

# Erneuerungsbedarfsprognosen für alternde Kanalisationssysteme

*Rolf Baur und Andrea Kerk (Dresden)*

## Zusammenfassung

Kanalisationssysteme weisen eine ausgeprägte Altersstruktur auf in der Kriege oder Phasen des Wirtschaftswachstums, ähnlich wie in der Altersstruktur der Bevölkerung, Spuren hinterlassen haben. Mit fortschreitendem Alter der Kanäle verschlechtert sich ihr Zustand.

Zur Beschreibung der Zustandsverschlechterung der Kanalisation lässt sich der Bestand jahrgangweise altern, ein Prozess, der mathematisch formuliert worden ist und bereits in PC-Anwendungsprogramme umgesetzt wurde. In diesem Artikel wird der prognostische Ansatz des Modells vorgestellt und anhand eines Anwendungsbeispiels erläutert.

Schlagwörter: Entwässerungssysteme, Kanalisation, Zustand, Klassifizierung, Modell, Erneuerung, Prognose

## Summary

### Replacement Needs Forecasts for Aging Sewer Systems

*Sewer systems have a very distinct age structure, on which wars or periods of economic growth have left their traces just as they have on the age structure of the population. With the passage of time, the condition of the sewers deteriorates.*

*To describe the deteriorating conditions in sewer systems, the current systems can be aged by age groups; this process has been expressed in a mathematical formula and has already been implemented in PC applications programmes. The following article describes the forecasting approach used for this model and it explains its application in one particular case.*

*Key words: drainage systems, sewer system, condition, classification, model, replacement, forecast*

## Résumé

### Prognostics du besoin de renouvellement des systèmes vieillissants de canalisation d'eaux usées

*Des systèmes de canalisation d'eaux usées montrent une nette structure de vétusté où des guerres ou des phases de la croissance de l'économie ont laissés des marques. L'état des égouts d'eaux usées se détériore avec la vétusté progressive.*

*Pour décrire la détérioration de l'état de la canalisation on peut faire vieillir l'effectif des égouts d'eaux usées par année, un procédé qui fut formulé mathématiquement et qui fut déjà réalisé dans des programmes d'emploi en ordinateur. Dans cet article, l'approche prognostique du modèle est présentée et expliquée à l'aide d'un exemple d'emploi.*

Notices matières: systèmes de canalisation d'eaux usées, canalisation état, classification, modèle, renouvellement, prognostic

## **Einleitung**

Der Zahn der Zeit nagt auch an Kanalisationsnetzen. Sie altern, ihr Zustand verschlechtert sich. Die Kanalabschnitte durchlaufen verschiedene, immer schlechtere Zustandsklassen, in denen sie sich unterschiedlich lang aufhalten, bis sie schließlich einen Zustand erreichen, der eine Erneuerung unabdingbar macht. Am Ende der technischen Nutzungsdauer stehen die Abflussfähigkeit und Standsicherheit des Kanals im Vordergrund, d.h. die hydraulische Leistungsfähigkeit und die Betriebssicherheit.

Der Alterungsprozess lässt sich mathematisch beschreiben. An der Universität Karlsruhe wurde ein Modell entwickelt, mit dem sich, analog zum Kohortenüberlebensmodell für Prognosen natürlicher Bevölkerungsbewegungen, der Erneuerungsbedarf von Infrastrukturnetzen Jahr für Jahr in die Zukunft projizieren lässt. Dieses Modell wurde inzwischen mehrfach auf Rohrnetze der Wasser- und Gasversorgung und auf Kanalisationsnetze angewandt. In beiden Fällen liegen benutzerfreundliche Programmsysteme vor, mit deren Hilfe auch eine Reihe von betriebswirtschaftlichen Fragen der künftigen Netz-erhaltung beantwortet werden können.

Die mathematisch statistischen Grundlagen, die empirische Eichung der Alterungsfunktionen aus Statistiken von Schadensfällen, Inspektionsbefunden und Erneuerungsaktivitäten in der Vergangenheit und ihre Anpassung an künftige Standards, Finanzierungsmöglichkeiten und Unternehmensphilosophien sollen hier nicht erörtert werden. Dazu wird auf einschlägige Veröffentlichungen verwiesen (z. B. [1-3]). In diesem Artikel soll über den prognostischen Ansatz in allgemein verständlicher Form berichtet werden.

## **Nutzungsdauer der Kanalisation**

Der Bestand unserer Kanalisationssysteme stammt aus den verschiedensten Epochen der letzten 150 Jahre und ist in seiner Zusammensetzung von Phasen unterschiedlicher Ausbauphase geprägt. Physischer Verschleiß, veränderte Abwassermengen oder Qualitätsanforderungen und -auflagen sind Faktoren, die den Alterungsprozess des Netzes kennzeichnen. Dieser Alterungsprozess, der mit einer Zustandsverschlechterung verbunden ist, ist erst abgeschlossen, wenn ein Kanalabschnitt erneuert wird. Die tatsächliche Nutzungsdauer eines Kanals wird damit

beendet, und ein neues Kanalleben beginnt.

Die Zustandsverschlechterung eines Kanals lässt sich nicht einfach aus den vorhandenen technischen Randbedingungen ableiten und schreitet auch nicht kontinuierlich fort. Deshalb ist schwer zu sagen, wann der Zeitpunkt erreicht sein wird, an dem die Nutzungsdauer beendet ist. Die Kanalinspektion liefert wertvolle Hinweise, aber neben technischen und ökonomischen Aspekten spielt auch die persönliche Einschätzung der künftigen Anforderungen durch die Verantwortlichen eine entscheidende Rolle.

Die Zustandsverschlechterung der Kanalisation kann mit Indikatoren beschrieben werden, die den physischen Zustand und die Funktionalität des Kanalabschnittes messen. Bei der Überwachung der Kanäle gewonnene Schadensdaten werden in Datenbanken erfasst und ausgewertet. Mehrmalige Kanalinspektionen ermöglichen die schrittweise Aufzeichnung von Schadensverläufen. Die Auswertung liefert dann ein Ergebnis, aus dem sich sowohl der Erhaltungszustand der Haltungen, als auch die Dringlichkeit einzelner Erhaltungsmaßnahmen ableiten lässt.

Durch die Definition von Übergangsgrenzen, wie z. B. nach dem Merkblatt ATV-M143 und in Anlehnung an das Merkblatt ATV-M <sup>149</sup>, werden Haltungen verschiedenen Zustandsklassen zugeordnet. Da hierbei der größte Einzelschaden den Ausschlag für die Zuordnung einer Haltung zu einer Zustandsklasse gibt, kommt es allerdings zu einer Verzerrung bei der Beurteilung des Erhaltungszustandes der Kanalisation. Die Dringlichkeit der Reparatur eines punktuellen Schadens erlaubt noch kein Urteil über die verbleibende Restnutzungsdauer der übrigen Haltungslänge, ein Umstand, der bei der Ermittlung des finanziellen Aufwandes für die Kanalsanierung zu berücksichtigen ist.

Von der Verlegung, dem schadensfreien Zustand, durchläuft eine Kanalisationshaltung schlechter werdend alle Zustandsklassen bis zur Erneuerung, deren Zeitpunkt durch das Festlegen des Interventionszustandes beeinflusst wird.

## **Modell des Alterungsprozesses**

Wie lässt sich die Zustandsverschlechterung der Kanäle beschreiben? Kommt es zur Neuverlegung eines Kanals, werden innerhalb einer gewissen Zeitspanne, abgesehen von Garantieschäden, keine gravierende Schäden auftreten, die zur Sanierung oder Auswechslung einer Haltung führen.

Ab einem bestimmten Zeitpunkt werden in einzelnen Bereichen oder Punkten die ersten Schadensanzeichen auftreten. Eine erkennbare Zustandsverschlechterung hat damit eingesetzt, und die Wahrscheinlichkeit steigt, dass sich der Zustand, auch weiterer Kanalabschnitte, verschlechtert. Ein Prozess setzt ein, der sich mathematisch beschreiben lässt [1].

Der an der Universität Karlsruhe entwickelten Ansatz benötigt hierzu drei Parameterwerte, die sogenannte Resistenzzeit  $c$ , den Alterungsfaktor  $a$  und den Ausfallfaktor  $b$ . Bis zur Resistenzzeit  $c$  findet praktisch keine Zustandsverschlechterung statt. Mit dem Alterungsfaktor  $a$  wird die Geschwindigkeit des Alterungsprozesses beschrieben, für  $a = 0$  findet keine Alterung statt. Der Ausfallfaktor  $b$  beschreibt die maximale Ausfall- oder Übergangsrate.

Die gewählte mathematische Verteilungsfunktion hat die Eigenschaft, dass die Ausfallrate nicht kontinuierlich steigt, sondern sich im hohen Alter einem konstanten Wert annähert. Aus der in Abbildung 1 dargestellten Überlebensfunktion lässt sich die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall eines Elementes ableiten.

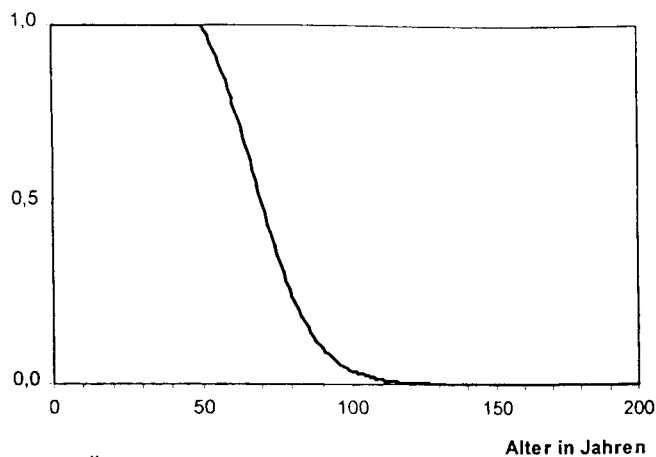


Abbildung 1: Überlebensfunktion

Im Gegensatz zu Leitungsnetzen der Trinkwasserversorgung können bei Abwasserkanälen aufgrund der Erkenntnisse aus der Netzinspektion mehr als die beiden Zustände funktionsfähig oder unbrauchbar unterschieden werden, so dass eine Einteilung in Zustandsklassen möglich ist. Diese Zustandsklassen lassen sich mit Kurvenscharen der Alterungsfunktionen darstellen. Die Überlebensfunktion fächert sich dann in mehrere Zustandsübergangsfunktionen auf, und an die Stelle der Einzelparameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  treten die Vektoren  $A$ ,  $B$ , und  $C$ .

Wie lange ein Kanal einer Zustandsklasse angehört, hängt von der Geschwindigkeit des Alterungsprozesses ab, die von Faktoren wie Material, Durchmesser, Abwasserqualität, äußeren Lasten und veränderten technischen Anforderungen beeinflusst wird. Daneben ist auch die Definition der Zustandsklassen maßgebend für die Festlegung der Übergangsgrenzen von einer Zustandsklasse in eine andere. Besonderes Interesse gilt dabei dem Übergang in die Interventions-Zustandsklasse, dem Zustand, der bestimmten Anforderungen nicht mehr genügt, der von den Netzbetreibern als nicht mehr akzeptabel angesehen wird und deshalb eine Sanierung oder Erneuerung der Haltung erfordert. Der Erneuerungsbedarf ist dann abhängig von einem defi-

nierten Mindestzustand bzw. Anteil von Kanalhaltungen, deren Zustand nicht mehr toleriert wird.

## **Das Kohortenüberlebensmodell**

Das Alterungsmodell, mit dem die Zustandsverschlechterung beschrieben und prognostiziert werden kann, ist in der Demographie als Kohortenüberlebensmodell bekannt [4]. Als Kohorten wurden im Alten Rom Einheiten der städtischen Sicherheitspolizei und der Feuerwehr, aber auch Teile von Legionen bezeichnet. Den Begriff wandte Whelpton 1949 auf eine Methode zu Bestimmung natürlicher Bevölkerungsbewegungen an, eine Methode, die später rechen-technisch noch vereinfacht wurde. Im sogenannten Cohort-Survival-Model sind die Kohorten Geburtenjahrgänge, die, je älter sie werden, mit steigender Wahrscheinlichkeit dezimiert werden. Mit dieser Sterberate und der prognostizierten Geburtenrate wird die Entwicklung der Bevölkerungszahl ermittelt.

Die Sterbewahrscheinlichkeit wird im Modell für Infrastrukturnetze der Ausfall- bzw. Erneuerungsrate gleichgesetzt und bei mehr als zwei Zuständen als Zustandsübergangsrate beschrieben. Analog zu Frauen und Männern, die ebenfalls unterschiedliches Alterungsverhalten zeigen, lassen sich Rohr- und Kanaltypen nach ihrem Alterungsverhalten bilden. Voraussetzung für eine gute Prognose sind aktuelle, möglichst nach Verlegejahr, Material, Nennweite, Verlegetiefe und äußerer Beanspruchung differenzierte Bestands- und Zustandsdaten des Kanalisationsnetzes. Einem Leitungstyp werden die Alterungsfunktion oder die Übergangsfunktionen seiner Zustandsklassen zugewiesen, mit denen die Anlagenteile, für jedes Verlegejahr als Kohorten definiert, bis zum Prognosehorizont gealtert werden. Damit erhält man für jede Leitung unter Einbeziehung der Ergebnisse aus Inspektionen und deren Auswertung die Jahr für Jahr zu erwartende Restnutzungsdauer im Hinblick auf einen definierten Mindestzustand.

Auch in der volkswirtschaftlichen Vermögens- und Anlagenbewertung hat sich das Modell bewährt; dort als Perpetuallinventory-Concept, das die Investitionen der Vergangenheit jahresweise abschreibt. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung hat diese Methode z. B. zur Bestimmung des künftigen Ersatzbedarfs der Bundesverkehrswege angewandt [51].

## **Anwendung**

Ziel vorausschauender Erhaltungspolitik ist, den Zeitpunkt der Erneuerung möglichst kurz vor den Eintritt in diesen nicht mehr akzeptablen Zustand zu legen. Grundsätzlich bestehen Unterschiede in der Anwendung des Modells auf die Netze der Wasser- und Gasversorgung auf der einen und die der Kanalisation auf der anderen Seite. Bei Versorgungsnetzen kann sich die Entscheidung zur Sanierung nur in Einzelfällen auf bekannte Schäden stützen, im Regelfall ist es die Häufigkeit eingetretener Schadensfälle. Dagegen wird im Kanalnetz fast ausschließlich

aufgrund der Beurteilung des Zustandes nach einer Inspektion saniert. Eine fehlerhafte Einschätzung des Erhaltungszustandes einer Versorgungsleitung führt zu Fehlinvestitionen, da vorhandene Restnutzungsdauer „verschenkt“ wird oder die Reparaturkosten steigen. Eine verfrühte Inspektion des Kanalnetzes zieht dagegen vergleichsweise geringe Kosten nach sich. Eine optimistische Einschätzung des Kanalzustandes betrifft in der Regel nicht die Betriebssicherheit, sondern hat Folgen in Form von Grundwasserverschmutzung oder erhöhtem Fremdwasser, wenn die Schäden zu spät erkannt werden.

Wegen dieser Unterschiede bei Trinkwasser- und Abwasserleitungen hat sich das Karlsruher Kohortenmodell für die Infrastrukturerhaltung in zwei Richtungen weiterentwickelt. Für Trinkwasser- und Gasversorgungsnetze wurde am Lehrstuhl Stadtbauwesen der Technischen Universität Dresden im Auftrag der American Water Works Association Research Foundation AWWA-RF ein Software basiertes Anwendungsprogramm entwickelt, mit dem der künftige Erneuerungsbedarf für Versorgungsnetze berechnet werden kann [9]. Die Anlagenteile, die nach Alter und Typ in Kohorten zusammengefasst sind, werden jahrgangsweise bis an das Ende des Prognosezeitraumes gealtert. Unter Verwendung des vorgestellten Ansatzes werden jährliche Erneuerungsraten und die Restnutzungsdauer des Leitungsbestandes unter optimistischen und pessimistischen Annahmen prognostiziert. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Entwicklung einer unternehmenseigenen Erneuerungsstrategie. Im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Rechnung werden die Investitionskosten für die Rehabilitation den Einsparungen durch vermiedene Reparaturkosten und Leckageverluste gegenüber gestellt [6].

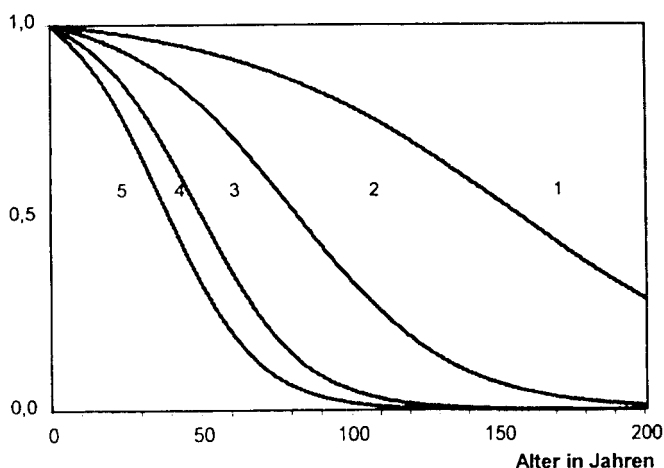


Abb. 2: Zustandsübergangsfunktionen

Für die Anwendung des Modells auf Kanalisationsnetze bieten sich durch die Einbeziehung von Zustandsdaten weitergehende Möglichkeiten. An Stelle der geschätzten Überlebensfunktionen treten Zustandsübergangsfunktionen, die aus den Inspektionsbefunden für jedes Netz neu ermittelt werden. Das in Abbildung 2 dargestellte Beispiel zeigt Zustandsübergangsfunktionen, die

für eine Stadt in Norwegen aus den Inspektionsdaten, mit den dort geltenden Definitionen der Zustandsklassifikation errechnet wurden. Der Abstand zwischen den Zustandsübergangsfunktionen kennzeichnet dabei den Zeitraum, in dem die einzelnen Kanalhaltungen einer Zustandsklasse zuzuordnen sind. Abhängig vom Alter einer Haltung lässt sich so der Zeitpunkt ihres Übergangs in die nächstfolgende Zustandsklasse oder das Erreichen des Interventionszustandes prognostizieren. Mit diesem Ergebnis kann für Kanalisationsnetze zunächst eine Inspektionsstrategie entwickelt werden, mit der auf effiziente Weise die Abschnitte bestimmt werden können, deren Zustand zu inspizieren ist. Diese Vorgehensweise stellt eine qualitative Verbesserung der Kanalnetzüberwachung dar, bei der unter Berücksichtigung der Alterungs- und Zustandsprognose gezielt solche Netzabschnitte überwacht werden können, die eine kritische Zustandsverschlechterung in nächster Zeit erwarten lassen. Mittelfristig können dadurch höhere Sanierungskosten durch zu spätes Erkennen von Anfangsschäden vermieden werden. Andererseits eröffnet sich auch die Möglichkeit, Teile des Netzes aus dem Zehn-Jahres-Inspektionsturnus herauszunehmen, wenn eine Verschlechterung des Erhaltungszustandes frühestens in zehn, zwanzig oder mehr Jahren zu erwarten ist.

Neben der Inspektionssteuerung bietet der Prognoseansatz auch die Möglichkeit zur Simulation unterschiedlicher Sanierungsstrategien. Die aus den Übergangsfunktionen prognostizierte Restlebenserwartung lässt Rückschlüsse darauf zu, wie sich eine Netzverschlechterung durch nicht ausgeführte Sanierungsmaßnahmen auf den künftigen Erneuerungsbedarf auswirkt [7].

Allgemein stehen Netzbetreiber vor der Wahl, Leitungen komplett neu zu verlegen oder auf ein kostengünstigeres Sanierungsverfahren zurückzugreifen. Durch die Entscheidung gegen eine Ersatzerneuerung zugunsten einer Low-Cost-Sanierung kommt es zu erheblichen Einsparungen bei den momentan aufzubringenden Investitionen, doch der Zeitpunkt der Sekundärerneuerung rückt aufgrund der geringeren Lebenserwartung bzw. Nutzungsdauerverlängerung näher. In Langzeitprognosen können die Erneuerungsmaßnahmen variiert und auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden.

## **Fazit**

Die Erneuerungsentscheidung ist bei langlebigen Gütern wie der technischen Infrastruktur schwierig, sie muss allerdings nicht kurzfristig getroffen werden.

Mit dem dargestellten Ansatz gelingt es, die Zustandsverschlechterung und die Ausfallraten stadttechnischer Netze zutreffend zu beschreiben. Die Verknüpfung der Prognoseergebnisse mit ökonomischen Modellrechnungen ermöglicht, den jährlichen Erneuerungsbedarf zu bestimmen, und dient damit als Entscheidungshilfe bei der mittelfristigen Investitionsplanung. Dabei ist es notwendig, die Inspektionsbefunde in eine Zustandsbewertung so zu übertragen, dass diese eine realistische Einschätzung des künftigen Investitionsbedarfs erlaubt.





## Literatur

[1] Herz, R./Hochstrate, K.:

Erneuerungsstrategien für städtische Infrastrukturnetze, Jahrbuch für Regionalwissenschaft 1987, Band 8. 5. 67 ff.

[2] Herz, R.:

Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen — Ein Kohortenüberlebensmodell/, Jahrbuch für Regionalwissenschaft 1995. Band 14/15, 5. s if.

[3] Baut, R./Herz, R.:

Service Life Management of Water Mains and Sewers. Proceedings of the 13th European Junior Scientist INorkshop, 1999. Technische Universität Dresden

[4] Whelptan, P, K.:

cohort Analysis of Fertitity, American Sociological Review 1949, Band 14

[5] Kuhfeld, H.:

Prognose des Erneuerungsbedarfs nach dem Perpetual-Inventory-concept, In: Kbhl, V,l.. Hrsg.: Erneuerung städtischer Infrastruktur. 5eminarbericht des Instituts für Städtebau und Landesplanung, 1987, Universität Karlsruhe, S. 115 ff.

[6] Herz, R.:

Exploring rehabilitation needs and strategies for drinking water distribution networks, 1. Water SRT - Aqua 12/1998

[7] Hochstrate K./Jansen. K.:

Werterhaltung und Finanzierung von Abwasserkanalnetzen durch vorbeugende Instandhaltung. Korrespondenz Abwasser. 43. Jg., 2/1996.S. 284 ff.

[8] Hochstrate, K.:

Opt/mierung des Netzzustandes unter schwierigen rechtlichen und finanziellen Randbedingungen, Vortrag am Lehrstuhl Stadt bauwesen, 1998, TU Dresden

[9] Deb. A., Herz, R. et al.:

Quantifying future rehabilitation and replacement needs of water mains, Final report of AWWARF research project 265, 1998 Denver: AWWARF

Autoren

Dipl.-Ing. Rolf Baur und Andrea Kerk

Lehrstuhl Stadtbauwesen

Technische Universität Dresden

01062 Dresden