

# Unterstützung der Instandhaltungsplanung von Wasserrohrnetzen mit dem Entscheidungshilfesystem PiReM

*Maintenance-Planning-Support of Water-Pipe-Networks with the Help of the Decision Support System PiReM*

H. KAINZ<sup>1)</sup>, D. FUCHS-HANUSCH<sup>2)</sup>, F. FRIEDL<sup>3)</sup>, B. KORNBERGER<sup>4)</sup> & G. GANGL<sup>5)</sup>

## Inhalt

	Seite
1. Problemstellung und Zielsetzung.....	156
2. Arbeitsprogramm und Untersuchungsschwerpunkte.....	157
2.1. PiReM Task 1 – langfristige Rehabilitationsplanung.....	157
2.2. PiReM Task 2 – mittelfristige Rehabilitationsplanung – Modellierung von Prioritäten.....	158
2.3. PiReM Task 3 – hydraulische Leistungsfähigkeit des Leitungsnetzes.....	159
2.4. PiReM Task 4 – Fallstudien – Modellierung ausgewählter Rohrnetze mit PiReM 2.3.....	160
2.5. PiReM Task 5 – vertiefende Untersuchungen zum wirtschaftlichen Rehabilitationszeitpunkt (Entscheidungsfindungsprozess Reparatur/ Rehabilitation).....	160
2.6. PiReM Task 6 – Auswirkungen der gewählten Rehabilitationsstrategie auf die Schadensentwicklung von Leitungsgruppen und des Gesamtnetzes.....	161
3. Ergebnisse.....	161
3.1. PiReM Task 1 – wissenschaftliche Untersuchungen und Softwareentwicklung.....	161
3.2. PiReM Task 2, 4 und 6 – Schadensprognosemodelle.....	163
3.3. Ergebnisse PiReM Task 3.....	168
3.4. PiReM – Software.....	169

<sup>1)</sup> Univ.-Prof. DDI Dr. techn. Dr. h.c. Harald KAINZ, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Stremayrgasse 10/1, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: kainz@sww.tugraz.at

<sup>2)</sup> DI Dr. techn. Daniela FUCHS-HANUSCH, Hydrosolutions TB Hanusch, Hubert-Hoffmann-Ring 34a, 8044 Graz, Österreich. E-Mail: fuchs@hydrosolutions.at

<sup>3)</sup> DDI Franz FRIEDL, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz, Stremayrgasse 10/1, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: friedl@sww.tugraz.at

<sup>4)</sup> DI Birgit KORNBERGER, Institut für Angewandte Statistik und Systemanalyse, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Steyrergasse 25a, 8010 Graz, Österreich. E-Mail: birgit.kornberger@joanneum.at

<sup>5)</sup> DI Dr. techn. Gerald GANGL, RBS wave GmbH, Geschäftsbereich Consulting, Kriegsbergstraße 32, 70174 Stuttgart, Deutschland. E-Mail: g.gangl@rbs-wave.de

Zusammenfassung.....	170
Literatur.....	171
Summary.....	172

## 1. Problemstellung und Zielsetzung

In der Tagespresse finden sich immer wieder Schlagzeilen über spektakuläre Wasserrohrbrüche. Es handelt sich dabei meist um Großereignisse, die zwar mit hohen Kosten verbunden sind, aber nur selten auftreten. Rohrbrüche in kleinen Leitungen treten häufig auf und werden meist rasch repariert. Dadurch kommt es in der Regel zu keinen nennenswerten Versorgungsunterbrechungen für die Kunden. Durch die große Anzahl dieser kleineren Gebrechen entstehen jährlich hohe Aufwendungen für Reparaturen, und im Rahmen der Arbeiten kommt es lokal zu einer spürbaren Beeinflussung des Straßenverkehrs. Kleine Schäden bleiben oft lange unbemerkt und verursachen beachtliche Wasserverluste.

Der Aufwand für Reparaturen soll vor dem Hintergrund einer stabilen Personal- und Finanzmittelauslastung über die Jahre im Rahmen eines unternehmensspezifisch definierten Richtwertes bleiben. Ein strategisch orientiertes und auf fundierten technischen und wirtschaftlichen Grundlagen basierendes Instandhaltungsmanagement für die Anlagen der Wasserversorgung stellt dies sicher und ist daher eine der wesentlichen Betriebsaufgaben für die alternden Versorgungsnetze im 21. Jahrhundert.

Mehr als 70 % des Gesamtanschaffungswertes eines Wasserversorgungssystems sind mit dem unterirdischen Rohrnetz „vergraben“. Der Ausbau der Netze ist heute in Europa weitgehend abgeschlossen. Der Anschlussgrad in Österreich an die öffentliche Wasserversorgung beträgt ca. 90 % (ÖVGW, 2008). Der Autor C. SKALA (2007) führt an, dass zwischen 1959 und 2006 in Österreich ca. 8,8 Mrd. € in die Wasserversorgung investiert wurden. Er schätzt, dass zwischen 2007 und 2015 1,3 Mrd. € an Investitionen anstehen. Der Großteil davon betrifft aber bereits die Rehabilitation bestehender Anlagen.

In Österreich wurde in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts mit dem Ausbau von Wasserversorgungsnetzen begonnen. Der Großteil unserer Rohrnetze wurde erst nach dem 2. Weltkrieg errichtet. Unterschiedliche Materialien und Nennweiten wurden unter verschiedensten Randbedingungen eingesetzt.

Mit dem zunehmenden Alter steigen die Rohrbrüche. Die Ursachen der Schäden und ihrer Zunahme im Wasserversorgungsnetz sind vielfältig. Unter anderem sind Altersprozesse dafür verantwortlich, die durch externe und interne Einflüsse beschleunigt werden können. In diesem Zusammenhang stellen sich viele Fragen:

- Wann ist nun der Zeitpunkt erreicht, ab dem eine weitere Reparatur wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll und eine vollständige Rehabilitation eines Abschnittes anzustreben ist?
- An welchen Strängen sollen im Netz die ersten Prioritäten gesetzt werden?
- Welche Einflüsse sind zu beachten?
- Kann die Alterung in Abhängigkeit dieser Einflüsse modelliert werden?
- Können Schadensstatistiken, kann das jahrelang angesammelte Expertenwissen einzelner Personen in eine computergestützte Entscheidungsfindung einfließen und so für nachfolgende Generationen und Wasserversorger mit jüngeren Netzen genutzt werden?

- Welche Daten hinsichtlich Bestand und Zustand der Netze und der darauf wirkenden Einflüsse sind verfügbar?
- Welche Daten müssen erhoben werden, um den Entscheidungsfindungsprozess zu optimieren?

Im Projekt „Pipe Rehabilitation Management – PiReM“ im „Kompetenznetzwerk Wasserressourcen und deren Bewirtschaftung“ (WATERPOOL) hat ein interdisziplinäres Forschungsteam aus TechnikerInnen, StatistikerInnen und WirtschaftlerInnen in Kooperation mit drei großen Wasserversorgungsunternehmen diese Problematik behandelt. Ziel war, ein wissenschaftlich fundiertes und praxistaugliches computergestütztes Entscheidungshilfesystem zu entwickeln.

## 2. Arbeitsprogramm und Untersuchungsschwerpunkte

Das Projekt PiReM wurde in sechs Aufgabenbereiche gegliedert, die zeitlich und inhaltlich aufeinander folgende Teilprobleme zum Inhalt hatten. Jede dieser Aufgaben wurde nach Fertigstellung der Forschungsergebnisse softwaretechnisch umgesetzt und sofort in der Praxis durch die Wirtschaftspartner Graz AG Wasser, Linz AG Wasser und Wasserwerk Villach getestet.

Die Teilergebnisse der einzelnen Aufgaben wurden in Workshops präsentiert und zur Diskussion gestellt. Dabei wurden unterschiedliche Kenntnisse und Erfahrungen zwischen den PraktikerInnen und WissenschaftlerInnen ausgetauscht. Dieser intensive Kommunikationsprozess hat wesentlich zum Erfolg des Projektes beigetragen.

### 2.1. PiReM Task 1 – langfristige Rehabilitationsplanung

Der Schwerpunkt in Task 1 lag auf der Auseinandersetzung mit der Thematik „Entwicklung langfristiger Rehabilitationsstrategien zur Unterstützung von Budgetplanungen“ unter Anwendung von Alterungsmodellen und Miteinbeziehung makroökonomischer Überlegungen. Das vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau im Rahmen einer Dissertation (D. FUCHS, 2001) entwickelte Decision Support System „Pipe Rehabilitation Planning System – PiReP“ diente als Basis.

#### **Datenaufbereitung bei den Wasserversorgungsunternehmen, Datenimport und Verifizierung der aktuellen Rehabilitationsstrategie**

Am Beginn des Projekts wurde definiert, welcher Datenumfang vor allem hinsichtlich Bestand und Zustand der Netze vorhanden bzw. für eine statistisch fundierte Modellierung zwingend erforderlich ist. Zur besseren Anwendbarkeit stochastischer Modelle wurde angestrebt, mit vertretbarem Aufwand zusätzliche Informationen zu erheben und aufzubereiten. Ziel dieser Untersuchung war ein erster Kompetenzaufbau bei den Wasserversorgern hinsichtlich ihrer Entscheidungsprozesse für Reparatur- bzw. Rehabilitationsstrategien und der ziel- und aufgabenorientierten Leitungsdokumentation.

#### **Makroökonomische Modellierung von Reinvestitionen zur Abschätzung von volkswirtschaftlichen Auswirkungen**

Ein regionalökonomisches Modell wurde erstellt bzw. an die bestehende Fragestellung angepasst, welches die makroökonomischen Auswirkungen von positiven externen Nachfrageschocks abbilden kann, wie sie ein Rohrleitungsnetzrehabilitationspro-

gramm darstellt. Die Adaptierung eines bestehenden regionalökonomischen Modells auf das gegenständliche Problem wurde in Kooperation von JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Institut für Technologie- und Regionalpolitik, und Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Volkswirtschaftslehre, bearbeitet. Insgesamt 32 Wirtschaftssektoren werden darin abgebildet.

Soweit verfügbar, wurden auch die aus individuellen Rohrleitungsnetzrehabilitationsprogrammen resultierenden regionalen Nachfragevektoren erhoben. Es wurde die Modellkalibrierung und eine Abbildung des Status quo vorgenommen. Damit können in Zukunft die volkswirtschaftlichen Auswirkungen für Rehabilitationsprogramme ermittelt werden.

Als Grundlage der Berechnungen wurden von den Wirtschaftspartnern Graz AG Wasser, Linz AG Wasser und Wasserwerk Villach Investitionsdaten der letzten drei Jahre erhoben. Diese wurden in die Bereiche eigene Leistungen (Bau), Fremdleistungen (Planung, Bauabwicklung, Abrechnung) und Materialkosten (Kunststoff, Metall) aufgliedert (G. GANGL, 2006).

### **Stochastische Simulation und Einsatz von Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsmodellen**

Mit den erhobenen Daten wurde die Methode zur Einteilung des Wasserrohrnetzes in homogene Gruppen anhand beobachteter Ausfallraten und den Variablen wie Material, Durchmesser, Bodenbeschaffenheit oder Verlegejahr auf statistisch fundierter Grundlage weiterentwickelt. Die Untersuchungen wurden vom Institut für Angewandte Statistik und Systemanalyse der JOANNEUM RESEARCH durchgeführt.

Die Anwendung verschiedener Lebensdauermodelle und die Entwicklung einer Auswahlmethode für die „beste“ Verteilfunktion zur Abbildung der Alterung einzelner Rohrgruppen wurden untersucht.

Ziel war die Ermittlung der statistisch am besten an die Daten angepasste Lebensdauerverteilung je Rohrgruppe, mit der Angabe von Konfidenzintervallen zur Abschätzung der Sicherheit der berechneten Ausfallrate. Daraus wurde die Berechnung der Ausfallrate abgeleitet.

### **Softwaretechnische Implementierung der Forschungsergebnisse aus Task 1 und Praxisanwendung der Software PiReM**

Im Anschluss an die oben angeführten Untersuchungen wurden die erzielten Ergebnisse in eine Software implementiert. Danach wurden Praxistests bei den Wirtschaftspartnern durchgeführt. Diese Tests ermöglichten eine Verifizierung der Praxistauglichkeit der Forschungsergebnisse. Diese Praxistests und Evaluierungen führten bei den Wirtschaftspartnern zu einem umfassenden Überblick und tiefen Einblick in den Zustand ihres Rohrnetzes.

## **2.2. PiReM Task 2 – mittelfristige Rehabilitationsplanung – Modellierung von Prioritäten**

### **Untersuchungen zur Anwendbarkeit unterschiedlicher Schadensprognosemodelle**

Die Schadensprognose in Abhängigkeit unterschiedlicher Rahmenbedingungen stellt den Schwerpunkt für die Beurteilung der Einzelleitungen hinsichtlich der Entscheidungsfindung Reparatur oder Rehabilitation dar. In Abhängigkeit von Rohreigenschaften sowie inneren und äußeren Einflüssen auf die Leitungen wurden unterschiedliche Schadensprognosemodelle angewendet, verglichen und auf ihre Einsetzbarkeit für die genannte Problemstellung überprüft.

## **Untersuchungen zum Einfluss externer Faktoren und wirtschaftlicher Einflussfaktoren auf die Ermittlung des optimalen Rehabilitationszeitpunktes**

Es wurden nicht nur reine Schadensbehebungskosten in die betriebswirtschaftlichen Überlegungen zur Ermittlung des optimalen Rehabilitationszeitpunktes einbezogen, sondern die wirtschaftlichen Auswirkungen eines Leitungsschadens ganzheitlich bewertet (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a). Zusätzlich wurden Korrelationen zwischen externen Einflüssen wie Straßenbaumaßnahmen, Frost-Tau-Wechsel oder Streustromeinflüssen und Schadensereignissen untersucht.

### **Ableitung von Standardleitungsgruppen**

Ziel war es, speziell für die Anwendung von Alterungsprognosen an Netzen mit keinen oder nur wenigen schadenstatistischen Aufzeichnungen, Standardparameter für eine Modellierung zur Verfügung zu stellen. Zu Beginn galt es daher, die Vergleichbarkeit der Netze Graz, Linz und Villach und ihrer Rohrtypen zu untersuchen. Darauf aufbauend wurde für vergleichbare Rohrtypen erhoben, ob Gemeinsamkeiten im Alterungsverhalten ableitbar sind. Dies geschah bereits unter Anwendung der Software PiReM 2.1.

### **Ermittlung des optimalen Rehabilitationszeitpunktes für Trinkwasserleitungen und softwaretechnische Implementierung**

Für die Ermittlung des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes wurde, abgeleitet aus den in den vorangestellten Teilschritten bearbeiteten Fragestellungen, ein geeignetes Modell aufgebaut, welches sämtliche relevanten Kostenfaktoren zum wirtschaftlich orientierten Vergleich bei weiterem Betrieb der alten Leitung in Relation zum Neubau der Leitung berücksichtigt.

Schadens- und Rehabilitationskosten der Vergangenheit bei den beteiligten Wasserversorgern wurden erhoben und näher analysiert. Eine Einteilung in homogene Gruppen hinsichtlich Schadens- und Rehabilitationskosten wurde für diese Fragestellung durchgeführt.

Das Modell berücksichtigt erhöhte Betriebskosten infolge von Wasserverlusten, erhöhte Aufwendungen für die Netzwartung bei alten Leitungen, soziale Kosten und Einsparpotentiale durch Baustellenkoordination. Auch allfällige Förderungen können einbezogen werden.

In einer Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss auf das Ergebnis bei Berücksichtigung der genannten Faktoren und Rahmenbedingungen untersucht.

## **2.3. PiReM Task 3 – hydraulische Leistungsfähigkeit des Leitungsnetzes**

Neben der Abschätzung des Schadenpotentials ist für die Rehabilitationsplanung auch die hydraulische Leistungsfähigkeit des Leitungsnetzes ein grundlegendes Entscheidungskriterium.

Im Zuge dieses Teilprojektes wurde das bestehende Rohrleitungsnetz des Wasserwerkes Villach auf die derzeitigen hydraulischen Anforderungen überprüft. Zusätzlich wurde die zukünftige Entwicklung des Versorgungsnetzes (in Abstimmung mit der Stadtplanung) berücksichtigt. Mittels einer Szenarienanalyse wurden die kurz-, mittel- und langfristigen Anforderungen an das Rohrnetz dargestellt. Die Ergebnisse können nunmehr in die Sanierungs- bzw. Erneuerungsplanung Eingang finden und zu einer Veränderung der Priorität führen.

Beispielsweise wurde überprüft, ob alle Teile des Versorgungsgebietes bei Ausfall einzelner wichtiger Netzteile entsprechend versorgt werden können. Aus den Ergebnissen wurden Verbesserungsvorschläge und Optimierungsmaßnahmen ausgearbeitet.

Die für die Rehabilitationsplanung relevanten Ergebnisse aus der hydraulischen Berechnung wurden in die Rehabilitationssoftware PiReM 2.3 implementiert. Dadurch wird die Erneuerungsdringlichkeit von Leitungsabschnitten zukünftig auch durch die hydraulischen Bedingungen bestimmt.

#### **2.4. PiReM Task 4 – Fallstudien – Modellierung ausgewählter Rohrnetze mit PiReM 2.3**

Die in den Tasks 1 bis 3 entwickelte Software PiReM 2.3 wurde anschließend anhand der Wasserrohrnetze der Salzburg AG, der Linz AG Wasser und des Wasserwerkes Villach vertiefend getestet. Die wesentlichen Teiluntersuchungen der Fallstudien beinhalten die Bereiche

- Datenerhebung und Datenbankaufbau,
- Auswertung der Schadensentwicklung,
- Standardleitungsgruppen,
- Alterungsprognose,
- wirtschaftlich optimaler Rehabilitationszeitpunkt,
- Definition von Prioritäten (Bewertungssystem).

Dadurch wurden allfällige Defizite der Software frühzeitig erkannt, um diese noch im Rahmen des Projektes durch zusätzliche Programmierschritte beheben zu können.

#### **2.5. PiReM Task 5 – vertiefende Untersuchungen zum wirtschaftlichen Rehabilitationszeitpunkt (Entscheidungsfindungsprozess Reparatur/Rehabilitation)**

Ziel war die Entwicklung eines Entscheidungshilfetools Reparatur/Rehabilitation in PiReM auf Basis des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes, Bezug nehmend auf technisch wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Wasserversorgers bzw. von Teilnetzen. Die signifikanten Einflussparameter auf den wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunkt waren in Abhängigkeit von technisch/wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu ermitteln.

Zu den wichtigsten Parametern zählen:

- Betriebskosten (Energiekosten durch Wasserverluste, erhöhte Kosten für Spülungen usw.) unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Pumpkosten, Wasseraufbereitungskosten/m<sup>3</sup>),
- Schadensrisiko des Einzelabschnittes,
- Rahmenbedingungen Kosten/Baupreise generell (Einsparpotentiale Rehabilitation – Baustellenkoordination),
- Rehabilitationslänge (Ermittlung der optimalen Länge des zu tauschenden Teilabschnittes),
- Schadensprognose (Vergleich verschiedener Modelle, Einfluss Datenbasis usw.).

In verschiedenen vertiefenden Analysen wurden die signifikanten Einflussparameter abgeleitet, wie z. B.

- Detailanalyse und Definition des von Schäden betroffenen Abschnittes (vertiefende GIS-Analysen, Rohrproben),
- Trübung – Ursachendefinition (Fließgeschwindigkeit, Ablagerung usw.).

Das Verfahren zur Ermittlung des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes war entsprechend weiterzuentwickeln und in die Software PiReM zu implementieren.

## **2.6. PiReM Task 6 – Auswirkungen der gewählten Rehabilitationsstrategie auf die Schadensentwicklung von Leitungsgruppen und des Gesamtnetzes**

Ziel ist die Prognose der Entwicklung der Schadensrate (bzw. Schadenskosten) von Leitungsgruppen und des Gesamtnetzes in Abhängigkeit von den gewählten jährlichen Rehabilitationsprogrammen (Szenarien bzw. Prioritäten).

Aus den genannten Zusammenhängen der Vergangenheit zwischen Rehabilitation und Schadenshäufigkeit wird das Verhalten der Entwicklung der Schadensrate in Abhängigkeit vom Rehabilitationsprogramm abgeleitet bzw. kalibriert.

Eingangs werden dazu unterschiedliche Ansätze zur statistischen Modellierung der Schadensraten untersucht. Die Entwicklung der Schadensrate wird in Abhängigkeit von Rehabilitationsstrategien und unter der Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen, die neben leitungsspezifischen Merkmalen (Durchmesser, Material usw.) auch lokale Gegebenheiten (Bodenbeschaffenheit, Lage usw.) umfassen können, modelliert und prognostiziert.

Verschiedene Modellansätze sowohl parametrischer als auch semi-parametrischer Natur kommen für diese Problemstellung in Frage. Die Vor- und Nachteile der Modelle werden untersucht und auf ihre Anwendbarkeit hin überprüft. Die Berücksichtigung mehrerer Schäden an einer Leitung erfordert die Anwendung von komplexen Modellen. Untersucht werden Modelle, die einen Zufallseffekt beinhalten (so genannte Frailty-Modelle) und multivariate Lebensdauermodelle. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll ein Modell gefunden werden, das einerseits die Entwicklung der Schadensraten hinreichend gut beschreibt und andererseits nicht zu komplex ist, um in die Software PiReM eingebunden werden zu können.

Durch die Implementierung der Untersuchungsergebnisse in einem weiteren Programmierschritt wird dem Benutzer ermöglicht, die Auswirkungen seiner Rehabilitationsentscheidung auf das Schadensverhalten im Rohrnetz zu modellieren.

## **3. Ergebnisse**

### **3.1. PiReM Task 1 – wissenschaftliche Untersuchungen und Softwareentwicklung**

#### **Makroökonomische Untersuchungen**

Die erhobenen Daten bei den Wirtschaftspartnern wurden auf Basis der jeweiligen Einwohnerzahlen und deren Verhältnis zur gesamtösterreichischen Bevölkerung hochgerechnet. Mit diesen Werten wurden die Berechnungen im Austrian Water Management Model (AWMM; D. KLETZAN et al., 2004), einem Modell nach der Methode des Computable General Equilibriums, welches die komplexen Zusammenhänge von regionalen und überregionalen Einflussfaktoren berücksichtigt, durchgeführt.

Mittels dieses Modells konnte bestimmt werden, welchen regionalen Wertschöpfungszuwachs die Gesamtinvestitionen in Rohrleitungssysteme erbringen. Die Aufwendungen der Investitionen wurden in ihrer Struktur so gewählt, wie sie in Linz, Graz und Villach in Beispieljahren durchgeführt wurden. Der Nettowertschöpfungseffekt ist wesentlich

von der konjunkturellen Lage abhängig. Es wurden daher Parameter der Verlinkung zwischen Investitionsvolumen und regionalökonomischem Effekt für zukünftige Anwendungen sowohl in Zeiten wirtschaftlichen Aufschwungs wie auch der Rezession ermittelt. Das Ergebnis wurde als Unterstützungsmodul „makroökonomische Auswertung“ in der Software PiReM implementiert.

### Analyse von Lebensdauermodellen

Für das Grazer Wasserrohrnetz wurden für die beiden Materialgruppen Asbestzement und Grauguss beispielhaft geeignete Unterteilungen der Leitungen in homogene Gruppen nach Durchmesser untersucht. Die Modellierung der Lebensdauer erfolgte unter Berücksichtigung dieser Gruppierung anhand der WEIBULL-, der Logistik- und der Lognormal-Verteilung.

Im Fall von Asbestzementleitungen wurden die vorliegenden Daten am besten durch ein Lebensdauermodell angepasst, das auf einer logistischen Verteilung basiert, mit einer Einteilung in drei Nennweitengruppen und einem zusätzlichen zeitlichen Einflussfaktor, der die beiden Weltkriege berücksichtigt.

Eine Modellierung der Graugussleitungen wurde mit der Lognormal-Verteilung (Fig. 1) durchgeführt und eine Gruppierung in fünf Nennweiten sowie eine zeitliche Unterteilung bestimmt.

In die Software PiReM wurde nun ein Statistikmodul integriert, um die Gruppeneinteilung und die Modellierung der Lebensdauer für Rohrleitungsnetze oder Teile davon zu ermöglichen. Graphische Tools wie z. B. Boxplots oder Quantile-Quantile-Plots helfen dem Anwender bei seiner Entscheidungsfindung. Als Lebensdauerverteilungen stehen nun zusätzlich zur HERZ-Funktion die WEIBULL-, Logistik- oder Lognormal-Verteilung zur Verfügung.

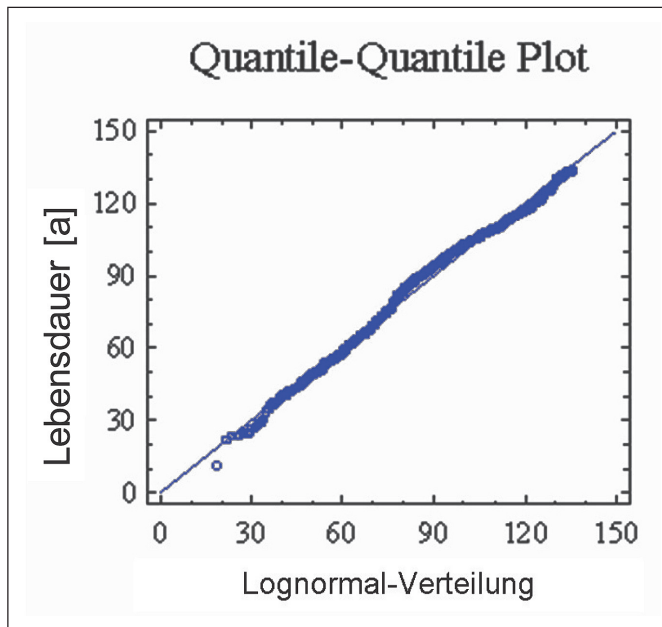


Fig. 1: Quantile-Quantile-Plot für Graugussrohre in Graz.  
Quantile-Quantile-Plot for cast-iron pipes in Graz.



### 3.2. PiReM Task 2, 4 und 6 – Schadensprognosemodelle

Eine Vorhersage des Erstschadens ist nur schwer möglich, eine Prognose der Entwicklung von Folgeschäden lässt sich jedoch mathematisch beschreiben. Aus diesem Grund wurde als Grundlage für die mittelfristige Rehabilitationsplanung die Schadensfolge an Trinkwasserleitungen näher analysiert (G. GANGL et al., 2007a). Die Untersuchungen haben gezeigt, dass jene Zeitperiode mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit definiert werden kann, in der der jeweilige Folgeschaden auf einem Leitungsabschnitt auftritt. Anhand der Daten der Wasserversorgungsunternehmen in Graz und Linz konnte in Abhängigkeit des Rohrmaterials der zeitliche Verlauf von Folgeschäden (Fig. 2) an Trinkwassernetzen berechnet werden (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

Das Modell ist so aufgebaut, dass gängige Schadensfunktionen (Gamma, WEIBULL, Exponential) dem zeitlichen Verlauf der Folgeschäden angepasst werden. Durch die mathematische Definition der Funktionen lässt sich die Zeitperiode in Abhängigkeit der definierten Eintrittswahrscheinlichkeit berechnen (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007c).

Die Auswertungen fließen direkt in die wirtschaftliche Bewertung einer Leitung mit ein. Somit kann anhand fundierter statistischer Prognosen und einer Hinterlegung mit entsprechenden Schadenskostendaten eine vorausschauende Rehabilitationsplanung durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt wurden die Rohrnetze bzw. auch nur Teile von Rohrnetzen getrennt betrachtet, da es noch offene Fragen bezüglich Datenqualität zu beantworten gab.

Die bisherige Analyse der Folgeschäden für ausgewählte Rohrnetzteile hat gezeigt, dass die Zeitspanne zwischen den einzelnen Schäden einer rechtsschiefen Verteilung folgt (Fig. 3). Verstärkt wird das Bild durch die oft relativ hohe Anzahl an Fällen, in denen der Folgeschaden im selben Jahr auftritt. Eine Diskussion mit den Wirtschafts- und Forschungspartnern führte zur Erkenntnis, dass diese Fälle gesondert zu untersuchen sind.

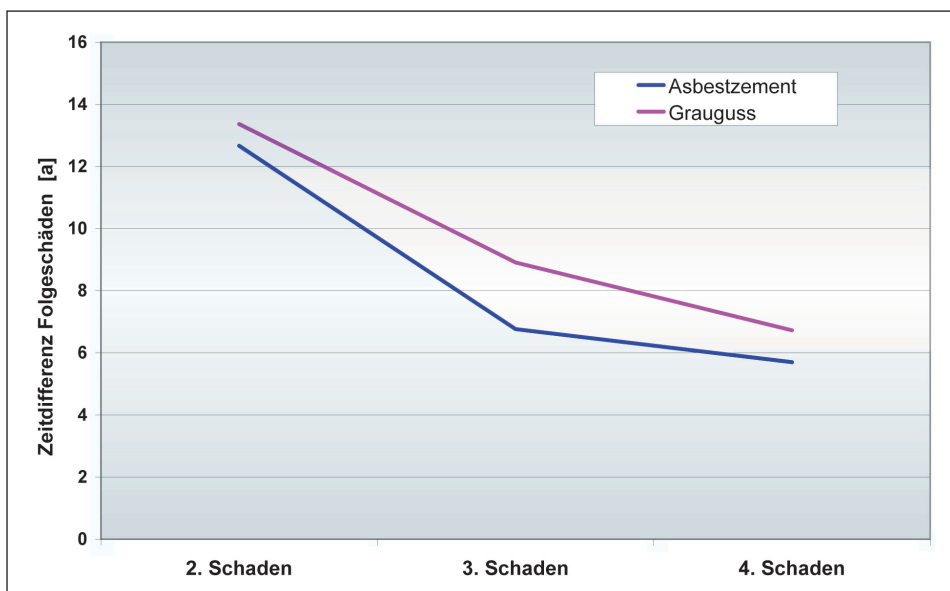


Fig. 2: Verlauf der Zeitdifferenz der Folgeschäden am Beispiel Graz (G. GANGL, 2007b).  
Characteristics of time lag of subsequent damages in Graz (G. GANGL, 2007b).

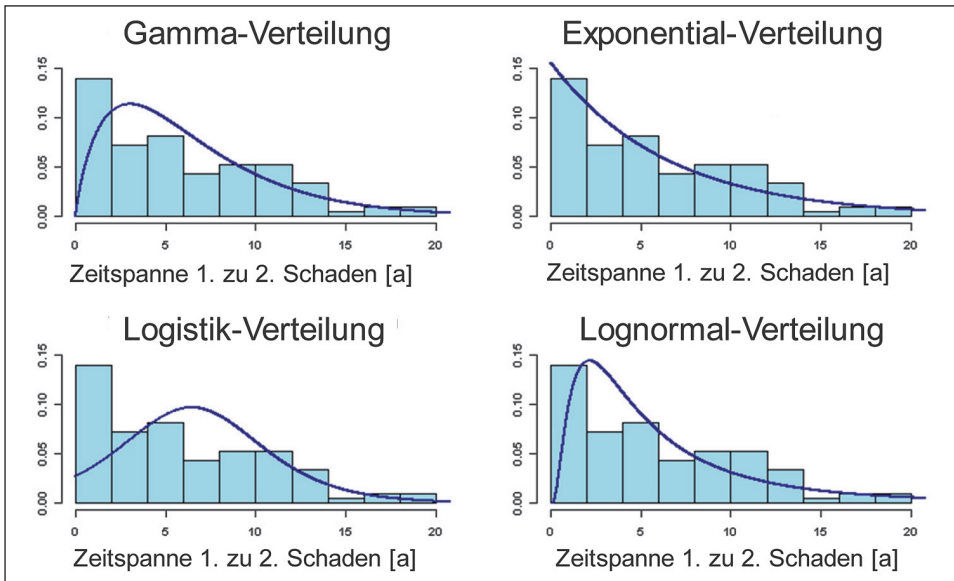


Fig. 3: Verteilung der Zeitspanne zwischen Erst- und Zweitschaden am Beispiel Villach.  
*Distribution of the period of time between first and second damage in Villach.*

Unter den schiefen Verteilungen erwies sich die Verwendung der Lognormal-Verteilung für die Modellierung des Folgeschadens als besonders geeignet.

Mit Hilfe eines geeigneten Modells soll zukünftig entschieden werden, welche leitungs- und umfeldspezifischen Merkmale einen wesentlichen Einfluss auf ein erhöhtes Risiko eines Folgeschadens haben.

Ein erster Blick auf die Zeitspanne zwischen zwei Schäden in Abhängigkeit von der Anzahl an bereits reparierten Schäden lässt vermuten, dass die Zeitspanne geringer wird, je mehr Schäden an einer Leitung bereits aufgetreten sind.

Nach Abschluss aller erforderlichen Datenaufbereitungsschritte wurde die Analyse nun auf alle vorhandenen Rohrnetze ausgeweitet. Eine weitere Aufgabe ist anschließend die Betrachtung der Schadensratenentwicklung in Abhängigkeit von den Rehabilitationsmaßnahmen. Anhand der Wasserrohrnetze von Graz, Linz, Salzburg und Villach soll ein stabiles Modell gefunden werden, das die Schadensrate unter Berücksichtigung leitungspezifischer und Umfeld bezogener Merkmale geeignet beschreibt.

Derzeit ist in der Software PiReM ein parametrischer Ansatz basierend auf der WEIBULL-, Logistik- und Lognormal-Verteilung ohne eine spezielle Berücksichtigung der Folgeschäden realisiert. Eine der Aufgaben ist es, das Auftreten von Folgeschäden näher zu untersuchen und in die Schätzung der Schadensrate mit einfließen zu lassen. Die in der Dissertation von G. GANGL (2008) bereits angestellten Überlegungen zur Analyse von Folgeschäden dienen hierbei als Basis zur Entwicklung einer geeigneten Methode zur Abschätzung des Schadenverhaltens einer Wasserleitung.

Die Modellierung des Erstsadens kann mit einem parametrischen Ansatz oder mit einem semi-parametrischen Ansatz von D. R. COX (1972), der auch von G. GANGL (2008) angewendet wurde, erfolgen. Die zusätzlichen Untersuchungen über die Folgeschäden sollen Aufschluss über eine geeignete Gewichtung der Schadensrate in Abhängigkeit wesentlicher Einflussgrößen geben.

Die Verwendung von Modellen mit Zufallseffekten – so genannten Frailty-Modellen – wird ebenfalls in Betracht gezogen. Welche Methode für diese hier vorliegende Art der Anwendung besonders brauchbar bzw. zielführend ist, ist noch Gegenstand von Untersuchungen.

### Ausgewählte Ergebnisse zu Einflussfaktoren auf Rehabilitationsentscheidungen

Im Falle eines Rohrbruchs und einer nachfolgenden Reparatur wird der innerstädtische Verkehr beeinflusst, es kann je nach Verkehrsbelastung zu Staubildung kommen. Ziel jedes Infrastrukturanbieters sollte es sein, diese Beeinträchtigung so gering wie möglich zu halten (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

Ist es möglich, die durch die Baumaßnahme verursachten Fahrzeitverzögerungen mit entsprechenden Kostenansätzen zu versehen, können auch volkswirtschaftlich verursachte Staukosten als wirtschaftliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden. In den Analysen wurden die Lastfälle „Sperrung eines Fahrstreifens“ und „Einengung eines Fahrstreifens“ untersucht, je nachdem wo die Trinkwasserleitung verlegt ist. Auf Basis der Verkehrsdaten (jährlich durchschnittlich täglicher Verkehr – JDTV) des Grazer Umweltamtes sowie der Tagesganglinie des Verkehrs in Graz konnten unterschiedliche Szenarien berechnet werden. Die Analysen wurden sowohl mit der Verkehrsmodellierungssoftware VISSIM (multimodale Verkehrssimulation; PTV AG, 2006) als auch mit dem Formelwerk aus dem Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen HBS 2001 (FGSV, 2002) durchgeführt (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

Dabei hat sich gezeigt, dass in Abhängigkeit der täglichen Verkehrsstärken zum Teil massive Einflüsse auf den städtischen Verkehr wirken. Umgelegt mit entsprechenden Kostenansätzen (Fig. 4) kann hier mit einer Erhöhung der Gesamtkosten eines Schadens von 100 % und mehr gerechnet werden (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

Im Rahmen einer Diplomarbeit (F. FRIEDL, 2007) wurde der Einfluss der Verkehrsbelastung auf Trinkwassernetze untersucht. Ziel dabei war aufzuzeigen, ob die sich ändernde innerstädtische Verkehrsbelastung auf die in 1,5 m Tiefe verlegten Trinkwasserleitungen einen Einfluss hat. Die Untersuchungen wurden sowohl mit dem Finite-Elemente (FEM)-Programm PLAXIS (Version 8.4.0.1003) als auch mit der Software zur ÖNORM B 5012 durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die derzeit maximal zulässige Verkehrsbelastung nach der Straßenverkehrsordnung die zulässigen Sicherheiten der verlegten Rohrleitungen nicht überschreitet.

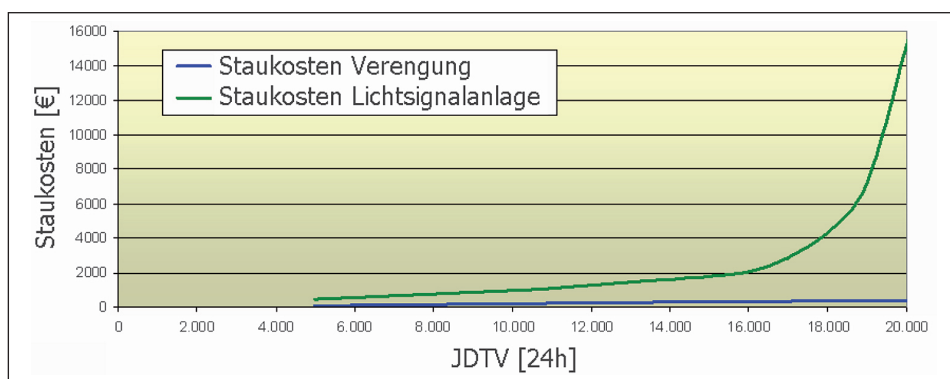


Fig. 4: Verlauf der eintägigen Staukosten in Abhängigkeit von Straßentyp und jährlich durchschnittlichem täglichem Verkehr (JDTV) (G. GANGL, 2007b).

Characteristics of the one-day social costs against type of street and average daily traffic volume (JDTV) (G. GANGL, 2007b).

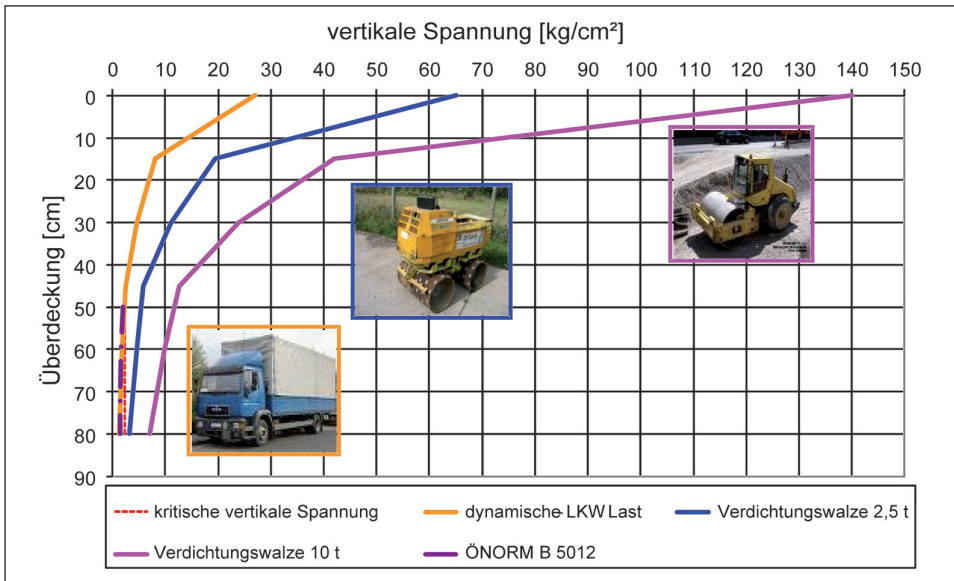


Fig. 5: Verlauf von Vertikalspannungen im Bauzustand bei 80 cm Überdeckung der Leitungszone für den Leitungstyp Asbestzement DN 125 (F. FRIEDL, 2007).

Characteristics of vertical pressure in the state of building with 80 cm of earth-covering for the pipe-material asbestos-cement with a diameter of 150 mm (F. FRIEDL, 2007).

Zusätzlich wurde der Lastfall Straßenneubau berechnet, der aufgrund der Erfahrungen in den Wasserwerken vermehrt zu Leitungsbrüchen geführt hat.

Die Berechnungen für den Leitungstyp Asbestzement DN 125 (Fig. 5) haben gezeigt, dass im Falle eines Straßenneubaus, inklusive Erneuerung des Straßenunterbaus, die Gesamtsicherheit unter dynamischer Verdichtungsbelastung für diesen Leitungstyp nicht mehr eingehalten wird. Bei einer Überschreitung der Sicherheit muss es nicht sofort zu einem Leitungsbruch kommen, die Lebensdauer wird jedoch beeinflusst. Plant der Straßenerhalter eine Generalsanierung, liegt dem Wasserversorgungsunternehmen somit ein weiteres Entscheidungskriterium vor, eine Leitung in ein Rehabilitationsprogramm aufzunehmen (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

### Ergebnisse Standardleitungsgruppen

Die Wasserrohrnetze der Projektpartner haben viele strukturelle Gemeinsamkeiten. In allen drei Netzen wurden sämtliche über die Jahre entwickelten Rohrmaterialien wie Grauguss, Asbestzement, Stahl, Duktulguss und Kunststoff eingebaut (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007b). Bei einer Gegenüberstellung der Verlegeperioden einzelner Rohrtypen im Detail konnte eine gute Vergleichbarkeit der Netze festgestellt werden. Im Speziellen wurden Grauguss, Stahl, PVC und Duktulguss-alt hinsichtlich Gemeinsamkeiten im Alterungsverhalten untersucht.

Vernachlässigt wurden neue Gruppen, an denen noch kein Schadensaufkommen bemerkbar ist. Hier können für die Lebensdauerbandbreiten Herstellerangaben verwendet werden, wie dies schon in der Software PiReP (D. FUCHS, 2003) umgesetzt wurde. Asbestzement wurde nur in Graz im entsprechenden Ausmaß verlegt und wurde daher nicht näher analysiert. Figur 6 zeigt die aus dem Datenpool Graz und Villach abgeleitete Ausfallrate für die Leitungsgruppe PVC  $\geq 150$  (Durchmesser  $\geq 150$  mm).

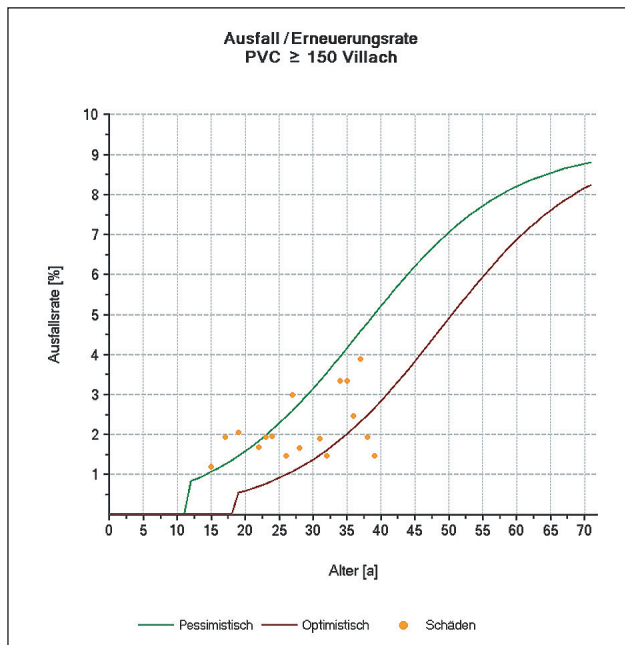
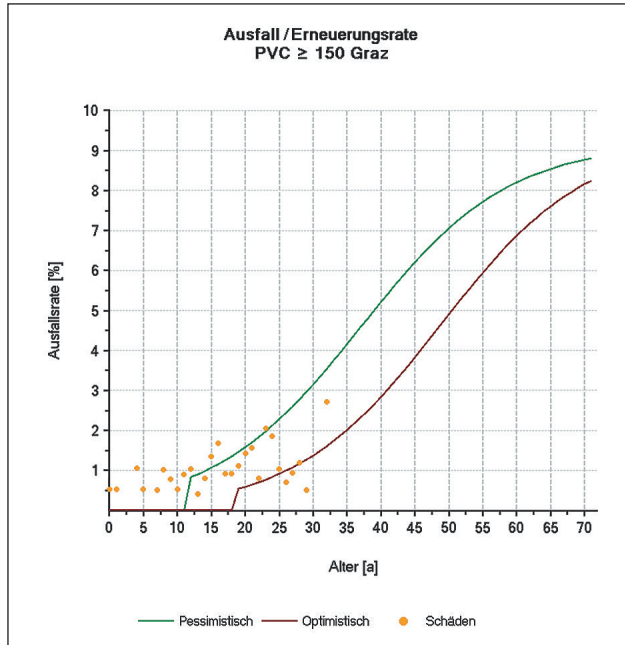


Fig. 6: Schadensdaten und Ausfallrate für Standardleitungsgruppe PVC  $\geq 150$  (Durchmesser  $\geq 150$  mm) (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).  
 Burst-information and failure rate for the standard-pipe-group PVC with a diameter  $\geq 150$  mm (D. FUCHS-HANUSCH et al., 2007a).

Eine Verifizierung bzw. Überarbeitung von Standardleitungsgruppen ist eine laufend zu wiederholende Aufgabe. Weiterführende Auswertungen mit Daten anderer Netze können die Ergebnisse weiter verfeinern. Bei der Vermarktung von PiReM wird angestrebt, die anonymisierte Nutzung der Rohnetzdaten der Kunden für wissenschaftliche Untersuchungen zu vereinbaren.

### **Modellierung des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes**

Zur Ermittlung des wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunktes von Wasser-verteillleitungen sind verschiedene Verfahren in der Literatur zu finden (U. SHAMIR & C. D. D. HOWARD, 1979, S. PARK & G. V. LOGANATHAN, 2002), welche meist auf der Kostenbarwertmethode aufbauen. Es werden die Betriebs- und Reparaturkosten, die auf die in Betrieb befindliche Leitung zukünftig anfallen werden, den Rehabilitationskosten für einen zu definierenden Betrachtungszeitraum (z. B. 25 Jahre Abschreibungsdauer) gegenübergestellt.

Im Projekt wurde ein Modell entwickelt, das für alle Leitungen, an denen bereits Schäden aufgetreten sind, für die nächsten fünf bis zehn Jahre ermittelt, ob der wirtschaftlich optimale Zeitpunkt für eine Rehabilitation, auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung, erreicht wird.

Basis für die Berechnungen ist die Auswahl eines passenden Schadenprognosemodells. Die definierte Methodik ermöglicht es, mit einer zu definierenden Wahrscheinlichkeit, Angaben über zukünftig an einer in Betrieb befindlichen Leitung auftretende Schäden zu machen (G. GANGL et al., 2007c). Um die daraus resultierenden Behebungskosten prognostizieren zu können, wurden die je Rohrtyp (eine Unterteilung erfolgte nach Material und Nennweite) durchschnittlichen Barwerte der Schadensbehebungskosten ermittelt.

Weitere Eingangsparameter des Modells sind Rehabilitationskosten je Rohrtyp (Material und Nennweite), Baupreisindex, Barwertzinssatz und Betriebskosten (alte/neue Leitung). Eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Einflussgrößen wie Schadenswahrscheinlichkeit, Einsparpotential durch Baustellenkoordination, Berücksichtigung sozialer Kosten (Staukosten) bzw. Eigen- oder Fremdfinanzierung hat Folgendes gezeigt:

Bei Berücksichtigung von Staukosten rückt der wirtschaftliche Rehabilitationszeitpunkt für Leitungen in verkehrsensitiven Straßen weit nach vorne, da Rehabilitationsmaßnahmen planbar sind und in Zeiten mit geringem Verkehrsaufkommen durchgeführt werden können. Rohrbrüche hingegen sind jahreszeitlich nicht vorhersehbar (G. GANGL et al., 2007c).

Weiters ist eine wirtschaftlich vertretbare Vorrückung von Rehabilitationen durch Kosteneinsparungen im Zuge von Baustellenkoordination erkennbar. Diese ist je nach Rahmenbedingungen auch technisch sinnvoll, da speziell bei Asbestzementleitungen mit Nennweiten unter DN 150 Aufgrabungstätigkeiten bzw. Straßenverdichtungsmaßnahmen Schäden hervorrufen können (F. FRIEDL, 2007).

Das Modell zur Berechnung des wirtschaftlichen Rehabilitationszeitpunktes wurde in die Software PiReM 2.3 integriert und liefert die Grundlage für die Modellierung von Rehabilitationsprioritäten im Zuge der mittelfristigen Rehabilitationsplanung.

### **3.3. Ergebnisse PiReM Task 3**

Mit der Software MIKE NET (DHI Water & Environment, 2001) wurden die hydraulischen Zustände in einem Versorgungsnetz zu bestimmten Rahmenbedingungen für viele verschiedene Lastfälle berechnet. Aus den zahlreichen Lastfallberechnungen stellten

sich die Auswertungen hinsichtlich maximaler Drücke und die Auswertung in Hinblick auf minimale Fließgeschwindigkeiten als relevant für die Planung von Rehabilitationen dar. Leitungen mit höherem Druck verursachen einen höheren Wasseraustritt bei einem Leitungsbruch als Leitungen mit geringerem Versorgungsdruck. Über einen Import des Attributs maximaler Druck je Leitung wird in PiReM eine Beurteilung bei der Prioritätsdefinition ermöglicht.

Geringe Fließgeschwindigkeiten bedingen lange Aufenthaltszeiten im Netz und können zu qualitativen Problemen (z. B. Gefahr der Verkeimung, Erwärmung in den Sommermonaten) und dadurch zu vermehrten Aufwendungen für Spülungen führen. Vor dem Hintergrund der Einhaltung der Anforderungen im Lastfall „Brandfall“ sind Leitungen zu definieren, für welche eine Reduktion der Nennweite möglich ist. Vorgezogene Rehabilitation, z. B. im Zuge koordinierter Baumaßnahmen, können hier langfristig Kosteneinsparungen beim Betrieb bewirken.

### 3.4. PiReM – Software

Einen Kernpunkt der Software PiReM 2.1 stellt das Kohortenüberlebensmodell nach R. HERZ (1994) für die Modellierung des langfristigen Rehabilitationsbedarfs und die Kalibrierungsmethode der HERZ-Funktion nach D. FUCHS (2001) dar.

Auf Basis dessen wurden die Ergebnisse des Projektes PiReM implementiert. Durch die Implementierung eines Statistikpaketes („R“ – Open Source Software) wurde eine größere Flexibilität bei der Auswahl von Lebensdauermodellen gewonnen. Es stehen nun neben der HERZ-Funktion weitere Funktionen (WEIBULL, Lognormal und Logistik) für die Simulation des Alterungsverhaltens der Rohrnetze zur Verfügung. Weiters können makroökonomische Auswirkungen von geplanten Rehabilitationsprojekten berechnet werden.

Die Ergebnisse flossen in die Software PiReM 2.2 ein. Hier wird nun eine Modellierung von mittelfristigen Rehabilitationsprioritäten auf Basis technisch-wirtschaftlicher Kriterien ermöglicht. Das implementierte Modell leitet sich aus einem Bewertungsschema des DVGW-Hinweises W 401 (1997) und den Ergebnissen des Projektes PiReM ab. Die aus externen Analysen gewonnenen zusätzlichen Leitungsattribute, wie z. B. die Ergebnisse aus hydraulischen Simulationen oder aus GIS-Verschneidungen hinsichtlich Verkehrsaufkommen, Streustromeinflüsse oder Baustellenkoordination im Bereich von Wasserleitungen, werden über den Import eines „Zusatzfiles“ für die Modellierung von Rehabilitationsprioritäten nutzbar gemacht.

Abschließend wurden auch die im Projekt PiReM abgeleiteten Standardparameter eingearbeitet und ermöglichen so auch eine Modellierung des Alterungsverhaltens von Rohrnetzen mit nur kurzer Schadensaufzeichnungsperiode.

Im Hinblick auf das Ziel des Projektes, ein marktreifes Softwareprodukt zu entwickeln, wurde von der Erweiterung der vorhandenen Version PiReP abgegangen und ein hinsichtlich Datenbankserver und Programmiersprache aktuelleres Produkt geschaffen. Die neue Software PiReM ist eine typische Client-Server-Anwendung. Als Datenbankserver wird der Microsoft SQL Server 2003 SP1 verwendet. Die von PiReM verwendeten Datenbanken werden auf Basis der Leitungs- und Schadensattribute der GIS-Systeme der Wasserversorger aufgebaut. Für den Datenimport werden die Formate .csv bzw. .dbf unterstützt, wobei diese Files aus den Attributdaten der GIS-Systeme generiert werden. Die Ergebnisse aus PiReM sind über einen .dbf bzw. .csv Exportfile wieder mit dem GIS über den eindeutigen Identifizierungsschlüssel der Leitung (ID) verlinkbar.

Im Rahmen der Datenaufbereitung wurde weiters erkannt, dass GIS-Daten in vielen Fällen Fehler hinsichtlich Plausibilität aufweisen können. Diese resultieren vor allem aus Fehlerquellen bei der GIS-Dateneingabe, die nie ganz ausgeschlossen werden können. Daher wurde der Importvorgang um eine Plausibilitätsüberprüfung hinsichtlich logischer Zusammenhänge von Rohreigenschaften, wie Material und Verlegejahr (z. B. Polyethylen → Verlegejahr nach 1950), erweitert.

#### **Erweiterungen von PiReM 2.4**

Aus den Tests der Daten der aktuellen Wirtschaftspartner ergaben sich verschiedene Umstrukturierungen. Eine Verbesserung der Software wurde in mehreren Bereichen erreicht. Die Verbesserung der Kalibrierung der Altersfunktion erfolgte durch Vernetzung des Statistiktools mit der expertengestützten Kalibrierung nach HERZ (D. FUCHS, 2001). Über die empirische Verteilung aus dem Statistiktool wird nun auch die Kalibrierung der HERZ-Funktion unterstützt.

Es wurde festgestellt, dass in den GIS-Daten der Wirtschaftspartner teils unplausible Daten vorliegen, z. B. ein Schadensdatum vor dem Leitungerrichtungsdatum, weitere gegenwärtige auftretende Rohrschäden auf stillgelegten Leitungen usw. Daher wurde durch erweiterte und ergänzte Kriterien eine Plausibilitätskontrolle in die PiReM-Version 2.4 implementiert.

## **Zusammenfassung**

Die Fragestellung „Wann sollen wo welche Leitungen in welchem Ausmaß erneuert werden?“ beschäftigt in den letzten Jahren viele Wasserversorger.

Mit der Software PiReM werden Alterungsfunktionen für unterschiedliche Rohrmaterialien und Durchmesser unter verschiedensten Rahmenbedingungen anhand von Einzugsgebiets bezogenen Schadensdaten erstellt. Abgeleitet aus dem integrierten Alterungsmodell einer Zielschadensrate für Leitungsgruppen und budgetären Rahmenbedingungen kann ein Rehabilitationsprogramm für einen Zeitraum von 10 bis 20 Jahren festgelegt werden.

Im Anschluss an die Definition der Größenordnung der erforderlichen Rehabilitationsmaßnahmen können durch eine Bewertung aller Leitungen auf Basis technischer und wirtschaftlicher Rehabilitationskriterien jene Leitungen definiert werden, welche Rehabilitationspriorität haben. Für jeden Leitungsstrang kann nach statistischen Kriterien der wirtschaftlich und technisch optimale Rehabilitationszeitpunkt ermittelt werden. In diese mittelfristige Rehabilitationsplanung können andere Faktoren wie die hydraulische Leistungsfähigkeit, wirtschaftliche Einflüsse durch koordinierte Leitungserstellung, Verkehrsbeeinträchtigung durch Baustellen, soziale Kosten und anderes einfließen.

Die im Rahmen des Projektes „Pipe Rehabilitation Management – PiReM“ im „Kompetenznetzwerk Wasserressourcen und deren Bewirtschaftung“ (WATERPOOL) entwickelte Software PiReM unterstützt die Entscheidungsträger bei diesen Fragestellungen. Das Entscheidungshilfswerkzeug PiReM ermittelt aus den spezifischen Schadensdaten eines Wasserversorgungsnetzes die erforderlichen Rehabilitationsmaßnahmen und definiert die Prioritäten und für die einzelnen Leitungsabschnitte den technisch und wirtschaftlich optimalen Rehabilitationszeitpunkt. Durch den Einsatz bei mehreren Wasserversorgungsnetzen ist dieses Werkzeug erprobt und bietet durch validierte Standardschadensfunktionen auch Aussagen über Netze ohne langjährige Schadensaufzeichnungen.



## Literatur

- COX, D. R. (1972): Regression Models and Life Tables.– Journal of Royal Statistic Society, **34** (2), 187–220.
- DHI Water & Environment (2001): MIKE NET User Guide & Tutorial.– 422 S., Hørsholm, Dänemark.
- DVGW (1997): Entscheidungshilfen für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen.– DVGW-Regelwerk, W 401 Hinweis, Ausgabe 09/1997, 40 S., Bonn.
- FGSV (2002): Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2001).– Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, Januar 2002, ISBN 3937356444.
- FUCHS, D. (2001): Decision Support Systeme für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen.– Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, **35**, 128 S., Graz (Technische Universität, ISBN 3-85444-030-8).
- FUCHS, D. (2003): Optimierung der Erneuerungsstrategie Wasserrohrnetz Linz.– Unveröffentl. Abschlussbericht, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz, 38 S., Graz.
- FUCHS-HANUSCH, D., G. GANGL, B. KORNBEBERGER, J. KÖLBL & F. MURNIG (2007a): WP 5.1.1: PiReM – Pipe Rehabilitation Management.– Zwischenbericht zum 3. Förderjahr: 1.7. 2006–30.6. 2007, 36 S., Kompetenznetzwerk Wasserressourcen GmbH, Graz.
- FUCHS-HANUSCH, D., B. KORNBEBERGER, G. GANGL & E. P. KAUCH (2007b): Entwicklung eines Entscheidungshilfesystems für die Rehabilitationsplanung von Wasserrohrnetzen.– Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, **59** (2007), 111–116, Wien.
- FUCHS-HANUSCH, D., G. GANGL, B. KORNBEBERGER, J. KÖLBL, J. HOFRICHTER & H. KAINZ (2007c): PiReM – Pipe Rehabilitation Management – Developing a decision support system for rehabilitation planning of water mains.– Proceedings of IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, Korea 2007, **4** (2007), 391–398, Jeju.
- FRIEDL, F. (2007): Einfluss der Verkehrslast auf die Schadenshäufigkeit von Trinkwasserleitungen.– Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz, 97 S., Graz.
- GANGL, G. (2006): WP 5.1.1: PiReM – Pipe Rehabilitation Management.– Zwischenbericht zum 2. Förderjahr: 1.7. 2005–30.6. 2006, 9 S., Kompetenznetzwerk Wasserressourcen GmbH, Graz.
- GANGL, G. (2007b): Einfluss auf die mittelfristige Erneuerungsplanung von Trinkwassernetzen.– Vortrag, Europäische Rohrleitungstage, St. Veit an der Glan, Juni 2007.
- GANGL, G. (2008): Rehabilitationsplanung von Trinkwassernetzen.– Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz, 219. S., Graz.
- GANGL, G., D. FUCHS-HANUSCH, E. STADLOBER & E. P. KAUCH (2007a): Analysis of the failure behaviour of drinking water pipelines.– Proceedings of IWA Specialist Conference on Efficient Use and Management of Urban Water Supply, Korea 2007, **4** (2007), 339–346, Jeju.
- GANGL, G., D. FUCHS-HANUSCH & M. FELLENDORF (2007c): Influence of Congestion Costs on the Midterm Rehabilitation Planning of Drinking Water Pipelines.– Proceedings of the European Water & Waste Water Management Conference, 24–26 September, Newcastle, 8 S.
- HERZ, R. (1994): Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen – ein Kohorten-Überlebensmodell.– Jahrbuch für Regionalwissenschaft, **14**, 9–28, Gesellschaft für Regionalforschung, Göttingen (Vanderhoeck & Ruprecht).
- KLETZAN, D., A. KÖPPL, F. PRETTENTHALER & K. W. STEININGER (2004): Austrian Water Management Model (AWMM) – Gesamtwirtschaftliche Effekte der Siedlungswasserwirtschaft im Zeitraum 1993–2001.– Studie des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung (WIFO), Wien.
- ÖNORM B 5012: Software zur statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen gemäß ÖNORM B 5012.– Aug. 2005-10-01, Lizenz TU Graz Franz Friedl, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖVGW (2008): ÖVGW Wasser.– Url: <http://www.ovgw.at/wasser/themen> [22. 12. 2009].
- PARK, S. & G. V. LOGANATHAN (2002): Optimal Pipe Replacement Analysis with a New Pipe Break Prediction Model.– Journal of the Korean Society of Water and Wastewater, **16** (6), 710–716.

- PLAXIS (k.A.): PLAXIS, Manual Finite Element Modellierungssoftware (FEM) – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses, Version 8.4.0.1003.– Delft, Netherlands.
- PTV AG (2006): VISSIM – Manual Vehicle Information System Simulation Version 4.20.– Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe.
- SHAMIR, U. & C. D. D. HOWARD (1979): An analytic approach to scheduling pipe replacement.– *Journal AWWA*, 71 (5), 248–258.
- SKALA, C. (2007): Bundesförderung im leitungsbezogenen Siedlungswasserbau.– Vortrag, Europäische Rohrleitungstage, St.Veit an der Glan, Juni 2007.

## Summary

Finding the right time and place for pipe restoration and maintenance within a water distribution network has become one of the central issues for water suppliers.

Based on this challenge, the key aspect of the project “Pipe Rehabilitation Management – PiReM”, carried out in the framework of “Competence Network Water Resources and their Management” (WATERPOOL) was to develop a decision support system for the planning process of rehabilitation measures in water supply systems based on scientific research and practical experience.

One of the main research topics of the project was grouping pipes based on similar failure behaviour using several different boundary conditions of the pipes. Several statistical models were used for describing the failure behaviour of water pipes. Based on these investigations, the Cohort Survival Model and the existing Software PiReP of Graz University of Technology, a new tool was generated to simulate long term rehabilitation needs and to define the best rehabilitation strategies.

In the next step, a midterm rehabilitation planning tool was implemented based on a priority planning scheme defined in the DVGW-Guideline 401 (1997). The planning tool was improved by implementing a calculation method to find the economic optimal time of rehabilitation.

Furthermore, the benefit of hydraulic modelling for rehabilitation planning has been analysed. The midterm rehabilitation planning tool was further advanced to use the relevant results of the hydraulic model as well as other technical and economical rehabilitation criteria. Regarding the hydraulic issues, it must be considered for priority planning whether or not pipes are in high pressure zones, low velocity zones or the main distribution pipeline. PiReM considers a plausibility check of GIS data.

The software was already tested by the business partners Linz AG, Graz AG, Salzburg AG and Water Supply Utility Villach.

Schlüsselwörter: Rehabilitationsplanung, Instandhaltung, Folgeschaden, Kostenbarwertmethode, soziale Kosten

Keywords: rehabilitation management, maintenance, subsequent damage, cash-value method, social costs