

Andrzej Raganowicz

# Nutzen statistisch- stochastischer Modelle in der Kanalzustandsprognose

Methoden, Modelle und  
wasserwirtschaftliche Anwendung

---

# Nutzen statistisch-stochastischer Modelle in der Kanalzustandsprognose

---

Andrzej Raganowicz

# Nutzen statistisch-stochastischer Modelle in der Kanalzustandsprognose

Methoden, Modelle und  
wasserwirtschaftliche Anwendung

 Springer Vieweg

Andrzej Raganowicz  
Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im  
Hachinger Tal  
München, Deutschland

ISBN 978-3-658-16116-3  
DOI 10.1007/978-3-658-16117-0

ISBN 978-3-658-16117-0 (eBook)

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. 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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

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

---

## Vorwort

Im Rahmen dieser Monographie werden statistisch-stochastische Modellierungen des technischen Zustands einer Kanalisation präsentiert. Die untersuchte Anlage entwässert im Trennsystem drei am südöstlichen Rand von München im Einzugsgebiet des Hachinger Bachs gelegene Kommunen: Oberhaching, Taufkirchen und Unterhaching. Diese Untersuchungen basieren auf zwei kompletten optischen Inspektionen, die der Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal (Betreiber dieses Kanalnetzes) in den Zeiträumen von 1998 bis 2001 und 2009 bis 2013 durchführte. Die TV-Inspektionen umfassten die Betonkanäle DN 600/1100 mm, DN 800/1200 mm und DN 900/1350 mm, Steinzeugkanäle DN 200–400 mm sowie Grundstücksanschlüsse DN 150 mm. Bei den statistisch-stochastischen Modellierungen wurde der Einfluss des Rohrwerkstoffs, des Grundwassers und der Gründungstiefe auf den technischen Zustand der Abwasserkanäle anschaulich verdeutlicht. Um die Kanalzustandsanalyse zu vereinfachen, wurde ein kritischer technischer Zustand definiert. Er beschreibt den Übergang der Kanäle vom Reparatur- zum Sanierungszustand, der für den Kanalbetrieb sehr bedeutsam ist.

Im Anfangsabschnitt wird auf den Übergang von den ältesten Kanalisationen zum modernen Kanalbetrieb Bezug genommen und ein kurzer Abriss der westlichen Abwasserbeseitigung gegeben. Anschließend werden die bekanntesten Zustandsprognosen für Kanal- und Wassernetze unter Berücksichtigung der technisch-ökonomischen Aspekte und eigener Untersuchungsmethodik präsentiert.

Die statistische Modellierung des kritischen Zustands von öffentlichen Kanälen, die das Hachinger Tal entwässern, basiert auf der zweiparametrischen Weibull-Verteilung. Die Weibull-Parameter wurden nach der vertikalen Momentmethode geschätzt. In dieser Untersuchungsphase wurde der Einfluss des Rohrwerkstoffs, des Grundwassers sowie der Gründungstiefe auf den kritischen Zustand der Kanäle analysiert.

In der nächsten Phase basierte die Modellierung des kritischen Zustands der Kanäle ebenfalls auf der Weibull-Verteilung und Momentmethode. Die Schätzung der Weibull-Parameter wurde jedoch mithilfe der mathematischen Simulationen nach der Monte-Carlo-Methode durchgeführt. Die Kombination der Weibull-Verteilung mit der Monte-Carlo-Methode erlaubte, die vorhandenen Stichproben beliebig zu erweitern und dadurch sicherere Untersuchungsergebnisse zu gewinnen. Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode verlangte sehr lange Ketten von Pseudozufallszahlen, die sich nicht wiederholen. Für die-

se Zwecke wurde der Generator der gleichverteilten Zufallszahlen – „multiplicative linear congruential generator“ – verwendet. Alle Berechnungs- und Simulationsalgorithmen sind vom Autor ausgearbeitet und basieren auf dem Programm EXCEL 2010.

Die vorgeschlagene Untersuchungsmethodik erwies sich als ein effektives Verfahren für die Kanalzustandsprognose. Sie ermöglichte es, eine repräsentative Analyse der baulich-betrieblichen Kanalkondition durchzuführen und basierend auf dieser den notwendigen Sanierungsumfang festzulegen.

Die Population der empirischen Daten garantiert, dass die Modellierungsergebnisse als maßgebend zu betrachten sind. Die Vielseitigkeit und Universalität der vorgeschlagenen Untersuchungsmethodik kann bei der Lösung vieler wasserwirtschaftlicher Probleme vorteilhaft sein.

München, 2016

Andrzej Raganowicz

---

# Symbolverzeichnis

$a$	Konstanter Wert des Zufallszahlgenerators
$A_j$	Kriterium der Kanalzuverlässigkeit
$b$	Formparameter der Weibull-Verteilung
$\hat{b}$	Formparameter der Weibull-Verteilung nach beliebiger Schätzungsmethode
$B$	Breite einer Altersgruppe von Kanalhaltungen
BP	Bewertungspunkte
$BP_j$	Bewertungspunkte für Kriterium $j$
BZ	Bewertungszahl
$c$	Konstanter Wert des Zufallszahlgenerators
CzU	Schadenshäufigkeit
$D$	Länge des Kanalnetzes in Metern
$D^-$	Negativer Abstand zwischen empirischer und theoretischer Verteilungsfunktion
$D^+$	Positiver Abstand zwischen empirischer und theoretischer Verteilungsfunktion
$D_i$	Länge der Haltung $i$ in Metern
$D_{\text{kryt}}$	Kritischer Abstand zwischen der empirischen der theoretischen Verteilungsfunktion
$D_{\text{max}}$	Maximaler Abstand zwischen der empirischen und der theoretischen Verteilungsfunktion
DU	Schadenslänge bezogen auf die Haltungslänge
$E(T^k)$	Funktion, die den Moment $k$ schätzt
$f(t)$	Dichtefunktion
$f^*(t)$	Empirische Dichtefunktion
$F^{-1}$	Umgekehrte Verteilungsfunktion
$F_j$	Faktor für Kriterium $j$
$F(t)$	Theoretische Verteilungsfunktion
$F^*(t)$	Empirische Verteilungsfunktion
$F(t)_W$	Verteilungsfunktion nach Weibull
$g_j$	Gewicht der Schicht $j$
$G$	Gründungstiefe des Kanals
$h_{\text{rel}}$	Ausfallhäufigkeit für Altersgruppe $i$
$H$	Hydraulikfaktor

---

$H_0$	Null-Hypothese
$H_1$	Konvergenzhypothese
$H(m)$	Summe der Ausfallhäufigkeit
HZ	Haltungszahl
$HZ_{\text{endg}}$	Endgültige Haltungszahl
$i$	Natürliche Zahlen $1, 2, \dots, n$
INT	Integer-Funktion, die Nachkommastellen eliminiert, z. B. $\text{INT}(2,9) = 2$
$K_{ij}$	Vorläufige Zustandsklasse einer Kanalhaltung
$KA_f$	Kanalartfaktor
$L_i$	Länge der Haltung in Metern
$L_{\text{ges}}$	Gesamtlänge der untersuchten Haltungen in Metern
$m$	Konstanter Wert des Zufallszahlgenerators
$m_k$	Moment $k$ einer empirischen Verteilung
$M$	Gefördertes Medium
$M_k$	Moment $k$ einer theoretischen Verteilung
$n$	Stichprobenumfang
$n_i$	Umfang Altersgruppe $i$
$n_j$	Anzahl der Randbedingungen
$n_k$	Empirisches Moment $k$
$N$	Umfang einer großen Stichprobe
$N_j$	Umfang der Schicht $j$
OH	hydraulische Belastung des Kanalnetzes
OL	Länge einer Kanalhaltung in Metern
$p$	Populationsanteil der Grundgesamtheit
$p_j$	Anteil der Schicht $j$
PG	Untergrundfaktor
$Q$	Abwasserfaktor
$R(t)$	Theoretische Zuverlässigkeitsfunktion
$R^*(t)$	Empirische Zuverlässigkeitsfunktion
$R_{jk}$	Randbedingung
RS	Faktor der Abwasserart
SC	Schutzzone
SD	Schadensdichte
SL	Schadenslänge in Metern
$SD_j$	gewichtete Schadenshäufigkeit
SO	Wasserschutzzone
$SR_f$	Schutz-/Rechtsfaktor
SYH	Systemzahl
SYL	Systemzahl des Kanalnetzes
SZ	Sanierungspriorität
$t$	Kanalalter in Jahren
$\bar{t}$	Mittelwert des Kanalalters in Jahren

---

$t^{k*}$	Simuliertes Kanalalter in Jahren
$t_m$	Summe von Differenzen ( $t_i - t_{i-1}$ ) für $i = 1, 2, \dots, n$
$t_{\max}$	Maximales Kanalalter in Jahren
$t_{\min}$	Minimales Kanalalter in Jahren
$t_n$	Zeitpunkt des Übergangs in eine schlechtere Zustandsklasse
$T$	Charakteristische Lebensdauer der Weibull-Verteilung in Jahren
$\hat{T}$	Charakteristische Lebensdauer der Weibull-Verteilung nach beliebiger Schätzungsmethode in Jahren
$U$	Gleichverteilte Zufallszahlen
UG	Untergrund
$U^{k*}$	Gleichverteilte Zufallszahlen aus dem Bereich (0,1)
$V_1, V_2$	Faktoren der vertikalen Momentmethode
WG	Abstand zwischen Grundwasserspiegel und Kanalsole in Metern
$x$	Zufallszahl
$xx_1$	Zwei letzte Stellen der Kanalzustandsbewertung
$Y$	Werte der umgekehrten Verteilungsfunktion
$z$	Normalverteilte Zufallszahlen
$ZK_f$	Zustandsklassenfaktor
ZP	Zustandspunkte
$ZP_0$	Vorläufige Zustandspunkte bezogen auf eine Zustandsklasse
$ZP_j$	Zustandspunkte eines Kanalzustands
$ZP_{zj}$	Zusätzliche Zustandspunkte eines Kanalzustands
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\Delta K_i$	Vertrauensbereich für die angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit
$\Delta L_i$	Schadenslänge in Metern
$\lambda$	Formparameter der Exponentialverteilung
$\lambda(t)$	Ausfalldichte
$\pi_o, \pi_u$	Obere und untere Grenze des Vertrauensbereichs

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführende Informationen</b> . . . . .	1
1.1	Meilensteine der Stadtentwässerungsgeschichte . . . . .	1
1.2	Hintergründe zu Netzbetrieb und Sanierungsentscheidung . . . . .	4
1.2.1	Verwaltung, Unterhalt, Sanierung und Ausbau des Kanalnetzes – State of the Art . . . . .	4
1.2.2	Motivation der Untersuchungen . . . . .	6
1.3	Grundlagen und Ziel statistisch-stochastischer Kanalzustandsprognosen . . . . .	7
1.4	Übersicht von Zustandsprognosen für Wasser- und Abwassersysteme . . . . .	9
1.4.1	Zustandsprognosen für Wassersysteme . . . . .	9
1.4.2	Kanalzustandsprognosen . . . . .	12
1.5	Die Untersuchungsmethodik . . . . .	14
1.6	Wirtschaftliche und applikative Bedeutung der vorgenommenen Modellierungen . . . . .	15
	Literatur . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Populäre Kanalisationssysteme und Untersuchungsmethoden des technischen Kanalzustandes</b> . . . . .	19
2.1	Freispiegelkanalisation . . . . .	19
2.1.1	Mischsystem . . . . .	20
2.1.2	Trennsystem . . . . .	22
2.1.3	Reduziertes Mischsystem . . . . .	22
2.2	Druckkanalisation . . . . .	23
2.3	Analyse und Beurteilung des Hachinger Kanalnetzes . . . . .	25
2.3.1	Allgemeine Charakteristik . . . . .	26
2.3.2	Untergrundverhältnisse . . . . .	30
2.3.3	Betonkanäle . . . . .	31
2.3.4	Öffentliche Steinzeugkanäle . . . . .	32
2.3.5	Grundstücksanschlüsse aus Steinzeug . . . . .	34
A	Anhang . . . . .	35
	Literatur . . . . .	36

<b>3</b>	<b>Kontrolle und Beurteilung vom baulich-betrieblichen Kanalzustand</b> . . . . .	37
3.1	Hochdruckkanalreinigung . . . . .	37
3.1.1	Automatische Dokumentation der Kanalreinigung . . . . .	39
3.2	Optische Inspektion . . . . .	40
3.2.1	Komplette optische Inspektion . . . . .	41
3.2.2	Selektive optische Inspektion . . . . .	41
3.3	Reparaturmaßnahmen . . . . .	46
3.4	Populäre Systeme der optischen Inspektion . . . . .	47
3.4.1	Optisches System – Beispiel 1 . . . . .	48
3.4.2	Optisches System – Beispiel 2 . . . . .	49
3.4.3	Optisches System – Beispiel 3 . . . . .	51
	Literatur . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Codiersysteme für optische Inspektionen von Entwässerungssystemen</b> . . . . .	53
4.1	Codiersystem nach ATV . . . . .	53
4.2	Codiersystem nach ISYBAU . . . . .	54
4.3	Codiersystem nach DIN EN 13508-2 . . . . .	55
4.4	Codiersystem nach DIN 1986-30 . . . . .	56
4.5	Schadensklassifizierung des Hachinger Kanalnetzes . . . . .	56
4.5.1	Charakteristik der Schäden an Betonkanälen . . . . .	57
4.5.2	Charakteristik der Schäden an öffentlichen Steinzeugkanälen . . . . .	58
4.5.3	Charakteristik der Schäden an den Grundstücksanschlüssen . . . . .	64
4.6	Schadensanalyse in Abhängigkeit von Untergrundverhältnissen und Rohrwerkstoffen . . . . .	67
4.7	Klassifizierung des baulich-betrieblichen Kanalzustandes . . . . .	69
4.7.1	Kanalzustandsbewertung nach ATV . . . . .	70
4.7.2	Kanalzustandsbewertung nach ISYBAU . . . . .	72
4.7.3	Kanalzustandsbewertung nach DWA . . . . .	73
4.7.4	Kanalzustandsbewertung nach DIN 1986-30 . . . . .	75
4.8	Zusammenfassung von Zustandsklassifizierungen . . . . .	76
A	Anhang . . . . .	76
	Literatur . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Kritischer Zustand des Entwässerungssystems</b> . . . . .	83
5.1	Kritischer Zustand von Betonkanälen . . . . .	84
5.2	Kritischer Zustand von öffentlichen Steinzeugkanälen . . . . .	84
5.3	Kritischer Zustand von Grundstücksanschlüssen . . . . .	85
5.4	Statistische Interpretation des Kanalzustandes . . . . .	86
5.4.1	Empirische, kritische Dichtefunktion . . . . .	89
5.4.2	Empirische, kritische Verteilungsfunktion . . . . .	90
5.4.3	Empirische, kritische Zuverlässigkeitsfunktion . . . . .	91
	Literatur . . . . .	94

<b>6</b>	<b>Statistische Modellierung des kritischen Kanalzustandes nach der zweiparametrischen Weibull-Verteilung</b> . . . . .	95
6.1	Statistische Modellierungen des kritischen Zustandes von Betonkanälen	100
6.2	Statistische Modellierungen des kritischen Zustands von öffentlichen Steinzeugkanälen	105
6.3	Statistische Modellierungen des kritischen Zustands von Grundstücksanschlüssen aus Steinzeug	109
6.4	Zusammenfassung der statistischen Modellierungen	114
A	Anhang	115
	Literatur	116
<b>7</b>	<b>Stochastische Modellierung des kritischen Kanalzustandes mittels mathematischen Simulationen nach Monte-Carlo-Methode</b> . . . . .	119
7.1	Stochastische Modellierung des kritischen Zustands von Betonkanälen	121
7.2	Stochastische Modellierungen des kritischen Zustands der öffentlichen Steinzeugkanäle	128
7.3	Stochastische Modellierungen des kritischen Zustands von Grundstücksanschlüssen	133
7.4	Diskussion der Testergebnisse unter Berücksichtigung der Untergrundverhältnisse	139
7.5	Diskussion der Testergebnisse unter Berücksichtigung der Gründungstiefe	140
A	Anhang	142
	Literatur	154
<b>8</b>	<b>Analyse der Testergebnisse und Planungsvorschläge für Kanalsanierungsmaßnahmen</b> . . . . .	155
	Literatur	164
<b>9</b>	<b>Abschlussbemerkungen</b> . . . . .	165
	Literatur	169
<b>10</b>	<b>Simulationen von wasserwirtschaftlichen Ereignissen</b> . . . . .	171
10.1	Stochastische Auswertung der Grundwasserstände als Planungsgrundlage für Niederschlagswasserversickerungsanlagen	172
10.1.1	Statistische Auswertung der empirischen Daten	173
10.1.2	$\lambda$ -Schätzung nach der Monte-Carlo-Methode	175
10.1.3	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	176

---

10.2 Fremdwasserprognose für die Hachinger Kanalisation . . . . .	179
10.2.1 Statistische Interpretation der empirischen Messdaten . . . . .	180
10.2.2 Mathematische Simulationen von Messdaten . . . . .	183
10.2.3 Fazit . . . . .	184
Literatur . . . . .	185
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>187</b>

Die Kanalisation stellt die wichtigste und teuerste Komponente der städtischen Infrastruktur dar, die seit Tausenden von Jahren die Entwicklung großer und kleiner menschlicher Siedlungen stimuliert. Die archäologischen Ausgrabungen liefern materielle Beweise, dass gut entwickelte Wasserversorgungs- sowie Wasserentsorgungssysteme aus der Zeit um 3500 v. Chr. stammen. In der Antike, etwa 500 v. Chr., entstanden die zwei größten und bekanntesten Entwässerungsbauwerke – die Cloaca Maxima in Rom und das Great Drain in Athen. Die beiden Abwassersysteme sind bis heute teilweise in Betrieb.

Im Mittelalter kümmerten sich die Menschen nicht sonderlich um ein hygienisches Ableiten des Schmutzwassers. Ein Umdenkprozess fand in der Zeit der technischen Revolution und der rapiden Entwicklung der großen europäischen Städte statt. Die Anfänge der modernen Stadtentwässerung in Europa liegen in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts. In allen historischen Zentren von europäischen Städten werden Kanalnetze betrieben, die vor 150–200 Jahren erbaut worden sind.

---

## 1.1 Meilensteine der Stadtentwässerungsgeschichte

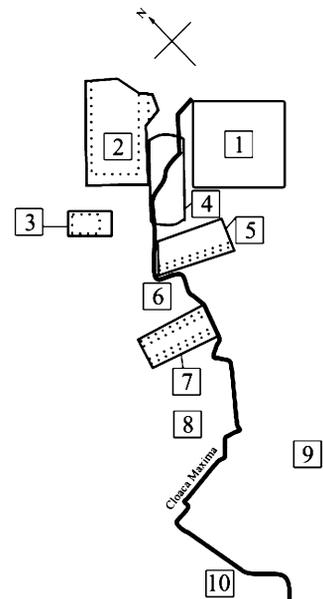
Die ältesten Funde von Abwasserentsorgungssystemen stammen aus der nordsyrischen Ortschaft Habuba Kariba am Oberlauf des Euphrat [1]. Diese Stadt hatte ihre Glanzzeit für etwa 150 Jahre zwischen 3500 und 3000 v. Chr. Die deutschen Archäologen fanden in den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts Wasserversorgungs- sowie Wasserentsorgungsleitungen. Die größeren Kanäle wiesen einen rechteckigen Querschnitt auf, bestehend aus einer Sohle und zwei Seitenwänden. Diese Konstruktion hatte eine solide Bettung, die sich aus einer Kiesschicht und zwei gestampften Lagen aus einem Stroh-Häcksel-Lehm-Gemisch zusammensetzte. Die kleineren Kanäle stellten eine perfekte Lösung in Form von Muffenrohrleitungen aus gebranntem Ton dar. Jedes Rohr hatte ein weites und ein enges Ende, sodass die Spitze in die Muffe eingesteckt werden konnte. Diese zwei Leitungstypen waren miteinander kombiniert.

Eine der größten antiken Kanalisationen ist das Athener Great Drain [1]. Die Anfänge dieses Entwässerungssystems im Bereich der Athener Agora sind auf das 5. Jahrhundert v. Chr. zurückzuführen. Die Konstruktion dieses Kanals hat eine Höhe von einem Meter und wurde aus Bruchsteinen sowie Steinplatten gebaut. Im Lauf der Zeit bekam dieser Sammler viele Zuläufe für Regen- und Schmutzwasser von den bebauten Flächen. Der Bau des Great Drain begleitete die städtische Entwicklung, sodass die antike Stadt Athen einen großen zivilisatorischen Fortschritt erreichte.

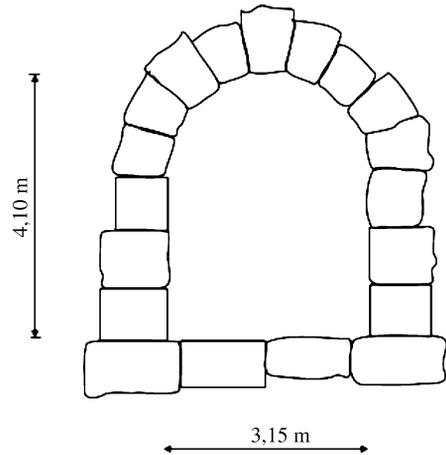
Die römische Cloaca Maxima ist schon über 2500 Jahre alt – und heute zum Teil immer noch in Betrieb. Die Anfänge der Abwasserentsorgung der Stadt Rom führen in die etruskische Zeit zurück. Der König Tarquinius Priscus (6. Jahrhundert v. Chr.) begann mit der Entwässerung von Flussniederungen nahe des späteren Forum Romanum [1]. Dort wurde ein großer unterirdischer Kanal, die Cloaca Maxima, gebaut. Sie leitete das Regen- und Schmutzwasser aus den zwei römischen Hügeln Campidoglio und Palatino. Die Cloaca Maxima folgte einem natürlichen und später kanalisiertem und begrädigtem Gewässerlauf, der in den Tiber mündete (Abb. 1.1). Nach dem Jahr 200 v. Chr. bekam der offene Graben ein Gewölbe. Die Abmessungen der römischen Cloaca Maxima betragen bis zu drei Meter Breite und mehr als vier Meter Höhe (Abb. 1.2). Das größte Teil dieses Bauwerks besteht aus Tuff- und Kalksteinblöcken. Die Fugen zwischen Tuffblöcken wurden nicht mit einem Mörtel verfügt, sondern einzelne Blöcke verbanden eiserne Schnallen mit einer Bleibesichtung. Eine ähnliche Bautechnik wurde bei der Errichtung des Kolosseums (70–80 n. Chr.) angewendet.

Im Mittelalter kümmerten sich die europäischen Stadtverwaltungen kaum um eine hygienische Abwasserbeseitigung. Deshalb ist besonders zu betonen, dass die Ritter des

**Abb. 1.1** Die Trasse der antiken Cloaca Maxima [1].  
1 Tempio della Pace, 2 Foro di Augusto, 3 Foro die Cesare, 4 Foro die Nervax, 5 Basilica Emilia, 6 Basilica Giulia, 7 Foro Romano, 8 Velabro, 9 Palatino, 10 Foro Boaria



**Abb. 1.2** Querschnitt der antiken Cloaca Maxima [1]



Deutschen Ordens in den von ihnen gebauten Städten und Schlössern moderne abwassertechnische Infrastrukturen einführen. Manche von Rittern des Deutschen Ordens gebaute Entwässerungssysteme, wie die Kanalisation der Stadt Rössel (Ostpreußen, Polen) aus dem 14. Jahrhundert, sind noch heute im Betrieb [2].

Ein großer Umdenkprozess fand nach vielen hundert Jahren in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts statt. Die technische Revolution führte zur dynamischen Entwicklung der europäischen Großstädte, die plötzlich enorme Mengen von Arbeitskräften benötigten. Die vorhandenen unhygienischen Entwässerungssysteme waren nicht im Einklang mit der urbanen Entwicklung und verursachten wiederkehrende Epidemien. Daher waren die europäischen Stadtverwaltungen dazu gezwungen, moderne Abwasserbeseitigungssysteme zu planen und zu bauen. Die Vorreiterrolle übernahmen die Städte London und Paris. Die erste Stadt im kontinentalen Europa, die schon im Jahr 1871 über eine Wasserversorgung sowie eine Abwasserbeseitigung mit einer Kläranlage verfügte, war jedoch die Stadt Danzig [3, 4]. Beim Danziger Konzept ist die Komplexität der Wasser-Abwasser-Investition zu bewundern. Sie bestand aus einer Trinkwasserfassung (Drainagesystem in Danzig Prangenau), einem Wassernetz, einem Mischwasserkanalnetz, einer zentralen Pumpstation auf der Insel Kämpe und einer Kläranlage in Form der Rieselfelder in Danzig Heibuden. Die Oberkante der aktiven Filtrationsfläche war auf der Höhe von 3,0 m ü. NN, wobei der Grundwasserspiegel zwischen 1,5 und 2,5 m ü. NN schwankte. Im Untergrund der Rieselfelder befanden sich lockere Meeressande mit der Korngröße von 0,1 bis 0,5 mm. Die Filtrationsfläche betrug in der Anfangsphase 180 ha und wurde nach ein paar Jahren um 140 ha erweitert.

Die Stadt Hamburg war die erste deutsche Stadt, die schon im Jahr 1853 über ein gut ausgebautes Wasser-Abwasser-System verfügte. Die beiden Netze entwarf William Lindley (1808–1900), der die Bauarbeiten auch persönlich überwachte. In den Jahren 1871–1875 wurde in Hamburg ein Kollektor verlegt, der die Abwässer aus dem rechten Ufer der

Stadt sammelte und in die Elbe einleitete. Im Jahr 1863 fing die Stadt Frankfurt am Main mit dem Entwurf und dem Bau einer Abwasserkanalisation an.

Eine Expertengruppe unter Leitung von Dr. Virchow unterbreitete 1872 Vorschläge dazu, wie die hygienischen Missstände in Berlin beseitigt werden sollten. Schon 1873 begann James Hobrecht mit dem Bau einer Abwasserkanalisation. Die Stadt wurde in zwölf Radialsysteme unterteilt, die an den Tiefpunkten die Pumpstationen für Mischwasser erhielten. Diese Bauwerke transportierten das Abwasser aus der Stadt heraus und leiteten dieses auf die Rieselfelder. Im Jahr 1889 waren bereits eine Million Einwohner an dieses Abwassersystem angeschlossen.

Viele europäische Städte betreiben moderne Abwassersysteme, deren älteste Fragmente aus der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts stammen. Sie sind nach dem 150–200-jährigen Dienst teilweise sanierungsbedürftig, aber sie weisen häufig einen besseren technischen Zustand als die Leitungen aus den 1970er- und 1980er-Jahren auf. Diese historischen Bauwerke bilden heutzutage eine faszinierende unterirdische Welt, die in der ursprünglichen Form erhalten bleiben sollte. Die Betreiber der alten Kanalisationen müssen sich die Sanierung jeder historischen Haltung sehr sorgfältig überlegen, bevor diese schönen Bauwerke mit einem Kunststoff-Liner abgedeckt werden. Die modernen Baustoffe erlauben, was selten wirtschaftlich ist, solche Kanäle zu reparieren, ohne die vorhandene Bausubstanz zu verändern.

---

## 1.2 Hintergründe zu Netzbetrieb und Sanierungsentscheidung

### 1.2.1 Verwaltung, Unterhalt, Sanierung und Ausbau des Kanalnetzes – State of the Art

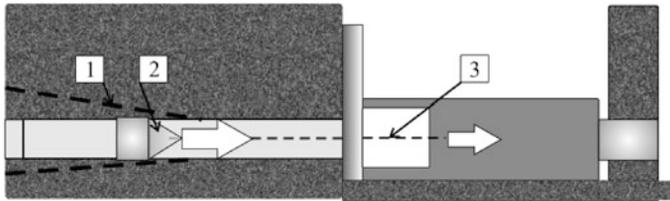
Das Ziel des Kanalbetriebs ist die Funktionsfähigkeit des Netzes. Das bedeutet, dass die Abwasserleitungen in der Lage sein müssen, gewisse Mengen von Abwasser von Punkt A nach Punkt B zu transportieren. Um funktionsfähig zu sein, müssen die Kanäle zudem dicht und standsicher sein. Die Standsicherheit ist im Arbeitsblatt ATV-A 127 [5], die Dichtheit in der DIN EN 1610 [6] definiert. Aus rechtlicher Sicht ist die Standsicherheit besonders wichtig. Im Zeitraum der Lebensdauer müssen die Kanäle diese Forderung erfüllen. Die rechtliche Verantwortung für den Zustand trägt der Kanalnetzbetreiber. Undichte Kanäle, die im Schwankungsbereich des Grundwassers fungieren, tragen zu Erhöhung der Betriebskosten bei. Sie belasten hydraulisch die Pumpwerke und die Kläranlage und beeinflussen die Reinigungsprozesse negativ. In besonderen Fällen können sie auch bauliche Katastrophen verursachen. Bei den Abwasserexfiltrationen sind die Verunreinigungen des Bodens und des Grundwassers zu erwarten [7–9].

- **Fazit** Die Kanäle müssen im Rahmen der technischen Lebensdauer funktionsfähig, dicht und standsicher sein – eine anspruchsvolle und interdisziplinäre Aufgabe. Ihre Bewältigung bereitet Probleme, weil die Abwassersysteme einem komplizierten und unregelmäßigen Alterungsprozess unterliegen [10].

Der technische Zustand von Abwasserkanälen ist abhängig von vielen Faktoren. Zu ihnen zählen die Qualität der Planung, die Herstellung der Rohre, die Ausführung, der Betrieb, die inneren und äußeren Belastungen, die Untergrundverhältnisse und die Eigenschaften des Abwassers. Eine weitere wichtige Rolle spielt der Zeitpunkt der Kanalverlegung. Von den vielen Faktoren hat der Betrieb einen entscheidenden Einfluss auf den technischen Zustand von Abwasserkanälen. Die moderne Exploitation eines Kanalsystems stellt einen interdisziplinären Zweig der technischen Wissenschaft dar und umfasst die Bereiche Verwaltung, Unterhalt, Sanierung und Ausbau des Netzes.

Die Verwaltung befasst sich mit der Erstellung von Haushaltsplänen, Gebührenkalkulationen, Analysen der Kosten und des Vermögens sowie der Bereitstellung von Finanzmitteln für Investitionen. Zu den Aufgaben des Kanalunterhalts gehören Hochdruckreinigung, einfache Sichtprüfung, Monitoring, Pflege und Aktualisierung der Kanaldatenbank sowie Reparaturmaßnahmen. Die Kanalsanierung (Renovierung) ist ein neues Gebiet der Bautechnik. Die ersten Versuche der Kanalsanierung wurden in den 1960er-Jahren durchgeführt. Im Jahr 1971 sanierte Eric Wood erfolgreich im Londoner Viertel Hackney mithilfe eines Liners (Inliner) eine Kanalhaltung aus Beton DN 600/1170 mm, die eine Länge von 70 m aufwies [11]. Diese Sanierungstechnik basierte auf dem Einsatz eines 9 mm dicken Nadelfilzschlauchs, dem ein loser Folienschlauch inne lag. Der Nadelfilzschlauch wurde mit ungesättigtem Polyesterharz (UP-Harz) getränkt und mit einer Winde in die zu sanierende Kanalhaltung eingezogen. Anschließend wurde der Schlauch mit Druckluft aufgestellt und bei Umgebungstemperatur ausgehärtet. Auf diese Weise entstand ein Rohr aus Kunststoff im Altrohr. Für die Betreiber war die Lebensdauer von solchen Produkten von großer Bedeutung. Anhand der entnommenen Materialproben und der Langzeitversuche wurde die Lebensdauer von Linern festgelegt. Man kann davon ausgehen, dass diese Konstruktionen 40–50 Jahre betrieben werden können. Inzwischen hat die Sanierungsbranche große Fortschritte gemacht, sodass diese Technologien ein relativ hohes technisches Niveau erreicht haben.

Die Instandhaltung von Abwasserkanälen mithilfe eines Liners ist heutzutage die populärste Technik. Sie hat viele Vorteile gegenüber anderen Methoden. Überzeugend ist das finanzielle Argument, weil die Kosten der Liner-Technik um etwa 50 % günstiger als die eines Ausbaus sind [12]. Das nächste Argument ist der grabenlose Charakter der Sanierung, was für die innenstädtischen Bereiche eine besonders große logistische Bedeutung hat [13, 14]. Bei der Planung von Sanierungsarbeiten sind die lokalen Randbedingungen, die Eigenschaften des Abwassers, die Güteklasse des Vorfluters sowie die spezifischen Anforderungen des Betreibers zu berücksichtigen. Die Linertechnologien haben konkrete Anwendungsgrenzen, die nicht überschritten werden sollten. Wenn die Voraussetzungen für eine Sanierungsmaßnahme nicht erfüllt sind, besteht fast immer die Möglichkeit, die betroffene Leitung zu erneuern. Der Neubau ist die sicherste und teuerste Sanierungsmethode. Eine interessante grabenlose Technik der Erneuerung als Alternative für den konventionellen Ausbau bietet die Berstliner-Methode [15]. Dieses Verfahren bricht die alte Rohrleitung auf und verdrängt sie in den umgebenden Untergrund. Gleichzeitig wird ein neues Rohr gleicher oder größerer Nennweite eingezogen. Je nach Krafteinleitung



**Abb. 1.3** Schematische Darstellung des statischen Berstlining-Verfahrens. 1 Altrohr, 2 Berstkörper, 3 Seil [15]

unterscheidet man zwischen dem dynamischen und dem statischen Berstliner. Beim dynamischen Berstliner unterstützt eine Seilwinde Berst- und Einziehvorgang. Als Verdrängungskörper dient ein druckluftbetriebener Bersthammer. Die Rammenergie wird auf die Altrohrleitung übertragen, sodass diese aufgebrochen wird. Beim statischen Berstliner findet die Krafteinleitung hydraulisch über ein Gestänge statt. Das leiterartig verbundene Gestänge zieht einen Berstkörper durch das alte Rohr, zerstört es und führt zugleich das neue Rohr ein. Das statische Berstlining-Verfahren für Leitungen DN 80–500 mm wird schematisch in Abb. 1.3 aufgezeigt.

Der letzte Bereich des Betriebs ist der Ausbau des bestehenden Kanalnetzes. Für den Neubau der Abwasserkanäle existieren grundsätzlich zwei Verfahren – die konventionelle Verlegung der Rohre im Rohrgraben und die grabenlose Bauweise. Die grabenlosen Verfahren werden aufgrund der technischen Vorteile v. a. in dicht bebauten Stadtzentren angewendet. Sie haben sich in Deutschland aufgrund der relativ hohen Kosten noch nicht etablieren können. Eine interessante Alternative zum konventionellen Verfahren stellt die Flüssigbodentechnik dar. Bei dem Verfahren wird die Leitungszone oder der komplette Rohrgraben mit dem sog. Flüssigboden verfüllt. Dieses Füllmaterial setzt sich aus Wasser, Zuschlagstoffen mit entsprechender Korngröße, Plastifikatoren und Bindemitteln zusammen. Aus diesen Komponenten entsteht eine fließfähige, selbstverdichtende Bindemittelsuspension (ein feinkörniger Porenleichtbeton). Nach der Aushärtung weist dieses Material interessante bauphysikalische Eigenschaften auf. Die Anwendung von Flüssigboden erlaubt, eine gleichmäßige Verdichtung der Leitungszone (optimale Bettung der Rohrleitung) zu erreichen [16]. Die Suspension kann in einem Werk hergestellt und anschließend mit Fahrmaschine an die Baustelle geliefert werden. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dieses Produkt direkt vor Ort auf Basis des Rohrgrabenaushubs herzustellen.

## 1.2.2 Motivation der Untersuchungen

Die durchgeführte Analyse zeigt, dass die Sanierung eine wichtige und teure Komponente des Kanalbetriebs darstellt. Aus diesem Grund ist es entscheidend, bei der Analyse des Kanalzustands die Grenze festzulegen, ab der die Sanierungsmaßnahmen notwendig sind. Diese Kenntnis ermöglicht, das Sanierungsvolumen und den Finanzbedarf zu bestimmen

und dadurch eine schnellere Kanalnetzalterung zu vermeiden. Gemäß der Schadenstheorie ist eine Kanalhaltung sanierungsbedürftig, wenn eine rapide Entwicklung der dokumentierten Schäden zu erwarten ist. Sie kann bei bestimmten Randbedingungen zu einer Baukatastrophe führen. Ein solches Szenario hat für die Kanalnetzbetreiber unangenehme technisch-rechtliche Konsequenzen. Heutzutage, dank des modernen Monitorings und der Kanalzustandsanalyse, ist dieser neuralgische Zeitpunkt rechtzeitig festzustellen. Unter Berücksichtigung der mittleren Kanalnetzgröße erhält man im Rahmen einer kompletten optischen Inspektion eine beachtliche Datenmenge, die nachfolgend bearbeitet werden sollte. Um diese Aufgabe in einem vernünftigen Zeitraum zu bewältigen, werden spezielle Algorithmen benötigt.

Trotz der technischen Fortschritte kommt es sehr oft in verschiedenen Ländern zu Kanalkatastrophen. Die größte und spektakulärste Kanalkatastrophe fand im Jahr 1957 in Seattle (USA) statt. Von 1909 bis 1913 wurde die kollabierte Leitung aus Mauerwerk DN 2000 mm 45 m unter der Geländeoberkante bergmännisch verlegt. Aufgrund von Grundwasserinfiltrationen entstand über dem Rohrscheitel ein großer Hohlraum. Dadurch drückten die Erdmassen in Richtung des Kanalinneren und verursachten einen Rohrbruch, der einen Krater mit der Fläche von  $30 \times 40$  m und der Tiefe von 45 m zur Folge hatte.

In dieser Monographie werden die Ergebnisse einer eingehenden Analyse des baulich-technischen Zustands des Schmutzwasserkanalnetzes präsentiert, das drei südlich von München gelegene Kommunen Oberhaching, Taufkirchen und Unterhaching entwässert. Anhand der empirischen Daten, die aus zwei kompletten optischen Inspektionen stammen, werden die theoretischen Kurven prognostiziert, die den Übergang der Kanalhaltungen von der Reparatur- bis zu der Sanierungszone beschreiben. Bei diesen statistisch-stochastischen Modellierungen wird der technische Zustand unter Berücksichtigung des Rohrwerkstoffs, der Gründungstiefe sowie der Untergrundverhältnisse analysiert. Zur Vereinfachung der Modellierungen wurde angenommen, dass alle Straßen im Verbandsgebiet, in denen Kanäle verlegt sind, der gleichen Verkehrsbelastung unterliegen. Die statistisch-stochastischen Untersuchungen umfassen Hauptsammler aus Ortbeton, öffentliche Steinzeugkanäle sowie Grundstücksanschlüsse aus Steinzeug, die oberhalb und unterhalb des Grundwassers funktionieren. Bei den öffentlichen Kanälen und Grundstücksanschlüssen wurde zudem die Gründungstiefe berücksichtigt. Die statistische Untersuchungsphase basiert auf der Weibull-Verteilung und der Momentmethode. Durch Schätzung der Weibull-Parameter mithilfe der Monte-Carlo-Methode wurden genauere Prognoseergebnisse erzielt.

---

### **1.3 Grundlagen und Ziel statistisch-stochastischer Kanalzustandsprognosen**

Die Ergebnisse von zwei kompletten optischen Inspektionen bildeten die Grundlagen der statistisch-stochastischen Zustandsprognosen des Kanalnetzes, das das Einzugsgebiet des Hachinger Bachs entwässert. Die untersuchte Kanalisation leitet Abwasser aus