

# Wasserinfrastrukturen nachhaltig in eine unsichere Zukunft führen

Die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sind Generationenbauwerke mit langer Lebensdauer und entsprechend langen Planungshorizonten. Wie können wir ihre Leistungen nachhaltig in die Zukunft führen? Wie gehen wir mit den Unsicherheiten um? Wie beziehen wir die Nachhaltigkeit quantitativ in unsere Planungsansätze ein? Im Rahmen des nationalen Forschungsprogramms 61 ging die Eawag diesen Fragen nach.



Max Maurer

Abb. 1: Die Kanalisation unter der Zürcher Bahnhofstrasse: noch gut im Schuss oder sanierungsbedürftig?

Wasserinfrastrukturen wie Wasserversorgungsleitungen, Kanalisations- und Kläranlagen sind in unserer Gesellschaft unverzichtbar. Sie stellen das Rückgrat unserer Gesundheitsvorsorge dar. Zusätzlich bieten sie Schutz vor Überschwemmungen und bewahren unsere Umwelt vor übermässigen Belastungen. Mit Lebensdauern von 30 bis 100 Jahren sind Wasserinfrastrukturen äusserst langlebig. Durch diese langen Abschreibungsdauern relativieren sich die hohen Investitionskosten.

Viele Wasserinfrastrukturen in der Schweiz kommen in die Jahre. So zeigt rund ein Viertel der in den 1960er- und 1970er-Jahre gebauten Kanalisationen deutliche Schäden und wird in den nächsten Jahren sanierungsbedürftig. Wir schätzen, dass der Wertverzehr der öffentlichen

Wasserinfrastrukturen über die nächsten 40 Jahre rund 81 Milliarden Franken beträgt. Für den Erhalt muss die Gesellschaft also sehr viel Geld in die Hand nehmen. Umso wichtiger ist es, die richtigen Investitionsentscheidungen zu treffen und damit eine gute Planung durchzuführen. Infrastrukturplanungen jedoch sind komplex – umso mehr als es gilt, zukünftige Anforderungen und Bedürfnisse abzuschätzen.

### **Grundlagen und Instrumente für die Planung entwickeln**

Das Hauptziel des NFP-61-Projekts «Sustainable Water Infrastructure Planning» (SWIP) war es, wissenschaftliche Grundlagen und Instrumente zu erarbeiten, mit denen sich die Erneuerung der Schweizer Trinkwasserversorgungs- und Entwässerungssysteme optimal planen lässt. Dabei galt es, ein Gleichgewicht der ökonomischen (Voraussage der Kosten), ökologischen (Auswirkungen auf Ökosysteme) und sozialen (Wertvorstellungen der Akteure) Aspekte anzustreben. Besonders berücksichtigt werden musste, dass in vielen Gemeinden genaue Daten zu ihren Infrastrukturen fehlen und dass sich zukünftige Entwicklungen nicht mit Sicherheit voraussagen lassen.

SWIP fokussierte auf vier Fragenkomplexe: (1) Was sind die Bedürfnisse der relevanten Akteure? Wie lassen sich diese Ziele im Prozess der Entscheidungsfindung erfassen und mit welchen Handlungsoptionen wie gut erreichen? (2) Wie entwickelt sich der Zustand der Wasserversorgungsleitungen und der Kanalisation? Wie gehen wir mit ungenügenden Daten um? Ist es möglich, die Erfahrungen von Experten quantitativ einzubinden? (3) Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf die Infrastrukturen, und wie berücksichtigen wir dies in der Planung? (4) Wie berücksichtigen wir sozioökonomische Faktoren wie zum Beispiel die Demografie, das Wirtschaftswachstum oder die Siedlungsentwicklung?

### **Transparente Entscheidungsfindung**

Die Methode der Multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) erleichtert den Umgang mit komplexen Entscheidungen. Sie ermöglicht eine Strukturierung der verschiedenen Einflussfaktoren und erhöht die Transparenz von Entscheidungsprozessen. Dabei werden die subjektiven Ziele und Präferenzen der Akteure ebenso berücksichtigt wie quantitative Daten, zum Beispiel die Kosten oder Leistungen einer Handlungsoption (Entscheidungsalternative). Mit einer MCDA lassen sich robuste Handlungsoptionen ermitteln, die für die meisten Akteure und für unterschiedliche Entwicklungen gut abschneiden und somit empfohlen werden können.

In einer Fallstudie für das Gebiet der Mönchaltorfer Aa (ZH) haben wir exemplarisch eine MCDA durchgeführt. Wir arbeiteten eng mit den Akteuren aus den Gemeinden zusammen – vom Politiker über die Baubehörde und dem planenden Ingenieur bis zum Brunnenmeister. Miteinbezogen waren zudem kantonale und nationale Behördenvertreter und Verbände. Bei der Analyse besonders wichtig war uns die Generalisierbarkeit, so dass einzelne Elemente nun übernommen und auf andere Fälle angepasst werden können.

Die sechs Hauptziele der beteiligten Akteure umfassen eine gute Wasserversorgung, eine sichere Abwasserentsorgung, Ressourcen-, Grundwasser- und Gewässerschutz und tiefe Kos-

ten sowie bisher eher vernachlässigte Ziele wie Generationengerechtigkeit (der nächsten Generation keine Rehabilitationslast aufbürden und möglichst flexible Systeme haben) und soziale Akzeptanz [1]. Die Akteure mussten persönlich einschätzen, wie wichtig die einzelnen Ziele sind. Den meisten Befragten war es wichtiger, eine gute Wasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie den Ressourcen-, Grundwasser- und Gewässerschutz und die Generationengerechtigkeit zu gewährleisten, als die Kosten tief zu halten [2, 3].

Die verschiedenen Handlungsoptionen zur Erreichung der Ziele erarbeiteten wir zusammen mit den Akteuren. Sie umfassen neben heutigen Verfahren auch dezentralisierte Systeme, bei denen man zum Beispiel das Trinkwasser im Supermarkt kauft, das Regenwasser rezykliert und das Abwasser im Haus behandelt. Berücksichtigt wurden auch Management-Aspekte oder verschiedene Kooperationsformen wie die Zusammenarbeit der Gemeinden und Versorgungssektoren.

### Zusammenarbeit wird grossgeschrieben

Mit mathematischen Modellen konnten wir für jede Handlungsoption abschätzen, wie gut sich einige der Ziele damit erreichen lassen. So konnten wir zum Beispiel beurteilen, wie sich verschiedene Handlungsoptionen auf den Zustand der Abwasserleitungen auswirken. Daraus konnten wir ableiten, wie stark die Gewässer und das Grundwasser im jeweiligen Fall verschmutzt oder wie gross Störungen für die Bevölkerung infolge defekter Kanäle sein würden. Für andere Prognosen, etwa bezüglich mikrobieller Qualität des Trinkwassers oder Flexibilität des technischen Rück- und Ausbaus jeder Infrastruktur-Option, befragten wir Experten.

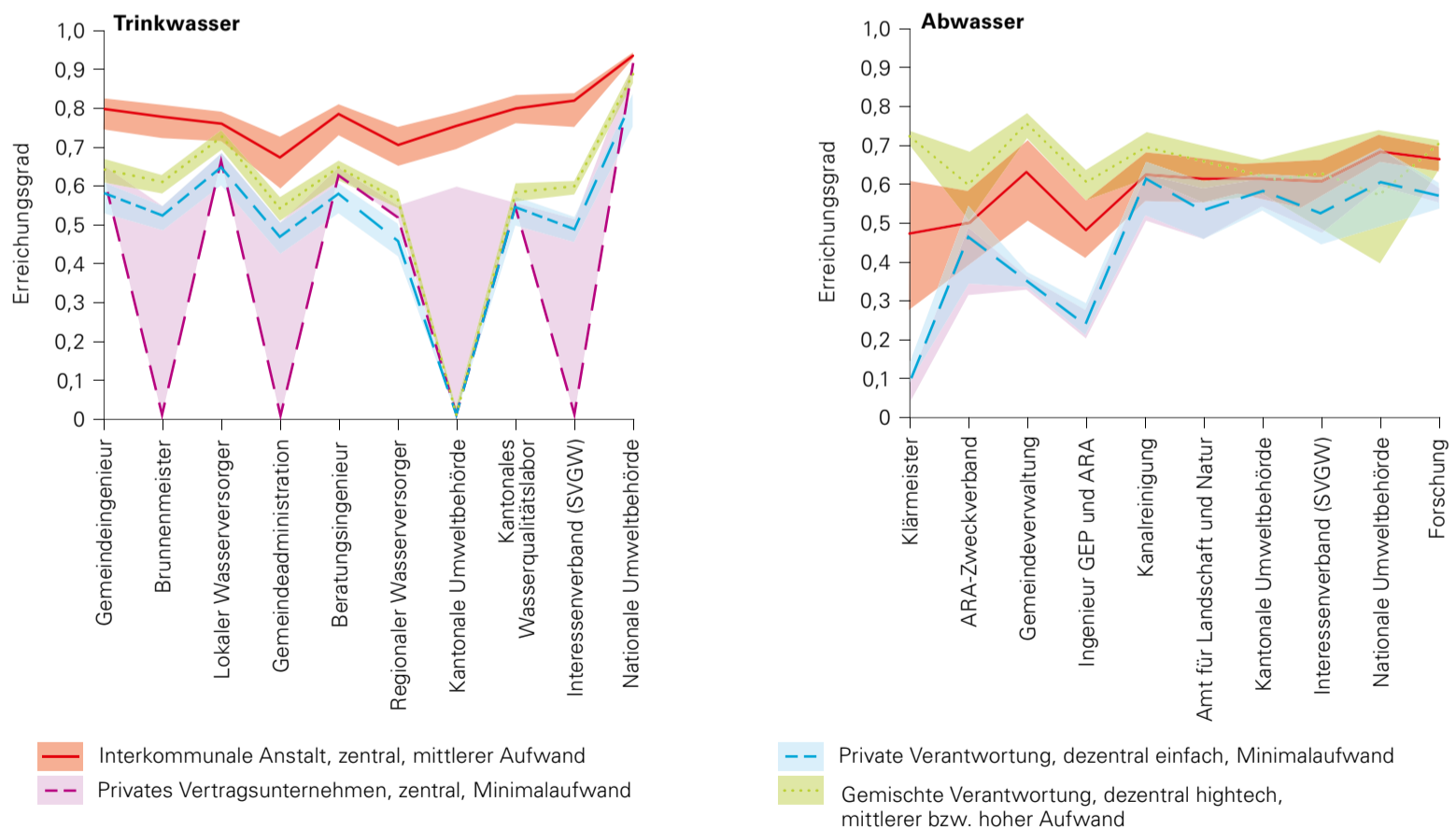


Abb. 2: Rangierung verschiedener Handlungsoptionen für den Trinkwasser- und Abwassersektor für zehn Akteure im Szenario «Status quo» (siehe unten). Die Linien verbinden die Mittelwerte (Median), die Farbflächen stellen den Unsicherheitsbereich dar. 0 = schlechtester Wert, Ziele nicht erreicht/1 = bester Wert, alle Ziele vollständig erreicht [6].



Um herauszufinden, welche Option aus welchen Gründen besonders gut oder schlecht abschneidet, nahmen wir eine Rangierung der Handlungsoptionen vor. Es gab keinen eindeutigen, unter allen Bedingungen besten Lösungsansatz. Es kristallisierten sich jedoch einige Optionen und Elemente heraus, die für alle Akteure und in allen Szenarien (siehe unten) im Mittel gut abschneiden (Abb. 2). Der Rehabilitationsaufwand, der mit höheren Kosten einhergeht, beeinflusste das Ergebnis stark, weil er mehrere Ziele betrifft, die vielen Akteuren wichtig sind, wie zum Beispiel Generationengerechtigkeit, gute Wasserqualität und Zuverlässigkeit der Wasserversorgung. Handlungsoptionen, die ein proaktives Rehabilitationsmanagement vorsehen – beispielsweise jährlich mindestens ein Prozent der schlechtesten Leitungen zu ersetzen –, schnitten demzufolge besser ab als die billigere Strategie, erst dann zu reparieren, wenn etwas kaputt geht [4].

Optionen, die eine Zusammenarbeit zwischen Gemeinden und Sektoren vorsehen, erreichten meist einen guten Rang. Eine soziale Netzwerkanalyse zeigt jedoch, dass der Wassersektor in der Schweiz sehr fragmentiert ist. Es gibt nur wenig Zusammenarbeit zwischen dem Abwasser- und dem Wasserversorgungssektor oder zwischen lokalen, kantonalen und nationalen Akteuren [5]. Dies wäre aus Sicht der Akteure aber nötig, um die Effizienz der Planung zu erhöhen und um längerfristige Ziele und ein besseres Einzugsgebietsmanagement zu erreichen.

Hingegen scheint die technische Ausgestaltung des Systems nicht entscheidend zu sein, vorausgesetzt, die wichtigsten Ziele werden erfüllt. So erreichte beim Abwasser auch eine Handlungsoption «dezentrales Hightech-System» einen sehr guten Rang für Akteure, denen eine tiefe Rehabilitationslast und hohe Flexibilität besonders wichtig waren [3]. Schliesslich erwies sich die Einstellung des Entscheiders bezüglich Risiko als ein sehr wichtiger Faktor. Eher risikoscheuen Akteuren sind Handlungsoptionen mit geringer Unsicherheit zu empfehlen [2].

### **Oft fehlen die Langzeitdaten**

Für die langfristige Planung ist es von zentraler Bedeutung, den zukünftigen Zustand der Infrastruktur zuverlässig antizipieren zu können. Dabei stehen insbesondere die Leitungsnetze im Vordergrund, die rund 90 Prozent der Investitionen ausmachen. Die Beurteilung des zukünftigen Sanierungsbedarfs von Wasserversorgungsnetzwerken und der Kanalisation erfordert Vorhersagemodelle zu Schäden und zur Lebensdauer von Leitungen.

In der Praxis sind Daten über Schäden und den Ersatz von Rohrleitungen oft nur unvollständig vorhanden oder decken nur einen kurzen Zeitraum ab. Zudem reichen die verfügbaren Daten von kleinen oder neueren Netzwerken nicht aus, um Prognosemodelle zuverlässig zu kalibrieren. Aufgrund einer unvollständigen Ersatzhistorie fehlen so beispielsweise die schlechtesten Leitungen im Datensatz, was das Gesamtbild verzerrt. Deshalb unterschätzen die herkömmlichen Modelle die Bruchhäufigkeit deutlich. (Abb. 3a).

Diese Situation trifft auf die meisten Netze in der Schweiz zu. Diese spezielle Herausforderung haben wir im SWIP-Projekt auf zwei Arten gemeistert: Zum einen entwickelten wir neue Prognosemodelle, welche die fehlenden Daten explizit und mathematisch korrekt berücksichtigen.

Der Preis dafür sind die grösseren Unsicherheiten, die stark von den verfügbaren Daten abhängen (Abb. 3b). Zum anderen kombinieren wir mittels Bayes'scher Parameterinferenz vorhandenes Vorwissen mit den lokal verfügbaren Daten. Auf diese Weise lassen sich fehlende Daten mit Expertenwissen und Erfahrungen aus anderen Versorgungsnetzen kompensieren. Im Rahmen von SWIP entwickelten wir einen Ansatz, um Expertendaten zur Lebensdauer von Rohrleitungen zu erheben und für die Kalibrierung von Vorhersagmodellen zu verwenden [7, 8]. Wir haben die Modelle erfolgreich für die Charakterisierung verschiedener Netze verwendet. Die Resultate können in einem nächsten Schritt mit einer Rehabilitationstaktik verknüpft werden, um den Sanierungsbedarf der Zukunft abzuschätzen [9].

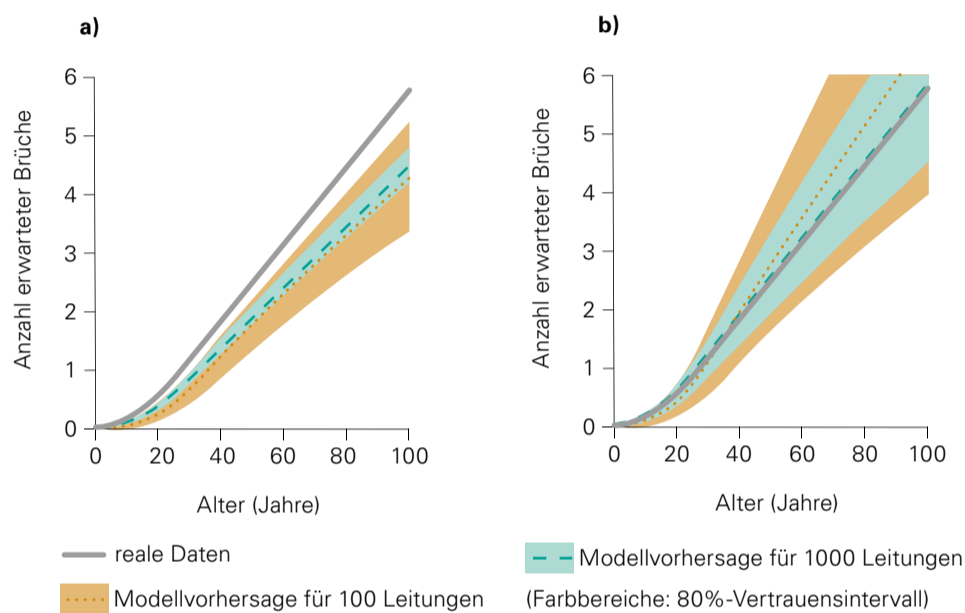


Abb. 3: (a) Einfluss unvollständiger Ersatzhistorie auf die vorhergesagte Bruchhäufigkeit von Leitungen. Die Simulation zeigt, dass die Schadenshäufigkeit typischerweise deutlich unterschätzt wird, wenn der Ersatz defekter Leitungen in der Vergangenheit nicht berücksichtigt wird. Ebenfalls deutlich erkennbar ist der Einfluss der Datensatzgrösse auf die Unsicherheit der Schätzung. (b) Die im SWIP-Projekt entwickelten Modelle vermögen das Problem der unvollständigen Datenhistorie zu kompensieren. Allerdings vergrössert sich mit diesem Ansatz die Unsicherheit [7].

### Der Klimawandel hat mittelfristig wenig Einfluss

Bei den Untersuchungen, wie sich der Klimawandel auf die zukünftigen Wasserinfrastrukturen auswirkt, stand der Einfluss von Starkregen auf die Leistung der Siedlungsentwässerung im Zentrum. Mit einem stochastischen Regenmodell haben wir für das Gebiet der Mönchaltorfer Aa die Regencharakteristik über den Zeitraum von 2036 bis 2065 nach bestem heutigem Wissen abgebildet. Das verwendete Modell ist in der Lage, Niederschläge zu simulieren, die sich statistisch nicht von den realen Messungen unterscheiden lassen [10].

Abbildung 4 zeigt den Einfluss der berechneten Regenserien auf die Überstauhäufigkeit der Kanalisation. Für die beiden untersuchten Einzugsgebiete lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen heutigen und zukünftigen Verhältnissen feststellen. Diese Resultate deuten darauf hin, dass wir mittelfristig (bis ins Jahre 2050) keinen Grund haben, die Dimensionierung der Kanalisation an den Klimawandel anzupassen. Diese Aussage gilt allerdings nur für die Fallstudienregion und wird auch von den Unzulänglichkeiten der globalen und regionalen Klimavorhersagemodelle relativiert.

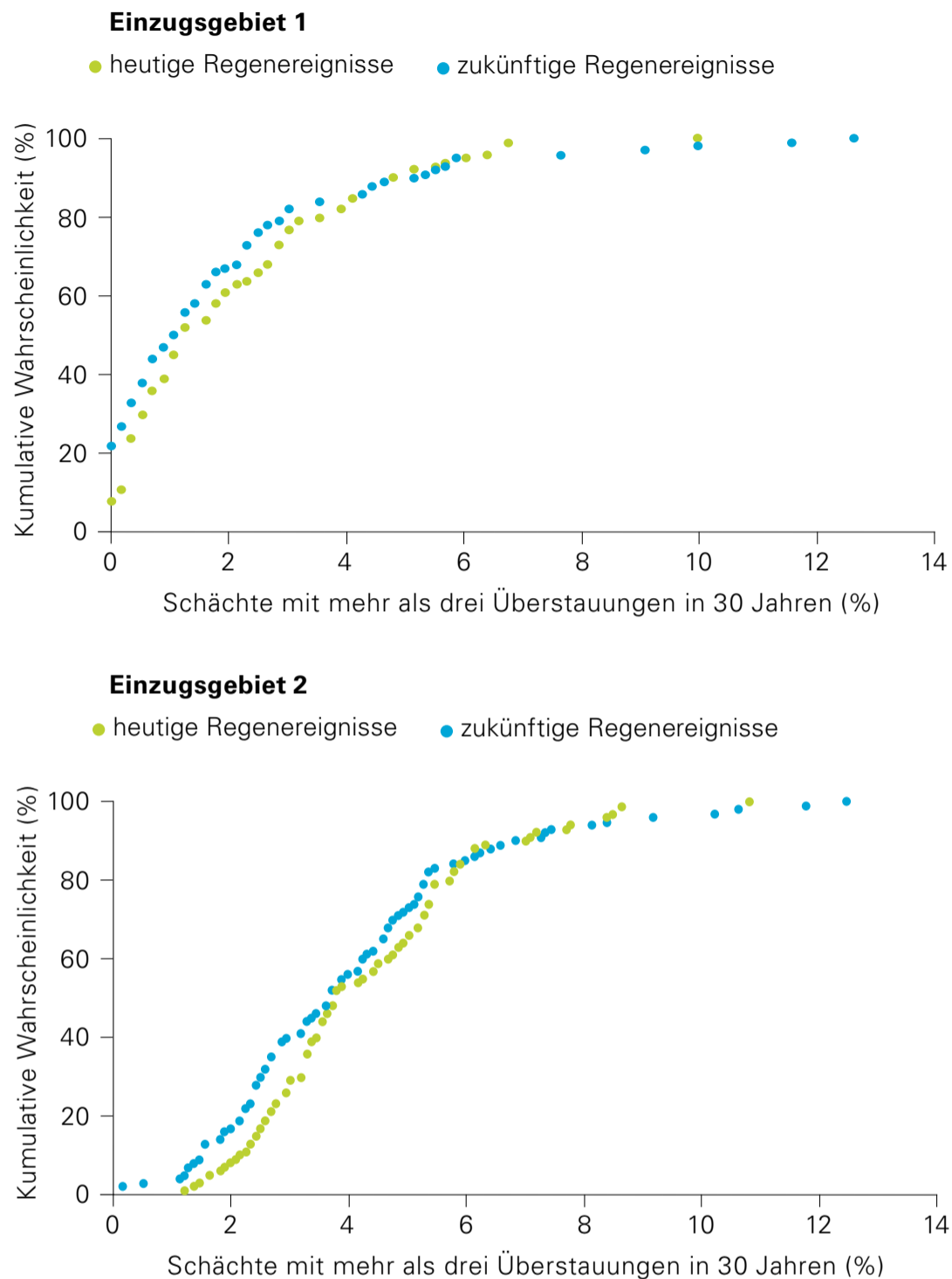


Abb. 4: Simulierte Überstauhäufigkeit der Kanalisation bei heutigen und zukünftigen Regenereignissen in zwei unterschiedlichen Einzugsgebieten der Mönchaltorfer Aa. Zwischen den beiden Kurven ist kein signifikanter Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Kanalisation zu erkennen. Die Grafiken zeigen, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Anteil an Schächten, die in 30 Jahren mehr als dreimal überstaut werden, unter oder gleich einem bestimmten Wert liegt. So besteht im Einzugsgebiet 1 eine Wahrscheinlichkeit von 80 Prozent, dass weniger als oder 3,5 Prozent der Schächte unzulässig häufig überstaut werden [10].

### Zukunftsszenarien von Doom bis Boom

Wie können wir die langfristige Planung der Infrastrukturen vornehmen, wenn wir nicht wissen, wie die Welt von morgen aussieht? Manche Unsicherheiten, wie die Unsicherheit von Vorhersagen und die Präferenzen der Entscheider, lassen sich direkt in die Modelle und in die MCDA integrieren. Für die unsichere sozioökonomische Entwicklung haben wir dagegen einen Szenario-Ansatz gewählt. Wir arbeiteten mit verschiedenen Zukunftswelten und entwickelten für sie kohärente Beschreibungen unabhängig davon, wie erstrebenswert oder wahrscheinlich ihr Eintreten ist.

Zusammen mit den Akteuren der Projektregion entwarfen wir vier Zukunftsszenarien für das Jahr 2050 [1]. Im Szenario «Status quo» ändert sich im Vergleich mit dem heutigen Zustand nichts. Beim Szenario «Qualitatives Wachstum» liegt der Fokus auf einer wirtschaftlich prosperierenden, aber umweltfreundlichen Entwicklung. Im Szenario «Doom» geht ein leichter

Bevölkerungsrückgang mit einer wirtschaftlich sehr schwierigen Situation einher. Im Szenario «Boom» kommt es dagegen zu einem massiven Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum und zu technologischen Innovationen.

Dafür, wie die verschiedenen Szenarien die Ausgestaltung der Wasserinfrastrukturen beeinflussen, erarbeiteten wir detaillierte Prognosen. Am stärksten wirkte sich das Boom-Szenario aus. Handlungsoptionen, die in der MCDA unter den anderen Szenarien bei den meisten Akteuren gut abschnitten, erzielten in diesem Szenario bei manchen einen deutlich schlechteren Rang – oder umgekehrt. Dies lag unter anderem daran, dass die massive Urbanisierung zu einer Übernutzung der lokalen Grundwasserressourcen führte, wodurch ein wichtiges Ziel einiger Akteure stark beeinträchtigt wurde. Mit diesem Wissen könnte man nun eine neue Handlungsoption kreieren, die beispielsweise den Import von Wasser aus dem Zürichsee vorsieht. Da vielen Akteuren in dieser Fallstudie das Ziel «Ressourcenautonomie» nicht besonders wichtig war, wäre eine stärkere Vernetzung der Wasserversorgung vermutlich ein gangbarer Kompromiss. Die Verknüpfung von MCDA und Szenario-Analyse hilft also dabei, die Robustheit von Entscheidungsoptionen bei ganz verschiedenen – unsicheren – zukünftigen Entwicklungen auszuloten.

### **Wissen und Präferenzen der Akteure integrieren**

Das Eawag-Projekt «Sustainable Water Infrastructure Planning» (SWIP) ist weltweit eines der ersten Projekte, in denen auf Akteurebene quantifiziert wurde, wie nachhaltig die langfristige Planung für kleine Wasserinfrastrukturnetze ist. SWIP gliedert sich in bestehende Planungsinstrumente der Schweiz wie die Generelle Entwässerungsplanung (GEP) oder die Generelle Wasserversorgungsplanung (GWP) ein und ergänzt diese mit partizipativen, zukunftsorientierten Elementen. Der Fokus lag auf dem Umgang mit Beschränkungen bei den Daten,

der Unsicherheit zukünftiger Entwicklungen und einer hohen Akzeptanz des Entscheidungsprozesses durch die Beteiligten. Das Projekt zeichnet sich durch einen konsequent transdisziplinären Ansatz aus. Erfahrungen, Wissen und Präferenzen der relevanten Akteure wurden während der verschiedenen Phasen in die wissenschaftliche Forschung integriert. Der Schweizerische Nationalfonds förderte SWIP im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Wasserwirtschaft» (NFP 61). [www.eawag.ch/swip](http://www.eawag.ch/swip)

### **Methoden und Resultate für die Praxis nutzbar machen**

Angesichts der grossen Herausforderungen, denen die Schweiz bei der Bewirtschaftung ihrer Wasserinfrastrukturen gegenübersteht, ist das sorgfältige Erarbeiten methodischer Grundlagen ein zentraler Aspekt. Wir sind überzeugt, dass das SWIP-Projekt hier wichtige Beiträge liefern konnte. So erleichtern die entwickelten Instrumente den Umstieg vom problembasierten Reparieren zur proaktiven und langfristigen Erhaltungs- und Sanierungsplanung. Obwohl das Projekt auf Wissenschaftlichkeit und nicht auf Praxisnähe ausgerichtet war, sehen wir ein grosses Potenzial darin, die entwickelten Methoden und Resultate für die Praxis nutzbar zu machen.

In einem Nachfolgeprojekt sind wir gegenwärtig daran, die Resultate der Klimaeffekte für die ganze Schweiz zu verallgemeinern. Die Prognosemodelle zur Bruchhäufigkeit von Leitungen lassen sich mit geringem Aufwand von Ingenieurbüros mit entsprechenden Fachkenntnissen anwenden. Neben der wenig komfortablen Benutzeroberfläche liegen hier die Herausforderungen vor allem in der Aufbereitung der Daten. Diese ist aufgrund der sehr heterogenen Datenhaltung in den Gemeinden oft mühsam. Eines grösseren Aufwands bedürfen die Anpassungen und Vereinfachungen der MCDA und das Übertragen dieses sehr spezifischen Wissens in die Ingenieurspraxis.



Max Maurer  
Leiter der Abteilung Siedlungswasserwirtschaft  
max.mauer@eawag.ch



Judit Lienert  
Leiterin der Gruppe Entscheidungsanalyse der Abteilung Umweltsozialwissenschaften  
judit.lienert@eawag.ch

- [1] Lienert J., Scholten L., Egger C., Maurer M. (2014): Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios (in Begutachtung)
- [2] Scholten L., Schuwirth N., Reichert P., Lienert J. (2014): Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis – An application to water supply infrastructure planning (in Vorbereitung)
- [3] Zheng J., Lienert J. (2014): Stakeholder preference elicitation and modeling for wastewater infrastructure planning: A comparative evaluation of two elicitation methods (in Vorbereitung)
- [4] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M., Lienert J. (2014): Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research* 49 (1), 124–143
- [5] Lienert J., Schnetzer F., Ingold K. (2013): Stakeholder analysis combined with social network analysis provides fine-grained insights into water infrastructure planning processes. *Journal of Environmental Management* 125, 134-148
- [6] Scholten L., Egger C., Zheng J., Lienert J. (2014): Multikriterielle Entscheidungsunterstützung zur Planung der Wasserver- und Abwasserentsorgung. *Aqua & Gas* 5 (im Druck)
- [7] Egger C., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Sewer deterioration modeling with condition data lacking historical records. *Water Research*, 47(17), 6762–6779
- [8] Scholten L., Scheidegger A., Reichert P., Maurer M. (2013): Combining expert knowledge and local data for improved service life modeling of water supply networks. *Environmental Modelling & Software* 42, 1-16
- [9] Scheidegger A., Beutler P., Maurer M. (2013): Prognosen zum Sanierungsbedarf der Schweizer Kanalisation. *Aqua & Gas* 1, 16–20
- [10] Egger C., Honti M., Maurer M. (2013): Einfluss des Klimawandels auf die Leistung der Siedlungsentwässerung. Tagungsunterlagen zur *Aqua Urbanica 2013: Gewässerschutz bei Regenwetter – Gemeinschaftsaufgabe von Stadtplanern, Ingenieuren und Ökologen in Zürich*