

Andrzej Raganowicz

# Möglichkeiten der Kanalzustandsprognose

Grundlage der betrieblichen  
Anlagenoptimierung – ein  
Methodenvergleich

---

## Möglichkeiten der Kanalzustandsprognose

---

Andrzej Raganowicz

# Möglichkeiten der Kanalzustandsprognose

Grundlage der betrieblichen  
Anlagenoptimierung – ein  
Methodenvergleich

Andrzej Raganowicz  
Zweckverband zur Abwasserbeseitigung  
Taufkirchen, Deutschland

ISBN 978-3-658-34498-6      ISBN 978-3-658-34499-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-34499-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

---

## Vorwort

Seit über 20 Jahren saniert der Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal die schadhaften Abwasserkanäle in seinem Zuständigkeitsgebiet. Der Autor war 20 Jahre beim Zweckverband als technischer Leiter mit dem Schwerpunkt – Kanalsanierung tätig. Dank der aktiven Mitwirkung und Gestaltung der Sanierungsmaßnahmen konnte er zahlreiche theoretische sowie praktische Erkenntnisse zu diesem Thema sammeln. Die ersten Kanalsanierungsarbeiten wurden im Einzugsgebiet des Hachinger Bachs in der zweiten Hälfte der 1990er-Jahre realisiert. Damals stellte die Sanierungstechnik ein neues Terrain in der bayerischen Baubranche dar. Allein eine Dekade früher, im Jahr 1983, wurde der erste Liner in Deutschland, in Hamburg erfolgreich installiert. Ein Mischwasserkanal aus Beton DN 600 mm mit der Länge von 120 m wurde in der Holzmühlenstraße mit einem Nadelfilzschlauch, der mit dem ungesättigten Polyesterharz (PE) getränkten war, ausgekleidet. Der Liner verfügte nur über eine Innenfolie aus Polyurethan (PU), da die Planer damals irrtümlicherweise davon ausgingen, dass eine Verklebung zwischen dem Liner und dem Altrohr stattfand.

Der Zweckverband realisierte in der Zeit 2000–2010 die sogenannte Grundsanierung in 3 südlich von München gelegenen bayerischen Kommunen: Oberhaching, Taufkirchen und Unterhaching. In der nächsten Dekade fand eine schlagartige Entwicklung der Sanierungsbranche statt. Die bemerkenswerten Fortschritte sind ausdrücklich auf dem Gebiet der optischen Inspektion zu verzeichnen. Zu den Meilensteinen der Entwicklung zählen die HD-Qualität der Aufnahmen und dank der Lesertechnik die Quantifizierung der Schäden. Dieses Gelingen lässt heutzutage zu, den baulich-betrieblichen Zustand von untersuchten Leitungen genauer und zielorientierter zu bewerten. In Zusammenhang damit wurden effiziente Minikanalroboter und Minifräsen entwickelt, die die Renovierung von kleindimensionierten Leitungen (DN < 200 mm) bewirken.

Zwei komplette optische Inspektionen des Hachinger Kanalnetzes aus den Jahren 2000 und 2010 lieferten die umfangreichen betrieblichen Datensätze. Diese nützlichen Informationen wurden vom Autor gründlich analysiert und daraus gewisse Rückschlüsse gezogen. Darauf aufbauend entstand eine Idee, die a-posteriori Kanalzustandsprognosen als eine analytische Bewilligung der realisierten Sanierungsmaßnahmen zu erstellen. Die Lektüre der deutschen und der amerikanischen Fachliteratur veranschaulichte gewisse

Untersuchungsrichtungen und Modellierungsmethoden. Die Lehraufträge an der Technischen Universität in München sowie Betreuung der Masterarbeiten weiteten die Forschungshorizonte aus.

Im Buch sind 4 Arten der statistisch-stochastischen Kanalzustandsprognosen präsentiert und detailliert erörtert. Sie basieren auf der Korrelation zwischen dem technischen Zustand und dem Alter der untersuchten Kanalhaltungen. Die erste Prognose wurde für die Leitungen aus Steinzeug DN 200–400 mm, die oberhalb des Grundwassers operieren, konzipiert. Die mathematische Interpretation der empirischen Kanalzustandsdaten fußte auf der Weibull-Verteilung in Verbindung mit der Monte-Carlo-Methode und der gleichverteilten Zufallszahlen. Die Schätzung der Weibull-Parameter erfolgte nach der Maximum-Likelihood-Methode. Nachdem viele technische Ereignisse einen zufälligen Charakter aufzeigen, wurde eine bedeutsame Annahme getan, dass die Aufenthaltszeiten der Leitungen in den jeweiligen technischen Zuständen ebenfalls einen zufälligen Charakter haben. Demnächst wurden die stochastischen Weibull-Parameter anhand der simulierten Daten geschätzt und ferner die Übergangskurven von einer in die jeweils nächstschlechtere Zustandsklasse konstruiert.

Bei der zweiten Modellierung handelt es sich um eine Zustandsprognose für die Anschlussleitungen aus Steinzeug DN 100–200 mm, die ebenfalls oberhalb des Grundwassers funktionieren. Da die Kalibrierung der Exponentialverteilung als theoretische Illustration der empirischen Daten mittels Kolmogorov-Smirnov-Tests ein negatives Ergebnis lieferte, musste ein mathematischer Umweg gefunden werden. Das Problem wurde mithilfe der Faltungsoperation erfolgreich gelöst. Die anschließend durchgeführte Kalibrierung und Validierung des Exponentialmodells leiteten zufriedenstellende Resultate zu.

Die nächste Kanalzustandsprognose stützte sich auf einer Expertenaussage. Falls der Netzbetreiber über keine zuverlässige TV-Dokumentation verfügt, besteht trotzdem eine mathematische Gelegenheit, den baulich-betrieblichen Zustand von hypothetischen Kanalhaltungen zu prognostizieren. Das Statement von Experten sollte die Wahrscheinlichkeiten der Aufenthaltszeiten von Leitungen in den jeweiligen technischen Zuständen (Zustandsklassen) beinhalten. Aufgrund dessen können die vorläufigen und mithilfe der Monte-Carlo-Methode und der gleichverteilten Zufallszahlen die stochastischen Weibull-Parameter ermittelt sowie die Übergangskurven entworfen werden.

Die vierte, stochastische Kanalzustandsprognose wurde nach dem Markov-Modell erstellt. Bei der Untersuchungsmethodik spielt die Anfertigung der Übergangsmatrix mit realistischen Einträgen eine entscheidende Rolle, die aus der Prognose nach der Weibull-Verteilung übernommen wurden. Hindurch die Multiplikation der Übergangsmatrix werden die Übergangswahrscheinlichkeiten in diskreten Zeiteinheiten generiert. Eine Zustandsklasse zum Zeitpunkt  $t$  wird mithilfe der Multiplikation der Übergangsmatrix mit dem Zustandsvektor bestimmt, womit der Alterungsprozess des untersuchten Kanalnetzes wiedergegeben wird.

Die Ergebnisse der dargestellten Kanalzustandsprognosen liefern die relevanten betrieblichen Informationen wie den notwendigen Sanierungsumfang oder die Nutzungsdauer. Sie bilden eine solide Grundlage einer qualifizierten Sanierungsplanung und einer

Kanalbetriebsoptimierung, da die Renovierungskosten heutzutage eine Hauptposition des betrieblichen Haushalts darstellen.

Das letzte Kapitel befasst sich mit der multiplen linearen Korrelationsanalyse in Bezug auf die Untersuchungsergebnisse von 25 Linerproben. In einem zertifizierten Labor wurden physikalisch-mechanische Parameter wie Biege-E-Modul, Biegesteifigkeit, Kriechneigung, Ringsteifigkeit, Dichtheit sowie Wandstärke der Lamine ermittelt. In Rahmen der multiplen linearen Korrelationsanalyse sollte der Nachweis erbracht werden, dass das Biege-E-Modul gleichzeitig von der Biegesteifigkeit und von der Wandstärke abhängig ist. In der zweiten Modellierungsphase wurde die vorhandene Stichprobe stochastisch erweitert, um die repräsentativen Resultate der Korrelationsanalyse zu erzielen.

Mit dem Buch ist beabsichtigt, den Betreibern und den Planern gewisse Modellierungsmethoden der Alterungsprozesse von Kanälen zur Verfügung zu stellen, die eine wirtschaftliche und nachhaltige Kanalrenovierung sichern. Die präsentierten Modelle können den Studierenden einen Einstieg in die praktische Exploitation einer Abwasserbeseitigungsanlage verhelfen.

Alle Berechnungs- und Simulationsalgorithmen sind vom Autor ausgearbeitet und basieren auf dem Programm EXCEL 2019.

München, Deutschland  
2021

Andrzej Raganowicz

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in die stochastische Kanalzustandsprognose</b>	1
1.1	Charakteristik der empirischen Daten	2
1.2	Statistische Beurteilung der empirischen Daten	4
1.3	Die Weibull-Verteilung	6
1.4	Methodik der statistischen Kanalzustandsprognose	14
1.5	Stochastische Kanalzustandsprognose nach dem Markov-Modell	20
1.6	Ergebnisse der Modellierungsuntersuchungen	24
	Literatur	26
<b>2</b>	<b>Statistische Kanalzustandsprognose nach der Faltungsoption</b>	29
2.1	Charakteristik der untersuchten Abwasseranlage	30
2.2	Statistische Kanalzustandsprognose nach der Faltungsoption	32
2.3	Kalibrierung und Validierung des Exponentialmodells	37
2.4	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	41
	Literatur	42
<b>3</b>	<b>Stochastische Kanalzustandsprognose anhand der Expertenaussage</b>	43
3.1	Alterungsprognose anhand der Expertenaussage	45
3.2	Praktische Anwendung der vorgeschlagenen Methodik	46
3.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	50
	Literatur	50
<b>4</b>	<b>Stochastische Kanalzustandsprognose nach dem Markov-Modell</b>	51
4.1	Einführung	51
4.2	Statistische Kanalzustandsprognose	52
4.3	Markov-Ketten	53
4.4	Stochastische Zustandsprognose für das Unterhachinger Kanalnetz mittels Markov-Ketten	55
4.5	Ergebnisse der Kanalzustandsmodellierung	58
	Literatur	59

<b>5 Multiple Korrelationsanalyse als Beurteilungsinstrument der Sanierungsqualität</b> .....	61
5.1 Einführung .....	61
5.2 Statistische Modellierung der multiplen linearen Korrelation .....	63
5.3 Mathematische Simulationen der Untersuchungsergebnisse .....	67
5.4 Konklusion .....	69
Literatur .....	69
<b>6 Abschlussbemerkungen</b> .....	71
Literatur .....	73
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	75