

# ZUSTANDSMODELLIERUNG KLEINER VERSORGUNGS- NETZE

**ERGEBNISSE AUS DEM NFP-61-PROJEKT «LANGFRISTIGE PLANUNG NACHHALTIGER WASSERINFRASTRUKTUREN»**

Den zukünftigen Sanierungsbedarf abzuschätzen, ist eine der grossen Herausforderungen für viele Wasserversorger. Dabei haben insbesondere kleinere Netze mit viel Erfahrungswissen und wenigen Daten besondere Schwierigkeiten. Der Artikel gibt einen Überblick zur Vorhersage des Netzzustandes und über wichtige Aspekte bei der Wahl der entsprechenden Modelle. Ein Folgeartikel zeigt an einem Beispiel die Anwendung des an der Eawag neu entwickelten Schadensmodells.

Lisa Scholten\*, Max Maurer; Andreas Scheidegger  
Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs

## RÉSUMÉ

### MODÉLISATION DE L'ÉTAT DE PETITS RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU RÉSULTATS DU PROJET PNR61 «GESTION DURABLE DE L'EAU»

On fait de plus en plus souvent appel à des modèles décrivant l'état actuel et futur du réseau de conduites pour déterminer le besoin de rénovation. Les modèles d'endommagement de conduite, calibrés à l'aide des rapports disponibles sur des dommages, sont particulièrement intéressants. Cet article présente divers modèles d'endommagement de conduite fréquemment utilisés. Il décrit le type de modélisation, les exigences de conservation des données et l'interdépendance qui existe entre les dommages. Peu de modèles d'endommagement, documentés dans la littérature, sont en mesure d'illustrer les données enregistrées en Suisse et propres à notre pays, et de les prendre en compte dans les prévisions d'endommagement. Nous avons mis au point un nouveau modèle pour mieux représenter ces particularités. Il accorde une importance particulière au manque de données des petits et moyens fournisseurs d'eau et prend en compte les incertitudes. Nous utilisons ici une approche qui permet d'inclure des connaissances préalables, provenant par ex. d'autres réseaux ou du personnel, souvent très expérimenté, des entreprises. Nous espérons que cet ar-

## EINLEITUNG

### HINTERGRUND

In den vergangenen zwanzig bis dreissig Jahren ist das Bewusstsein über die Bedeutung der langfristigen Rehabilitationsplanung von Wasserinfrastrukturen stark angestiegen. Gezielte Forschungsprogramme z. B. in den USA, Kanada, Australien und Europa brachten neue Erkenntnisse über die Zustandsentwicklung von Leitungsnetzen. Auch im NFP-61-Projekt SWIP (*Box 1*) war eines der Forschungsziele, Methoden zur Ermittlung des Rehabilitationsbedarfs zu entwickeln. Die Kenntnis, wie sich der Zustand des Leitungsnetzes in Zukunft verändert, ist zentral für die Formulierung optimaler Ersatz- und Unterhaltstrategien und die dafür benötigten Finanzen. Hierbei wird häufig von strategischem Anlagenmanagement gesprochen (engl.: *Strategic Asset Management*).

Für die Abschätzung der Zustandsentwicklung existiert eine Reihe mathematischer Modelle. Im Zentrum stehen Lebensdauermodelle und Schadensmodelle. Die Lebensdauermodelle bilden die Dauer bis zum Ersatz einer Leitung ab, während Schadensmodelle die Zeit des Eintritts von Erstschäden oder Folgeschäden ermitteln (die nicht unmittelbar zum Ersatz führen müssen). Solche Modelle sind in verschiedenen Softwarelösungen implementiert. Diese Publikation gibt einen groben

\* Kontakt: [lisa.scholten@eawag.ch](mailto:lisa.scholten@eawag.ch)

**SWIP**

Ziel des Projekts «SWIP» (*Sustainable Water Infrastructure Planning*) ist eine verbesserte Planung von Trinkwasserversorgungs- und Entwässerungssystemen, die sich in die bestehenden Planungsstrukturen der Schweiz eingliedert. Der Fokus liegt auf dem Umgang mit Beschränkungen in den Daten, der Unsicherheit von zukünftigen Entwicklungen und einer hohen Akzeptanz des Entscheidungsprozesses durch Akteure.

Weitere Informationen:

[www.eawag.ch/forschung/sww/gruppen/swip](http://www.eawag.ch/forschung/sww/gruppen/swip)

Kontakt:

Judit Lienert, [judit.lienert@eawag.ch](mailto:judit.lienert@eawag.ch)

Max Maurer, [max.maurer@eawag.ch](mailto:max.maurer@eawag.ch)

Box 1 Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen (SWIP)

Planification à long terme d'infrastructures durables du secteur de l'eau

Überblick über die Modelle, die hinter sieben ausgewählten Software-Lösungen stehen. Das sind *PiReM*, *D-WARP*, *I-WARP*, *CARE-W*, *Casses*, *PARMS* und *AWARE-P*. Auf die enge Beziehung zwischen der Datenverfügbarkeit und der Eignung solcher Modelle wird eingegangen. Dabei werden auch die Gründe dargelegt, weshalb im Rahmen von SWIP für die typische schweizerische Situation der Wasserversorgungspraxis ein neues Modell entwickelt wurde. In einem Folgeartikel<sup>1</sup> werden anhand eines Beispiels für eine «typische» kleine Gemeinde die Datenaufbereitung, Kalibrierung und Prognose erläutert, ausserdem wird aufgezeigt, warum sich die Anwendung solcher Modelle in der Rehabilitationspraxis lohnt.

### SCHADENSMODELLE ZUR BESTIMMUNG DES NETZZUSTANDS UND REHABILITATIONSBEDARFS

Entgegen der vorhandenen Zustandsklassifizierung von Abwasserkanälen gibt es bei Trinkwasserleitungen keine einheitliche Zustandsbeschreibung. Defekte kommen meist erst bei Leitungsbrüchen, gezielten Leckage-Suchkampagnen oder Bautätigkeiten im Untergrund zum Vorschein. Zustandsinformationen aus z. B. visuellen Inspektionen der Netze stehen aufgrund des technischen Aufwands und hoher Kosten in der Regel nur bei grosskalibrigen Transportleitungen zur Verfügung. Im Gegensatz zu den Lebensdauermodellen, in denen zwischen zwei Zuständen unterschieden wird (in Betrieb/ausser Betrieb), verwenden die vorhandenen Zustandsmodelle für Versorgungsleitungen generell die Anzahl von Leitungsschäden zur Beschreibung des Zustands. Je mehr Schäden eine Leitung in der Vergangenheit hatte, desto schlechter ihr Zustand. Aus der Veränderung der Schadenszahl relativ zur Netzlänge lassen sich dann Schadensraten ableiten, die häufig als zentraler Leistungsindikator in die Bewertung einfließen. Die mittleren und grossen Wasserversorger in der Schweiz verfügen meist über eine Schadensdokumentation (z. B. integriert in ein GIS-System) und verwenden diese Daten im Anlagenmanagement. Bei der

<sup>1</sup> Voraussichtlich erscheint der Artikel in der diesjährigen Novemberausgabe von *Aqua & Gas*

Mehrzahl der Versorger, nämlich denjenigen mit weniger als 10 000 Einwohnern, liegt jedoch nur teilweise eine solche Schadensdokumentation vor.

Ungeachtet der Grösse und vorhandenen Schadensdokumentation herrscht oft Unklarheit darüber, ob genügend oder gegebenenfalls sogar zu viel erneuert bzw. ersetzt wird. Eine Ursache hierfür liegt in der Schwierigkeit der Bestimmung der technischen Lebensdauer von Leitungen. Buchhalterisch und in der Erneuerungspraxis werden häufig Richtgrössen von 50 bis 80 Jahren angenommen, die dann in einen jährlichen Rehabilitationsbedarf übersetzt werden. Bei einer Lebensdauer von 75 Jahren müssten beispielsweise im Mittel  $1/75 = 1,33\%$  des Netzes jährlich ersetzt werden. Dabei wird von einer homogenen Altersverteilung der Leitungen ausgegangen, speziell bei jungen Netzen ist ein dynamischer Ansatz vorteilhaft [1]. Zudem entsprechen diese Richtgrössen oft nicht der «wahren» technischen Lebensdauer, sondern stellen eine erfahrungsbasierte Grösse dar [2, 3]. Dabei gibt es in der Praxis erhebliche Abweichungen je nach Material und Randbedingungen. Ausserdem ist eine alte Leitung nicht unbedingt in einem technisch schlechteren Zustand als eine junge.

Für einen detaillierten Vergleich zukünftiger Erneuerungsstrategien und deren Leistung ist die Verwendung solcher Richtgrössen nur bedingt hilfreich. Da Wassernetze ein weitgehend reparables System darstellen, gibt es keine eindeutige technische Lebensdauer, nach deren Erreichen Leitungen ersetzt werden müssen. Vielmehr ist der Ersatz-Entscheid an andere Ziele gekoppelt: zum Beispiel das Erreichen eines guten Systemzustands (oft «Werterhalt» genannt), eine hohe Kontinuität der Wasserversorgung, die Minimierung von Störungen des Verkehrs oder der Anlieger durch Bautätigkeiten und auch eine Reduzierung der Kosten. Viele dieser Ziele werden unmittelbar von der Schadensentwicklung beeinflusst. Deshalb ist die Verwendung von Schadensmodellen für die Abschätzung der Lebensdauer von Leitungen und des Erneuerungsbedarfs sinnvoll.

### SCHRITTE BEI DER SCHADENS- UND REHABILITATIONSMODELLIERUNG

Bei der Modellierung von Schäden und Rehabilitationsstrategien sind unterschiedliche Herangehensweisen möglich. Wir schlagen folgendes Vorgehen vor (Fig. 1):



Fig. 1 Vereinfachtes Ablaufschema zur Unterstützung der Rehabilitationsplanung mithilfe Schadens- und Rehabilitationsmodellierung  
Schéma simplifié de planification de la rénovation à l'aide d'une modélisation d'endommagement et de rénovation

### 1. Daten

Zunächst sind die Daten über den Ist-Zustand des Leitungsnetzes zu beschaffen und aufzubereiten. Dies umfasst die Leitungen und deren Charakteristika (Einbaujahr, Material, Durchmesser etc.) sowie – wenn vorhanden – die Schadensaufzeichnung und Dokumentation über bereits ersetzte Leitungen. Diese Daten werden einer Plausibilitätsprüfung unterzogen (z.B. ob Material, Verbindungsart und Baujahr zusammenpassen). Zur Berücksichtigung möglicher Änderungen der Randbedingungen können neben der Fortführung des Status quo auch weitere Zukunftsszenarien (z.B. Rück- und Ausbau, andere Dimensionierung und Materialien) definiert und parallel untersucht werden.

### 2. Modell

Im nächsten Schritt wird das Modell ausgewählt und kalibriert. Die Wahl des Modells hängt davon ab, welche Daten zur Verfügung stehen und welche Anforderungen man an die Prognose hat. Bei der Kalibrierung gibt es viele mögliche Herangehensweisen, um die Parameter (Stellgrößen) des Modells festzulegen. Diese gehen vom Übernehmen von Standardparametern bis zum Einsatz datenbasierter Verfahren.

### 3. Schadensprognose

Auf die Kalibrierung folgt die Prognose. Meistens ist die Prognose auf die Schätzung zukünftiger Schäden ausgerichtet. Bei einer unvollständigen Historie und damit lückenhaften Kenntnis des derzeitigen Zustands der Leitungen kann auch eine Prognose nicht beobachteter Schäden bis zum heutigen Zeitpunkt bzw. Beginn der Schadensaufzeichnungen interessant sein. Die detaillierte Kenntnis des aktuellen Zustands ist z.B. interessant, wenn zustandsbedingte Rehabilitationsstrategien angewendet werden sollen oder wenn die Wasserverluste des derzeitigen Systems zu bestimmen sind.

Eine langfristige Prognose benötigt die ins Auge gefassten Rehabilitationsstrategien, da der Zustand und die Leistung ein und desselben Netzes in 30 Jahren erwartungsgemäss in Abhängigkeit davon variiert, ob jährlich z.B. 1,5% der schlechtesten Leitungen ersetzt wurden, gar nichts gemacht wird oder die Leitungen immer beim Erreichen eines bestimmten Alters ersetzt werden. Die Prognose ist für alle betrachteten Zukunftsszenarien und Rehabilitationsstrategien durchzuführen.

### 4. Berechnung der Leistungsindikatoren

Zentrales Element ist die Berechnung von Leistungsindikatoren, die aus der Schadensprognose abgeleitet werden. Diese dienen der Bewertung im Hinblick auf spezifische Ziele, z.B. Zuverlässigkeit des Systems, niedrige Schadensrate, wenig Baustellen, minimale Versorgungsunterbrechungen oder geringe Kosten. Mittels dieser Leistungsindikatoren können die verschiedenen Strategien verglichen und ausgewählt werden. Auch hier kann das Zukunftsszenario eine Rolle spielen, z.B. bei Änderungen im Versorgungsgebiet.

### 5. Leistungsbewertung, Strategievergleich

Zur Unterstützung bei Vergleich und Auswahl stehen beispielsweise die multi-kriterielle Entscheidungsanalyse (s. Artikel *Scholten et al., Aqua & Gas 5/14* [4]) oder auch andere Bewertungsmethoden zur Verfügung. Gegebenenfalls kann auch eine Anpassung/Optimierung der Rehabilitations-Strategien bzgl. ausgewählter Ziele durchgeführt werden, für die dann wiederum die Schäden prognostiziert (Schritt 3) und die erwartete Leistung berechnet werden. Die Beurteilung unter verschiedenen Zukunftsszenarien ermöglicht die Einschätzung der Robustheit der Leistung einer Strategie in einer unsicheren Zukunft.

## HERAUSFORDERUNGEN DER SCHWEIZER WASSERVERSORGUNGSPRAXIS

### Kleine Netze, wenig Daten

Gemäss der SVGW-Statistik werden in der Schweiz mehr als die Hälfte der Menschen von Wasserversorgungen mit weniger als 10 000 angeschlossenen Einwohnern versorgt [5]. Die Mehrheit der Leitungsnetze sind also klein, bei etwa 5–10 m Netzlänge pro Kopf deutlich unter 100 km. Vom Aspekt der Schadens- und Rehabilitationsmodellierung betrachtet bedeutet das, dass auch bei sehr guter Dokumentation des Netzes nur eine geringe Anzahl Leitungen und Leitungsschäden für statistische Auswertungen zur Verfügung steht. Damit ist eine rein datenbasierte Kalibrierung nur begrenzt möglich. Diese Tatsache stellt eine besondere Herausforderung bei der Auswahl und Anpassung von Modellen zur Unterstützung der langfristigen Rehabilitationsplanung dar.

### Unvollständige Daten

Für die Schadensmodellierung werden sogenannte statistische Überlebensmo-

delle verwendet, wie sie ähnlich auch aus der Medizin und Bevölkerungsstatistik bekannt sind. Diese Analogie dient zur Erläuterung der Limitationen angesichts der Datenlage. Um beispielsweise ein Modell für die Lebenserwartung der Bevölkerung (analog: die Schäden des Leitungsnetzes) anzupassen, ist eine gute Kenntnis der Demografie (Altersverteilung) sowie der historischen Sterbedaten (Schadens- und Ersatzdaten) nötig.

In Bezug auf die Leitungsnetze fehlen allerdings häufig viele dieser relevanten Daten, so z.B. die Einbaujahre eines Teils der Leitungen. Falls nach spezifischen Eigenschaften unterschieden werden soll (z.B. Durchmesser, Material, Korrosionsschutz o.ä.), müssen auch diese für jede Leitung erfasst sein. Eine auswertbare Dokumentation des historischen Leitungsersatzes ist nur selten vorhanden. Während unvollständige Altersverteilungen und Daten sich häufig mithilfe lokaler Experten und anhand des verwendeten Materials rekonstruieren lassen, stellt das Fehlen historischer Ersatzdaten eine grosse Herausforderung in der Modellierung dar. Das aktuelle Netz entspricht dabei nicht einer repräsentativen Stichprobe aller gebauten Leitungen, weil die häufig ausfallenden Leitungen bereits ersetzt wurden. Diese selektive Beobachtung (hier: selektives Überleben) führt zu einer systematischen Unterschätzung der Anzahl Schäden.

Weiterhin ist für die Einschätzung des derzeitigen Netzzustands und die Schadensprognose eine möglichst vollständige Schadensdokumentation wichtig. Ein häufiger Fall ist, dass es erst seit wenigen Jahren eine zuverlässige, einheitliche Schadensaufzeichnung gibt. Bei Leitungen, die vor dem Beginn der Schadensaufzeichnungen verlegt wurden, ist daher weder bekannt, ob sie schon vor dem Beobachtungszeitraum Schäden hatten oder nicht, noch wie viele Schäden in welchem Alter. Dieser Umstand wird oft «Linkstrunkierung» genannt und führt analog zum «selektiven Überleben» zu einer zu optimistischen Einschätzung des Zustands und einer Unterschätzung der zukünftigen Schäden.

## MODELLAUSWAHL

Bei der Modellauswahl sind verschiedene Aspekte wichtig: Das Modell sollte gut mit der vorhandenen Datenlage umgehen können und eine Unterscheidung von



Leitungen entsprechend ihrer Haupteigenschaften erlauben. Ausserdem sollen Unsicherheiten aus der Kalibrierung anhand der Daten zur Schadensprognose fortgepflanzt werden. Mit dem Ziel, den derzeitigen und zukünftigen Netzzustand zu bestimmen, ist die Auswahl auf die Schadensmodelle beschränkt. Lebensdauermodelle sind hier ausgeklammert, da in der Regel keine Ersatzdaten zur Kalibrierung zur Verfügung stehen und mangels Dokumentation der Ersatzgründe nicht zwischen technischen und betrieblichen Gründen unterschieden werden kann.

**VORHANDENE SOFTWARE UND MODELLE**

Im deutsch- und französischsprachigen Raum sind vor allem die Software *PiReM* [6] und *Casses* [7] bekannt. Weitere europäische Produkte sind *CARE-W* [8] und *AWARE-P* [9]. Die Programme *D-WARP* [10] und *I-WARP* [11] wurden in Kanada entwickelt und sind in Nordamerika weit verbreitet, *PARMS* [12] in Australien. Teilweise liegen diesen Softwareprodukten dieselben Schadensmodelle zugrunde, wie aus der Zuordnung in *Tabelle 1* hervorgeht. Die Gemeinsamkeit der vertretenen Modelle besteht darin, dass sie die Schadenswahrscheinlichkeit für individuelle Leitungen beschreiben. Dabei werden frei wählbare Einflussfaktoren wie z.B. Material, Durchmesser und Länge nach dem *Proportional-Hazards-Ansatz* (PHA)<sup>2</sup> als erklärende Variablen (auch: Kovariablen) berücksichtigt.

Die Modelle beschreiben mathematisch entweder die Zeit zwischen den Brüchen (hier: Schadenszeit-Modelle) oder die Schadenszahl in einer gegebenen Zeitperiode (hier: Schadenszahl-Modelle). Theoretisch kann jedes Leitungsschadensmodell in beiden Formulierungen ausgedrückt werden. Sehr wichtige Eigenschaften eines Modelles sind, ob es Abhängigkeiten zwi-

schen den Schäden modellieren kann und inwiefern Linkstrunkierung und selektives Überleben berücksichtigt werden.

**Schadenszahl-Modelle**

Schadenszahl-Modelle basieren auf diskreten Zählprozessen, bei denen die Schäden eines Leitungsabschnitts in Abhängigkeit des Alters gezählt werden. Es wird also die Wahrscheinlichkeit ermittelt, dass eine Leitung in einem bestimmten Alter eine bestimmte Anzahl Schäden hat (s. *Fig. 2 (B)*). Mit dem Alter nimmt die Schadenswahrscheinlichkeit häufig zu. In den betrachteten Softwarelösungen kommen der homogene und inhomogene *Poisson*-Prozess und der linear erweiterte *Yule*-Prozess (LEYP) zum Einsatz. Beim homogenen *Poisson*-Prozess ist das Basisrisiko altersunabhängig, beim inhomogenen *Poisson*-Prozess und beim LEYP veränderlich mit dem Alter.

**Schadenszeit-Modelle**

Bei den Schadenszeit-Modellen wird mit einer kontinuierlichen Wahrscheinlichkeitsverteilung die Zeit bis zum Schadenseintritt auf einem Leitungsabschnitt modelliert. Diese beschreibt entweder die Zeit vom Einbau bis zum ersten Schaden bzw. zwischen zwei Schäden (Schadenszeit-Modell Typ I) oder die Zeit vom Einbau bis zum k-ten Schaden (Typ II), siehe *Figur 2 (C)*. In den betrachteten Schadenszeit-Modellen kommen die *Weibull*-Verteilung, die *Exponential*-Verteilung und eine semi-parametrische *Exponential*verteilung zum Einsatz. Bei der *Exponential*-Verteilung ist das Basisrisiko konstant, bei den anderen veränderlich über die Zeit. Häufig wird in der Literatur bei Schadenszeit-Modellen auch von *Proportional-Hazards*-Modellen (PHM) gesprochen, auch wenn die Anwendung des *Proportional-Hazards*-Ansatzes (PHA) keine Besonderheit dieser Modelle ist. Er ist zum Beispiel auch für oben beschriebene Schadenszahl-Modelle anwendbar. Rein formell beschreibt PHM nur eine Möglichkeit, wie die Kovariablen in ein Modell einfließen.

<sup>2</sup> Die Grundidee des PHA ist, dass das Ausfallverhalten – z.B. aller Leitungen eines Wassernetzes – durch eine zeitabhängige Risikofunktion (Hazardfunktion)  $h(t)$  beschrieben werden kann, die sich aus dem «Basisrisiko» (base-rate hazard)  $h_0(t)$  und Anpassungsfaktor  $z^\beta$  für spezifische Eigenschaften zusammensetzt. Diese Anpassung führt zu einer Verformung der Risikokurve hin zu einem niedrigeren oder höheren Ausfallrisiko. Meist wird für den Einfluss des Anpassungsfaktors ein exponentieller Zusammenhang (d. h.  $e^{\alpha \cdot \beta}$ ) gewählt:

$$h(t) = h_0 \cdot e^{\alpha \cdot \beta}$$

Die darin enthaltene Kovariable  $z$  ist ein Indikator und entweder gleich 1, wenn eine Eigenschaft zutrifft (z. B. «Durchmesser < 250 mm?») und 0, wenn sie nicht zutrifft.  $\beta$  ist eine Zahl, die misst, wie stark der Einfluss ist. Das Basisrisiko kann eine konstante Zahl oder eine Funktion (z. B. *Weibull*- oder *Exponential*verteilung) sein.

In *Figur 2* beschreiben beide Modellarten ein und dieselbe Ausgangsgrösse, z. B. die in (A) dargestellte Anzahl Schäden  $N(t)$  über die Zeit  $t$ . Bei (B) Schadenszahl-Modellen wird quasi «entlang der Schadens-Achse modelliert». Zur Illustration sind drei mögliche Verteilungen für die Wahrscheinlichkeit einer Leitung, im Alter von  $t = 10, 25$  und  $40$  Jahren eine bestimmte Anzahl von Schäden ( $k$ ) zu haben, eingezeichnet. Entsprechend der Annahmen ist die Wahrscheinlichkeit einer Leitung, im Alter von  $t = 10$  Jahren mehrere Schäden (d. h. grosses  $k$ ) zu haben, deutlich

Software	Schadensmodell(e)	LT*	SÜ*	FS*	Referenz
PiReM	Schadenszeit-Modell: Semi-parametrische Exponentialverteilung	nein	nein	mittels Kovariablen	[6]
D-WARP	Schadenszeit-Modell: Exponential-Verteilung	nein	nein	mittels Kovariablen	[10]
I-WARP	Schadenszahl-Modell: Inhomogener Poisson-Prozess	nein	nein	mittels Kovariablen	[11]
CARE-W	Schadenszeit-Modell: Weibull-Verteilung ODER Schadenszahl-Modell: Poisson-Zählprozess (homogen oder inhomogen)	nein	nein	mittels Kovariablen	[8]
Casses	Schadenszahl-Modell: Linear erweiterter Yule-Zählprozess (von Engl. «Linear Extension of the Yule Process»; LEYP)	ja	ja	Ja	[7, 13]
PARMS	Schadenszahl-Modell: LEYP oder Poisson-Zählprozess	nein	nein	mittels Kovariablen	[12]
AWARE-P	Schadenszahl-Modell: LEYP oder Poisson-Zählprozess	ja (LEYP)	ja (LEYP)	ja (LEYP)	[9]

\*Spalte «LT» zeigt an, ob generell die Linkstrunkierung berücksichtigt ist und analog «SÜ» für die Berücksichtigung des selektiven Überlebens und «FS» für den Zusammenhang zwischen vorherigen und Folgeschäden

Tab. 1 Ausgewählte Modellierungssoftware und darin verwendete Schadensmodelle  
Logiciel de modélisation choisi et modèles d'endommagement qu'il utilise

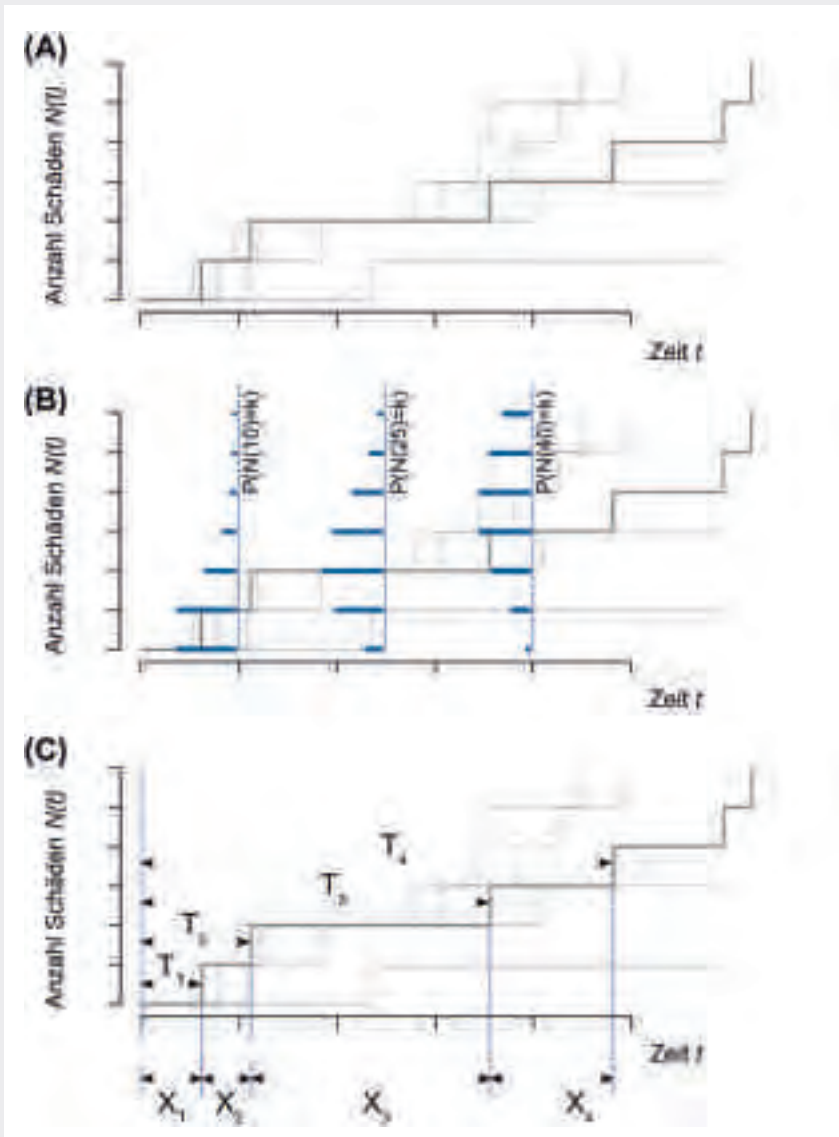


Fig. 2 Gegenüberstellung der Modellierung von Schäden in Abhängigkeit der Zeit (des Alters) bei Schadenszahl- und Schadenszeit-Modellen. (A) zeigt beispielhaft die Entwicklung der Schadenszahl einzelner Leitungen über die Zeit. Eine ausgewählte Leitung ist dunkel hervorgehoben. Die zugrunde liegenden Parameter sind frei erfunden. (B) repräsentiert die Schadenszahl-Modelle, (C) die Schadenszeit-Modelle

Modélisation de l'endommagement en fonction du temps (de l'âge): comparaison des modèles basés sur le nombre de dommages et sur leur fréquence. (A) montre la progression du nombre de dommages de certaines conduite dans le temps. Une conduite sélectionnée est mise en évidence par une couleur foncée. Les paramètres sont choisis arbitrairement. (B) représente le modèle basé sur le nombre de dommages, (C) celui sur leur fréquence

geringer als im Alter von  $t = 25$  oder  $t = 40$  Jahren. Die Modellierung bei (C) Schadenszeit-Modellen erfolgt quasi «entlang der Zeit-Achse». Beim Typ I werden die Schadenszeitpunkte  $X_i$  zeitlich versetzt modelliert (d.h.  $X_1$  - Zeit vom Einbau bis zum ersten Schaden,  $X_2$  - Zeit vom ersten Schaden bis zum zweiten Schaden usw.). Beim Schadenszahl-Modell vom Typ II sind die Verteilungen für die Schadenszeitpunkte  $T_i$  zeitlich überlappend ( $T_1$  - Zeit vom Einbau bis ersten Schaden,  $T_2$  - Zeit vom Einbau bis zweiten Schaden usw.).

#### Abhängigkeit zwischen Schäden

Aus der Auswertung vergangener Schadensdaten ist bekannt, dass ein Schaden auf einer Leitung die Wahrscheinlichkeit eines Folgeschadens in der Umgebung erhöht. Ausserdem nimmt die Zeit zwischen zwei Schäden mit ansteigender Schadenszahl erfahrungsgemäss ab. Im LEYP-Modell ist das Basisrisiko nicht nur veränderlich über die Zeit, sondern auch abhängig von vorherigen Schäden, d.h. der Einfluss vorheriger Schäden ist explizit berücksichtigt. Bei den anderen

Modellen ist das Basisrisiko schadensunabhängig, zur Berücksichtigung muss für jede Schadensordnung (d. h. erster, zweiter, dritter Schaden usw.) eine zusätzliche Kovariable definiert werden. Dies macht jedoch korrekte Prognosen sehr schwierig, da die zukünftige Schadensordnung wiederum von der Prognose abhängt.

#### Linkstrunkierung und selektives Überleben

Das LEYP-Modell ist das einzige vorgestellte Modell (Tab. 1), das sowohl Linkstrunkierung als auch selektives Überleben explizit miteinbezieht. Für die Abhängigkeit von früheren Schäden wurde ein zusätzlicher Modellparameter eingeführt. Zur Berücksichtigung des selektiven Überlebens wird ein zwei-parametriges Ersatzmodell bestimmt. Es beschreibt die altersabhängige Wahrscheinlichkeit einer Leitung, bei einem früheren Schaden bereits ersetzt worden zu sein. Entsprechend der Annahme ist die Ersatzwahrscheinlichkeit alter Leitungen bei einem Schaden demnach grösser als bei jungen Leitungen.

#### Berücksichtigung der Leitungslänge

Sofern die Länge von Leitungen nicht explizit als Kovariable berücksichtigt wird, beziehen sich die Ausfallwahrscheinlichkeit und die Schadenszahl auf die Anzahl Leitungsabschnitte. Da die Leitungslänge nachweislich einen starken Einfluss auf die Entwicklung der Schadensentwicklung haben kann, ist bei Leitungsnetzen mit sehr unterschiedlichen Leitungslängen eine Längenhomogenisierung des betrachteten Netzes empfehlenswert. Dieses gilt für alle oben beschriebenen Schadenszeit- und Schadenszahlmodelle. Eine mögliche Herangehensweise für die Homogenisierung bei vorliegenden GIS-Daten ist z. B. in Fuchs-Hanusch et al. [14] beschrieben.

#### Zusätzliche Aspekte

Neben der Analyse der bestehenden Netzinfrastruktur bieten die meisten der Softwarepakete «nur» eine Prognose des Leitungszustandes in der Zukunft. Für die Anwendung zustandsbasierter Erneuerungsstrategien, z. B. Ersatz nach dem k-ten Schaden oder Ersatz eines prozentualen Anteils des Netzes im schlechtesten Zustand, ist die Kenntnis des derzeitigen Zustands durch eine Prognose der nicht dokumentierten Schäden bis zum Beginn der Schadensaufzeichnungen wichtig. Zusätzlich erlaubt die Implementierung

in den verschiedenen Softwarepaketen derzeit keine Fortpflanzung von Unsicherheiten z. B. aus der Parameterschätzung zur Prognose der Leitungsschäden.

### DAS SWIP-SCHADENSMODELL (SWIP-PFM)

Die häufig angetroffene Datensituation Schweizer Wasserversorger sieht zusammengefasst etwa folgendermassen aus:

- kleine oder junge Netze mit einer entsprechenden kleinen Anzahl von Brüchen pro Jahr
- fehlende Datenhistorie (ersetzte Leitungen werden aus der Datenbank gelöscht)
- limitierte Beobachtungs- und Aufzeichnungszeitspanne
- viel vorhandenes Erfahrungs- und Expertenwissen

Diese Datensituation stellt alle im letzten Kapitel vorgestellten Modelle vor substantielle Probleme. Insbesondere die Linkstrunkierung und die fehlende Datenhistorie führen dazu, dass diese Modelle die Bruchhäufigkeit deutlich unterschätzen. Einzig das LEYP-Modell erfüllt die Anforderungen bezüglich der Linkstrunkierung und der fehlenden Datenhistorie. Die Parameter zur Beschreibung des selektiven Überlebens sind in der Regel nur aus sehr grossen Datensätzen zu bestimmen. Dieses erschwert oder verunmöglicht eine verlässliche Bestimmung aller Modellparameter mit kleinen Datensätzen.

Nach dem Kenntnisstand der Autoren ist in keinem der aufgeführten Datenprodukte die Fehlerfortpflanzung infolge der Unsicherheit der geschätzten Parameter vorgesehen. Aus diesen Gründen haben sie ein weiteres Modell entwickelt, das SWIP-Schadensmodell (SWIP-PFM, *Sustainable Water Infrastructure Planning-Pipe Failure Model*). Das Ziel war, möglichst viel von den lokal vorhandenen Daten profitieren zu können, aber auch Erfahrungswissen von Experten oder anderen Netzen zu berücksichtigen und dabei die Unsicherheiten der Daten und Kalibrierung in der Prognose explizit zu machen. Die statistischen Grundlagen des SWIP-PFM werden ausführlich in *Scheidegger et al.* [15] dargestellt und eine Anwendung für eine kleine Beispielgemeinde ist in *Scholten et al.* [16] zu finden.<sup>3</sup> Im Folgenden werden die aus Sicht der Autoren für die Praxis relevantesten Aspekte dargelegt.

#### Zentrale Annahmen und Eigenschaften

Das SWIP-PFM ist als Schadenszeit-Modell formuliert, in dem eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Zeit zum Schaden

<sup>3</sup> Beide Manuskripte können von der SWIP-Website heruntergeladen werden:

[www.eawag.ch/forschung/sww/gruppen/swip/watersupply/index](http://www.eawag.ch/forschung/sww/gruppen/swip/watersupply/index)

angenommen wird. Entgegen der vorgestellten Schadenszeit-Modelle (*Tab. 1*) wird zwischen der Zeit bis zum ersten Schaden und für die Folgeschäden unterschieden. *Figur 3* zeigt die im Modell verwendeten Verteilungen: *Weibull* für die Modellierung der Zeit bis zum ersten Schaden und für alle Folgeschäden eine Exponentialverteilung. Leitungscharakteristika oder Umweltbedingungen, die den Zustand beeinflussen, werden als Kovariablen berücksichtigt. Diese sind aber aus numerischen Gründen nicht, wie bei den beschriebenen Schadenszeit-Modellen, als PHM integriert, sondern es wird der Mittelwert der *Weibull*- und Exponentialverteilungen skaliert.

Bei der Kalibrierung des Modells werden sowohl die Linkstrunkierung als auch das «selektive Überleben» berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit, bei einem früheren Schaden ersetzt worden zu sein, hängt dabei von der Anzahl Schäden (und damit nur indirekt vom Alter) ab. Es sind mindestens vier Parameter zu ermitteln. Für jede Kovariable kommt ein weiterer Parameter hinzu.

#### Entwicklungsstand

Das Modell des SWIP-PFM für die Kalibrierung und Prognose vergangener bzw. zukünftiger Schäden liegt als Programmcode in der Programmiersprache und Programmierumgebung R vor und greift auf verschiedene R-Pakete zurück [17]. Beides ist unter der GNU-Lizenz frei erhältlich. Es ist eine Prototyp-Implementierung ohne grafische Benutzerführung oder Schnittstellen zu den entsprechenden Infrastrukturdatenbanken. Grundlegende Programmierkenntnisse sind deshalb notwendig.

#### Limitierungen des SWIP-PFM

Das SWIP-PFM soll die auf dem Markt verfügbaren Modelle nicht ersetzen, sondern ergänzen. Das entwickelte Modell hat einige Einschränkungen. Die zwei wichtigsten sind die Gleichbehandlung der Folgeschäden und die Invarianz der Kovariablen. Die Gleichbehandlung der Folgeschäden impliziert, dass die Leitungen nach dem ersten Schaden gleich schnell altern, d. h. die Zeit zwischen Schäden höherer Ordnung im Mittel gleich lang ist. Dies widerspricht den Beobachtungen aus Praxis und Literatur, von denen man weiss, dass die Zeit zwischen den Schäden mit höherer Ordnung abnimmt. Allerdings hat diese Vereinfachung bei nur wenig dokumentierten Schäden und kurzen Prognosezeiträumen einen eher geringen Einfluss. Dafür erleichtert die geringere Anzahl Parameter deren Schätzung. Bei der Verwendung für Netze mit einer hohen Anzahl Folgeschäden ist es ratsam, zu untersuchen, inwiefern sich die er-

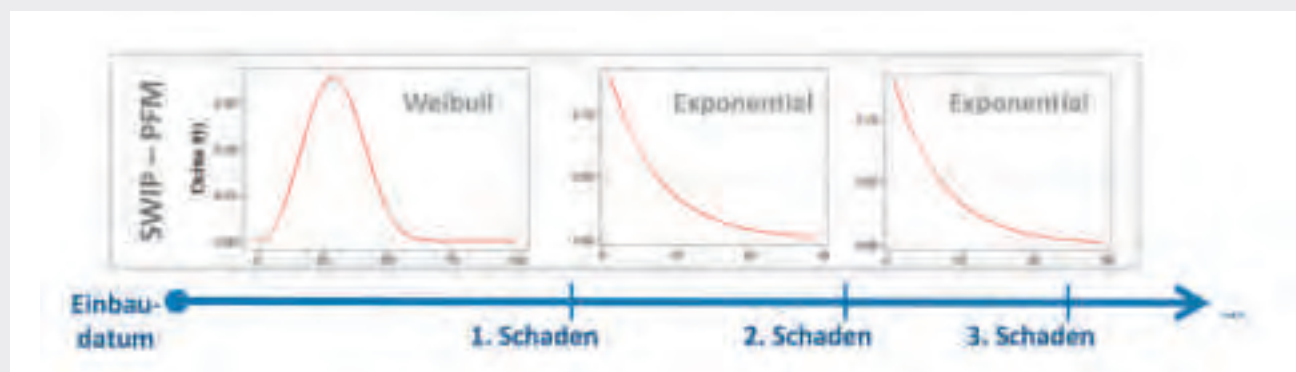


Fig. 3 Illustration der Schadensmodellierung im SWIP-PFM. Die Werte sind frei erfunden

Modélisation des dommages dans SWIP-PFM. Les valeurs sont choisies arbitrairement



mittelten Parameter der Verteilungen für Schäden höherer Ordnungen unterscheiden. Wenn diese sehr verschieden sind, lohnt es sich ggf. separate Verteilungen anzunehmen.

Zusätzlich bedarf es aufgrund der Modellstruktur einer Umrechnung um den Einfluss der Kovariablen auf die Hazardrate zu bestimmen. Das liegt daran, dass die Kovariablen beim SWIP-PFM direkt die Verteilungsparameter skalieren und nicht (wie bei den in *Tab. 1* aufgeführten Modellen) die Hazardfunktion.

## MODELLKALIBRIERUNG

Sobald die Modellstruktur feststeht, d. h. die grundlegenden Annahmen bezüglich des zu beschreibenden Ausfallverhaltens definiert sind, gilt es die Modellparameter zu bestimmen. Sie passen das Modell an die spezifischen Gegebenheiten, unter denen es eingesetzt werden soll, an. Diese Modellkalibrierung oder Parameterschätzung kann mit verschiedensten Methoden und Ansätzen gemacht werden. Sehr häufig wird eine rein datenbasierte Kalibrierung (auch frequentistische Parameterschätzung bzw. Inferenz genannt) angewandt. Hierbei werden über Optimierungsverfahren diejenigen Parameter bestimmt, mit denen das Modell am wahrscheinlichsten die beobachteten Daten widerspiegelt. Sind genügend geeignete Datenpunkte vorhanden, dann erhält man ein Modell, das in der Lage ist, das Schadensverhalten der Vergangenheit quantitativ zu beschreiben.

Am anderen Ende des Spektrums ist die expertenbasierte Kalibrierung. Dabei werden die Parameter von Experten oder anhand von Angaben aus vergleichbaren Studien festgelegt. Dafür muss in Kauf genommen werden, dass das Modell nur sehr eingeschränkt die lokale Datenlage widerspiegelt.

Die *Bayes'sche* Modellkalibrierung ist in der Lage, zwischen diesen beiden Extremen zu funktionieren. Dies bietet sich an, wenn die lokalen Daten allein nicht zur Bestimmung der Parameter ausreichen. Dabei werden sowohl das Vorwissen (z. B. von Experten oder aus anderen Versorgungsnetzen) als auch die lokalen Daten bei der Parameterschätzung berücksichtigt und anhand des Informationsgehaltes gewichtet. Dazu muss das Vorwissen zuerst als Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet werden, was nicht trivial ist [3]. Wenn keine lokalen Daten vorhanden

sind, entspricht die Kalibrierung einer rein expertenbasierten Kalibrierung. Je mehr lokale Daten vorhanden sind, desto besser ist das Modell an die lokalen Begebenheiten angepasst. Die Parameterwerte nähern sich damit mit zunehmenden lokalen Daten immer näher an eine rein datenbasierte Kalibrierung an.

Wenn die Datengrundlage alleine für ein in *Tabelle 1* gelistete Softwareprodukt nicht ausreicht, können beispielsweise weniger Kovariablen definiert werden (um die Zahl der zu schätzenden Parameter klein zu halten; z. B. Schätzung für das Gesamtnetz ohne Unterscheidung nach Materialtypen bzw. Durchmesser) oder es kann ein passenderes Modell gewählt werden, dessen Daten für die Kalibrierung ausreichen. Typischerweise wird aber in der Praxis dann eine rein expertenbasierte Kalibrierung durchgeführt. Wichtig dabei ist, die Resultate mit der entsprechenden Vorsicht zu interpretieren.

Für die typische Datenlage in der Schweiz ist die *Bayes'sche* Modellkalibrierung vielversprechend. Sie erlaubt es, das vorhandene sehr wertvolle betriebliche Wissen mit den wenigen vorhandenen Daten zu kombinieren und damit die vorhandene Information optimal zu nutzen. Alternativ kann man die Erfahrungen (Parameter) aus anderen Netzen als Vorwissen einbringen und wiederum diese mit den verfügbaren lokalen Daten ergänzen. Leider wird dieser Typ Modellkalibrierung von keinem der in *Tabelle 1* vorgestellten Softwarepaketen angeboten. Sie nutzen alle eine rein datenbasierte Kalibrierung, d. h. benötigen eine ausreichend umfassende Datenbasis. Teilweise ist auch eine expertenbasierte Kalibrierung durch Vorgabe der Parameter möglich (nicht im Detail für alle Modelle untersucht).

Das SWIP-PFM wurde ebenso mit der datenbasierten Kalibrierung für grössere Netze wie Lausanne und Zürich angewandt, als auch mit der *Bayes'schen* Kalibrierung für kleine Netze aus den Fallstudiengebieten.

## FAZIT UND AUSBLICK

Die Kenntnis des Netzzustands ist die Basis für eine faktenbasierte, nachhaltige Rehabilitationsstrategie. Um den aktuellen und zukünftigen Netzzustand und Erneuerungsbedarf zu bestimmen, sind Schadensmodelle zentrale Hilfsmittel. Die Auswahl eines geeigneten Modelles hängt primär von der gewünschten Aus-

sage wie auch von den verfügbaren Daten ab. Die Datenhaltung ist hierbei ein zentrales Element des Wissensmanagements. Je vollständiger lokale Daten vorhanden sind, desto verlässlicher ist die Prognose von Schäden (und desto solider das daraus resultierende Rehabilitationsmanagement). Die systematische Aufzeichnung von Leitungsschäden und -ersatz heute und in Zukunft ermöglicht, das historische Wissen zu erhalten und damit einem Wissensverlust (z. B. durch Pensionierungen) vorzubeugen.

## DANKSAGUNG

Wir danken unseren Praxispartnern für die grosse Unterstützung bei der Entwicklung des Modells und den Zugang zu ihren Netzdaten. Das SWIP-Projekt wurde vom Schweizer Nationalfonds Projektnr. 4061-125901 gefördert.

Vermutlich ist die Datenlage der allermeisten der knapp 3000 Wasserversorger in der Schweiz ungeeignet für die Verwendung in der verfügbaren Software und deren zugrundeliegenden Modellen. Dies sind kleine oder junge Netze mit fehlenden Datenhistorien und limitierten Aufzeichnungszeitspannen. Dafür ist an sehr vielen Orten viel Erfahrungs- und Expertenwissen vorhanden. Dieses lässt sich, mathematisch beschrieben, als wertvolles Vorwissen bei der Parameterschätzung nutzen. Für diese Situation wurde das neue Schadensmodell SWIP-PFM entwickelt. Dieses hat Limitationen wie die anderen vorgestellten Modelle auch. In Kombination mit der *Bayes'schen* Parameterschätzung ist es aber in der Lage, mit der schwierigen Datensituation der kleinen und mittleren Schweizer Versorger umzugehen. In Anbetracht der derzeitigen Implementation als reiner Programmcode ist es vermutlich weniger attraktiv für die praktische Anwendung als vorhandene Programme. Wir hoffen auf Unterstützung aus der Praxis, die an einer softwaretechnischen Umsetzung interessiert ist. Der grösste Aufwand ist aber die Beschaffung, Aufbereitung und kritische Kontrolle der Daten – eine Arbeit, die sich nicht automatisieren lässt. Unabhängig davon, welcher Ansatz gewählt wird, ist es wichtig, die Limitationen und grundlegenden Annahmen der verwendeten Modelle zu kennen, um einen informierten Entscheid treffen zu können. Eine Anwendung des SWIP-PFM



## Erfolgreicher Korrosionsschutz dank Erfahrung\* und Qualität!

### Der Topathlet



**DENSOLEN**  
Butylkautschukbänder- und Kitte  
Co-extrudiertes High-Tech Mehrschichten-Band, im kalten Zustand selbstverschweißend, für Gas- und Wasserrohre/Pipelines.

### Die Anziehende



**DEKOTEC** Schrumpfmanschetten  
Anwendungen auf kaltem (Mastic-Variante) oder auf vorgewärmtem Rohr (Hotmelt-Variante).

### Der Gestählte



**DENSOLID 2K-Polyurethan**  
Streich- oder Sprühbeschichtungen auf PU-Basis für unregelmässige Geometrien, Boden-Luft-Übergänge oder auch für Drilling- oder Pressvortrieb.

### Die Anschmiegsame



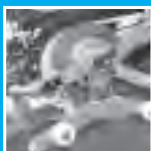
**DENSO Petrolatum**  
(Fettbänder und -Massen)  
Auf technischer Vaseline basierend. Für Rohre und unregelmässige Geometrien, wie z.B. Flansche oder Schieber.

### Der Superschlitten



**RACI Gleitkufen**  
(Generalvertretung CH)  
Rohr-in-Rohr-Anwendungen. Für sicheres und leichtes Gleiten bei gleichzeitigem Schutz der Rohrumhüllung, resp. des Korrosionsschutzes.

### Der Supporter



**Wickel- und Auftraggeräte**  
Eigene Innovationen für den Profi.

\* Das Mutterhaus der DENSOKOR feierte 2012 das 90 Jahre-Jubiläum.

**DENSOKOR AG**  
Bahnhofstrasse 36 Tel. 043 366 22 44 info@densokor.ch  
CH-5502 Hunzenschwil Fax 043 366 22 43 www.densokor.ch

auf eine «typische» Schweizer Wasserversorgung werden wir in einem separaten Folgeartikel in *Aqua & Gas* vorstellen.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] Scheidegger, A. et al. (2013): Prognosen zum Sanierungsbedarf der Schweizer Kanalisation. *Aqua & Gas*. 93(1): S. 16–20
- [2] Le Gat, Y. et al. (2011): Is the service life of water distribution pipelines linked to their failure rate? in *LESAM 2011 – Strategic Asset Management of Water and Wastewater Infrastructure*. Mülheim an der Ruhr, Deutschland: IWA International Water Association
- [3] Scholten, L. et al. (2013): Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. *Environmental Modelling & Software*. 42: S. 1–16
- [4] Scholten, L. et al. (2014): Multikriterielle Entscheidungsunterstützung zur Planung der Wasserver- und Abwasserentsorgung. *Aqua & Gas*. 94(5): S. 62–69
- [5] SVGW (2009): Statistische Erhebungen der Wasserversorgungen in der Schweiz, Betriebsjahr 2008, Schweizer Verein des Gas- und Wasserfaches: Zürich. S. 35
- [6] Fuchs-Hanusch, D. et al. (2008): *PIReM- Pipe Rehabilitation Management. Developing A Decision Support System for Rehabilitation Planning of Water Mains*. *Water Practice & Technology*. 3(1): S. 1–9
- [7] Renaud, E. et al. (2012): Using a break prediction model for drinking water networks asset management: From research to practice. *Water Science and Technology: Water Supply*. 12(5): S. 674–682
- [8] Sægrov, S. (2005): *CARE-W: computer aided rehabilitation of water networks*, ed. S. Sægrov, London: IWA Publishing
- [9] Cardoso, M.A. et al. (2012): Urban water infrastructure asset management – A structured approach in four water utilities. *Water Science and Technology*. 66(12): S. 2702–2711
- [10] Kleiner, Y.; Rajani, B. (2004): Quantifying Effectiveness of Cathodic Protection in Water Mains: Theory. *Journal of Infrastructure Systems*. 10(2): S. 43–51
- [11] Kleiner, Y.; Rajani, B. (2010): I-WARP: Individual Water Main Renewal Planner. *Drinking Water Engineering and Science*. 3(1): S. 71–77
- [12] Burn, S. et al. (2003): Asset planning for water reticulation systems – The PARMS model. *Water Science and Technology: Water Supply*. 3(1-2): S. 55–62
- [13] Le Gat, Y. (2009): Une extension du processus de Yule pour la modélisation stochastique des événements récurrents – Application aux défaillances de canalisations d'eau sous pression. Doktorarbeit, L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, ENGREF Paris. S. 121
- [14] Fuchs-Hanusch, D. et al. (2012): Whole of Life Cost Calculations for Water Supply Pipes. *Water Asset Management International*. 8(2): S. 19–24
- [15] Scheidegger, A. et al. (2013): Extension of pipe failure models to consider the absence of data from replaced pipes. *Water Research*. 47(11): S. 3696–3705
- [16] Scholten, L. et al. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*. 49: S. 124–143
- [17] R Development Core Team (2011): *A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria

### > SUITE DU RÉSUMÉ

ticle permettra de mieux comprendre les modèles existants, sans entrer trop loin dans les détails mathématiques.