

Quelle: tba555 – Fotolia.com

Neubestimmung

der technischen Nutzungsdauer von Rohrleitungen

Die Bestimmung der technischen Nutzungsdauer von Rohrleitungen beruht in der Praxis meist auf vorgegebenen Richtkennwerten laut unternehmensspezifischer Erfahrung, Fachliteratur und Regelwerk. Zunehmende Erkenntnisse über das unternehmensübergreifende Ausfallverhalten von Rohrleitungen ermöglichen es, ein empfohlenes Verfahren laut **DVGW-Merkblatt W 403** praxisbezogen einzuführen, um so die technische Nutzungsdauer objektiv, d. h. unabhängig von den angesetzten Erfahrungs- und Schätzwerten, quantifizieren zu können.

von: Marc Wallerath & Rudi Wehr (RZVN GmbH)

Jedes Rohrleitungssystem unterliegt einem kontinuierlichen Alterungs- und Abnutzungsprozess, dem mit entsprechenden Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen entgegenzuwirken ist. Für den Betreiber eines solchen Systems stellt sich daher die Frage, ab welchem Zeitpunkt eine Leitung aus technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu sanieren oder zu erneuern ist. Im Regelfall bedeutet eine zu frühe Erneuerung Kapitalvernichtung und damit Zusatzkosten [1]. Eine zu späte Erneuerung erhöht das Ausfallrisiko und damit die möglichen monetären Schadensauswirkungen. Wie bei jeder technischen Einrichtung ist die Lebensdauer einer verlegten Leitung endlich und damit weitgehend planbar. Die Planbarkeit bezieht sich dabei auf die technische Nutzungsdauer, also auf jenen zeitlichen Abschnitt der Lebensdauer, in dem die Leitung funktionell und sicher betrieben werden kann.

Der Abnutzungsprozess über der technischen Nutzungsdauer bzw. der Lebensdauer einer Leitung, der früher oder später zu einem Schaden führt, wird in **Abbildung 1** schematisch dargestellt. Ob der Substanzverlust dabei linear oder nicht linear verläuft, ist für die Bestimmung der technischen Nutzungsdauer zweitrangig.

Die technische Nutzungsdauer von Leitungen hat in Bezug auf das Versorgungsunternehmen (VU) vielfältige kostenbezogene Auswirkungen, so

- in der Projektplanung,
- im Instandhaltungsmanagement, insbesondere in der Erneuerungsplanung,
- in der projektbezogenen Investitionsplanung und Jahreskostenermittlung,
- für die strangbezogene Risikoanalyse,
- für die Ermittlung des Wertausgleichs bei Umlagungen,
- für die monetäre Netzbewertung.

Daher sollte ein Netzbetreiber oder -eigner bestrebt sein, lange technische Nutzungsdauern der Leitungen zu erreichen und diese Nutzungsdauer im Rahmen seiner verfahrenstechnischen Möglichkeiten weitgehend genau zu bestimmen.

Derzeitiger Meinungs- und Kenntnisstand

In der Praxis wird die technische Nutzungsdauer bisher meist über VU-eigene Erfahrungs- und Schätzwerte oder laut Fachliteratur bestimmt und festgesetzt [1]. Dabei zeigt sich, dass die laut Fachliteratur genannten technischen Nutzungsdauern teilweise stark auseinanderliegen bzw. starke zeitliche Bandbreiten aufweisen. **Tabelle 1** zeigt hierzu einige in Fachliteratur und Regelwerk angegebene Zeitwerte und Bandbreiten. Eine objektive Bestimmung der technischen Nutzungsdauer anhand einer statistisch gesicherten Schadensprognose fehlt im Regelfall. Bestätigt wird diese Aussage durch die im DVGW-

Tabelle 1: Übersicht der laut Fachliteratur und Regelwerk beschriebenen technischen Nutzungsdauern

Werkstoff	Technische Nutzungsdauer		
	Wasser		Gas
	DVGW W 403 (M)	Roscher [2]	GasNEV
DG1	55	30-90	45-55
DG2	80	70-150	
GE1	105		45-55
GE2	80	60-120	
PE	70	40-80	45-55
PVC	50	-	30-40
			PE ummantelt 45-55
ST	70	50-100	kathodisch geschützt 55-65
			bituminiert 45-55

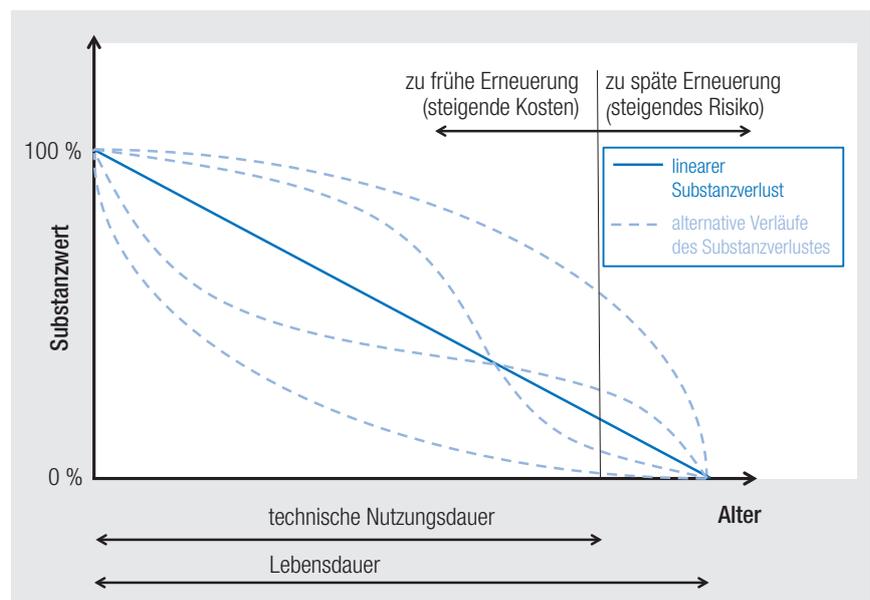
Quelle: Zusammenstellung durch RZVN

Merkblatt W 403 beschriebenen drei Methoden zur Ermittlung des erforderlichen Rehabilitationsbedarfs in Abhängigkeit von der verfügbaren Datengrundlage des betrachteten Versorgungsnetzes (Umfang, Qualität, Aktualität). Während die einfachen Methoden 1 und 2 von geschätzten technischen Nutzungsdauern ausgehen, gibt die erweiterte Methode 3 vor, diese Nutzungsdauern leitungsgruppenbezogen durch Alterungsfunktionen und Prognosemodelle zu ermitteln. [1]

Objektivierung der Nutzungsdauerbestimmung von Rohrleitungen

Bezogen auf die Ermittlung des Erneuerungszeitpunktes von Leitungen und deren technischer Nutzungsdauer weist das DVGW-Regelwerk im DVGW-Merkblatt W 403 und im DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 darauf hin, dass

- eine Leitung genau dann zu erneuern ist, wenn die technische Nutzungsdauer ihr Ende erreicht, und



Quelle: RZVN

Abb. 1: Darstellung des möglichen Verlaufs des Substanzabbaus einer Leitung mit Unterscheidung zwischen technischer Nutzungsdauer und Lebensdauer

Tabelle 2: Richtwerte für Schadensraten in Rohrnetzen (Haupt- und Versorgungsleitungen ohne Armaturen) laut DVGW-Arbeitsblatt W 400-3

Bereiche für Rohrschadens- raten	Rohrschadensraten an Haupt- und Versorgungsleitungen (Schäden je km und Jahr)
niedrige Schadensrate	$\leq 0,1$
mittlere Schadensrate	$> 0,1$ bis $\leq 0,5$
hohe Schadensrate	$> 0,5$

Quelle: [3]

- das Ende der technischen Nutzungsdauer dann erreicht ist, wenn die tatsächliche Schadensrate die zugelassene Schadensrate dauerhaft überschreitet [1, 3].

Der theoretische Weg zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer ist laut Regelwerk eindeutig, die praktische Anwendung wird jedoch noch kaum gehandhabt. Die Begründung hierzu liegt in der meist unvollständigen Schadensdokumentation der Versorgungsunternehmen, welche die Grundlage für die Schadensprognose darstellt. Um die Ermittlung der technischen Nutzungsdauer von bestehenden Schätzwerten zu entkoppeln, wird nachfolgend eine objektive und auf statistisch belastbaren Daten beruhende Herleitung (VU- und werkstoffspezifisch) methodisch erläutert und dargestellt.

Der Herleitung liegen dabei für ein Netz zugrunde:

- die Altersstruktur
- eine statistisch gesicherte Schadensprognose
- die zugelassene Schadensrate (Grenzschadensrate)

Die Altersstruktur eines Netzes ist meist über den aktuellen GIS-Datenbestand darstellbar. Auf statistisch abgesicherte Schadensprognosen können nur wenige Versorgungsunternehmen – meist infolge nicht ausreichender Schadensstatistiken – zurückgreifen. Die zugelassene Schadensrate kann zumindest für die Wasserversorgung mit Hilfe des technischen Regelwerks abgeleitet werden. Somit kann bezüglich der Anforderungen an die drei genannten Parameter der Methodik generell festgehalten werden:

- Die Altersstruktur ist (meist) gegeben.
- Die Schadensprognose muss werkstoffspezifisch erarbeitet oder generiert werden.
- Die Grenzschadensrate muss unternehmensbezogen bestimmt werden.

Vorgabe der Grenzschadensrate

Für Wasserversorgungsunternehmen (WVU) gibt das technische Regelwerk spezifische Bandbreiten mittlerer Rohrschadensraten vor. Die Einteilung der Rohrschadensraten erfolgt nach den drei Klassen niedrig, mittel und hoch (Tab. 2). Die zugehörigen Empfehlungen lauten:

- Die mittlere Schadensrate sollte nicht oberhalb des angegebenen mittleren Bereiches liegen.
- Die zulässige Schadensrate ist dauerhaft zu unterschreiten [3].

Die zulässige Schadensrate ist für jedes Wasserrohrnetz durch das VU zu bestimmen und sollte sich an

- den Angaben des technischen Regelwerks (Tab. 2),
- kundenspezifischen, versorgungstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten [3] und
- der betrieblich zu beherrschenden Anzahl an jährlichen Schäden im Verteilungssystem

orientieren.

Für Gasrohrnetze liegen bisher keine entsprechenden Bandbreiten und Mittelwerte für jährliche Schadensraten vor. Erfahrungsgemäß liegt die jährliche Schadensanzahl in Wasserrohrnetzen jedoch meist um den Faktor 4 bis 6 höher als in Gasrohrnetzen.

Laut technischem Regelwerk wird die technische Nutzungsdauer damit zumindest im Bereich Wasser an eine weitgehend objektive Größe, „die zugelassene Schadensrate“, geknüpft. Diese Verknüpfung wird im Rahmen des nachfolgend dargestellten Verfahrens für die objektive Bestimmung der technischen Nutzungsdauer herangezogen. Beispielsweise liegt die gehandhabte Grenzschadensrate in einem bestimmten Versorgungsunternehmen im Wasserbereich bei 0,3 Schäden pro Kilometer und Jahr (alternativ 0,1 S/km*a für großkalibrige Leitungen¹) und bei 0,05 Schäden pro Kilometer und Jahr im Gasbereich. Für dieses Unternehmen würde das Zulassen einer höheren Grenzschadensrate bedeuten, dass ein zu hoher Anteil des operativen Netzbetriebes durch Reparatur- und Folgearbeiten gebunden würde.

¹ Bezogen auf die Vorgaben für großkalibrige Leitungen heißt es im technischen Regelwerk, dass für sonstige Leitungen mit besonderer versorgungstechnischer Bedeutung bezüglich der Schadensrate strengere Maßstäbe anzusetzen sind. [DVGW W 400-3 (A)]

² Im Bereich Wasser hat RZVN die Möglichkeit, die zugrunde zu legenden Ausfallfunktionen mit Ergebnissen und Erkenntnisse eines kürzlich abgeschlossenen 17-monatigen DVGW-Forschungsvorhabens zu stützen, in dem auf Grundlage von ca. 21.000 km Leitungslänge der 10 teilnehmenden Projektpartner das Alterungs- und Ausfallverhalten von Wasserrohrleitungen untersucht wurde und über das in der Fachliteratur bereits berichtet wurde [4].

Werkstoffspezifische Ausfallraten

Im Rahmen der beschriebenen Methodik laut technischem Regelwerk ist neben der Bestimmung der zugelassenen Schadensrate die zeitliche Schadensentwicklung eines Versorgungsnetzes zu prognostizieren. Die Schadensentwicklung kann über werkstoffspezifische Funktionen der Ausfallraten (nachfolgend nur noch als Ausfallraten bezeichnet) mit Hilfe mathematisch-statistischer Verfahren bestimmt werden. Die Ausfallrate sagt aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Rohrleitungsabschnitt, der das Alter X Jahre erreicht hat, im Alter $X+1$ ausfallen wird.

Die altersbedingte Ausfallrate unterscheidet sich von der netzbezogenen mittleren Schadensrate laut DVGW-Arbeitsblatt W 402 durch den höheren Detaillierungsgrad. Während die netzbezogene mittlere Schadensrate im Allgemeinen als eine beschreibende Kennzahl eines Verteilungssystems genutzt wird, bildet die altersbedingte Ausfallrate das Ausfallverhalten einer bestimmten homogenen Leitungsgruppe über die gesamte Nutzungsdauer ab. Nur die Kenntnis der altersbedingten Ausfallrate erlaubt eine statistisch gesicherte Schadensprognose [4]. Wie bereits angedeutet, liegen diese Ausfallraten in vielen Versorgungsunternehmen nicht vor. Ist es einem Unternehmen aufgrund seiner unzureichenden Datenbasis nicht möglich, eigene Ausfallraten zu erstellen, so kann es auf belastbare Ausfallraten vergleichbarer Unternehmen zurückgreifen. Für jeden Versorger ergeben sich damit folgende Möglichkeiten der Erstellung bzw. Beschaffung von werkstoffspezifischen Ausfallraten:

- selbsterzeugte Funktionen
- Funktionen von Vergleichsunternehmen (z. B. geografische Nähe, vergleichbare Bodenarten etc.)
- mittels verfügbarer unternehmensspezifischer Daten angepasste Funktionen von Vergleichsunternehmen
- übergeordnete (jedoch evtl. anzupassende) Funktionen größerer Versorgungsunternehmen²

Bei der Übernahme von Vergleichsfunktionen anderer Unternehmen ist eine Justierung der mathematisch-statistischen Ausfallraten durch Gegenüberstellung von tatsächlichen und errechneten jährlichen Schadensfällen für zurückliegende Zeiträume durchzuführen. Die

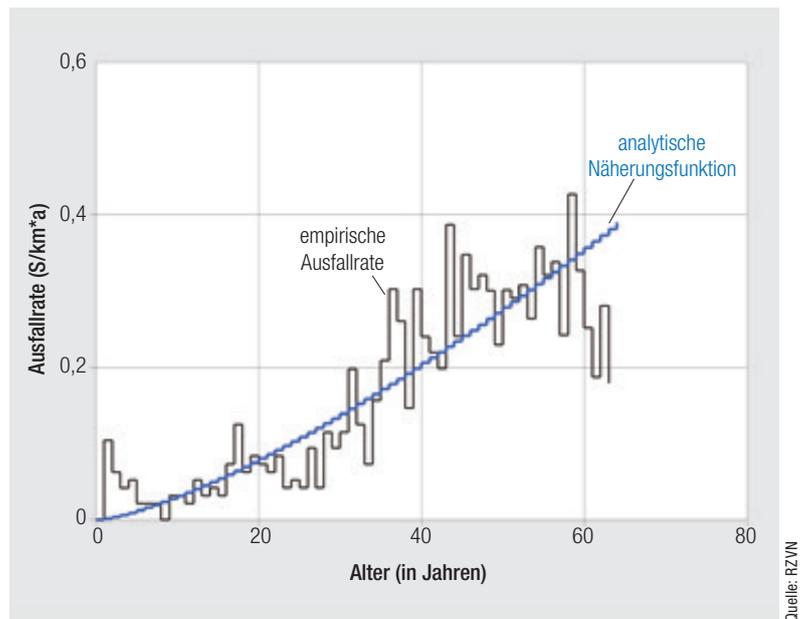


Abb. 2: Darstellung einer empirischen werkstoffspezifischen Ausfallrate mit analytischer Näherungsfunktion

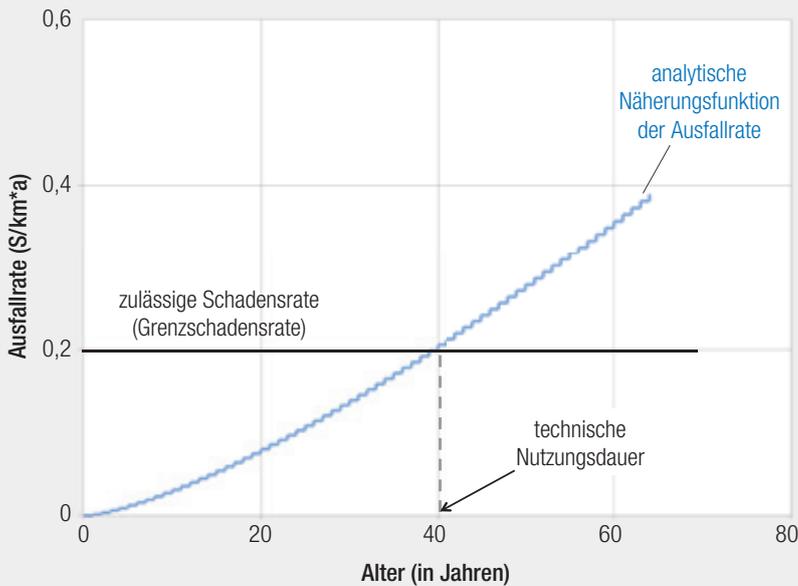
tatsächlich aufgetretenen und die über Funktionen errechneten Schadensfälle sollten dabei die gleiche Größenordnung erreichen.

Bei der Bestimmung der Ausfallraten sind mindestens folgende Klassifizierungen zu berücksichtigen:

- der Rohrwerkstoff (bspw. GGL 1. Gen., GGL 2. Gen, PE usw.)
- die Nennweite (bspw. groß- und kleinkalibrig)
- das Versorgungsgebiet (bspw. nach Bodenarten und Topografie)

Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine generierte empirische Ausfallrate mit angenäherter Weibull-Funktion. Bei der Weibull-Verteilung





Quelle: RZWM

Abb. 3: Bestimmung der technischen Nutzungsdauer über den Schnittpunkt aus Ausfallrate und Grenzschadensrate

handelt es sich um eine in Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen besonders häufig verwendete Verteilung. Sie wird auch im DVGW-Merkblatt G 403 als „Wahrscheinlichkeitsfunktion“ berücksichtigt. [5]

Die Qualität der erreichbaren Ergebnisse hängt maßgeblich von der Belastbarkeit der zugrunde gelegten Ausfallraten ab. Um die Belastbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sind die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- aktuelle und mindestens über zehn Jahre bestehende Bestands- und Schadensdokumentation
- Einsatzzeit des Werkstoffs von mindestens 20 Jahren [6]
- Bildung von homogenen Werkstoffgruppen (bspw. nach Werkstoffgenerationen und Nennweitenstufen)
- statistisch ausreichende Anzahl an jährlichen Schäden pro Werkstoffgruppe

Wenn aus der aktuellen Schadensstatistik werkstoffspezifische Ausfallraten ermittelt werden können, lässt sich ableiten, wann die bestehende Ausfallrate im Regelfall die vorgegebene Grenzschadensrate erreicht (Ende der technischen Nutzungsdauer) (**Abb. 3**).

Methodik

Die beschriebene Methodik zur Bestimmung der technischen Nutzungsdauer umfasst generell folgende Verfahrensschritte:

- Beurteilung/Aufarbeitung der bestehenden Schadensstatistik
- Auswertung der bestehenden längenbezogenen Altersstruktur des Netzes
- Generierung der empirischen altersbezogenen Ausfallraten (Treppenkurven) für die verlegten Werkstoffgruppen (spezifische Ermittlung oder Übernahme von Vergleichsfunktionen)
- Nachbildung der empirischen Ausfallraten durch analytische Näherungsfunktion (hier verwendet: Weibull-Funktion)
- Prognose des zukünftigen Ausfallverhaltens durch Extrapolation der bestehenden Ausfallraten
- Vorgabe der Grenzschadensrate (als unternehmensspezifisch zulässige Schadensrate)
- Berechnung des Jahres (bzw. des Alters), in dem die Grenzschadensrate von der prognostizierten Anzahl jährlicher Schäden erreicht wird (**Abb. 3**)
- Umsetzung der Ergebnisse in die Jahreserneuerungs- und Budgetplanung und sonstige betriebliche Auswertungen

Die in **Abbildung 3** dargestellte grafische Bestimmung der technischen Nutzungsdauer wird nachfolgend unter Anwendung funktionaler Zusammenhänge rechnerisch ermittelt. Unter Berücksichtigung einer Ausfallrate $\lambda(t)$ (hier dargestellt über eine zwei-parametrische Weibull-Funktion)

$$\lambda(t) = \frac{b}{T} * \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \quad \text{Gleichung 1}$$

- mit
- t: Statistische Variable (hier Alter bzw. technische Nutzungsdauer)
 - T: Lageparameter bzw. charakteristische Lebensdauer (Ausfallwahrscheinlichkeit 63,2 Prozent [7]) der Verteilung
 - b: Formparameter bzw. Ausfallsteilheit der Verteilung

wird die technische Nutzungsdauer über die Schnittpunktbestimmung aus altersbedingter Ausfallrate $\lambda(t)$ und vorgegebener Grenzschadensrate (GSR) ermittelt:

$$\lambda(t) = \text{GSR} \quad \text{Gleichung 2}$$

Eine Umstellung der Gleichung 2 nach t ergibt die nachfolgende Gleichung zur Bestimmung der technischen Nutzungsdauer t:

$$t = \left(\frac{GSR}{\left(\frac{b}{T}\right)^{b-1}} \right) * T \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Parameter T und b ergeben sich dabei wie beschrieben über eine Näherungsfunktion auf Grundlage der empirischen Ausfallraten einer belastbaren Schadensstatistik. Beispielsweise errechnet sich für die Parameter T = 500, b = 2,5 und GSR = 0,0003 Schäden pro Meter und Jahr (0,3 Schäden pro km und Jahr) eine technische Nutzungsdauer von 77 Jahren.

Praxisbeispiel Wasser

Zur Ermittlung der werkstoffspezifischen technischen Nutzungsdauern werden innerhalb des nachfolgenden Praxisbeispiels – unter der Berücksichtigung bestehender belastbarer Ausfallfunktionen (entsprechend den Punkten 1 bis 5 des vorherigen Abschnittes) – die beschriebenen Verfahrensschritte 6 und 7 näher betrachtet. Wie bereits dargestellt, sind die Grenzscha-densraten für jedes Netz separat zu bestimmen. Im Praxisbeispiel werden die genannten Grenzscha-densraten zugrunde gelegt:

- Leitungen ≤ DN 300
0,3 Schäden/(km*a)
- Leitungen > DN 300
0,1 Schäden/(km*a)

Die analytischen Ausfallraten und damit die Funktionsparameter T und b wurden auf Grundlage vergleichbarer unternehmensübergreifender Schadensstatistiken bestimmt. Eine Anwendung der beschriebenen Gleichung 3 auf verschiedene Werkstoffgruppen ergibt die dargestellten technischen Nutzungsdauern laut **Tabelle 3**. Laut vorgestellter Methodik liegen diese

- für ältere Werkstoffe (GGL, GGG 1. Gen., St 1. und 2. Gen.)
- zwischen 68 und 83 Jahren (kleinkalibrig) bzw.
- zwischen 111 und 136 Jahren (großkalibrig)
- für neuere Werkstoffe (GGG 2. Gen, ST 3. Gen. und PE)
- zwischen 139 und 160 Jahren

Schlussbetrachtung und Folgerungen für die Praxis

Die Ermittlung der technischen Nutzungsdauer von Rohrleitungen in Verteilungsnetzen kann für Leitungsgruppen anhand prognostizierter

Tabelle 3: Ermittelte werkstoffspezifische technische Nutzungsdauern laut vorgestellter Methodik

Werkstoff- gruppe	Verlegungs- zeitraum ca.		Nennweitenstufe klein: ≤ DN 300, groß: > DN 300	Weibullparameter der Ausfallfkt.		Grenz- schadensrate [S/km*a]	berechnete technische Nutzungsdauer
	von	bis		T	b		
GGL 1. Gen.	1890	1945	klein	410	3,0	0,3	83
			groß	1.500	2,1	0,1	136
GGL 2. Gen.	1946	1965	klein	570	2,2	0,3	68
			groß	1.370	2,1	0,1	115
GGG 1. Gen.	1966	1979	klein	520	2,4	0,3	74
			groß	1.350	2,1	0,1	111
GGG 2. Gen.	1980	heute	klein	1.000	2,1	0,3	160*
			groß	-	-	0,1	-**
ST 1. Gen.	1900	1940	klein	450	2,8	0,3	83
			groß	1.150	2,3	0,1	115
ST 2. Gen.	1941	1979	klein	530	2,3	0,3	68
			groß	1.050	2,3	0,1	98
ST 3. Gen.	1980	heute	klein	900	2,1	0,3	139*
			groß	-	-	0,1	-**
PE	1973	heute	gesamt	800	2,4	0,3	154

* bisher nur vorläufiges Ausfallverhalten ableitbar infolge begrenzter Einsatzzeit

**bisher kein altersbedingtes Ausfallverhalten ableitbar infolge begrenzter Einsatzzeit

Quelle: RZ/W

alterungsabhängiger Schadensentwicklungen und vorgegebener zulässiger Schadensraten erfolgen. Das Ende der Nutzungsdauer ist erreicht, wenn die tatsächliche Schadensrate die zulässige Schadensrate dauerhaft überschreitet.

Die bisher nur in Einzelfällen angewandte und im DVGW-Merkblatt W 403 empfohlene Methodik zur Ermittlung der technischen Nutzungsdauer von Rohrleitungen zeichnet sich gegenüber der bisherigen erfahrungsorientierten Bestimmung durch

- die objektive und statistisch abgesicherte Berechnungsmöglichkeit und
- eine höhere Spezifität (Punktwert statt Spannweite)

aus. Insgesamt werden für definierte Werkstoffgruppen der Wasser- und Gasverteilung durchweg höhere technische Nutzungsdauern ermittelt als bisher praktiziert. Für die Wasserverteilung wurde diese Aussage anhand eines Praxisbeispiels näher erläutert.

Die dargestellte objektive Bestimmung der technischen Nutzungsdauer für Leitungen hilft:

- Planungssicherheit für die Betriebsdauer und Rehabilitation zu schaffen
- Ausfallrisiken zu begrenzen
- die durch zu frühe Ersatzerneuerungen entstehenden Mehrkosten weitgehend zu vermeiden
- Restwerte von Rohrleitungen und Netzen zu bestimmen
- Wertausgleichsverfahren bei Umlegungen zu objektivieren
- Abschreibungsdauern abzuleiten
- kalkulatorische Kosten geltend zu machen
- notwendige jährliche Erneuerungsraten abzuleiten

Im Rahmen einer detaillierten Rehabilitationsplanung sind neben den werkstoffgruppenbezogenen technischen Nutzungsdauern und Ausfallprognosen zusätzliche Informationen einzubeziehen. Für die Erneuerung einer Leitung ist das strangspezifische Risiko maßgeblich, welches neben der individuellen Ausfallwahrscheinlichkeit die punktuellen Auswirkungen eines Schadens auf die Umgebung und die Versorgungssicherheit berücksichtigt. Die gruppenbezogene Ausfallwahrscheinlichkeit

ist dabei um Zusatzeinflüsse wie lokale Schadenshäufungen, Bodenbewegungen, Bodenaggressivitäten etc. zu korrigieren [8].

Um die Belastbarkeit der Ergebnisse der beschriebenen Methodik zu erhöhen, sollte das Alterungs- und Ausfallverhalten von Leitungen der Gas- und Wasserversorgung erweitert untersucht werden. Insbesondere für „neue“ Werkstoffe und die Auswirkung besonderer Umgebungseinflüsse (Bodenart, Hanglage, Bebauungsnähe etc.) besteht noch Untersuchungs- und Forschungsbedarf. ■

Quellen:

- [1] DVGW-Merkblatt W 403: „Entscheidungshilfen für die Rehabilitation von Wasserverteilungsanlagen“, April 2010.
- [2] Roscher H. et al., Rehabilitation von Wasserrohrnetzen, 2. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Berlin 2008.
- [3] DVGW-Arbeitsblatt W 400-3: „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 3: Betrieb und Instandhaltung“, September 2006.
- [4] König D., Wallerath M., Sorge H. C., Neubewertung des Alterungs- und Ausfallverhaltens von Wasserrohrleitungen, DVGW energie | wasser-praxis 10/2012, S. 42-47.
- [5] DVGW-Merkblatt G 403: Entscheidungshilfen für die Instandhaltung von Gasverteilungsnetzen, März 2013.
- [6] Merkel W., Berger W., Schlicht H., Betrieb und Instandhaltung von Wassernetzen: gut oder billig?, DVGW energie | wasser-praxis 9/2009, S. 18-22.
- [7] Wilker H., Weibull-Statistik in der Praxis – Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Produkte, Band 3, 2004.
- [8] Wehr R., König D., Die Instandhaltung von Versorgungsnetzen mit risiko- und kostenorientierter Ersatzerneuerung, GWF Wasser/Abwasser 148 (2007) Nr. 13, S. 42-49.

Die Autoren

Dipl.-Volksw. Marc Wallerath ist Projektleiter bei der RZVN GmbH.

Dipl.-Ing. Rudi Wehr ist ehemaliger Geschäftsführer/Gesellschafter und derzeitiger Projektberater der RZVN GmbH.

Kontakt:
Rechenzentrum für Versorgungsnetze
Wehr GmbH
Wiesenstr. 21
40549 Düsseldorf
Tel.: 0211 601273-00
E-Mail: wallerath@rzvn.de
Internet: www.rzvn.de