

# SPÜLPLÄNE FÜR DEN NOTFALL



## RECHNERGESTÜTZTE SPÜLPLANENTWICKLUNG AM BEISPIEL DER STADT ZÜRICH

Für eine Wasserversorgung besteht ein begrenztes Risiko, dass eine bewusste oder unbewusste Kontamination im Trinkwassernetz auftreten kann. Um einen solchen Störfall betrieblich zu beherrschen, sollte der Netzbetrieb auf diese Situationen vorbereitet und sofort handlungsfähig sein. Durch die Einspeisung von sauberem Wasser und gleichzeitiger Entnahmen an Hydranten von kontaminiertem Wasser wird die Verschmutzung flächendeckend und schnell beseitigt. Hierzu wurden für die Wasserversorgung Zürich Spülpläne und Einsatzpläne entwickelt, bei denen kurzfristige Spülzonen gebildet wurden und bestimmte Hydranten gezielt und gestaffelt zur Spülung eingesetzt werden.

Vincent Layec\*; Dirk König, Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH (RZVN)  
Adrian Rieder; Harald Tarnowski, Wasserversorgung Zürich (WVZ)

### RÉSUMÉ

#### PROJETS DE RINÇAGE EN CAS D'URGENCE – CONCEPTION D'UN PROJET DE RINÇAGE, À L'EXEMPLE DE LA VILLE DE ZÜRICH

Le principe de précaution vis-à-vis des populations implique pour les entreprises de distribution d'eau une préparation opérationnelle à une situation de contamination du réseau. Dans ce cadre, la société de l'eau zurichoise (WVZ) élabore avec le bureau d'étude Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr GmbH (RZVN) des plans de rinçage pour agir sans délai et éliminer un contaminant sur l'ensemble du réseau le plus rapidement possible.

Dans la présente modélisation, on considère que la contamination ne concerne pas les réservoirs (ou que ceux-ci ont déjà été rincés au début) et que l'eau du réseau ne peut pas revenir contaminer les réservoirs. Le plan de rinçage consiste à injecter de l'eau propre depuis les réservoirs jusqu'à ce que le contenu des canalisations ait été complètement renouvelé. Des prises d'eau sont effectuées aux bornes incendie pour augmenter les débits et accélérer la progression de l'eau propre. Le plan d'action de rinçage décrit quelles bornes parmi les 6500 possibles sont retenues, et dans quel ordre et pour quelle durée elles sont utilisées.

### EINLEITUNG

Am 6. Februar 2008 wurde das Trinkwassernetz der Gemeinde Adliswil wegen eines fälschlicherweise eingebauten Verbindungsstücks in der Abwasserreinigungsanlage mit Brauchwasser verschmutzt. Die Kunden wurden dabei umgehend durch die Behörden und Medien aufgefordert, das Wasser vor dem Verbrauch abzukochen. Als Vertragspartner der Wasserversorgung Zürich (WVZ) ist Adliswil über definierte Abgabestellen mit deren Leitungsnetz verbunden. Die Trinkwasserversorgung der Stadt Zürich war aber zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt. Eine durchgeführte Risikoanalyse und Überprüfung der kritischen Kontrollpunkte im Trinkwassernetz der WVZ zeigte auf, dass ein vergleichbarer Vorfall in der Wasserverteilung des städtischen Netzes nur mit grossem Aufwand und Unsicherheiten bewältigt werden könnte. Darauf entschied die WVZ, die nötigen Planungsgrundlagen und hydraulischen Berechnungen für die Bewältigung einer gravierenden Verschmutzung im Trinkwassernetz durchzuführen. Das Ziel der Untersuchung war, das kontaminierte Wasser flächendeckend und möglichst schnell aus dem Netz zu spülen.

\* Kontakt: layec@rzvn.de

## DIE HERAUSFORDERUNG

Für die Modellierung dieses Störfalls wird davon ausgegangen, dass die Kontamination nicht genau identifiziert und geografisch geortet werden kann. Deshalb ist die angenommene Kontamination flächendeckend, bezogen auf die definierten Spülzonen, im gesamten Wasserrohrnetz zu beseitigen. Ferner geht man davon aus, dass die Kontamination die Einspeisungen in das Rohrnetz (Wasserwerke und Reservoirs) nicht betrifft

und dass kein Wasser aus dem Rohrnetz zurück in die Reservoirs fließen kann. Ebenso werden die Stollenleitungen – als direkte Verbindung zwischen den Werken – sowie die explizit in der hydraulischen Simulation markierten Transport- und Hauptleitungen als nicht verunreinigt betrachtet.

Die Spülaufgabe besteht darin, klares Wasser aus den Wasserwerken und Reservoirs so lange in das Netz einzuspeisen, bis ein nahezu kompletter Wasseraustausch des Leitungsvolumens

stattgefunden hat. Zur Erhöhung der Volumenströme und zur Beschleunigung des Fortschritts der klaren Wasserfront werden Entnahmen an Hydranten durchgeführt. Das operative Team muss dafür sorgen, dass während der Spülung an Hydranten das entnommene kontaminierte Wasser in die Abwasserkanalisation geleitet wird. Die Spülaufgabe für diesen Störfall unterscheidet sich von der bekannten Spülung eines Netzes zur Beseitigung von Ablagerungen und Schwebstoffen mit hohen Fließgeschwindigkeiten. In der vorliegenden Fragestellung muss die Fließgeschwindigkeit nicht zwingend sehr hoch sein, aber der Vorgang muss flächendeckend und schnell sein.

Die zu erstellenden Einsatzpläne sollen beschreiben, welche der insgesamt ca. 6500 möglichen Netzhydranten als Spülstelle benutzt werden, in welcher Reihenfolge und wie lange die einzelnen Hydranten genau zu öffnen und zu schliessen sind.

Netzmodell (= Druckzone) Kennwerte	Limmatzone	Sonnenberg	Glattzone
Anzahl Rechenstrecken (ursprünglich)	84 072	22 223	31 600
Leitungslänge [m]	449 649	116 141	180 466
Leitungsvolumen [m <sup>3</sup> ]	28 672	5 621	7 783
mittlerer Durchmesser [mm]	284,9	248,2	228,2

Tab. 1 Typische Kennwerte der hydraulischen Rechenetze

Valeurs caractéristiques typiques pour le calcul hydraulique des réseaux



Fig. 1 Spülzonen der Limmatzone (mit Einfärbung)

Zones de rinçage de la région de la Limmat (avec coloration)

## DATENGRUNDLAGE UND VORGEHENSWEISE

Die Ermittlung des Spülplans erfolgt mithilfe des Rechenetzprogramms *Roka*, das nach hydraulischer Berechnung auch die Verteilung der Fremdstoffkonzentrationen zu bestimmen vermag. Als Grundlage wird das von der WVZ erstellte Rechenetzmodell in das Programm importiert und verwendet.

Insgesamt werden 783 km Rohrnetzlänge in der Limmatzone und in der Hangzone Sonnenberg und der Glattzone berücksichtigt. Die typischen Kennwerte der Netzmodelle ohne die Transportleitungen und Hausanschlussleitungen gehen aus *Tabelle 1* hervor.

Zur Lösung dieser komplexen Aufgabe für die Limmatzone und für die Hangzone Sonnenberg und die Glattzone wird zuerst eine Aufteilung der grossen Zonen in mehrere kleinere Spülzonen durchgeführt. Diese können von ihrer Konzipierung her einzeln gespült werden, ohne dass während der Spülung potenziell verunreinigtes Wasser in andere Netzbereiche dringt. Es wurde darauf geachtet, dass die Versorgung des übrigen Netzes während der Spülung sichergestellt ist.

Um während der Spülmassnahmen eine Verunreinigung des übrigen Netzes zu vermeiden, wurden geeignete Schieber im Netz identifiziert, die vor dem Beginn der Spülung geschlossen werden.

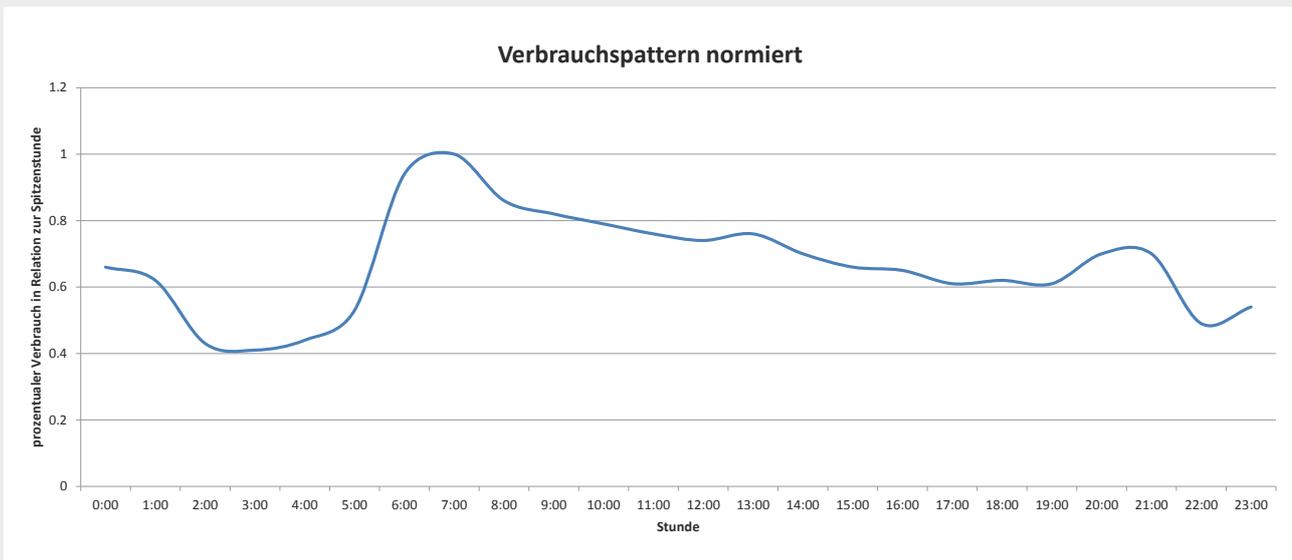


Fig. 2 Verbrauchsganglinie  
 Courbe de consommation

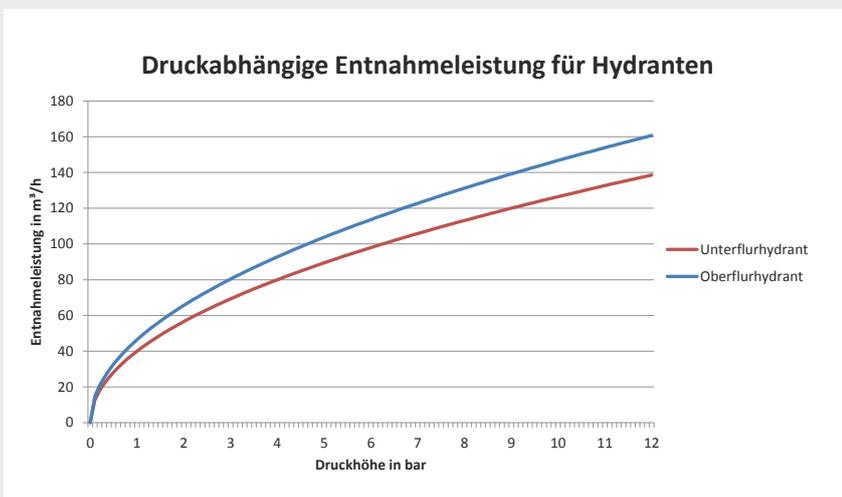


Fig. 3 Entnahmelleistung der Hydranten  
 Capacité de soutirage des hydrants

Insgesamt sollen 18 Einsatzpläne für die separaten Spülzonen mit überschaubarer Zonengröße (von 400 m<sup>3</sup> bis 4000 m<sup>3</sup>) erstellt werden, die auf dem internen Geografischen Informationssystem (GIS) der WVZ aktualisiert und thematisch nachbearbeitet werden. Die Aufteilung der Limmatzone in zehn Spülzonen geht exemplarisch aus *Figur 1* hervor. Der zeitabhängigen hydraulischen Berechnung wird als Netzabgabe die Verbrauchsganglinie eines typischen Durchschnittstags zugrunde gelegt (*Fig. 2*). Zusätzlich werden Entnahmemengen an jeder Spülstelle in Abhängigkeit des Netzdruckes berechnet (*Fig. 3*). Nach der hydraulischen Berechnung wird die Konzentration des Fremdstoffs an jedem Netzknoten mit einer Berechnung der Wasserqualität (Transportmodell ohne Diffusions- oder Reakti-

onsverhalten) ermittelt. Als wesentliche (operative) Randbedingung wurde seitens WVZ definiert, dass bis zu 15 Entnahmen gleichzeitig benutzt werden dürfen, jedoch unter Einhaltung eines Mindestnetzdruckes von 3,5 bar. Spülstellen werden nach der Entfernung von ca. 99,5% der anfänglichen Fremdstoffkonzentration in den Leitungen geschlossen. Nach einer theoretischen Umsetzzeit zum nächsten Hydranten von zehn

Minuten nach der Schliessung können diese Hydranten durch weitere Spülstellen ersetzt werden, bis das Netz flächendeckend (zu mindestens 95% seines Volumens) gespült wurde.

### ERGEBNISDOKUMENTATION

Die Auswahl der Spülstellen ist in je einem Übersichtsplan für jede Druckzone dargestellt. Mit einer thematischen Einfärbung wird dargestellt, ob der Hydrant zu der gewählten optimalen Startkombination gehört oder erst nachgelagert eingesetzt wird. Die Öffnungs- und Schliesszeiten der 22 Spülstellen der Spülzone *grau* (s. *Fig. 1*) der Limmatzone werden jeweils tabellarisch (*Tab. 2*) festgehalten. Der Fortschritt des Spülvorgangs (Anteil des bereinigten Leitungsvolumens) über die Zeit ist exemplarisch für die Spülzone *grau* der Limmatzone in *Figur 4* dargestellt. Die Entwicklung des Spülvorgangs ist in den *Figuren 5a* bis *k* in jedem hydraulischen Zeitschritt mit Strangeinfärbung nach der Fremdstoffkonzentration dokumentiert. Dabei sind im jeweiligen Zeitschritt geöffnete bzw. geschlossene Hydranten *rot* bzw. *blau* dargestellt.

Hydrantenname	Spülbeginn	Spülende	Spüldauer	Menge
N_0071174_003_E	00:00	00:25	00:25	50 m <sup>3</sup>
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
N_0071821_001_S	00:30	00:40	00:10	10 m <sup>3</sup>
N_0080371_002_E	00:25	00:45	00:20	40 m <sup>3</sup>

Tab. 2 Auszug der zu öffnenden Hydranten für die Spülzone *grau* der Limmatzone  
 Extrait des hydrants à utiliser dans la zone de rinçage grise de la région de la Limmat

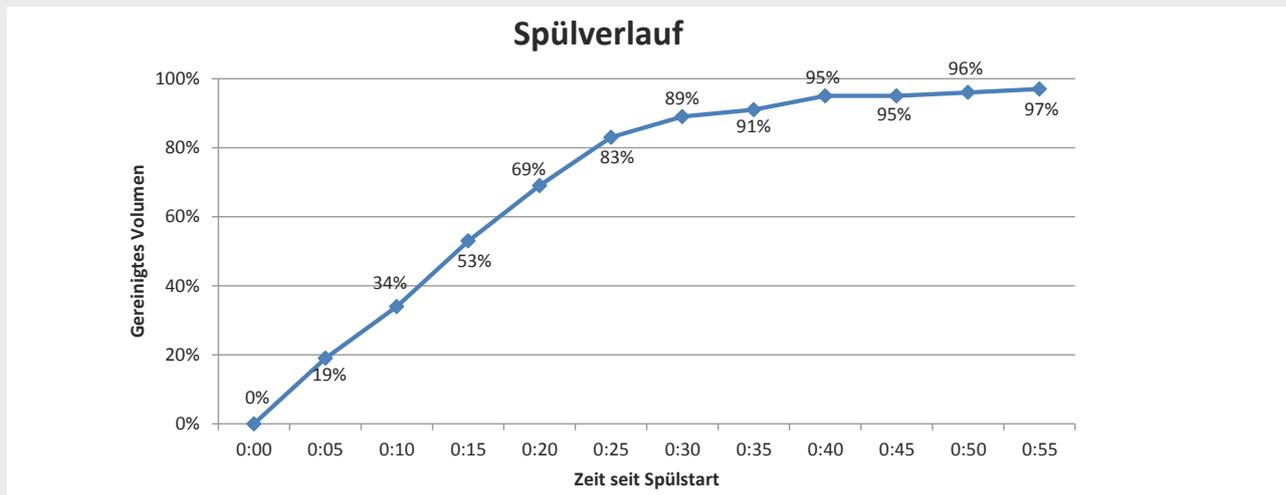


Fig. 4 Spülverlauf (Anteil des bereinigten Leitungsvolumens) für die graue Spülzone der Limmatzone

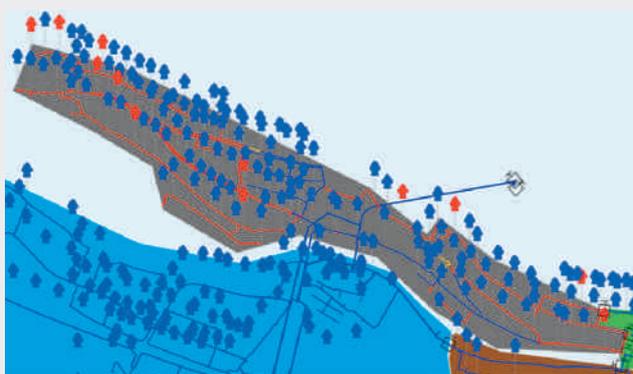
*Déroulement du rinçage (part du volume de conduite nettoyées) pour la zone de rinçage grise de la région de la Limmat*



a) Spülzone grau zum Simulationsstart (Startkonzentration: 1000 mg/l)



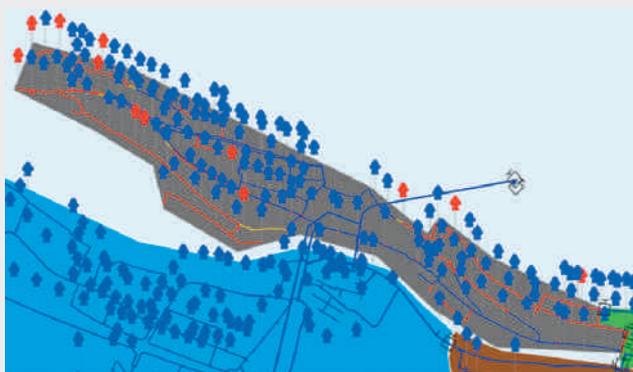
b) Spülzone grau nach 5 Minuten



c) Spülzone grau nach 10 Minuten



d) Spülzone grau nach 15 Minuten



e) Spülzone grau nach 20 Minuten



f) Spülzone grau nach 25 Minuten



g) Spülzone grau nach 30 Minuten



h) Spülzone grau nach 35 Minuten



i) Spülzone grau nach 45 Minuten



j) Spülzone grau nach 50 Minuten



k) Spülzone grau nach 55 Minuten



Fig. 5a bis k Die Strangeinfärbung (Verschmutzungsgrad von rot nach blau) zeigt den zeitlichen Ablauf und den Fortschritt des Spülvorganges in der Spülzone grau

La coloration des conduites (selon leur concentration de contaminant de rouge à bleu) montre le déroulement chronologique et l'avancée du processus de rinçage dans la zone grise

## ERGEBNISSE DER UNTERSCHIEDLICHEN SPÜLZONEN

Von besonderem Interesse für die WVZ ist die Gegenüberstellung der gesamten Spülwassermengen (an Spülstellen plus Verbraucher in m<sup>3</sup>) zu dem gesamten geometrischen Volumen (in m<sup>3</sup>) der Leitungen und die Darstellung des Spülfortschritts (Anteil an bereinigtem Leitungsvolumen) am Ende des Spülvorgangs (Tab. 3).

### SPÜLFORTSCHRITT AM ENDE DES SPÜLVORGANGS

Die acht rot markierten Werte des Spülfortschritts (Tab. 3) stellen Ergebnisse dar, die nicht den gewünschten Endwert von 95% Volumenaustausch (auf alle Leitungen volumenbezogen) erreichen. Der Grund dafür ist, dass in manchen Spülzonen Hauptleitungen nicht ohne Öffnung der spülzonentrennenden Schieber gespült werden können, weil keine Hydranten direkt an die Hauptleitungen angeschlossen sind. Aufgrund des grossen Leitungsvolumens dieser Hauptleitungen sind die Spülfortschritte

hier begrenzt. Gezielte Schieber-Öffnungen und -Schliessungen, die mit dem Wissen der Rohrnetzfachleute den Fortschritt der klaren Wasserfront beschleunigen könnten, wurden nicht berücksichtigt. Die Komplexität des Modells konnte so in Grenzen gehalten werden und das Prinzip der Aufteilung in klar definierte Spülzonen wurde beibehalten.

Für die acht betroffenen Spülzonen mit dem nicht vollständig erreichten Spülfortschritt von 95% wurde als Abbruchkriterium des Spülvorgangs ein neuer Kennwert «Fortschritt bezogen auf die spülbaren Stränge» benötigt und in drei Schritten umgesetzt:

1. Im Netzmodell wurde händisch geprüft, an welchen Leitungen noch ein grosses Potenzial an Volumen für weitere Spülungen besteht.
2. Die verunreinigten Hauptleitungen ohne Hydranten und ohne Entleerungsleitungen, die wegen der geschlossenen Spülzonentrennschieber nicht gespült werden können, wurden speziell markiert.

Druckzone	Spülzone	Dauer bis Ende (hh:mm)	Anzahl benutzter Spülstellen	Spülfortschritt (F1) [%]	geometr. Leitungsvolumen [m³]	Spülwasservolumen (Hydranten + Verbrauch) [m³]	Verhältnis Spülwasservolumen / geometr. Volumen
Sonnenberg	grün	00:55	27	96,4	367	832	2,3
	blau	02:00	35	94,7	864	3042	3,5
	rot	03:20	46	94,0	2092	6568	3,1
	lila	02:40	45	94,9	1326	3909	2,9
Glattzone	blau	02:55	22	96,1	1391	2705	1,9
	grau	02:05	33	95,7	905	2652	2,9
	grün	01:40	35	93,2	810	3358	4,1
	lila	07:00	43	92,0	3160	12016	3,8
Limmatzone	pink	04:45	38	97,6	3413	8527	2,5
	grün	04:25	23	96,7	2240	5782	2,6
	grau	00:55	22	96,5	473	870	1,8
	blau	01:50	35	86,5	1773	2731	1,5
	dunkelgrün	01:25	26	95,6	677	1828	2,7
	gelb	05:15	28	95,7	2872	8141	2,8
	braun	02:30	29	88,0	2554	4537	1,8
	hellblau	06:15	28	96,1	3922	12714	3,2
	orange	01:50	33	96,5	703	2263	3,2
lila	06:40	29	92,1	5332	12329	2,3	

Tab. 3 Gesamte Spülwassermenge und Spülfortschritt am Ende des Spülvorgangs in jede Spülzone  
Quantité totale d'eau et avancée du rinçage à la fin du processus de rinçage dans chaque zone

Druckzone	Spülzone	Spülfortschritt (F1)	«Fortschritt bezogen auf spülbare Stränge» (F2)	Massen bezogener «Fortschritt» (F3)
Sonnenberg	blau	94,7 %	99,7 %	
	rot	94,0 %	95,7 %	
	lila	94,9 %	95,7 %	
Glattzone	lila	92,0 %	93,2 %	98,5 %
	grün	93,2 %	96,6 %	
Limmatzone	blau	86,5 %	98,0 %	
	braun	88,0 %	90,5 %	96,8 %
	lila	92,1 %	92,4 %	97,6 %

Tab. 4 Spülfortschritt am Ende des Spülvorgangs in den acht schwierig zu spülenden Spülzonen  
Avancée du rinçage à la fin du processus de rinçage dans les huit zones difficiles à rincer

3. Der neue Kennwert «Fortschritt bezogen auf spülbare Stränge» ist die Summe der Volumen der bereinigten Leitungen dividiert durch die Summe der Volumen der Leitungen, die zum Simulationsstart verunreinigt waren und nicht speziell markiert wurden.

Für die drei betroffenen Spülzonen, bei denen der «Fortschritt bezogen auf spülbare Stränge» unter 95% bleibt, wurde der Fortschritt bezogen auf die ursprüngliche Masse des Fremdstoffs definiert. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 4* festgehalten.

Mit Erreichen des Abbruchkriteriums durch die neuen Kennwerten F2 und F3 ist es möglich, den rechnerischen Spül-

vorgang zu beenden. Das Netz kann als nahezu gesäubert betrachtet werden. Die Freigabe der gespülten Leitungen erfolgt durch die Fachleute des Labors nach erfolgter Trinkwasseranalyse. Aus der Sicht des Netzbetriebs kann aber das Team vor Ort bereits mit der nächsten Spülzone beginnen, sobald das Ende des operativen Spülvorgangs bei der Zone erreicht wird.

#### SPÜLDAUER – FUNKTION DER ZONENGRÖSSE

Aus der Gegenüberstellung der Spülwasservolumen zu den geometrischen Leitungsvolumen der Spülzone geht hervor, dass die im Verhältnis am sparsamsten zu spülende Zone nur das 1,5-Fache ihres geometrischen Leitungsvolumens benö-

tigt, während die mit grösstem Aufwand zu spülende Zone das 4,1-fache des Leitungsvolumens benötigt.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass sich kleinere Zonen in kürzerer Dauer als grosse Zonen spülen lassen (*Fig. 6*).

#### ERKENNTNISSE

Durch die Untersuchung wurden Erfahrungen und Erkenntnisse gewonnen, um die für das gewählte Vorgehen und für das Modell benötigten allgemeinen Simulationsparameter zu definieren. Dazu gehören die Wahl eines kurzen Zeitschrittes für die Berechnung der Wasserqualität und die Homogenisierung des Netzmodells (Reduzierung der Anzahl

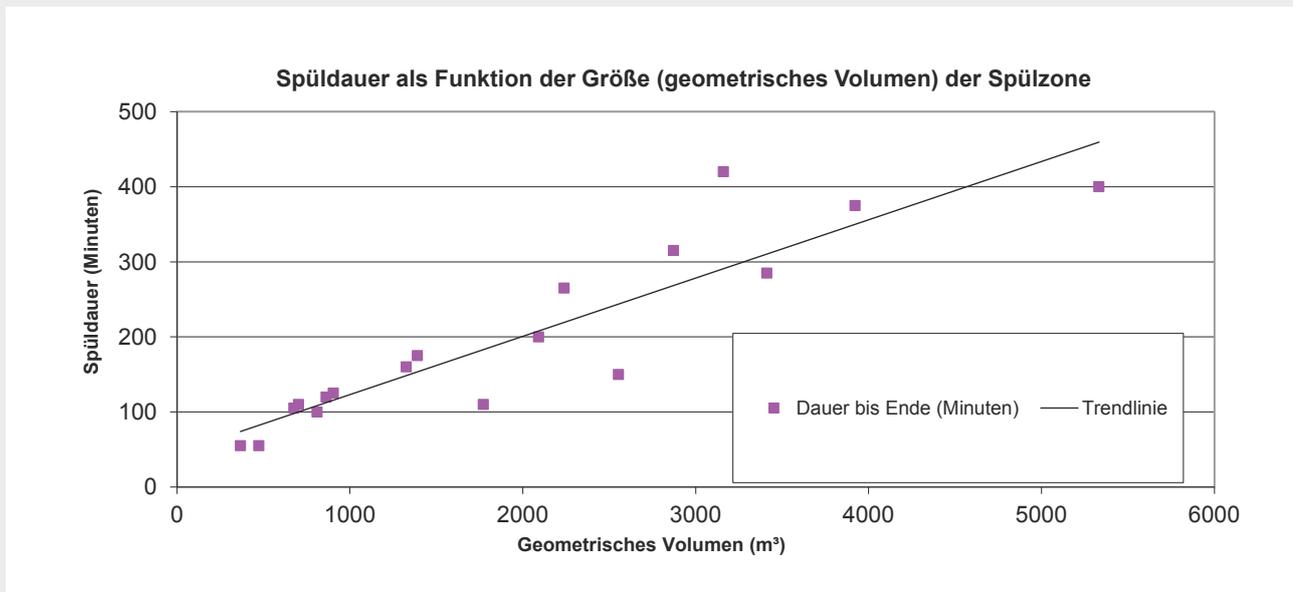


Fig. 6 Dauer der Spülung und Volumen der Spülzone

*Durée du rinçage et volume de la zone de rinçage*

kurzer Strangabschnitte) zur Erhöhung der Rechengenauigkeit.

Aus den Ergebnissen der dynamischen Simulation der Wasserqualität für das Versorgungssystem in Zürich können Einsatzpläne mittels GIS generiert werden, sodass großflächige Verunreinigungen durch systematische Netzspülung beseitigt werden können.

Die benötigte Spülwassermenge reicht in den analysierten Zonen vom 1,5-fachen bis zum 4,1-fachen (im Durchschnitt das 2,6-fache) des Leitungsvolumens. Die Spüldauer ist sehr unterschiedlich und dauert je nach Spülzone und zu spülendem Leitungsvolumen von 55 Minuten bis zu sieben Stunden.

## FAZIT

Auf der Grundlage des hier beschriebenen Simulationsmodells können für nahezu alle Rohrnetze der Wasserverteilung Spülpläne mit Einsatzplänen für das Betriebspersonal vorbereitet werden. Somit stehen im hoffentlich nie eintretenden Störfall eine Strategie und ein Konzept bereit, die umsetzbar sind. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass durch die Spülung keine Unterversorgung eintritt und auch während der Spülung die Wasserversorgung zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist. Die Einsatzpläne enthalten im Wei-

teren Informationen über die Anzahl der einzusetzenden Mitarbeiter und Teams, über die Spüldauer und stellen den Erfolg der getroffenen Massnahmen sicher.

## > SUITE DU RÉSUMÉ

Le plan de rinçage est élaboré avec un programme de simulation qui adjoint au calcul hydraulique une modélisation du transport advectif de la concentration de contaminant. Les charges du réseau sont représentées par une courbe de charge typique de consommation ainsi que par des prises d'eau aux bornes incendie. Le réseau a été partagé en 18 petites zones de rinçage (de 400 m<sup>3</sup> à 4000 m<sup>3</sup>). Un plan de rinçage est élaboré séparément pour chaque zone. Jusqu'à 15 bornes peuvent être utilisées simultanément, toutefois en respectant les conditions hydrauliques en vigueur. Les bornes sont refermées lorsque la concentration locale du contaminant atteint moins de 0,5% de sa concentration initiale. Après une rotation du monteur en 10 minutes jusqu'à un autre emplacement de la zone de rinçage, une nouvelle borne peut être ouverte, jusqu'à ce que le volume total des canalisations rincées représente au moins 95% du volume total dans la zone de rinçage.

Il résulte de cette simulation que la durée de rinçage et la quantité d'eau nécessaire au rinçage augmentent avec le volume total de la zone de rinçage. Le volume d'eau de rinçage s'élève en moyenne à 2,6 fois le volume total de la zone. La durée varie de 55 minutes à 7 heures.

Le choix des bornes est représenté sur un plan pour chaque zone, ainsi que dans un tableau récapitulatif incluant l'heure d'ouverture et de fermeture de chaque borne. La progression du rinçage est représentée sur des plans pour chaque incrément de temps avec une coloration des tuyaux selon la concentration de contaminant. Avec cette méthode, des plans de rinçage peuvent être développés pour n'importe quel réseau de distribution d'eau afin d'être préparé à agir immédiatement le cas échéant.