

MULTIKRITERIELLE ENTSCHEIDUNGSANALYSE

NEUE ANSÄTZE FÜR LANGFRISTIGE INFRASTRUKTUR- PLANUNG IN DER WASSERVER- UND -ENTSORGUNG

Im NFP-61-Forschungsprojekt «Langfristige Planung nachhaltiger Wasserinfrastrukturen» der Eawag wurden für die Planung der Wasserver- und Abwasserentsorgung unterschiedliche Alternativen miteinander verglichen. Die multikriterielle Entscheidungsanalyse berücksichtigt dabei die Präferenzen der Akteure und die Szenarienanalyse testet die Robustheit der Alternativen gegenüber unsicheren Zukunftsentwicklungen. Dieser neue Ansatz ergänzt die generelle Wasserversorgungsplanung (GWP) sowie die generelle Entwässerungsplanung (GEP) und bringt die Infrastrukturplanung auf eine nachhaltige Basis.

Lisa Scholten*; Christoph Egger; Jun Zheng; Judit Lienert, Eawag

RÉSUMÉ

ANALYSE DÉCISIONNELLE MULTICRITÈRE: NOUVELLE APPROCHE POUR LA PLANIFICATION DE L'INFRASTRUCTURE À LONG TERME RELATIVE AU TRAITEMENT ET À L'ÉVACUATION DES EAUX USÉES

La planification stratégique des infrastructures aquatiques en Suisse est confrontée à d'importants défis. Actuellement, les approches constructives de planification pour aborder les systèmes existants et garantir un futur durable font défaut. Le projet de recherche «Planification à long terme des infrastructures durables de l'eau» de l'Eawag s'est penché sur le développement de nouveaux concepts pour le long terme et les a éprouvés au moyen d'une étude de cas dans l'Oberland zurichois. Conjointement avec les acteurs et à l'aide d'une analyse décisionnelle multicritère, les objectifs fondamentaux pour une bonne infrastructure de l'eau ont été définis et utilisés pour l'évaluation des systèmes conventionnels et novateurs de distribution, traitement et d'évacuation des eaux usées, des formes d'organisation et des stratégies de gestion. Des pronostics sur la prestation à long terme de ces systèmes ont été pris en compte pour cette évaluation, ainsi que les préférences des acteurs centraux. Des scénarios ont été développés afin de tester la solidité des options d'action pour différentes évolutions futures. L'analyse décisionnelle multicritère a permis une meilleure compréhension de la puissance des infrastructures dans le cadre d'un avenir incertain et a aidé à révéler de possibles

EINLEITUNG

HERAUSFORDERUNGEN IN DER WASSERINFRASTRUKTURPLANUNG

Die Infrastrukturen der Wasserver- und Abwasserentsorgung übernehmen eine zentrale Rolle in unserer Gesellschaft. Sie bestehen hauptsächlich aus Leitungen bzw. Kanälen, für die eine Lebensdauer von 50 bis 100 Jahren üblich ist. Um die hohe Leistung dieser Systeme zu erhalten, müssen insbesondere die Leitungen vielerorts erneuert werden – was kostspielig ist. So müssen schätzungsweise 176 Mrd. Franken in den nächsten 40 Jahren in die schweizerischen Siedlungswasserinfrastrukturen investiert werden. Ein grosser Teil davon gehört der öffentlichen Hand; hier betragen die benötigten Investitionen etwa 81 Mrd. Franken. Diese Zahlen zeigen deutlich, dass es sich lohnt, darüber nachzudenken, wie das Geld am besten investiert wird. Die Planung der Wasserinfrastrukturen ist komplex. Sie wird durch Instrumente wie GEP (Generelle Entwässerungsplanung) und GWP (Generelle Wasserversorgungsplanung/Generelles Wasserversorgungsprojekt) unterstützt. Diese Planungsinstrumente sind von zentraler Bedeutung, basieren aber meist auf einer Projektion des Ist-Zustandes in die Zukunft. Somit werden dynamische zukünftige Veränderungen, z. B. infolge der sozio-ökonomischen Entwicklung oder des Klimawandels,

* Kontakt: lisa.scholten@eawag.ch

nicht berücksichtigt. Folgenreiche Unsicherheiten oder vielversprechende Lösungen abseits der bekannten «Status quo-Systeme» werden hierbei meist ignoriert. Auch sehen GEP und GWP keine aktive Beteiligung zentraler Akteure vor. Verschiedene Autoren bemängeln, dass die Ingenieurspraxis und die finanziellen Ressourcen den anstehenden Planungsherausforderungen kaum gewachsen sind [1, 2]. In der Schweiz wird eine integrale, strategische Planung zusätzlich durch die starke Fragmentierung des Wassersektors erschwert (hier sei auf die etwa 2800 Wasserversorgungen und 750 Kläranlagen in der Schweiz verwiesen). Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 wurde an der Eawag das Projekt SWIP durchgeführt (s. *Box 1*). Ziel von SWIP war es, Instrumente und Methoden zu entwickeln, die den langfristigen Planungsprozess verbessern. Ein Fokus lag auf der Bestimmung des aktuellen und zukünftigen Zustands der Infrastruktur. Es wurden Modelle für die Rehabilitationsplanung entwickelt, die mit der typischen Datenlage kleiner Schweizer Gemeinden umgehen können. Diese Modelle werden an anderer Stelle beschrieben. Der vorliegende Artikel beschreibt den zweiten Themenbereich, nämlich die multikriterielle Entschei-

dungsanalyse (MCDA, von *Multi-Criteria Decision Analysis*) als Planungsansatz sowie die Ergebnisse einer konkreten Fallstudie. MCDA kann (z. B. auch in vereinfachter Form) die bestehende Planung mit GEP und GWP ergänzen. Sie unterstützt den Übergang von einem problembasierten Reparieren zu einer vorausschauenden, nachhaltigen Planung, die auch mit verschiedensten Unsicherheiten umgehen kann.

MCDA ALS PLANUNGSINSTRUMENT

Die MCDA wurde in der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts entwickelt und ist insbesondere im englisch- und französischsprachigen Raum verbreitet. Sie findet praktische Anwendung in der strategischen Unternehmensplanung, aber auch zur Unterstützung von Entscheidungen z. B. im Umweltmanagement, Gesundheitswesen oder bei Fragen der nationalen Sicherheit.

Es gibt vielerlei Ansätze, die sich hinter dem Oberbegriff MCDA verbergen. Allen gemein ist das Ziel, komplexe Einzel- oder Gruppenentscheide zu strukturieren und zu unterstützen. Wir verwenden in diesem Artikel wertefokussierte Verfahren (und meinen diese, wenn wir MCDA schreiben). Ihre Stärke liegt genau in dieser Fokussierung auf Werte – d. h. das, was einem wirklich wichtig ist. Sie führt damit weg von einer oft vorurteilsbelasteten und damit gegebenenfalls wenig zielführenden Diskussion über mögliche Entscheidungsoptionen. Die MCDA ermöglicht es, Vorhersagen über «objektive Daten» (z. B. betreffend Kosten und Qualität des Trinkwassers) mit «subjektiven Präferenzen» zu verbinden. Die Methode erhöht so die Transparenz der Entscheide, weil die Wichtigkeit, die verschiedene Akteure den einzelnen Zielen beimessen, klar erhoben und dargestellt werden kann.

ZIEL DES ARTIKELS

Im Projekt SWIP wurde exemplarisch gezeigt, wie verschiedene Interessensgruppen und ihre Meinungen und Werte mittels der MCDA-Methode systematisch in den Entscheidungsprozess einbezogen werden können [3, 4]. Man ist dabei in acht Schritten vorgegangen (*Box 2*). Der letzte Schritt, die Umsetzung, war jedoch nicht Bestandteil des Forschungsprojektes. Ziel dieses Artikels ist es, in die MCDA-Methodik einzuführen und einen Teil der Ergebnisse aus einer Fallstudie, die im

ABLAUF DES MCDA-PROZESSES

Die im SWIP-Projekt verwendete MCDA-Methode gliedert sich in acht Schritte:

Schritt 1: Rahmen und Systemgrenzen klären
Entscheiden, worüber entschieden und wer in den Prozess involviert wird.

Schritt 2: Ziele definieren
Was ist wichtig für die Entscheidenden/die Gesellschaft/zukünftige Generationen? Attribute (Kennzahlen/Indikatoren) messen, wie gut die Ziele erreicht werden.

Schritt 3: Zukunftsszenarien entwickeln
Um die unsichere zukünftige Entwicklung zu berücksichtigen, wurde die MCDA mit einer Szenarioplanung kombiniert. Wie könnte die Welt im Jahr 2050 aussehen und wie beeinflusst dies die Wasserinfrastrukturen?

Schritt 4: Alternativen entwickeln
Wie können Haushalte mit Wasser versorgt und Abwässer entsorgt werden? Wie können Infrastrukturen erhalten, repariert oder ersetzt werden? Wie können die Institutionen, Firmen etc. organisiert werden?

Schritt 5: Konsequenzen abschätzen
Wie gut werden die Ziele (Schritt 2) für jede Alternative (Schritt 4) unter den Zukunftsszenarien (Schritt 3) erreicht? Für die Prognosen können Modelle benutzt oder Experten um Einschätzung gebeten werden.

Schritt 6: Präferenzen der Akteure erheben
Welche Ziele sind die wichtigsten? Kann eine Zielerreichung (z. B. steigende Kosten) gegen eine andere (z. B. bessere Gewässerqualität) abgewogen werden?

Schritt 7: Abschneiden der Alternativen berechnen
Hier werden die Prognosen (Schritt 5) mit den Präferenzen (Schritt 6) mittels eines mathematischen Modells kombiniert. Gibt es robuste Alternativen, die für die meisten Akteure und auch unter verschiedenen Zukunftsszenarien gut abschneiden? Falls nicht, können Kompromissalternativen erstellt werden, welche die Ziele für alle besser erreichen?

Schritt 8: Diskussion, Entscheid, Umsetzung und Erfolgskontrolle
Dieser letzte Schritt der MCDA wurde im SWIP-Projekt nicht durchgeführt.

LANGFRISTIGE PLANUNG NACHHALTIGER WASSERINFRASTRUKTUREN (SWIP)

Ziel des Projekts SWIP (Abk. des englischen Projekttitels: *Sustainable Water Infrastructure Planning*) ist eine verbesserte Planung von Trinkwasserversorgungs- und Entwässerungssystemen, die sich in die bestehenden Planungsstrukturen der Schweiz eingliedert. Der Fokus liegt auf dem Umgang mit Beschränkungen in den Daten, der Unsicherheit von zukünftigen Entwicklungen und einer hohen Akzeptanz des Entscheidungsprozesses durch Akteure.

Weitere Informationen finden sich auf der SWIP-Projektwebsite:
www.eawag.ch/forschung/sww/gruppen/swip

Kontakt:
Judith Lienert, judit.lienert@eawag.ch
Max Maurer, max.maurer@eawag.ch

Rahmen von SWIP durchgeführt wurde, darzustellen. Die MCDA wurde für die Planung von Trinkwasser- und Abwasserinfrastrukturen separat angewandt. Der Einfachheit halber wird nur auf vier Entscheidungsalternativen (von elf für die Trinkwasserversorgung bzw. 15 für die Abwasserentsorgung) und auf eines von vier sozioökonomischen Zukunftsszenarien, nämlich das Szenario «Status quo», mit kurzem Verweis auf das Szenario «Boom» eingegangen. Auf die beiden anderen Szenarien (Doom und qualitatives Wachstum) wird hier verzichtet.

VORGEHEN BEI DER FALLSTUDIE

AKTEURS-ANALYSE

An der Fallstudie «Mönchaltorfer Aa» haben vier Gemeinden im Zürcher Oberland, Egg, Gossau, Grüningen und Mönchaltorf, teilgenommen. In der Region lebten im Jahr 2010 etwa 24 000 Menschen. Um herauszufinden, wer wichtige Entscheider sind oder stark von Entscheiden betroffen sein könnte, wurde eine systematische Akteurs-Analyse (Identifizierung von Akteuren und Klassifizierung nach Einfluss bzw. Betroffenheit) durchgeführt [4].

Für die Wasserinfrastrukturplanung wurden 66 wichtige Akteure identifiziert. Am konkreten Entscheid sind jedoch nur wenige, vor allem lokale Akteure beteiligt zusammen mit den beratenden Ingenieuren. Die bekannte Trennung zwischen

Wasserversorgungs- und Abwasserentsorgungssektor ist in der sozialen Netzwerkanalyse deutlich sichtbar geworden. Auch zwischen verschiedenen Entscheidungsebenen (lokalen, kantonalen und nationalen Akteure) war nur eine geringe Vernetzung zu finden. Andererseits nehmen die Tiefbauämter der Gemeinden, aber auch die kantonalen Umweltbehörden eine Schlüsselposition ein, da sie mit vielen anderen interagieren und zwischen Sektoren vernetzen können. Von den 66 Akteuren wurden je zehn für die MCDA im Trink- und Abwasserbereich ausgewählt. Dies waren Vertreter der Gemeinden und beratenden Ingenieure, aber auch Vertreter von kantonalen und nationalen Behörden sowie der Fachverbände in der Siedlungswasserwirtschaft.

DEFINITION VON ZIELEN

Bei der konventionellen Planung der Wasserinfrastrukturen werden verschiedene Bewertungskriterien meist nicht explizit berücksichtigt. Zum Beispiel ist die dauerhafte Verfügbarkeit von genügend Trink- und Löschwasser ein implizites Ziel der Wasserversorgung. Im Abwassersektor steht die Entsorgung von Schmutz- und Meteorwasser im Vordergrund. Mit der MCDA werden die impliziten Ziele, die eine «gute Wasserinfrastruktur» kennzeichnen, explizit gemacht und quantifiziert. Es können auch nicht monetäre und qualitative Ziele miteinbezogen werden. Der

«Trade-off», also das Abwägen verschiedener Ziele gegeneinander, ist ein der MCDA zugrunde liegender Leitgedanke. Bei der MCDA werden alle Ziele auf einer neutralen Skala miteinander verglichen. Damit kann z.B. eine höhere Trinkwasserqualität gegen höhere Kosten oder niedrigere Flexibilität getauscht werden – sofern das den Präferenzen des Akteurs entspricht. In intensiver Zusammenarbeit mit lokalen, kantonalen und nationalen Akteuren wurde eine Zielhierarchie aufgestellt (Fig. 1; Details in [3]). Sie kann auch auf andere Fälle angewandt werden. Neben Qualitäts-, Kosten- und Umweltschutzziele enthält sie auch andere Ziele für die Nachhaltigkeit der Infrastrukturen wie Generationengerechtigkeit und soziale Akzeptanz.

Die Zielerreichung wird durch Attribute (Indikatoren) gemessen. Beispielsweise kann das Erreichen des Ziels «geringer Kostenanstieg» anhand des Attributs «mittlerer jährlicher Kostenanstieg» über den Betrachtungszeitraum (2010 bis 2050) gemessen werden. Die verwendeten Attribute sind in [3] genauer beschrieben.

ALTERNATIVEN UND ZUKUNFTSSZENARIEN

Die MCDA sieht vor, dass in einem kreativen Prozess ein breites Spektrum von Alternativen (Handlungsoptionen) entwickelt wird. In SWIP wurden in einem Akteursworkshop konventionelle, aber auch unkonventionelle (z.B. dezentrale) Alternativen zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung entwickelt [3]. Die Alternativen wurden nun nicht direkt durch die Akteure bewertet, sondern sie wurden indirekt über das Erreichen verschiedener Ziele analysiert. Die Alternativen zeichneten sich jeweils durch bestimmte Formen der betrieblichen Organisation, eine Strategie zu Betrieb und Sanierung der Anlagen sowie verschiedene Technologien und räumliche Strukturen der Infrastruktur aus. Betrachtet wurden insgesamt zehn gemeinsame Alternativen zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung mit zusätzlichen Varianten hinsichtlich einzelner Aspekte. Die Ergebnisse der MCDA werden hier für vier ausgewählte Alternativen diskutiert (Tab. 1). Zusätzlich wurden in einem Workshop mit Vertretern aus der Fallstudie vier Zukunftsszenarien entwickelt (Details in [3]). Sie beschreiben unterschiedliche Möglichkeiten, wie die Welt in der Region «Mönchaltorfer Aa»



Fig. 1 Zielhierarchie zur Bewertung von Wasserinfrastrukturen.

Blau: Wasserversorgung; orange: Abwasserentsorgung; grün: beide

Objectif hiérarchique pour l'évaluation d'infrastructures de l'eau

Bleu: approvisionnement en eau; orange: évacuation des eaux usées; vert: les deux

	A1 Interkommunale Anstalt, zentral, mittlerer Aufwand	A2 Privates Vertragsunternehmen, zentral, Minimalaufwand	A3 Private Verantwortung, dezentral einfach, Minimalaufwand	A4 Gemischte Verantwortung, de- zentral Hightech, mittlerer (TW) bzw. hoher (AW) Aufwand
Organisatorische Struktur	Interkommunale Anstalt (IKA), die weitere Sektoren (z. B. Strassenwesen und Energieversorgung) sowie sämtliche Gemeinden im Zürcher Oberland einschliesst.	Konsumenten wählen privates Vertragsunternehmen. Es bestehen keine Kooperationen zwischen Gemeinden oder mit anderen Sektoren.	Haushalte sind selbst verantwortlich. Nur der Trink- und Abwassersektor kooperieren miteinander. Teilweise gibt es Kooperationen über Gemeindegrenzen hinweg.	Dezentrale Systemelemente von Haushalten selbst verantwortet, zentrale Systemelemente von gemeindeübergreifenden Kooperativen. Keine organisatorische Kooperation mit anderen Sektoren.
Sanierung der Netzinfrastrukturen	TW: Jährlicher Ersatz von 2% der Leitungen in Abhängigkeit ihres Zustands. AW: Ersatz so, dass höchstens 10% der Netzlänge in einem schlechten Zustand ist.	Minimaler Sanierungsaufwand. Nur bei Bruch einer Trinkwasserleitung bzw. Einsturz einer Abwasserleitung werden Massnahmen ergriffen.	wie bei A2	Mittlerer bis hoher Rehabilitationsaufwand. Ersatz erfolgt anhand der geschätzten Anlagenlebensdauer. TW: nur dezentrale Anlagen werden rehabilitiert, zentrale Anlagen (z. B. das Leitungsnetz) zerfallen.
Wasserversorgung	Rohwasser (Grund- und Seewasser) wird zentral aufbereitet (Desinfektion, Entfernung von MV). Verteilung über zentrales Rohrnetz. In neuen Wohngebieten werden Rohrdurchmesser neu auf den Haushaltsverbrauch dimensioniert und zusätzliches Löschwasser zur Erfüllung der Löschwasservorgaben in dezentralen Tanks bereitgestellt.	wie bei A1	Nicht aufbereitetes Grundwasser wird mit Fahrzeugen an Konsumenten geliefert, in Behältern gespeichert und vor Ort behandelt (nur Desinfektion mit Chlorung). Löschwasser wird in separaten Behältern vorgehalten.	Regenwasser wird vorzugsweise verwendet (Brauch- und Trinkwasser). Falls nötig wird weiteres Rohwasser an Konsumenten geliefert. Löschwasser wird in Behältern vorgehalten. Die dezentrale Aufbereitung umfasst Desinfektion und Entfernung von MV.
Abwasserentsorgung	Bestehende Entwässerungssysteme bleiben unverändert und werden gemäss bestehender Planungen (GEP) ausgebaut. Neu ausgezonte Gebiete werden ausschliesslich im Trennsystem entwässert. Die ARA werden nach Bedarf ausgebaut und mit einer Reinigungsstufe zur Entfernung von MV ausgestattet.	Entwässerungssysteme wie bei A1; sofern möglich, wird 80% des Dachabwassers in Neuüberbauungen infiltriert (nur an wenigen Stellen möglich). Bestehende ARA werden bei Bedarf ausgebaut.	Bestehende Entwässerungssysteme bleiben unverändert. Regenabwasser wird in neuen Siedlungsgebieten oberflächlich abgeleitet. Mechanische Reinigungsstufen bestehender ARAs werden weiterhin betrieben. In neuen Siedlungsgebieten werden Faulgruben installiert.	Entwässerung wie bei A1, in Neubaugebieten 80% der Dachflächen als Gründach; pro ha reduzierte Fläche werden 300 m ³ Regenrückhalteräume bereitgestellt. Nährstoffe werden aus Abwasser dezentral zurückgewonnen. Restliches Abwasser wird in bestehenden ARA geklärt (Ausbau nach Bedarf, zusätzliche Reinigungsstufe zur Entfernung von MV).

Tab. 1 Beschreibung der Alternativen A1–A4 für die Wasserver- und Abwasserentsorgung im Fallstudiengebiet

TW = Trinkwasser, AW = Abwasser, MV = Mikroverunreinigungen, ARA = Abwasserreinigungsanlagen

Description des alternatives A1–A4 pour l’approvisionnement en eau et l’évacuation des eaux usées dans la région d’étude

TW = eau potable, AW = eaux usées, MV = micropolluants, ARA = stations d’épuration des eaux usées

im Jahr 2050 aussehen könnte, nämlich Boom (extremes Wachstum), Doom (wirtschaftliche Krise) und Lebensqualität (moderates, nachhaltiges Wachstum). Das Szenario Status quo ist eine Projektion des Ist-Zustandes auf das Jahr 2050. Beim Szenario Boom wächst die Bevölkerung von heute 24 200 auf 200 000 Einwohner, es kommt zu einer grossen wirtschaftlichen und technologischen Entwicklung. Für jedes Szenario sehen die Prognosen der Leistung der einzelnen Alternativen anders aus. Eine Alternative ist robust, wenn sie in verschiedenen Szenarien ähnlich gut abschneidet.

ATTRIBUTPROGNOSEN

Für jede Alternative wird prognostiziert, wie gut die Attribute abschneiden. Dies kann über komplexe Modellierungen geschehen, z. B. betreffend Zustand und

Rehabilitation der Leitungen oder auch mit Expertenschätzungen. Dabei werden beispielsweise die mittleren Kosten einer Alternative bestimmt, die Anzahl Mischwasserüberläufe pro Jahr oder wie viele Sektoren (nicht) zusammenarbeiten und Ärger über unnötige Strassenbaustellen hervorrufen. Der Prognosezeitraum reicht vom Referenzjahr 2010 bis 2050. Für die langfristige Planung sind langfristige Änderungen der Randbedingungen (z. B. Bevölkerungszahl, Wassernutzung, Klima) wichtig. Deshalb wurden die Prognosen für jedes Attribut und jede Alternative unter allen vier Zukunftsszenarien erstellt. Insbesondere die Prognosen für das Szenario Boom unterscheiden sich von den anderen Szenarien. Das Abschneiden der vier Alternativen bzgl. der Hauptziele im Szenario Status quo ist in *Figur 2* (Attribute der Wasserversorgung)

und *Figur 3* (Abwasserentsorgung) dargestellt (für weitere Alternativen, Teilziele und Szenarien siehe [5, 6]).

Einige Attribute hängen besonders stark von den Annahmen der Szenarien ab. Beispiele hierfür sind die Umsetzung des Rehabilitationsbedarfs (siehe Attribut *rehab* in *Fig. 2* und 3), das Ausschöpfen der Grundwasserneubildung (*gwhh*), die hydraulische Beeinträchtigung (*hydr*), technische Zuverlässigkeit (z. B. der Löschwasserversorgung: *reliab_ffw* oder der Abwasseranlagen: *failure*), Ansteckung mit Krankheitserregern aus dem Abwasser (*illn*) oder die Jahreskosten (*costcap*) und der Kostenanstieg (*costchange*). Diese Attribute tragen massgeblich zur (In-)Stabilität der Alternativen unter den Zukunftsszenarien bei. Andere Attribute sind zwar für die Alternativen sehr verschieden, aber unter allen Szenarien ungefähr gleich. Das

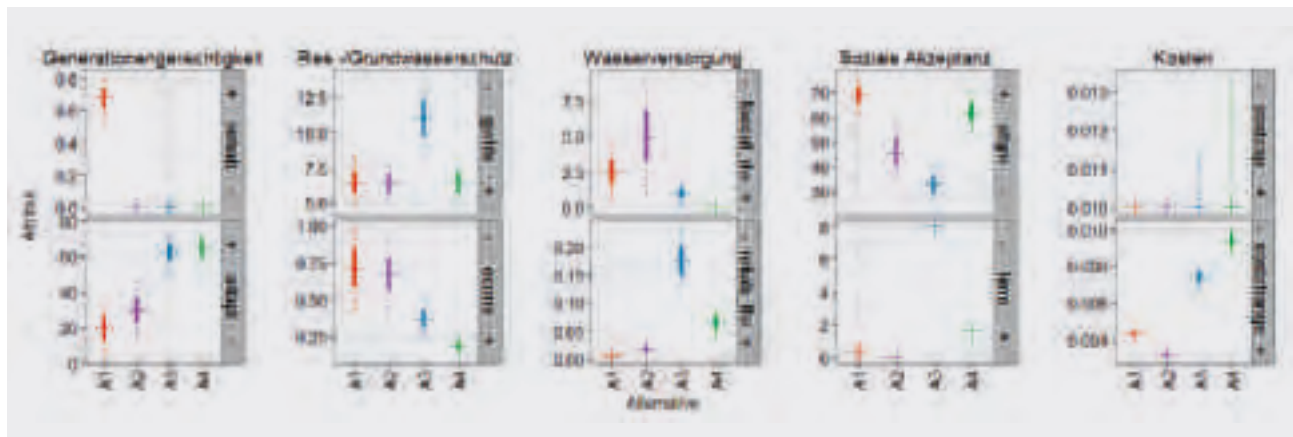


Fig. 2 Prognosen für ausgewählte Attribute der fünf Hauptziele einer guten Trinkwasserversorgung (Szenario Status quo) für die Alternativen A1–A4. Die Minus- und Pluszeichen neben den Attributbezeichnungen (graue Kästen) geben an, in welche Richtung sich das Attributergebnis verbessert (+) bzw. verschlechtert (-). Waagrechter Strich: Median; durchgezogener, senkrechter Strich: Bereich, in dem 50% der Werte liegen; gepunkteter, senkrechter Strich: Bereich, in dem 90% der Werte liegen

Pronostics pour des attributs des cinq objectifs principaux d'un bon traitement de l'eau potable (scénario statu quo) pour les quatre alternatives A1–A4. Les signes (+) et (-) à côté des désignations des attributs (encadrés gris) indiquent le sens d'amélioration (+) ou de détérioration (-) du résultat des attributs. Ligne horizontale: médiane; ligne continue verticale: domaine dans lequel se situe 50% des valeurs; ligne pointillée, verticale: domaine dans lequel se trouve 90% des valeurs

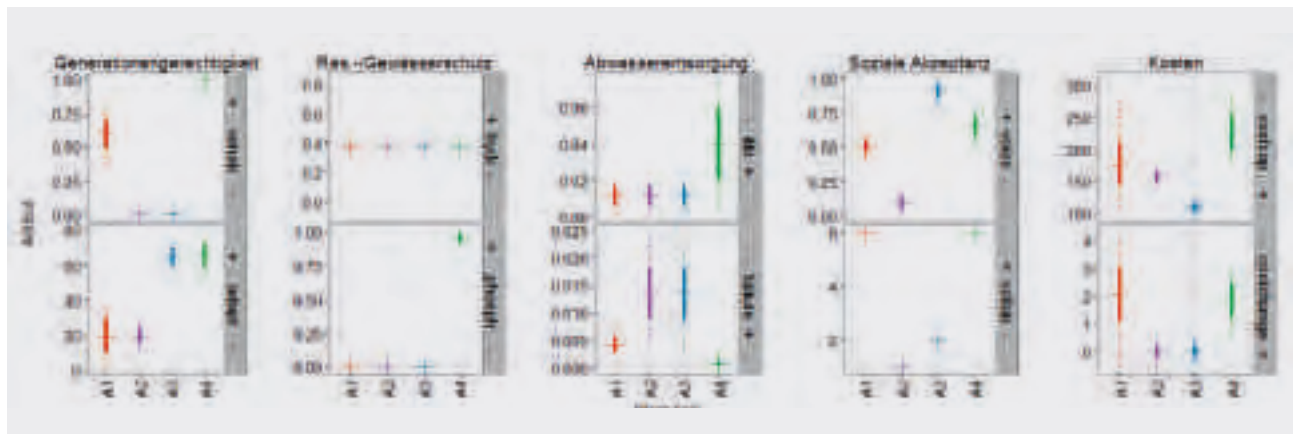


Fig. 3 Prognosen für ausgewählte Attribute der fünf Hauptziele einer guten Abwasserversorgung (Szenario Status quo) für die Alternativen A1–A4. Erläuterungen siehe Fig. 2

Pronostics pour attributs sélectionnées parmi les cinq objectifs principaux d'une bonne évacuation des eaux usées (scénario statu quo) pour les quatre alternatives A1–A4. Explications, voir fig. 2

trifft zu auf die Flexibilität des technischen Rück- und Ausbaus (*adapt*), den Energiebedarf (*econs*), die Qualität des Trink-/ Brauchwassers (z.B. *faecal_dw*: hygienische Beeinträchtigung des Trinkwassers), die Rückgewinnung von Phosphor (*phosph*) und die Attribute zur Messung der sozialen Akzeptanz (z.B. *efqm*: Qualität von Verwaltung und Betrieb; *time*: Zeitaufwand der Endnutzer; *voice*: Mitbestimmung der Bevölkerung; *collab*: Anzahl Sektoren, die zusammenarbeiten). Schliesslich gibt es Attribute, die wenig zur Unterscheidung und Beurteilung der Robustheit der Alternativen beitragen. Hier lassen sich beispielsweise der chemische Zustand der Gewässer oder die Trinkwasserquantität (nicht dargestellt) nennen.

ERHEBUNG DER PRÄFERENZEN

Um die Alternativen bewerten zu können, sind Kenntnisse der subjektiven Präferenzen der Akteure über die Ziele nötig. Diese wurden mithilfe von Online-Fragebögen und Interviews erhoben. Dabei wurden u. a. Gewichte und Wertefunktionen ermittelt (Box 3).

Nicht alle Aspekte, die für eine umfassende Beschreibung der MCDA-Präferenzen wünschenswert sind, konnten erhoben werden. Diese wurden in der Berechnung als Unsicherheiten angenommen. Details hierzu und die Ergebnisse für alle untersuchten Alternativen sind in [5, 6] beschrieben. Für die hier vorgestellten Ergebnisse wurden Standardannahmen verwendet, da sie für ein Verständnis der

MCDA-Methodik ausreichen (d. h. mittlere Gewichte, lineare Wertefunktionen – sofern nicht eine andere Form erhoben, volle Kompensierbarkeit zwischen den Zielen).

Die sichere Wasserver- und Abwasserentsorgung war den Akteuren am wichtigsten, gefolgt vom Ressourcen-, Grundwasser- und Gewässerschutz und der Generationengerechtigkeit (Fig. 4). Die Ziele der sozialen Akzeptanz spielten eine untergeordnete Rolle ebenso wie die Kosten im Falle der Abwasserinfrastrukturen. Die grossen Fehlerbalken zeigen aber auch, dass die Gewichtungen der Akteure insbesondere im Abwassersektor individuell sehr verschieden waren.

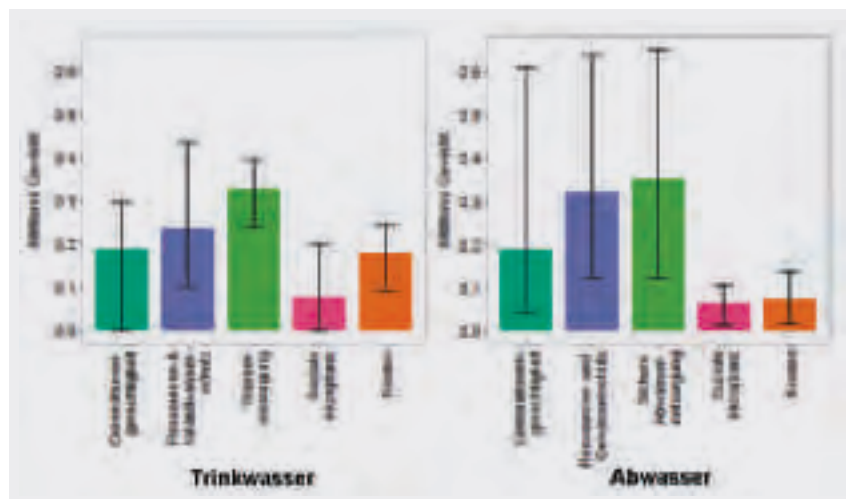


Fig. 4 Mittlere Gewichte der je zehn Akteure aus dem Trink- und Abwassersektor für die fünf Hauptziele. Die Fehlerbalken geben die Abweichung zwischen den mittleren Gewichten der individuellen Akteure an

Poids moyens pour chacun des dix acteurs issus du secteur de l'eau potable et des eaux usées pour les objectifs principaux. Les colonnes d'erreur indiquent la déviation entre les poids moyens des acteurs individuels

ERGEBNISSE DER MCDA

Um eine Rangordnung der Alternativen zu erstellen (welche ist besser, welche schlechter?), wurden die Präferenzen der Akteure bezüglich der Zielerreichung und die Leistungsprognosen der Alternativen rechnerisch zusammengeführt.

WASSERVERSORGUNG

Szenario Status quo

In *Figur 5* sind die Ergebnisse der MCDA für Trinkwasser für die Alternativen A1-A4 (siehe *Tab. 1*) zusammengefasst. Im Szenario Status quo schnitt unter den berücksichtigten Zielen Alternative A1 (Interkommunale Anstalt, zentrale Versorgung, mittlerer Aufwand; in *Fig. 5 rote Kurve*) am besten ab, da sie bei allen zehn Akteuren die höchsten Werte erreichte (zwischen 0,7 und 0,95). Auf dem zweiten Rang lag Alternative A4 (Gemischte Verantwortung, dezentral Hightech, mittlerer Aufwand; *grüne Kurve*), wenn auch mit deutlich niedrigerem Gesamtwert für die meisten Akteure. Die Vertreter der lokalen Wasserversorgungsgenossenschaft (Nr. 3 in *Fig. 5*) schätzten A4 nur minimal schlechter als A1 ein, der Wert für A4 war aber mit weniger Unsicherheit behaftet. Bei Risikoaversion könnte also auch A4 vorgezogen werden. Um das zu bestimmen, wäre eine detaillierte Erhebung der Risikoeinstellung nötig.

Der dritte und vierte Rang waren weniger eindeutig. Für den Vertreter der

kantonalen Umweltschutzbehörde (Nr. 7) waren alle Alternativen ausser A1 irrelevant (Wert = 0). Das lag an zusätzlichen Ausschlusskriterien, die von den Alternativen nicht erreicht werden. Die Vorgaben dieses Akteurs waren, dass weder die Anzahl Tage mit hygienischen Beeinträchtigungen des Trinkwassers (z.B. Attribut *faecal_dw* in *Fig. 2*) noch die Zuverlässigkeit der Löschwasserversorgung (*reliab_ffw*) schlechter ausfallen dürfen als im heutigen System. Bei A4 war die Zuverlässigkeit der Löschwasserversorgung etwas geringer als heute, weil die Ausfallrate dezentraler Trinkwasseranlagen tendenziell etwas höher als bei zentralen Anlagen angenommen wurde.

Bei A2 (Privates Vertragsunternehmen, zentrale Versorgung, Minimalaufwand; *violette Kurve*) führte ein marodes Netz infolge der rein reaktiven, minimalen Rehabilitation zu einer schlechteren Wasserqualität. Da die Prognose aus den Rehabilitationsmodellen relativ unsicher war und eine mindestens genauso gute Wasserqualität wie heute vorkommen kann, ergab sich für A2 ein sehr grosser Unsicherheitsbereich. Bei A3 (Private Verantwortung, dezentral einfach, Minimalaufwand; *blaue Kurve*) waren sowohl die prognostizierte technische Zuverlässigkeit als auch die Wasserqualität geringer. Ähnliche Ausschlusskriterien bezüglich der Wasserqualität (z.B. nicht mehr als 5 Tage/Jahr mit hygienischen Beeinträchtigungen) führten auch bei

Vertretern des lokalen Betriebspersonals (Nr. 2), der Gemeindeadministration (Nr. 3) und des SVGW (Nr. 9) zu einem Ausschluss von A2.

Wie sich auch in der detaillierten Analyse mit Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Präferenzen herausstellte [5], hat der Rehabilitationsaufwand einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Das liegt daran, dass er diejenigen Ziele beeinflusst, denen die Akteure hohe Gewichte gegeben haben. Das sind vor allem die Wasserqualität (Hygiene, z.B. *faecal_dw*), die Zuverlässigkeit des Systems (z.B. *reliab_ffw*) und die Umsetzung des Rehabilitationsbedarfs für die Generationengerechtigkeit (*rehab*). Im Mittel schnitten dabei diejenigen Alternativen am besten ab, die eine verlässliche

ERHEBUNG DER SUBJEKTIVEN PRÄFERENZEN

Um die subjektiven Präferenzen der einzelnen Akteure darzustellen, werden zwei Grössen herangezogen:

Gewichte

Gewichte messen, wie wichtig ein Ziel relativ zu einem anderen ist, d.h. sie legen die Austauschverhältnisse fest. Beispielsweise kann ein Akteur bereit sein, die Verbesserung der «Anzahl Mischwasserentlastungen (MWE)» im Verhältnis 2:1 gegen eine gleich starke Verschlechterung des «jährlichen Kostenanstiegs» zu tauschen. Diese Einschätzung hängt immer vom Bereich ab, den das beste und schlechteste Attributniveau aufspannen. Die Stärke der Verbesserung oder Verschlechterung wird auf einer neutralen Skala von 0 bis 1 gemessen (siehe Wertefunktionen).

Wertefunktionen

Für die Umrechnung der Attributeinheiten auf die neutrale Skala von 0 bis 1 wird eine Wertefunktion benötigt. Sie beschreibt, wie wertvoll das Erreichen eines bestimmten Attributniveaus ist. Eine lineare Wertefunktion bedeutet, dass eine Verbesserung vom schlechtesten Niveau (z.B. 60 MWE pro Jahr; Wert = 0) auf ein mittleres Niveau (30 MWE pro Jahr, Wert = 0,5) genauso gut ist wie vom mittleren Niveau auf das beste Niveau (0 MWE pro Jahr, Wert = 1), nämlich genau 0,5 Werteeinheiten. Selbstverständlich können auch nicht lineare Zusammenhänge vorkommen. In den Interviews wurden für ausgewählte Ziele die Wertefunktionen erhoben.

Hygienisierung des Trinkwassers und ein proaktives Rehabilitationsmanagement ($\geq 1\%$ jährlicher Ersatz nach Leitungszustand) vorsehen. Gleichzeitig waren dies Alternativen mit einer hohen räumlichen und sektoriellen Kooperation.

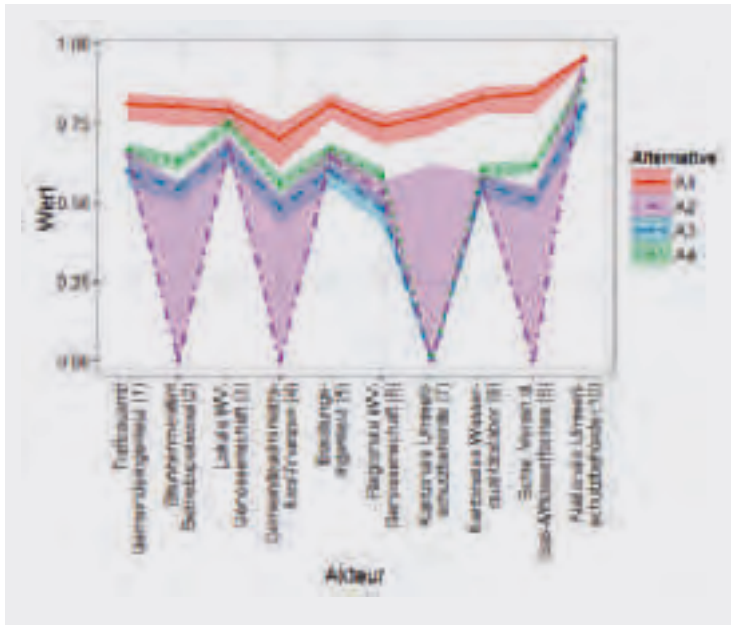


Fig. 5 Gesamtwerte der Alternativen (Trinkwasser) im Szenario Status quo der zehn Akteure. Die Linien verbinden die Mittelwerte (Median), die Schattierungen stellen die Unsicherheit des Wertes dar, die auf die Unsicherheit der Attributprognosen zurückzuführen ist. 0 = schlechtester Wert; 1 = bester Wert, d. h. alle Ziele werden vollständig erreicht

Valeurs totales des alternatives (eau potable) dans le scénario statu quo des dix acteurs. Les lignes relient les valeurs moyennes (médianes), les ombrages représentent l'incertitude de la valeur, qui peut être ramenée à l'incertitude des pronostics des attributs. 0 = valeur la plus mauvaise; 1 = meilleure valeur, à savoir que tous les objectifs ont été entièrement atteints

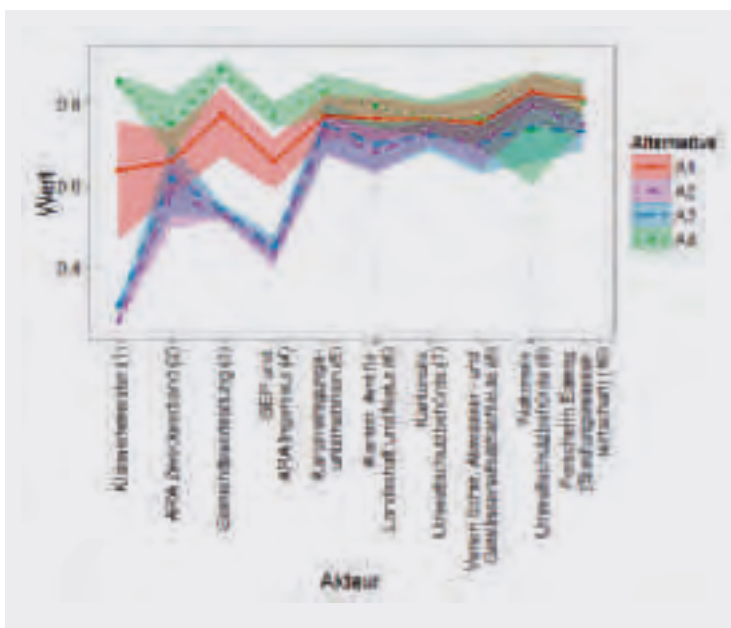


Fig. 6 Gesamtwerte der Alternativen (Abwasser) im Szenario Status quo der zehn Akteure. Erläuterung siehe Fig. 5

Valeurs totales des alternatives (eaux usées) dans le scénario statu quo des dix acteurs. Explication, voir fig. 5

Szenario Boom

Von den Zukunftsszenarien hatte das Szenario Boom den grössten Einfluss. Grund ist die massive Urbanisierung und Veränderung des Systems durch Neubauten, aber auch ein höherer Druck auf die lokalen Grundwasserressourcen (*gwhh*). Da das Ziel «hohe Ressourcenautonomie» eine vernachlässigbare Rolle spielte, könnte eine Übernutzung des Grundwassers durch regionale Vernetzung und Wasserimport vermindert werden, ohne dass negative Auswirkungen auf die Alternativenbewertung zu erwarten sind.

ABWASSERENTSORGUNG

Szenario Status quo

Die Resultate der MCDA für die Abwasserentsorgung sind in Fig. 6 dargestellt, wiederum für vier Alternativen A1-A4 (siehe Tab. 1). Beim Abwassersystem lassen sich bei den ermittelten Werten des Vertreters des Kanalreinigungsunternehmens (Nr. 5 in Fig. 6) sowie aller kantonalen und nationalen Akteure (Nr. 6 bis 10) kaum Unterschiede zwischen den vier Alternativen erkennen. Alle Alternativen schnitten mit Werten zwischen 0,7 und 0,9 gut bis sehr gut ab. Die lokalen Vertreter der ARA, des Zweckverbandes, der Verwaltung und des Gemeindeingenieurs (Nr. 1 bis 4) schätzten A4 (Gemischte Verantwortung, dezentral Hightech, hoher Aufwand; grüne Kurve in Fig. 6) eindeutig am besten ein (Werte zwischen 0,7 und 0,9), gefolgt von A1 (Interkommunale Anstalt, zentrale Entsorgung, mittlerer Aufwand; rote Kurve). Alternative A2 (Privates Vertragsunternehmen, zentrale Entsorgung, Minimalaufwand; violette Kurve) und A3 (Private Verantwortung, dezentral einfach, Minimalaufwand; blaue Kurve) erreichten niedrigere Werte (0,25-0,65) bei einer vergleichbar geringen Unsicherheit. Werden die Einschätzungen aller Akteure betrachtet, so schnitt Alternative A4 im Mittel am besten ab. Eine Ausnahme bildete hierbei die Einschätzung des Vertreters der nationalen Umweltschutzbehörde (Nr. 9), für den A4 im Mittel sogar die schlechteste Alternative war. Allerdings wies A4 grosse Unsicherheiten auf. Ohne Kenntnis der Risikoeinstellung ist daher eine klare Rangierung der Alternativen schwierig.

Die stark voneinander abweichenden Werte der lokalen Akteure lassen sich mit deren individuellen Präferenzen begründen. So gaben der Klärwerkmeister (Nr. 1) und der lokale Ingenieur (Nr. 4) dem Ziel «hohe Generationengerechtigkeit» ein besonders hohes Gewicht (Details in [6]). Je höher der Rehabilitationsaufwand (siehe die Attribute *rehab* und *failure* in Fig. 3) bei einer Alternative ausfiel und je höher die Flexibilität (*adapt*) war, desto besser schnitten die Alternativen ab. Anderen Akteuren, z. B. dem Vertreter des kantonalen Amtes für Landschaft und Natur (Nr. 6), waren hingegen die Ziele «guter chemischer Zustand der Gewässer» und «geringe Verunreinigung des Grundwassers» besonders wichtig. Da die Alternativen diesbezüglich jedoch sehr ähnlich abschnitten, gab es kaum Unterschiede in der Bewertung.

Szenario Boom

Wie bei den Trinkwasseralternativen hatte das Szenario Boom einen starken Einfluss auf die Rangierung (siehe [6]). So schnitt die zentrale Alternative A1 (die im Status quo gut abschnitt) im Szenario Boom ähnlich schlecht ab wie die Alternativen A2 (zentrale Entsorgung) und A3 (dezentrale Entsorgung). Das

lässt sich durch die der Alternative A1 zugrundeliegenden Rehabilitationsstrategie begründen. Die Bedingung für den Ersatz von Leitungen, nämlich dass 10% des Systems im schlechtesten Zustand sind (Tab. 1), wird bei einem massiven Ausbau der Infrastruktur erst über deutlich längere Zeiträume als die betrachteten 40 Jahre erreicht. Die detaillierte Analyse mit weiteren Alternativen ergab ähnliche Resultate.

Möglicherweise ein guter Kompromiss für alle Szenarien sind Alternative A4 (dezentral Hightech) oder auch Varianten des heutigen Systems, die hier nicht vorgestellt wurden (siehe [6]). Diese haben z. B. einen höheren Regenwasserrückhalt als heute oder weisen nur eine einzige Kläranlage auf, die zentral das Abwasser aus neun Gemeinden in der Region reinigt. Diese Varianten und A4 schnitten unter allen vier untersuchten Szenarien für die Akteure gut bis sehr gut ab. Zu erwähnen ist, dass eine hohe Zuverlässigkeit bezüglich der technischen Leistung der dezentralen Abwasseranlagen angenommen wurde. Ob dies in der Praxis so erreicht werden kann, ist nicht gesichert, doch sicherlich nicht unmöglich.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse, MCDA, kann die bestehende Planung mit GEP und GWP sinnvoll erweitern. Sie hilft, Schwächen in der derzeitigen Planung zu überwinden, erhöht die Transparenz und strukturiert den Planungs- und Entscheidungsprozess. Durch die Bewertung der Handlungsoptionen anhand derjenigen Ziele, die den Akteuren wichtig sind, wird eine partizipative und wertbasierte Planung erreicht. Unsicherheiten über die Prognosen oder Präferenzen können explizit mitberücksichtigt werden. Durch die Kombination mit der Szenarioanalyse ist es möglich, die Robustheit bestehender und alternativer Systeme unter unterschiedlichen zukünftigen Randbedingungen abzuschätzen. Im vorliegenden Artikel werden die Resultate einer MCDA, die im Rahmen einer Fallstudie durchgeführt wurde, für je vier Handlungsoptionen für die Wasserver- und Abwasserentsorgung vorgestellt. Die ausgewählten Alternativen sind nicht als Handlungsempfehlungen

zu verstehen, sondern sollen vielmehr die mögliche Spannbreite der Handlungswege aufzeigen. An den Ergebnisse lässt sich erkennen, dass trotz individueller Unterschiede bei den Präferenzen nur wenig Konfliktpotenzial vorhanden war. Die wichtigsten Ziele waren eine «gute Wasserver- und Abwasserentsorgung», ein «hoher Ressourcen- und Gewässer- bzw. Grundwasserschutz» und eine «hohe Generationengerechtigkeit». Die «soziale Akzeptanz» und «niedrige Kosten» waren in der Fallstudie im Vergleich dazu eher unwichtig.

Die MCDA-Resultate verdeutlichen ausserdem, dass ein klarer Zusammenhang zwischen dem Rehabilitationsmanagement und der Rangierung der Alternativen bestand. Insgesamt schnitten Alternativen mit einem soliden Rehabilitationsmanagement deutlich besser ab als solche mit einem rein reaktiven Vorgehen (reparieren, wenn etwas kaputt ist). Diese Alternativen waren auch in der Regel diejenigen mit einer höheren räumlichen und sektorübergreifenden Kooperation, als dies heute im Fallstudiengebiet der Fall ist. Erstaunlich ist, dass die technischen Unterschiede nur einen geringen Einfluss auf die Rangierung hatten. Die derzeit verwendeten zentralen Systeme schnitten insgesamt gut ab, sofern das Rehabilitationsmanagement vernünftig ist. Doch auch teildezentralisierte oder völlig dezentrale Ansätze (letztere vor allem beim Abwasser) rangierten recht weit oben.

Der nächste Schritt ist die Diskussion der Ergebnisse mit den Akteuren, beispielsweise darüber, ob die Akteure mit der Leistungsprognose und Rangierung einverstanden sind oder zusätzliche Aspekte berücksichtigt werden sollten. Anhand der nun vorhandenen Prognosen und Kenntnis über die Präferenzen wäre es auch möglich, neue Alternativen zu definieren, welche die Ziele noch besser erreichen (d.h. einen höheren Gesamtwert erhalten). Dies ist eine der Stärken der hier verwendeten wertebasierten MCDA. In dieser wissenschaftlichen Fallstudie sind die Resultate rein informativer Natur. Sie zeigen aber, welche wichtigen Einsichten durch eine MCDA-unterstützte Planung zu erreichen sind. Die Ergebnisse sind selbstverständlich fallstudien-spezifisch und können nicht verallgemeinert wer-

den. Um generalisierbare Empfehlungen ableiten zu können, sind Anwendungen in weiteren Fallstudien nötig. Falls Sie ein Anwendungspotenzial sehen, melden Sie sich doch bei uns.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Arnbjerg-Nielsen, K.; Arnbjerg-Nielsen F.H.S. (2009): Feasible adaptation strategies for increased risk of flooding in cities due to climate change. *Water Science and Technology* 60(2): 273–281
- [2] Butler, J. et al. (2007): Sewer storage tank performance under climate change. *Water Science and Technology* 56(12): 29–35
- [3] Lienert, J. et al. (2014): Structured decision-making for sustainable water infrastructure planning and four future scenarios. Submitted to *EJDP*
- [4] 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
- [5] Scholten, L. et al. (2014): Tackling uncertainty in multi-criteria decision analysis – An application to water supply infrastructure planning. Submitted
- [6] Zheng, J.; Egger, C.; Lienert, J. (2014): Incorporating stakeholders' preferences in wastewater infrastructure planning in Switzerland (working title). In preparation

DANKSAGUNG

Das Projekt SWIP wurde vom Schweizer Nationalfonds Projektnr. 406140-125901 gefördert. Ohne die engagierte Teilnahme vieler lokaler, kantonaler und nationaler Akteure und Experten wäre SWIP nicht möglich gewesen. Wir danken Ihnen herzlich für Ihre Unterstützung! Zusätzlich danken wir *Max Maurer* für die ausgezeichnete Zusammenarbeit im Projekt und Anmerkungen zu früheren Versionen dieses Artikels.

> SUITE DU RÉSUMÉ

conflits d'intérêts. Malgré des intérêts divergents, le potentiel de conflits était plutôt faible, et des solutions de compromis ont pu être identifiées. La méthodologie et les résultats sont présentés ici à titre d'exemple.