Das Langzeitverhalten von Trinkwasser-Versorgungsrohren aus PVC-U, 1993

von Egon Barth, Leiter der Stoff- und Systemprüfung der Hüls Troisdorf AG, Troisdorf, in krv-Nachrichten 1/1993

Das Langzeitverhalten von Trinkwasser-Versorgungsrohren aus PVC-U

E. Barth, Troisdorf)*

Einleitung

In „3R international", 31. Jahrg. H. 5/92, wurde das Langzeitverhalten von PVC-U-Rohren beschrieben. Trotz der allgemeinen Auswertung des Alterungsverhaltens wurden die aus den unterschiedlichen Untersuchungen gewonnenen Schlußfolgerungen vorwiegend auf die Dauerhaftigkeit drucklos betriebener PVC-U-Kanalrohre bezogen. Wohl aus diesem Grunde tauchte die Frage nach einem ergänzenden Artikel auf, in dem weitere spezielle Gesichtspunkte für die Lebensdauer von Druckwasser-Versorgungsleitungen aus PVC-U eingearbeitet sein sollten.

Da die wesentlichen Ergebnisse zur Beurteilung der Lebensdauer von PVC-U-Rohren aus Zeitstand-Innendruckversuchen gewonnen wurden, sind in nachstehendem Folgeartikel die allgemeingültigen Aussagen zu Werkstoffverhalten und Zeitstand-Innendruckversuchen übernommen, aber durch einige Ergebnisse zu Restfestigkeitsuntersuchungen ergänzt.

Nicht nur aus ökonomischen, sondern auch aus ökologischen Erwägungen ist die Kenntnis der Lebensdauer von Kunststoffrohren für den sicheren Betrieb von Rohrleitungen zum Transport von Flüssigkeiten von Bedeutung. Während für Polyolefin-Rohre schon eine Reihe von Veröffentlichungen über die mögliche Einsatzdauer unter den üblichen Betriebsbedingungen vorliegen, sollen die Auswertungen der inzwischen über etwa 40 Jahre durchgeführten Zeitstand-Innendruckversuche und Untersuchungen zur Restlebensdauer zeigen, daß auch Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid eine deutlich über die von der Wasserwirtschaft geforderte Gebrauchstüchtigkeit hinausgehende Lebenserwartung aufweisen.

Werkstoffverhalten

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens und der Alterung von PVC begann bereits vor 50 Jahren. Schon wenige Jahre nachdem die Herstellung des PVC-U im industriellen Maßstab begonnen hatte (die Entdeckung gelang Henri Regnault bereits 1835), wurden von Buchmann Langzeitversuche an PVC aufgenommen, die schon 1940 veröffentlicht wurden [1]. Diese wurden, entsprechend den Festigkeitsuntersuchungen am herkömmlichen Konstruktionswerkstoff Stahl, zunächst an Zugproben durchgeführt, die aber bereits auch aus PVC-Rohren selbst entnommen wurden, welche damals noch im Strangpreßverfahren hergestellt wurden.

Bei diesen Versuchen wurde schnell erkannt, daß die Ermittlung der Dauerstandfestigkeit thermoplastischer Kunststoffe sich nicht einfach aus der Kenntnis der normalen Festigkeitswerte ableiten läßt. Vielmehr zeigte sich, daß bei weichmacherfreiem PVC-U – wie bei den anderen Thermoplasten – die Verformung nicht nur von der Belastung und der Temperatur, sondern auch von der Belastungszeit abhängig ist.

Stahl als klassischer Konstruktionswerkstoff ist bei normalen Temperaturen bis nahe an seine Bruchfestigkeit belastbar. Der Hookesche Bereich, in dem die Verformung mit der Belastung linear steigt und sich bei Entlastung vollständig zurückstellt, reicht bis dicht an seine Streck- oder Fließgrenze.

Zwar ist ein solcher Hookescher oder elastischer Bereich, in dem die Verformung eine lineare Funktion der Spannung und reversibel ist, auch bei Thermoplasten feststellbar. Der Bereich, in dem Thermoplaste elastisches Verhalten zeigen, ist jedoch sehr klein. Er endet weit vor Erreichen der Streckspannung bei Dehnungen, die je nach Werkstoff bei Bruchteilen, in jedem Fall unter 1 % liegen. Diesem nur sehr kleinen Bereich des elastischen Verhaltens schließt sich bei weiterer Belastung ein plastisches Verhalten an, in dem die Verformung mit der Zeit linear zunimmt, wobei die Verformungszunahme von der Viskosität abhängig ist. Leider sind diese Bereiche nicht streng getrennt, sondern überlagern sich in einer Übergangszone, in der außer der normalen belastungsabhängigen Verformung zusätzlich eine zeitabhängige Verformung auftritt, die sich aber ebenfalls – wenn auch verzögert – nach der Entlastung wieder zurückstellt, das heißt relaxiert.

Werkstoffe mit dem beschriebenen Verhalten bezeichnet man deshalb als viskoelastische Werkstoffe. Ihr Verhalten läßt sich nicht mehr wie bei elastischen Werkstoffen durch die Beziehung $\sigma = \varepsilon \cdot E =$ const. beschreiben, bei der die Verformung ε allein von der Größe der einwirkenden Spannung σ und dem Elastizitätsmodul E des Werkstoffes abhängt. Bei viskoelastischen Werkstoffen nimmt vielmehr die Verformung unter Belastung mit der Einwirkungszeit zu, sie „kriechen" im viskoelastischen Bereich, in dem die Rückstellung von der Viskosität η und der Relaxionszeit τ abhängig ist. Dieser Vorgang läßt sich stark vereinfacht noch durch das Maxwell-Modell beschreiben:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_0}{E_r}\,(1 - \exp\,[-\,E/\eta \cdot t])$$

in dem die Relaxionszeit τ durch den Quotienten E/η dargestellt ist.

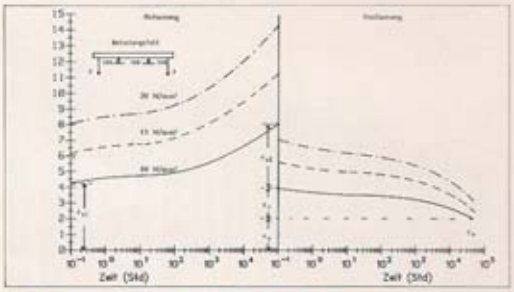

Bild 1: Verlauf der Verformung von PVC-U „Trovidur" bei unterschiedlich großer konstanter Biegespannung und der Rückstellung nach Entlastung

Erst bei weiterer Erhöhung der Belastung tritt die plastische oder viskose Verformung ein, die mit der Zeit zunimmt und nach der Belastung nicht mehr zurückgeht, also irreversibel ist. Die Verformung von Thermoplasten unter Belastung entsteht aus der Überlagerung der drei Komponenten: elastische Verformung ε_{el}, viskoelastische oder relaxierende Verformung ε_r und plastische oder viskose Verformung ε_v. Das dadurch bestimmte Verformungsverhalten dieser Werkstoffgruppe ist am Verlauf von sogenannten Kriechmodulkurven gut zu erkennen (Bild 1), läßt sich aber bis heute theoretisch nicht exakt beschreiben. Die theoretische Erfassung wird dadurch erschwert, daß die mathematisch entwickelten Kriechmodelle nur für den linearen Verformungsbereich gelten.

Vorgeschichte

Bei den Versuchen zur Bestimmung des mechanischen Verhaltens von Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen mit viskoelastischem Verhalten wurde sehr schnell erkannt, daß die Ermittlung von Festigkeitskennwerten im einfachen Zugversuch nicht für die Bestimmung ihres Langzeitverhaltens genügen. Die Erkenntnisse über das Verhalten von warmfesten Stählen, die bei hoher Temperatur über 500 °C ebenfalls viskoelastisches Verhalten zeigen, waren dabei hilfreich.

Von daher lagen erste Erfahrungen über den Einsatz belasteter Konstruktionswerkstoffe jenseits des rein elastischen Bereiches und über die dabei auftretenden Probleme vor. Dem Konstrukteur, der dafür die erforderliche Bemessung von Bauteilen bestimmen soll, reichen dann jedoch die Angaben von Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit, Reißfestigkeit oder Streckgrenze aus einfachen Kurzzeit-Zugversuchen nicht mehr aus. Er benötigt vielmehr Festigkeitskennwerte, deren Veränderung in Abhängigkeit von der Belastungszeit bekannt sind.

Wegen des Kriechens und Fließens viskoelastischer Werkstoffe unter mechanischer Spannung – was auch als „kalter Fluß" bezeichnet wird – nimmt deren Verformung mit der Zeit zu, es sei denn, die Belastung wird auf sehr niedrige, völlig unwirtschaftliche Werte begrenzt. Es ist also nicht möglich, mit einer „Dauerstandfestigkeit" zu rechnen, die die zulässige Spannung darstellt, welche von einer Konstruktion unendlich lange Zeit ohne weitere Zunahme der Verformung ertragen werden kann. Es galt vielmehr, dem Konstrukteur für den konstruktiven Einsatz von Thermoplasten deren „Zeitstandfestigkeit" für eine möglichst lange Belastungszeit anzugeben.

Kunststoffrohre zum Transport von Trinkwasser sind ein solcher Anwendungsfall. Sie unterliegen

*) Dipl.-Phys. Egon Barth, Kleiststraße 4, 5210 Troisdorf-Sieglar

Copyright liegt beim krv, Bonn

Tabelle 2

Eigenschaften von PVC-U-Rohren nach unterschiedlichen Einsatzzeiten von Versorgungsleitungen

Proben Nr.	1	2	3	4	4a	5	6	7	8	9	10	11
Rohrdimensionen in mm	16x1.6	22x1.6	75x4.9	110x7	-	160x7.7	110x8.2	225x10.8	125x9.6	90x4.3	110x5.3	225x10.8
Einsatzdauer in Jahren	23	23	22	27	-	-	25	12	28	11	29	8
Einsatzzeitraum	1937-1961	1937-1961	1949-1961	1939-1967	-	-1968	1959-1984	1973-1985	1962-1990	1969-1980	1962-1991	1984-1992
Einsatzort	Wohnhaus Mohr	Hamburg	DN-Rheinfelden	DN-Würgendorf	-	Hueck, Lindenscheid	IKV-Aachen Hausanschlußleitung	Wasserversorgung Unkel	Versorgungsleitung Fußbodenbetrieb DNAG	Versorgungsleitung Oleftal	Wasserversorgung St. Augustin	Wasserversorgung St. Augustin
Betriebsdruck in bar	4	4	0-1	0,5	-	1,5-4	-	-	4	-	6	7
Durchflußmedium	Wasser	Wasser	Salzsäure	Sauerwasser ph 4-5	-	Sulfo-Phtalsäure	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser
Betriebstemperatur in °C	ca. 16-18	ca. 16-18	-	ca. 20	-	25	ca. 14	ca. 14	18-20	ca. 14	ca. 14	ca. 14
Werkstoff	E-PVC	E-PVC	PVC-60	E-PVC	-	PVC 100	PVC 100	PVC 100	PVC 100	PVC 100	PVC 100	PVC 100
Bezeichnung	Mipolam	Mipolam	Trovidur	Trovidur	-	Trovidur	Dynadur	Dynadur	Dynadur	Dynadur	Dynadur	Wavin
Bemerkungen	-	-	deutlich Verwitterung Linsenbildung freiverlegt	Linsenbildung	Preßplatte aus Rohr 4	Rohr durch T > 120 °C + Unterdruck zusammengefaltet	-	-	22-519-62 frei verlegte Leitung	- erdverlegte Versorgungsleitung	21-398-62 erdverlegte Versorgungsleitung	028-60-484-92 erdverlegte Versorgungsleitung
Zugfestigkeit in N/mm²	535	475	490	405	575	550	558	-	-	-	-	-
Reißdehnung in %	45	14	3	3	40	60	36	-	-	-	-	-
Schlagzähigkeit in kJ/m²												
+ 23 °C	10 ng	10 ng	4 ng 1 gebr	7.4	5 ng	5 ng	9 ng 1 gebr	8 ng	9 ng 1 gebr	10 ng	10 ng	10 ng
+ 0 °C	10 ng	10 ng	-	-	-	5 ng	-	8 ng	-	-	-	-
Kerbschlagzähigkeit in kJ/m²	-	-	4.7	3.2	3.9	-	4.3	-	-	-	-	-
Wasseraufnahme in %	3.4	3.5	6.1	-	-	-	0.18	0.12	0.35	-	0.38	0.20
Vicat Erweichungstemperatur VST B 50 in °C	83	82	79	75	76	-	-	80	80	-	78	-
Innendruckversuche												
Standzeit in h bei σ(N/mm²) / T(°C)												
42/20	-	-	-	-	-	> 1,2	24,5 Rohrbogen	-	-	-	-	-
39/20	2	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30/20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15/60	-	-	-	-	-	-	375	-	2350/2627/1585	-	15	-
14/60	3.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11/60	-	-	-	-	-	3810	-	-	> 8300 (3x)	-	769	> 6216
10/60	203	-	-	-	-	> 3792	5630	15216	-	39070	> 7656 (3x)	> 6168 (3x)
8,75/60	323	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8,55/60	648	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

einem praktisch dauernd wirkenden, leicht schwankenden Innendruck, der noch von Druckstößen unterschiedlicher Größe überlagert wird. Außerdem entstehen von außen wirkende Belastungen infolge von Erdüberdeckung, Verkehrslasten und – wenn auch geringen – Temperaturschwankungen.

Für eine wirtschaftliche Nutzung solcher Rohrleitungen wird eine Betriebssicherheit von mindestens 50 Jahren verlangt [2 bis 4]. Wie häufig in der Technik wurden auch Rohre aus PVC-U zunächst ohne umfassende Untersuchung des mechanischen Verhaltens empirisch eingesetzt. Zuerst wohl im Bereich der Chemischen Industrie wegen ihrer hohen Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Chemikalien [5]. In diesem Einsatzgebiet waren extrem lange Einsatzzeiten noch nicht gefordert, und bei der Dimensionierung wurden hohe Sicherheitsbeiwerte zugrunde gelegt. PVC-U-Rohre gelangten aber auch schon ab 1936 als Trinkwasserrohre zum Einsatz. Immerhin erschien bereits 1941 die erste DIN-Norm, in der Eigenschaften, Durchmesser und Wanddicken von PVC-Rohren festgelegt wurden [6].

Systematische Untersuchungen mit dem Ziel, das Langzeitverhalten von PVC-U-Rohren und den etwa zehn Jahre später entwickelten Polyethylen-Rohren zu ermitteln, begannen aber erst später, nachdem PVC-U-Rohre schon etwa zehn Jahre lang in verschiedenen Anwendungsgebieten im praktischen Einsatz waren.

Die wissenschaftlichen Untersuchungen des Langzeitverhaltens wurden dann aber mit großer Intensität aufgenommen, indem die Prüflabors der deutschen Kunststoffhersteller und einiger Rohrextrudeure unter dem Dach des Fachnormenausschusses Kunststoffe im DIN und dem ISO/TC 5/SC 6 „Kunststoff-Rohre" gemeinschaftliche Versuche durchführten.

Untersuchungen an Kunststoffrohren

Diese Versuche zur Ermittlung der Zeitstandfestigkeit wurden aus mehreren Gründen nicht mehr an Zugproben aus der Rohrwand, sondern an Probekörpern aus ganzen Rohrabschnitten vorgenommen. Einmal war damit die Untersuchung an realen Rohren unter Einschluß der von den Extrusionsbedingungen abhängigen Eigenschaften des fertigen Rohres sowie weitgehend dem praktischen Einsatz entsprechenden Bedingungen möglich. Zum anderen konnte so das Langzeitverhalten direkt unter mehrachsiger Beanspruchung ermittelt werden. An der Außenoberfläche der Rohrwand eines unter Innendruck stehenden Rohres herrscht ein zweiachsiger Spannungszustand, bei dem die Tangentialspannung und die Axialspannung zusammenwirken. An der Innenoberfläche wirkt als weitere Komponente noch die Radialspannung. Da diese Spannungen unterschiedlich groß sind, entstehen zusätzlich Schubspannungen, die durch Temperaturunterschiede noch verstärkt werden können. Somit bieten die Untersuchungen an ganzen Rohrabschnitten gegenüber den einachsigen Zugversuchen den Vorteil, daß das theoretisch noch nicht gelöste Verformungsverhalten bei mehrachsigem Spannungszustand in das Ergebnis eingeht.

Um dies zu ermöglichen, wurden die als Prüfkörper benutzten Rohrabschnitte an beiden Enden mit getrennten Prüfköpfen so verschlossen, daß alle Hauptspannungen (abgesehen von den Behinderungen im Einspannungsbereich) in der Rohrwand zur Wirkung kommen (Bild 2). So war es möglich, die realen Belastungen, denen die Rohre in der Rohrleitung während des praktischen Betriebes ausgesetzt sind, weitgehend durch die Laboruntersuchung zu simulieren. Die vereinbarten Prüfbedingungen für den statischen Innendruckversuch mit konstanten Prüftemperaturen t in Stufen von 20 °C und konstanter Prüfspannung σ – bezogen auf die Rohrdimensionen bei Beginn der Prüfung – umfassen trotzdem nicht alle in der Praxis auftretenden Belastungen mit ihren Druck- und Temperaturschwankungen, Druckstößen, Erdlasten usw. Sie ermöglichen es aber, die Zeitstandfestigkeit und natürlich auch die Dehngrenze als Funktion der Zeit für die geforderten Bedingungen zu ermitteln.

Nachdem die ISO die Außendurchmesser der Rohre und die Nenndrücke für den Dauerbetrieb der Rohrleitungen festgelegt hatte [7], einigte man sich, die Wanddicke der Rohre nach der Naday-Formel zu berechnen:

$$s = \frac{p \cdot (d_a - s)}{2\,\sigma} = \frac{p \cdot d_m}{2\,\sigma}$$

s – Wanddicke
p – Nenndruck
d_a – Außendurchmesser
d_m – mittlerer Durchmesser
σ – zulässige Spannung bei 20 °C

Für die Prüfung der Rohre kann man aus dieser vereinfachten Kesselformel die Prüfspannung bestimmen mit

$$\sigma = \frac{p \cdot d_m}{2\,s}.$$

Als Einstieg in Zeitstand-Innendruck-Versuche hat sich die Ermittlung des Berstdruckes der zu untersuchenden Rohre bei der jeweiligen Prüftemperatur bewährt. Dabei wird nach Angleichung der Rohrwandtemperatur an die Prüftemperatur der Innendruck kontinuierlich und stoßfrei vom Atmosphärendruck erhöht, bis die Rohrprobe bricht. Aus dem erreichten Berstdruck läßt sich dann die Bruchspannung nach der oben genannten Kesselformel berechnen, allerdings bezogen auf die Rohrdimensionen zu Beginn des Versuches. Wegen der starken Umfangsdehnung bei diesem Kurzzeitversuch ist die tatsächliche Wandspannung beim Bruch natürlich höher. Ausgehend von diesem Berstversuch führen weitere Versuche mit Prüfspannungen, die etwa zwischen 90 und 50 % der Berstspannnung liegen, zu gut auswertbaren Zeitstandversuchen mit Standzeiten bis über 10 000 Stunden. Es hat sich bewährt, die Prüftemperaturen an der Vicat-Erweichungstemperatur (bei amorphen Thermoplasten) bzw. der Kristallit-Schmelztemperatur (bei teilkristallinen Thermoplasten) auszurichten. Prüfungen werden in der Regel beginnend bei 20 °C in Stufen von 20 K steigend bis zu Maximaltemperaturen, die 20 K unter den genannten Temperaturgrenzen liegen, durchgeführt.

Unter den genannten Gesichtspunkten wurden zu Beginn der 50er Jahre systematische Zeitstand-Innendruckversuche mit Rohren aus PVC-U und Polyethylen aufgenommen. Dank des Zusammenwirkens mehrerer Rohrstoff- und Rohrhersteller[1]) konnten bereits in den Jahren zwischen 1955 und 1959 die grundlegenden Ergebnisse über das Zeitstandverhalten von Rohren aus diesen Werkstoffen vorgelegt werden [8 bis 15].

Diese ersten systematischen Zeitstandversuche erlaubten bereits recht gute Aussagen über das Langzeitverhalten der beiden Rohrwerkstoffe. Die Auswertung der Versuche erfolgte damals im wesentlichen graphisch. Dazu wurden die bis zum Bruch erreichten Standzeiten in doppellogarithmische Diagramme aus Prüfspannung σ und Standzeit t eingezeichnet. Als Bruchgrenzen wurden die Mindestbruchkurven durch die niedrigsten Bruchpunkte bei der jeweiligen Prüftemperatur gezogen. Dabei ergaben sich für PE-HD und PE-LD-Rohre bilineare Zeitstandskennlinien mit einem flachen und einem steilen Ast. Die ersten PVC-Rohre, noch aus Emulsions-PVC hergestellt, lieferten breite Streubereiche, deren Mindestbruchkurven ebenfalls einen gekrümmten Verlauf zeigten, wenn auch kein so ausgeprägter Knick zwischen flachem und steilem Kurvenast gefunden wurde wie bei den PE-Rohren.

Bei aller Unsicherheit hinsichtlich der Extrapolation ließen es die gewonnenen Ergebnisse zu, die ursprünglich von Buchmann genannte zulässige Beanspruchung bei 20 °C von 4,5 N/mm² auf 6,0 N/mm² anzuheben. Der Rohrtyp PVC 60 konnte eingeführt werden.

Während die Entwicklung neuer und besserer Werkstofftypen für PE-Rohre in den folgenden 30 Jahren durch eine große Zahl von Veröffentlichungen dokumentiert wurde, sind neuere Ergebnisse über PVC-U-Rohre nur vereinzelt mitgeteilt worden [16, 17, 18].

Wie bei den Polyolefinen wurden auch beim PVC-U Verbesserungen in den Werkstoffeigenschaften erzielt. Durch den Einsatz von Suspensionspolymerisaten gelang es, die Wasseraufnahme herabzusetzen, die bei den Rohren aus Emulsionspolymerisaten infolge der damit verbundenen Quellung als Ursache für das Absinken der Zeitstandfestigkeit und die Krümmung der ersten Zeitstandkurven für PVC-Rohre angesehen wird. Eine weitere Verbesserung der Zeitstandfestigkeit gelang durch Erhöhung des Molekulargewichtes, des sogenannten K-Wertes, von 55 auf 70 [16].

Bild 2: Rohrproben mit Einspannung im Zeitstand-Innendruck-Versuch bei 20 °C (l_k/A_k)

Mit der Zahl der Prüfkörper steigt natürlich die Sicherheit des Ergebnisses. Um ein statistisch gesichertes Ergebnis zu erreichen, ist für jede Prüfbedingung eine Mindestanzahl von fünf Proben erforderlich. Bei jeder Temperatur werden die Rohrabschnitte innen mit Wasser gefüllt. Je nach Temperatur und Prüfanlage werden die Rohrproben von außen in Luft oder in Wasserbädern auf der jeweiligen Prüftemperatur gehalten.

Rohre aus solchen PVC-U-Typen, mit ebenfalls ständig verbesserten Extrusionstechniken hergestellt, führten 1960 zur Normung des PVC 100, für das mit ausreichender Sicherheit (f_v = 2,5) eine Dauerbeanspruchung von 10 N/mm² bei 20 °C über eine Einsatzzeit von mindestens 50 Jahren als zulässig festgelegt werden konnte [19].

[1]) BASF, Chemische Werke Hüls, Dynamit Nobel AG, Farbwerke Hoechst, Mannesmann, Rhein-Plastik-Rohr

Bild 3: PVC-U-Rohrextrusion

Die Extrusionstechnik wurde laufend optimiert und hat heute einen Stand erreicht (Bild 3), der die wirtschaftliche Herstellung von PVC-U-Rohren in einer weitgehend automatisierten Fertigung erlaubt (Bild 4). Durch eine engmaschige Gütesicherung, die aus einer umfassenden Eigenkontrolle, welche vom Rohstoff bis zum Zeitstand-Innendruckversuch reicht und einer ständigen Fremdüberwachung durch neutrale Prüfinstitute unterliegt, ist eine gleichbleibende Qualität der Rohre über den gesamten Dimensionsbereich von 12 mm bis 450 mm Außendurchmesser (Bild 5 u. 6) gewährleistet.

Bild 4: Extruder mit Schaltschrank und Rohrkopf

Bild 5: Anzeigegerät der automatischen Wanddickenregelung

Extrapolation von Zeitstanduntersuchungen

Obwohl die 1955 begonnenen systematischen Zeitstand-Innendruckversuche bei einigen Prüfstellen bis heute weitergeführt werden und auch die inzwischen an Rohren aus verbesserten PVC-U-Typen begonnenen Untersuchungen noch laufen, sind die 1960 in DIN 8061 extrapolierten Standzeiten bis zu 50 Jahren bei 20 °C noch nicht ganz erreicht. Auch bei der heute gültigen Anforderung an das Zeitstandverhalten von Rohren aus PVC-U nach DIN 8061 (PVC 100) sind die Zeitstandkennlinien noch über etwa zehn Jahre extrapoliert (Bild 7).

Bedenkt man, daß die ersten Extrapolationen nach nur vier bis fünf Jahren Prüfzeit vorgenommen wurden, kann man sagen, daß sich das graphische Verfahren durchaus bewährt hat. Wenn auch die Darstellung der Mindestbruchkurven im doppellogarithmischen Maßstab die Extrapolation erleichtert, ist es doch eindrucksvoll, jetzt, nach nahezu 40 Jahren Versuchszeit mit vielen

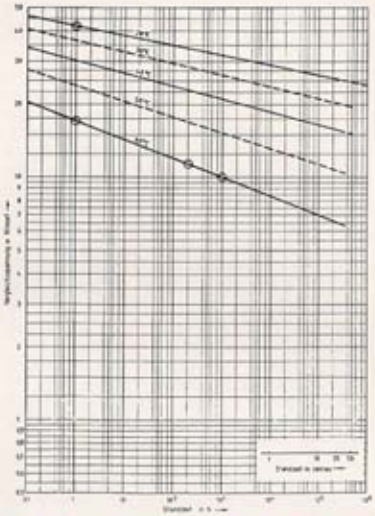

Bild 7: Zeitstanddiagramm für Rohre aus PVC-U nach DIN 8061

tausend Zeitstandproben festzustellen, daß das vor 35 Jahren prognostizierte Zeitstandverhalten der PVC-U-Rohre dem vorhergesagten Verlauf bisher immer entsprochen hat (Bild 8). Hilfreich für die Extrapolation war die Erkenntnis, daß durch thermische Energie ausgelöste Prozesse dem von Arrhenius [20] gefundenen Gesetz gehorchen, wonach die Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen eine Funktion der Aktivierungsenergie ist und deshalb mit zunehmender Temperatur ansteigt:

$$k \sim \exp\,(A/kT) \quad \text{oder} \quad \ln\, k_0 = -A/T + H$$
$$\text{oder } 1/T = a + b \cdot \ln t$$

T – absolute Temperatur in K
A, H – Konstanten
a – $R/A \ln k_0$
b – R/A
R – Gaskonstante
A – Aktivierungsenergie
k_0 – Reaktionsgeschwindigkeitskonstante für 100 % Ausbeute
t – Reaktionszeit = τ

Nachdem Larson und Miller [21] bei der Untersuchung des Zeitstandverhaltens von warmfesten Stählen festgestellt hatten, daß deren Rißgeschwindigkeiten der gleichen Beziehung folgen, ermittelte Gloor [22] schon sehr früh, daß die Larson-Miller-Gleichung auch geeignet ist, das Zeitstandverhalten von PE in Abhängigkeit von der Temperatur zu beschreiben. Später zeigte sich, daß auch die molekularen Bewegungs- und Um-

Bild 8: PVC-U-Rohre 32 × 2,4 mm seit 1958 mit einem Innendruck von 30 bar (σ = 17,9 N/mm²) bei 20 °C bis heute in Prüfung

lagerungsvorgänge im PVC dem Arrhenius-Gesetz folgen [23].

Die durchgeführten Zeitstand-Innendruckversuche an Rohren aus PE und PVC-U hatten schon gezeigt, daß bei gleicher Prüfspannung die erreichten Standzeiten mit steigender Prüftemperatur kürzer waren. Mit der Anwendung der Arrhenius-Beziehung war nun die Möglichkeit gegeben, durch Versuche mit höheren Temperaturen nach vergleichsweise kurzer Versuchszeit die Extrapolation bei 20 °C für lange, noch nicht erreichte Standzeiten zu überprüfen. Für PE-Rohre bot die Lage der Transitionspunkte, der sogenannten „Knies", in den bilinearen Zeitstandkurven bei Temperaturen zwischen 50 und 80 °C über die Arrhenius-Geraden eine gute Möglichkeit zur Bestimmung der Lage des Knickpunktes bei 20 °C und damit zur Überprüfung der Extrapolation der 20-°C-Kurve [24].

Die Anwendung der Arrhenius-Beziehung auf die Zeitstandkennlinien der PVC-U-Rohre ist nicht so naheliegend. Einmal zeigt sich bei den Zeitstanduntersuchungen der heute üblichen Rohrqualitäten auch nach Prüfzeiten bis zu mehr als 10^3 Stunden bei 60 °C noch kein Abknicken der Zeitstandkennlinie, und wegen ihrer geringen Neigung erfordern Untersuchungen mit gleichen Prüfspannungen zur Erstellung von Arrhenius-Geraden im relevanten Bereich von 10 bis 20 N/mm² schon mehrere Jahre. Entnimmt man den in Bild 7 wiedergegebenen Mindestbruchkurven aus DIN 8061 die Standzeiten für die Vergleichsspannung σ = 20 N/mm² und überträgt sie in ein Arrhenius-Diagramm, erhält man die in Bild 9 gezeigte Gerade, deren Extrapolation auf 20 °C eine Standzeit von etwa 10^8 Stunden erwarten läßt. Das bedeutet, daß für PVC-U-Rohre, die mit einer Umfangsspannung von 20 N/mm² belastet sind, bei 20 °C eine Zeitstandfestigkeit von rund 11 000 Jahren zu erwarten ist. Eine so hoch prognostizierte Lebensdauer liegt natürlich um Größenordnungen außerhalb der üblichen menschlichen Zukunftserwartungen und sollte deshalb außerhalb der hier angestellten Betrachtung bleiben. Trotz oder wegen dieser weit jenseits anschaulicher Annahmen liegenden Lebensdauererwartungen ist eine Kontrolle der wie beschrieben ermittelten Zeitstandfestigkeit nach anderen Überlegungen erforderlich.

So wurde – mit dem Ziel einer beschleunigten und gesicherten Auswertung von Zeitstandver-

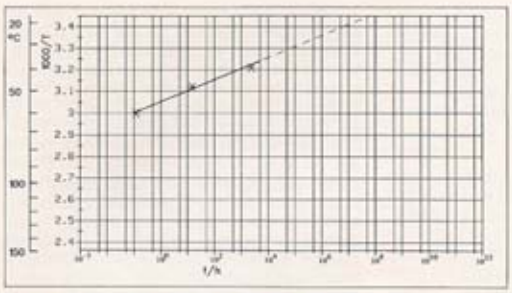

Bild 9: Arrhenius-Darstellung der aus dem Zeitstanddiagramm für PVC-U-Rohre (Bild 7) entnommenen Standzeiten bei einer Prüfspannung von 20 N/mm² und Prüftemperaturen von 60, 50 und 40 °C

suchen – nach mathematischen Methoden zur Erstellung von Zeitstanddiagrammen gesucht [25, 26, 27], die es erlauben, sowohl lineare als auch bilineare Zeitstandkennlinien zu konstruieren. Die dabei entwickelten Methoden wurden durch Überprüfung mit Meßwerten aus Versuchen mit unterschiedlichen Rohrwerkstoffen als brauchbar bestätigt. So konnte sie in die internationale und nationale Normungsarbeit einfließen, wobei die Regeln für die zulässigen Extrapolationen festgelegt wurden. Die im ISO/TC 138 erarbeitete Standard-Extrapolationsmethode (SEM) [28] erlaubte es, die zulässige Umfangsspannung sowohl für eine Lebensdauer von 50 Jahren bei 20 °C als auch für andere Standzeiten und andere Temperaturen zu ermitteln. Dabei beschränkt sich die Aussage der SEM auf den Einsatz von Wasser als Prüfmedium. Benutzt man diese SEM, die auch Eingang in die DIN 16887 [29] gefunden hat, für die Extrapolation der Zeitstandkurven von PVC-U-Rohren, kann die Extrapolationszeit t_e aus folgenden Größen berechnet werden:

$$t_e = t_{max} \cdot k_e.$$

Darin ist t_{max} der geometrische Mittelwert der größten gemessenen Bruchzeiten und k_e der Extrapolationszeitfaktor, der abhängig ist von der Differenz ΔT der höchsten Prüftemperatur t_{max} und der Temperatur t_e, bei der eine Extrapolation der erreichten Bruchzeiten vorgenommen werden soll.

$$\Delta T = t_{max} - t_e.$$

Selbst wenn man auf die letzte Auswertung der den Zeitstandkurven in DIN 8061 zugrundeliegenden Versuche von 1970 zurückgreift und die damals bei 60 °C erreichten Standzeiten zwischen 1 bis $2 \cdot 10^5$ h in die Rechnung einsetzt, ergibt sich mit dem nach der SEM zulässigen Extrapolationszeitfaktor für $\Delta T = 60\,°C - 20\,°C = 40$ K von $k_e = 50$ eine erlaubte Extrapolationszeit von $t_e = 10^5\,h \cdot 50 = 5 \cdot 10^6$ h oder 570 Jahren. Auch dies ist noch eine extrem lange Zeitstandfestigkeit die auch noch eine Sicherheit durch die Benutzung von Mindestbruchkurven enthält.

Thermische Alterung von PVC-U

Um die Arrhenius-Beziehung besser für die Bestimmung des Zeitstandverhaltens von PVC-U-Rohren nutzen zu können, ist es zweckmäßig, Prüfungen auch bei Temperaturen über 60 °C vorzunehmen. Obwohl der Glasübergang – auch Erweichungs- oder Einfrierbereich – zwischen dem energieelastischen und dem entropie-elastischen Verhalten des PVC-U bei etwa 80 °C liegt, wurden auch Zeitstand-Innendruckversuche an PVC-U-Rohren bei 80 °C durchgeführt. Die dabei ermittelte Mindestbruchkurve ist in Bild 10 zu den Zeitstandkurven nach DIN 8061 eingetragen. Um eine Auswertung für die Prüfspannung von 10 N/mm² nach Arrhenius zu ermöglichen, sind darin die zwischen 0,1 und etwa $4 \cdot 10^5$ h belegten Zeitstandkurven sowohl nach kürzeren Zeiten bis 10^{-3} h als auch nach längeren Zeiten extrapoliert. So kann man aus diesem Diagramm die Bruchzeiten für $\sigma = 10$ N/mm² bei 80 °C ($4 \cdot 10^{-4}$ h), 60 °C (10^3 h) und 50 °C ($2 \cdot 10^6$ h) entnehmen. In ein Arrhenius-Diagramm übertragen (Bild 11), zeigt sich, daß diese drei Werte – wie gefordert – auf einer Geraden liegen, welche die 40-°C-Linie erst bei 10^{10} h und die 20-°C-Linie erst jenseits von 10^{12} h schneidet.

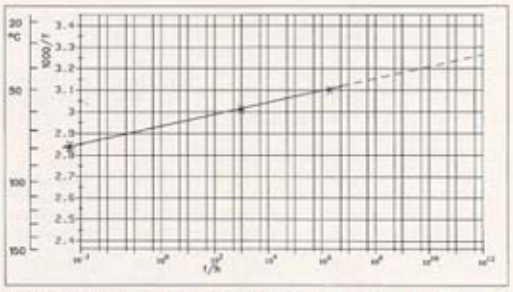

Bild 11: Arrhenius-Darstellung der aus dem Zeitstanddiagramm für PVC-U-Rohre (Bild 10) entnommenen Standzeiten für eine Prüfspannung von 20 N/mm² und Prüftemperaturen von 80, 60 und 50 °C

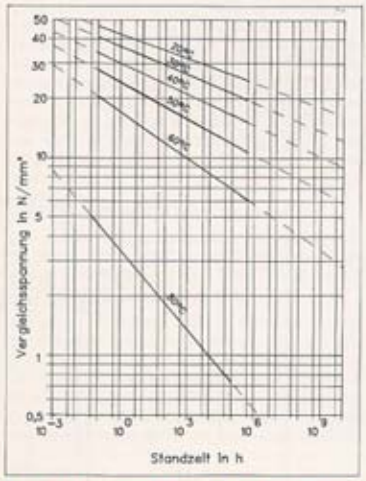

Bild 10: Zeitstandverhalten von PVC-U-Rohren zwischen 20 und 80 °C

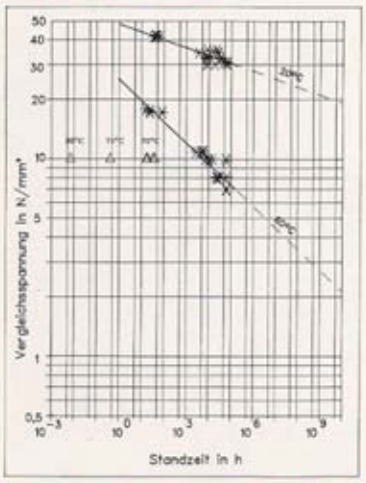

Bild 12: Zeitstandverhalten von Trovidur-Rohren 32 × 2,4 mm aus PVC-U

Das sind allerdings schon kosmische Zeiten, die sich dem menschlichen Vorstellungsvermögen fast entziehen. Auch wenn sich, weiterer linearer Verlauf vorausgesetzt, für den Schnittpunkt der 20-°C-Zeitstandkennlinie mit den z. Zt. für Versorgungsleitungen aus PVC-U zulässigen Betriebsdrücken (die einer Vergleichsspannung von 10 N/mm² entsprechen), ebenfalls eine Zeit in dieser Größenordnung ergibt, sind solche Extrapolationszeiten natürlich für realistische Lebensdauerbetrachtungen nicht zu gebrauchen.

Zur Überprüfung der Arrhenius-Beziehung wurden in jüngster Zeit auch Trovidur-PVC-U-Rohre 32 × 2,4 mm aus PVC 100 herangezogen, die zur Ermittlung von f_{CR}-Faktoren für die Bestimmung der Widerstandsfähigkeit gegen Chemikalieneinwirkung auch mit Wasser geprüft werden. An diesen Rohren, die bei der Prüfung mit Wasser bei 20 und 60 °C inzwischen Standzeiten über 65 000 Stunden erreicht haben, wurden jeweils fünf Proben mit einer Prüfspannung von 10 N/mm² in Wasser bei 80, 75, 70 und 65 °C geprüft (Bild 12). Überträgt man die in Tabelle 1 zusammengestellten Werte in ein Arrhenius-Diagramm (Bild 13), ergibt sich eine sogar noch etwas flacher verlaufende Gerade als in Bild 11.

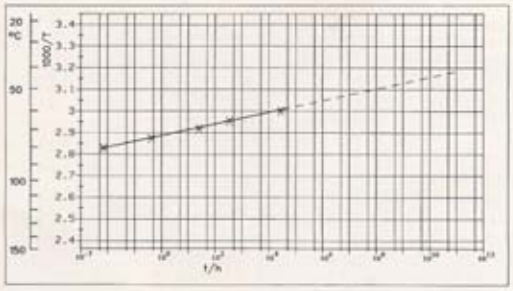

Bild 13: Arrhenius-Diagramm der mit $\sigma = 10$ N/mm² an den Trovidur-Rohren 32 × 2,4 mm aus Abb. 12 ermittelten Standzeiten bei 80, 75, 70 und 65 °C

Prüftemperatur °C	Prüfspannung N/mm²	Prüfdruck bar	Standzeit h	Bruchform
80	10,0	17,3	20...30 s	Dehnbruch
	10,0	17,3	20...30 s	Dehnbruch
	10,0	17,3	20...30 s	Dehnbruch
	9,8	17,3	20...30 s	Dehnbruch
	10,0	17,3	20...30 s	Dehnbruch
75	9,9	17,3	0,39	Dehnbruch
	10,0	17,3	0,46	Dehnbruch
	9,9	17,3	0,44	Dehnbruch
	10,0	17,3	0,34	Dehnbruch
	10,0	17,3	0,42	Dehnbruch
70	10,0	17,3	18,35	Dehnbruch
	10,0	17,3	16,57	Dehnbruch
	10,0	17,3	17,98	Dehnbruch
	10,0	17,3	32,47	Dehnbruch
	10,0	17,3	39,20	Dehnbruch
65	10,1	17,3	> 4770	
	10,1	17,3	> 4770	
	10,1	17,3	> 4770	
	10,1	17,3	> 4770	
	10,2	17,3	> 4770	
60	10,0	17,0	15 300	Sprödbruch
	10,0	17,0	10 601	Sprödbruch
	9,8	17,0	> 63 876	Sprödbruch
	10,1	17,0	7 860	Sprödbruch
	10,0	17,0	58 020	Sprödbruch
	9,8	17,0	10 600	Sprödbruch

Handelsname des Rohrmaterials: Trovidur

Tabelle 1: Zeitstandverhalten von Trovidur-Rohren 32 × 2,4 mm aus Abb. 12 bei Temperaturen zwischen 60 und 80 °C

Mit der Dehydrochlorierung- oder Stabilitätszeit steht ein gutes Kriterium für die thermische Alterung von PVC zur Verfügung [30]. Um einen Hinweis auf die thermische Alterung des PVC-U zu bekommen, wurde an einem der o. g. im Zeitstand-Innendruckversuch geprüften Trovidur-Rohre 32 × 2,4 mm die Dehydrochlorierung geprüft. Dabei wurden an Rohren im Anlieferungszustand Stabilitätszeiten von 44 min gemessen. Die Stabilitätszeit der im Zeitstand-Innendruckversuch geprüften Rohrprobe erreichte nach einer Standzeit von 58 020 h bei 60 °C = 39,5 min (Bild 14).

Die geringe Abnahme der Stabilitätszeit beim Zeitstand-Innendruckversuch zeigt, daß durch die thermische Alterung die aus den Zeitstandversuchen resultierenden Extrapolationen nicht negativ beeinflußt werden.

Die Restlebensdauer von PVC-U-Rohren
(nach praktischem Einsatz)

Die Ermittlung der Restlebensdauer ist für die Beurteilung aller belasteten Konstruktionen von Bedeutung. Entsprechende Untersuchungen sind auch zur Bestimmung dieses Beurteilungskriteriums an Thermoplasten vorgenommen worden. Leider sind bis heute kaum Ergebnisse bekannt, die Hinweise auf die Ermittlung entsprechender Kennwerte geben [31].

Auch hier kann nicht über systematische Versuche in dieser Richtung berichtet werden. Nachstehend werden aber Ergebnisse von Einzeluntersuchungen angegeben und beurteilt, ob sie geeignet sind, die Aussagen zum Langzeitverhalten von innendruckbelasteten PVC-U-Rohren zu unterstützen.

Nach Zeitstand-Innendruckversuchen über einen Zeitraum von 40 Jahren ist es im nachhinein erstaunlich, daß nicht gleichzeitig systematische Untersuchungen zur Bestimmung der Restlebensdauer durchgeführt wurden. Dabei wären solche Versuche im Rahmen der langfristigen und umfangreichen Prüfprogramme sicher möglich gewesen. So hätten Rohrproben, die bei 20 und 40 °C mit unterschiedlichen Prüfspannungen eingesetzt waren, nach unterschiedlichen Standzeiten vor deren Bruch entnommen werden können, um die Proben dann bei höherer Temperatur, z. B. 60 °C, erneut unter Druck zu setzen. Auf diese Weise hätte man im Laufe der Zeit feststellen können, ob bei den höheren Prüftemperaturen die noch erreichten Standzeiten eine Beziehung zur Höhe und Dauer der Vorbelastung bei den niedrigeren Prüftemperaturen aufweisen. Natürlich gibt es genügend Gründe zur Erklärung dieses Versäumnisses, wie Kapazität der Prüfeinrichtungen, Prüfumfang, Kosten und vor allem wohl das vorrangige Ziel, Bruchzeiten zu erreichen, um das Zeitstandverhalten überhaupt erst einmal zu ermitteln. Aber vielleicht gibt dieser Hinweis den Anstoß, ein solches Prüfprogramm nachzuholen, das beim Rückgriff auf die Vielzahl laufender Zeitstand-Innendruckprüfungen bei allen Rohrherstellern und Prüfstellen zumindest zeitlich relativ schnell zu Ergebnissen führen könnte.

Wenn auch bisher solche systematischen Untersuchungen fehlen, sind doch zumindest Einzelprüfungen dieser Art durchgeführt worden. Diese basieren auf der Untersuchung von Rohren und Rohrleitungsteilen, die im praktischen Einsatz waren, aus unterschiedlichen Gründen aus den Rohrleitungen entnommen wurden und anschließend geprüft werden konnten.

Natürlich sind aus Versorgungsleitungen keine regelmäßigen und gezielten Probeentnahmen möglich, vielmehr erfolgen diese nur zufällig bei Änderungen der Leitungsführung, Änderungen

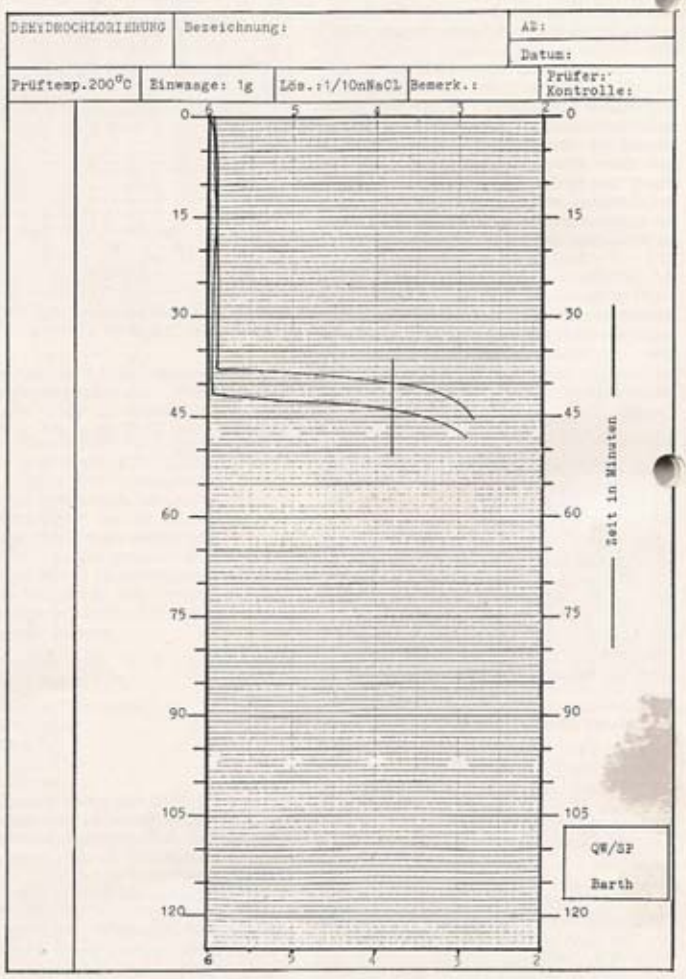

Bild 14: Verlauf der Dehydrochlorierungszeiten von Trovidur-PVC-U-Rohren 32 × 2,4 mm aus Abb. 12

a) im Anlieferungszustand
b) nach 58 020 Stunden Standzeit unter σ = 10 N/mm² bei 60 °C in Wasser

des Querschnitts, Reparaturen usw. Dementsprechend ist auch die Größe und der Zustand der Proben, die schließlich zur Prüfung zur Verfügung stehen, sehr unterschiedlich.

Entsprechend sind die Prüfmöglichkeiten meist begrenzt und der Idealzustand, nach der die Probenmenge für Zeitstand-Innendruckversuche ausreicht, eher selten.

Zwar können auch Veränderungen anderer Eigenschaften Hinweise auf den Werkstoffzustand geben, doch ist deren Interpretation im Hinblick auf die Restlebensdauer sehr viel problematischer als die Bewertung von Zeitstand-Innendruckprüfungen.

Aus den vorliegenden Untersuchungen praktisch eingesetzter PVC-U-Rohre sind einige Untersuchungsergebnisse in Tabelle 2 (siehe Einlegeblatt) zusammengestellt.

Aus diesen sicher sporadischen und zufälligen Untersuchungsergebnissen an PVC-U-Rohren, deren Herstellung zwischen 1937 und 1965 liegt, lassen sich doch erste interessante Schlußfolgerungen ziehen.

Bei Alterungsvorgängen an PVC-U lassen diese sich in der Regel am schnellsten und besten an der Veränderung der Schlag- bzw. Kerbschlagzähigkeit und der Reißdehnung erkennen, noch bevor ein Abfall der Festigkeit eintritt. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden deshalb neben dem Zugversuch, dessen Schwergewicht auf der Ermittlung der Reißdehnung lag, noch Schlag- und Kerbschlagbiegeversuche vorgenommen. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte, um zu erkennen, ob die Rohre aus Emulsions- oder Suspensions-PVC hergestellt sind.

Soweit die verfügbare Rohrmenge es zuließ, wurden natürlich Zeitstand-Innendruckversuche durchgeführt, welchen die beste Aussagekraft über den Zustand der Rohrproben beizumessen ist.

Zunächst ist aus der Wasseraufnahme nach 24 h Lagerung in kochendem Wasser zu erkennen, daß die Rohre 1 bis 4 aus Emulsions-PVC hergestellt sind, was auch aus ihrem Herstellungs-Jahr zu schließen war. Diese aus E-PVC hergestellten Rohre neigen infolge der recht hohen Wasseraufnahme häufig zu einer sogenannten „Linsenbildung" im Rohrwandquerschnitt. An solchen Stellen führt die Einlagerung von Wasser zu lokalen Rißbildungen. Solche „Linsenbildungen" waren beim Rohr 4 deutlich sichtbar und beim Rohr 3 bei der mikroskopischen Untersuchung zu erkennen. Aus diesem Grunde zeigen die Rohre 3 und 4 als einzige der untersuchten 11 Rohre eine erkennbare Abnahme der Reißdehnung und der Schlagzähigkeit. Daß diese jedoch nicht auf eine Versprödung der Rohre infolge Alterung zurückzuführen sind, ergibt sich aus der weiteren Untersuchung des stark mit „Linsen" durchsetzten Rohres 4. Nach der mechanischen Prüfung wurden nämlich die Probenreste dieses Rohres granuliert, gewalzt und zu einer 4 mm dicken Preßplatte umgeformt. Wie unter Probe 4a aufgeführt, erreichen diese wieder einwandfreie Werte für die Reißdehnung und die Schlagzähigkeit. Dadurch wird bestätigt, daß noch kein relevanter Abbau des E-PVC eingetreten ist.

Die Zeitstand-Innendruckversuche bestätigen an allen so geprüften Rohren, daß auch nach unterschiedlichen Einsatzbedingungen die für den Anlieferungszustand geltenden Anforderungen der DIN 8061 noch sicher erfüllt werden. Wenn auch ein direkter Vergleich zwischen Anlieferung und nach dem Einsatz nicht möglich ist – man kann den gleichen Rohrabschnitt nur einmal prüfen – liegen selbst nach 28jährigem Einsatz die ermittelten Standzeiten noch deutlich über den Zeitstandkennlinien der DIN 8061. Das gilt sogar für das Rohr 6, das infolge einer Temperaturerhöhung auf 120 °C und dabei einwirkenden Unterdruck vollständig zusammengefaltet war. Die Deformation dieses Rohres wurde vor der Prüfung durch Warmlagerung bei 135 °C wieder zurückgestellt. Trotz dieser doppelten Verformung erreichte auch dieses Rohr im anschließenden Zeitstand-Innendruckversuch noch eine um den Faktor 3,8 bis 19 über dem Sollwert liegende Standzeit.

Außerdem war bei der Untersuchung der eingesetzten Rohre bemerkenswert, daß außer in der Salzsäureleitung (Probe 3) in keinem der anderen Rohre Beläge auf der Rohr-Innenoberfläche gefunden wurden. Ein Beweis dafür, daß die geringe Rauhigkeit der PVC-U-Rohrwand Inkrustationen und damit verbundene Querschnittsveränderungen verhindert.

So zufällig und lückenhaft diese Untersuchungen zur Bestimmung der Restfestigkeit von eingesetzten PVC-U-Rohren auch noch sind, zeigen sie doch, daß auch nach 28 Jahren noch keine erkennbare Alterung eingetreten ist. Die erreichten Standzeiten liegen noch deutlich über den Zeitstandkennlinien für 60 °C, so daß den beschriebenen Extrapolationen durch die Restfestigkeit eine zusätzliche Sicherheit beigemessen werden kann, auch wenn bis zur Ermittlung einer Funktion für die Restfestigkeit in Abhängigkeit von der Vorbelastung noch weitere systematische Versuche mit größeren Probenzahlen erforderlich sind.

Schlußfolgerung

Bei der Bewertung des Langzeitverhaltens von Druckrohren aus PVC-U kann es natürlich nicht darum gehen, Einsatzzeiten von mindestens 600 oder gar 1000 Jahren zu propagieren.

Bei allem Vertrauen auf die Ergebnisse jahrzehntelanger Untersuchungen, die Gültigkeit des Arrheniuschen Gesetzes und die Extrapolationsverfahren, sind so extrapolierte Bruchzeiten von 10^7 bis 10^{12} h bzw. 600 bis 10^8 Jahren schon wegen völlig anderen unvorhersehbaren Ereignissen für die Prognostizierung der Lebensdauer eines technischen Produktes wie die eines PVC-U-Rohres natürlich völlig irrelevant.

Nach über 40 Jahren andauernden Zeitstand-Innendruckversuchen und über 50jähriger praktischer Erfahrung mit PVC-U-Rohren und Rohrleitungen lassen die diskutierten Untersuchungsergebnisse und deren Auswertungen aber die Schlußfolgerung zu, daß erdverlegte Druckrohrleitungen aus PVC-U mit den heute zulässigen Innendrücken bei bestimmungsgemäßem Einsatz ihre Funktionstüchtigkeit mit Sicherheit über einen Zeitraum von 100 bis 200 Jahren bewahren werden. Da alle beschriebenen Auswertungen teilweise sogar beträchtlich höhere Lebensdauern erwarten lassen, beinhaltet die genannte Lebenserwartung eine ausreichende werkstoffspezifische Sicherheit.

Trotzdem bleibt eine Prognose über 100 bis 200 Jahre mit vielen anderen Unsicherheiten behaftet. Sie ist jedoch weniger durch die spezifischen Werkstoffeigenschaften, insbesondere das Langzeitverhalten unter Dauerbelastung und die thermische Alterung des PVC-U begrenzt, als durch nicht vorhersehbare äußere Einflüsse wie z. B. politischer oder geophysikalischer Natur.

Bild 15: Abladen der Rohrpaletten auf der Baustelle

Natürlich werden vereinzelt PVC-U-Rohre auch in Zukunft nach weniger als 50 Jahren brechen. Doch andererseits werden, so wie heute noch funktionsfähige Teile aus Wasserversorgungsanlagen des Römischen Reiches und sogar aus ebenso alten Holzrohrleitungen gefunden werden, sicher auch noch funktionierende PVC-U-Rohrleitungen im vierten Jahrtausend existieren. Zahl und Umfang der dann noch vorhandenen technischen Versorgungseinrichtungen aus unserer heutigen Zeit ist aber von einer Vielzahl anderer Einflüsse abhängig, deren Bewertung jedoch ins Philosophische führen würde.

Bild 16: Herstellen des Rohrgrabens

Rohrleitungen aus PVC-U besitzen nicht nur ein ausreichendes Langzeitverhalten. Ihre Festigkeit gegen Innendruckbelastung gestattet nicht nur den Dauerbetrieb mit dem heute vorwiegend benutzten Betriebsdruck von 10 bar, sondern erlaubt auch vorübergehende Druckerhöhungen auf 16 bar, ohne daß damit ihre Sicherheitsgrenze überschritten wird. Andererseits ist durch

Bild 17: Verlegte PVC-Druckrohre mit Steckmuffe

die Elastizität des Werkstoffes PVC-U die Gewähr gegeben, daß auch Verformungen infolge Erdbewegungen und von Verkehrslasten aufgenommen werden können, ohne daß dies sofort zu Leitungsbrüchen führt.

Wegen der glatten Rohrwand treten keine Ablagerungen im Rohrinneren auf, so daß eine Verengung des Förderquerschnittes durch Inkrustationen und ein mit der Einsatzzeit steigender Strömungswiderstand nicht zu befürchten sind.

PVC-U wird von Wasser nicht angegriffen und hat eine hohe Widerstandsfähigkeit auch gegen aggressivere Medien. Die Zeitstandfestigkeit wird weder vom transportierten Wasser, unabhängig von seiner Qualität und Beschaffenheit, noch von der Bodenart bzw. von außen einwirkenden Wässern beeinflußt. Andererseits geben PVC-U-Rohre keine Substanzen aus der Rohrwand an das transportierte Wasser ab, so daß die Qualität des Wassers in hygienischer und toxiokologischer Hinsicht während des Transportes durch die Rohrleitung nicht verändert wird.

Das geringe Gewicht der PVC-U-Rohre (ϱ = 1,4 g/cm³) erlaubt vorteilhafte Transport- und Verlegebedingungen (Bild 15 bis 17). Gleiches gilt auch für die Verbindungstechnik.

Für die technischen Belange kann somit gesagt werden, daß den Versorgungsunternehmen mit den PVC-U-Rohren ein werkstoffmäßig, fertigungs- und verlegetechnisch ausgereiftes Produkt zur Verfügung steht, dessen Dauerhaftigkeit eine weit über die planerische Nutzungsdauer hinausgehende wirtschaftliche Wasserversorgung ermöglicht und die Qualität des Wassers nicht beeinträchtigt.

Die Recyclingfrage ist wegen der zu erwartenden langen Lebensdauer zwar nicht akut. Das Beispiel des Rohres 4 in Tab. 2 zeigt aber neben inzwischen durchgeführten umfangreichen Versuchen, daß ein Recycling von PVC-U-Rohrleitungen ohne Schwierigkeiten möglich ist.

Literatur:

[1] Buchmann, W.: VDI Z. 84 (1940), S. 425–431
[2] DIN 8062 „Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U, PVC-H), Maße" (11/88)
[3] DVGW-Merkblatt W 403 „Wasserversorgung; Wasserverteilung; Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze" (1/88)
[4] DIN EN 805 „Wasserversorgung" (Entwurf 11/92)
[5] W. Krannich: Chemische Fabrik 13, 1940, S. 233ff.
[6] DIN 8061 „Kunststoffrohre aus Polyvinylchlorid (Rohrtyp); Eigenschaften und Richtlinien für die Verwendung" (6/41)
[7] Tagung des ISO/TC 5/SC 6 „Kunststoffrohre" in Zürich, 20. bis 22. März 1956
[8] Richard, K.; Diedrich, G.: Kunststoffe 45 (1955), S. 429–433
[9] Richard, K.; Diedrich, G.: Kunststoffe 46 (1956) Nr. 5, S. 183–190
[10] Niklas, H.; Eiffländer, K.: Kunststoffe 49 (1959) Nr. 3, S. 109–113
[11] Nümann, E.; Umminger, O.: Kunststoffe 49 (1959) Nr. 3, S. 113–116
[12] Richard, K.; Ewald, R.: Kunststoffe 49 (1959) Nr. 3, S. 116–120
[13] Gaube, E.: Kunststoffe 49 (1959) Nr. 9, S. 446–454
[14] Richard, K.; Gaube, E.; Diedrich, G. Kunststoffe 49 (1959) Nr. 10, S. 516–525
[15] Richard, K.; Diedrich, G.; Gaube, E.: Kunststoffe 49 (1959) Nr. 11, S. 616–621
[16] Bollmann, Dettke: Plastverarbeiter 21 (1969) Nr. 7
[17] Nowack, R.; Barth, E.: 3R internat. 20 (1981) Nr. 6/7, S. 337–353
[18] Diedrich, G.: FNK 12.2 Doc 16–70
[19] DIN 8061 „Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid, Allgemeine Güteanforderungen, Prüfungen" (4/84)
[20] Arrhenius, S. A.: Z. f. physik. Chemie 3 (1889) Nr. 4, S. 226ff.
[21] Larson, F. R.; Miller, J.: Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 74 (1952), pp 765–775
[22] Gloor, W. E.: Modern Plastics 36 (Okt.) 1959, pp 144–148
[23] Retting, W.: Physik in unserer Zeit 8 (1977) Nr. 1, S. 17–32
[24] Gaube, E.; Gebler, H.; Müller, W.; Gondro, C.: Kunststoffe 75 (1985) Nr. 7, S. 412–415
[25] Juillard, M.; Mozzo, G.: Kunststoffe 69 (1979) Nr. 6, S. 334–340
[26] Kempe, B.; Hessel, J.: Schweißen und Schneiden 43 (1990) Nr. 4
[27] Bassewitz, A.v.: Plastverarbeiter 32, 1981, Nr. 4, S. 442–446
[28] ISO/DTR: 9080 „Standard-Extrapolationsverfahren zur Bestimmung der Zeitstand-Innendruckfestigkeit von thermoplastischen Rohrwerkstoffen"
[29] DIN 16887 „Prüfung von Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen; Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens" (7/90)
[30] DIN 53381 Teil 1 Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung der Thermostabilität von Polyvinylchlorid (PVC); Dehydrochlorierungsverfahren" (5/83)
[31] Hessel, J.; Gaube, E.: Zeitschrift f. Werkstofftechnik 17, 1986, S. 34–37