

# **Rehabilitationsplanung von Kanalnetzen unter Unsicherheit**

Christoph Egger, Max Maurer

Eawag, Dübendorf

## **Kurzfassung**

Vielerorts zeichnet sich mittelfristig ein steigender Sanierungsbedarf von Kanalnetzen ab, der vor allem auf zunehmende bauliche Mängel zurück geführt wird. Gleichzeitig stellt sich die Frage der hydraulischen Anpassung, die durch menschliche Einflüsse auf das Klimasystem und relevanter Niederschlagseigenschaften an Dringlichkeit gewonnen hat. Die Einbeziehung dieses Aspekts in die hydraulische Bemessung wohnt die Unsicherheit der Klimaprognosen inne. Darüber hinaus haftet den der hydraulischen Bemessung zugrundeliegende Regeninformation erhebliche Stichprobenunsicherheit an, die durch die heutige Bemessungspraxis vernachlässigt wird. Mit stochastischen Niederschlagsmodellen lassen sich diese Schlüsselunsicherheiten berücksichtigen und reduzieren. Ziel ist es aufzuzeigen, welche Bedeutung diese Unsicherheiten auf den zukünftigen hydraulischen Sanierungsbedarf und den Sanierungsbedarf insgesamt haben, falls die Bemessungsziele auf einem hohen Konfidenzniveau erreicht werden sollen. Es zeigt sich, dass der hydraulische Sanierungsbedarf unter dieser Voraussetzung erheblich und zeitweise in ähnlicher Größenordnung wie der baulich bedingte sein kann. Bei zeitnaher Umsetzung der hydraulischer Sanierung ist nur mit wenigen Synergien zwischen hydraulischer und baulicher Sanierung zu rechnen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Notwendigkeit bei der hydraulischen Bewertung von Entwässerungssystemen in höherem Maße die Vulnerabilität der Einzugsgebiete zu berücksichtigen. Dies erlaubt nicht nur eine größere Bandbreite von möglichen (günstigeren) Maßnahmen zur Anpassung zu betrachten, sondern auch eine Priorisierung von solchen zu bestimmen als auch eine höhere Robustheit der Systeme zu gewährleisten.

## **1 Einleitung**

In OECD-Ländern wird sich der Rehabilitationsbedarf der Infrastruktur zur Siedlungsentwässerung allein schon aus baulichen Gründen in den nächsten Jahren vergrößern (z.B. Cashman und Ashley, 2008). Unabhängig vom baulichen Zustand der Lei-

tungen kann sich zusätzlich hydraulisch begründeter Sanierungsbedarf ergeben, etwa durch unterdimensionierte Leitungen sowie veränderte Einzugsgebiets- und Regeneigenschaften. Insbesondere menschliche Einflüsse auf das Klimasystem und das Niederschlagsregime haben Diskussionen über den Anpassungsbedarf der Systeme und der zugrundeliegenden Dimensionierungspraxis vorangetrieben (z.B. Arnbjerg-Nielsen und Fleischer, 2009; Arnbjerg-Nielsen, 2011; Mailhot und Duchesne, 2010). Zukünftige Niederschlagseigenschaften etwa für die Bemessung von Kanalisationen können mit Hilfe stochastischer Regenmodelle berücksichtigt werden (Fowler et al., 2007; Paschalis et al., 2014). Mit diesen lassen sich die von Klimamodellen prognostizierten grobskaligen Änderungen des Niederschlagsregimes auf die örtlich, in hoher Zeitauflösung beobachteten Niederschlagseigenschaften statistisch übertragen. Durch die Verwendung von Prognosen, die von verschiedenen Klimamodellen stammen, kann die Unsicherheit der Klimamodelle in den erzeugten Regenserien abgebildet werden (Räisänen, 2007). Eine weitere wichtige Eigenschaft der stochastischen Regenmodelle ist, dass sich mit ihnen beliebig umfangreiche Regenserien erzeugen lassen. Somit lassen sich die häufig endlastig verteilten Niederschlagsintensitäten besser abbilden als mit den relativ kurzen zur Verfügung stehenden historischen Regenserien (Egger und Maurer, 2015).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es aufzuzeigen wie unsichere (zukünftige) Niederschlagseigenschaften den hydraulischen Sanierungsbedarf und den Sanierungsbedarf insgesamt beeinflussen. Zu diesem Zweck betrachten wir vier mögliche langfristige Strategien zur baulichen Sanierung von zwei Kanalnetzen und deren Auswirkungen auf Kosten und Gesamtzustand der Netze über einen Zeithorizont von 40 Jahren. Der Alterungsprozess der Netze wird dabei durch ein statistischen Alterungsmodell repräsentiert (Egger et al., 2013). Der (mittelfristige) hydraulische Sanierungsbedarf wird ermittelt anhand einer bestehenden Richtlinie zur Kanalnetzbemessung (DWA, 2006). Diese wurde jedoch erweitert mit der Bedingung, dass die Bemessungsziele mit einer bestimmten „hohen“ Sicherheit erreicht werden sollen unter den gegebenen (unsicheren) Klimaprognosen und stochastischen Regeneigenschaften.

## 2 Methodik und Daten

### 2.1 Kanalnetze, sozio-ökonomische Szenarien und Planungshorizonte

Als Fallstudie untersuchten wir zwei kleinere Kanalnetze N1 und N2 mit einer Gesamtlänge von 23 und 45 km. Für die entsprechenden Siedlungsgebiete wurden Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2011-2050 entwickelt um nicht vorhersagbare äußere Einflussfaktoren bei der Sanierungsplanung zu berücksichtigen (siehe z.B. auch deren Anwendung durch Scholten et al. (2014)). Die Szenarien beschreiben plausible Zu- und abnahmen von Bevölkerung und bestimmter reduzierter Flächen (Lienert et al., 2015; Egger und Maurer, 2015). Für die Zustands- und Sanierungsprognosen betrachten wir hier lediglich das *Status Quo*-Szenario (keine Änderungen gegenüber heute). Für die hydraulische Bemessung berücksichtigen wir dagegen das *Boom*-Szenario, welches starkes Wachstum über heutige Siedlungsbereiche hinweg vorsieht. Für die bestehenden Kanalisationen N1 und N2 hat das *Boom*-Szenario insofern Bedeutung als dass die angeschlossenen reduzierten Flächen durch Nachverdichtung um 20 bzw. 32 % ansteigen. Da Nachverdichtung Priorität hat gegenüber Ausweitungen der Siedlungsflächen über heutige Siedlungsbereiche hinweg, kann diese bereits nach weniger als 10 Jahren abgeschlossen sein. Deshalb und aufgrund der Langlebigkeit von Kanalhaltungen wird bei der hydraulischen Neubemessung der Netze vollständige Nachverdichtung angenommen.

Ziel einer strategischen Sanierungsplanung ist es Investitionen und Zustand bzw. Leistungsvermögen der Infrastruktur über einen längeren Zeitraum hinweg betrachtet in Einklang zu bringen. Wir betrachten dazu einen Planungshorizont von 40 Jahren (2011-2050). Nützlich in diesem Kontext sind Werkzeuge wie statistische Alterungsmodelle, die auf Netzebene integriert realistische Prognosen über den Zustand der Netze ermöglichen. Um den hydraulischen Sanierungsbedarf zu bestimmen bedarf es allerdings komplexe Modelle und detaillierte Eingangsdaten. Deshalb und aufgrund der Annahme, dass hydraulische Anpassungen möglichst zeitnah umgesetzt werden sollen, betrachten wir die hydraulische Sanierung als Teil der taktischen Sanierungsplanung mit einem Planungshorizont von 10 Jahren. In diesem Fall sind Sanierungen spezifischer Leitungen Gegenstand der Planung. Aufgrund der langen Lebensdauer von Kanälen sollte das Leistungsvermögen über einen längeren Zeitraum sicher gestellt werden indem vorhersagbare und nicht vorhersagbare Änderungen des Systems berücksichtigt werden. Aus dieser Überlegung heraus betrachten wir

einen hydraulischen Analysehorizont von 40 Jahren (2011-2050) entsprechend dem strategischen Planungshorizont und berücksichtigen dazu neben dem möglichen Anstieg der reduzierten Flächen auch prognostizierte Änderungen in den Niederschlagseigenschaften.

## 2.2 Niederschlagsdaten und hydraulische Bemessungsregeln

Für die Untersuchung legen wir als generelles hydraulisches Bemessungsziel fest, dass Überstau über Schachtdeckelniveau an allen Schächten der Netze maximal mit einer Rate  $r_{max}$  von 0,1 pro Jahr (a) vorkommen darf. Wir verwendeten zwei verschiedene Bemessungsregeln H1 und H2 mit denen der Nachweis über die Erfüllung des Bemessungsziels geführt wird. ~~H1~~-H2 entspricht dem Vorgehen gemäß DWA (2006), welches eine historische Niederschlagsserie mit der geforderten Mindestlänge von  $l = 30 a$  als Eingangssignal für ein hydrodynamisches Kanalnetzmodell vorsieht. Das Bemessungsziel an einem Schacht gilt als erfüllt, wenn die Anzahl der simulierten Überstauereignisse  $k$  maximal drei beträgt, d.h. wenn  $\hat{r} \approx \frac{k}{l} \leq r_{max} = 0.1a^{-1}$ . ~~H2~~-H1 basiert dagegen auf einem Nachweis mit zehn stochastischen Regenserien mit je einer Länge von  $l_{lang} = 300 a$ . Diese wurden sowohl an lokale historische Punktregeneigenschaften kalibriert als auch jeweils angepasst an Änderungen von Regenstatistiken prognostiziert von zehn Klimamodellen über den Zeitraum 2036-2065 (Egger und Maurer, 2015). Dieser Zeitraum entspricht einer dreißigjährigen Periode zentriert um das Ende des strategischen Planungshorizontes im Jahr 2050. Das Ensemble der zehn Klimaprognosen wird als probabilistische Prognose betrachtet. Jedem der verwendeten Klimamodelle wird dabei das gleiche Gewicht zugeordnet. Das Bemessungsziel gilt als erreicht wenn  $\hat{r} \approx \frac{k}{l_{lang}} \leq r_{max} = 0.1a^{-1}$  unter mindestens neun der zehn Klimamodellprognosen erfüllt wird bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %. Durch die Verwendung von langen Niederschlagsserien gegenüber der in ~~H1~~-H2 verwendeten „kurzen“ historischen soll erreicht werden, dass die Überstaurate  $\hat{r}$  präziser geschätzt wird.

Als hydraulische Anpassungsoption wird ausschließlich die Vergrößerung von Leitungsdurchmesser betrachtet und damit die maximal erforderlichen hydraulischen Anpassungsbedarfe der Leitungssysteme berücksichtigt. Die hydraulische Bemessung erfolgte unter beiden Bemessungsregeln iterativ. Das bedeutet, dass Leitungsdurchmesser im Modell in kritischen Bereichen bei jedem Schritt nur minimal und nur

in minimalem Umfang vergrößert wurden. Danach wurden hydraulische Langzeitsimulationen mit den jeweils relevanten Regendaten durchgeführt um die Erfüllung des Bemessungsziels zu überprüfen. Gleichzeitig wurde mit Hilfe von Simulationen mit synthetischen Bemessungsregen sichergestellt, dass Druckliniengefälle entlang modifizierter Leitungsabschnitte möglichst ausgewogen verlaufen.

### 2.3 Zustandsprognose unter verschiedenen Sanierungsstrategien

Die Alterung der Netze wird beschrieben mit einem statistischen Alterungsmodell (Egger et al. 2013). Dieses beschreibt Wahrscheinlichkeiten mit denen sich eine Haltung in den Zustandsklassen (ZK) 1 (guter), 2 (mittlerer) und 3 (schlechter Zustand) als Funktion ihres Alters befindet. Die Parameter wurden geschätzt mit Bayesscher Inferenz unter Berücksichtigung von Expertenwissen und lokaler Kanalzustandsdaten. Während das Alterungsmodell den baulichen Zustand möglichst realitätsnah repräsentiert, stellen die Strategien zur baulichen Sanierung Bedingungen dar unter denen eine Sanierungen an Haltungen vorgenommen wird. Diese Bedingungen können wie hier verknüpft sein mit einem bestimmten zur Verfügung stehenden Budget oder Mindestanforderungen an den Gesamtzustand der Netze. Außerdem beinhalten sie Kriterien, die eine Priorisierung von Haltungen bei der Sanierung innerhalb eines Prognoseschrittes (*hier*: ein Jahr) festlegen. Die hier betrachteten Sanierungsstrategien stellen plausible Strategien dar und sind in Tab. 1 beschrieben. Der Einfachheit halber wird ausschließlich der Ersatz von Leitungen als Sanierungsart vorgesehen. Jede der vier Sanierungsstrategien S1-S4 wurde mit den hydraulischen Bemessungsregeln H1 und H2 kombiniert und unter dem Szenario *Status Quo* angewendet. Außerdem wurde der Referenzfall H3 betrachtet, unter dem keine hydraulische Sanierung (~~H3~~) vorgenommen wird.

Die den Strategien anhaftenden Bedingungen wurden in den Prognosen jährlich überprüft. Allfällige Sanierungskosten wurden mit Hilfe eines Kostenmodells berechnet (AWA, 2001). Aufgrund der Unsicherheit der Alterungsparameter und der als zufälligen Prozess beschriebenen Alterung erzeugten wir für alle Kombinationen von Sanierungsstrategien jeweils 1000 Realisationen. Dazu wählten wir die Alterungsparameter für jede berechnete Realisation zufällig aus der geschätzten Parameterverteilungen aus.

Tab. 1: Angewendete bauliche Sanierungsstrategien S1-S4 definiert durch zwei Bedingungen und den Parametern  $p_{S1-S4}$ .

Bauliche Sanierungsstrategien		
Strategie	Bedingungen	Parameter
S1	Es werden $p$ % des theoretischen Investitionsbedarfes <sup>1)</sup> reinvestiert mit folgender Priorisierung: 1) Hydraulisch kritische Haltungen in ZK 3 <sup>2)</sup> 2) Hydraulisch kritische Haltungen in ZK 2 <sup>2)</sup> 3) Hydraulisch kritische Haltungen in ZK 1 <sup>2)</sup> 4) Haltungen in ZK 3 5) Haltungen in ZK 2	$p_{S1}=100\%$
S2	Generell werden Haltungen mit größeren Diametern priorisiert.	$p_{S2}=150\%$
S3	• Es werden alle hydraulisch kritischen Haltungen innerhalb der ersten 10 Jahre mit gleichmäßigem Budget ersetzt. Haltungen in schlechterem Zustand werden priorisiert. <sup>2)</sup>	$p_{S3}=2\%$
S4	• Es werden außerdem gerade so viele Haltungen in ZK 3 ersetzt, dass der Anteil der Haltungslänge in ZK 3 höchstens $p$ % beträgt. • Generell werden Haltungen mit größeren Diametern priorisiert.	$p_{S4}=10\%$
<sup>1)</sup> Der theoretische Reinvestitionsbedarf ist definiert als Quotient des momentanen Wiederbeschaffungswertes des Kanalnetzes und der mittleren Lebensdauer der Haltungen, d.h. dem Alter in dem eine Haltung in ZK 3 übertritt. Die mittlere Lebensdauer ist abgeleitet aus statistischer Inferenz mit dem Alterungsmodell und den Zustandsdaten des jeweiligen Netzes. <sup>2)</sup> Trifft nur zu in Kombination mit den hydraulischen Bemessungsregeln H1 und H2.		

### 3 Resultate

#### 3.1 Hydraulischer Sanierungsbedarf

In Tab. 2 sind die Längenanteile der Netze N1 und N2 angegeben, die hydraulisch saniert werden müssten unter Anwendung der hydraulischen Sanierungsstrategien H1-H2. Es zeigt sich, dass der zusätzliche Sanierungsaufwand der unter ~~H2-H1~~ gegenüber ~~H1-H2~~ anfällt bei den beiden Netzen recht unterschiedlich ausfällt (N1: 209%, N2: 44%).

Tab. 1: Längenanteile der Netze N1 und N2 die in Abhängigkeit der zugrunde liegenden Dimensionierungsregeln H1 und H2 hydraulisch saniert werden müssten.

Netzwerk	H1	H2
N1	<del>39.9.2</del>	<del>9.93.2</del>
N2	<del>8.612.4</del>	<del>12.48.6</del>

### 3.2 Schätzung der Alterungsparameter

Die in Abb. 1 abgebildeten Überlebensfunktionen repräsentieren das geschätzte Alterungsverhalten von N1. Die ausgeprägte Unsicherheit der Schätzung ist begründet in der kleinen Größe des Datensatzes, das geringe Alter des Netzwerkes und damit den begrenzten Informationsgehalt des Datensatzes über das Alterungsverhalten des Netzes. Somit ist das Ergebnis in hohem Maße beeinflusst von subjektivem und vagen Vorwissen über die Alterungsparameter (Egger et al., 2013).

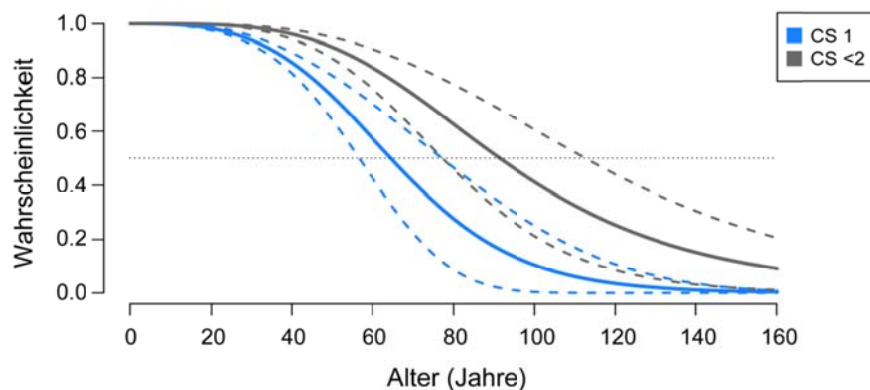


Abb. 1: Geschätzte Überlebensfunktionen, die das Alterungsverhalten von Netzwerk N1 repräsentieren. Sie beschreiben die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Leitung noch in der besten Zustandsklasse ZK 1 befindet (blau) und mindestens noch in ZK 2 (grau) als Funktion ihres Alters. Die durchgezogene Linie beschreibt den Mittelwert und die gestrichelten Kurven Bereiche zwischen den 10%- und 90%-Quantilen.

### 3.3 Sanierung

Abb. 2 zeigt exemplarisch Längenanteile des Kanalnetzes N1 in den Zustandsklassen 1-3 über die Zeit im *Status Quo*-Szenario unter Anwendung der Sanierungsstrategie S1 mit jährlichen Reinvestitionen, die  $p_{S1} = 100\%$  des theoretischen Bedarfs entsprechen, siehe Definition in Tab.1. Abb. 2 zeigt auf wie sich der Zustand des Netzes entwickelt, wenn keine hydraulische Sanierung stattfindet (H3) und wenn die Strategien H1 und H2 zur Anwendung kommen. In allen Fällen kommt es zu einer Verschlechterung des Gesamtzustandes indem die Anteile in ZK 2 zunehmen und das obwohl 100% des theoretischen Sanierungsbedarfs investiert wird. Dies unterstreicht die momentane Alterung des sich derzeit noch in mittlerem Alter und daher noch in gutem Zustand befindende Netz.

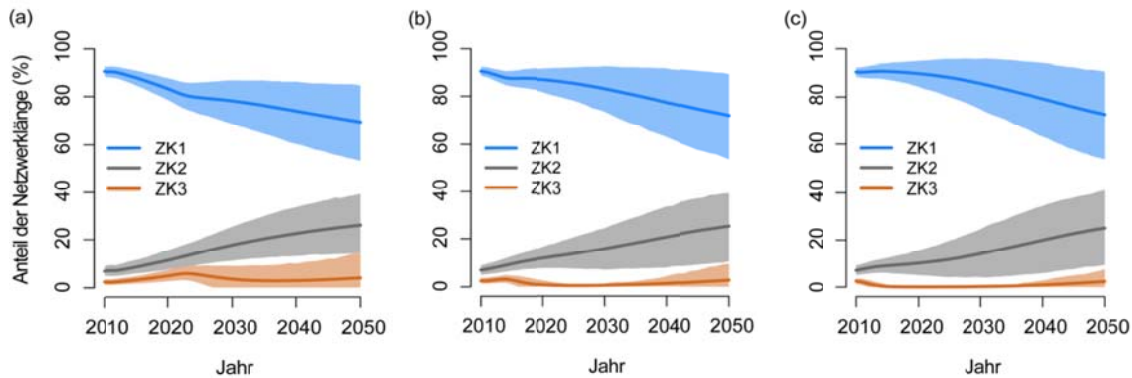


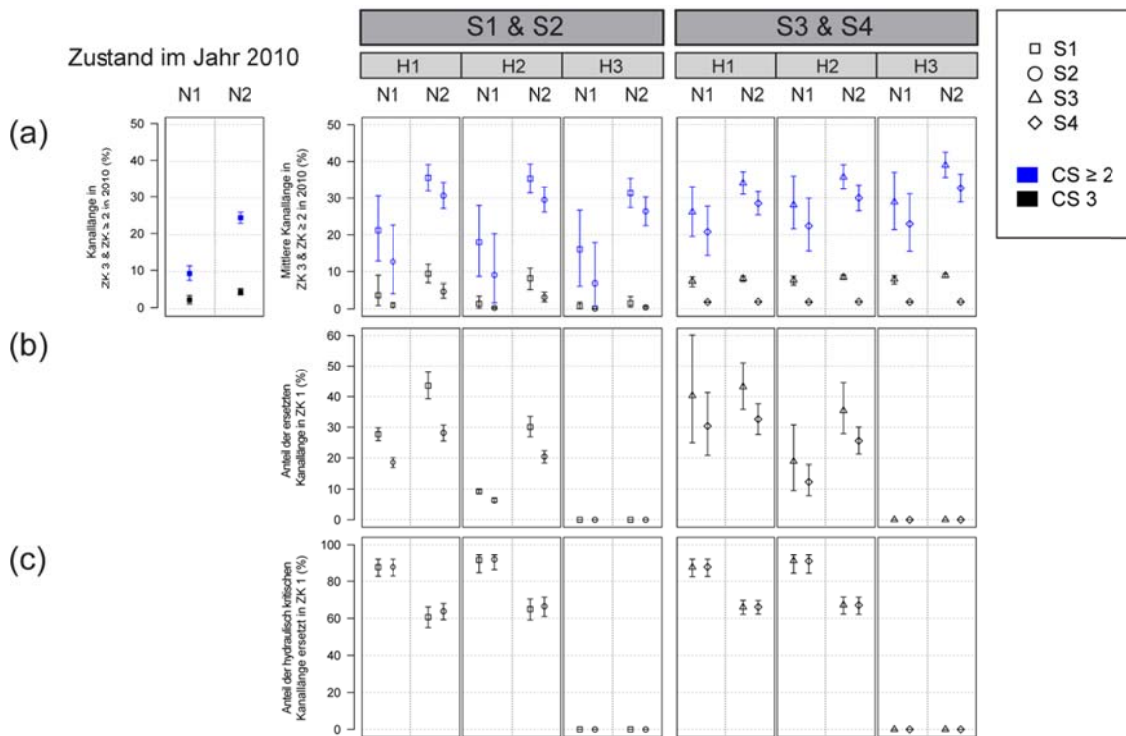
Abb. 2: Anteile der Gesamtnetzlänge von N1 in den Zustandsklassen 1, 2 und 3 über die Zeit unter Anwendung der Sanierungsstrategie S1 (100% Reinvestition) in Kombination mit den hydraulischen Sanierungsstrategien H1 (a) und H2 (b) sowie ohne hydraulische Sanierung (H3, c). Die Linien beschreiben Mittelwerte und die schattierten Flächen Unsicherheitsbänder zwischen den 10 %- und 90 %-Quantilen über 1000 Realisationen.

Abb. 3(a) zeigt wie sich die verschiedenen Kombinationen von baulichen und hydraulischen Sanierungsstrategien auf den Gesamtzustand von N1 und N2 über den strategischen Planungshorizont gemittelt auswirken. Abb. 3(b) gibt die Anteile der gesamten ersetzten Netzlängen an, die sich zum Zeitpunkt des Ersatzes noch in ZK 1 befinden, d.h. aus rein hydraulischen Gründen ersetzt werden. Zudem gibt Abb. 3(c) die Anteile der hydraulisch kritischen Netzlängen wieder, die sich bei ihrem Ersatz noch in ZK 1 befinden. Abb. 4 zeigt für S3 und S4 die Kosten auf, welche unter Verwendung von H1-H3 anfallen.

Abb. 3(b,c) und 4 geben somit die Synergieeffekte wieder, die sich aus gleichzeitiger baulicher und hydraulischer Sanierung ergeben. Die hohen Anteile von ersetzten Leitungen in ZK 1 sowie die Kostenunterschiede bei S3 und S4 lassen schließen, dass die Synergien eher gering sind. Dies ist einerseits dem Umstand geschuldet, dass die hydraulische Sanierung möglichst zeitnah erfolgen soll (bei S1 ist sie im Mittel nach ca. 13 (N1) und 27 Jahren (N2), bei S2 nach 9 (N1) und 18 Jahren (N2) und bei S3 und S4 nach 10 Jahren abgeschlossen). Andererseits wird sich der Gros der (hydraulisch kritischen) Leitungen trotz Alterung noch viele Jahre in gutem Zustand befinden. Falls wie in S1 und S2 und wie in Abb. 2 gezeigt ein begrenztes Budgets zur Verfügung steht, so wird bei H1 und H2 ein Großteil der Mittel durch die hydraulische Sanierung gebunden solange bis diese abgeschlossen ist. Somit kommt es zu einer spürbaren Verschlechterung des Gesamtzustandes bei S1 und S2 unter An-



wendung von jeweils H1 gegenüber H2 und gegenüber H3 (Abb. 2, 3(a)). Jedoch trägt auch die hydraulische Sanierung zur Verbesserung des baulichen Zustandes bei indem in jedem Fall ältere durch neue Leitungen ersetzt werden wie es die Ergebnisse in Abb. 3(a) für S3 und S4 verdeutlichen. Wie durch Abb. 3(b) ausgedrückt, kann langfristig und aus heutiger Sicht der Sanierungsbedarf in ähnlicher Größenordnung baulich wie auch hydraulisch begründet sein.



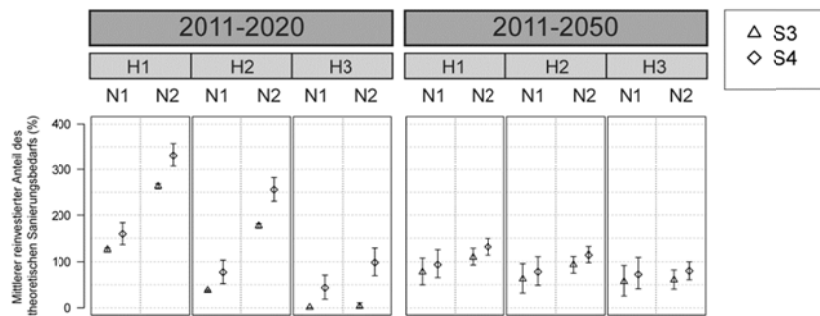


Abb. 4: Mittlerer reinvestierter Anteil des theoretischen Sanierungsbedarfs über den gesamten strategischen Planungshorizont (2011-2050, links) und über den taktischen Planungshorizont (2011-2020, rechts). Die Symbole repräsentieren jeweils Mittelwerte und die Bänder Unsicherheitsbereiche zwischen den 10%- und 90%-Quantilen über 1000 Realisationen. Gegeben sind Ergebnisse für die Strategien S3 und S4 und den Bemessungsregeln H1-H3 angewandt auf die Netze N1 und N2.

## 4 Diskussion

In den zwei untersuchten Gemeinden muss mittelfristig mit einem ansteigenden Sanierungsbedarf gerechnet werden und bestätigt damit die allgemeine Voraussicht nach einem höheren Bedarf. Dieser ist aus heutiger Sicht nicht nur baulich sondern je nach gewählter Bemessungsregel bzw. zugrunde liegende Regeninformation sowie Netzwerk in unterschiedlichem Ausmaß auch hydraulisch bedingt.

Die Bestimmung des hydraulischen Sanierungsbedarfs stellt eine Herausforderung dar, da mit Hilfe von historischen Regendaten aufgrund ihrer kurzen Dauer und den gleichzeitig ausgeprägt variablen, häufig endlastig verteilten Regenintensitäten nur eine grobe Abschätzung erfolgen kann (Egger und Maurer, 2015). Genauere Schätzungen sind mit langen stochastischen Regenserien möglich vorausgesetzt, dass (i) der Stichprobenfehler der für die Kalibrierung des Niederschlagsmodells verwendeten, aus historischen Daten abgeleitete Regenstatistiken vernachlässigbar ist und (ii) insbesondere extreme Niederschlagsintensitäten durch das Modell korrekt wiedergegeben werden. Der von uns erweiterte auf DWA (2006) basierende Bemessungsansatz beinhaltet (i) eine genauere Überprüfung des Bemessungsziels durch Verwendung „langer“ stochastischer Regenserien und (ii) Erfüllung des Bemessungsziels mit einer „hohen“ Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Klimaprognoseunsicherheit.

Mit diesem erweiterten probabilistischen Ansatz wird ein in beiden Fällen signifikant jedoch unterschiedlich höherer hydraulischer Sanierungsbedarf festgestellt gegenüber dem Fall in dem der Ansatz nach DWA (2006) verwendet wird. Das trifft zu obwohl im betreffenden Gebiet im Mittel keine Tendenz zu stärkeren Niederschlagsintensitäten im Zeitraum 2036-2065 gegenüber dem Kontrollklima (1981-2010) festgestellt wurde (Egger und Maurer et al., 2015). Dagegen wurde festgestellt, dass die Stichprobenunsicherheit, die einer 30-jährigen historischen Niederschlagsserie anhaftet, bei weitem das Klimasignal und die Unsicherheit seiner Prognose übertrifft. Dies bedeutet, dass die hydraulische Bemessung basierend auf historischen Regendaten wesentlich von den in einer relativ kurzen Periode zufällig observierten extremen Niederschlagseigenschaften abhängt. Der (hier unter ~~H2~~H1 gegenüber ~~H1~~H2 zusätzlich) festgestellte hydraulische Sanierungsbedarf macht sich umso stärker bemerkbar je früher die hydraulische Ertüchtigung des Netzes abgeschlossen sein soll. Deshalb empfiehlt es sich die Auswirkungen von hydraulischen Überlastungen genauer, etwa zusätzlich mit Hilfe von 2-D-Oberflächenabflussmodellen, zu untersuchen um eine sinnvolle Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Vulnerabilität des Systems festlegen zu können.

Ein weiteres Argument die Vulnerabilität des Systems stärker zu berücksichtigen ist der Umstand, dass die Zuverlässigkeit der stochastischen Regenmodelle, der Klimamodelle und die Übertragung grobskaliger Klimaprognosen auf hochaufgelöste Punktregeleigenschaften nicht überprüft werden kann und die Modelle nur teilweise physikalisch begründet sind. Deshalb erscheint die von mehreren Autoren vorgeschlagene Kombination von „Top-down“- und „Bottom-up“-Strategien zur Bemessung von Wasserinfrastrukturen interessant (Brown und Wilby, 2012; Wilby und Dessai, 2010). Dies beinhaltet die Identifizierung von Schwachstellen des Systems unter einer großen Bandbreite von plausiblen, jedoch nicht prognostizierter Einflussfaktoren („Bottom-up“). Ergänzend dazu wird das Risiko unter heute vorhandenen, prognostizierten Eingangsdaten betrachtet („Top-down“).

Weiterhin unterstreichen die geringen Synergien zwischen hydraulischer und baulicher Sanierung, die hier ausschließlich Leitungersatz und Anpassung von Leitungsdimensionen vorsieht, die Notwendigkeit alternative (günstige „Low-regret“-) Optionen in Betracht zu ziehen. Die Planung von Optionen, welche etwa den kontrollierten Einstau von Oberflächen miteinbeziehen, als auch die Berücksichtigung der Vulnera-

bilität der Einzugsgebiete erfordern jedoch den Einsatz komplexer hydraulischer Modelle, die zusätzlich den oberflächlichen Abfluss bei überlasteter Kanalisation beschreiben. Dies unterstreicht die Bedeutung dieser Modelle in zukünftiger Planung.

## 5 Schlussfolgerungen

- Es muss vielerorts mittelfristig mit einem ansteigenden Sanierungsbedarf gerechnet werden. Dabei können hydraulische Aspekte eine ebenso große Rolle spielen wie den baulichen Zustand betreffende. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die den Niederschlagsdaten anhaftende Unsicherheiten mit den heute verfügbaren Methoden systematisch berücksichtigt werden und gleichzeitig die Bemessungsziele mit hoher Konfidenz erreicht werden sollen. Die geringen Synergieeffekte zwischen hydraulischer und baulicher Sanierung von Kanalhaltungen unterstreichen die Notwendigkeit verstärkt alternative, günstigere hydraulische Anpassungsmöglichkeiten wie z.B. Retention von Regenabwasser in Betracht zu ziehen.
- Stochastische Regendaten und Klimamodelle stellen eine wichtige Grundlage zur Bestimmung des hydraulischen Sanierungsbedarfs dar, da historische Niederschlagsserien lediglich grobe Schätzungen über den Erfüllungsgrad eines Bemessungskriteriums zulassen. Da sich ihre Zuverlässigkeit jedoch nur schwerlich überprüfen lässt und eine physikalische Grundlage teilweise fehlt, sollten „Top-down“-Bemessungsstrategien ergänzt werden mit „Bottom-up“-Strategien unter Berücksichtigung der Vulnerabilität des Einzugsgebietes. Diese helfen nicht nur mögliche, günstige „Low-regret“-Optionen zu identifizieren, sondern auch konkrete hydraulische Maßnahmen zu priorisieren und insgesamt die Robustheit der Systeme unter einer großen Bandbreite unsicherer Einflussfaktoren zu erhöhen.

## Literatur

- Arnbjerg-Nielsen, K. and Fleischer, H.S. (2009) Feasible adaptation strategies for increased risk of flooding in cities due to climate change. *Water Science and Technology* 60, 273-281.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2011) Past, present, and future design of urban drainage systems with focus on Danish experiences. *Water Science and Technology* 63(3), 527-535.

- AWA (2001) Vorgehen zur Bestimmung der Kosten von Abwasserkanälen, Amt für Abwasser und Abfall des Kantons Bern, Bern, Schweiz.
- Brown, C. and Wilby, R.L. (2012) An alternate approach to assessing climate risks. *Eos* 93(41), 401-402.
- Cashman, A. and Ashley, R. (2008) Costing the long-term demand for water sector infrastructure. *Foresight* 10(3), 9-26.
- DWA (2006) Arbeitsblatt DWA-A 118, Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen, DWA, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Deutschland.
- Egger, C., Scheidegger, A., Reichert, P. and Maurer, M. (2013) Sewer deterioration modeling with condition data lacking historical records. *Water Research* 47(17), 6762-6779.
- Egger, C. and Maurer, M. (2015) Importance of anthropogenic climate impact, sampling error and urban development in sewer system design. *Water Research* 73(0), 78-97.
- Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C. (2007) Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27(12), 1547-1578.
- Lienert, J., Scholten, L., Egger, C. and Maurer, M. (2015) Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. *EURO Journal on Decision Processes* 3(1-2), 107-140.
- Mailhot, A. and Duchesne, S. (2010) Design Criteria of Urban Drainage Infrastructures under Climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management* 136(2), 201-208.
- Paschalis, A., Molnar, P., Fatichi, S. and Burlando, P. (2014) On temporal stochastic modeling of precipitation, nesting models across scales. *Advances in Water Resources* 63, 152-166.
- Räisänen, J. (2007) How reliable are climate models? *Tellus* 59A, 2-29.
- Scholten, L., Scheidegger, A., Reichert, P., Mauer, M. and Lienert, J. (2014) Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research* 49(0), 124-143.
- Wilby, R.L. and Dessai, S. (2010) Robust adaptation to climate change. *Weather* 65(7), 180-185.

Christoph Egger

Eawag, Abteilung Siedlungswasserwirtschaft

Überlandstrasse 133

Postfach 611

8600 Dübendorf

Schweiz

E-Mail: christoph.egger@eawag.ch

Telefon: +41 58 765 5055