



Doctoral Thesis

## Sewer rehabilitation planning under uncertainty

**Author(s):**

Egger, Christoph S.

**Publication Date:**

2015

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010532893> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22594

## **Sewer rehabilitation planning under uncertainty**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZÜRICH

(Dr. sc. ETH Zürich)

presented by

Christoph Simon Egger

Dipl.-Ing. Wasserwirtschaft, Technische Universität Dresden

born on 06.10.1978  
citizen of Germany & EU

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Eberhard Morgenroth, examiner

Prof. Dr. Peter Krebs, co-examiner

Prof. Dr. Max Maurer, co-examiner

2015

## Summary

The need for renewal of sewer systems will increase in coming decades. However, efficient and effective rehabilitation involves substantial planning challenges. These challenges are due to the typically limited degree of documentation of existing infrastructure, variability of input data and deterioration processes, lack of knowledge on the current and indeed future structural condition of sewer systems and unpredictable external influences. Planning challenges are even more pronounced in small utilities as (i) the rehabilitation demand will increase more markedly and (ii) informational, personal and financial planning resources are typically more restricted. Furthermore, it is necessary to make the planning process transparent as a wide range of stakeholders is involved and affected by the planning decisions.

The aim of the present study was to develop and identify methodologies for sewer deterioration modelling and hydraulic design that improve (strategic) rehabilitation planning. At the same time the importance of factors affecting the outcome of rehabilitation, including a range of uncertainties, were identified.

Estimating the aging behavior of sewer systems is difficult due to the frequently encountered discrepancy between common model structures and data. Existing sewer condition records serving as calibration data are often affected by changes, or even discarded in connection with rehabilitation measures realized in the past. This explains, for instance, the fact that condition records of pipes that have been replaced in the past are no longer available. Consequently, the remaining data no longer exclusively represent the deterioration of pipes but also reflect the (condition improving) rehabilitation of the network. Rehabilitation exerts a selective effect on the pipe population as fast aging pipes are, as a rule, rehabilitated at a lower age. Naively calibrating a deterioration model with such data consequently results in overestimated sewer lifespans. We therefore combined a sewer deterioration model with a rehabilitation model corresponding to the processes reflected by the data. We used Bayesian inference to fully exploit the available information and to overcome problems with parameter identifiability.

The combined deterioration and rehabilitation model effectively compensates for the distorting effect of rehabilitation reflected by the data. The identifiability of the model is, however, limited and is only possible when considering prior knowledge. Bayesian inference consequently constitutes a very attractive methodology in the domain of sewer deterioration modelling as it copes with the limited informational content of the data and because prior knowledge is available.

Beside the structural aging of sewers, rehabilitation is determined by hydraulic aspects. Current hydraulic design practices have been questioned due to anthropogenic impacts on extreme precipitation

properties and, consequently, on the hydraulic performance of sewer systems. We applied stochastic downscaling to refine the precipitation output of multiple climate models to address this impact, including its prediction uncertainty. The data and methodologies applied represent our best knowledge on current and future (extreme) precipitation properties. This information was then used in long-term hydraulic simulations to quantify the performance of selected sewer systems under current and future climatic conditions. The stochastic precipitation data was also used to specifically consider the uncertainties encountered in designing sewer systems.

The methodology developed for deterioration modelling and hydraulic design and their combined application was demonstrated in a case study. At the same time we explored different factors influencing sewer rehabilitation as well as the outcomes of various rehabilitation strategies in terms of costs, conditions and hydraulic performance under different socio-economic conditions. Multi-criteria decision analysis (MCDA) was applied to identify well-accepted rehabilitation strategies for given preferences of stakeholders.

The impact of climate change and inherent uncertainties were found to be insignificant in the Swiss case studies investigated and the 40-year horizon considered. Significant uncertainty in the extreme precipitation properties arises because we can only observe a ‘random’ realization of the precipitation. This is due of the relatively ‘short’ observation periods of typically 30-40 years.

Rehabilitation needs primarily arise from structural deficits and to a lesser extent from hydraulic deficits in the - typical for Switzerland - hydraulically robust sewer networks investigated. However, to attain a higher hydraulic reliability under consideration of these uncertainties relevant extra costs may arise. This is particularly the case if the hydraulic rehabilitation is planned to be completed within a few decades as many pipes would have to be replaced which are still in good structural condition. The results constitute a valuable basis for the revision of current design practice, ensuring a greater hydraulic robustness of sewer systems.

The results show that the overall conditions, particularly of the small, “young” aged networks, are distinctly dynamic, non-intuitive and strongly influenced by external factors. This underlines the usefulness of sewer deterioration models and consideration of different scenarios in sewer rehabilitation planning as well as the need for regularly re-evaluating rehabilitation strategies.

The most extensive rehabilitation strategies turned out to be the most accepted ones as a result of the MCDA. The decision support obtained by MCDA is, however, supposedly affected by significant biases in the preferences elicited. This is probably due to the failure to provide adequate attributes comprehensible for stakeholders on the basis of the technical and partly probabilistic predictions.

---

## Zusammenfassung

Der Erneuerungsbedarf von Kanalisationen wird in den nächsten Jahren vielerorts ansteigen. Eine effiziente und effektive Umsetzung dieses Bedarfs beinhaltet jedoch substanzielle planerische Herausforderungen. Diese sind begründet in limitiertem Dokumentationsgrad bestehender Infrastruktur, Variabilität von Eingangsgrößen und Alterungsprozessen, fehlendem Wissen über den heutigen und zukünftigen baulichen Zustand der Infrastruktur, sowie in hohem Masse unbekanntem äusseren Einflussfaktoren. Insbesondere kleine Kanalnetzbetreiber sind von diesen Herausforderungen betroffen, da im ländlichen Raum oftmals (i) der Erneuerungsbedarf ausgeprägter ansteigen wird und (ii) dessen Planung informationell, personell wie finanziell noch stärkeren Einschränkungen unterliegt. Weiterhin gilt es entsprechende Planungen transparent zu gestalten, da ein breites Spektrum an Akteuren an Entscheidungen beteiligt und betroffen ist.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es methodische Ansätze zur Kanalalterungsprognose und hydraulischen Bemessung aufzuzeigen, welche die (strategische) Erneuerungsplanung verbessern. Durch die praktische Anwendung konnte darüber hinaus aufgezeigt werden, welche Faktoren, insbesondere verschiedene Unsicherheitsquellen, bei der Erneuerungsplanung von Bedeutung sind.

Die Schätzung des physischen Alterungsverhalten von Kanalnetzen ist eine Herausforderung, da in vielen Fällen eine Diskrepanz zwischen Modellstruktur und Daten besteht. Vorhandene Kanalzustandsdaten aus denen sich der Alterungsprozess eines Netzes grundsätzlich ableiten liesse, sind oftmals beeinflusst von Datenmutationen in Verbindung mit umgesetzten Erneuerungsmassnahmen. Dies führt etwa dazu, dass keine Zustandsdaten mehr von Leitungen vorliegen, welche in der Vergangenheit ersetzt worden sind. Damit repräsentieren die Daten nicht mehr nur den Alterungsprozess alleine sondern auch die der Alterung entgegengesetzte Erneuerung. Erneuerungen haben dabei einen selektiven Effekt auf die Kanalleitungspopulation indem schnellalternde Leitungen entsprechend früher erneuert werden. Wird ein reines Alterungsmodell unbefangen mit solchen Daten kalibriert, kann die Lebensdauer der Leitungen stark überschätzt werden. Konsequenterweise haben wir ein Kanalalterungsmodell kombiniert mit einem Erneuerungsmodell entsprechend den durch die Daten repräsentierten Prozesse Alterung und Erneuerung. Um die Identifizierbarkeit dieses kombinierten Modells zu erreichen, verwendeten wir Bayes'sche Inferenz zur Einbeziehung von Vorwissen.

Durch das kombinierte Alterungs- und Erneuerungsmodell können realistische Alterungsprognosen gemacht werden indem es den verzerrenden Effekt der selektiv wirkenden Erneuerung auf die Daten effektiv kompensiert. Die Identifizierbarkeit dieses Modells ist allerdings nur unter Einbeziehung von Vorwissen etwa durch Bays'sche Inferenz möglich. Generell stellt Bayes'sche Inferenz ein attraktives Werkzeug für die Schätzung von Alterungsparametern dar, da typischerweise der Informationsgehalt der Daten einerseits begrenzt ist, andererseits (subjektives) Vorwissen jedoch vorhanden ist.

Der Rehabilitationsbedarf wird neben der physischen Alterung der Systeme auch bestimmt durch deren hydraulischen Leistungsfähigkeit. Bisherige hydraulische Bemessungspraktiken wurden in der Vergangenheit aufgrund menschlich bedingter Einflüsse auf die Eigenschaften von Starkniederschlag in Frage gestellt. Um diesen Einfluss sowie die damit verbundene Prognoseunsicherheit auf das hydraulische Leistungsvermögen von Kanalnetzen zu untersuchen verwendeten wir Prognosen von verschiedenen Klimamodellen, welche mit Hilfe von stochastischen Regenmodellen in ihrer räumlichen wie zeitlichen Auflösung verfeinert wurden. Die verwendeten Daten und Methoden spiegeln dabei bestes Wissen in Bezug auf heutigen und zukünftigen Extremniederschlag wieder. Diese Regeninformation wurde anschliessend in hydraulischen Langzeitsimulationen verwendet um das Überstauverhalten ausgewählter Kanalnetze unter heutigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen zu quantifizieren. Ausserdem wurden die stochastischen Regendaten unter spezifischer Berücksichtigung von Unsicherheiten zur Planung von hydraulischer Rehabilitation von Kanalnetzen benutzt.

Die erarbeitete Methodik zur Alterungsprognose und hydraulischen Bemessung wurde kombiniert in einem Fallbeispiel angewendet. Somit wurde deren (kombinierte) Anwendbarkeit aufgezeigt als auch die Folgen verschiedenster Strategien zur baulichen und hydraulischen Erneuerung auf Zustand, Leistung und Kosten der Systeme unter verschiedenen sozio-ökonomischen Bedingungen. Mit Hilfe von multikriterieller Entscheidungsanalyse (MCDA) wurde schliesslich die Akzeptanz der Strategien unter gegebenen Präferenzen von relevanten Akteuren bestimmt.

Der Einfluss des Klimawandels und der Klimaprognose anhaftenden Unsicherheit haben sich in unserem schweizerischen Anwendungsfall und betrachteten Zeithorizont von 40 Jahren als relativ unbedeutend erwiesen. Bedeutende Unsicherheit haftet den relevanten extremen Niederschlagseigenschaften an von denen nur eine ‚zufällige Stichprobe‘ vorliegt. Diese ist bedingt durch die relativ ‚kurzen‘ Beobachtungsdauern von hochaufgelösten Extremereignissen von typischerweise 30-40 Jahren.

Der Erneuerungsbedarf wird in erster Linie durch bauliche und weniger durch hydraulische Defizite bestimmt in den untersuchten, für die Schweiz typischen, hydraulisch robusten Netzen. Allerdings führt die höhere hydraulische Robustheit der Netze, erzielt durch Berücksichtigung der Unsicherheit von Starkniederschlag, zu relevanten Mehrkosten bei der hydraulischen Rehabilitation. Diese sind umso ausgeprägter je zeitnäher die hydraulische Rehabilitation abgeschlossen sein soll, da mehr Leitungen in noch gutem baulichen Zustand ersetzt werden müssten. Die Ergebnisse stellen insgesamt eine Diskussionsgrundlage für eine Überarbeitung der Bemessungspraxis dar, welche eine grössere hydraulische Zuverlässigkeit der Systeme sicherstellt.

Die Resultate zeigen, dass der Gesamtzustand der kleinen, insbesondere der noch recht ‚jungen‘ Netzen ausgesprochen dynamisch verläuft, stark durch äussere Randbedingungen beeinflusst wird und schwer absehbar ist. Dies unterstreicht sowohl die Nützlichkeit von Alterungsmodellen und Betracht-

tung verschiedener Szenarien bei der Planung als auch die Notwendigkeit Erneuerungsstrategien regelmässig zu überprüfen.

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse ergab, dass ausgesprochen extensive Rehabilitationsstrategien die höchste Akzeptanz besitzen. Allerdings ist die Entscheidungsanalyse vermeintlich stark beeinflusst von Verzerrungen in den eruierten Präferenzen. Dies ist wahrscheinlich begründet in der Unzulänglichkeit geeigneter, verständlicher Attribute zu beschreiben auf Basis der technischen und teils probabilistischen Prognosen.