

Schwachstellenanalyse bei Mischwasseranlagen für eine sichere Bewirtschaftung

1. Zusammenfassung/Summary

In dieser Arbeit wird die Schwachstellenanalyse basierend auf der örtlichen Sensitivitätsanalyse im Rahmen des „Achilles-Ansatzes“ für eine sichere Bewirtschaftung von Mischwasseranlagen präsentiert. Es wird eine Auswahl von im „Achilles-Ansatz“ entwickelten Themenkarten für Mischsysteme (Haltungseinsturz, Entlastungsausfall, Pumpwerksausfall) vorgestellt und deren Anwendung mit den drei Fallstudien Götzis, Hall in Tirol und Innsbruck demonstriert. Dabei wird aufgezeigt, wie die erstellten Themenkarten für die Planung von Präventivmaßnahmen gegen Störfälle verwendet werden können. Zusätzlich wird gezeigt wie eine kausal abhängige Verkettung von Haltungs- und Pumpwerksausfällen (Kaskadenausfall) systematisch untersucht werden kann, und somit das effiziente Planen von Präventivmaßnahmen wie redundante Pumpwerke oder die Installation von Notstromaggregaten unterstützt werden kann. Als „positive“ Interpretationsmöglichkeit der Sensitivitätskarten wird die Kapazitätenkarte vorgestellt, mit der die effektivsten Positionen für neu errichtete Mischwasserrückhaltebecken identifiziert werden können. Diese Themenkarte unterstützt den Planungsprozess und gewährleistet einen effizienten Ressourceneinsatz.

Vulnerability analysis for combined sewer systems to ensure reliable operation

Summary: This article describes a vulnerability assessment based on the spatial sensitivity analysis, as part of the „Achilles Approach“ for reliable operation of combined sewer systems. A selection of thematic maps for combined sewer systems (sewer collapse, failure of combined sewer overflows or pump failure) is presented and their application demonstrated using three case studies - Götzis, Hall in Tyrol

and Innsbruck. It is shown how these thematic maps can be used for planning proactive actions. It is also demonstrated how causal linking of failure of combined sewer overflows and pump station (cascading failure) can be investigated systematically to support an efficient planning of preventive measures such as redundant pumps stations or installation of an emergency power supply. In addition, a capacity map identifying the most effective sites for new storage volumes is presented as „positive“ interpretation of such a sensitivity map. This thematic map supports the planning process and ensures the efficient use of resources.

2. Einleitung

Aufgaben der Siedlungsentwässerung ist es, den Menschen vor der Natur zu schützen sowie auch die Natur vor negativen anthropogenen Einflüssen zu bewahren (Rauch et al., 2010). Dabei spielt die Leistungsfähigkeit der Entwässerungsnetze eine besondere Rolle. Beim Ausfall von Komponenten oder anderen Systemveränderungen der Mischwasseranlage kann die Entwässerungsleistung beeinträchtigt werden. Für einen sicheren und stabilen Betrieb auch in kritischen Situationen, ist die Kenntnis von Schwachstellen beziehungsweise von maßgebenden Komponenten für die Leistungsfähigkeit des Systems wichtig (Fritsch, 2010). Zur Untersuchung von möglichen Ausfallszenarien sind numerische Modelle besonders geeignet. Mit modelltechnischen Untersuchungen können die Auswirkungen von unterschiedlichen Ausfallszenarien untersucht und verglichen, sowie - darauf aufbauend - entsprechende Gegenmaßnahmen geplant werden.

Zur systematischen modelltechnischen Untersuchung von Entwässerungs- sowie auch Wasserversorgungssystemen wurde im Rahmen des „Achilles-Ansatz“ die örtliche Sensitivitätsanalyse entwickelt (Möderl et al., 2010). In diesem Manuskript wird eine Auswahl von im „Achilles-Ansatz“ entwickelten Themenkarten für Mischsysteme (Haltungseinsturz, Entlas-

tungsausfall, Pumpwerksausfall, Kapazitäten) vorgestellt. Anschließend wird mit den drei Fallstudien Götzis, Hall in Tirol und Innsbruck aufgezeigt, wie diese Auswertungen und Themenkarten interpretiert werden können. Weiters wird dargestellt wie auf Basis dieser Methodik Präventivmaßnahmen, wie einerseits Durchführung von Baumaßnahmen bei Systemschwachstellen und andererseits Errichtung von Schutzbauwerken für gefährdete Bauteile, getroffen werden können. Beispielsweise kann damit ein optimales Risikomanagement in Form eines Entwässerungssicherheitsplanes durchgeführt werden (Möderl et al., 2011).

3. Methoden

3.1. Systematische Schwachstellenanalyse

Bei dem „Achilles-Ansatz“ für Mischwassersysteme wird eine örtliche Sensitivitätsanalyse basierend auf Modellrechnungen mit der frei verfügbaren hydrodynamischen Modellierungssoftware SWMM5 (Storm Water Management Model, Rossman, 2004) verwendet. Bei der örtlichen Sensitivitätsanalyse wird sequentiell an jeder Komponente des Infrastrukturmodells eine Veränderung (Parametervariation) vorgenommen und das Ergebnis (Sensitivität einer Bewertungsfunktion) örtlich an der betreffenden Komponente in einem GIS (Geographisches Informationssystem) referenziert. Variablen sind dabei die Eingangsparameter, welche die Variation spezifizieren, die Variation selbst, und die Systembewertungsfunktion. In *Abbildung 1* ist diese Vorgehensweise zur Erstellung einer Sensitivitätskarte (je nach Interpretation auch Schwachstellenkarte) zusammengefasst. Als erster Arbeitsschritt wird eine Modifikation (d. h. Parametervariation) einer Komponente definiert (*Arbeitsschritt 1* Komponentenmodifikation). Beispielsweise kann dies der Einsturz einer Haltung sein (Durchmesser wird im Modell auf null gesetzt). In einem zweiten Schritt wird die Auswirkung dieser Modifikation auf das Gesamtsystem mit Hilfe einer Modellrechnung bewertet (Bewertungsfunktion z. B. hinsichtlich Überflutung). Ein

¹ Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik, Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck

² hydro-IT GmbH, Technikerstraße 21a, 6020 Innsbruck

³ Ingenieurbüro Passer & Partner Ziviltechniker GmbH, Andechstraße 65, 6020 Innsbruck

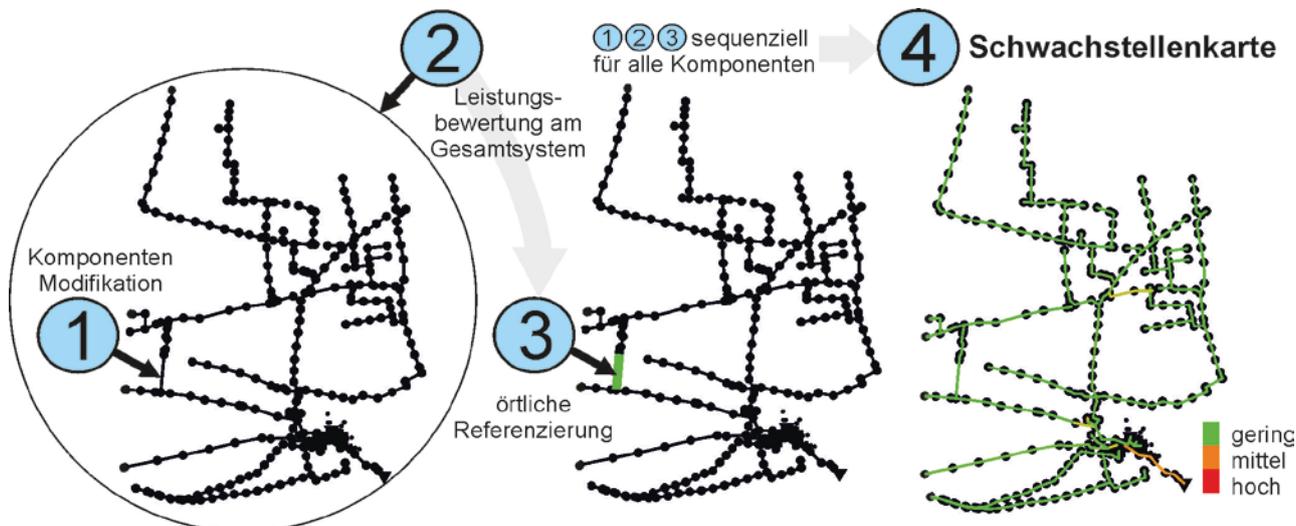


Abb. 1: Vorgehensweise „Achilles Ansatz“

normierter Wert wird in einem dritten Schritt an die Stelle der Komponentenmodifikation örtlich referenziert und mithilfe eines GIS je nach quantitativer Auswirkung symbolisiert. Daher spiegelt die beispielhafte örtliche Referenzierung in *Arbeits-schritt 3* das Ergebnis einer Modellrechnung am Gesamtsystem wider. Eine grüne Visualisierung entspricht einer geringen Auswirkung auf das Gesamtsystem.

Ein sequenzielles Anwenden von den *Arbeitsschritten 1 bis 3* auf alle Systemkomponenten, resultiert in einer Sensitivitäts- bzw. Schwachstellenkarte (*Arbeits-schritt 4*), bei dem die Visualisierung jedes einzelnen Elementes, einem Simulationslauf entspricht. Je nach Wahl der Komponentenmodifikation, können die erstellten Sensitivitätskarten unterschiedlich interpretiert werden. Nachfolgend wird eine Auswahl von unterschiedlichen Themenkarten vorgestellt.

3.2. Themenkarten (Sensitivitätskarten)

Die örtliche Sensitivitätsanalyse wird für Entwässerungssysteme (Mair et al., im Druck) und Wasserversorgungssysteme (Möderl et al., 2011) verwendet, kann aber grundsätzlich auf alle Netzwerkstrukturen (Gas, Fernwärme, Elektrizität, etc.) angewandt werden. In diesem Beitrag wird eine Auswahl von implementierten Themenkarten für Mischwassersysteme im „Achilles-Ansatz“ vorgestellt und deren Anwendung aufgezeigt. Es werden Themenkarten für die Aspekte Haltungseinsturz, Entlastungs- und Pumpwerksausfall und Kapazitäten vorgestellt. Der Vollständigkeit halber seien die im „Achilles-An-

satz“ integrierten, aber in diesem Manuskript nicht diskutierten, Themenkarten zur Schmutzwasserzunahme (mögliche Siedlungserweiterungen), Flächenzunahme (Landnutzungsveränderungen und Flächenanschluss), Sensorstandorte (aussagekräftige Positionen für Messungen), Kalibrierungshilfe (Lokalisation sensitive Bereiche für Parametervariationen) und Unsicherheitserfassung (Identifizierung von Komponenten bei denen besonderer Wert auf die Datengüte gelegt werden sollte) erwähnt.

3.2.1. Haltungseinsturz

Haltungen können z. B. durch unzulässige Baumaßnahmen Dritter oder Explosionen einstürzen oder alterungsbedingt strukturell versagen. Eine vollständige Verlegung des Querschnitts durch Stoffanreicherungen im Kanal ist einem Haltungseinsturz gleichzusetzen. Die Auswirkungen durch eine solche Abflussunterbrechung auf Überstau und Weiterleitung werden mit der Haltungseinsturzkarte bewertet. Modelliert wird diese Themenkarte, indem der Querschnitt einer Haltung auf null gesetzt wird. Das heißt, es wird angenommen, dass das Deckmaterial die offenen Bereiche der eingestürzten Haltung vollkommen verschließt. Symbolisiert wird diese Themenkarte mit der Bewertung des resultierenden Überstaus (siehe auch 3.3).

3.2.2. Entlastungsausfall

Durch vom Vorfluter verursachte Hochwasserlagen kann die Entlastungseffizienz der Mischwasseranlage verschlechtert

werden, weil durch Einstau der Abfluss des Mischwassers an den Entlastungsbauwerken verhindert wird. Das Hochwasser im Fluss verursacht demzufolge eine - durch den Kanal verursachte - indirekte Überflutung. In der Praxis werden in einer solchen Einstaulage die Sperrorgane bei den Entlastungen geschlossen, sodass kein Flusswasser eintritt. Damit kann jedoch aber auch kein Mischwasser entlastet werden. In manchen Fällen sind deshalb Hochwasserpumpwerke bei den Entlastungsbauwerken angebracht, welche trotz Einstaus eine Entlastung ermöglichen. Um diese Hochwasserpumpwerke strategisch zu positionieren, wird die Entlastungsausfallkarte erstellt. Mit Hilfe der Entlastungsausfallkarte wird festgestellt, welche Entlastungsbauwerke bei Einstau das höchste Überflutungsmaß bewirken. Modelliert wird diese Themenkarte, indem bei jeder Entlastung jeweils die Kapazität des Querschnittes infinitesimal klein gesetzt wird. Symbolisiert wird diese Themenkarte mit der Bewertung für den Überstau (siehe auch 3.3).

3.2.3. Pumpwerksausfall

Durch Stromausfälle oder andere Ursachen kann die Funktionsfähigkeit von Pumpen beeinträchtigt werden. Welche Pumpwerke nicht nur redundant ausgeführt, sondern auch im besonderen Ausmaß überprüft und gewartet werden sollen, zeigt die Pumpwerkkarte. Jene Pumpwerke, welche bei Ausfall ein (relativ gesehen) besonders hohes Überstauvolumen verursachen, werden durch Ausfallsimulationen identifiziert. Modelliert wird

dieser Ausfall durch eine Pumpkennlinie mit infinitesimal kleiner Leistung. Symbolisiert wird diese Themenkarte mit der Bewertung für den Überstau (siehe auch 3.3).

3.2.4. Kapazitäten

Kapazitäten bezeichnen in diesen Zusammenhang Speichervolumen im System (sowohl Becken als auch Kanalspeichervolumen). Bei der Karte für Kapazitäten, die planerisch zur Systemoptimierung eingesetzt wird, werden die Durchmesser jeder Leitung erhöht und sequentiell die Auswertung zusätzlicher Becken im Modell an jedem Knoten bewertet. Diese Karte zeigt wo zusätzliche Kapazität am effizientesten wirkt. Symbolisiert wird diese Karte mit der Bewertung für den Wirkungsgrad der Weiterleitung (siehe auch 3.3).

3.2.5. Kaskadenausfall

Ein Hochwasserereignis kann nicht nur einen Hochwasserstand im Fluss verursachen, sondern auch einen Kurzschluss in der Energieversorgung. Damit kommt es zu einem gleichzeitigen Ausfall der Entlastung (Einstau) und des Hochwasserpumpwerks (Kurzschluss). Dies ist ein Beispiel eines Kaskadenausfalls. Modelliert wird diese Karte gleich wie die Karte für den Entlastungsausfall, nur wird zusätzlich auch ein Hochwasserpumpwerk deaktiviert. Symbolisiert wird diese Themenkarte mit der Bewertung für den Überstau. Diese Karte stellt die Notwendigkeit der effizienten Wartung der Hochwasserpumpwerke dar und der Sicherung der Einsatzfähigkeit im Notfall. Eine detaillierte Beschreibung zu Kaskadenausfällen kann in Sitzenfrey et al., (2011) nachgeschlagen werden.

3.3. Bewertung der Systemleistungsfähigkeit

Ziel der Bewertungsfunktionen, die auf Basis von hydraulischer oder qualitativer Simulationen berechnet werden können, ist die Erfassung der Änderung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bei äußeren und inneren Einwirkungen. Dadurch wird das Potential einer Gefährdung des Systems und der damit verbundenen Verletzlichkeit messbar gemacht.

Einerseits ist es mit den Bewertungsfunktionen möglich, eine Prioritätenliste für Präventivmaßnahmen anhand objektiver Maßstäbe zu erstellen, andererseits können Schwachstellen im Untersuchungsgebiet anhand der den Bewertungs-

funktionen zugeordneten Farbskalen visualisiert werden. Die im Folgenden definierten Bewertungsfunktionen basieren auf einschlägigen Regelwerken und messen die Einhaltung des Stands der Technik. Sie stellen ein Bindeglied zwischen den rechtlichen und technischen Anforderungen dar. Die im Folgenden definierten Bewertungsfunktionen für Entwässerungsanlagen im Mischsystem quantifizieren die Überflutungsgefährdung und die Emissionsbelastung unter Berücksichtigung der Entwässerungssicherheit.

Als Niederschlag wird ein Euler Typ II Modellregen (ÖWAV RB 11, 2009) mit einer Jährlichkeit von 5 verwendet. Da der Trockenwetteranteil der superponierten Abflüsse sehr gering ist, wird ein konstanter Trockenwetteranfall angesetzt. Als Berechnungssoftware wird SWMM5 (Rossman, 2004) mit einer „dynamischen Welle“ als Transportmodell verwendet.

3.3.1. Überflutung

Die hydraulische Leistungsfähigkeit des Entwässerungsnetzes bezüglich des Schutzes vor Überflutung (ÖNORMEN 752, 2008, ÖWAV RB 11, 2009, DWA A 118, 2006) lässt sich durch Einstau-, Überstau- und Überflutungszustände bei Niederschlagsereignissen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten beschreiben. Einstau tritt auf, wenn das unter Freispiegelabfluss mögliche Fassungsvermögen einer Haltung am oberen oder unteren Schacht erreicht wird. Überstau tritt auf, wenn Abwasser aus den Schächten austritt und an die Oberfläche gelangt. Überflutung bedeutet entsprechend den österreichischen Regelwerken, dass bei Überstau Schaden entsteht.

Mit *Formel 1* wird die Summe über alle Knoten (N) des überstauten Volumens (V_0) ausgewertet. Tritt kein Überstauvolu-

men an einem Schacht auf, so wird dies mit 1 bewertet. Tritt ein höheres Überstauvolumen als der definierte Maximalwert $V_{0,max}$ auf, wird dies mit 0 bewertet. Dazwischen wird linear interpoliert.

$$\text{Überstau} = \frac{\sum_{n=1}^N \begin{cases} \max(V_0) = 0 : 1 \\ 0 < \max(V_0) < V_{0,max} : 1 - \frac{\max(V_0)}{V_{0,max}} \\ \max(V_0) > V_{0,max} : 0 \end{cases}}{N}$$

In dieser Arbeit wird ein Maximalwert für das tolerierbare Überstauvolumen an einem Knoten von 1.000 m³ verwendet. Beispielsweise würde ein Überstauvolumen an jedem dritten Knoten von 500 m³ zu einer Überstaubewertung des Gesamtsystems von 0,83 resultieren ($(1/N \cdot (N/3 \cdot 500 / 1000 + 2N/3 \cdot 1) = 0,83)$).

3.3.2. Emissionen

Für die Bewertung des Gewässerschutzes, der durch die Leistungsfähigkeit der Mischkanalisation erzielt wird, wurde eine weitere Bewertungsfunktion (*Formel 2*) verwendet, welche auf der Definition des Wirkungsgrades der Weiterleitung nach ÖWAV-RB 19, (2007) basiert. Es wird jedoch keine Langzeitsimulation verwendet, sondern ein Modellregen vom Typ Euler II. Daher wird quasi ein Ereigniswirkungsgrad berechnet. Dabei wird das Entlastungsvolumen (V_E) durch das Niederschlagsabflussvolumen (V_{RW}) dividiert.

$$\text{hydraulischer Wirkungsgrad} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N V_{E,i}}{V_{RW}}$$

Diese Bewertung gibt also an, welcher Anteil des Niederschlagsabflussvolumens zur Kläranlage weitergeleitet wird.

TABELLE 1
Auswahl von Themenkarten

Themenkarte	untersuchte Auswirkung	Bewertung	Interpretation
Haltungseinsturz	Haltungsquerschnitt Querschnittfläche auf 0	Überflutung	Identifizieren der systemrelevantesten Haltungen
Entlastungsausfall	Entlastungsquerschnitt Querschnittfläche auf 0	Überflutung	Identifizieren der systemrelevantesten Entlastungen
Pumpwerksausfall	Deaktivierung Pumpe	Überflutung	Identifizieren der systemrelevantesten Pumpen
Kapazitäten	Haltungsquerschnitt mal Faktor 2; zusätzliches Beckenvolumen 2000 m ³	Weiterleitung	Identifizieren der effektivsten Vergrößerungen von Haltungsquerschnitten; effektivste Beckenstandorte

In *Tabelle 1* werden die hier vorgestellten Themenkarten mit Ihren Eigenschaften und Anwendungsfälle zusammengefasst.

3.4. Fallstudien

Für die drei nachfolgenden Fallstudien wurde jeweils ein SWMM5 Modell der Entwässerungsanlage für die weiteren Untersuchungen verwendet.

3.4.1. Götzis

Das Gemeindegebiet von Götzis wird zu ca. 80% im Mischsystem und zu ca. 20% im Trennsystem entwässert. Sämtliche Abwässer werden der Verbandskläranlage der Region Hohenems zugeführt. Die jährliche Abgabe von Schmutzwasser (inkl. Regenwasser) an die Abwasserreinigungsanlage Hohenems beträgt dabei ca. 1.400.000 m³.

Das Leitungsnetz (hydraulisches Modell siehe *Abbildung 2*) hat eine Länge von ca. 70 km in den Dimensionen zwischen DN 200 und DN 1800 und verfügt über ca. 2.000 Schächte. In den topographisch tiefer liegenden Ortsteilen werden für die Weiterleitung der Schmutzwässer insgesamt 6 Pumpwerke eingesetzt. Die Mischwasserbehandlung erfolgt über 4 Regenentlastungsbauwerke sowie 2 Regenrückhaltebecken.

3.4.2. Hall in Tirol

Die modellierte Entwässerungsanlage der Gemeinde Hall in Tirol ist insgesamt 40 km lang und beinhaltet ca. 1.200 Schächte und Haltungen. Im Modell werden insgesamt 8 Mischwasserentlastungen bzw. Notüberläufe aufgenommen. Eine Entlastung ist mit einem Fangbecken im Nebenschluss ausgestattet, die übrigen Entlastungen führen direkt zum jeweiligen Vorfluter. Das Entwässerungssystem verfügt über 10 Pumpstationen. Das hydraulische Modell ist in *Abbildung 3* dargestellt.

3.4.3. Innsbruck

Die Kanalisation in Innsbruck erschließt nahezu das gesamte besiedelte Gebiet, der Anschlussgrad liegt bei etwa 100%. Die Innsbrucker Kanalisation wird zum überwiegenden Teil als „qualifiziertes Mischsystem“ geführt. Das Einzugsgebiet der Kläranlage reicht weit über die Stadtgrenze hinaus und umfasst das Gemeindegebiet von 14 Nachbargemeinden. Das Entwässerungssystem umfasst ca. 250 km



Abb. 2: Fallstudie Götzis

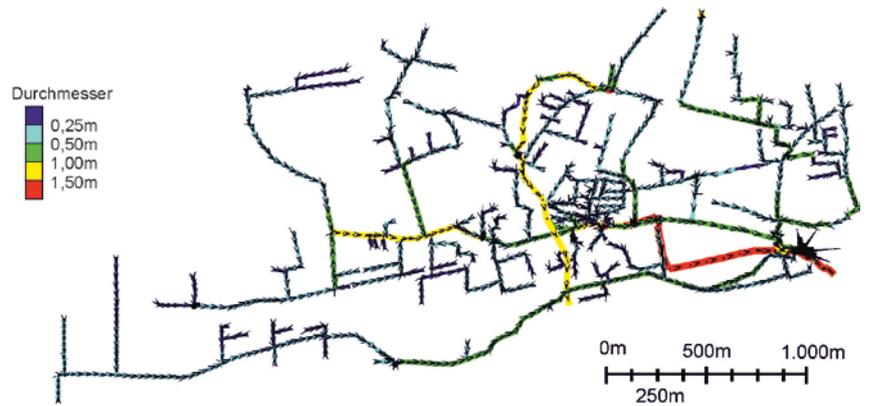


Abb. 3: Fallstudie Hall in Tirol

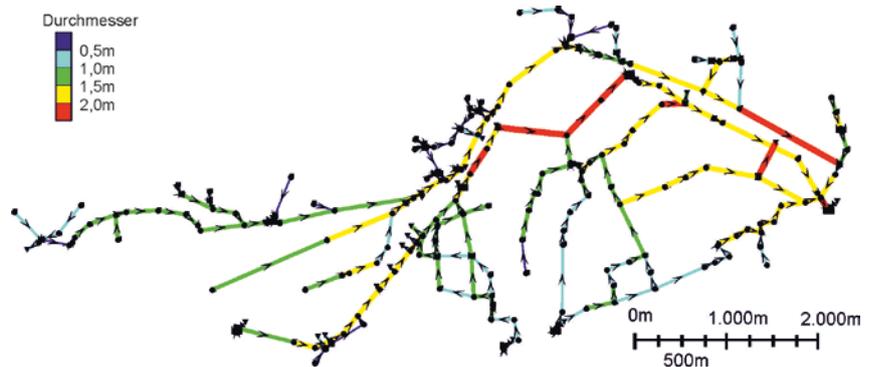


Abb. 4: Fallstudie Innsbruck

Sammelkanäle, 46 Mischwasserentlastungen, 7 Pumpwerke und 2 Regenüberlaufbecken. Insgesamt wird in der Abwasserreinigungsanlage eine Abwassermenge von rund 19 Mio. m³ pro Jahr gereinigt. In *Abbildung 4* ist das verwendete Grobnetz von Innsbruck dargestellt.

4. Ergebnisse und Diskussion

Bei den nachfolgenden Themenkarten spiegelt die farbliche Darstellung die

Sensitivität der unterschiedlichen Komponenten auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wider. Dabei bedeutet eine rote Symbolisierung einer Komponente, dass diese im Vergleich zu anderen z. B. grün symbolisierten Komponenten im System eine wichtigere (systemrelevantere) Rolle einnimmt und daher mehr zur Gesamtsystemleitung beiträgt. Hervorzuheben ist dabei, dass es sich nicht um Schwachstellen per se handelt, sondern dass die Symbolisierung den Ver-



Abb. 5: Haltungseinsturzkarte Hall in Tirol

gleich zu anderen Komponenten ausdrückt. Quasi ergibt das eine Priorisierung der Komponenten entsprechend ihrer Relevanz hinsichtlich der Parametervariation im Zusammenhang mit der Systemleistung.

4.1. Haltungseinsturz: Anwendungsbeispiel Hall in Tirol

Weist das Abwassersystem eine ideale Baumstruktur auf (keine Vermaschung), so kann die Systemrelevanz von Komponente direkt über die topologische Lage im Netzwerk bestimmt werden. Dabei korrespondiert die Relevanz auch mit den Durchflussverhältnissen und somit auch den Durchmessern der Haltungen. Bei dieser Entwässerungsanlage handelt es sich um ein nicht so stark verästeltes Netz. Bei der Einsturzkarte weichen daher die Ergebnisse nur teilweise von den vorherrschenden Durchflussverhältnissen ab.

Im unmittelbaren Bereich zur Einleitung in den Verbandskanal (Abbildung 5, schwarz markierter Bereich) weisen die Haltungen im Vergleich zum Rest des Systems große Durchflüsse auf (siehe Durchmesser Abbildung 3). Durch die Redundanz der Leitungen in diesem Bereich (Vermaschung), wirkt sich ein Einsturz einer Haltung in diesem Bereich durch die mögliche hydraulische Umlagerung im System nur gering auf den untersuchten Überstau aus. Als kritische Komponenten wurden die Haltungen im Zufluss der Mischwasserentlastungen identifiziert, da ein Einsturz dieser Komponenten (Abbildung 5, blau markiert) zu einem Rückstau



Abb. 6: Kapazitätenkarte Götzis

im System führt, da das Abwasser nicht mehr entlastet werden kann sondern überstaut. Als Präventivmaßnahme sollte einer regelmäßigen Überprüfung dieser Komponenten auf potenzielle Verkläuserung oder Schaden im baulichen Zustand besondere Beachtung zukommen.

4.2. Kapazitäten: Anwendungsbeispiel Götzis

In der Kapazitätenkarte wurden zwei Parametervariationen visualisiert. Die Haltungen wurden entsprechend der Auswirkung einer Durchmessererhöhung

symbolisiert. Die Schächte wurden entsprechend der Wirksamkeit eines dort angeordneten Mischwasserbeckens mit einem Volumen von 2.000 m³ symbolisiert. Dabei entspricht für beide Parametervariationen grün einer positiven Auswirkung und rot keiner oder einer sogar negativen Auswirkung auf den Wirkungsgrad der Weiterleitung.

Für die beiden schwarz markierten Bereiche (Abbildung 6) wurden effiziente Standorte für Mischwasserrückhaltebecken identifiziert. Diese identifizierten Standorte decken sich auch mit den Ergebnissen einer zuvor durchgeführten

„manuellen“ Standortbestimmung für mögliche Mischwasserrückhaltebecken. Zusätzlich wurden mit dieser Themenkarte im Vergleich zur konventionellen manuellen Standortbestimmung noch weitere effiziente Standorte identifiziert (grau markierte Bereiche). Soll der Wirkungsgrad der Weiterleitung durch zusätzliches Speichervolumen verbessert werden, kann mit dieser Karte, wie oben erwähnt, der effizienteste Standort gefunden werden.

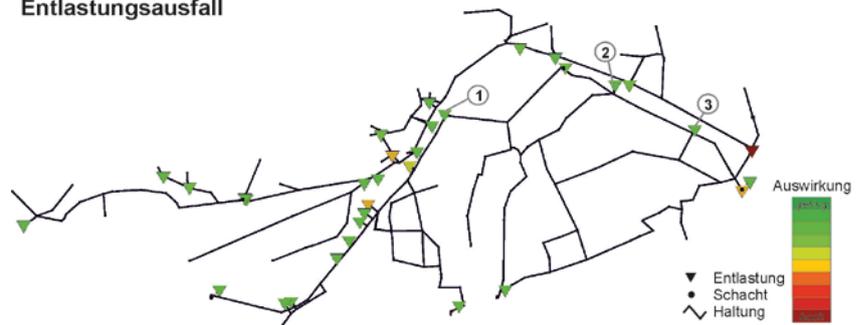
Für die Haltungskapazitäten wurden keine Engpässe im Sinne einer unerwünschten „Drosselwirkung“ aufgrund zu geringer Haltungsdurchmesser identifiziert. Die Positionen der Haltungen mit günstigen Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der Weiterleitung decken sich in etwa mit den identifizierten günstigen Positionen für Mischwasserrückhaltebecken. Daher wirken an den identifizierten Positionen Durchmessererhöhungen quasi als Stauraumkanäle welche durch das zusätzliche Speichervolumen eine günstige Auswirkung auf den Wirkungsgrad der Weiterleitung aufweisen. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Analyse der Auswirkung von Kapazitäten auf Überstau ein entgegengesetztes Bild liefert.

4.3. Ausfall Entlastung und Pumpwerksausfall Anwendungsbeispiel Innsbruck

Um die Kaskadenkarten für Entlastungs- und Pumpwerksausfall zu demonstrieren, wird diese im Vergleich mit der Entlastungskarte diskutiert. Die in *Abbildung 7* eingezeichneten Dreiecke markieren Entlastungsbauwerke im untersuchten System. Visualisiert wird die Bewertung für Überflutung. Die in *Abbildung 7* oben nicht als grün visualisierten Entlastungsbauwerke wurden – im Vergleich zu den restlichen Bauwerken – hinsichtlich Überflutung als relevante Bauwerke identifiziert.

Bei den zusätzlich mit den Ziffern 1, 2 und 3 markierten Positionen sind Hochwasserpumpwerke installiert. In der Entlastungsausfallkarte (*Abbildung 7 oben*) sind die Entlastungen bei Hochwasserpumpwerken mit geringer Auswirkung eingestuft. Im Modell wird ein Ausfall der Entlastung durch die Hochwasserpumpwerke kompensiert. Beim Betrachten eines Kaskadenausfalls der Hochwasserpumpwerke zusammen mit den Entlastungsbauwerken (*Abbildung 7 unten*) wird ersichtlich dass es sich - zumindest bei den Standorten 2 und 3 - sehr wohl um kritische Standorte handelt. Demzufolge

Entlastungsausfall



Kaskadenausfall Entlastungsausfall + Pumpwerksausfall

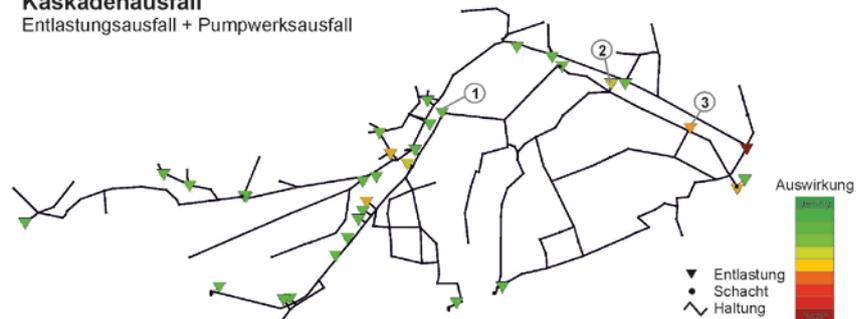


Abb. 7: Entlastungsausfall und Kaskadenausfall Innsbruck

sollten für diese Hochwasserpumpwerke ein störungsfreier Betrieb auch in kritischen Situationen (z. B. Hochwasser und Stromausfall) gewährleistet werden. Dies könnte durch Installieren von Notstromaggregaten an den Positionen 2 und 3 erreicht werden.

5. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde gezeigt, wie die örtliche Sensitivitätsanalyse im Rahmen des „Achilles-Ansatzes“ in Hinblick auf eine sichere Mischwasserbewirtschaftung angewendet werden kann. Es wurde eine Auswahl von im „Achilles-Ansatz“ entwickelten Themenkarten für Mischwasseranlagen (Haltungseinsturz, Entlastungsausfall, Pumpwerksausfall, Kapazitäten) vorgestellt und deren Anwendung mit den drei Fallstudien Götzis, Hall in Tirol und Innsbruck demonstriert. Mit der Haltungseinsturzkarte wurde demonstriert, welche Haltungen im Vergleich eine besondere Systemrelevanz aufweisen und daher hinsichtlich Präventivmaßnahmen wie z. B. Überprüfung, Wartung und Erneuerung vorrangig betrachtet werden sollten.

Als „positive“ Interpretationsmöglichkeit der örtlichen Sensitivitätsanalyse wurde die Kapazitätenkarte vorgestellt. Mit diesem Ansatz kann eine Karte mit den effektivsten Positionen für Mischwas-

serrückhaltebecken erstellt werden. Die Ergebnisse dieser Themenkarte decken sich auch mit den Ergebnissen einer konventionell manuell durchgeführten Standortbestimmung und beinhalten darüber hinaus noch weitere, manuell nicht identifizierte, effiziente Standorte.

Als Schwachstellenkarte wurde die Entlastungsausfallkarte vorgestellt. Damit konnten die Entlastungsbauwerke hinsichtlich der Auswirkungen eines möglichen Ausfalls priorisiert werden. Das heißt, dass eine Störung dieser priorisierten Entlastungen im Vergleich zur Störung anderer Entlastungen im System zu größeren Überstauereignissen im Gesamtsystem führt. Zusätzlich wurde noch die Kombination von Entlastungsausfällen mit Pumpwerksausfällen in Form einer Kaskadenkarte diskutiert. Das untersuchte gleichzeitige Versagen dieser zwei Komponenten kann beispielsweise durch ein Hochwasserereignis (Einstau und somit Ausfall Entlastung) mit einem gleichzeitig auftretenden Stromausfall oder Kurzschluss (z. B. durch Blitzschlag kommt es zum Ausfall der Stromversorgung und damit zum Ausfall des Hochwasserpumpwerks) verursacht werden. Es wurden damit die kritischsten Stellen im Anwendungsbeispiel identifiziert bei denen, beispielsweise durch redundante Pumpwerke, oder ein Notstromaggregat die optimale Leistungssteigerung hin-

sichtlich Überstau in Störfällen erreicht werden kann.

Die im „Achilles-Ansatz“ entwickelte Methodik einer örtlich verteilten Sensitivitätsanalyse kann in Form von unterschiedlichen Themenkarten angewendet werden. Die Methodik ist beliebig auf andere systematische Parametervariationen erweiterbar und kann in vielerlei Hinsicht interpretiert und angewendet werden. Die erstellten Themenkarten unterstützen nicht nur einen sicheren Betrieb im Störfall, sondern können auch für eine effiziente Mischwasserbewirtschaftung im Regelfall herangezogen werden. Darüber

hinaus kann mit verständlich visualisierten Themenkarten, eine technische Aussage einfach und schnell an EntscheidungsträgerInnen kommuniziert werden.

6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Marktgemeinde Götzis, der Stadtwerke Hall in Tirol GmbH und den Innsbrucker Kommunalbetriebe AG für die gute Zusammenarbeit, das zur Verfügung stellen der Daten und für die Plausibilitätsprüfung der gewonnenen Ergebnisse mit betrieblichen Erfahrungen. ■

Korrespondenz:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Robert Sitzenfrei,
Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik,
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck,
email: robert.sitzenfrei@uibk.ac.at

Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Möderl, hydro-IT GmbH,
Technikerstraße 21a, 6020 Innsbruck,
email: michael.moederl@gmail.com

Dipl.-Ing. Erich Fritsch,
Ingenieurbüro Passer & Partner Ziviltechniker GmbH,
Andechstraße 65, 6020 Innsbruck,
email: e.fritsch@passer.at

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch,
Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Umwelttechnik,
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck,
email: wolfgang.rauch@uibk.ac.at

LITERATUR

DWA A 118 (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA e.V., Hennef

Fritsch E. (2010). Kritische Infrastruktur in der Siedlungswasserwirtschaft - Planung, Risikomanagement und Vorsorge für kritische Wasserinfrastrukturen, 27. Jänner 2010, Innsbruck, Österreich.

Mair M., Sitzenfrei R., Kleidorfer M., Moderl M. and Rauch W. (im Druck). GIS-based applications of sensitivity analysis for sewer models. Water science and technology

Möderl M., Hellbach C., Sitzenfrei R., Mair M., Lukas A., Mayr E., Perfler R. and Rauch W. (2011). GIS Based Applications of Sensitivity Analysis for Water Distribution Models. ASCE Conf. Proc. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/41173\(414\)14](http://dx.doi.org/10.1061/41173(414)14) Proceedings of the 2011 World Environment and Water Resources

Möderl M., Sitzenfrei R. and Rauch W. (2010). Achilles Approach to Identify Vulnerabilities in Urban Water Infrastructure for Operation and Emergency Management. IWA World Water Congress and Exhibition, 19 - 24 Sept. 2010, Montreal, Canada.

Möderl M., Lammel J., Apperl M. and Rauch W. (2011). Entwässerungssicherheitspläne (ESP). DVGW energie | wasserpraxis,

ÖNORM EN 752 (2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖWAV-RB 19 (2007): Richtlinie für die Bemessung von Mischwasserentlastungen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien

ÖWAV RB 11 (2009): Richtlinie für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung

von Abwasserkanälen. Österreichischer Wasser- und Abwasserverband, Wien

Rauch W., Kleidorfer M. and Fach S. (2010). Vom Bleistift zum Prozessor: Wandel der Modelle in der Siedlungsentwässerung (From the pencil to the processor: Change in the modelling of urban sewerage systems). Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62 (3-4), 43-50.

Rossman L. A. (2004). Storm water management model - User's manual Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory - U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

Sitzenfrei R., Mair M., Möderl M. and Rauch W. (2011). Cascade vulnerability for risk analysis of water infrastructure. Water Science and Technology 64 (9), 1885-1891.