

Quantitative Beschreibung der Resilienz urbaner Wassersysteme

A. Matzinger¹, M. Zamzow¹, M. Riechel¹, E. Pawlowsky-Reusing², P. Rouault¹

¹Kompetenzzentrum Wasser Berlin; ²Berliner Wasserbetriebe

Kurzfassung: Die Erhöhung der Resilienz urbaner Wasserinfrastrukturen wird oft als wichtiges Ziel genannt. Eine Literaturstudie zeigt, dass dafür konkretisiert werden muss, um welche Infrastruktur es sich handelt, gegenüber welcher Störung sie resilient sein soll und an welcher Leistung sich die Resilienz zeigen soll. Hier wird darauf aufbauend ein quantitativer Ansatz der Resilienzmessung vorgeschlagen, der die Schwere des Leistungsausfalls gegenüber einem Grenzwert über die Zeit integriert und dieses Integral über das Zeitintervall und den gewählten Grenzwert normiert.

Eine beispielhafte Anwendung für Stadtentwässerungsstrategien bei Starkregenereignissen zeigt, dass der vorgeschlagene Ansatz den Vorteil hat, dass Dauer und Ausmaß eines Leistungsausfalls in einem Resilienzwert berücksichtigt werden können. Zudem erlaubt der Ansatz eine Evaluation unterschiedlicher Störungen, beispielsweise durch Systemausfälle.

Durch die Normierung wird ein Vergleich unterschiedlicher Leistungen von Wasserinfrastruktur ermöglicht. Allerdings ist die normierte Resilienz stark von der Wahl des Zeitintervalls und des festgelegten Grenzwertes abhängig und damit nicht ohne weiteres auf andere Systeme übertragbar.

Key-Words: Resilienz, Erholungszeit, urbane Gewässer, Starkregen

1 Hintergrund

Die Resilienz von Städten im Allgemeinen und von urbaner Wasserinfrastruktur im Speziellen wird zunehmend als wichtiges Ziel genannt. So zeigt eine Internetabfrage knapp 500.000 Ergebnisse für die genaue Wortgruppe „resilience to climate change“ und 200.000 Ergebnisse für „resilient city“. Zahlreiche Konferenzen, Förderprogramme und städtische Ziele betonen die Wichtigkeit von resilienter Wasserinfrastruktur (z.B. IWA oder WEFTEC).

Resilienz wird in der Regel als Fähigkeit eines Systems betrachtet, seine Struktur und Funktionalität im Falle von Veränderungen beizubehalten (Juan-Garcia et al. 2017).

Die Beschreibung der (technischen) Resilienz von Wasserinfrastruktur erfordert laut Juan-Garcia et al. (2017) Kenntnis der folgenden vier Punkte:

- (1) die Störung („stressor“) gegenüber der das System resilient sein soll,
- (2) die Eigenschaften („properties“) des Systems,
- (3) die angestrebte Leistung („performance“) des Systems (z.B. Überflutungsvorsorge) und
- (4) eine Bewertungsmethode („metrics“), um die Leistung zu messen.

In der Praxis wird der Begriff allerdings oft nur als Schlagwort verwendet. Selbst in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Resilienz von Abwasserinfrastruktur hat laut der ausführlichen Literaturstudie von Juan-Garcia et al. (2017) nur in 17 von 289 Arbeiten eine tatsächliche Diskussion der Resilienz stattgefunden. Von letzteren beschäftigt sich lediglich die Arbeit von Mugume et al. (2015) mit der Funktionalität der Stadtentwässerung im Falle von akuten Störungen durch Starkregen.

Während sich die Definitionen von (technischer) Resilienz vor allem in Details unterscheiden, fehlt es an konkreten Vorgehensweisen, um die Resilienz eines Systems zu bestimmen und damit gezielt zu erhöhen. Ausgehend von existierenden Arbeiten wird hier ein quantitatives Konzept der Resilienzbestimmung vorgeschlagen und zur Diskussion gestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Bestimmung der Resilienz

Es wird vorgeschlagen, die Resilienz ausgehend von Arbeiten von Mugume et al. (2015) und Sweetapple et al. (2017) zu bestimmen. Mugume et al. (2015) haben einen Resilienzindex Res_0 zwischen 0 und 1 für die Funktionalität der Stadtentwässerung im Falle von akuten Störungen durch Starkregen eingeführt:

$$Res_0 = 1 - Sev \quad (1)$$

wobei Sev die Schwere des Leistungsausfalls („severity“) durch eine Störung beschreibt. Den Berechnungsansatz für Sev von Mugume et al. (2015) haben wir durch die Aufnahme einer akzeptablen Leistung P_a (bzw. eines Grenzwertes) ergänzt, wie von Sweetapple et al. (2017) empfohlen:

$$Sev = \frac{1}{P_a - P_{max}} \times \frac{1}{t_n - t_0} \times \int_{t_0}^{t_n} P_a - P(t) dt$$

$$\text{mit } P(t) = \begin{cases} P_a, & \frac{P_a - P(t)}{P_a - P_{max}} < 0 \\ P(t), & \frac{P_a - P(t)}{P_a - P_{max}} \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Sev entspricht dem Integral der Leistung $P(t)$ über ein Zeitintervall t_0 bis t_n , wobei nur Zeiträume integriert werden in denen $P(t)$ schlechter ist als P_a (siehe Abb. 1). Das Integral wird mit der Differenz zwischen P_a und einem festzulegenden maximalen Schadensfall P_{max} sowie dem Zeitintervall normiert. Für Res_0 ergibt sich so ein Wert von 0, wenn über den gesamten Zeitraum der maximale Schadensfall P_{max} eintritt und ein Wert von 1, wenn P_a immer eingehalten wird.

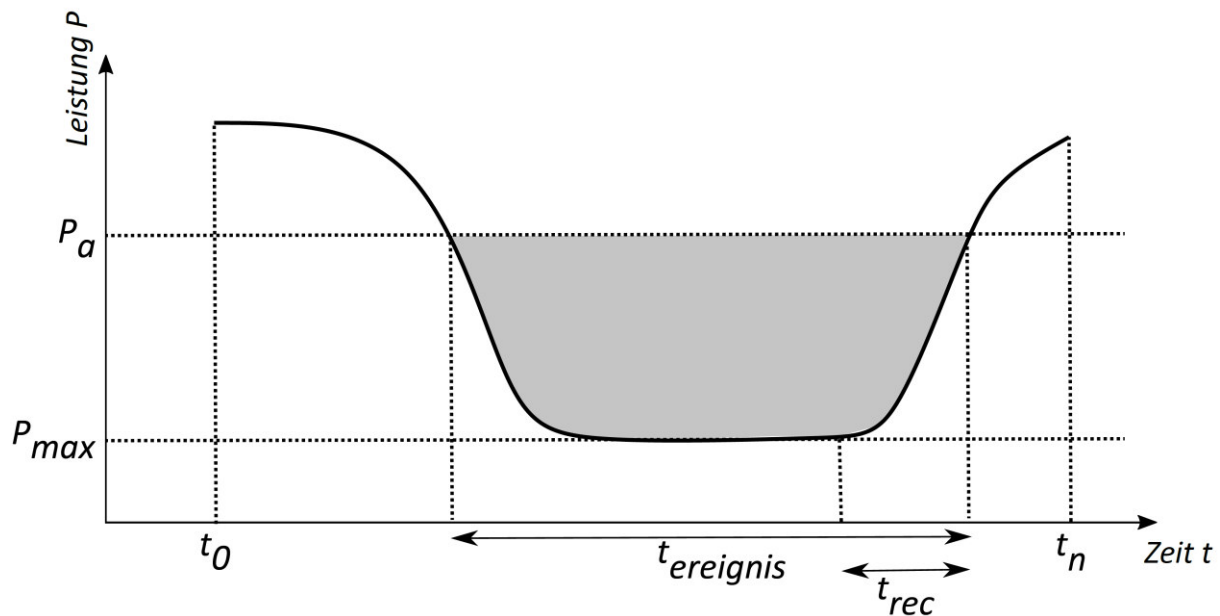


Abbildung 1 Schema des Berechnungsansatzes. Die graue Fläche zeigt das Integral in Gleichung (2).

Ein wichtiges Element der Resilienz ist die Erholungszeit t_{rec} die ein System (z.B. ein Ökosystem oder eine technische Anlage) benötigt, um nach einer Störung wieder zu voller Funktionalität zurückzukehren. Wir haben diese hier pro Ereignis definiert als Zeit zwischen dem maximalen Schaden und dem Ende des Ereignisses (Abb. 1). Neben dem absoluten Wert verwenden wir die relative Erholungszeit $t_{rec,\%}$ bezogen auf die gesamte Dauer eines Schadensereignisses $t_{ereignis}$:

$$t_{rec,\%} = \frac{t_{rec}}{t_{ereignis}} \times 100\% \quad (3)$$

2.2 Fallstudien

An zwei Beispielen wurde die technische Resilienz verschiedener Strategien der Stadtentwässerung bei Starkregenereignissen aus Sicht des Gewässerschutzes berechnet (Tabelle 1).

Beispiel 1 bewertet die Auswirkungen von Überläufen des Mischkanalsystems auf das Gewässer, ausgehend von den Arbeiten von Riechel et al. (2016). Die Eigenschaften des Entwässerungssystems werden dabei durch drei Maßnahmenszenarien variiert:

Geplantes Sanierungsziel als Referenzzustand (S1), Reduktion der angeschlossenen versiegelten Fläche (S2) und Belüftung der Überlaufskanäle (S3). Die Leistung des Systems bei Starkregen wird über die Sauerstoffkonzentration im Gewässer bewertet, $P_a = 2 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ bildet dabei einen *unteren* Grenzwert, da in Berliner Innenstadtgewässern unterhalb P_a Fischsterben zu erwarten sind. Zur Veranschaulichung werden Gleichungen (1) bis (3) für ein einzelnes Starkregenereignis sowie für ein gesamtes Regenjahr angewendet.

Tabelle 1: Überblick über die beiden verwendeten Fallstudien

	Störung	Systemeigenschaften	Leistung für das Gewässer	Methode für Berechnung von Se_v	Grenzwert P_a
1	Starkregen	Mischkanal mit unterschiedlichen Maßnahmen	Schutz vor Sauerstoffmangel	Modellkette: InfoWorks – QSim	$2 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ (minimal)
2	Starkregen	Trenngebiet mit RBF, Mulden und Dachbegrünung	Schutz vor hydraulischer Belastung	Modell: KOSIM	$10 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ (maximal)

Beispiel 2 betrachtet die hydraulische Belastung eines Gewässers durch eine hypothetische versiegelte Fläche von 1 ha, zu gleichen Teilen bestehend aus Dach- und Straßenflächen. Analog zu Beispiel 1 werden auch hier unterschiedliche Maßnahmen für ein Starkregenereignis verglichen, vereinfacht umgesetzt in der Modellumgebung KOSIM. Dabei wird einmal ein Retentionsbodenfilter ohne dezentrale Maßnahmen am Gebietsauslass eingesetzt (Szenario "RBF") und einmal ein Retentionsbodenfilter mit Mulden und extensiver Dachbegrünung kombiniert (Szenario: "Komb"), die insgesamt ein Drittel der versiegelten Fläche beeinflussen. Der Retentionsbodenfilter wurde für beide Fälle nach dem DWA-Merkblatt M 178 (DWA 2005) aufgrund einer 60-jährigen Regenreihe bemessen und wird im Vollstrom betrieben. Durch den verminderten Oberflächenabfluss bei vorhandenen dezentralen Entwässerungsmaßnahmen fiel der Retentionsbodenfilter in "Komb" um ~20 % kleiner aus als in "RBF". Die Leistung des Entwässerungssystems bezüglich hydraulischer Belastung wird in diesem Beispiel mit einem *oberen* Grenzwert $P = 10 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ verglichen, in Anlehnung an aktuelle Einleitbegrenzungen des Landes Berlin (SenUVK, 2017). Neben einem direkten Szenarienvergleich wird auch die Leistung im Falle eines teilweisen Systemausfalls getestet. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass sich das Retentionsvolumens des RBF um 25 % reduziert, was etwa durch Sedimentablagerung oder den langjährigen Aufbau von Pflanzenmaterial eintreten könnte.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Sauerstoffminima im Gewässer

Abb. 2 zeigt eine deutliche Verbesserung der O_2 -Situation in der Berliner Stadtspreew nach einem Starkregenereignis durch eine Abkopplung von 20 % der versiegelten Flächen (S2) und durch eine Belüftung des überlaufenden Mischwassers auf $5 \text{ mg } O_2 \text{ L}^{-1}$ (S3). Eine Quantifizierung von Res_0 über ein Zeitintervall von 24 h für das Starkregenereignis in Abb. 2 zeigt eine Erhöhung von Res_0 von 0,80 (S1) auf 0,93 (S2) bzw. 0,91 (S3). Während Riechel et al. (2016) das Auftreten und die Dauer von Unterschreitungen ausgewiesen haben, berücksichtigt Res_0 zusätzlich das Ausmaß der Unterschreitung. Wie Abb. 2 deutlich zeigt, reduziert sich auch t_{rec} von 4,25 h (S1) auf 3,0 h (S2) bzw. 3,25 h (S3). Die relative Erholungszeit $t_{rec,\%}$ bleibt dagegen für alle drei Szenarien nahezu unverändert bei ca. 47 %.

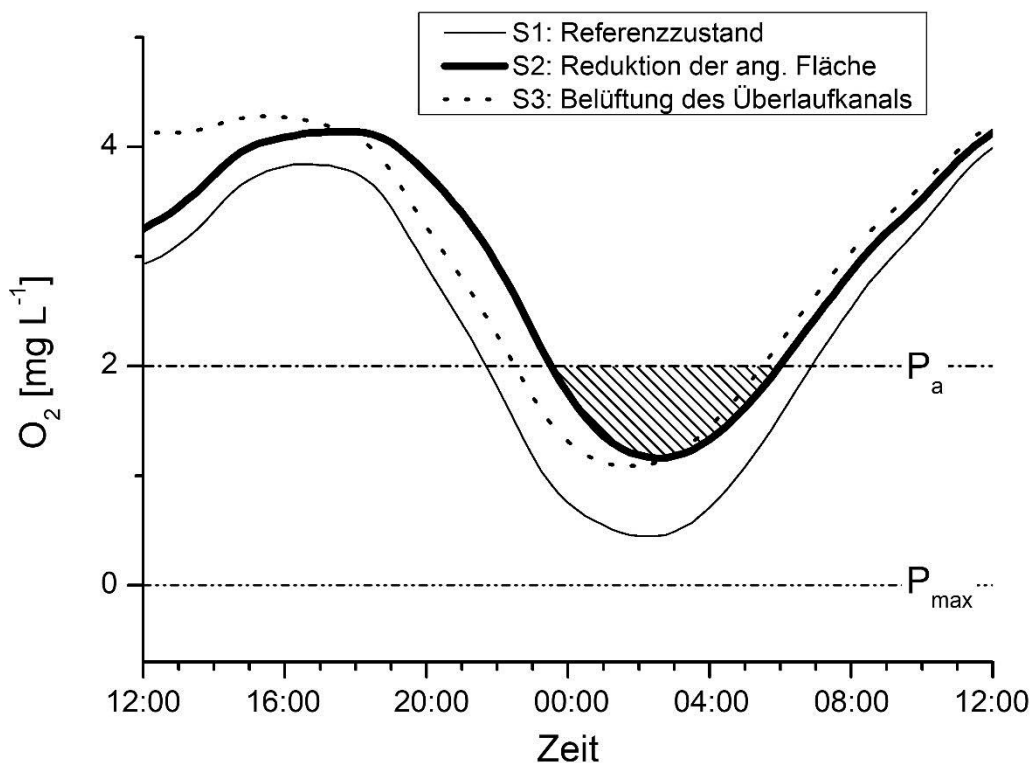


Abbildung 2: Sauerstoffverlauf $P(t)$ im Gewässer für drei Maßnahmenszenarien im Mischsystem nach einem Starkregenereignis. Die schraffierte Fläche zeigt das in der Gleichung (2) berücksichtigte Integral für die Schwere des Leistungsausfalls in Szenario S2. Simulationen aus Riechel et al. (2016).

Die vorgeschlagene Methodik lässt sich auch für längere Zeitreihen anwenden. Tabelle 2 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse für das gesamte Regenjahr. Die Auswertung zeigt, dass Res_0 für eine lange Zeitreihe, in der Schadensfälle nur selten auftreten, sehr nahe bei 1 liegt und sich Unterschiede zwischen den Szenarien erst ab der dritten Nachkommastelle zeigen. Die Unterschiede könnten durch Betrachtung eines

engeren Zeitraumes (z.B. nur Zeiten in denen es Starkregen gibt) deutlicher hervor gehoben werden, wie das Beispiel für ein Starkregenereignis in Abb. 2 zeigt. Alternativ kann Sev , bzw. deren relative Veränderung ΔSev betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass S2 und S3 die Schwere des Leistungsausfalls Sev um 78 %, bzw. 70 % reduzieren. Da Sev dabei auch die absolute Veränderung in der O_2 -Konzentration mit abbildet, liegt diese Reduktion in Sev deutlich höher als die Reduktion der Gesamtdauer der Schadensereignisse (Tabelle 2).

Wie schon für ein einzelnes Starkregenereignis zeigt sich auch für die Jahresbetrachtung eine Verkürzung der mittleren Erholungszeit pro Ereignis $\overline{t_{rec}}$ für S2 und S3. Interessanterweise zeigt aber nur S2 eine Reduktion der mittleren relativen Erholungszeit $\overline{t_{rec,\%}}$ pro Ereignis, von 50 auf 41 %. Dies könnte daran liegen, dass nur bei S2 eine geringere Menge an abbaubarem organischem Material eingetragen wird, während in S3 eine Verbesserung durch einen höheren O_2 -Gehalt unmittelbar nach dem Überlaufereignis erreicht wird.

Tabelle 2 Zusammenfassung der Auswertung für das Regenjahr 2017

Szenario	klassische Auswertung			Resilienzbewertung				
	Ereignisse < P_a	Gesamt- Dauer	min. O_2 - Konz.	Res_0	Sev	ΔSev	$\overline{t_{rec}}$	$\overline{t_{rec,\%}}$
	[-]	[h]	[mg L ⁻¹]	[-]	[-]	[%]	[h]	[%]
S1	4	22	0,5	1,00	$1,4 \cdot 10^{-3}$	0	2,6	50
S2	2	7	1,2	1,00	$0,3 \cdot 10^{-3}$	78	1,6	41
S3	3	11	1,1	1,00	$0,4 \cdot 10^{-3}$	70	1,8	49

Das Beispiel zeigt, dass die Resilienzbewertung die Ergebnisse der klassischen Bewertung bestätigt und teilweise erweitert. Die Zusammenfassung unterschiedlicher Belastungsaspekte in einem Wert (Res_0 , bzw. Sev) bietet sich auch für Optimierungen an. Interessant ist auch die Möglichkeit andere Störungen des Gewässersystems zu untersuchen, wie z.B. in der Wassertemperatur oder der Vorbelastung des Gewässers. Zudem könnten durch die Normierung unterschiedliche stoffliche Belastungen (für die Grenzwerte vorliegen) verglichen werden. Dabei muss aber beachtet werden, dass die Ergebnisse stark vom Zeitintervall und von der Wahl der Werte P_a und P_{max} abhängen.

3.2 Hydraulische Belastung des Gewässers

Abb. 3 zeigt, dass beide Maßnahmenszenarien "RBF" und "Komb" eine deutliche Reduktion der hydraulischen Belastung bewirken. Dies zeigt sich auch in einer Erhöhung von Res_0 von 0,59 auf 0,83 (RBF) bzw. 0,87 (Komb). Das zweite Beispiel unterstreicht, dass eine Berechnung der Gleichungen (1) und (2) auch für einen oberen Grenzwert anwendbar bleibt.

Res_0 ermöglicht auch die Betrachtung eines (Teil)ausfalls der Maßnahmen. Als Beispiel wurde der Retentionsraum des Retentionsbodenfilters in beiden Fällen um 25% reduziert (gestrichelte Linien in Abb. 3). Der teilweise Ausfall führt auch zu einer Reduktion der Resilienz gegenüber des betrachteten Starkregenereignisses, um 9 % für "RBF" und um 7 % für "Komb". Diese leicht höhere Resilienz eines Systems mit dezentralen und zentralen Maßnahmen gegenüber Ausfällen deckt sich mit Ergebnissen von Mugume et al. (2015) der eine erhöhte Überflutungsresilienz bei dezentralen Stauräumen gegenüber einem zentralen Bauwerk festgestellt hat.

Interessant ist, dass sich $t_{rec,\%}$ für "RBF" von ca. 40 % auf 30 % reduziert, für "Komb" aber auf knapp 70 % erhöht. Hier zeigt sich einerseits der stärkere Nachlauf, bzw. der Verzögerungseffekt der Dachbegrünung. Andererseits zeigt das Beispiel, dass $t_{rec,\%}$ zwar zusätzliche Informationen über das Systemverhalten aufzeigt, aber eine Erhöhung nicht unbedingt auf eine verschlechterte Resilienz hinweist.

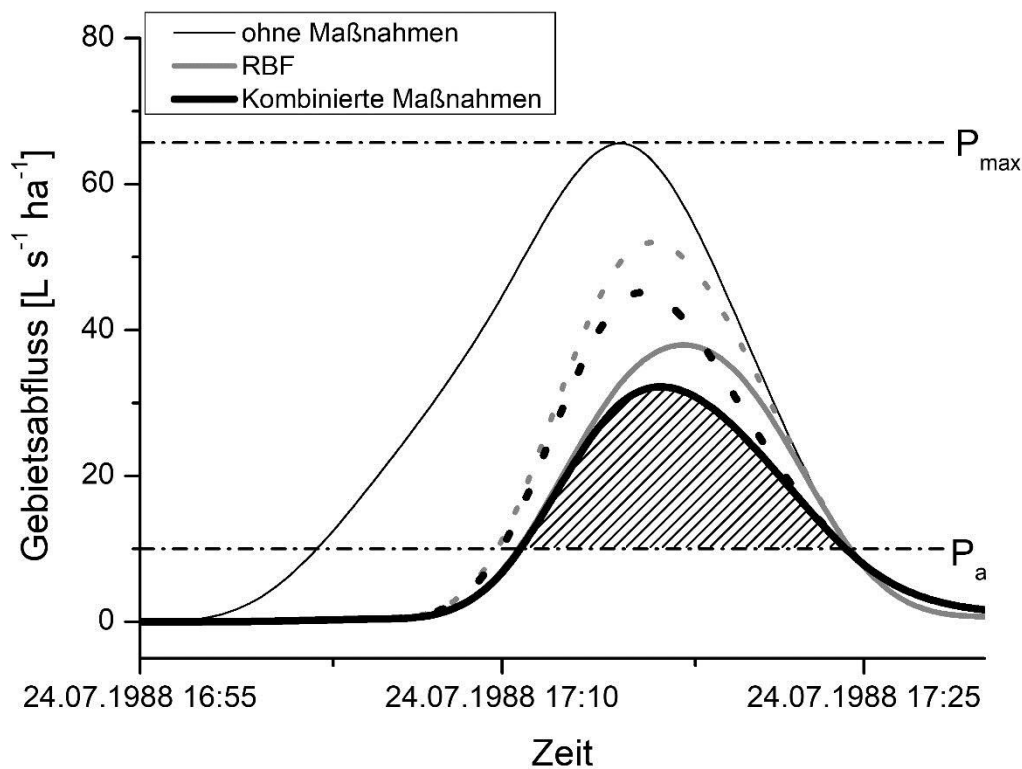


Abbildung 3: Gebietsabfluss $P(t)$ in das Gewässer für drei Maßnahmenzenarien im Trennsystem nach einem Starkregenereignis. Die schraffierte Fläche zeigt das in der Gleichung (2) berücksichtigte Integral für das Szenario "kombinierte Maßnahmen". Die gestrichelten Kurven zeigen den Effekt eines um 25 % reduzierten Retentionsvolumens des RBF.

4 Schlussfolgerung

- Resilienz kann durch Res_0 für unterschiedliche angestrebte Leistungen bezüglich Gewässerschutz quantifiziert werden. Die Einführung eines Zielwertes/Grenzwertes funktioniert für obere und untere Grenzwerte.
- Resilienz hat den Vorteil, dass Dauer und Ausmaß einer Belastung berücksichtigt werden. Dies kann etwa für Optimierungsfragen hilfreich sein. Zudem erlaubt sie eine Evaluation unterschiedlicher Störungen von Klimawandel bis zum Ausfall von Maßnahmen.
- Die Normierung von Res_0 bzw. Sev ermöglicht den Vergleich sehr unterschiedlicher Leistungen von Wasserinfrastruktur (z.B. Kühlung, Biodiversität, etc.).
- Allerdings sind die absoluten Werte von Res_0 zwischen Systemen nur bedingt vergleichbar, da Sev durch die zeitliche Normierung stark vom gewählten Zeitintervall und durch die Wahl eines Grenzwertes und eines maximalen Schadenfalls stark von diesen Randbedingungen abhängt. Eine Berechnung für eine längere Regenreihe anstelle von einzelnen Ereignissen führt etwa zu stark abweichenden Ergebnissen (mit Res_0 nahe 1, da Starkregen prozentual nur einen kleinen Zeitraum betreffen). Sollen Systeme/Leistungen verglichen werden ist eine sorgfältige Wahl der Randbedingungen entsprechend unerlässlich.
- Durch den Einfluss der Randbedingungen bleibt Res_0 ein abstrakter Wert, der aus unserer Sicht vor allem für Systemoptimierungen oder Bewertungen und weniger für eine direkte Interpretation geeignet ist. In jedem Fall ist bei einer Anwendung Transparenz über Methode und Eingangswerte zentral.
- Insgesamt zeigen die Beispiele aber deutlich, dass eine Forderung nach resilienter Wasserinfrastruktur oder gar resilienten Städten nur über eine Konkretisierung der Störung, der Systemeigenschaften und der angestrebten Leistung beschrieben und damit in sinnvolle Maßnahmen übersetzt werden kann. Trotz aller Einschränkungen zeigen die Rechenbeispiele, dass die Resilienz über eine Beschreibung hinaus auch für konkrete Anwendungsfälle quantitativ bewertet werden kann.

5 Literatur

- DWA. (2005). DWA-M 178: Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem.
- Juan-Garcia, P., D. Butler, J. Comas, G. Darch, C. Sweetapple, A. Thornton, und L. Corominas. (2017). Resilience theory incorporated into urban wastewater systems management. State of the art. Water Research.
- Mugume, S. N., D. E. Gomez, G. Fu, R. Farmani, und D. Butler. (2015). A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems. Water Research, 81, 15 - 26.
- Riechel, M., A. Matzinger, E. Pawlowsky-Reusing, H. Sonnenberg, M. Uldack, B. Heinzmann, N. Caradot, D. von Seggern, und P. Rouault. (2016). Impacts of combined sewer overflows on a large urban river – Understanding the effect of different management strategies. Water Research, 105, 264-273.
- SenUVK (2017) Hinweisblatt: Begrenzung von Regenwassereinleitungen bei Bauvorhaben in Berlin (BReWa-BE). Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz. Berlin.
- Sweetapple, C., G. Fu, und D. Butler. (2017). Reliable, Robust, and Resilient System Design Framework with Application to Wastewater-Treatment Plant Control. Journal of Environmental Engineering (United States), 143.

Danksagung:

Die gezeigten Arbeiten wurden am KWB im Rahmen des Projektes NetWorks 4 durchgeführt. Dieses wird durch das BMBF im Rahmen des Programms „FONA – Forschung für nachhaltige Entwicklungen“ gefördert (<http://www.fona.de>). Die involvierten Unternehmen beteiligen sich zudem durch Eigenanteile. Das KWB erhält eine Co-Finanzierung durch die Berliner Wasserbetriebe.

Korrespondenz an:

Andreas Matzinger
Cicerostraße 24
10709 Berlin

Tel.: 030 - 5 36 53 - 824

Fax: 030 - 5 36 53 - 888

E-Mail: andreas.matzinger@kompetenz-wasser.de