



Schlussbericht

zum Teilvorhaben

„Systemanalytische Untersuchungen zur Vulnerabilität von Wasserversorgungsnetzen“

(Förderkennzeichen 13N10623)

im Verbundprojekt

Schutz der Trinkwasserversorgung vor Anschlägen mit CBRN-Stoffen

Phase 1: Konzeption und Strukturierung der Elemente des Risikomanagement-Ansatzes

Phase 2: Grundlegende Untersuchungen zur beispielhaften Umsetzung der Elemente des Risikomanagementansatzes



(STATuS)

zur Bekanntmachung

Schutz vor Ausfall von Versorgungsinfrastrukturen

Projektlaufzeit: 01.10.2009 – 28.02.2013

Ansprechpartner:

Herr Dipl.-Ing. Georg Käser

Tel.: +49 89 540414652
(kaeser@3sconsult.de)

Herr Dr.-Ing. Andreas Wolters

(Geschäftsführer)
Tel.: +49 89 540414650
(wolters@3sconsult.de)

Herr Dr.-Ing. Jochen Deuerlein

(Projektleiter)
Tel.: +49 721 33503360
(deuerlein@3sconsult.de)

INHALT

I.	KURZE DARSTELLUNG ZU	4
I.1	Aufgabenstellung	4
I.1.1	Risikoanalyse und Prävention (AP 2, AP 3a)	4
I.1.2	Projektierung und Inbetriebnahme Online-Simulationsmodell und Ausbreitungsversuche (AP 4b-1)	4
I.1.3	Möglichkeiten zu Abwehr und Reaktion bei Anschlägen mit CBRN-Stoffen (AP 4b-2)	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
I.4.1	3S Consult GmbH	7
I.4.2	Stand der Technik	8
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II.	EINGEHENDE DARSTELLUNG	12
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	12
II.1.1	Auswahl und Simulation von Kontaminationsszenarien [TP 2-2-2]	12
II.1.2	Risikoanalyse und Erstellung von Risikolandkarten [TP 2-2-3]	16
II.1.2.1	Definition Injektionsrisiko	16
II.1.2.2	Definition Kontaminationsrisiko	18
II.1.2.3	Risikolandkarten für die Pilotzone	21
II.1.2.3.1	Injektionsrisiko	21
II.1.2.3.2	Kontaminationsrisiko	25
II.1.3	Prävention - Angriffsresiliente Infrastrukturen [TP 3a-1 und TP 4b-1-1]	27
II.1.4	Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation von Schiebern zur Isolation kontaminierter Netzbereiche [TP 4b-1-2]	31
II.1.5	Detektierbarkeit von Druckstößen, die durch Rückpumpereignisse ausgelöst werden [TP 4b-1-5 und TP 4b-1-6]	33
II.1.6	Zusammenfassung/Stand der Zielerreichung nach Phase I	35
II.1.7	Projektierung , Implementierung und Inbetriebnahme eines Online-Simulationsmo- dells für die Pilotzone PL-S [TP 4b-1-8]	38
II.1.7.1	Mess- und Übertragungstechnik	38
II.1.7.1.1	Vorbemerkungen zur Messtechnik	38
II.1.7.1.2	Messtechnik – mobile Messapparatur	38
II.1.7.1.3	Messtechnik – ortsfeste Messapparatur	42
II.1.7.1.4	Messtechnik – KWL Leitsystem	43
II.1.7.1.5	Übertragungstechnik	44
II.1.7.1.6	Konfiguration Messtechnik	47
II.1.7.2	Online-Simulationsmodell	48
II.1.7.2.1	Vorbemerkungen	48
II.1.7.2.2	Randbedingungen der Online-Simulation	48
II.1.7.3	Einflussfaktoren auf Abweichung zwischen Messung und Rechnung	50
II.1.7.3.1	Modellierungsfehler:	50
II.1.7.3.2	SIR 3S Stofftransport Berechnungsalgorithmus	52
II.1.7.3.3	Messungenauigkeiten	53



II.1.7.3.4	Zeitverzug / Zeitungleichheit bei der Übertragung der Messdaten (Prozessdaten)	54
II.1.7.4	Durchführung der Messkampagne [TP 4b-1-9]	54
II.1.7.4.1	Überblick über den zeitlichen Ablauf aller Versuche	54
II.1.7.4.2	Überblick über den Ablauf eines Versuches	56
II.1.7.5	Erfahrungen aus der Versuchspraxis und Empfehlungen	56
II.1.7.5.1	Messtechnik	56
II.1.7.5.2	Hydraulik	58
II.1.7.5.3	Straßenabsperungen	58
II.1.7.5.4	Netzbetrieb	58
II.1.7.6	Ergebnisse, Vergleich Messung – Rechnung	59
II.1.7.6.1	Überblick	59
II.1.7.6.2	Lage der Messstellen und Ergebnisverlauf der wichtigsten Ereignisse:	60
II.1.7.6.3	Zeitkurven	61
II.1.7.6.4	Netzdarstellung – Ausbreitung der Fernwasserfront	67
II.1.7.7	Messung / Rechnung – Erfahrungen aus der Versuchspraxis	69
II.1.7.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	70
II.1.8	Netzspülung als Reaktion auf Kontamination des Wasserversorgungsnetzes [TP 4b-2-1]	72
II.1.8.1	Begriffe:	72
II.1.8.2	Kriterien	72
II.1.8.3	Softwaremodul FlushPlan	73
II.1.8.3.1	Übersicht	73
II.1.8.3.2	Erstellung des vollständigen Graphen	73
II.1.8.3.3	Ermittlung der spülbaren/nicht spülbaren Stränge	77
II.1.8.3.4	Ermittlung der Segmentgraphen	79
II.1.8.3.5	Ermittlung der Spülstrecken und Berechnung des Spülplans	79
II.1.9	Befragung von Wasserversorgern, Erarbeitung des Fragebogens zur Selbstevaluierung von Wasserversorgungsunternehmen bezüglich Gefährdung (TP 3a-1)	81
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	82
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	82
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	82
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	83
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	83
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		85



I. KURZE DARSTELLUNG ZU

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war es, durch Anwendung systemanalytischer Verfahren die Gefährdung der Bevölkerung durch Anschläge auf die Trinkwasserversorgung mit CBRN-Stoffen einzuschätzen und geeignete Gegenmaßnahmen zur Verringerung der Vulnerabilität zentraler Wasserversorgungseinrichtungen zu entwickeln.

I.1.1 Risikoanalyse und Prävention (AP 2, AP 3a)

Zunächst sollte im Rahmen einer Risikoanalyse durch die mathematische Simulation unterschiedlicher Anschlagsszenarien auf die Trinkwasserversorgung exemplarisch für die Versorgungsnetze der Projektpartner KWL (Kommunale Wasserwerke Leipzig) als städtisches Versorgungsunternehmen und ZVWKK (Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig) als regionaler Versorger, mögliche Auswirkungen eines Anschlags durch vorsätzliche Kontamination des Trinkwassers auf die Bevölkerung untersucht werden. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Untersuchung der Ausbreitungsmechanismen im Leitungsnetz differenziert nach Ort, Menge und Dauer der Einbringung toxischer Substanzen. Dazu wurden ausgewählte Zonen der Netze der Verbundpartner im Hinblick auf mögliche Kontaminationsquellen KWL untersucht und bezüglich ihres Risikos klassifiziert. Für das System der KWL wurde Kontaminationsquellen im innerstädtischen Bereich, an der Druckerhöhungsstation mit Speicherbehälter und auf Haupttransportleitungen betrachtet. Für das Leitungsnetz des ZVWKK wurden als repräsentative Szenarien die Kontamination des Zwischenspeicherbehälters und Einbringung einer Substanz durch Rückpumpen in einem Kontrollschacht ausgewählt.

Aus den Ergebnissen der szenarienbasierten Risikoanalyse sollten schließlich allgemeine Aussagen abgeleitet werden, die die Übertragung auf das Gesamtnetz und das Erstellen einer Risikokarte ermöglichen. Zusätzlich sollten Vorschläge für mögliche Umstrukturierungen des Trinkwasserversorgungsnetzes zur Verringerung der Vulnerabilität abgeleitet werden. Diese waren sowohl allgemein als auch spezifisch für die Netze der Projektpartner zu erarbeiten. Dazu gehörte auch die Untersuchung von alternativen Möglichkeiten zur Netzüberwachung und zur Detektion von Anschlägen. Es sollte z.B. untersucht werden, inwieweit Druckmessungen für die Detektion von Anschlägen auf die Trinkwasserversorgung durch Rückpumpen geeignet sind.

I.1.2 Projektierung und Inbetriebnahme Online-Simulationsmodell und Ausbreitungsversuche (AP 4b-1)

Ein bekannter Nachteil des Einsatzes von Simulationswerkzeugen ist die Tatsache, dass sämtliche Modellrechnungen auf einem definierten, für planerische Zwecke eingestellten Betriebszustand beruhen. Für den operativen Einsatz im Krisenfall ist ein solches planerisches Modell allerdings nur sehr begrenzt geeignet. Ein Schwerpunkt des Vorhabens bestand daher in der Projektierung und Inbetriebnahme eines Online-Simulationsmodells für eine Pilotzone der KWL. Im Gegensatz zu Offline-Modellen kann das Online-Simulationsmodell durch die Anbindung an das Prozessleitsystem des Wasserversorgers regelmäßig automatisch aktualisiert und damit sehr viel näher auf den tatsächlichen, aktuellen Betriebszustand des Versorgungssystems eingestellt werden.



Zur Überprüfung der Aussagekraft des Online-Simulationsmodells für Ausbreitungsrechnungen sollten im Netz der KWL Ausbreitungsversuche durchgeführt werden. Dazu wurden zusätzlich zu den vorhandenen Messwerten im Leitsystem mobile Qualitätssensoren in das Netz eingebaut. In unterschiedlichen Ausbreitungsversuchen wurde durch Öffnen eines Zonentrennschiebers Wasser mit abweichenden Eigenschaften in die Zone eingespeist. Die Mischung und der Transport der verschiedenen Qualitätseigenschaften (im Wesentlichen die elektrische Leitfähigkeit des Wassers) im Netz sollten sowohl messtechnisch als auch rechnerisch nachvollzogen werden.

I.1.3 Möglichkeiten zu Abwehr und Reaktion bei Anschlägen mit CBRN-Stoffen (AP 4b-2)

Da eine absichtliche Kontamination des Trinkwasserversorgungsnetzes trotz möglicher Präventionsmaßnahmen mit absoluter Sicherheit nicht auszuschließen ist, kommt der Erarbeitung von Maßnahmenplänen zur Reaktion nach einem geglückten Anschlag besondere Bedeutung zu. Im Rahmen des Vorhabens sollten neue Verfahren und Algorithmen zur Erhöhung der passiven Sicherheit und zur raschen Wiederinbetriebnahme der Wasserversorgung nach einer Kontamination erarbeitet werden.

Dazu gehörte die Entwicklung eines Softwaretools, welches die dynamische Berechnung der kontaminierten Leitungen und die Identifikation von Netztrennschiebern, die zur Isolation der Kontaminante in einem vom restlichen System getrennten Teilgebiet zu schließen sind, ermöglicht. Einen Schwerpunkt bildete die Entwicklung und Implementierung des Tools Flush-Plan zur automatisierten Ermittlung von Spülstrecken und Spülplänen, welches sowohl zur Planung effizienter Maßnahmen zur Dekontamination von Verunreinigungen betroffener Gebiete eingesetzt werden kann aber auch unter normalen Bedingungen die Planung von regelmäßigen Spülkampagnen erleichtert.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Auf Weisung des Mittelgebers wurde das Projekt in zwei Phasen durchgeführt. In der ersten Phase standen die Konzeption und Strukturierung des Risikoansatzes im Mittelpunkt der Arbeiten. Innerhalb des Teilvorhabens betraf dies die Durchführung einer ersten Risikoanalyse mit dem Ziel, die weiteren Forschungsarbeiten der Phase II festzulegen.

Gegenstand der Untersuchungen war jeweils eine Pilotzone der Wasserversorgungssysteme der Projektpartner ZVWKK und KWL. (Im Folgenden mit PZ-S: für städtische Pilotzone und PZ-R: für Pilotzone regionaler Versorger bezeichnet) Details zu den Pilotzonen können aus Gründen der Geheimhaltung nicht veröffentlicht werden. Im vorliegenden Abschlussbericht werden daher die Informationen zu den durchgeführten Untersuchungen anonymisiert dargestellt.

Als Datengrundlage konnte zum Teil auf bestehende Simulationsmodelle zurückgegriffen werden, zum Teil mussten die Daten mittels neu implementierter Schnittstellen aus den Referenzdatensystemen in die Simulationssoftware SIR 3S übertragen werden.

Die Untersuchungen konnten zum Teil mit dem bestehenden Leistungsumfang der Software SIR 3S bearbeitet werden. Zum Teil mussten neue Softwarebausteine entwickelt und implementiert werden.



I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war wegen der Komplexität und des Umfangs an Fragestellungen, die das Gesamtthema Sicherheit der Trinkwasserversorgung vor Anschlägen mit CBRN-Stoffen betreffen, in zwei Phasen gegliedert. In der ersten Phase sollten im Rahmen einer Risikoanalyse erste Untersuchungen zur Gefährdung durchgeführt und daraus der Forschungsbedarf für die zweite Phase abgeleitet werden.

Während Phase I vom 1. September 2009 bis 28. Februar 2011 lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf simulationsbasierten, systemanalytischen Untersuchungen zur Einschätzung des Risikos. Dafür wurden mehrere Referenzszenarien ausgewählt, simuliert und bewertet. Die Ergebnisse wurden in Form von Risikolandkarten für die Pilotzonen zusammengefasst. Des Weiteren wurden Maßnahmen und Risikominimierung abgeleitet. Die Arbeitsschwerpunkte in Phase I betrafen:

- Datenübernahme, Modellerstellung, Validierung (TP 2-2-1)
- Systemanalyse bezüglich der Vulnerabilität gegenüber Angriffen mit CBRN-Stoffen und Ermittlung erforderlicher Einspeisemengen basierend den Annahmen konservativen Verhaltens der Substanzen im Netz und vollständiger Durchmischung an den Knoten (TP 2-2-2).
- Ermittlung von Worst-Case-Szenarien (TP 2-2-3):
- Entwicklung allgemein gültiger kurzfristig umsetzbarer Maßnahmen zur Verminderung der Vulnerabilität von Versorgungsinfrastrukturen (TP 3a-1).
- Untersuchungen zur Strukturoptimierung der Verteilungsnetze der KWL und des ZVWKK zur Verringerung der Vulnerabilität gegenüber Angriffen mit CBRN-Substanzen (TP 4b-1-1).
- Entwicklung eines Algorithmus zur Bestimmung der Schieber zur Isolation kontaminierter Teilbereiche (TP 4b-1-2).
- Untersuchung zur Detektion von Anschlägen durch Druckmessungen (Druckstoßereignis) (TP 4b-1-5).
- Untersuchung, ob Druckmessungen im Falle eines Anschlages die rasche Lokalisierung des Einbringungsortes unterstützen können (TP 4b-1-6).
- Untersuchungen zur Entwicklung eines Verfahrens zur Allokation von Einbringungsorten anhand von Qualitätssensormessungen (TP 3b)

In der zweiten Phase, die sich über den Zeitraum vom 1. März 2011 bis zum 28. Februar 2013 erstreckte, wurden einerseits die Ergebnisse der Phase I algorithmisch umgesetzt. Dies betraf größtenteils Erweiterungen der Software SIR 3S; wo möglich wurden auch unabhängige Bibliotheken implementiert (FlushPlan, Erweiterungen der Bibliothek zur Analyse der Netztopologie). Andererseits wurde die Projektierung und Implementierung des Online-Simulationsmodells für eine ausgewählte Pilotzone im Trinkwasserversorgungsnetz der KWL mit anschließenden Ausbreitungsversuchen neu in der Liste der zu bearbeitenden Themen in Phase II aufgenommen. Dieser Teil war so in der ursprünglichen Antragstellung nicht vorgesehen. Aus den Ergebnissen der Phase I kristallisierte sich aber deutlich der Bedarf für eine solche Untersuchung heraus.



Die Arbeiten zur Errichtung des Online-Simulationsmodells setzten die umfangreiche Unterstützung durch die K LW und deren Bereitschaft zum Bau zusätzlicher Schächte im Leitungsnetz voraus. Zunächst konnten die erforderlichen Arbeiten, wie z.B. Anbindung der Simulationssoftware SIR 3S an das Leitsystem, wie geplant durchgeführt werden. Der Beginn der Ausbreitungsversuche verzögerte sich jedoch gegenüber dem ursprünglich vorgesehenen Zeitplan, da es bei der Errichtung der Kontrollschächte und dem Einbau der Messungen zu Verzögerungen kam. Auch bei der Durchführung der Versuche kam es durch Anwohnerbeschwerden und sich überschneidenden Rehabilitationsarbeiten im Netz zu Verzögerungen. Diese konnten später wieder aufgeholt werden, so dass zum Abschluss des Projektes drei erfolgreiche Ausbreitungsversuche zur Auswertung zur Verfügung standen. Eine Verlängerung der Projektlaufzeit musste nicht beantragt werden.

Die in Phase II durchzuführenden Arbeitsschwerpunkte im Teilvorhaben waren:

- Befragung von Wasserversorgern, Erarbeitung des Fragebogens zur Selbstevaluierung von Wasserversorgungsunternehmen bezüglich Gefährdung (TP 3a-1).
(Bemerkung: Später wurde entschieden, die Selbstevaluation nicht in Form eines Fragebogens sondern als Teil des Leitfadens aufzunehmen)
- Auswahl möglicher Standorte für Sonden in der PZ-S (TP 3b-4).
- A3: Parametrierung und Errichtung des Online-Simulationsmodells für die PZ-S (TP 4b-1-8).
- Untersuchungen zur Netzüberwachung, Verringerung der Vulnerabilität, Rückverfolgung, Einleitung von Gegenmaßnahmen auf Basis des Online-Simulationsmodells für die PZ-S (TP 4b-1-9)
- Entwicklung eines Werkzeugs (FlushPlan) zur automatisierten, rechnergestützten Ermittlung von Spülstrecken (TP 4b-2-1)
- Anwendung von FlushPlan auf die PZ-S (TP 4b-2-2)

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

I.4.1 3S Consult GmbH

3S Consult bietet seit über 20 Jahren Lösungen für die Berechnung, Simulation und Analyse von dynamischen Strömungsvorgängen in Rohrleitungssystemen. Das Spektrum der Engineering- und Beratungsleistungen reicht von der Modellerstellung und Kalibrierung bis hin zur Analyse, Bewertung und Optimierung von Systemen und Betriebsstrategien. Die Leistungen werden mit Hilfe der 3S Consult-eigenen Software SIR 3S erbracht, welche das gesamte Spektrum von stationärer hydraulischer Berechnung bis zur Simulation hoch instationärer Ereignisse und Druckstoßberechnungen in Rohrleitungssystemen abdeckt. Neben Wasser können alle möglichen Fluide von Gas und Öl über Dampf bis zu Produkten der petrochemischen Industrie simuliert werden. Je nach Anwendungsfall werden dazu vereinfachte Modelle oder auch 1:1-Modelle verwendet.



I.4.2 Stand der Technik

Grundlage aller Untersuchungen im Teilvorhaben ist die mathematische Simulation des Strömungsverhaltens in Rohrleitungssystemen. Die Geschichte der Rohrnetzberechnung reicht bis in die dreißiger Jahre des vorigen Jahrhunderts zurück (Cross, 1936). Die mathematischen Grundlagen wurden unter anderem beschrieben von Birkhoff (1963) Collins et al. (1978) und Nielsen (1989).

Der Einsatz hydraulischer Simulationsmodelle ist heute sowohl in Planung als auch Betrieb von Wasserversorgungsnetzen unverzichtbar. Mit der Software EPANET, die von der US Environmental Protection Agency entwickelt wurde (Rossman 2000), steht ein kostenloses Programm zur hydraulischen Berechnung von Wasserversorgungsnetzen und zur Ausbreitung von Qualitätsparametern zur Verfügung.

Seit den Anschlägen vom 11. September 2001 auf das World Trade Center in New York rückte die Gefahr einer absichtlichen Kontamination der Trinkwasserversorgung durch terroristisch motivierte Attentäter in den Mittelpunkt des Forschungsinteresses im Bereich der mathematischen Modellierung von Wasserversorgungssystemen (Allmann und Carlson, 2005; Kroll, 2006).

Ein Schwerpunkt der Forschung zur Prävention gegenüber Anschlägen mit CBRN-Stoffen im Versorgungsnetz lag in der Entwicklung von Sensoren und Frühwarnsystemen zur Detektion der Substanzen (Hart et al., 2010; Janke et al., 2008; Ostfeld und Salomons, 2003). Auf dem Gebiet der Modellierung entstanden eine Reihe von Werkzeugen zur optimalen Allokation der Sensoren im Verteilungsnetz (Murray et al., 2008; Ostfeld et al., 2008; Murray, 2007; Berry et al., 2006; Propato et al., 2005; Ostfeld und Salomons, 2004) und zur Identifikation der Kontaminationsquellen nach einem Sensoralarm (Wong et al., 2010; Preis und Ostfeld, 2008; Propato et al., 2007; Preis und Ostfeld, 2006; De Sanctis et al., 2006; Ostfeld und Salomons, 2005).

Zur optimalen Platzierung von Sensoren wird, ebenfalls von der US EPA, das Programmpaket TEVA-SPOT (US EPA, 2010; Berry et al., 2008) im Internet zum Download angeboten. Wenig Forschung wurde dagegen auf dem Gebiet der strukturellen Umgestaltung der Versorgungssysteme mit dem Ziel der Vulnerabilitätsminderung und besseren Überwachbarkeit zentraler Wasserversorgungssysteme betrieben.

Eine wichtige Rolle im Teilvorhaben kam der topologischen Analyse des Versorgungsnetzes und graphentheoretischer Untersuchungen zu (Diestel, 2005). Die Software SIR 3S[®] (Eigenentwicklung der 3S Consult GmbH) beinhaltet Module zur Dekomposition des Netzgraphen, welche vom Antragsteller entwickelt wurden (Deuerlein 2006, Deuerlein 2008) und eine adaptive, für die jeweilige Fragestellung optimale Modellierung sowie die im Rahmen von STATuS erforderlichen umfangreichen topologischen Untersuchungen ermöglichen. Die Graphendekomposition hilft einerseits einen besseren Überblick über die zumeist sehr komplexen Strukturen innerstädtischer Wasserversorgungsnetze zu bekommen, andererseits lassen sich viele Berechnungen wesentlich vereinfachen und die Rechenzeit drastisch verkürzen, was gerade im Hinblick auf die kurzen Reaktionszeiten im Falle eines Anschlages auf die Trinkwasserversorgung von großer Bedeutung ist. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der topologischen Betrachtungen ist die Unterteilung des Netzes in leichter überwachbare und besser zu kontrollierende Teilgebiete.



In der zweiten Phase des Vorhabens wurde ein Online-Simulationsmodell für eine ausgewählte Pilotzone projiziert, implementiert und anhand von Ausbreitungsversuchen validiert. Auf dem Gebiet der Echtzeitsimulation liegen weit weniger Erfahrungen vor. Auf Konferenzen wurde von ersten Installationen in Singapur (Whittle et al., 2010) und England (Matchell et al., 2010) berichtet.

Ähnlich wenig Material ist zur Planung von Netzspülungen mit klarer Wasserfront zu finden. Eine Ausnahme bilden die Veröffentlichungen von Haxton und Uber (2010) sowie Poulin et al. (2010). Von Walski (2006) wurde in anderem Zusammenhang eine Untersuchung zur Bedeutung der Lage von Netztrennschiebern durchgeführt, die auch zur Isolation einer Kontaminante im Netz sowie bei der Netzspülung von großer Bedeutung sind.

Eine zusätzliche Grundlage der Untersuchungen bildete das Regelwerk des DVGW (2008a, 2008b, 2004). Abschließend sei erwähnt, dass die aufgeführten Referenzen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Aufgrund der Vielzahl an Veröffentlichungen zum Thema können hier nicht alle genannt werden. Eine relativ große Anzahl der genannten Referenzen wurde während der Laufzeit des Vorhabens veröffentlicht.

REFERENZEN

- Allmann, T. P., Carlson, K. H. (2005): "Modeling Intentional Distribution System Contamination and Detection". Journal AWWA, No 1, 2005.
- Berry, J. ; Hart, W. E. ; Phillips, C. ; Uber, J. and Watson, J.-P. (2006) : "Sensor Placement in Municipal Networks with Temporal Integer Programming Models". J. Wat. Res. Planning and Manag. 132(4): 218-224.
- Berry, J. ; Boman, E. ; Riesen, L. A. ; Hart, W. A. ; Phillips, C. A. ; Watson, J.-P. and Murray, R. (2008) : "TEVA-SPOT Toolkit and user's manual". U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/041A, 2008.
- Birkhoff, G. (1963). "A variational principle for nonlinear networks". Quarterly of Applied Mathematics, 21(2), 160 – 162.
- Collins, M.; Cooper, L.; Helgarson, R.; Kennington, J. Le Blanc, L. (1978): "Solving the pipe network analysis problem using optimisation techniques". Management Science, 24(7), 747-760.
- Cross, H. (1936): "Analysis of flow in networks of conduits and conductors". University of Illinois, Engineering Experiment Station. Urbana Illinois. 286. Bulletin.
- Deuerlein, J. W. (2008): "Decomposition model of a general water supply network graph". ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 134, 6, 2008, 822 - 832.
- Deuerlein, J. (2006): "Efficient supply network management based on linear graph theory". 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium; Cincinnati, Ohio, USA; August, 2006.
- Diestel, R. (2005): "Graph Theory". Springer Verlag Heidelberg, New York, 3rd Edition, 2005.
- De Sanctis, A. E., Shang, F., and Uber, J. G. (2006): "Determining Possible Contaminant Sources through Flow Path Analysis". Cincinnati, Ohio, USA, printed by ASCE, Volume 247/, 124-124.
- DVGW (2008a) : "Technische Mitteilung, Hinweis W 1001, Sicherheit in der Trinkwasserversorgung – Risikomanagement im Normalbetrieb". 2008. ISSN 0176-3504.
- DVGW (2008b) : "Technische Regel, Arbeitsblatt W 410, Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen". DVGW, 2008. ISSN 0176-3504



- DVGW (2004) : "Technische Mitteilung, Hinweis W 400 - 1, Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen Teil 1 Planung". Bonn : DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., 2004. ISSN 0176-3504.
- Hart, D. B.; McKenna, S. A.; Murray, R. and Haxton, T. (2010): "Combining water quality and operational data for improved event detection". 12th Water Distribution System Analysis Symposium, Tucson, Arizona, USA, September 2010.
- Haxton, T. M. and Uber, J. (2010) : "Flushing Under Source Uncertainties". 12th Water Distribution System Analysis Symposium, Tucson, Arizona, USA, September 2010.
- Janke, R. J., Grayman, W.; Samuels, W.; TenBroek, M.; Steglitz, B. and Bahl, S. (2008): "Distribution System Monitoring Strategy for Detecting Contamination Events and Water Quality Changes". Journal AWWA. American Water Resources Association, Middleburg, VA, 100(7), 2008.
- Kroll, Dan (2006) : "Securing Our Water Supply: Protecting a Vulnerable Resource". Penn-Well Corp., 2006. ISBN-13: 978-1593700690.
- Machell, J.; Mounce, S. R. and Boxall, J. B. (2010): "Online modelling of water distribution systems: a UK case study". Drink. Water Eng. Sci., 3, 21–27, 2010, www.drink-water-eng-sci.net/3/21/2010/.
- Murray, R.; Baranowski, T.; Hart, W. E.; Janke, R. (2008): "Risk Reduction and Sensor Network Design". 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, Van Zyl, J.E., Ilemobade, A.A., Jacobs, H.E. (eds.), August 2008, Kruger National Park, South Africa.
- Murray, R. (2007): "SPOT-A Sensor Placement Optimization Tool for Drinking Water Contamination Warning System Design". In Proceedings, ASCE/EWRI Conference , Tampa, FL, May 01 - 31, ASCE, Reston, VA, 1-8, 2007.
- Nielsen, H. B. (1989). "Methods for analyzing pipe networks". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 115(2), 139-157.
- Ostfeld, A., and Salomons, E. (2003) : "An Early Warning Detection System (EWDS) for Drinking Water Distribution Systems Security". Philadelphia, Pennsylvania, USA, printed by ASCE, Volume 118/, 34-34.
- Ostfeld, A., and Salomons, E. (2004). "Optimal Layout of Early Warning Detection Stations for Water Distribution Systems Security". Journal of Water Resources Planning and Management, 130(5), 377-385.
- Ostfeld, A., and Salomons, E. (2005). "Solving the Inverse Problem of Deliberate Contaminants Intrusions into Water Distribution Systems." Anchorage, Alaska, USA, printed by ASCE, Volume 173/, 46-46.
- Ostfeld, A., Uber, J. G., Salomons, E., Berry, J. W., Hart, W. E., Phillips, C. A., Watson, J. P., Dorini, G., Jonkergouw, P., Kapelan, Z., Di Pierro, F., Khu, S. T., Savic, D., Eliades, D., Polycarpou, M., Ghimire, S. R., Barkdoll, B. D., Gueli, R., Huang, J. J., Mac Bean, E. A., James, W., Krause, A., Lescovec, J., Isovitsch, S., Xu, J., Guestrin, C., Van Briesen, J., Small, M., Fischbeck, P., Preis, A., Propato, M., Piller, O., Trachtman, G. B., Yi Wu, Z., and Walski, T. (2008). "The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): a design challenge for engineers and algorithms." Journal of Water Resources Planning and Management, 134(6), 556-568.
- Preis, A. and Ostfeld, A. (2008): "Genetic algorithm for contaminant source characterization using imperfect sensors". Civil Engineering and Environmental Systems, 25(1), 29 – 39, 2008.



- Preis, A. and Ostfeld, A. (2006): "Contaminant Source Identification in Water Systems : A Hybrid Model Trees – Linear Programming Scheme". Journal of Water Resources Planning and Management, 132(4), 263 – 273, 2006.
- Poulin, A.; Maihot, A. Periche, N. Delorme, L. and Villeneuve, J.-P. (2010): "Planning Unidirectional Flushing as a Response to Drinking Water Distribution System Contamination". Journal of Water Resources Planning and Management, 136(6), 647 – 657, 2010.
- Propato, M., Tryby, M. E., and Piller, O. (2007) : "Linear Algebra Analysis For Contaminant Source Identification in Water Distribution Systems". World Environmental and Water Resources Congress 2007, Tampa, Florida, USA, 10 pages.
- Propato, M., Piller, O., and Uber, J. G. (2005) : "A sensor location model to detect contaminations in water distribution networks". World Water and Environmental Resources Congress (EWRI05), Anchorage, USA, May 15-19, 2005, 12.
- Rossman, L. A. (2000) : "EPANET 2 Users manual". EPA/600/R-00/057, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- United States Environmental Protection Agency, EPA. (2010): "User's Manual TEVA-SPOT Toolkit Version 2.4". 2010.
- Walski, T. M. ; Weiler, J. S. and Culver, T. (2006) : "Using Criticality Analysis to Identify Impact of Valve Location". 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium; Cincinnati, Ohio, USA; August, 2006.
- Whittle, A. J.; Girod, L.; Preis, A.; Allen, M.; Lim, H. B.; Iqbal, M.; Srirangarajan, S.; Fu, C.; Wong, K. J. and Goldsmith, D. (2010): "WATERWISE@SG: A testbed for continuous monitoring of water distribution system in Singapore". 12th Water Distribution System Analysis Symposium, Tucson, Arizona, USA, September 2010.
- Wong, A. V.; McKenna, S. A.; Hart, W. E. and Laird, C. D. (2010): "Real-Time-Inversion and Response Planning in Large-Scale Networks". 20th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE20. S. Perucci and G. Buzzi Ferraris (Editors), Elsevier B. V.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit innerhalb des Vorhabens betraf ausschließlich die Projektpartner

- Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB), Karlsruhe,
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe,
- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH, Mülheim an der Ruhr,
- DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruhe und Dresden,
- bbe Moldaenke GmbH, Kronshagen,
- Kommunale Wasserwerke Leipzig (KWL)

und während Phase I den assoziierten Partner Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig (ZVWKK). Eine Zusammenarbeit mit Dritten war zur Durchführung des Vorhabens nicht erforderlich.



II. EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

PHASE I

II.1.1 Auswahl und Simulation von Kontaminationsszenarien [TP 2-2-2]

Die Grundlage für die Untersuchung unterschiedlicher Sicherheitsszenarien bildete die Erstellung von mathematischen Simulationsmodellen, mit denen sich die Hydraulik des Wasserversorgungsnetzes sowie die Ausbreitung von Substanzen im System rechnerisch nachvollziehen lassen. Simulationsmodelle wurden nach Übergabe der Daten durch die Projektpartner Kommunale Wasserwerke Leipzig (KWL) und den Zweckverband Wasserversorgung Kleine Kinzig (ZVWKK) sowohl für eine innerstädtisch geprägte Pilotzone (PZ-S) als auch für eine ausgewählte Pilotzone (PZ-R) im Versorgungssystem Kleine Kinzig, repräsentativ für Transportnetze regionaler Versorger, erstellt [TP 2-2-1]. Für jedes Versorgungsnetz waren je nach Fragestellung unterschiedliche Variantenmodelle aufzubereiten (differenziert nach Detaillierungsgrad, Art der Untersuchung, stationär – instationär, ...). Die PZ-S wird aus einem Speicherbehälter (Volumen: 12.000 m³) mit anschließender Druckerhöhung (DEST) versorgt.

Zu Beginn der Risikoanalyse wurden die Versorgungssysteme zunächst hinsichtlich ihrer Netztopologie untersucht. Diese beinhaltet die Zerlegung des Netzgraphen in verästelte Endstränge (graphentheoretisch Wald), vermaschte Bereiche und Verbindungsleitungen zwischen vermaschten Teilsystemen (Brücken). Während das Leitungssystem des ZVWKK aufgrund der ausgeprägten Transportstrukturen kaum Vermaschungen enthält, zeigt das Netz der PZ-S für städtische Versorgungssysteme typisch ausgeprägte vermaschte Bereiche auf. Das Ergebnis der Graphenzerlegung für die PZ-S ist in Abbildung 1 dargestellt.

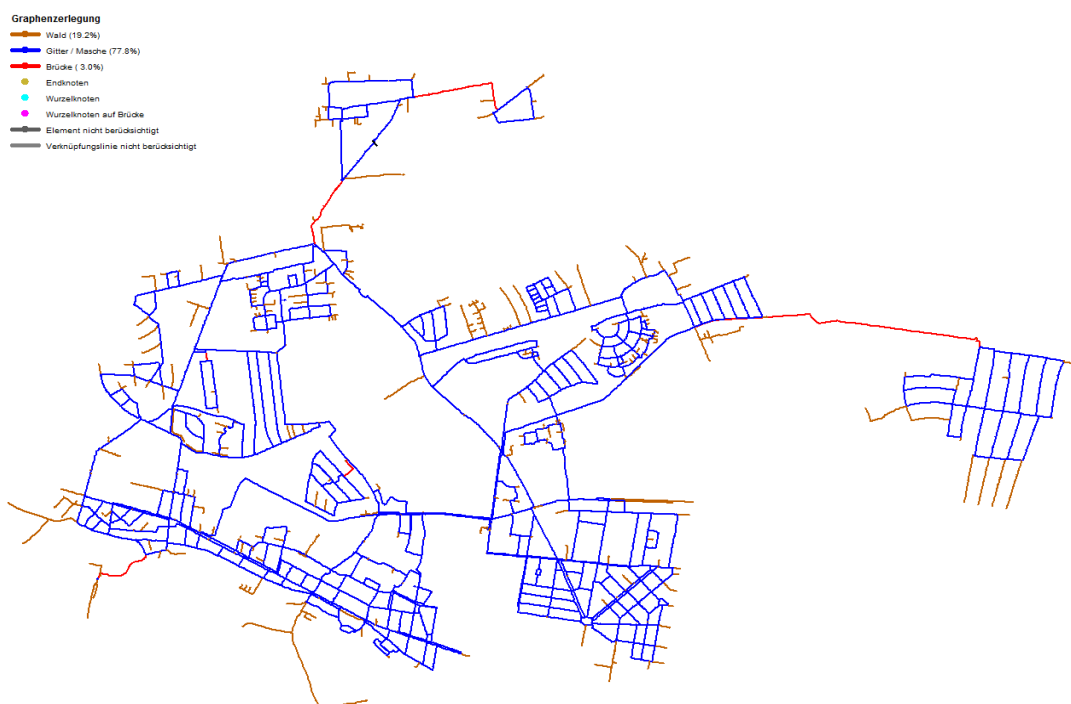


Abbildung 1 Graphentheoretische Analyse der städtischen Pilotzone (PZ-S)



Ein für die Risikoeinschätzung bedeutender Unterschied zwischen Brückenleitungen/Wald und vermaschten Teilsystemen besteht darin, dass in Brücken/Wald unabhängig vom aktuellen Betriebszustand die Fließrichtung eindeutig durch die Topologie vorgegeben ist. D.h. eine in den Wasserstrom eingebrachte Kontaminante kann sich nur unterhalb der Einbringungsstelle verteilen. Dieser Sachverhalt ist allerdings nur gültig unter der Annahme, dass die Kontaminante ohne zusätzliches Trägermedium direkt in den Wasserstrom der Leitung eingebracht wird, also nur ein geringer Mengeneintrag stattfindet. Wird dagegen unterstellt, dass eine größere Flüssigkeitsmenge bestehend aus toxischer Substanz und Trägermedium durch Rückpumpen in das Leitungsnetz eingebracht wird, kann es auch in den Verästelungsnetzen des Waldes zu einer Flussumkehr kommen, die schließlich zu einer Kontamination übergeordneter Hauptversorgungsleitungen führen kann.

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden daher relevante Sicherheitsszenarien festgelegt, die im Hinblick auf ihre Auswirkungen – repräsentiert durch die kontaminierte Wassermenge - und mögliche Abhilfenahmen beispielhaft durch Simulation der Ausbreitung der Kontaminante untersucht wurden. Dabei wurden Angaben der Wasserversorger über Zugangsmöglichkeiten zum Netz berücksichtigt. Die Sicherheitsszenarien unterschieden sich in der topologischen Lage des Einbringungsortes (Endstrang, Brückenstrang, vermaschtes Netz), Dauer des Eintrags und der dem Netz von außen zugeführten kontaminierten Wassermenge.

Insgesamt wurden drei graphentheoretische Brückenleitungen (also Rohre mit eindeutiger Fließrichtung), ein Endstrang, zwei Orte im vermaschten Netzgebiet sowie der Speicherbehälter als zu untersuchende Anschlagsorte ausgewählt. Es wurde als Worst-Case-Annahme die Detektion der Kontamination über Sensoren ausgeschlossen. Als Dauer für die Einbringung wurden 5 h, 12 h und 74 h gewählt. Die 5-stündige Einbringungsdauer wurde zusätzlich für die unterschiedlichen Startuhrzeiten 0:00 Uhr und 7:00 Uhr simuliert.

Die einzelnen Szenarien wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Bevölkerung untersucht. Dazu wurde vereinfachend angenommen, dass die Konzentration auch nach Durchmischung mit Frischwasser noch toxisch wirkt. Die Auswirkung (engl. Impact) wurde dann anhand der kontaminierten Wassermenge ermittelt. Die Anzahl der betroffenen Personen ergibt sich näherungsweise aus der kontaminierten Wassermenge pro Tag geteilt durch den spezifischen Tagesbedarf. Eine Differenzierung nach Verbrauchern, die Wasser für Produktionszwecke benötigen (Industrie, Handwerk), wurde nicht durchgeführt.

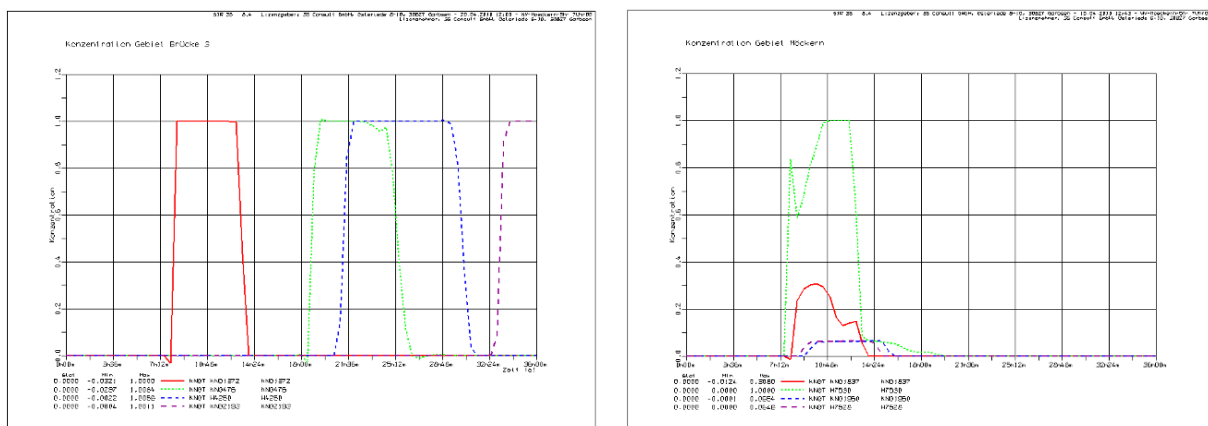


Abbildung 2 Konzentrationsverlauf nach Einbringung an Bücke (links) und im vermaschten Bereich (rechts)



Der zeitliche Verlauf der Konzentrationen hängt maßgeblich vom Ort der Einbringung ab. Wird die Substanz über den Behälter oder über eine Brückenleitung eingebracht, so sind eine Durchmischung mit Frischwasser und damit eine Verringerung der Konzentration ausgeschlossen. Im vermaschten Bereich kommt es dagegen häufiger zu Vermischungen mit sauberem Wasser, was einen Abfall der Konzentration zu Folge hat (siehe Abbildung 2).

Als Worst-Case-Szenario [TP 2-2-3] wurde erwartungsgemäß die Kontamination des Speicherbehälters mit einer ausreichend hohen Konzentration ermittelt. Nach 24 h Simulationszeit sind weite Teile des Versorgungssystems kontaminiert. Das große Speichervolumen (12.000 m³) erfordert allerdings eine hohe Menge toxischer Substanz, um eine solche Konzentration zu erreichen.

Eine zusätzliche für die Ermittlung der Gefährdung durch Anschläge in Stichleitungen und Hausanschlüssen (topologisch: Wald des Netzgraphen) wesentliche Unterscheidung betrifft die Menge/Zeit, mit der die Substanz eingebracht wird. Wird unterstellt, dass die Substanz zunächst mit einem Trägermedium (Wasser) vermischt und hinterher ins Netz gepumpt wird, ergibt sich ein sprunghafter Anstieg der Auswirkungen eines Anschlags, sobald genügend kontaminiertes Wasser in das Netz gepumpt wird, um die nächste größere Versorgungsleitung zu erreichen. Eine untere Grenze für diese Menge ist das Rohrvolumen zwischen Hauptleitung und Einbringungsort. Dazu kommt der Verbrauch der über die Stichleitung angeschlossenen Verbraucher. Solange die einbrachte Wassermenge den Schwellenwert nicht überschreitet, bleibt die Kontamination lokal begrenzt. Nach einem Überschreiten des Grenzwertes erreicht das kontaminierte Wasser die Hauptleitung, und die Substanz wird von der Strömung der Hauptleitung mitgerissen und wesentlich schneller und weiter verteilt als bei lokaler Begrenzung (Deuerlein et. al. 2010; Deuerlein und Wolters 2011). Dieser Sachverhalt wurde von bisherigen Forschungsarbeiten weitestgehend vernachlässigt, da zumeist von einer festen, konstanten Einbringungsmenge ausgegangen wird (siehe TEVA-SPOT u.ä.).

Als Beispiel für ein regionales Versorgungssystem wurde der sogenannte Weststrang des Zweckverbandes Wasserversorgung kleine Kinzig modelliert und zwei unterschiedliche Anschlagsszenarien simuliert: Speicherbehälter und Kontrollschacht. Ein wesentlicher Unterschied zur Zone PZ-S besteht neben der langgestreckten, nicht vermaschten Topologie im Abnahmeverhalten. Beim regionalen Versorger schwanken die Abnahmen räumlich und zeitlich sehr stark, da die meisten Verbandsmitglieder über zusätzliche eigene Quellen verfügen und das Wasser des ZVWKK nur als Zusatzversorgung betrachten. Ein Übergabebehälter dient dabei als Puffer und trennt das Leitungsnetz des ZVWKK vom eigentlichen Versorgungssystem. Entnahmen entstehen dadurch räumlich und zeitlich entkoppelt vom eigentlichen Bedarf der Konsumenten. Beispielfhaft wurde eine übliche Verbrauchsganglinie für die Übernahme des Fernwassers hinterlegt und die Ausbreitung der Substanz simuliert.

Bei der Vorhersage der Ausbreitung einer Kontaminante im Netz führt die unbekannte Lastverteilung zu einer größeren Unschärfe als dies im städtischen System der Fall ist. Da die Anzahl der Übergabestellen wesentlich geringer ist als im städtischen System, könnte die Installation von Online-Verbrauchsmessungen zu einer erheblich besseren Einschätzung des aktuellen Lastzustandes beitragen. Die Simulation auf Basis der zugrunde gelegten Lastprofile zeigte, dass sich ausgehend vom kontaminierten Speicherbehälter eine Kontaminante binnen 24 h über das gesamte unterstrom gelegene Versorgungssystem ausgebreitet hätte.



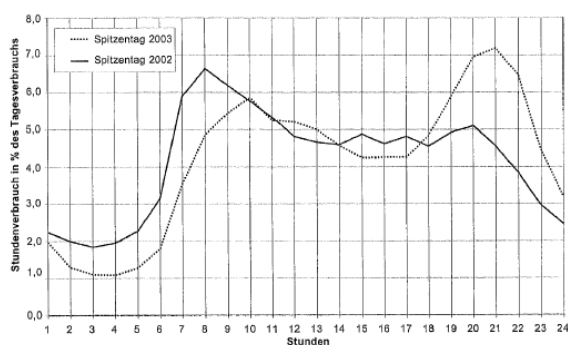
Die Ergebnisse der Simulation ausgewählter Kontaminationsszenarien zeigten, dass wesentlich für das Ausmaß des Schadens die Nähe des Einbringungsortes zu Hauptleitungen mit hohen Durchflussmengen verantwortlich ist. In den untersuchten vermaschten Gebieten beschränkte sich die Ausbreitung auf ein weit kleineres Gebiet als erwartet. Jedoch hängt im vermaschten Teil des Netzes die Ausbreitung und auch die Durchmischung sehr stark vom aktuellen Betriebszustand und der tatsächlichen Verteilung der Entnahmemengen ab. Sogenannte Brückenleitungen dagegen „kanalisieren“ den Strom kontaminierten Wassers und halten die hohe Konzentration in allen unterstrom gelegenen Gebieten aufrecht. Bei Anschlägen im Hausanschlussbereich ist für die Größe des Schadens die Menge des eingebrachten kontaminierten Wassers maßgebend. Um einen Schaden zu erzeugen, der über den lokalen Einflussbereich der Hausanschlussleitungen hinausgeht, muss das anstehende Wasservolumen der Hausanschlussrohre verdrängt werden. Wird der dadurch vorgegebene Grenzwert überschritten, hat das einen sprunghaften Anstieg der Auswirkungen zur Folge, ansonsten bleibt die Kontamination lokal auf die Baumstruktur begrenzt.

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der Simulation von Anschlagsszenarien stichpunktartig zusammengestellt:

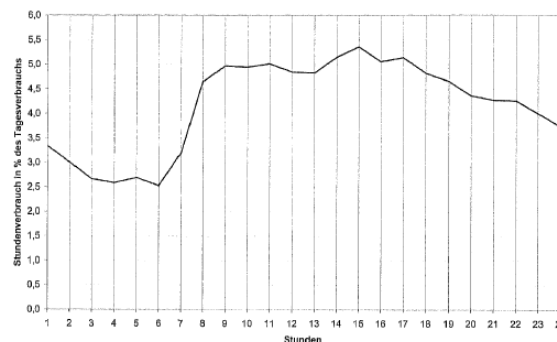
- Anschläge auf graphentheoretische Brückenleitungen erhalten eine hohe Konzentration aufrecht, da keine Durchmischung mit Frischwasser möglich ist. In Abhängigkeit der Laufzeit kann das gesamte Gebiet stromabwärts mit hoher Konzentration kontaminiert werden.
- In den untersuchten vermaschten Gebieten ist die Ausbreitung relativ stark begrenzt. Ab einer gewissen Laufzeit ist keine weitere Ausbreitung mehr möglich. Die Konzentrationen werden dabei durch Durchmischung verringert.
- Für die Auswirkung und den Schaden ist maßgeblich die Nähe zum Behälter ausschlaggebend.
- In Sticheleitungen muss ein mehr oder weniger großes Volumen verdrängt werden, um mit der toxischen Substanz in das Hauptverteilungsnetz zu gelangen.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Giftstoffs ist abhängig Strömungsfeld und damit auch von den Verbrauchsschwankungen. Für städtische Versorgungsgebiete mit hohem Gewerbeanteil ist der Tagesgang relativ ausgeglichen. Die Schwankungen ergeben sich im Wesentlichen durch den Unterschied im Tages- bzw. Nachtverbrauch. Bezüglich der Ausbreitungsgeschwindigkeit herrschen daher relativ konstante Verhältnisse. Hingegen treten in ländlicheren Versorgungsgebieten stärkere Verbrauchsschwankungen auf, die die Giftstoffausbreitung in stärkerem Maße beeinflussen.
- Gemäß DVGW Arbeitsblatt W 400 (DVGW, 2004) ist für die Bemessung von Zubringer-, Haupt- und Versorgungsleitungen der Stundenspitzendurchfluss anzusetzen. Aufgrund der relativ ungleichmäßigen Ganglinien (s. Schwankungen in Tagesganglinie) für ländliche Versorgungsgebiete ist davon auszugehen, dass der Bemessungsfall sich sehr selten einstellt. Hingegen für städtische Versorgungsgebiete häufiger, da dort die Verbrauchsschwankungen geringer ausfallen. Im Hinblick auf die Fließgeschwindigkeiten ist folglich zu erwarten, dass aufgrund der Verbrauchsschwankungen die durchschnittlichen Geschwindigkeiten in ländlichen Versorgungsgebieten geringer sind als in städtischen Versorgungsgebieten. Demgemäß ist zu er-



warten, dass sich Giftstoffe in städtischen Versorgungssystemen schneller ausbreiten als in ländlichen Versorgungsgebieten.



Ländliches Versorgungsgebiet



Städtisches Versorgungsgebiet

Abbildung 3 Tagesganglinien für Versorgungsgebiete unterschiedlicher Größe

II.1.2 Risikoanalyse und Erstellung von Risikolandkarten [TP 2-2-3]

II.1.2.1 Definition Injektionsrisiko

Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden zur Formulierung eines allgemeinen mathematischen Ansatzes für das Risiko eines allgemeinen Punktes P im Netz verwendet. Dabei wurde unterschieden in

- Injektionsrisiko: Risiko für das restliche System, das von P als Kontaminationsquelle ausgeht
- Kontaminationsrisiko: Risiko von P, von Kontamination anderswo betroffen zu sein

Ganz allgemein ist das Risiko eines Ereignisses definiert als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung des Ereignisses. Während die Auswirkung noch relativ zuverlässig anhand der Menge kontaminierten Wasser abgeschätzt werden kann, die mit Hilfe des hydraulischen Simulationsmodells wie oben gezeigt berechenbar ist, bereitet die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit weit größere Schwierigkeiten. Da die absolute Eintrittswahrscheinlichkeit eines terroristischen Anschlags auf die Wasserversorgung nicht angegeben werden kann, wurde für diesen Zweck eine relative Eintrittswahrscheinlichkeit definiert, die die unterschiedlichen möglichen Einbringungsstellen im Verteilungssystem gegenüberstellt. Ohne dass das Risiko wirklich quantifizierbar ist, lassen sich auf diese Weise trotzdem die am meisten gefährdeten Stellen ermitteln.

Im Rahmen der Untersuchungen in STATuS wurden exemplarisch die folgenden Kriterien zur Abschätzung der relativen Wahrscheinlichkeit einer Kontamination verwendet:

- Zugänglichkeit des Einbringungsortes (P_{Acc})
- Gefahr für den Attentäter, entdeckt zu werden (P_D)
- „Attraktivität“ der umliegenden Gebäude (P_{Att})

Für die weitere Vorgehensweise wurde unterstellt, dass unterschiedlichen Einbringungsorten je nach Anschlusstyp unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können. Dabei ging es hier weniger um eine möglichst genaue Bestimmung dieser Werte als vielmehr darum, die prinzipielle Anwendbarkeit der Methode aufzuzeigen. Für spätere Anwendungen



kann die Liste der zu berücksichtigenden Parameter beliebig erweitert oder modifiziert werden. Bei der Berechnung des Risikos wurden zwei Varianten unterschieden:

$$RI_i = \underbrace{\frac{\sum_{i=1}^{n_s} \bar{Q}_{o,i}}{Q_{total}}}_{\text{Imp}_i} \cdot \underbrace{(1 - P_{i_D}) \cdot P_{i_{Acc}} \cdot P_{i_{Att}}}_{P_i} \quad \quad \quad RI_i = \underbrace{\int_0^{(1-P_{i_D}) \cdot t_{\max}} \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \bar{Q}_{o,i}(t)}{Q_{total}(t)} dt}_{\text{Imp}_i} \cdot \underbrace{(1 - P_{i_D}) \cdot P_{i_{Acc}} \cdot P_{i_{Att}}}_{P_i} \quad (II.1)$$

„Stationäres“ Risiko

„Instationäres“ Risiko

Dem „stationären“ Risiko liegt der Berechnung der Auswirkung einer Kontamination eine stationäre Betrachtung der Netzhydraulik zu Grunde. Die Auswirkung (Impact) wird stark vereinfacht als Verhältnis des kontaminierten Flüssigkeitsstroms zur Gesamtnetzeinspeisung angegeben. Für Wassernetze bzw. Versorgungsgebiete mit nur einer Einspeisequelle entspricht der Durchfluss am Ausgang des Behälters der Gesamtnetzeinspeisung. D.h. bei Kontamination des Behälters ist das Verhältnis kontaminierter Flüssigstrom zur Gesamteinspeisung = 1. Das Schadensausmaß ist in diesem Fall maximal.

Bei der „instationären“ Betrachtung wird der kontaminierte Flüssigkeitsstrom über die Anschlagsdauer integriert. Dadurch geht die Wahrscheinlichkeit entdeckt zu werden zweimal ein: beim Impact und bei der Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit, entdeckt zu werden, wurde daher als wichtigstes Kriterium für die Auswahl eines bestimmten Anschlagsortes identifiziert.

Tabelle 1: Annahmen für relatives Risiko (exemplarisch)

Anlageart	PD	Pacc	Patt	Pi
Bürogebäude	0.8	0.5	0.4	0.04
Einfamilienhaus / Reihenhaushaus	0.1	0.7	0.4	0.252
Einfamilienhaus mit Gewerbe	0.2	0.65	0.4	0.208
Garten	0.15	0.9	0.4	0.306
Gewerbegebäude	0.8	0.5	0.4	0.04
KGV	0.15	0.85	0.4	0.289
Mehrfamilienhaus	0.5	0.4	0.4	0.08
Mehrfamilienhaus mit Gewerbe	0.6	0.35	0.4	0.056
Wohnblock	0.8	0.4	0.5	0.04
Wohnblock mit Gewerbe	0.9	0.5	0.5	0.025
Wohnung - Sonstiges	0.1	0.7	0.5	0.315

Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Verbraucher werden zur Risikoberechnung den Knoten des Netzmodells zugeordnet. Die resultierende Eintrittswahrscheinlichkeit am Knoten, falls mehrere Verbraucher einem Knoten zugeordnet sind, wird analog der Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Parallelschaltungen berechnet:

$$P_{i,res} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_{i,i}) \quad (II.2)$$

Wie schon festgestellt lassen sich die absoluten Eintrittswahrscheinlichkeiten für einen Anschlag nicht quantifizieren. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten beruhen immer auf einer individuellen, relativen Einschätzung, die bei praktischer Anwendung der Methode mit dem jewei-



ligen Wasserversorgungsunternehmen abzustimmen ist. Gefahrenstellen mit hohem Schadensausmaß sollten daher unabhängig von der angenommenen Eintrittswahrscheinlichkeit immer in die höchste Risikoklasse eingestuft werden analog Abbildung 4. Das Schadensausmaß lässt sich im Gegensatz zur Eintrittswahrscheinlichkeit relativ genau anhand des mathematischen Ansatzes bestimmen, solange unterstellt wird, dass die Menge getrunkenen oder für die Körperhygiene verwendeten Wassers innerhalb des Versorgungsgebietes nicht zu unterschiedlich verteilt ist. Befinden sich z.B. gewerbliche oder industrielle Großabnehmer, die das Wasser aus dem Trinkwasserversorgungssystem ausschließlich für die Produktion einsetzen, müssen die entsprechenden Mengen bei der Berechnung des Risikos herausgenommen werden.

U.a. aufgrund der für einen Attentäter vergleichsweise hohen Gefahr, in innerstädtischen Bereichen entdeckt zu werden, wird einem Anschlag über Netzarmaturen eine niedrigere Eintrittswahrscheinlichkeit beigemessen als einem Anschlag über Hausanschlüsse. Im Rahmen der Risikoanalyse dieser Studie wurde daher im speziellen das Risiko von Anschlägen auf Hausanschlussleitungen näher untersucht. Die Ergebnisse dieser Risikoabschätzung wurden verwendet, um eine Risikolandkarte zu erstellen (s. Kap.II.1.2.3).

		Schadensausmaß		
		GERING	MITTEL	HOCH
Eintrittswahrscheinlichkeit	GERING	Niedriges Risiko	Niedriges Risiko	Hohes Risiko
	MITTEL	Niedriges Risiko	Mittleres Risiko	Hohes Risiko
	HOCH	Mittleres Risiko	Hohes Risiko	Hohes Risiko

Abbildung 4 Matrix zur Risikoabschätzung (DVGW, 2008)

Gegebenenfalls können analog zur Tabelle 1 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Giftanschlägen über Netzarmaturen (Hydranten / Schächte (Kontrollschächte...) / Be- und Entlüftungsventile von Rohrleitungen) bestimmt werden. Hierzu könnten z.B. die Größe der Straße, das Verkehrsaufkommen in der jeweiligen Straße oder die Lage der Armatur innerhalb der Siedlung bei der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten einfließen. Jedoch ist es aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren schwierig, repräsentative Eintrittswahrscheinlichkeiten zu definieren, die den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort gerecht werden.

II.1.2.2 Definition Kontaminationsrisiko

Das Injektionsrisiko beschreibt das Risiko einer Giftstoffinjektion an der jeweiligen potenziellen Eintragsstelle. Hingegen gibt das Kontaminationsrisiko an, wie groß das Risiko am jeweiligen Punkt ist, infolge eines Anschlages mit Giftstoff kontaminiert zu werden.



Analog der Definition des Injektionsrisikos ergibt sich das Kontaminationsrisiko aus dem Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß.

$$RC_i = \frac{\sum Q_i}{Q_{total}} \cdot IF \cdot \frac{\sum_{j \in \text{Upstream}(i)=f(t)} P_j}{P_{total}} \quad (11.3)$$

Die Eintrittswahrscheinlichkeit am Knoten i ergibt sich durch die Summe über alle Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Knoten j . Die Injektions-Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Knoten j entsprechen den Eintrittswahrscheinlichkeiten aus der Injektionsrisikoberechnung (s. Tabelle 1). Die Menge aller Knoten j umfasst diejenigen Knoten, die potenzielle Giftstoffeintragsstellen sind und im Anschlagsfall zu einer Giftstoffkontamination am Knoten i führen können. Hierzu gehören auch diejenigen stromabwärtsgelegenen Knoten bzw. Eintragsstellen, die durch Strömungsumkehrung mittels einer Pumpe zu einer Giftstoffkontamination am Knoten i führen können. Die Menge der Knoten j ist dabei abhängig der Dauer des Anschlags. Die Fließzeit entspricht der max. Zeitspanne, die das kontaminierte Wasser vom Knoten j zum Knoten i unterwegs ist. Sie ist vom Anwender festzulegen und limitiert die Menge aller Knoten j . Große Fließzeiten unterstellen, dass der Giftstoff nach Eintragung sich „ungestört“ ausbreiten kann ohne dass Maßnahmen zur weiteren Unterbindung der Giftstoffausbreitung vorgenommen werden. Kleine Fließzeiten unterstellen hingegen, dass nach erfolgter Detektion des Kontaminationsereignisses Maßnahmen zur Begrenzung der Ausbreitung des Giftstoffs unmittelbar und erfolgreich eingeleitet wurden.

Als primäres Täterziel wurde das Bewirken von gesundheitlichen und / oder psychologischen Beeinträchtigungen unterstellt (vgl. Riegel und Bethmann, 2010). Bei der Berechnung des Kontaminationsrisikos wird daher das Schadensausmaß gemessen an der Zahl der potenziellen kontaminierten Personen. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die Zahl der Anschlagsoffer an einem Anschluss abhängig ist von der Entnahme am Knoten i . Dies ist eine starke Vereinfachung, da allgemein in Versorgungsgebieten zwar überwiegend Anschlüsse der Kundengruppe Wohnhaus existieren jedoch aber auch Anschlüsse der Kundengruppe Gewerbe, Industrie, Krankenhäuser etc. mit betriebsbedingter Abnahme. Für letztere ist eine Aussage über unmittelbare gesundheitliche Folgen bei Giftstoffkontamination des Anschlusses sehr schwierig, da die Wasserabnahme dieser Kunden nicht allein auf den Wasserkonsum von Personen zurückgeht, sondern vielmehr betriebsbedingt ist. Da die Vergiftung der betriebsbedingten Abnahme im Allgemeinen keine unmittelbare Gesundheitsgefährdung bedeutet, würde bei Vernachlässigung des betriebsbedingten Verbrauchs das gesundheitliche Schadensausmaß von Kunden mit hoher betriebsbedingter Abnahme stark überschätzt werden. Zur Berücksichtigung der betriebsbedingten Entnahme gewerblicher Kunden wird daher das Schadensausmaß am Knoten i mit einem Skalierungsfaktor (IF) multipliziert. Der Skalierungsfaktor ist typischerweise umso kleiner je größer der betriebsbedingte Verbrauch¹. Bei der Bestimmung der hier definierten Skalierungsfaktoren IF flossen Erfahrungswerte des Wasserverbrauchs je Verbrauchseinheiten aus der Literatur ein (vgl. Mutschmann und Stimmelmayer, 2002).

¹ Anmerkung: Durch groß gewählte Skalierungsfaktoren für Wasserkunden mit hoher betriebsbedingter Entnahme kann der wirtschaftliche Schaden berücksichtigt werden. Es würde suggeriert werden, dass der wirtschaftliche Schaden proportional abhängig ist von der Entnahme.



Für gewerbliche Kunden, deren Verbrauch stark abhängig ist von der Personenzahl (z.B. Krankenhäuser, Schulen etc.), beziehen sich die Erfahrungswerte der Literatur auf die Zahl der Personen am Anschluss. Der Erfahrungswert je Verbrauchseinheit von Krankenhäusern bezieht sich z.B. auf die Zahl der Patienten (P_a) bzw. Personal (A). Er beträgt $350 \text{ l}/((P_a+A)*d)$. Mithilfe der Erfahrungswerte zum Wasserverbrauch je Verbrauchseinheit kann unter Kenntnis des Verbrauchertyps die Zahl der Personen an jedem Anschluss approximiert werden. Da die Information über den Verbrauchertyp zu jedem Kunden im Versorgungsgebiet bekannt ist, kann diese Information zur Bestimmung der Zahl der versorgten Personen an jedem Anschluss verwendet werden. Die Skalierungsfaktoren, die im Rahmen dieser Studie verwendet wurden, sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Sie wurden so gewählt, dass sie das Schadensausmaß von Kunden mit angenommenem, geringem getrunkenen Trinkwasserkonsumanteil kleinskaliert wird. Da die Skalierungsfaktoren auf Anhaltswerte aus der Literatur und eigenen Einschätzungen beruhen, stellen sie keine Absolutwerte dar. Bei anderweitiger Einschätzung können sie gegebenenfalls geändert werden.

Tabelle 2: Definierte Skalierungsfaktoren i.A. von der Kundengruppe

Lfd. Nr.	Kundengruppe	Anz. im Versorgungsgebiet	I-Factor
1	Eigenverbrauch KWL	3	12
2	Garten	194	267
3	Gartenvereine	29	267
4	Gewerbe (Handwerker, Kleinbetriebe)	78	168
5	Hoch- u. Fachschulen, Lehrlingsausbildg.	2	62
6	Industrie - sonstiges	1	2
7	Industrie (ohne 14000 / Nahrungsmittel)	9	2
8	Justiz, Polizei, Armee, Feuerwehr, JVA	7	140
9	Kita & Schulen	27	2.400
10	Krankenhäuser, Kliniken, Ärztehäuser	3	96
11	Kultur & Sport	4	336
12	Land-, Forstwirtschaft und Fischzucht	5	2
13	Öffentliche Bedarfsträger -Sonstiges-	11	140
14	Restaurants, Kantinen, Bars, etc.	1	720
15	Schwimmbhallen, Freibäder etc.	2	120
16	sonstige Dienstleistung	32	140
17	Sonstiges / nicht zuzuordnen	7	140
18	Stadt- und Gemeindeverwaltung	9	140
19	Verkaufseinrichtungen, Kaufhallen etc.	2	280
20	Wohnhäuser	5.558	200
Summe		5.984	

Zur Ermittlung des Kontaminationsrisikos werden genauso wie bei der Ermittlung des Injektionsrisikos weder Durchmischungs- noch Zersetzungsvorgänge bei der Ausbreitung innerhalb der Versorgungssystems berücksichtigt. Es wird auch hier vom Worst-Case-Szenario ausgegangen, dass unabhängig von der Giftstoffkonzentration kontaminiertes Wasser maximal gesundheitsgefährdend ist. Aufgrund dieser starken Vereinfachung wurden in Phase 2



Feldversuche durchgeführt, um die Ausbreitungsprozesse zu untersuchen und evaluierte Algorithmen zur Schadstoffausbreitung abzuleiten.

II.1.2.3 Risikolandkarten für die Pilotzone

II.1.2.3.1 Injektionsrisiko

Wie oben erläutert, werden zur Berechnung des Risikos zusätzliche Informationen zur Klassifizierung der Verbraucher benötigt, die für herkömmliche hydraulische Simulationsrechnungen nicht relevant sind. Um den einzelnen Netzknoten des hydraulischen Simulationsmodells diese Kriterien zuzuordnen zu können, wurde die Software SIR 3S[®] um die Anzeige der unterschiedlichen Hausanschlusstypen erweitert. Dazu mussten das Datenbankgerüst, die Schnittstellen und die graphische Benutzeroberfläche angepasst werden. Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt der untersuchten Pilotzone. Die unterschiedlichen Anschlussleitungen sind farbig dargestellt: blau: Einfamilienhaus, gelb: Industriebetrieb, violett: Mehrfamilienhaus, rot: Wohnblock, grün: Garten. Solche Informationen liegen in der Regel den Wasserversorgungsunternehmen in der Verbrauchsabrechnungssoftware oder im Geoinformationssystem und können über spezielle Schnittstellen in die Simulationssoftware übernommen werden.

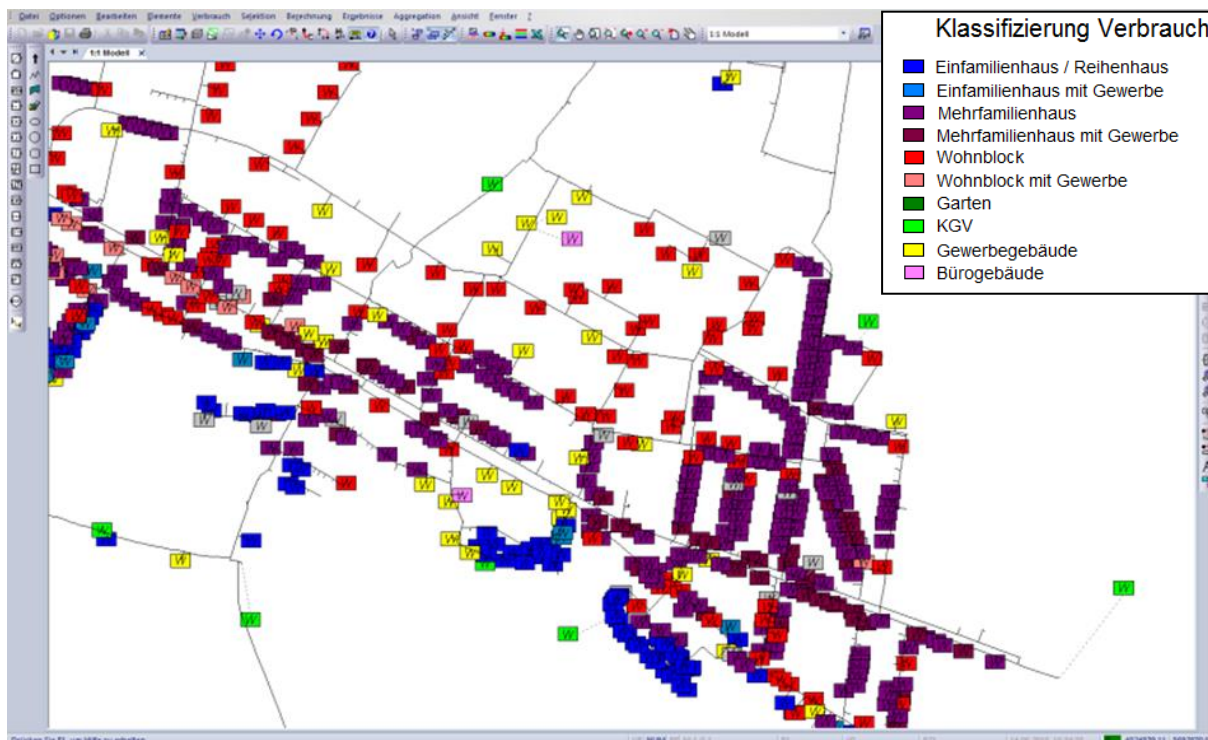


Abbildung 5 Klassifizierung der Verbraucher (Hausanschlüsse) im hydraulischen Simulationsmodell

Der Großteil der Wasserkunden innerhalb der Pilotzone gehört der Kategorie Wohnhäuser (Einfamilienhaus / Reihenhäuser; Wohnblock) an. Hingegen ist der Anteil an Gewerbeanschlüssen relativ gering. Das Versorgungsgebiet entspricht daher eher einem Wohngebiet. Die Anzahl der jeweiligen Anlagearten innerhalb der untersuchten Pilotzone PZ-S sind in Tabelle 3 zusammengestellt.



Tabelle 3: Anzahl Verbraucher je Anlageart

Anlageart	Anz. im Versorgungsgebiet	Anteil %
Bürogebäude	7	0,12
Einfamilienhaus / Reihenhaus	3.795	64,44
Einfamilienhaus mit Gewerbe	59	1,00
Garten	56	0,95
Gewerbegebäude	190	3,23
KGV	163	2,77
Mehrfamilienhaus	686	11,65
Mehrfamilienhaus mit Gewerbe	209	3,55
Wohnblock	678	11,51
Wohnblock mit Gewerbe	46	0,78
Summe	5.889	100

Die Vielzahl an Anschlüssen der Anlageart „Einfamilienhaus / Reihenhaus“ ist in der Eintrittswahrscheinlichkeitsverteilung in Abbildung 6 wiederzuerkennen. Es existiert eine Vielzahl von Knoten mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit $P_i = 0,252$. Dagegen ist der Anteil an Anschlüssen mit niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit aufgrund der wenigen Gewerbeanschlüsse relativ gering. Für einen geringen Anteil (rd. 280 Knoten) ist die Eintrittswahrscheinlichkeit größer als 0,315 (= maximale Eintrittswahrscheinlichkeit gemäß Verbraucherklassifizierung nach Tabelle 1). Diesen Knoten sind mehr als ein Verbraucher zugeordnet. Die Eintrittswahrscheinlichkeit an diesen Knoten ergibt sich nach Formel (2.2).

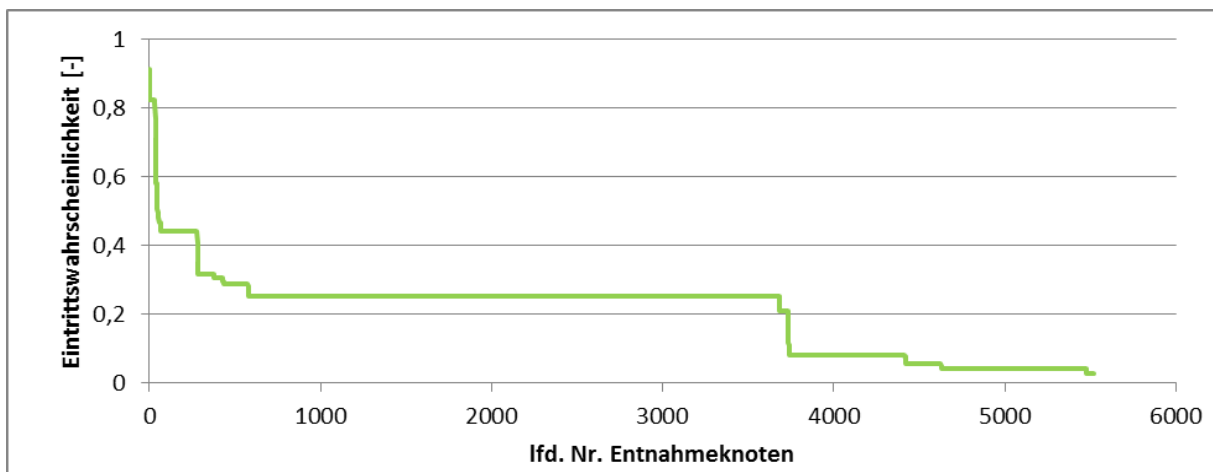


Abbildung 6 Verteilung der relativen Eintrittswahrscheinlichkeit

Die Knoten mit erhöhter Eintrittswahrscheinlichkeit sind nicht auf einen Bereich konzentriert sondern relativ gleichmäßig über das Versorgungsgebiet verteilt.

Für die Schadensauswirkung ist die topologische Entfernung zur Einspeisequelle bzw. der Durchfluss der Leitung, in die der Giftstoff injiziert wird, maßgebend. Das Schadensausmaß ist abhängig von der Flussverteilung im Versorgungsnetz. Nachfolgende Abbildung 7 zeigt die stationäre Flussverteilung für die Pilotzone PZ-S.

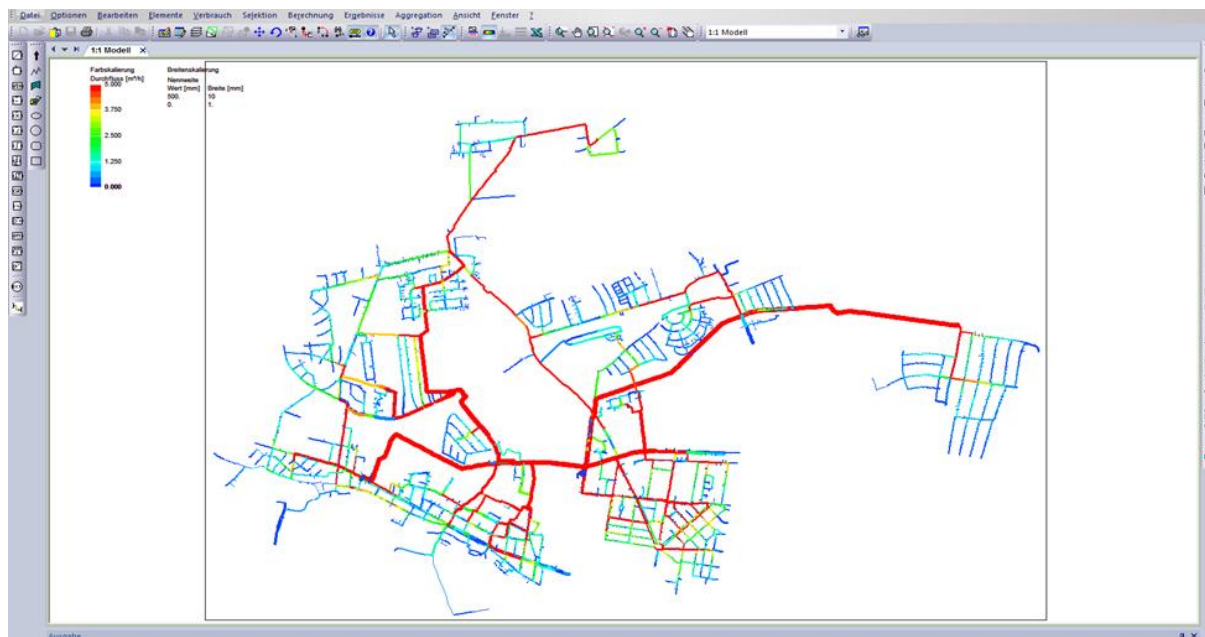


Abbildung 7 Stationäre Flussverteilung in der PZ-S

Die Verteilung des Schadensausmaßes bei einer angenommenen Injektion einer kontaminierten Wassermenge von 10 m³/h und stationärer Betrachtung ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Diese hohe Einspeisung führt dazu, dass auch über Stichleitungen eingebrachte Substanzen die übergeordneten Hauptversorgungsleitungen erreichen können. Die Verteilung weist einen deutlichen Peak auf. Es existieren folglich vereinzelt Hausanschlüsse, die unmittelbar an durchflussstarken Leitungen angeschlossen sind. Die Mehrheit der Anschlüsse ist an Versorgungsleitungen angeschlossen, deren Durchflüsse zwischen zwischen 2 % und 4 % der Gesamtnetzeinspeisung betragen.

Die Relevanz der Einbringung einer derart großen Menge in relativ kurzer Zeit wurde kontrovers diskutiert. Durch hydraulische Simulation konnte nachgewiesen werden, dass aus hydraulischen Gesichtspunkten ein solches Szenario durchaus möglich ist. Es setzt lediglich voraus, dass ein genügend großes Speichervolumen für das kontaminierte Trägermedium vorhanden ist. Die Verdrängung des anstehenden Rohrvolumens der Stichleitung ist je nach Durchmesser über mehrere hundert Meter Anschlusslänge möglich. Pumpen mit einer entsprechenden Leistungsfähigkeit sind leicht zu beschaffen.

Die Ergebnisse zum Schadensausmaß bei Einspeisung einer kontaminierten Wassermenge von 10 m³/h sowie die Klassifizierung der Verbraucher wurden für die Erstellung einer Risikolandkarte der gesamten Versorgungszone zusammengefasst und sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die ermittelte Risikoverteilung hat einen deutlichen Peak. An rd. 3 % der potenziellen Einbringungsstellen ist das Risiko besonders stark erhöht und übersteigt das Risiko an den übrigen Einbringungsstellen um ein Vielfaches. Das Risiko der breiten Masse ist hingegen relativ gering. Die Umstrukturierungsmaßnahmen sollten insbesondere darauf abzielen, das Risiko an stark risikobehafteten Hausanschlüssen zu vermindern. Gezielte Maßnahmen wären demnach denkbar. Jedoch sollten bei Untersuchungen zu Risikovermeidungsmaßnahmen auch diejenigen Anschlüsse berücksichtigt werden, deren hohe Schadensauswirkungen durch niedrige Eintrittswahrscheinlichkeiten relativiert werden.

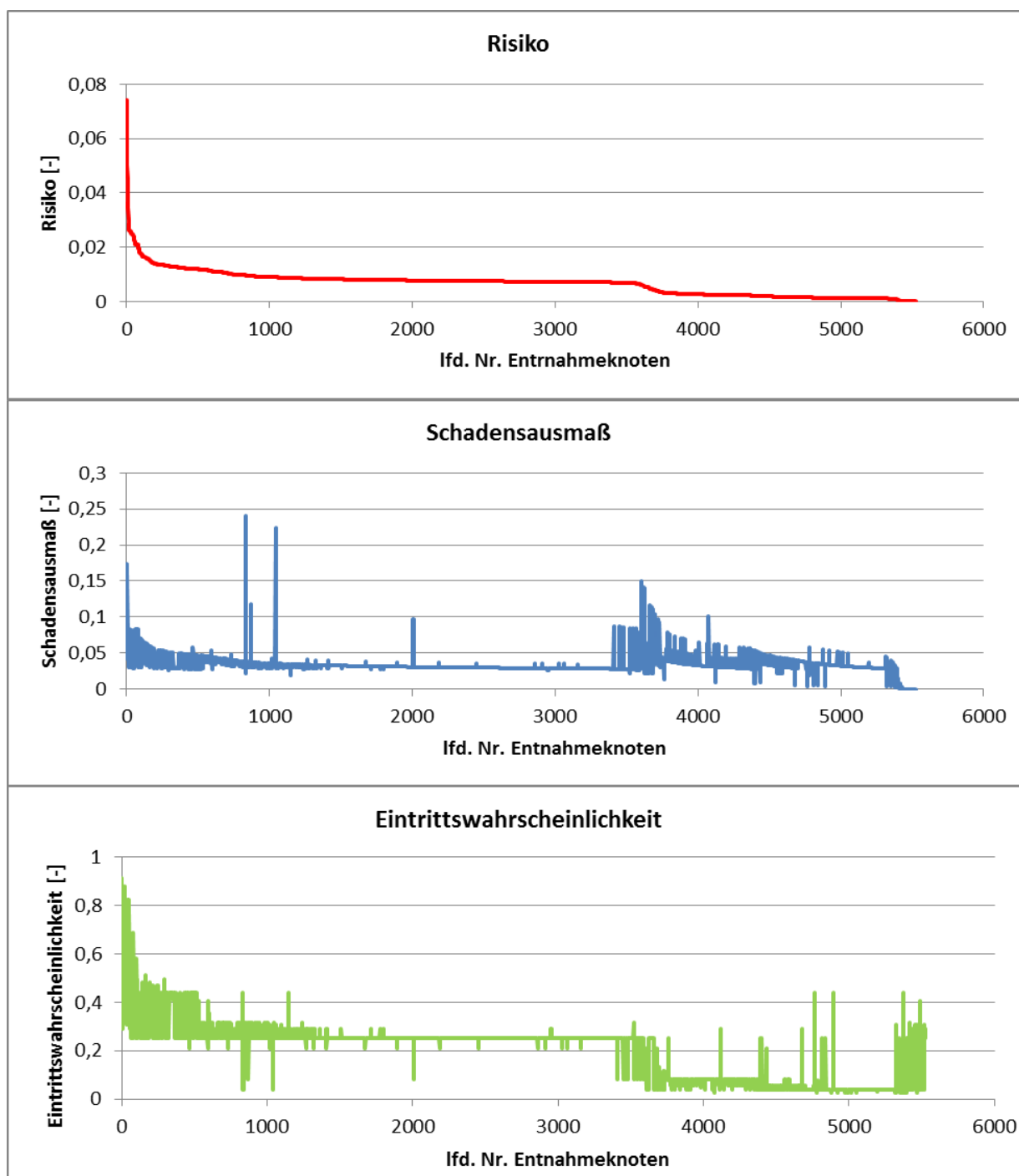


Abbildung 8 Injektionsrisiko / Schadensausmaß / Eintrittswahrscheinlichkeitsverteilung (Sortierung in den drei Diagrammen nach Injektionsrisiko)

Als Fazit lässt sich feststellen, dass die gefährdetsten Gebiete Anschlussleitungen mit geringer Entdeckungswahrscheinlichkeit in topologischer Nähe zum Speisebehälter darstellen. Die Kontamination des Behälters selbst hat zwar die größte Auswirkung. Durch die Möglichkeit von Objektschutzmaßnahmen wird jedoch im Vergleich zu abseits gelegenen Kundenanschlüssen die relative Eintrittswahrscheinlichkeit stark herabgesetzt. Als Planungsgrundsatz sollte folglich auch aus Gründen der Sicherheit gegenüber unabsichtlichen Kontaminationen durch Störfälle die Untergliederung des Netzes in Transport-, Versorgungs-, und Hausanschlussleitungen beachtet werden. Insbesondere sind direkte Anschlüsse von Verbrauchern an übergeordnete Transportleitungen zu vermeiden.



Analog zu der vorgenommenen Risikoabschätzung einer Giftstoffinjektion über Hausanschlussleitungen kann das Risiko eines Eintrags einer Kontaminante über Netzarmaturen ermittelt werden. Hierzu ist die relative Eintrittswahrscheinlichkeit an jeder Netzarmatur zu bestimmen. Alternativ könnte auch argumentiert werden, dass die Gefahr entdeckt zu werden innerhalb städtischer Gebiete überall gleich groß ist. Unter Vernachlässigung der übrigen Einflussfaktoren würden sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Netzarmaturen nicht voneinander unterscheiden und das Risiko wäre proportional abhängig von dem Schadensausmaß bzw. dem Durchfluss durch die Netzarmatur. Die stark risikobehafteten Netzarmaturen können so anhand der alleinigen Betrachtung des Schadensausmaßes, das bereits zur Einschätzung des Risikos der Hausanschlussleitungen berechnet wurde, identifiziert werden.

Auf eine graphische Darstellung der Risikolandkarte für die untersuchte Pilotzone wird hier aus Gründen der Geheimhaltung verzichtet.

II.1.2.3.2 Kontaminationsrisiko

Eintrittswahrscheinlichkeit

Die Kontaminations-Eintrittswahrscheinlichkeit ist ein relatives Maß innerhalb des Untersuchungsgebietes für die gefährdeten Bereiche, an welchen die Wahrscheinlichkeit einer Giftstoffkontamination erhöht ist. Grundsätzlich gilt: je größer die Anzahl der potenziellen Giftstoffeintragsstellen oberstrom, desto größer ist die Eintrittswahrscheinlichkeit am Anschluss. Für die relative Wahrscheinlichkeit, von einer Kontamination betroffen zu sein, ist daher die Lage des Kunden innerhalb des Versorgungsgebiets maßgebend. Die Untersuchungen in der Pilotzone zeigten, dass erwartungsgemäß die Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Randgebieten des Versorgungsgebiets erhöht sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeit muss jedoch nicht zwingend mit zunehmender Entfernung zur Einspeisestelle steigen. Lange Brückenleitungen ohne Anschlussleitungen können die Eintrittswahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung zur Einspeisestelle aufgrund der Verlängerung der Fließzeit mindern.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Kontaminations-Eintrittswahrscheinlichkeiten ist die Anschlussdichte. In Versorgungsgebieten mit hoher Anschlussdichte ergeben sich erhöhte Kontaminationswahrscheinlichkeiten, da sich in unmittelbarer Entfernung oberstrom zu jedem Wasserkunden relativ viele potenzielle Giftstoffeintragsstellen befinden. Umgekehrt gilt: je weitläufiger ein Versorgungsgebiet desto größer die Fließzeiten. Das heißt in weitläufigen Versorgungsgebieten sind Eintrittswahrscheinlichkeiten grundsätzlich niedriger.

Die Fließzeiten im Netz ergeben sich in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeiten. In Gebieten mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten breitet sich eine Kontaminante schneller aus und führt zu hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten, da die Zahl der potenziellen Eintragsstellen oberstrom mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit steigt.

Zusammenfassend haben folgende Faktoren Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Giftstoffkontamination an einem Anschluss:

- Lage des Anschlusses innerhalb des Versorgungsgebiets
- Anschlussdichte
- Strömungsgeschwindigkeiten in den Leitungen (umso größer die Strömungsgeschwindigkeiten desto größer die Giftstoffausbreitungsgeschwindigkeit)



- Stationäre / Instationäre Flussverteilung = $f(t)$
(Instationarität kann u.U. zu Richtungswechseln führen)
- Maßnahmen zur Verhinderung der Giftstoffausbreitung
(Definierte max. Fließzeit von Knoten j nach Knoten i)
- Injektions-Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Knoten oberstrom (Knoten j)

Schadensausmaß

Das Schadensausmaß zur Berechnung des Kontaminationsrisikos ist abhängig von der Entnahme am Knoten und einem Skalierungsfaktor. Durch den Skalierungsfaktor wird das Schadensausmaß der Kunden mit hoher betriebsbedingter Abnahme relativiert. Das Schadensausmaß zeigt idealerweise die Anschlüsse mit hohem getrunkenem Trinkwasseranteil innerhalb des Versorgungsgebiets auf. An diesen Anschlüssen ist bei einem Giftstoffanschlag mit den größten gesundheitlichen Folgeschäden zu rechnen.

Wie Untersuchungen der Pilotzone zeigten, ist das Schadensausmaß insbesondere in Gebieten mit größeren Wohneinheiten (Wohnblöcke und Mehrfamilienhäuser) erhöht. Zurückzuführen ist dies auf den erhöhten Verbrauch dieser größeren Wohneinheiten. Da diese größeren Versorgungseinheiten in Stadtvierteln zusammenliegen, ergeben sich einzelne Stadtzonen mit bereichsweise erhöhtem Schadensausmaß. Diese Gebiete mit verdichtetem hohem Schadensausmaß sind als besonders „anfällig“ gegenüber Giftstoffanschlägen einzustufen. In Wohngebieten mit kleineren Wohneinheiten (Einfamilienhäuser) oder Gartenanlagen ist der Verbrauch geringer. Das Schadensausmaß ist dort daher erwartungsgemäß niedriger. Aufgrund der Nähe der größeren Wohneinheiten zur Einspeisestelle nimmt der getrunkene Trinkwasseranteil oberflächlich betrachtet in Flussrichtung ab.

Unter den Kunden mit maximalem Schadensausmaß befinden sich Kindertagesstätten, Schulen und Wohnhäuser. Die maximale Schadensauswirkung wurde jedoch zunächst für eine Wäscherei mit einer überdurchschnittlich hohen Entnahme ermittelt. Der Jahresverbrauch der Wäscherei betrug rund 50.000 m³. Der mittlere Verbrauch (Verbrauch im gesamten Versorgungsgebiet / Anzahl Verbraucher im Versorgungsgebiet) betrug im Vergleich dazu nur rd. 275 m³/a. Der Verbrauch der Wäscherei liegt folglich um ein Vielfaches über dem Durchschnitt. Die Kontamination des Anschlusses dieser Wäscherei hat jedoch wesentlich geringere gesundheitliche Folgeschäden, da das Trinkwasser betriebsbedingt überwiegend zum Waschen verwendet wird. Durch eine entsprechende Wahl des Skalierungsfaktors kann das Schadensausmaß der Wäscherei an den beschriebenen Sachverhalt angepasst werden. An zweiter Stelle folgte ein Wasserkunde der Kundengruppe „Wohnblocks“. Der Verbrauch dieses Wohnblocks beträgt rd. 22.000 m³/a. Der Wohnblock besteht aus mehreren einzelnen Gebäuden, die sich eine Anschlussleitung teilen. Bei Kontamination dieses Anschlusses würde folglich der gesamte Wohnblock betroffen sein.

Risiko

Maximalwerte für das Kontaminationsrisiko ergeben sich definitionsbedingt für Anschlüsse mit erhöhter Eintrittswahrscheinlichkeit und gleichzeitig erhöhtem Schadensausmaß. Für die Pilotzone wurden zwei Gebiete mit erhöhtem Kontaminationsrisiko ermittelt. Im überwiegenden Teil sind in der Pilotzone größere Wohneinheiten mit erhöhtem getrunkenem Trinkwasseranteil einspeisenahe angesiedelt. Gleichzeitig befinden sich die kleineren Wohneinheiten mit erhöhter Injektionswahrscheinlichkeit eher in Wohngebieten in den Randzonen des Versorgungsgebietes. Die vorgenannten beiden Punkte wirken sich positiv auf das Kontaminati-



onsrisiko im Versorgungsgebiet aus. Der umgekehrte Fall - die Anschlüsse mit erhöhter Injektionswahrscheinlichkeit befinden sich in Einspeisenähe - würde zu einem deutlich höheren Kontaminationsrisiko an den Anschlüssen der Wohneinheiten mit erhöhtem konsumiertem Trinkwasseranteil führen. Die Verteilungsstruktur der Wasserkunden innerhalb des untersuchten Versorgungsgebietes wirkt sich daher positiv auf das Kontaminationsrisiko aus.

Im Allgemeinen sind in Stadtzentren eher Gewerbe und größere Wohneinheiten (Wohnblöcke, Mehrfamilienhäuser) mit erhöhter Anschlussdichte angesiedelt. In Randgebieten nehmen die Größe der Wohneinheiten und die Anschlussdichte ab. Folglich ist zu erwarten, dass ausgehend vom Stadtzentrum der Verbrauch in Richtung Randgebiet abnimmt. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass die Injektionswahrscheinlichkeit mit zunehmender Entfernung zum Stadtzentrum ansteigt, da dort die Zahl der Einfamilienhäuser mit erhöhter Injektionswahrscheinlichkeit zunimmt. Zentrumsnahe Einspeisestellen sind bezüglich des Kontaminationsrisikos daher in der Regel vorteilhaft im Gegensatz zu zentrumsfernen Einspeisestellen.

Zu den kritischen Abnehmern, die hinsichtlich Giftstoffanschlägen besonders gefährdet sind, gehören z.B.:

- Krankenhäuser / Seniorenheime
- Schulen / Kindertagesstätten
- Kasernen

Schuleinrichtungen und Seniorenheime gehören zu den besonders gefährdeten Kunden, da junge und ältere Menschen grundsätzlich gesundheitlich anfälliger sind. Kasernen sind besonders schützenswert, da sie gerade in Krisenzeit einsatzbereit sein muss. Außerdem könnten politisch motivierte Täter gezielt einen Anschlag auf militärische Einrichtungen planen. Kasernen sind daher auch zu den kritischen Wasserkunden hinzuzuzählen. Idealerweise sollten sich die kritischen Wasserkunden innerhalb des Versorgungsgebiets in Bereichen mit geringer Kontaminations-Wahrscheinlichkeit befinden.

II.1.3 Prävention - Angriffsresiliente Infrastrukturen [TP 3a-1 und TP 4b-1-1]

Die Ergebnisse der Risikoanalyse dienen unter anderem als Basis für die Entwicklung von Kriterien für angriffsresiliente Infrastrukturen. Wie die Injektions- und die Kontaminationsrisikoanalyse zeigte, ist insbesondere die Topologie des Netzes für die Gefährdung eines Versorgungsnetzes verantwortlich. Um die einzelnen Zusammenhangskomponenten auch im operativen Einsatz, z.B. zur Überprüfung der Auswirkung von Abschiebern einzelner Rohrleitungen, besser darstellen zu können, wurde die Software SIR 3S[®] um ein Werkzeug zur Selektion graphentheoretisch unterschiedlicher Zusammenhangskomponenten erweitert.

Der Netzgraph wird zunächst in die drei Hauptbestandteile vermaschte Blöcke, Brückenleitungen als Verbindung dieser Blöcke und Wald untergliedert (siehe auch Kapitel Risikoanalyse). Die neue Funktionalität ermöglicht es nun dem Bearbeiter, einzelne Komponenten auszuwählen und Informationen über Teilnetzlänge, -volumen, Verbrauch etc. abzulesen (siehe Abbildung 9). Insbesondere das Rohrvolumen von Bäumen (Teilkomponenten des Waldes) ist für die Einschätzung der Wassermenge, die bei einem Anschlag innerhalb des Baumes verdrängt werden muss, von Bedeutung. Des Weiteren lassen sich Auswirkungen von Absperurmaßnahmen und die daraus resultierenden isolierten Teilgebiete sofort und in Echtzeit ermitteln.



Das Werkzeug lässt sich auch für die Ermittlung von Umstrukturierungsmaßnahmen zur Reduzierung der Vulnerabilität gegenüber Anschlägen mit toxischen Substanzen einsetzen. Mögliche Maßnahmen aus Sicht der Netzanalyse sind das planmäßige Schließen von Schiebern zur Unterteilung und besseren Überwachbarkeit des Netzes aber auch bauliche Maßnahmen wie die Verhinderung einer Kontamination durch Rückpumpen aus Hausanschlussleitungen.

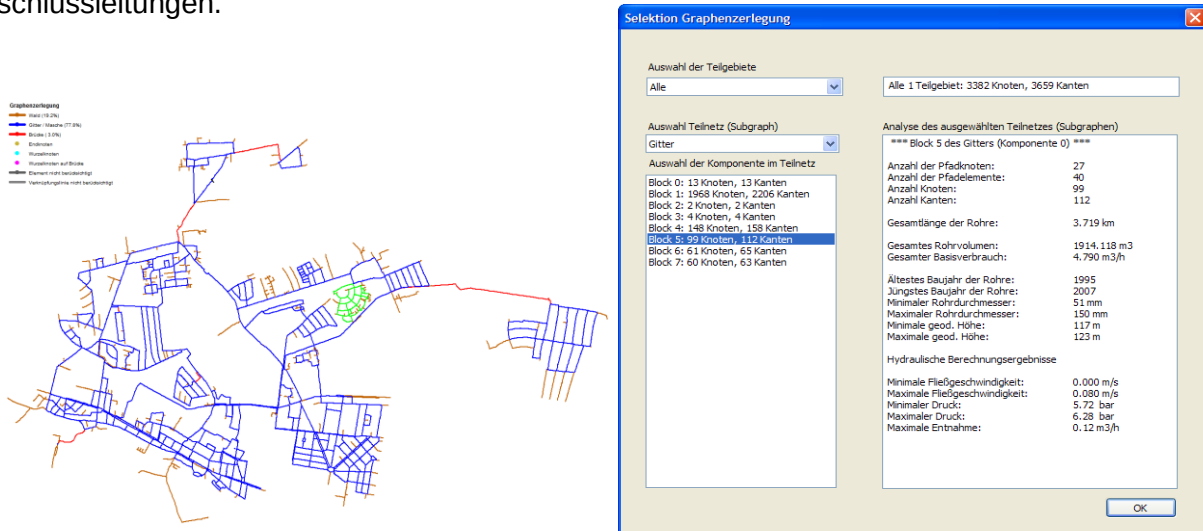


Abbildung 9 Netzstatistik für grün markierten vermaschten Block.

Die Gefahr eines Anschlags im Hausanschlussbereich ließe sich so auf ein Minimum reduzieren.

Abbildung 10 zeigt die Auswirkung einer unidirektionalen Trennung (Vermeidung der Flussumkehr durch Rückpumpen) auf das Risiko, das von Hausanschlussleitungen ausgeht.

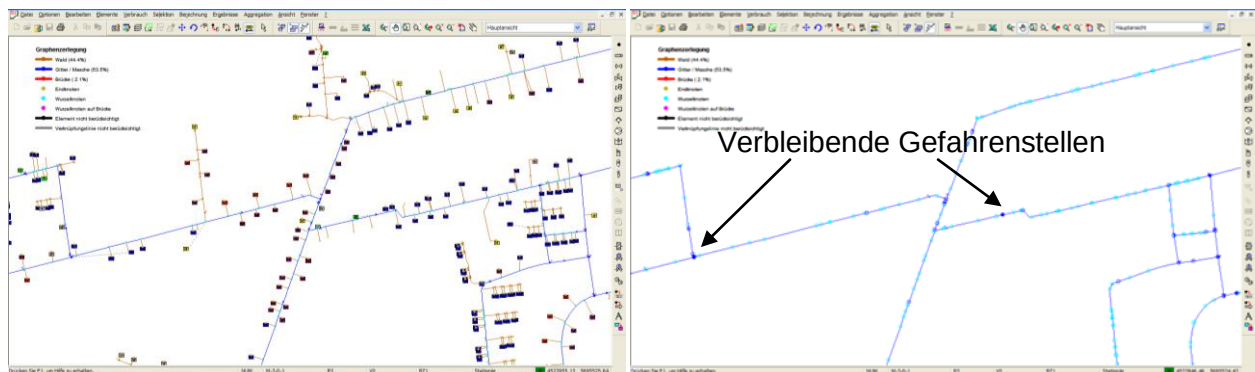


Abbildung 10 Auswirkung unidirektionaler Abtrennung von Hausanschlussleitungen

Allerdings haben bereits geführte Gespräche mit Versorgungsunternehmen und dem DVWG große Vorbehalte gegenüber dieser Maßnahme gezeigt. Einerseits bedeutet der Einbau von entsprechenden Bauteilen in allen Baumstrukturen (zumeist Hausanschlussnetze) einen großen finanziellen und zeitlichen Aufwand. Andererseits stehen den Wasserversorgungsunternehmen derzeit keine wartungsfreien Armaturen mit der Funktionalität einer Rückflussverhinderung zur Verfügung. Als Fazit kann gezogen werden, dass die unidirektionale Separation von Strängen mit eindeutiger Fließrichtung theoretisch eine wirkungsvolle Maßnahme darstellen würde, jedoch erst mittel- oder langfristig zur Verringerung der Vulnerabilität beitragen kann.



Hausanschlüsse an übergeordnete Transportleitungen sind aufgrund des erhöhten Schadensausmaßpotenzials stark risikobehaftet. Netzstrukturen mit eindeutiger Untergliederung in Transport-, Haupt-, und Versorgungsleitungen sind daher vorteilhaft. Das Risiko eines Giftstoffeintrages über Hausanschlüsse in übergeordnete durchflussstarke Leitungen wird unter Beachtung dieser Untergliederung minimiert. Diese Schlussfolgerung sollte als Planungsgrundsatz unbedingt berücksichtigt werden.

Um das Schadensausmaß im Anschlagsfall einzugrenzen, sind unmittelbare und zweifelsfreie Lagebeurteilungen und operative Maßnahmen notwendig. Solange die Giftstoffausbreitung nicht mit eindeutiger Sicherheit identifiziert und eine weitere Giftstoffausbreitung zweifelsfrei verhindert werden kann, ist eine risikofreie Aufrechterhaltung der Wasserversorgung in vermeintlich nicht betroffenen Gebieten nach einem Anschlag nicht möglich. Als Konsequenz ausbleibender Reaktionen steigt das Schadensausmaß noch weiter an. Diesbezüglich sind großflächige Bereiche mit hohem Vermaschungsgrad unvorteilhaft, da diese u.U. zu:

- einer erschwerten Netzüberwachbarkeit,
- einer niedrigen Wahrscheinlichkeit einer Giftstoffdetektion (Vermaschungen führen zu niedrigeren Durchflüssen aufgrund der erhöhten Anzahl an Fließwegen. Umso größer die Zahl der Fließwege, desto niedriger die Wahrscheinlichkeit einer Giftstoffdetektion),
- einer erschwerten Eingrenzung der Giftstoffausbreitung nach einem Anschlag

führen. Aufgrund der bekannten Vorteile sind Vermaschungen in Bezug auf Versorgungssicherheit, Löschwasserbereitstellung etc. durchaus sinnvoll, solange gleichzeitig die o.g. Nachteile in ausreichendem Maße in der Planung berücksichtigt werden.

Da eine Giftstoffinjektion in Rohrleitungssysteme nicht nur über Hausanschlüsse sondern auch durch Kontrollschächte, Hydranten, Be- und Entlüftungsventile möglich ist, sind diese Bestandteile des Wasserversorgungssystems ebenfalls zu sichern. Folgende Maßnahmen sind möglich:

- Schließsysteme / verschließbare Abdeckhauben für Schachtdeckel, Hydranten, Armaturen etc.
- Vollständige verschließbare Einhausung von oberirdisch verlegten Armaturen etc.
- Zugangsüberwachung von Schächten mittels Sensoren
- Videoüberwachung besonders gefährdeter Eintragsstellen
- Sonstige Schutzmaßnahmen: Sicherheitszäune, Straßenpoller / Verkehrssperren bzw. -barrieren zur Fernhaltung von Fahrzeugen von gefährdeten Eintragsstellen

Für detailliertere Aussagen zum Objektschutz wird an dieser Stelle auf die Arbeiten der Projektpartner Fraunhofer IOSB und infraprotect verwiesen.

Eine Alternative/Ergänzung zu baulichen Maßnahmen bietet die Überwachung des Netzes durch Sensornetzwerke in Verbindung mit einer möglichst einfachen Isolierbarkeit von Teilnetzen. In Phase II des F&E-Vorhabens STATuS wurde zu einer ersten Einschätzung der Leistungsfähigkeit eines solchen Sensornetzwerkes ein Online-Simulationsmodell in Verbindung mit mobilen Multiparametersonden zur Echtzeitüberwachung der Pilotzone implementiert (siehe Ergebnisbericht zu Phase II).



Besonders kritische Kunden (z.B. Krankenhäuser, Schulen, Kasernen etc.) sollten einen Anschluss mit geringer Kontaminationswahrscheinlichkeit erhalten. Zusätzlich kann auch eine Überwachung der Wasserqualität vor Ort sinnvoll sein. Für das untersuchte Versorgungsgebiet wurden die Kontaminationswahrscheinlichkeit bestimmt und die besonders gefährdeten Bereiche innerhalb des Versorgungsgebiets ermittelt. Die Kontaminationswahrscheinlichkeit hängt im Wesentlichen von den Injektionswahrscheinlichkeiten an den oberstrom gelegenen potenziellen Eintragsstellen ab. Allgemein ist davon auszugehen, dass die Kontaminationswahrscheinlichkeit in Strömungsrichtung mit zunehmender Anzahl möglicher Kontaminationsquellen steigt. Als Standorte für die kritischen Abnehmer sind daher einspeisenahere Bereiche vorteilhaft, wenn gleichzeitig die Stationen gegenüber Giftstoffanschlägen geschützt sind.

In Abhängigkeit der Verteilung der Verbrauchertypen innerhalb des Versorgungsgebietes ergeben sich strategisch günstige Standorte für die Einspeisestation. Im Allgemeinen sind in den Stadtzentren die großen Wohneinheiten (Wohnblöcke, Mehrfamilienhäuser) mit vermutlich hohem getrunken Trinkwasseranteil und gleichzeitig geringer Injektionswahrscheinlichkeit vorzufinden. In Richtung Stadtrand werden die Wohneinheiten kleiner (Einfamilienhäuser), der Verbrauch sinkt; jedoch steigt das Injektionsrisiko an. Aus konzeptioneller Sicht sind daher zentrumsnahe Einspeisestationen gegenüber Einspeisestationen am Stadtrand vorzuziehen. Voraussetzung ist, dass der Bereich der Station ausreichend geschützt werden kann. Eine Kontamination der Versorgungsstation hätte aufgrund kurzer Fließwege zu einem Großteil der Kunden ein maximales Schadensausmaß zur Folge. Eine Überwachung der Wasserqualität durch Sensoren ausgangs der Station und zusätzlich in den Hauptleitungen ist dringend zu empfehlen.

Die oben aufgeführten Erkenntnisse zu angriffsresilienten Infrastrukturen wurden dazu verwendet, eine ideale Netzstruktur abzuleiten, die sich durch eine geringe Vulnerabilität gegenüber Anschlägen auszeichnet. Die Netzstruktur ist gekennzeichnet durch:

- Eine konsequente Untergliederung zwischen Transport- und Versorgungsleitungen.
- Möglichkeiten zur Untergliederung des Netzes in Teilgebiet durch unidirektionale Trennung (eindeutige Fließrichtung) oder durch definierte Zonentrennschieber, die im Bedarfsfall schnell geschlossen werden können (dadurch wird die Ausbreitung einer Kontamination über mehrere Teilgebiete unterbunden).
- Eine transparente Netzstruktur, welche die Überwachbarkeit und die Reaktion im Anschlagsfall erleichtert.
- Ein begrenztes potenzielles Schadensausmaß durch einzelne, voneinander separierte oder separierbare Versorgungsgebiete geringerer Größe: Bei einem Anschlag innerhalb eines der Versorgungsteilgebiete ist die Giftstoffausbreitung auf das Versorgungsteilgebiet beschränkt. D.h. die Größe der einzelnen Versorgungsteilgebiete bestimmt das Schadensausmaß. Umso kleiner die Versorgungsteilgebiete desto geringer das Schadensausmaß im Anschlagsfall. Eine sichere und risikofreie Aufrechterhaltung der Wasserversorgung nach einem Kontaminationsereignis ist damit in den übrigen Versorgungsteilgebieten möglich.
- Wirtschaftlich verträgliche Anzahl von Wasserqualitätssensoren zur Bestimmung konventioneller Wasserqualitätsparameter oder spezifischer Toxizitätssensoren in Transportleitungen zur Detektion von Anschlägen über die Netzarmaturen (Armaturen in



Schächten, Hydranten etc.): Die Ausstattung der Transportleitungen mit Giftstoffsensoren und die hohe Transparenz der Netzstruktur ermöglichen unter Verwendung hydraulischer Simulationsmodelle zweifelsfreie Rückschlüsse, mit welchen Maßnahmen (Schieberstellungen) eine Kontamination weiterer Versorgungsteilgebiete verhindert werden kann und wo die Wasserversorgung nach einem Anschlag im restlichen System aufrechterhalten werden kann. Hierbei wird angenommen, dass die verwendeten Sensoren eine zuverlässige Detektion toxischer Substanzen implizieren.

- Verbrauchertypen mit hoher Injektions-Eintrittswahrscheinlichkeit befinden sich idealerweise nicht oberstrom in Versorgungsteilgebieten mit hohem Wohnbauflächenanteil sondern in den Randzonen des Versorgungsgebiets mit geringerem Anteil an konsumiertem Trinkwasser.
- Geringe Gefährdung kritischer Kunden (Verbraucher mit hohem getrunkenen Trinkwasseranteil, Krankenhäuser, Schulen, Seniorenheim etc.): Die kritischen Kunden befinden sich in Versorgungsgebieten mit geringer Kontaminations-Eintrittswahrscheinlichkeit.

Im Unterschied zum städtischen Versorgungsnetz der KWL weist das Leitungsnetz des regionalen Versorgers kleine Kinzig durch das Fehlen von Hausanschlüssen wesentlich weniger kritische Punkte auf. Jedoch sind dort, im Falle eines erfolgreichen Anschlages, die Auswirkungen durch die größeren transportierten Wassermengen um ein Vielfaches größer. Kritische Stellen sind die Aufbereitungsanlage, eine überschaubare Anzahl von Schächten, vor allem aber die Zwischenbehälter, die oft sehr abgelegen liegen und nur in längeren Zeitabständen inspiziert werden. Maßnahmen zur Verringerung der Vulnerabilität betreffen hier vor allem den Objektschutz. Simulationsrechnungen für die Verfolgung der Ausbreitung einer eingebrachten Substanz sind schwierig, da die Entnahmen an den Kundenbehältern nicht in hoher zeitlicher Auflösung gemessen werden. Außerdem sind sie keinem versorgungsgebietstypischen Tagesgang unterworfen, da die meisten Kommunen als Abnehmer über eine eigene alternative Wasserquelle verfügen. Abhilfe könnte hier nur der Einsatz eines Echtzeitsimulationsmodells schaffen, welches die aktuellen Abnahmedaten über das Prozessleitsystem zur Verfügung gestellt bekommt.

II.1.4 Entwicklung eines Algorithmus zur Identifikation von Schiebern zur Isolation kontaminierter Netzbereiche [TP 4b-1-2]

Im Anschlagsfall sind die ersten Gegenmaßnahmen die Isolation des kontaminierten Gebietes und anschließende Netzspülung. Die Ergebnisse der im Rahmen der Risikoanalyse durchgeführten Simulationen ausgewählter Anschlagsszenarien wurden an das TZW Dresden übergeben. Dort wurden Spülpläne für die Dekontamination des Teilnetzes erarbeitet. Wie sich herausstellte, ist der Aufwand für die Erstellung solcher Spülpläne „von Hand“ erheblich, auch bei relativ begrenzter Ausbreitung. Im Krisenfall bedeutet die Zeitverzögerung eine hohe Gefährdung. Daher wurde für Phase II, entgegen der ursprünglich geplanten Arbeitspakete, die Entwicklung eines Softwaretools zur automatischen Ermittlung von Spülplänen neu aufgenommen.

Zur Isolation kontaminierter Teilbereiche ist die Kenntnis der erforderlichen, zu schließenden Schieber Voraussetzung. Dazu wird vereinfachend vorausgesetzt, dass sowohl Anschlagsort als auch Zeitpunkt der Injektion bekannt sind. Damit kann mit Hilfe der dynamischen Netzrechnung die Ausbreitung der Substanz simuliert werden. Gesucht sind nun diejenigen



Schieber, die mit einem gewissen Sicherheitsabstand das kontaminierte Netz vom Rest trennen. Die Software SIR 3S[®] wurde im Rahmen des Vorhabens um eine entsprechende Funktionalität erweitert.

Die Funktion benötigt als Eingabe den Ort des Anschlags und eine maximale Laufzeit, die angibt, wie viel Zeit zwischen dem Anschlag und dem Abschluss der Arbeiten verstreicht, die nötig sind, um das kontaminierte Wasser im Netz einzuschließen. Der Gedanke dahinter ist, dass sich das kontaminierte Wasser im Netz ausbreitet, solange die stromabwärts des kontaminierten Wassers gelegenen Schieber geöffnet sind.

Den Einbringungsort wird durch Mausklick festgelegt; die maximale Laufzeit ist über einen Eingabeaufforderungsdialog in der Einheit Sekunden einzugeben. Mit diesen Eingabedaten berechnet SIR 3S[®], wie weit sich das kontaminierte Wasser im System innerhalb der vorgegebenen Laufzeit ausbreitet; an Leitungskreuzen wird aus Gründen der Modellvereinfachung angenommen, dass sich das Wasser vollständig durchmischt.

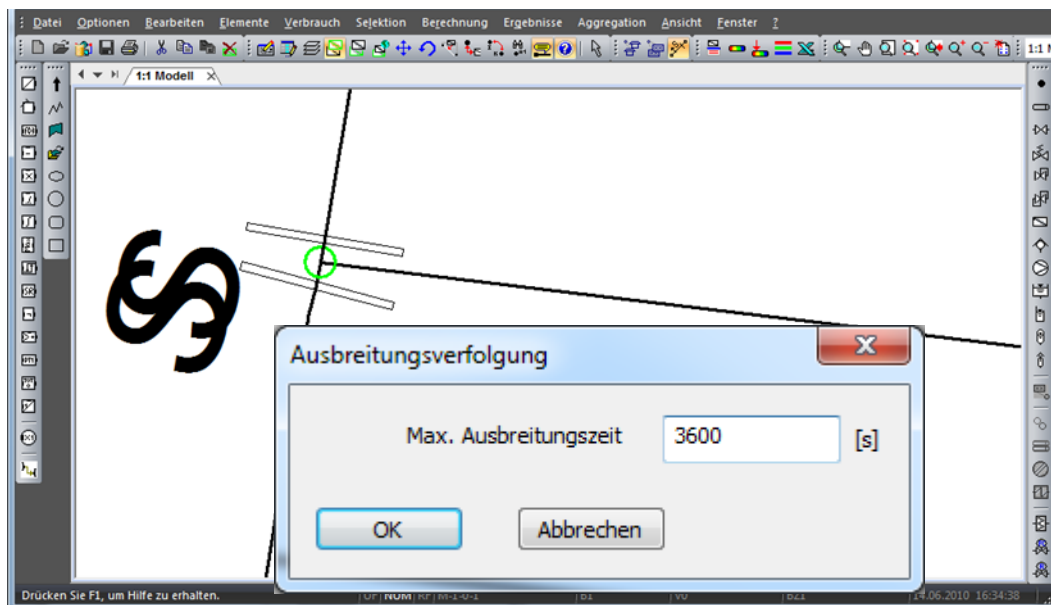


Abbildung 11 Markierung der Injektionsstelle und Eingabe der max. Ausbreitungszeit zur Ermittlung des zu spülenden Netzbereichs

Nach der Berechnung der Ausbreitung sucht eine graphentheoretische Breitensuche von den kontaminierten Knoten aus die nächsten Schieber. Sind alle Schieber identifiziert, nach deren Schließen eine Ausbreitung unterstrom nicht mehr möglich ist, kann das kontaminierte vom Rest des Systems isoliert werden. Die Visualisierung der maximalen Ausbreitung, der zu schließenden Schieber, etc. erfolgt über automatisch erzeugte Ausgabelayer.



II.1.5 Detektierbarkeit von Druckstößen, die durch Rückpumpereignisse ausgelöst werden [TP 4b-1-5 und TP 4b-1-6]

Da in den oben angeführten Szenarien der Einbringung einer größeren Menge kontaminierter Wassers über einen Hausanschluss eine besondere Bedeutung zukam, wurden theoretische Untersuchungen zur Detektierbarkeit von Anschlägen mit Hilfe von kontinuierlichen Druckmessungen an beiden Beispielsystemen durchgeführt. Qualitätssensoren haben den Nachteil, dass immer zunächst die Fließzeit zwischen Anschlagort und 1. Sensorort „nutzlos“ verstreicht. Eine Detektion von Einträgen über Druckänderungen wäre bei Weitem schneller - und unabhängig von der Art der Substanz.

Dabei werden Schadstoffeinträge ins Netz als „negatives Leck“ betrachtet und Methoden der Leckerkennung zur Erkennung der Einbringung kontaminierter Flüssigkeitsmengen ins Netz angewandt. Folgende Parameter sind zu berücksichtigen:

- Dauer der Einbringung
- eingebrachte Menge
- Anfahrzeit der Pumpe (bzw. Schnelligkeit Start/Stopp Einbringung)
- Mengenrate während der Einbringung
- Netzabnahme während der Einbringung
- Lage des Anschlagortes im Netz
- Fahrweise der gesamten Anlage

Für unterschiedliche Parameterkonstellationen wurden beispielhaft Druckstoßberechnungen sowohl an Versorgungssystem der KWL als auch am Weststrang des ZVWKK durchgeführt. Insbesondere sehr kurze Ereignisse mit hoher Einspeisung wurden untersucht. Abbildung 12 zeigt für unterschiedliche Pumpenanfahrzeiten von 100 s, 10 s und 1 s die Druckverläufe in der Nähe der Einbringung. Es wurde von einer gesamten Einspeisedauer von 5 min. ausgegangen.

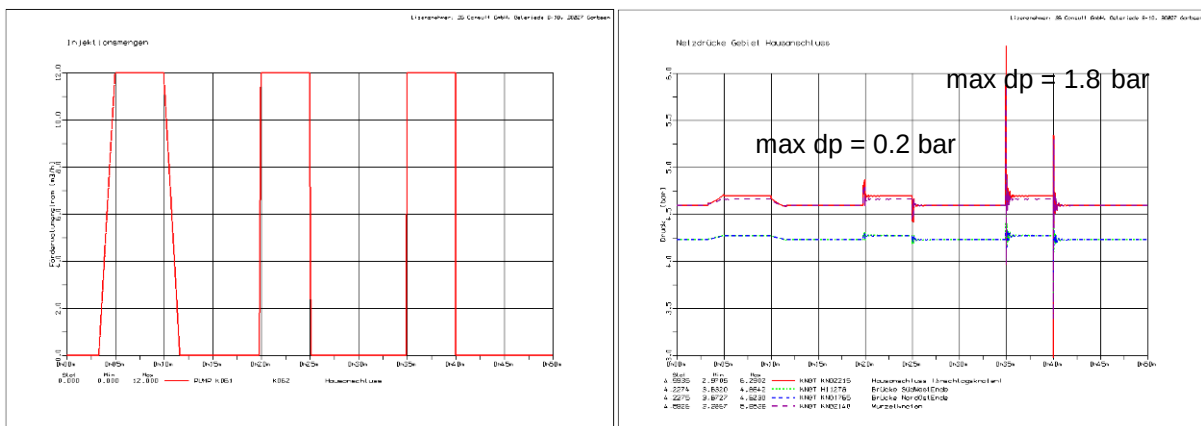


Abbildung 12 Pumpendrehzahl und Druckverlauf, Einbringung von 12 m³/h am Hausanschluss

Als weiteres Beispiel wurde das sogenannte „Taucherflaschenszenario“ untersucht. Dem zu Grunde gelegt wird die Einbringung von 150 l toxischer Substanz mit einem Überdruck von 300 bar, der mit 1/t abnimmt. Als Gesamtdauer der Einbringung wurden 5 s angesetzt. Die



Simulation dieses Szenarios ergab einen Spitzendurchfluss von 135 m³/h. Injektionsmengen- und Druckverlauf für die Eintragsstelle am Hausanschluss sind in Abbildung 13 dargestellt.

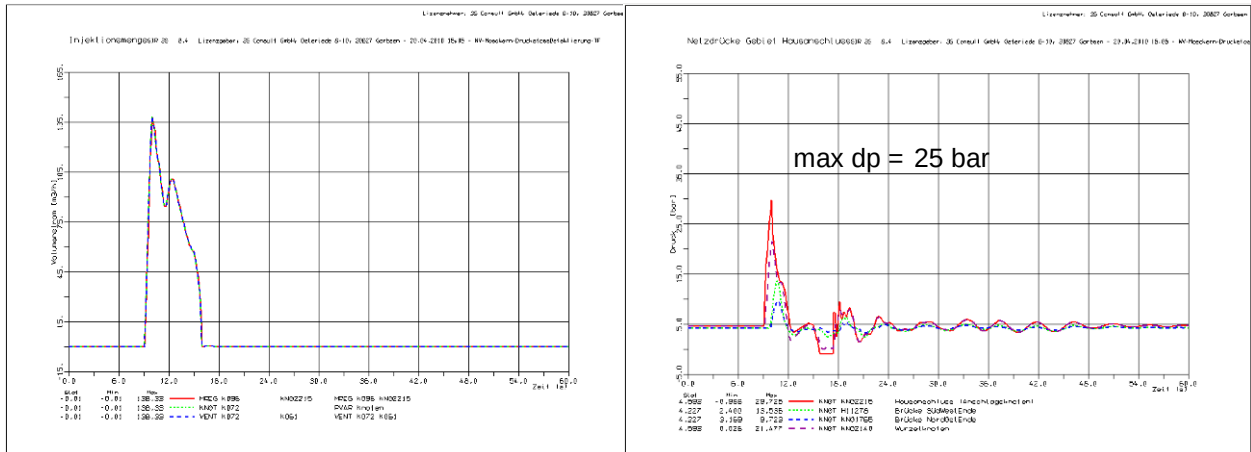


Abbildung 13 Injektionsmenge und Druckverlauf im Taucherflaszenszenario (ZVWKK)

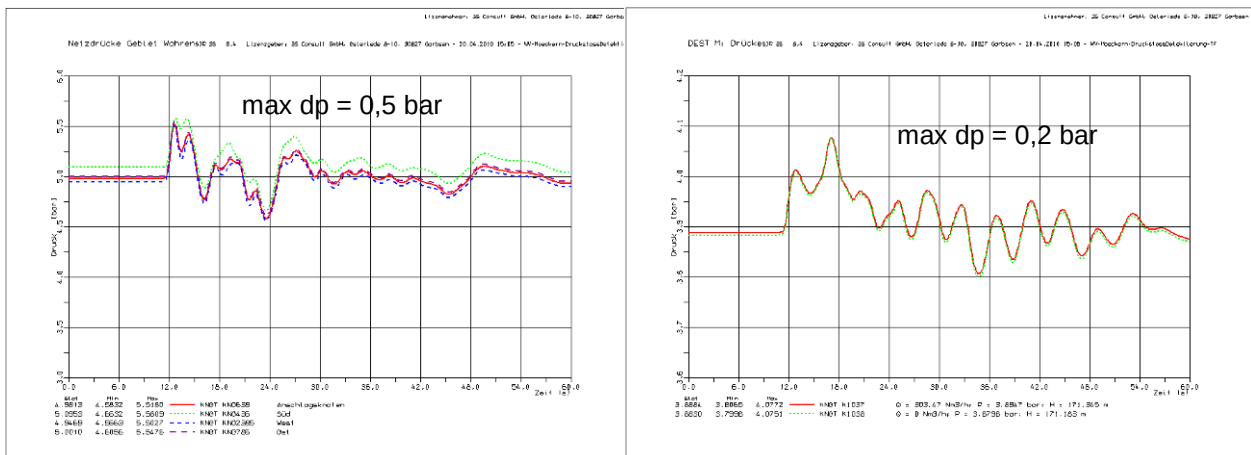


Abbildung 14 Taucherflaszenszenario für Anschlag im vermaschten Netz der WL

Im vermaschten Netzteil überlagern sich die Druckwellen wesentlich stärker. Die möglicherweise detektierbaren Auswirkungen sind dadurch wesentlich geringer. In Abbildung 14 ist die Druckantwort im Netz (links) und an der Pumpstation DEST (rechts) dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind auch hier die Auswirkungen noch messbar. Allerdings würden dazu sehr genaue und zeitlich hochauflösende Messungen benötigt.

Fazit:

- Anwendbarkeit der Methode sehr stark abhängig von Art der Einbringung: Schnell eingebrachte hohe Raten (große Mengen über kurze Zeit, unregelmäßig, hoher Anschlagdruck) sind detektierbar. Allgemeiner formuliert: Der Signal-/Rauschabstand muss groß genug sein. Faustregel: Druckerhöhung durch Einbringung an der Messstelle > 0,2 bar.
- Zeitlich hohe Auflösungen der Druckmessungen sind erforderlich (1000 ms).

Aber:

- Wenn, dann sind Auswirkungen von Einbringungen sehr schnell und in weiten Systemteilen erkennbar - auch an zentralen Anlagen wie der DEST (es ist dann nicht einmal eine zusätzliche Netzmessung erforderlich).



- Das Rauschen nimmt mit dem Einfluss der Störgröße (der Netzabnahme) ab. Insbesondere in Nachtstunden verbessert sich dadurch die Detektierbarkeit.
- Druckmessungen sind sehr preiswert im Vergleich zu Mengen- und Qualitätsmessungen und detektieren das Ereignis unabhängig vom eingebrachten Stoff. Mit der Anzahl der Druckmessungen steigt die Erkennungs- und Lokalisierungsgüte. Je smarter das Grid ist, desto besser kann es sich selbst vor Anschlägen schützen.
- Deterministische prozessbegleitende Simulation wird in Zusammenhang mit anderen Methoden (z.B. KNN) bereits jetzt zur Erkennung von Sonderbetriebsweisen (Leckagen) projiziert. Dieselben intelligenten Softwaresysteme können dann auch zur Detektierung von Anschlägen verwendet werden.

Aufgrund der hohen theoretischen, praktischen und zeitlichen Anforderungen weitergehender Untersuchungen wurde der Ansatz jedoch in Phase II STATuS nicht weiter verfolgt, sondern könnte Bestandteil eines zukünftigen Forschungsprojekts sein.

II.1.6 Zusammenfassung/Stand der Zielerreichung nach Phase I

Die theoretischen Untersuchungen zur Risikoanalyse konnten in Phase I weitestgehend abgeschlossen werden (AP 2). Einige wichtige und grundlegende Erkenntnisse konnten anhand der hydraulischen Simulationsrechnungen gewonnen werden. Die Ergebnisse wurden theoretisch weiterverarbeitet und mündeten in eine allgemeine mathematische Formulierung des relativen Risikos, das auch auf andere Wasserversorgungssysteme anwendbar ist und in die Software SIR 3S[®] integriert wurde. Aufbauend auf der Risikoanalyse und topologischen Untersuchungen wurden in AP 3b bauliche, planerische und organisatorische Maßnahmen zur Verringerung der Vulnerabilität erarbeitet. Diese beinhalten zum Beispiel die Untergliederung des Netzes in kleinere Einheiten durch Umstrukturierung und den Einbau von Kontrollarmaturen und Sensoren (TP 3b). Die Arbeiten zu AP 2 und AP 3b waren nach Phase I mit Ausnahme zusätzlicher Implementierungsarbeiten weitestgehend abgeschlossen.

Die Ergebnisse der Simulation der Anschlagsszenarien wurden in Phase I vom Projektpartner TZW Dresden verwendet, um optimale Spülpläne zur Dekontamination des Netzes zu erarbeiten. Der Aufwand nicht nur für die Durchführung der Spülungen, sondern auch für die Ermittlung der Spülstrecken ist erheblich. In Phase II sollte deshalb in Zusammenarbeit mit dem TZW Dresden das Softwaretool FlushPlan zur automatischen Identifikation von Spülstrecken entwickelt werden, welches im Krisenfall die Identifikation und rasche Umsetzung von Dekontaminationsmaßnahmen unterstützt. Erste Vorarbeiten wurden durch die Implementierung eines Algorithmus zur Identifikation von Schiebern, die zur Isolation kontaminierter Teilnetze geschlossen werden müssen, bereits in Phase I geleistet.

Im Themenfeld Netzüberwachung wurde die Anwendbarkeit von Druckmessungen zur Anschlagdetektion theoretisch durch Modellrechnungen untersucht. Grundsätzlich scheint der Ansatz für die Erkennung bestimmter Kontaminationsszenarien erfolgversprechend. Er wurde aber wegen des hohen zusätzlichen Aufwandes sowohl an die theoretischen Modelle als auch an die erforderlichen zeitlich hochauflösenden Messungen in Phase II nicht weiter verfolgt. Ebenso wurden die Arbeiten zur Identifikation von Kontaminationsquellen und zur optimalen Platzierung in Phase II nicht mehr weiterverfolgt [TP-3b]. Die Begründung dafür liefert die Tatsache, dass es sich bei den beiden Fragestellungen um sehr komplexe Themen han-



delt, die aber von einer Vielzahl von Forschern international bearbeitet worden und mit TE-VA-SPOT auch kostenlose Tools zur Verfügung stehen.

Wie die Ergebnisse der Phase I zeigte, können Maßnahmen zur Prävention zwar eine Reduzierung des Risikos bewirken, ersetzen aber nicht die Erarbeitung von Notfallplänen, Gegenmaßnahmen oder die Überwachung der Wasserqualität im Netz durch geeignete Sensoren. In Phase II stand demzufolge Arbeiten zu AP 4 „Netzanalyse und –umstrukturierung“ im Mittelpunkt der Untersuchungen. Die in Phase I durchgeführten umfangreichen Simulationsrechnungen für unterschiedliche Anschlagsszenarien zeigten die große Abhängigkeit der Kontaminationsausbreitung im Netz vom aktuellen Betriebszustand und von der lokalen und zeitlichen Verbrauchsverteilung. Die bis dahin durchgeführten Berechnungen basierten ausschließlich auf planerischen Modellen; d.h. Angaben über Modellparameter wie Verbrauchslinien, Behälterstände, Betriebsweisen von Pumpstation gründen auf Annahmen, die wiederum aus Messungen der Vergangenheit beruhen. Im Falle einer Kontamination im Leitungsnetz sind die Minimierung der verstrichenen Zeit zwischen Anschlag und Detektion, die sichere Allokation der Verunreinigungsquelle sowie die Einleitung effizienter Maßnahmen (Netzspülung, Abschiebern, ...) ausschlaggebend für den Schutz der Bevölkerung. Alle genannten Punkte sind direkt abhängig vom berechneten Strömungsfeld. Dieses wiederum kann den aktuellen, tatsächlichen Betriebszustand des physikalischen Systems in ausreichender Genauigkeit nur dann wiedergeben, wenn wichtige Randbedingungen messtechnisch erfasst werden und in (Nahe-)Echtzeit zur Verfügung stehen. Abweichungen zwischen Annahmen im „planerischen“ Offline-Modell und dem tatsächlichen Betriebszustand können zu schwerwiegenden Fehleinschätzungen bei der Identifikation effizienter Maßnahmen führen.

Als Arbeitsschwerpunkt in Phase II STATuS sollte daher ein Online-Simulationsmodell entwickelt und projektiert werden. In diesem Fall ist das hydraulische Simulationsmodell über einen OPC-Server mit dem SCADA-System des Wasserversorgungsunternehmens verbunden (Abkürzungen: OPC: OLE for Process Control, SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition -> Prozessleitsystem). Wichtige, den aktuellen Betriebszustand kennzeichnende Größen wie Pumpenfahrweisen, Behälterstände, aktueller Verbrauch, Druckhöhen, ...), sind für das Online-Simulationsmodell ständig verfügbar. Zur Verifikation der Ergebnisse dienen die Planung und die Durchführung von Versuchen zu Transportvorgängen im Netz. Dazu wurden von Seiten der KWL zusätzliche Schächte mit hydraulischen und Messungen ergänzt um mobile Sensoren zur Bestimmung von Qualitätsparametern wie elektrische Leitfähigkeit, Temperatur und pH-Wert in die Pilotzone eingebaut. Insgesamt sollten mehrere Ausbreitungsversuche mit Quereinspeisung von Wasser mit abweichenden Qualitätsmerkmalen aus der Nachbarzone gefahren und die Messungen mit den Simulationsergebnissen abgeglichen werden. Ziel war es, genauere Hinweise über die Zuverlässigkeit von Modellrechnungen bezüglich Transport, Durchmischung und Ausbreitung von Substanzen in einem realen Wasserversorgungssystem zu erhalten und Empfehlungen für den zukünftigen Einsatz abzuleiten.

Zusammenfassend ergaben sich für Phase II die folgenden Arbeitsschwerpunkte im Teilvorhaben:

- Projektierung , Implementierung und Inbetriebnahme eines Online-Simulationsmodells für die Pilotzone der KWL
- Planung, Durchführung und Auswertung von Ausbreitungsversuchen im Netz der KWL



- Entwicklung und prototypischen Implementierung des Softwarebausteins FlushPlan zur automatisierten Ermittlung von Spülstrecken und Spülplänen
 - Mitarbeit am Leitfaden zur Selbstevaluierung von Wasserversorgungsunternehmen
-

PHASE II

II.1.7 Projektierung , Implementierung und Inbetriebnahme eines Online-Simulationsmodells für die Pilotzone PL-S [TP 4b-1-8]

II.1.7.1 Mess- und Übertragungstechnik

II.1.7.1.1 Vorbemerkungen zur Messtechnik

Ausgangspunkt der Versuche war vorgesehen, dass an den mobilen Messstellen (=Hydranten) auch der Durchfluss gemessen wird. Dies ist technisch mit geringem Aufwand auch ohne Messschacht und IDM Messgerät realisierbar. Hierbei wird ein Durchflussmessgerät über einen Hydranten in die Rohrleitung eingebracht. Sofern der Hydrant einer dafür vorgesehenen Bauart mit freiem Zugang zum darunterliegenden Rohr² entspricht, ist das Einbringen eines solchen Durchflussmessgerätes möglich.

Die Unterflurhydranten in der Pilotzone der KWL sind jedoch von der Bauart „Kegelabspernung“. Für die Unterflurhydranten dieser Bauart ist das Einbringen eines Durchflussmessgerätes nicht möglich. Der Zugang zur Rohrleitung wird bei dieser Bauart durch das Absperrorgan des Hydranten versperrt. Durchflussmessungen innerhalb des Versorgungsnetzes der KWL sind daher nur durch den Bau von mit IDM Messgeräten ausgestatteten stationären Messschächten möglich. Um den finanziellen Aufwand für die Messung in STATuS gering zu halten, wurde daher entschieden, nur Durchmessstellen an den 2 Fernwassereinleitstellen (=Zonentrennschieber) zu installieren.

II.1.7.1.2 Messtechnik – mobile Messapparatur

Multiparametersensor

Als mobile Messapparaturen kommen Multiparametersonden der Firma Gero³ zum Einsatz. Die Multiparametersonden zeichnen folgende Messparameter kontinuierlich auf:

- Hydraulische Parameter: Druck
- Wasserqualitätsparameter: Leitfähigkeit, Temperatur, pH- Wert



Abbildung 15 Multiparametersonde (Fa. Gero)

² Bauart: Freistrom Unterflurhydrant

³ GERO Meßsysteme GmbH Braunschweig: <http://www.gero-mess.de/> (25.03.2013)



Die Multiparametersonde wird mithilfe eines Anschlussadapters auf die Unterflurhydrantenkralle aufgeschraubt (Abbildung 15). Aufgrund der Konstruktionshöhe der Multiparametersonde von rd. 30 – 40 cm kann die Multiparametersonde nicht vollständig in die Straßenkappe integriert werden. Nach Montage der Multiparametersonde kann die Straßenkappe nicht wieder geschlossen werden und muss daher im geöffneten Zustand bleiben. Zum Witterungsschutz wurden die nur bedingt wasserfesten Multiparametersonden bestmöglich mit einer wasserfesten Folie eingehüllt.

Da die Sonde nicht in direktem Kontakt mit der Rohrströmung steht, muss ihr zur Messung der Wasserqualitätsparameter kontinuierlich Wasser, das der Rohrleitung abgeschlagen wird, über einen Probeentnahmeschlauch zugeführt werden. Der Probeentnahmeschlauch wird bei der Montage der Multiparametersonde zurechtgeschnitten und verlegt. Aus messtechnischem Gesichtspunkt wäre es optimal, wenn der Probeentnahmeschlauch bis direkt in die Rohrleitung hineinreichen würde. Dies ist jedoch aus technischen Gründen leider nicht möglich, da der Probeentnahmeschlauch nicht an dem Absperrorgan des Hydranten vorbeigeführt werden kann (obwohl das Absperrorgan nach Aufschrauben der Multiparametersonde auf die Hydrantenkralle vollständig geöffnet wird). Der Probeentnahmeschlauch reicht daher nicht wie gewünscht bis in Rohrleitung sondern nur bis zum Anschlagspunkt, dem Absperrorgan des Hydranten. Ob Lösungen anderer Anbieter zur Verfügung stehen, die die oben genannten Nachteile der Verschleißbarkeit und der Probenentnahme nicht aufweisen, konnte im Rahmen des Vorhabens nicht abschließend geklärt werden.

Vor jeder neuen Qualitätsmessung muss folglich mindestens ein bestimmtes Volumen; nachfolgend Verdrängungsvolumen genannt, mit frischen Wasser ausgetauscht werden. Das Verdrängungsvolumen setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

Bestandteile Verdrängungsvolumen:

- evtl. Volumen Rohrbogen
- evtl. Volumen Rohrstück zwischen Rohrbogen bis Anschlussflansch Unterflurhydrant
- Volumen zwischen Anschlussflansch bis Ende Probeentnahmeschlauch
- Volumen Probeentnahmeschlauch

Nach Auskunft des TZW wird der Probeentnahmeschlauch nach jedem Hydranten-Standortwechsel neu bemessen und zurechtgeschnitten, um das Verdrängungsvolumen möglichst gering zu halten. Abbildung 16 zeigt einen Querschnitt durch einen Unterflurhydranten mit eingebauter Messtechnik.

Die laufende Probeentnahme entwässert auf die Straße und wird mithilfe des Probeentnahmeschlauchs in Richtung nächsten Straßenablauf geleitet. Eine Regelarmatur am Ende des Probeentnahmeschlauchs ermöglicht eine Mengenregulierung. Nach Angaben der Fa. Gero beträgt die maximale Abgabe über den Probeentnahmeschlauch bei vollständig geöffneter Regelarmatur rd. 150 l/h. Bei Bedarf kann mithilfe der Regelarmatur die Probenahme reduziert werden, um dauerhafte und großflächige „Überschwemmungen“ im Bereich der Messstandorte zu vermeiden. Insbesondere bei einsetzendem Frostwetter sind geringe Probeentnahmemengen erstrebenswert, um der erhöhten Glättegefahr entgegenzuwirken. Unter messtechnischen Gesichtspunkten ist hingegen eine maximale Probenahme anzustreben. Hierdurch wird ein schnellstmöglicher Wasseraustausch im Verdrängungsvolumen sichergestellt.

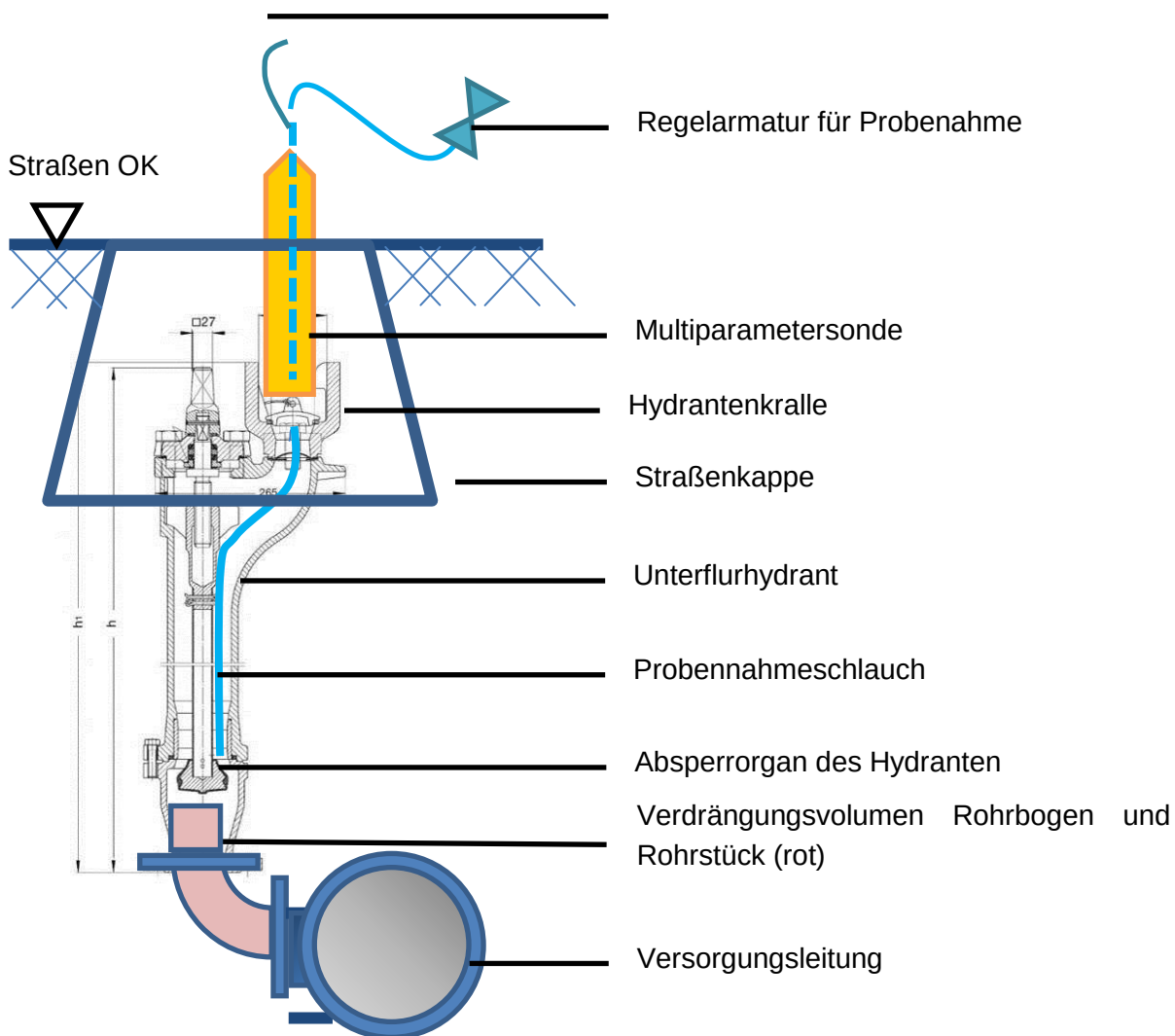


Abbildung 16 Multiparametersonde an Unterflurhydrant

Insbesondere im Projekt STATuS, in dem das Signal der eintreffenden Fernwasserfront (=fiktiver Giftstoff) und daraus resultierende Konzentrationsänderungen messtechnisch möglichst zeitgenau erfasst werden sollen, ist ein verzögertes Signal aufgrund zu geringem Wasseraustausch zu vermeiden.

Aufgrund der zahlreichen Unterflurhydranten und der Mobilität der Multiparametersonden bestand die Möglichkeit, die Messstandorte zu wechseln und weitestgehend flächendeckend Messwerte innerhalb der PZ-S zu sammeln.

Datenlogger, Batterie und Stromsicherung

Die Multiparametersonde ist über ein Datenkabel an einen Datenlogger angeschlossen. Der Datenlogger verfügt über ein eingebautes GSM-Modem für D1/D2 Mobilfunknetze zur Übertragung der Messungen, über einen internen Datenspeicher über 512 kBytes Datenspeicher (ca. 340.000 Messwerte), einen internen Akkumulator und einem Kabelanschluss an die Funkantenne. Der Datenlogger ist programmierbar durch Anschluss eines externen Computers mit installierter Gero Software. Folgende Programmierhandlungen sind möglich (vor Ort):

- Konfiguration Mess- und Übertragungsintervall
- Export von im Datenlogger gespeicherten Messwerten
- Eingabe der Kalibrierfaktoren für hydraulische bzw. Qualitätsparameter

Bei den fiktiven Giftstoffeintragsversuchen soll die Ausbreitung der Fernwasserfront und Konzentrationsänderungen möglichst hochauflösend und zeitgenau erfasst werden. Dies erfordert eine Messung mit möglichst geringen Messintervallen. Da der fiktive Anschlag außerdem gleichzeitig Online simuliert werden soll, werden für die Online-Simulation ständige aktuelle Messwerte gefordert. Unter den beiden Gesichtspunkten, der Messtechnik und der Online-Simulation, ist daher eine möglichst hochauflösende Messung und Datenübertragung erstrebenswert. Limitierender Faktor bezüglich kurzer Messintervalle und zeitnahe Übertragung ist der steigende Strombedarf: Das Modem muss in diesem Fall quasi ständig Verbindung aufbauen und halten. Insbesondere scheint die hier durchgeführte Datenübertragung per SMS sehr energieintensiv zu sein im Vergleich zu GSM/Daten oder GPRS. Logger/Modems/Techniken die kurze Intervalle und zeitnahe Übertragung bei geringstmöglichem Stromverbrauch (und damit langer Laufzeit bei gegebener Akku-Kapazität) gewährleisten wären optimal.

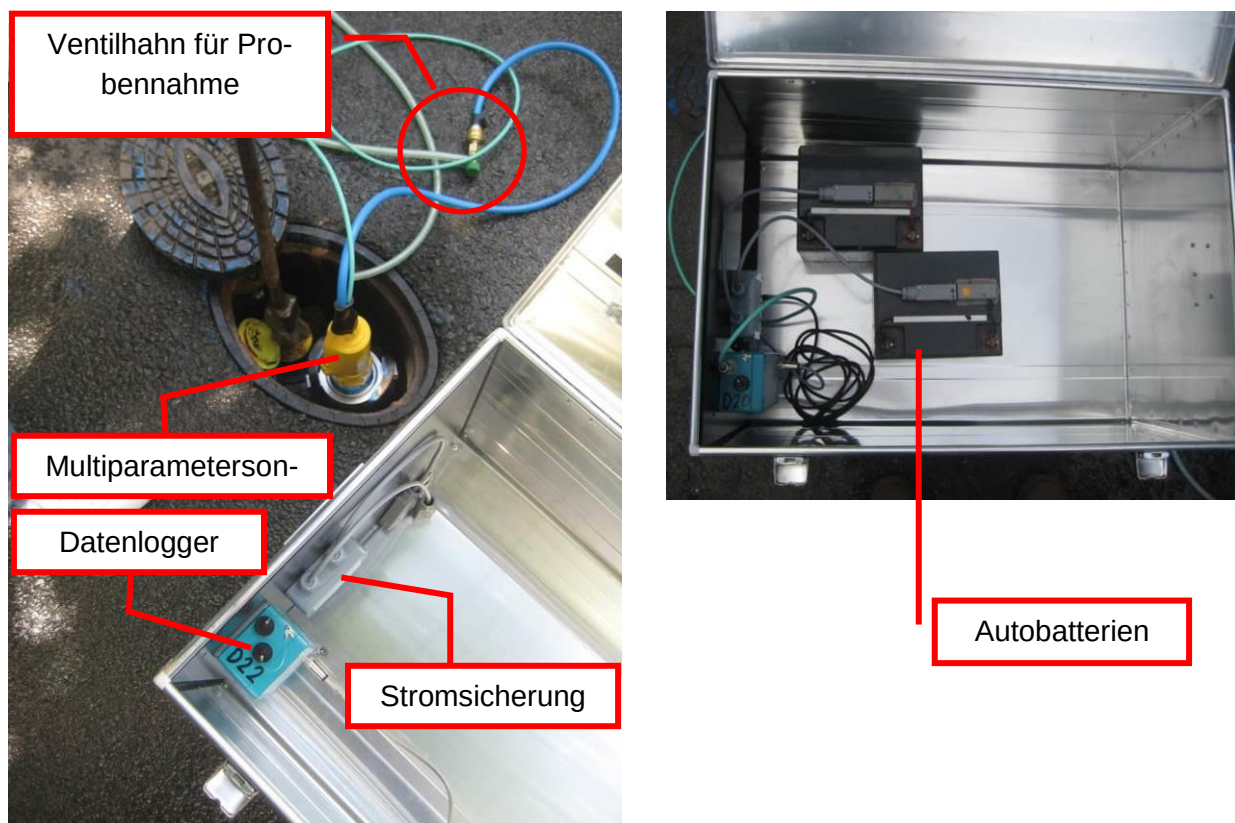


Abbildung 17 Anschluss Multiparametersonde an Messkoffer

Bei der Bemessung der Akkumulatoren der mobilen Messapparaturen wurde die geforderte hohe Mess- und Datenübertragungsfrequenz berücksichtigt. Die Akkumulatoren wurden so bemessen, dass sie für die Dauer der Messkampagne ohne Austausch ausreichend Kapazität besitzen und in diesem Zeitraum auch die Möglichkeit bieten, bei Bedarf unterschiedliche Konfigurationen bzgl. Mess- und Datenübertragungsfrequenz zu parametrieren. Die Bemessung ergab, dass zwei Autobatterien für jeweils eine mobile Messapparatur für die Dauer der



Messkampagne ausreichend sind. Die Bemessung der Akkumulatoren erfolgte durch das TZW in Absprache mit der Fa. Gero.

Zwei Autobatterien plus Datenlogger können freilich nicht in die Straßenkappe des Hydranten integriert werden. Zur Diebstahlsicherung und zum Witterungsschutz wurden die Autobatterien und der Datenlogger in extra für die Messkampagne angefertigten abschließbaren Aluminiumkoffern untergebracht. Der Aluminiumkoffer ist außerdem mit einer Stromsicherung ausgestattet (Abbildung 17).

Unterflurhydranten befinden sich meistens innerhalb des Straßenkörpers, so dass es nach Aufstellung der mobilen Messapparatur zur Behinderung des Straßenverkehrs kommt und manchmal sogar eine Straßenfahrbahn für die Dauer einer Messung vollständig gesperrt werden muss.

Aufgrund der Beeinträchtigung des Straßenverkehrs sind daher offizielle Straßenabspernungen notwendig, die beim Ordnungsamt vorab einer Messung beantragt werden müssen. Die Antragsstellung erfolgt nach Absprache mit einem zeitlichen Vorlauf von zwei Wochen durch die KWL.

Aufgrund der zahlreichen Hydranten ist zwar eine fast flächendeckende Messung im Netz der KWL möglich. Die Beeinträchtigungen des Straßenverkehrs durch die Abspernungen beschränken jedoch die Auswahl der Messstandorte. Stark befahrene Straßen oder Umleitungen, die aufgrund einer Baumaßnahme andernorts befahrbar bleiben müssen, sind bei der Auswahl der Messstandorte möglichst zu vermeiden.

Die Beantragung von Straßenabspernungen wurde in den Zeitplan aufgenommen. Der ausgearbeitete Zeitplan enthielt alle Standortwechsel und natürlich die geplanten Versuche mit einströmendem Fernwasser.

II.1.7.1.3 Messtechnik – ortsfeste Messapparatur

Durchflussmessungen innerhalb der PZ-S sind über Hydranten sind wegen der Bauart der Hydranten nicht möglich. Da die KWL an den Zonengrenzen über keine Durchflussmessung verfügt, wurden eigens für die STATuS Messkampagne zwei neue IDM installiert. Hierzu mussten die Rohrleitung an den definierten Stellen freigelegt und in die Rohrleitung ein IDM eingesetzt werden (Abbildung 18). Die Messstellen wurden hinsichtlich der zur Installation des IDMs erforderlichen Straßenbauarbeiten so ausgewählt, dass die Baumaßnahmen so klein und die Beeinträchtigungen durch Absperrung so gering wie möglich ausfielen (Abbildung 19). Die beiden IDMs wurden daher im Seitenbereich der Straße verlegt. Hersteller der beiden IDMs ist ABB.

Die im Rahmen von STATuS neu installierten IDMs sind zur Messdatenerfassung und –übertragung an einen Messschacht angeschlossen. In die Messschächte sind Druck- und Durchflusslogger (Fa. Gero) sowie eine Probeentnahmestelle integriert. Der Durchflusslogger der Fa. Gero ist kompatibel zu dem IDM Durchflussmessgerät der Fa. ABB. Die Messgrößen der ortsfesten Messstellen sind Durchfluss und Druck.

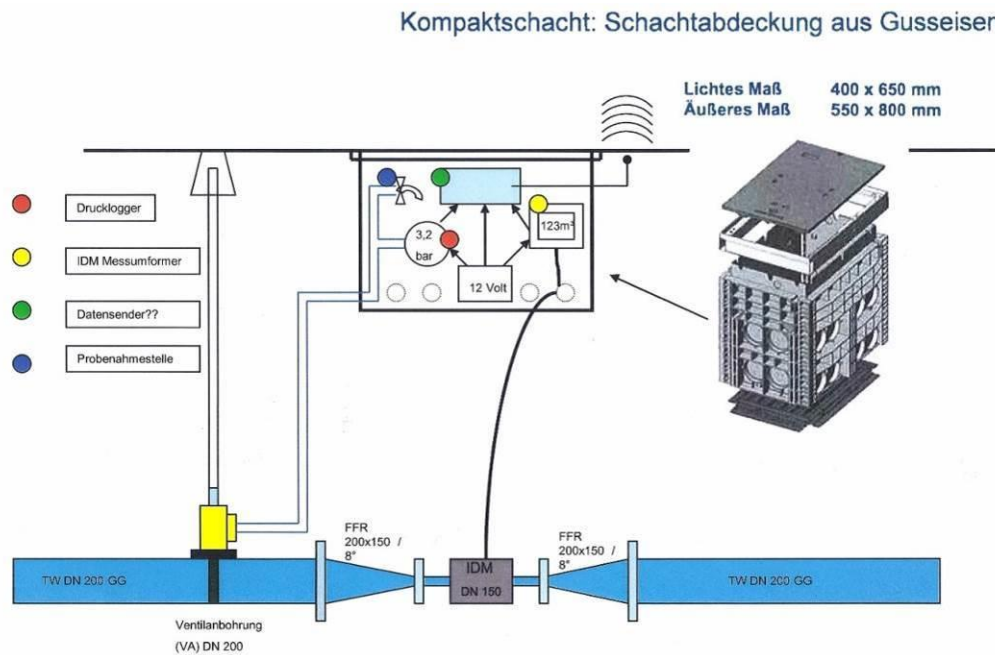


Abbildung 18 Schacht mit Messtechnik (Planskizze von KWL)



Abbildung 19 Schachtverlegung (Aufnahmedatum: 03.08.2012)

II.1.7.1.4 Messtechnik – KWL Leitsystem

Hinsichtlich der Pilotzone PZ-S verfügt das Leitsystem der KWL über Messungen, die innerhalb der Druckerhöhungsstation (DEST) erhoben werden. Die Messdaten umfassen im Wesentlichen Druck-, Durchfluss-, Wasserstandmessungen inkl. Auf / Zu Meldedaten zu Schieberarmaturen in der DEST. Die Messdaten der DEST werden in Echtzeit erhoben und an das Leitsystem der KWL übermittelt. Gemäß Aussagen der KWL wird die Leitfähigkeit in der DEST nicht online, sondern wöchentlich, durch manuelle Probennahmen erfasst. Die Leitfähigkeit ist daher auch kein Prozessdatum der via OPC Kanal im Leitsystem der KWL verfügbar ist.



Über die Messgenauigkeit innerhalb der DEST wurden keinen näheren Recherchen oder Untersuchungen angestellt. In einem Gespräch wurde seitens der KWL angemerkt, dass die beiden Druckmessungen druckseitig der Pumpen nicht geeicht sind. Dies ist auch der Grund dafür, dass die beiden Druckmesswerte (Druckmessung 1 = 4,05 bar bzw. Druckmessung 2 = 4,09 bar s. Abbildung) trotz ihres sowohl in Höhe als auch in Fließweglage identischen Messortes nicht exakt denselben Messwert liefern.

II.1.7.1.5 Übertragungstechnik

Das Leitsystem der KWL stellt alle im Leitsystem ständig verfügbaren Prozessdaten (z.B. alle Messwerte Druck, Durchfluss) per OPC quasi in Echtzeit zur Verfügung. Applikationsserver, die sich innerhalb der Leitsystemumgebung befinden und über einen OPC Client verfügen, können auf die Messdaten via OPC zugreifen.

Die Messdaten der temporären Messstellen mit der Messtechnik der Fa. Gero werden per Funk (SMS) gesendet und laufen in erster Instanz auf einem GSM Server auf. Der GSM Server wurde von der Fa. Gero in der Verbundleitwarte der KWL aufgestellt und in Betrieb genommen. Der GSM Server der Fa. Gero kann Daten im neuen noch wenig verbreiteten OPC UA Standard zur Verfügung stellen. Da SIR 3S derzeit jedoch nur den alten weiter verbreiteten OPC DA Standard unterstützt wurde von der Fa. Gero ein so genannter Wrapper installiert, der von OPC UA nach OPC DA transformiert.

Insgesamt konnte/musste die Online-Simulation damit die Prozessdaten von 2 verschiedenen nicht miteinander synchronisierten OPC Servern beziehen (Abbildung 20).

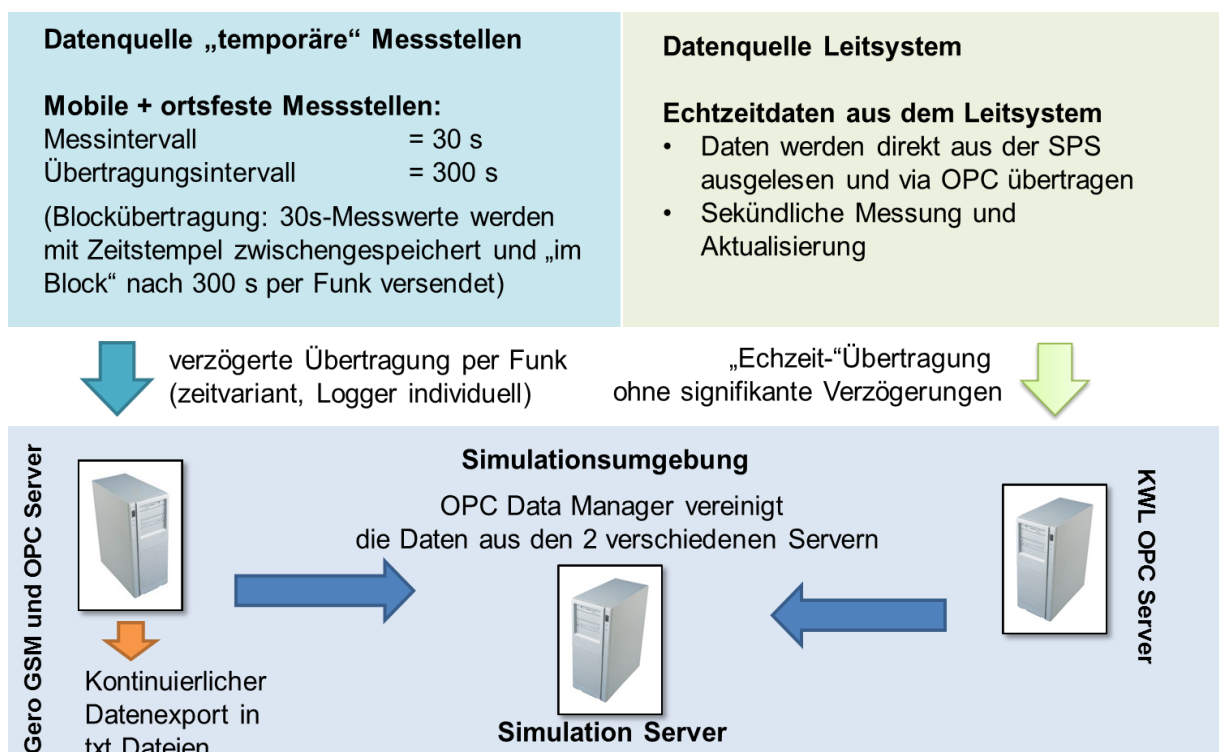


Abbildung 20 Schema Datenübertragung

In der Simulationsumgebung stehen die Messwerte der beiden Datenquellen, dem Leitsystem der KWL bzw. temporäre Messstellen mit Gero Messsystemen, auf zwei unterschiedlichen OPC-Servern zu Verfügung, dem KWL OPC-Server bzw. dem Gero GSM und OPC-



Server. Die Vereinigung der beiden Datenquellen zu einer wurde mit der Software OPC Data Manager der Fa. Matrikon gelöst. Neben weiteren Funktionalitäten ermöglicht der OPC Data Manager durch Konfiguration eines Quell- und Zielservers für einzelne OPC Datenpunkte die Vereinigung von Messdaten unterschiedlicher OPC-Server auf einen zentralen OPC-Server. Dieser Ziel OPC-Server läuft auf demselben Server (Simulation Server) auf dem die Online-Simulation selbst untergebracht ist. Als Ziel OPC-Server Online-Simulation wird der Matrikon OPC Simulationsserver verwendet. Die Online-Simulation bezieht die Prozessdaten ausschließlich vom Ziel OPC-Server.

Beim Zusammenfassen von Prozessdaten aus verschiedenen Quellen ist die Problemstellung der verzögerten Übertragung der Messwerte der temporären Messstellen zu lösen:

Ein Zeitverzug bei der Übertragung der Leitsystem Prozessdaten besteht lt. KWL aus dem zyklischen Umkopieren der Werte in der SPS von den Eingangsbaugruppen in eine Tabelle (Dauer ca. 1 s), einer Latenzzeit bedingt durch die Datenübertragung von 100 – 800 ms und dem Abtastzyklus des OPC-Servers. In der Summe beträgt der Zeitverzug der Leitsystem-Messdaten folglich rd. 3 s. Die Messdaten des Leitsystems weisen daher für die Anwendung niederfrequente Online-Simulation der Strömungs- und Transportvorgänge in einem Wasserversorgungsnetz keine signifikante Verzögerung auf.

Die Übertragung der per Funk gesendeten Messwerte der temporären Messstellen ist hingegen stark zeitverzögert. Zum einen wegen der Blockübertragung. Diese ist darüber hinaus u.a. abhängig von der Netzauslastung des Telekomanbieters und von der Verbindungsqualität der Sende-(=Datenlogger der Messstelle) bzw. Empfangskomponente (=GSM Server aufgestellt in der Leitwarte der KWL). Die vorgenannten Abhängigkeiten bedingen, dass der Zeitverzug nicht konstant ist und für jeden Datenlogger trotz Echtzeitsynchronisation der Logger individuell unterschiedlich sein kann; d.h. die Messwerte der temporären Messstellen treffen mit Zeitverzug zu unterschiedlichen Zeiten ein. Gegenüber dieser Zeitverzögerung und ihren Schwankungen spielen Zeiteffekte, die durch die weitere Verarbeitung der Daten auf dem Funkserver eingetragen werden können, nicht ins Gewicht.

Aufgrund der Verzögerung sind die Messwerte der temporären Messstellen nicht wie für die Online-Simulation benötigt als zu den Leitsystemmesswerten zeitlich synchrone Werte verfügbar. Am Beispiel der Durchflussmessungen, die als Steuergrößen verwendet werden, ist die erforderliche Synchronität am einfachsten nachvollziehbar: Durchflussmessungen, die als Steuergrößen der Online-Simulation dienen, werden benötigt, um die Last durch Summation der einzelnen Durchflussmesswerte zu ermitteln. Wenn folglich Synchronität dieser Durchflusssteuergrößen nicht gegeben ist, kann auch nicht die reale Last zu einem Zeitpunkt ermittelt werden, da Durchflussmesswerte die zu unterschiedlichen Echtzeiten gehören aufaddiert würden. Je größer der Zeitverzug desto größer wäre der Fehler in der Lastermittlung. In der nachfolgenden Abbildung 21 ist die Problemstellung, die sich aus dem Übertragungsverzug ergibt, skizziert.

Die Problemstellung, die sich durch den Übertragungszeitverzug ergibt, wurde mit einer neuen, durch 3S Consult im Rahmen des Arbeitspakets entwickelten SIR 3S Softwarekomponente, Sir OPC Drive in Verbindung mit Funktionalitäten des OPC Data Managers von Matrikon gelöst. Sir OPC Drive hat folgende Funktionalitäten:

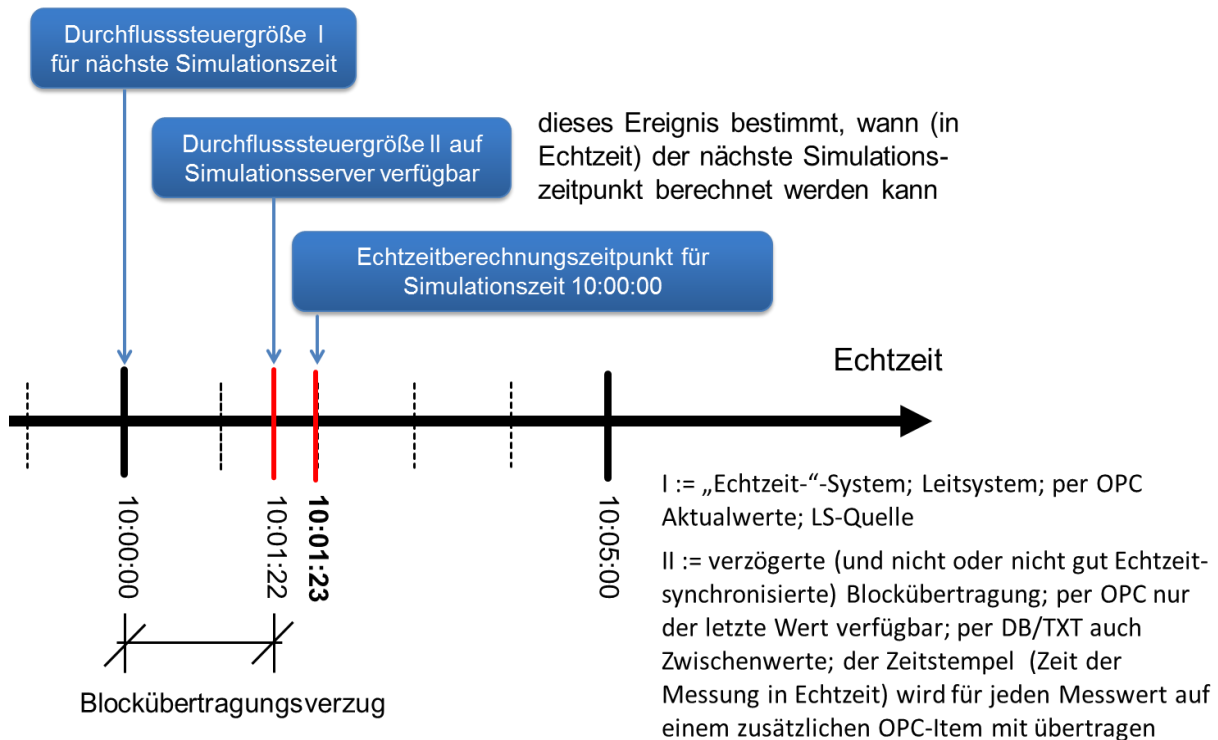


Abbildung 21 Problemstellung Übertragungszeitverzug der temporären Messstellen

1. Steuerung der Übertragung der Leitsystem Messdaten:

- Schaltet die OPC Datenübertrag der Leitsystem Messdaten aus, wenn die Simulationszeit erreicht ist (die Bedingung Simulationszeit = Echtzeit erfüllt ist). Die OPC Übertragung des OPC Data Manager kann über einen binären OPC Datenpunkt von außen aus- und wieder eingeschaltet werden. Diese Funktion wird ausgenutzt.
- Überwacht die Quittierung der letzten Simulationsrechnung und schaltet danach die OPC Datenübertragung der Leitsystem Messdaten wieder an.

2. Überwachung der per Funk übertragenen Messdaten:

- Bei der Feststellung, dass die für die Online-Simulation relevanten, per Funk übertragenen Messwerte der temporären Messstellen vollständig und aktuell sind, automatische Weitergabe des Rechne!-Befehls für die Online-Simulation.

Seitens der KWL bestand Interesse, die Messdaten der Multiparametersonden der Fa. Gero in das Leitsystem zu integrieren. Dies war im ursprünglichen Vorhaben (s. Forschungsantrag) auch so angedacht. Von Seiten der KWL wurde jedoch die Integration der Messwerte in das Leitsystem nicht gewünscht. Weiterhin verfügt die KWL über ein bestehendes System, das sie komponentenkonform halten und nicht um zusätzliche neue (Software-) Komponenten der Fa. Gero erweitern möchte. Von einer Integration der Messwerte aus temporären Messstellen wurde daher seitens KWL abgesehen, wodurch 3S Consult ein in der Antragstellung nicht vorhergesehener Mehraufwand entstand, der wie dargestellt gelöst wurde. Nachhaltig aus Sicht des SIR 3S Produktes: Die Lösung ist für alle gleichgelagerten Projekte effizient anwendbar.



II.1.7.1.6 Konfiguration Messtechnik

Konfiguriertes Messintervall

Für die zuverlässige Messung der Qualitätsparameter sollte folgende Bedingung gewährleistet sein:

Messintervall $\geq$ Zeit bis Verdrängungsvolumen ausgetauscht ist.

Solange das Verdrängungsvolumen (vgl. Definition in Kap II.1.7.1.2) nicht vollständig mit neuem Wasser ausgetauscht ist, bezieht sich die Messung auf dieselbe Probenahme und die Sonde würde zweimal dieselbe Wasserqualität messen. Für die Messungen wurde vorerst ein Messintervall von 30 s eingestellt. Gleichzeitig wurde ein maximal möglicher Abschlag (Ventil Probeentnahmeschlauch vollständig geöffnet), der gemäß Erfahrungswert der Fa. Gero bei ca. 150 l/h liegt, an den Sonden eingestellt.

Die tatsächlichen Abschlagsmengen der Multiparametersonden wurden probeweise im Laufe der Messkampagne mithilfe eines Messeimers vom TZW geprüft. Nachfolgend sind die tatsächlichen Abschlagsmengen aus den Volumenmessungen zusammengestellt.

Tabelle 4 Probeentnahmemengen

Hydrant	Probenahmemenge	
ID	l/h	m³/h
H7261	56,40	0,056
H8012	48,00	0,048
H20512	49,20	0,049
H10847	52,20	0,052
H10840	46,20	0,046
H7529	49,80	0,050
H10873	51,00	0,051
H7533	45,00	0,045
H16066	84,60	0,085
H790	37,20	0,037
H794	64,80	0,065
H16112	48,60	0,049
Mittelwert	52,75	0,053
Max	84,60	0,085
Min	37,20	0,037

Die realen Probeentnahmemengen sind deutlich geringer als die angenommenen Entnahmemengen bei maximal geöffnetem Probenentnahmeventil. Nachfolgend wird der Einfluss der Probeentnahmemenge in Abhängigkeit des Verdrängungsvolumens näher untersucht. Die Zeit, bis das Verdrängungsvolumen vollständig ausgetauscht, ist errechnet sich wie folgt:

Zeit $t = \text{Verdrängungsvolumen (V}_{\text{Ver}}) / \text{Probeentnahmemenge (Q}_{\text{Ent}})$



Bei einem angenommenen Verdrängungsvolumen von 0,005 m³ (entspricht einem Volumen von 1 m Rohr mit Innendurchmesser Di = 80 mm) und einer Entnahmemenge = 150 l/h beträgt die Zeit t = 0,033 h (=2,01 min). Weitere Beispiele sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

V _{Ver} (m ³)	0,005	0,005	0,002	0,002
Q _{Ent} (l/h)	150	50	150	50
Zeit t (min)	2.00	6.00	0.80	2.40
Zeit t (Sek.)	120	360	48	144

Die Zeit bei einem Verdrängungsvolumen von 0,002 m³ (entspricht dem Volumen von 1 m Rohr mit Innendurchmesser Di = 50 mm) und einer angenommenen Probeentnahmemenge von 150 l/h beträgt demnach 48 Sekunden. Dieser Wert wurde für die Bemessung des Messintervalls als Referenzgröße gewählt.

Konfiguriertes Übertragungsintervall

Limitierender Faktor für die Häufigkeit der Datenübertragung ist – bei gegebener Übertragungstechnik - die Akkulaufzeit der Batterien. Hochfrequente Übertragungen benötigen viel Energie. Um den Energieverbrauch möglichst gering zu halten, wurde vorerst ein Übertragungsintervall von 5 min (> Messintervall) gewählt.

Da für die Online-Simulation per OPC nur der letzte Messwert aus der Blockübertragung verfügbar ist, werden die Zwischenmesswerte, die in txt-Dateien zu Verfügung stehen und auch online mitübertragen werden, für optionale Offline Vergleichs-Nachberechnungen und Auswertungen genutzt.

II.1.7.2 Online-Simulationsmodell

II.1.7.2.1 Vorbemerkungen

Das bestehende Offline SIR 3S Modell, welches zur Risikobetrachtung im Projekt STATUS genutzt wurde, wurde für die Ausbreitungsversuche in STATUS aktualisiert und auf den GIS Stand 2012 gebracht.

Bei der Online-Simulation werden aktuelle Prozessdaten zur Steuerung des Modells verwendet. Die Steuergrößen werden 1:1 einem SIR 3S Element als Istwert auferlegt. Zum Beispiel kann ein gemessener Druck als Steuergröße verwendet werden und einem Knoten als Druckrandbedingung auferlegt werden. Steuergrößen entsprechen daher im Online-Ergebnis immer dem aktuellen Prozesswert. Somit wird sichergestellt, dass die Modellrandbedingungen immer den aktuellen Betriebszustand des realen Systems widerspiegeln. Im nachfolgenden Kapitel werden die Steuergrößen (=Randbedingungen der Online-Simulation) zusammengefasst.

II.1.7.2.2 Randbedingungen der Online-Simulation

Druckerhöhungsstation DEST

Randbedingungen (Steuergrößen):

Druck p (Messwert Leitsystem)



Leitfähigkeit (bekannter, als konstant angenommener Wert)

Zonentrennschieber:

Randbedingungen (Steuergrößen):

Durchfluss Q (Messwert IDM)

Leitfähigkeit (bekannter, als konstant angenommener Wert)

Detektierung des Verbrauchs (der Last) in der Zone unter Annahme eines leckfreien Zustandes:

Durchfluss Q DEST (Messwert Leitsystem) +

Durchfluss Q Zonentrennschieber (Messwert IDM)

Die Überführung der Messgrößen in Modellparameter des Simulationsmodells erfolgt über das sogenannte Signalmodell innerhalb der Software SIR 3S (Abbildung 22).

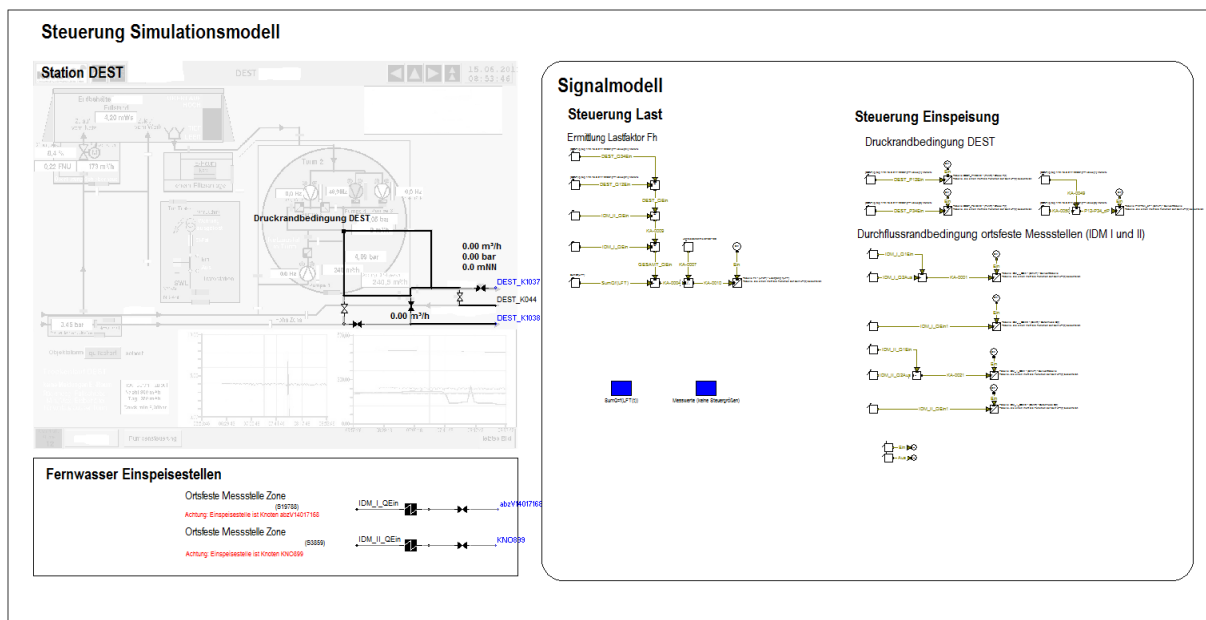


Abbildung 22 Steuerung des SIR 3S Simulationsmodells

Durch die Detektierung des Verbrauchs muss der simulierte Durchfluss in der DEST immer gleich dem gemessenen Durchfluss in der DEST sein. Anhand des Vergleichs Messung/Rechnung Durchfluss DEST kann die Simulation verifiziert werden. Der Durchfluss DEST ist eine Kontrollgröße mit Verifikationscharakter: Unabhängig vom Kalibrierungsstand muss für diese Kontrollgröße Messung=Rechnung gelten. Dieser Sachverhalt kann im Sinne von Wahr/Falsch binär verifiziert werden. Deshalb spricht man von Verifikation und nicht von Kalibrierung oder gar Validierung.

Der Druck am Zonentrennschieber ist eine Kontrollgröße mit Kalibrierungscharakter: Denn es gibt freie Parameter im Modell, die zum Zweck einer guten Übereinstimmung Messung/Rechnung angepasst werden können. Diesen Vorgang nennt man Kalibrierung. Drücke und Leitfähigkeiten der mobilen Multiparametersonden sind ebenfalls Kontrollgrößen.



Für die Kalibrierung werden in der Regel ein oder mehrere Szenarien (Versuche, Messkampagnen, Betriebstage) verwendet. Das so kalibrierte Modell wird dann mit einem oder mehreren Szenarien konfrontiert, welche nicht bereits für die Kalibrierung verwendet wurden. Aus dem Vergleich Messung/Rechnung wird dann die Güte des Modells abgeleitet und beurteilt. Diesen Vorgang nennt man Validierung. Validierung ob und in wie weit ein Modell für eine Aufgabenstellung geeignet ist.

Neben den beiden ortsfesten Messstellen mit IDM Messung wurden 4 weitere temporäre Messstellen eingebaut. Die Datenlogger der temporären Messstellen messen Druck, Leitfähigkeit, Temperatur, pH-Wert, aber keine Durchflüsse. Anhand der Messwerte dieser mobilen Logger sollte die Ausbreitungsberechnung einschließlich Hydraulik validiert werden. Die Messsonden wurden im Versuchszeitraum mehrfach umgesetzt. Zur Validierung wurden folgende Messdaten verwendet:

- Hydraulik: 4x Druck der mobilen Messsonden
- Stofftransport bzw. indirekt Durchflussverteilung/Strömungsfeld: 4x Leitfähigkeitsmessungen der mobilen Messsonden

II.1.7.3 Einflussfaktoren auf Abweichung zwischen Messung und Rechnung

II.1.7.3.1 Modellierungsfehler:

Aktualität des Modells:

Um das Modell auf den aktuellen GIS Stand zu bringen, wurde es per Modellvergleich aktualisiert. Somit wurde gewährleistet, dass das Modell den aktuellsten GIS Stand widerspiegelt.

Schieberstellungen:

Schieberstellungen Auf/Zu sind keine Sachdaten sondern Bewegungsdaten – auch Betriebszustandsdaten genannt, weil sie Bestandteil des netzbetrieblichen Zustandes eines Wasserversorgungsnetzes sind.

Die KWL Mitarbeiter sind mit sogenannten Handhelds⁴ ausgestattet. Mithilfe der Handhelds werden leitungsrelevante Angaben, wie z.B. Schieberstellungen bei Vororteinsätzen (z.B. auf Baustellen) durch den Messtrupp digital gesammelt. Die Daten der Handhelds werden taggleich in das GIS –System der KWL übertragen. Vorort aufgenommene Daten durch Handhelds (z.B. geänderte Schieberstellungen) sind somit am Folgetag im GIS enthalten. Die Datenqualität und -aktualität des GIS konnte somit gemäß Aussage der KWL stark verbessert werden. Jedoch sind weiterhin Fehler / Fehleintragungen aufgrund menschlichen Fehlverhaltens, z.B. in Stresssituationen bei der Behebung von Havarie Fällen nicht auszuschließen.

Da im Modell falsch eingestellte Schieber starken Einfluss auf die berechnete Flussverteilung haben, wurden die Schieberstellungen in einem separaten Bearbeitungsschritt beim Modellupdate geprüft und ggfs. aktualisiert. Gemäß den Aussagen zur Datenqualität der KWL ist somit von einem geringen Einfluss auf Abweichungen zwischen Messung Rechnung auszugehen. Es ist jedoch festzuhalten, dass diese Aussage nur dann gelten kann, wenn während der gesamten Messkampagne die Schieberstellungen nicht verändert werden. Über die SIR

⁴ Mobilgeräte zur Datenerfassung



3S-Online-Schnittstelle konnten die KWL die Schieberstellungen leider nicht zur Verfügung stellen, da diese ausschließlich mit dem Leitsystem der KWL datentechnisch verbunden ist und bei den KWL die Schieberstellungen im GIS und nicht im Leitsystem nachgeführt werden.

Rauheitswerte / Durchmesser etc.:

Die von der Fa. Pöry im Zuge einer Modellkalibrierung ermittelten Rauheitswerte und Innendurchmesser wurden in das SIR 3S Modell übernommen. Große Abweichungen zwischen berechneten bzw. gemessenen Drücken können auf falsch angenommene Rauheitswerte und ggfs. Innendurchmesser hinweisen.

(Lage-) Genauigkeit des Modells bzgl. der Messpunkte, Geometrie Rohrnetz und geodätische Höhe Druckmessstellen :

Im SIR 3S Modell wurden die Hydranten und die Zonenschieber, die als Messstellen verwendet wurden, als Knoten modelliert. Die X, Y Koordinaten der Messstellen im SIR 3S Modell entsprechen den GIS Koordinaten. Die neuen Durchflussmessschächte, die im Rahmen von STATuS neu gebaut wurden, sind von den KWL vermessungstechnisch aufgenommen und zunächst in das GIS übertragen worden. Entsprechend der Lage im GIS wurden dann die Durchflussmessstellen in SIR 3S modelliert. Die Lagegenauigkeit in SIR 3S ist demnach an das GIS gekoppelt.

Die geodätische Höhe der Rohrleitungen ist im GIS nicht Bestandteil der Datenhaltung. Die Höhen im Modell (Knotenhöhen) stammen aus einem Digitalen Gelände-Modell (DGM). Die Knotenhöhen in SIR 3S entsprechen der Geländeoberkante des Geländemodells. Da die Genauigkeit der berechneten Knotendrücke in bar von der Bezugshöhe abhängig ist, wurden die Höhen der Druckmessstellen im Zuge des Modellupdates mit den Kanaldeckelhöhen aus dem GIS verglichen und ggfs. bei großen Abweichungen einander angeglichen. Konstante, vom Last- und Fließzustand unabhängige Abweichungen der Drücke bei Vergleich Messung/Rechnung können ihre Ursache in einer fehlerhaften geodätischen Höhe der Druckmessstelle haben. Der Einfluss auf die Simulationsgüte ist in diesem Punkt daher an die Genauigkeit des GIS bzw. des Geländemodells gekoppelt. Die Abweichung kann schlussendlich nur durch Einmessen der geodätischen Höhe der Druckmessstellen beurteilt bzw. korrigiert werden.

Verbraucherverhalten (reale Entnahme der Kunden):

Die realen Verbrauchsprofile der einzelnen Wasserkunden sind unbekannt. Anhand der Durchflussmessstellen ist es für die Online-Simulation unter Annahme eines leakagefreien Zustandes möglich, die aktuelle Gesamtlast in der PZ-S zu ermitteln. Anhand der detektierten Last in der PZ-S wird in der Online-Simulation ein aktueller Online-Lastfaktor berechnet. Durch den Online-Lastfaktor wird das reale Verbrauchsprofil der Kunden in der Online-Simulation approximiert. Die Last des jeweiligen Wasserkunden errechnet sich in der Online-Simulation wie folgt:

Akt. Entnahme Wasserkunden = Verbrauch aus Jahresabrechnung $\times$ Online – Lastfaktor

mit:

$$\text{Online – Lastfaktor} = \frac{\text{aktuell detektierte Last}}{\sum \text{Jahresverbrauchswerte}}$$



Es ist davon auszugehen, dass die Abweichung zwischen tatsächlichem Verbraucherverhalten und approximiertem Verbraucherverhalten den größten Einfluss auf die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung von mit der Strömung transportierten Konzentrationen oder molekularen Eigenschaften nimmt. Auf diesen Punkt wird in der Auswertung noch näher eingegangen.

Einfluss Verbrauch Großkunden:

Im Norden der PZ-S ist eine Wäscherei angeschlossen, für die im Zuge der Modellkalibrierung ein eigenes Lastprofil ermittelt wurde. Das Lastprofil unterscheidet zwischen Arbeits- bzw. Wochenendtag. Die Online-Simulation wurde unter Verwendung dieses Lastprofils durchgeführt. Die Ergebnisse der Online-Simulation zeigen jedoch, dass die Simulation mit oder ohne Lastprofil keinen nennenswerten Einfluss auf die Durchflussverteilung in den beiden Pilotzonen nimmt. Der Einfluss des Verbraucherverhaltens dieses Großkunden in Bezug auf die Simulationsgüte des Strömungsfeldes ist daher in den beiden Pilotzonen gering. Generell gilt natürlich, dass jedes näher untersuchte Lastprofil, jeder gemessene Verbraucher die Simulationsgüte verbessert. In diesem vorliegenden Fall verändert das Verbraucherverhalten des Großkunden bedingt durch seine Lage und seine Anbindung ans Netz das Strömungsfeld in den Pilotzonen nur unwesentlich.

II.1.7.3.2 SIR 3S Stofftransport Berechnungsalgorithmus

Vereinfachter Stofftransportberechnungsansatz in SIR 3S

Zur instationären Berechnung der Ausbreitung der Leitfähigkeit wurde ein vereinfachter Ansatz verwendet. Es werden alleine die advektiven Terme aus der Stofftransportgleichung berücksichtigt. Die molekulare bzw. turbulente Diffusion und die Dispersion genauso wie Stoffzersetzungsprozesse werden vernachlässigt. Da die Leitfähigkeit ein konservativer Stoff ist, haben Stoffzersetzungsprozesse folglich im Gegensatz zu den übrigen Vereinfachungen keinen Einfluss auf die Güte. An Kreuzungsstellen wird vereinfacht von einer vollständigen, unmittelbaren Durchmischung ausgegangen. Diese Vereinfachung kann Abweichungen zwischen Messung und Rechnungen bedingen. Der Einflussgrad ist nur schwer abzuschätzen und anhand der Messergebnisse nicht auszuwerten. Um den Einfluss der angenommenen Vereinfachung zu ermitteln, müsste für die Versuche eine größere Anzahl mobiler Messstellen zu Verfügung stehen. Nur dann könnte die Durchmischung an Kreuzungsstellen messtechnisch erfasst und der Einfluss des vereinfachten Durchmischungsansatzes näher spezifiziert werden (Ho & O'Rear, 2009).

Diskretisierung (Berechnungsintervall) / Courant Zahl

Nach Fertigstellung des Modellupdates wurden kurze Rohrleitungen zusammengefasst (aggregiert). Dies hat den Hintergrund, dass hinsichtlich der Ausbreitungsberechnung kurze Rohrleitungen zu numerischen Problemen bei Vereinigungen (Mischungsvorgänge) führen können. Die Probleme treten dann auf, wenn folgender Sachverhalt eintritt:

$$u > \frac{L}{dt} \quad \text{Courant Zahl} = \frac{u \times dt}{dx}$$

mit:

u Fließgeschwindigkeit



L	Rohrlänge
dt	Diskreter Zeitschritt
dx	Diskreter Ortsschritt

In diesem Fall ist die Courant Zahl > 1 und deutet darauf hin, dass die sich mit der Strömung fortbewegende Front im aktuellen Berechnungszeitschritt rechnerisch über das Rohrende hinausreicht. Bei Vereinigungen (Mischungsvorgängen) muss der Berechnungsalgorithmus darauf reagieren. Die numerische Güte, mit der das möglich ist, ist abhängig von der Courant Zahl. Der interne Berechnungszeitschritt wurde wegen der, trotz Aggregation, teilweise im Modell verbliebenen sehr kurzen Rohrleitungen auf 30 s gesetzt, um geringe Courant Zahlen während der Online-Simulation zu gewährleisten.

Anmerkung: Der numerische Fehler, der durch einen Berechnungsalgorithmus durch hohe Courant Zahlen eingetragen wird, kann praktisch leicht ermittelt werden, indem dasselbe Szenarium 1x mit großem Zeitschritt und 1x mit einem 100-fach kleineren Zeitschritt ermittelt wird.

Diskretisierung Mobilfunk-Prozessdaten (Abtaste der Randbedingungen):

Bedingt durch die bereits erläuterten Sachstände bei der Prozessdatenübertragung per Mobilfunk ist für die Online-Simulation auf dem OPC-Kanal immer nur der jeweils letzte (aktuellste) Messwert verfügbar. Die Online-Simulation verwendet folglich Ist-Werte im 5-Minutenraster an den per Mobilfunk bestückten OPC-Kanälen. Bei Bedarf könnte das Übertragungsintervall geringer gewählt werden, um hiermit eine hochauflösendere Verfügbarkeit der Prozessdaten und damit eine Online-Simulation mit kürzeren Zeitschritten zu ermöglichen. Dies wurde ausgangs der Messkampagne als Option vorgesehen, um im Fall großer Abweichungen reagieren zu können.

II.1.7.3.3 Messungenauigkeiten

Messung der Qualitätsparameter / Leitfähigkeitsmessung an temporären Messstellen:

Das Eintreffen der Wasserfront aus der Nachbarzone wird von den mobilen Multiparametersonden genau dann korrekt wiedergegeben, wenn durch den Vorgang Verdrängung/Probenahme die Messung nicht maßgeblich verzögert wird. Da das Verdrängungsvolumen an den einzelnen Hydranten-Messstellen nicht bekannt ist, konnte es in der Online-Simulation auch nicht berücksichtigt werden. Beispielrechnungen zeigten jedoch, dass realistische Verdrängungsvolumenschätzungen eine Verzögerung von bis zu 6 Minuten bedeuten können. Ein Einfluss des Verdrängungsvolumens ist gegeben und kann aufgrund des unbekannten realen Verdrängungsvolumens jedoch nicht genauer spezifiziert werden.

Weiterhin ist die Leitfähigkeit ein Qualitätsparameter, der von anderen Parametern beeinflusst werden kann. So ist die Leitfähigkeit abhängig von der Wassertemperatur und dem pH-Wert. Änderungen in der Leitfähigkeit können die Folge eines geänderten pH-Wertes bzw. Wassertemperatur sein. Die Multiparametersonden wurden bevor der erste Ausbreitungsversuch mit paralleler Online-Simulation unternommen wurde mit einer temperaturkompensierten Leitfähigkeitsmessung ausgestattet. Die Temperaturschwankungen sollten demnach keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Ausbreitungsversuche haben.

Hier angemerkt sei, dass die Multiparametersonden regelmäßig (alle 2 Wochen) kalibriert worden sind, der Probeentnahmeschlauch bei jeder Umsetzung neu bemessen wurde und



im Versuchszeitraum ein ständiger Kontakt zum Sonden-Hersteller gehalten wurde. Es wurde folglich alles dafür unternommen bestmögliche Messergebnisse zu erzielen. Eine höhere Messgenauigkeit war in diesen Feldversuchen nicht zu erreichen.

Druckmessung an temporären Messstellen

Die Druckmessung an den temporären Messstellen erfolgt nicht direkt in der Rohrleitung sondern im Gehäuse der Multiparametersonde. Der Messfehler wirkt sich in bar auf die 2. Nachkommastelle aus. Eine weitere Ursache für möglicherweise abweichende Drücke zwischen Messung und Rechnung ergibt sich durch die angenommenen Bezugshöhen (s.a. Abschnitt II.1.7.3.1).

Genauigkeit der Durchflussmessung IDM

Messunsicherheiten werden in Datenblättern vom IDM Hersteller in der Größenordnung von 0,5 % beziffert. Jedoch können sich die vom Hersteller genannten Abweichungen durch Einbaufehler etc. noch vergrößern. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt die Abhängigkeit der Messfehler von der Fließgeschwindigkeit – also vom Durchfluss. Es gilt: je kleiner die Fließgeschwindigkeit desto größer der relative Fehler.

Die im Datenblatt angegebenen Abweichungen sind jedoch in Bezug auf die Online-Simulation unerheblich und sollten einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Online-Simulation nehmen, solange die Herstelleranweisungen beim Einbau befolgt wurden.

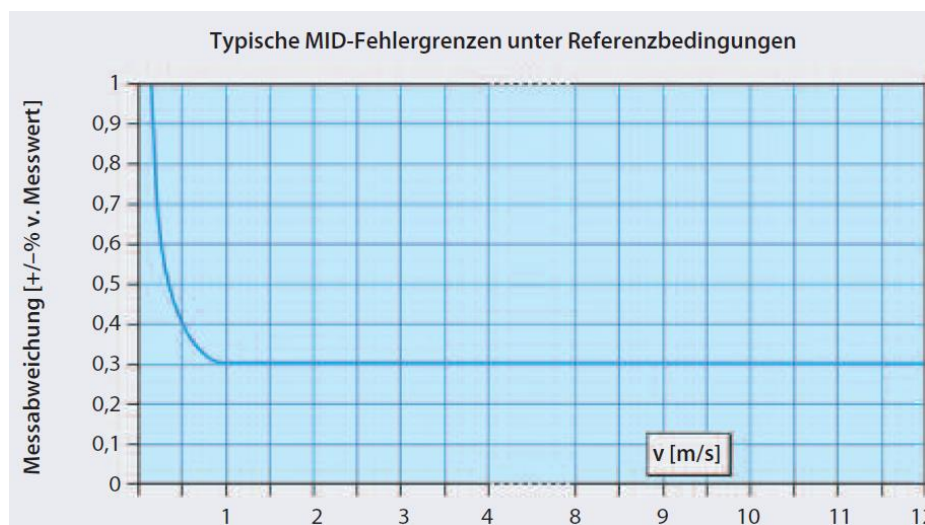


Abbildung 23 Abhängigkeit der Messabweichung von der Fließgeschwindigkeit (11/2011 WVGW)

II.1.7.3.4 Zeitverzug / Zeitungleichheit bei der Übertragung der Messdaten (Prozessdaten)

Das Problem der Zeitungleichheit der Prozessdaten wurde durch die im Rahmen des Vorhabens neu entwickelte SIR 3S Komponente SIR OPC Drive gelöst. Damit konnte weitestgehend eine Zeitgleichheit der Prozessdaten erreicht werden (siehe Abschnitt II.1.7.1.5).

II.1.7.4 Durchführung der Messkampagne [TP 4b-1-9]

II.1.7.4.1 Überblick über den zeitlichen Ablauf aller Versuche



Die Inbetriebnahme der mobilen Messapparaturen erfolgte am 12.06.2012

Aufgrund von Verzögerungen bei der Installation des Messschachts inkl. Messtechnik konnten die ortsfesten Messstellen nicht früher (zeitgleich mit den mobilen Messapparaturen) in Betrieb genommen werden. Gründe für Verzögerungen:

- Straßensperrungs-Antrag zur Verlegung des Messschachts wurde abgelehnt. Begründung: Straße musste zur Umgehung einer Baustelle andernorts befahrbar bleiben.
- Verzögerungen bei der Bestellung/Auslieferung der Messtechnik.

Die erstmalige Inbetriebnahme der ortsfesten Messapparaturen in Pilotzone 2 erfolgte am 24.08.12, die der ortsfesten Messapparatur in Pilotzone 1 am 31.08.12.

Die Ausbreitungsversuche mit begleitender Online-Simulation mussten aufgrund der Verzögerungen vorerst aufgeschoben werden:

Da die Durchflussmessung an den Zonentrennschiebern eine erforderliche Steuergröße für die Online-Simulation ist, konnte mit den Ausbreitungsversuchen erst begonnen werden, nachdem der Messschacht inkl. IDM installiert worden war und die Durchflussmessung als OPC Datenpunkt in der Online-Simulation zur Verfügung stand.

Die Zeitspanne von der Inbetriebnahme der mobilen Messapparaturen bis zur Inbetriebnahme der Durchflussmessung am Zonentrennschieber wurde genutzt, um die mobilen Messapparaturen zu testen und erste Erfahrungen über die Zuverlässigkeit der Leitfähigkeitsmesswerte zu sammeln. In Vorausversuchen ohne Durchflussmessung am Zonentrennschieber wurde u.a. auch geprüft, ob bei geöffnetem Zonentrennschieber und in die Pilotzone 1 einströmendem Fernwasser anhand der mobilen Messapparaturen die FW-Front an ausgewählten Messstandorten nachgewiesen werden kann. Im Rahmen dieser Vorausversuche wurden festgestellt, dass für die Ausbreitungsversuche eine Drosselung des Einspeisedrucks in der DEST erforderlich ist, um relevante Einspeisemengen über den Zonentrennschieber zu erzielen.

Aufgrund der größeren Verzögerung bei der Installation des Messschachts in Pilotzone 1, wurde entschieden, den ersten Ausbreitungsversuch mit Online-Simulation in der Pilotzone 2 durchzuführen.

Der erste Ausbreitungsversuch erfolgte in Pilotzone 2 am 11.09.2012.

Die Ergebnisse zu diesem ersten Ausbreitungsversuchs wurden als zufriedenstellend bewertet, da Messung und Rechnung das Eintreffen der Front an allen Messstellen gut wiedergegeben haben. Für die Pilotzone 2 war in der ursprünglichen Versuchsplanung kein Umsetzen der mobilen Messapparaturen vorgesehen. Deswegen und wegen des begrenzten Zeitraumes für die Messkampagne insgesamt wurde entschieden die Ausbreitungsversuche in der Pilotzone 1 fortzusetzen.

Der zweite Ausbreitungsversuch erfolgte in Pilotzone 1 am 19.10.2012.

Es wurden für diesen Versuch zonentrennschiebernahe Messstandorte für die mobilen Messstellen in der Pilotzone 1 gewählt um sicherzustellen, dass die FW-Front auch alle mobilen Messstellen erreicht. Da die Ergebnisse aus diesem Ausbreitungsversuch am 19.10.2012 ebenfalls als gut bewertet wurden - Messung und Rechnung haben das Eintreffen der Front an den Messstellen gut wiedergegeben - wurden für den nächsten und gleich-



zeitig letzten Ausbreitungsversuch zonentrennschieberentferntere Standorte für die mobilen Messstellen gewählt. Gleichzeitig wurde der Zonentrennschieber über einen verlängerten Zeitraum (insgesamt rd. 29 h) geöffnet, um sicherzustellen, dass wiederum die FW- Front alle Messstellen erreicht.

Nach dem dritten Versuch am 12.11.2012 – dem zweiten Versuch in Pilotzone 1 – wurden die Versuche beendet, da die Multiparametersonden nicht frostfest sind.

In der ursprünglichen Versuchsplanung waren 5 Versuche vorgesehen. Ein 4. zeitgleich in beiden Pilotzonen. Und ein 5. in Pilotzone 1 mit zeitweise geöffnetem Hydranten, um das Strömungsfeld deutlich zu beeinflussen. Jedoch waren aufgrund der Verzögerungen und dem einsetzenden Frost keine weiteren Versuche mehr möglich.

II.1.7.4.2 Überblick über den Ablauf eines Versuches

Ein Ausbreitungsversuch lief wie folgt ab:

1. Auswahl der Standorte für die mobilen Messapparaturen durch 3S unter Einsatz des SIR 3S Modells und Mitteilung der Standorte an die KWL und das TZW [TP 3b-4]
2. Beantragung der Straßenabspernungen für die mobilen Messapparaturen durch die KWL
3. Einbau der mobilen Messstellen an den auserwählten Standorten durch das TZW und die KWL
4. Kontrolle der Funktionalität der Messapparaturen und Plausibilitätsprüfung der Messwerte durch 3S (Sicherstellung, dass kein FW aus einem evtl. vorherigen Versuch an Messstellen nachgewiesen werden kann)
5. Festsetzung des Zeitpunkts, ab dem und wie lange der Zonentrennschieber geöffnet wird durch die KWL und 3S unter Einsatz des SIR 3S Modells
6. Öffnen und Schließen des Zonentrennschiebers gemäß Festsetzung durch die KWL
7. Drosselung des Einspeisedrucks der DEST durch die KWL
8. Beenden der Online-Simulation nachdem das FW durch die DEST wieder von allen vier mobilen Messstellen verdrängt wurde (Kontrolle durch 3S unter Einsatz des SIR 3S Modells)
9. Kurzbewertung der Ergebnisse durch 3S und Planung des nächsten Ausbreitungsversuchs durch 3S

II.1.7.5 Erfahrungen aus der Versuchspraxis und Empfehlungen

II.1.7.5.1 Messtechnik

Messgenauigkeit:

Die Messungsgüte der Multiparametersonde insbesondere der Qualitätsmessung war nicht immer stabil. Im Verlauf der Messkampagne zeigte sich, dass in der Regel alle 2 Wochen die Kalibrierfaktoren neu eingestellt werden mussten. Die Leitfähigkeitsmessung der Multiparametersonden wurde daher bei jeder Umsetzung und zusätzlich, sobald nicht plausible Messwerte übertragen und von 3S festgestellt wurden, neu parametrisiert. Die Änderung der Kalibrierfaktoren erfolgte durch eine Vergleichsmessung mit einem geeichten Handgerät des TZW.



Zuverlässigkeit der Messungen:

Nach Inbetriebnahme der Multiparametersonden kam es zu Ausfällen der Messtechnik, die durch einen Vororteinsatz behoben werden mussten.

Frostbeständigkeit:

Die Messversuche wurden nach dem dritten erfolgreichen Versuch am 12.11.2012 beendet. U.a. deswegen, weil die Multiparametersonden nicht frostbeständig sind und weitere Messungen aufgrund des einsetzenden Frostes nicht möglich gewesen wären. Von den KWL wurde daher empfohlen, zukünftig die Multiparametersonden mit einer Außentemperaturmessung zu versehen, damit der einsetzende Frost rechtzeitig erkannt werden kann und bei kritischen Außentemperaturen die Multiparametersonden ausgebaut werden können.

Stromversorgung:

Die Akkumulatoren der Multiparametersonden haben sich gemäß ihrer Bemessung als ausreichend erwiesen. Ein Austausch oder Aufladen der Akkumulatoren war daher im Verlauf der Messkampagne nicht erforderlich. Hingegen zeigte sich, dass die Akkumulatoren der IDMs zu gering bemessen waren und daher die Messkampagne zum Aufladen der Akkumulatoren unterbrochen werden musste. Vorteilhaft für zukünftige Messvorhaben wäre, wenn die Datenlogger zusätzlich den Ladestand übertragen würden, so dass bei kritischem Ladestand rechtzeitig reagiert werden kann.

Laufende Probenahme:

Die Befürchtung Passanten oder Anwohner könnten die Schlauchklemme aus Unwissenheit schließen um „überflüssigen Wasserverbrauch“ zu unterbinden, hat sich nicht bewahrheitet. Passanten müssen jedoch des Öffnen den Probeentnahmeschlauch verlegt haben. Der Probeentnahmeschlauch wurde hierbei irrtümlich so platziert, dass das austretende Wasser direkt in die Straßenkappe mit der Messsonde entwässerte. Konsequenz: Straßenkappe inkl. Messsonde unter Wasser. Problem: Messsonden sind für ständigen Betrieb unter Wasser nicht ausgelegt. Evtl. führte dies zu den oben genannten Ausfällen der Multiparametersonden.

Leitfähigkeitsunterschiede trotz Temperaturkalibrierung und Nachkalibrierung:

Bei Leitfähigkeitsmessungen ohne einströmendes Fernwasser wurde festgestellt, dass die Multiparametersonden stark divergierende Leitfähigkeitsmesswerte liefern. Es wurde erwartet, dass, solange sich nur DEST Wasser in der Zone befindet, alle mobilen Messapparaturen dieselben Leitfähigkeitsmesswerte liefern. Tatsächlich betrugen die Leitfähigkeitsunterschiede an den verschiedenen Messstellen trotz Temperaturkompensation und regelmäßiger Nachkalibrierung bis zu rd. 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Diese Unterschiede liegen in der Größenordnung des Messsignals - die beiden Wässer unterschieden sich in ihrer Leitfähigkeit nur um 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Unabhängig von den Unterschieden im gemessenen Niveau bei eigentlich derselben Leitfähigkeit reagierten alle Leitfähigkeitsmessungen zuverlässig und eindeutig auf Änderungen der Leitfähigkeit.

Um Messung/Rechnung -Vergleiche trotz der Unterschiede überhaupt zu ermöglichen wurden die temperaturkompensierten Leitfähigkeiten für das DEST-Wasser (L_{DEST}) und für das Fernwasser (L_{FW}) vor jedem der drei Ausbreitungsversuche von 3S bestmöglich neu bestimmt. Die für die Versuche von 3S ermittelten Werte für das Wasser aus der DEST (L_{DEST}) und für das Fernwasser (L_{FW}) sind in den folgenden Kapiteln aufgeführt.



Leitfähigkeitsmessung an den Einspeisestellen:

Während der Versuchsplanung war man davon ausgegangen, dass auf Leitfähigkeitsmessungen an den Einspeisestellen verzichtet werden könne weil, DEST-Wasser und Fernwasser einen bekannten und konstanten Leitfähigkeitswert haben. Aus dem oben geschilderten Sachverhalt kann man jedoch zu dem Schluss kommen, dass bei zukünftigen Versuchen die Leitfähigkeit an den Einspeisestellen ebenfalls zu messen ist.

II.1.7.5.2 Hydraulik

Die ersten Vorversuche ohne IDM mit geöffnetem Zonentrennschieber zeigten, dass der sich einstellende Fernwasserzufluss über den Zonentrennschieber geringer ist als erwartet – die Front kam an den mobilen Messapparaturen gar nicht an. Der sich einstellende Fernwasserzufluss konnte im SIR 3S Modell vorher durch Berechnungen nicht genau ermittelt werden, weil der Vordruck der Fremdeinspeisung nicht bekannt war und auch der sich einstellende Druck KWL-seitig erst nach dem Einbau des IDM als Messwert verfügbar war.

Nachdem der IDM eingebaut worden war und erste Messwerte lieferte (Durchflüsse und in Verbindung mit der Gesamteinrichtung auch den Druck KWL-seitig) konnte modellgestützt leicht ermittelt werden, um wie viel der Einspeisedruck der DEST mindestens verringert werden musste, um den gewünschten Fernwasserzufluss in die Pilotzone zu erzielen. Bis zur Erkennung, Lösung und Verifikation dieser Zusammenhänge mussten die Versuche teilweise wiederholt werden, was zu weiteren Verzögerungen im Gesamtzeitplan führte.

II.1.7.5.3 Straßenabsperrungen

Diebstahl:

Es wurde „nur“ eine Schlauchklemme von einem Probeentnahmeschlauch abmontiert. Außerdem wurden Teile der Straßenabsperrung entwendet. Die Diebstahlvorfälle waren daher für die Messungen eher unbedeutend und führten zu keinen Verzögerungen.

Mutmaßliche Sachbeschädigungen:

Straßenabsperrungen wurden verrückt und umgeworfen. Ansonsten wurden keine weiteren besonderen Vorkommnisse festgestellt.

Anwohnerbeschwerden:

Nach Messung über einen Zeitraum von 4 Wochen wurden erste Anwohnerbeschwerden eingereicht. Konsequenz: eine Messstelle musste sofort umgesetzt werden. Eine Verlängerung der Straßenabsperrung an den übrigen Messstellen wurde abgelehnt. Insbesondere die Straßenabsperrungen, die teilweise Parkplätze versperrten, wurden von der Bevölkerung wenig akzeptiert. Aufgrund der Anwohnerbeschwerden wurde im weiteren Verlauf der Messkampagne nicht länger als 4 – 6 Wochen an einem Standort gemessen.

II.1.7.5.4 Netzbetrieb

Während einer Versuchskampagne über einen so langen Zeitraum ist mit durch den Netzbetrieb verursachten Änderungen zu rechnen, die in der ursprünglichen Versuchsplanung nur schwer vorhersehbar sind. Das war auch hier der Fall: Aufgrund einer Baumaßnahme auf der Zuleitung in die DEST ab Oktober 2012 musste die PZ-S netzbetrieblich neu aufgeteilt werden. Davon waren der zweite und dritte Versuch betroffen.



II.1.7.6 Ergebnisse, Vergleich Messung – Rechnung

II.1.7.6.1 Überblick

Insgesamt wurden drei Ausbreitungsversuche unternommen. Alle drei Versuche waren erfolgreich. Mit „erfolgreich“ ist hier gemeint, dass die Front die mobilen Messstellen erreicht hat, die Leitfähigkeitsänderungen aufgezeichnet und übertragen wurden und die Berechnungsergebnisse der Online-Simulation nachvollziehbar und plausibel sind – Messung und Rechnung folglich miteinander verglichen werden können.

Die Zeitpunkte der 3 erfolgreichen Versuche waren:

Erster erfolgreicher Versuch : 11.09.2012 in der Pilotzone 2

Zweiter erfolgreicher Versuch: 19.10.2012 in der Pilotzone 1

Dritter erfolgreicher Versuch: 12.11.2012 in der Pilotzone 1

In den im Folgenden gezeigten Zeitkurvendiagrammen sind Messwerte und berechnete Werte über der Zeit dargestellt. Sie bieten die Möglichkeit Messung und Rechnung miteinander zu vergleichen. Gegenübergestellt werden Drücke in bar und Durchflüsse in m³/h.

Bzgl. der Leitfähigkeit ist zu beachten, dass in SIR 3S die Mischtemperatur als Surrogat für die Mischung von Wässern mit unterschiedlicher Leitfähigkeit, verwendet wird. Eine berechnete (Misch-) Temperatur von 11°C ist der Leitfähigkeit des DEST-Wassers bzw. eine berechnete (Misch-) Temperatur von 10°C der Leitfähigkeit des FWs gleichzustellen. Um einen Vergleich zwischen berechneter Mischtemperatur als Surrogat für die Leitfähigkeit und der gemessenen Leitfähigkeit zu bewerkstelligen, wurden die gemessenen temperaturkompensierten Leitfähigkeiten durch lineare Interpolation in eine normierte Leitfähigkeit umgerechnet:

$$L_{\text{normiert}} = \frac{T_{\text{DEST}} - T_{\text{FW}}}{L_{\text{DEST}} - L_{\text{FW}}} (L_{\text{gem}} - L_{\text{DEST}}) + T_{\text{DEST}}$$

mit:

L_{normiert}	Normierte Leitfähigkeit in °C
T_{DEST}	Gewählte Temperatur für die DEST Leitfähigkeit in °C: 11°C
T_{FW}	Gewählte Temperatur für die FW- Leitfähigkeit in °C: 10°C
L_{DEST}	Temperaturkompensierte Leitfähigkeit DEST in µS/cm
L_{FW}	Temperaturkompensierte Leitfähigkeit Fernwasser in µS/cm
L_{gem}	Gemessene temperaturkompensierte Leitfähigkeit in µS/cm

Im Folgenden werden repräsentativ nur die Ergebnisse des dritten Ausbreitungsversuchs, der vom 12. November bis 13. November 2012 durchgeführt wurde, dargestellt. Für den Versuch am 12.11.2012 wurden die folgenden Stützwerte zur Berechnung der temperaturkompensierten Leitfähigkeiten in normierte Leitfähigkeiten gewählt:

- Fernwasser L_{FW} : 525 µS/cm
- Leitfähigkeit DEST L_{DEST} : 585 µS/cm



II.1.7.6.2 Lage der Messstellen und Ergebnisverlauf der wichtigsten Ereignisse:

Messung und Rechnung gaben in dem Ausbreitungsversuch am 19.10.2012 das Eintreffen der Fernwasserfront an allen vier Messstellen sehr gut wieder. Daher wurden für den letzten Versuch zonentrennschieberentferntere Hydranten für die mobilen Messstellen ausgewählt. Gleichzeitig wurde zwischen dem zweiten und dritten Versuch genug Zeit verstrichen lassen (insgesamt >2 Wochen), um sicherzustellen, dass das im vorherigen Versuch eingetragene FW vollständig aus der Zone ausgetragen wurde und damit eine Beeinflussung der Ergebnisse im Ausbreitungsversuch am 12.11.2012 ausgeschlossen werden kann.

Die Lage der Messstellen ist Abbildung 24 zu entnehmen. Die Seitenlänge der Rasterquadrante beträgt 200 m.

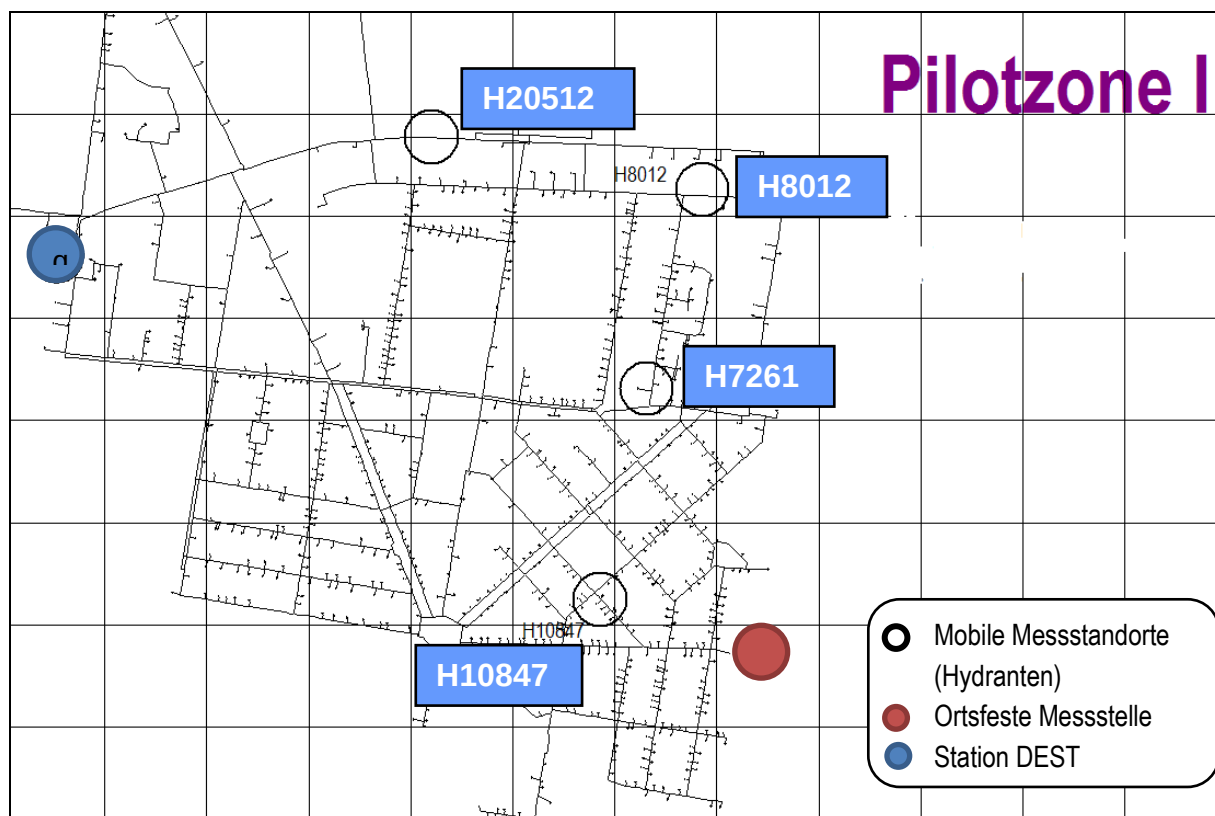


Abbildung 24 Messstandorte des dritten Ausbreitungsversuchs am 12.11.2012

Der zeitliche Verlauf der wichtigsten Ereignisse während der Messung ist Tabelle 5 aufgelistet.



Tabelle 5 Versuch am 12.11.12: Ereignisablauf

Ereignis	Zeitpunkt Messung	Zeitpunkt Rechnung	betragsmäßige Zeitdifferenz	längengemittl. Geschwindigkeit Pilotzone m/s	Äquivalente Distanz in Meter
Zonenschieber Auf	12.11.2012 09:55	12.11.2012 09:55	00:00:00	0,05	0
FW-Front erreicht H10847	12.11.2012 10:26	12.11.2012 10:10	00:16:00	0,05	48
FW-Front erreicht H7261	12.11.2012 12:30	12.11.2012 11:48	00:42:00	0,05	126
FW-Front erreicht H8012	12.11.2012 14:35	12.11.2012 15:02	00:27:00	0,05	81
FW-Front erreicht H20512	13.11.2012 01:20	12.11.2012 19:22	05:58:00	0,05	1074
FW-Front wird verdrängt H20512	13.11.2012 08:20	13.11.2012 16:05	07:45:00	0,05	1395
Zonenschieber Zu	13.11.2012 15:25	13.11.2012 15:25	00:00:00	0,05	0
FW-Front wird verdrängt H8012	13.11.2012 17:30	13.11.2012 20:05	02:35:00	0,05	465
FW-Front wird verdrängt H10847	13.11.2012 18:40	13.11.2012 18:35	00:05:00	0,05	15
FW-Front wird verdrängt H7261	13.11.2012 19:25	13.11.2012 19:40	00:15:00	0,05	45

II.1.7.6.3 Zeitkurven

Einspeisemenge

Während des Versuchs am 19.10.12 stellte sich heraus, dass der Hydrant H20512, der als Messstandort für den Versuch am 12.11.12 ausgewählt wurde, nicht mit FW angeströmt wurde. Für den Versuch am 12.11.12 musste daher der Zonentrennschieber über einen längeren Zeitraum geöffnet werden, um sicherzustellen, dass alle Hydranten inkl. H20512 von der Fernwasserfront erreicht werden. Der Zonentrennschieber wurde daher am 12.11.12 um 10:00 Uhr geöffnet und blieb insgesamt über rd. 29 h geöffnet.

Der Fernwasserzufluss betrug in diesem Zeitraum annähernd konstant 60 m³/h. Im Vergleich zum vorherigen Versuch ist der FW-Zufluss etwas unregelmäßiger. Zwischen 05:30 und 10:15 Uhr am 13.11.2012 Uhr findet kurzzeitig kein FW-Zufluss in die Pilotzone 1 statt. Dies ist zurückzuführen auf die gezielte Druckanhebung zu Spitzenlastzeiten in der DEST, um eine flächendeckende Versorgung bei ausreichendem Versorgungsdruck zu garantieren. Die Wechselwirkungen zwischen FW-Zufluss und Einspeisemenge DEST können wie folgt zusammengefasst werden:

Zu Spitzenlastzeiten:

Bedingt durch den erhöhten Einspeisedruck an der DEST steigt die Einspeisemenge der DEST und sinkt der FW-Zufluss ab.

Außerhalb von Spitzenlastzeiten:

Bedingt durch den reduzierten Einspeisedruck DEST sinkt die Einspeisemenge der DEST ab und steigt der FW-Zufluss.

Die Zeitkurven der berechneten und gemessenen Durchflussmessungen sind in Abbildung 25 dargestellt. Die „dicken“, helleren Linien gehören dabei zu den Messwerten, die „dünnen“, dunkleren zu den Berechnungsergebnissen. Die Mengen der DEST sind in blauer Farbe dargestellt, der zeitliche Verlauf der Einspeisung am Zonentrennschieber ist in brauner Farbe gezeichnet.

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind nochmals für die beiden Einspeisestellen getrennt die Zeitkurven der hydraulischen Größen Druck und Einspeisemenge sowohl für Messung als auch Rechnung dargestellt

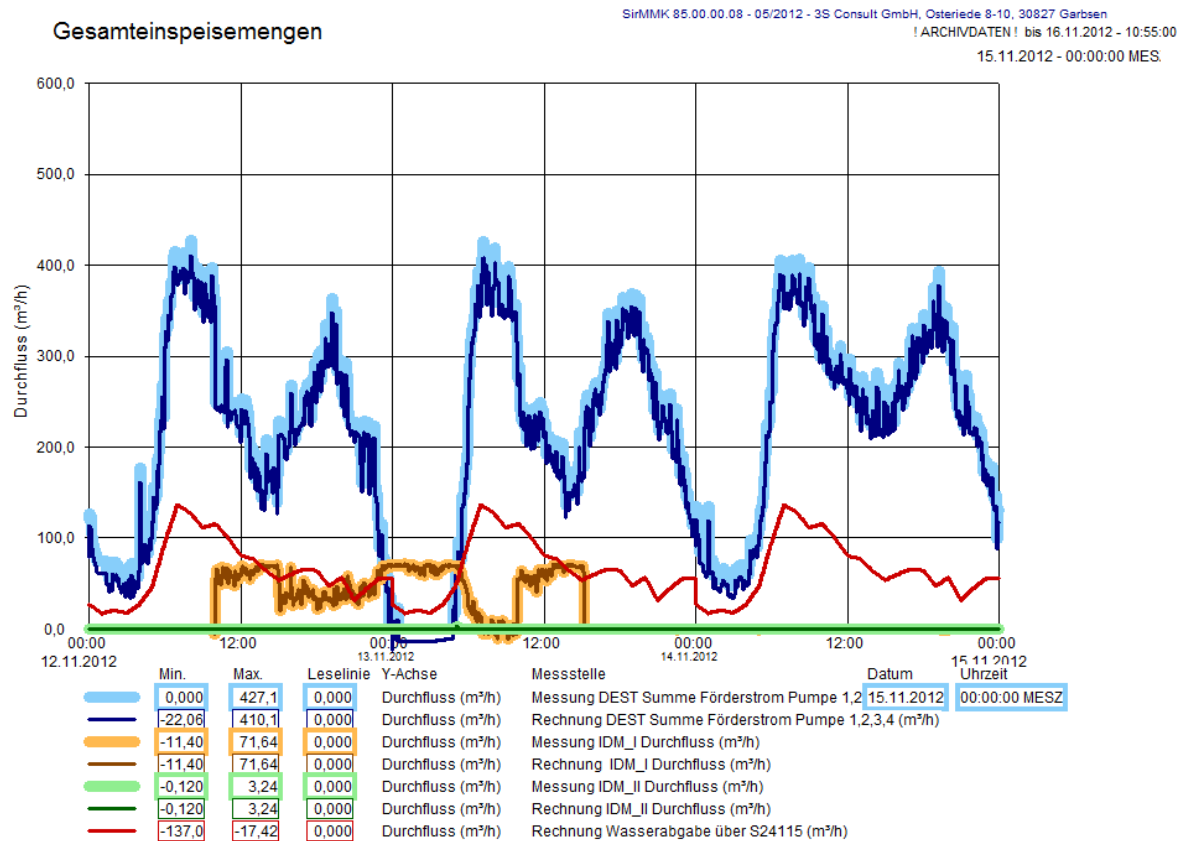


Abbildung 25 Versuch 12.11.2012 - Einspeisemengen

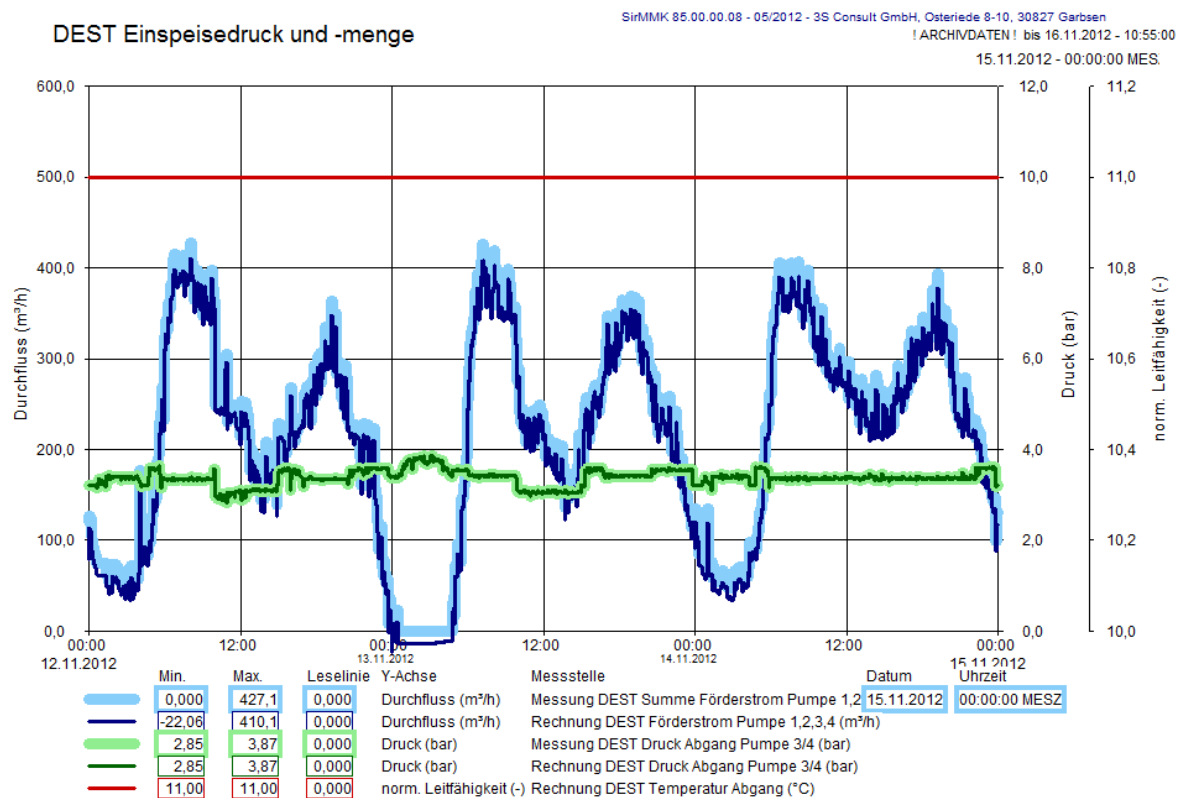


Abbildung 26 Einspeisemengen und Druck an der DEST

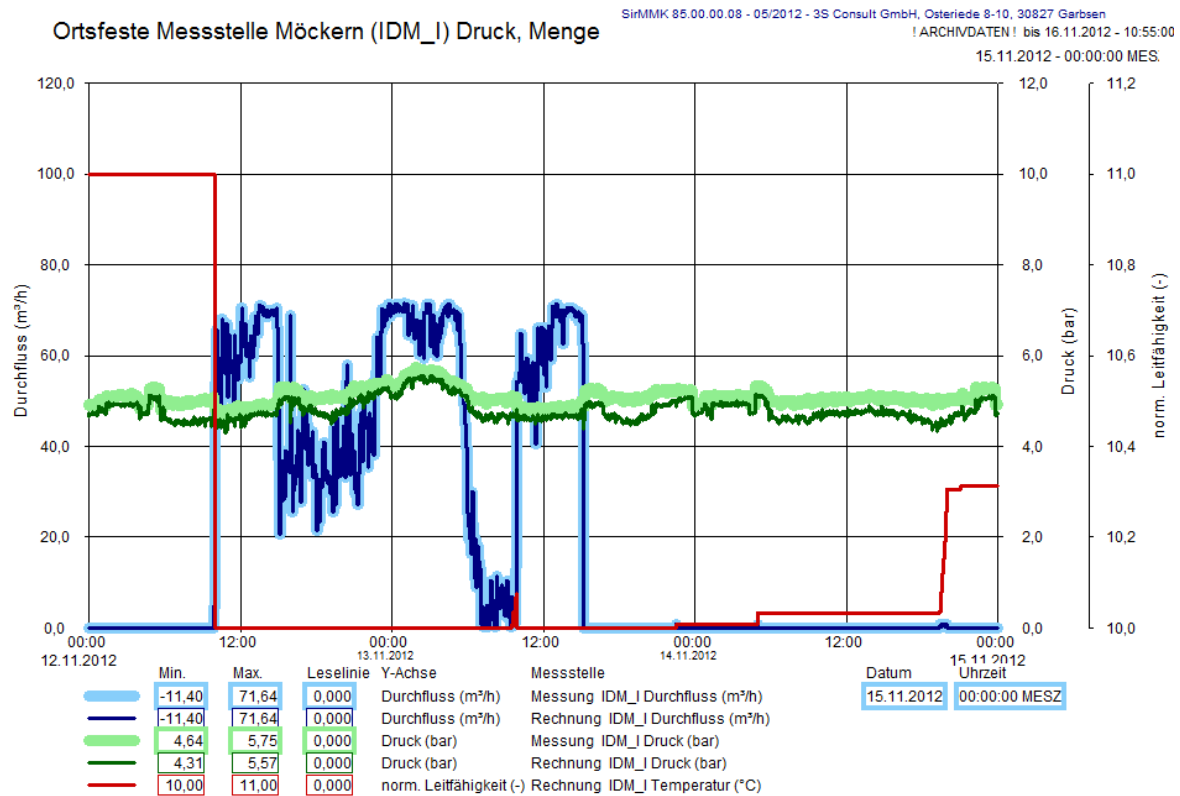


Abbildung 27 Einspeisemengen IDM_I (Zonentrennschieber) und Druck

Messstelle Hydrant H10847 (Abbildung 28)

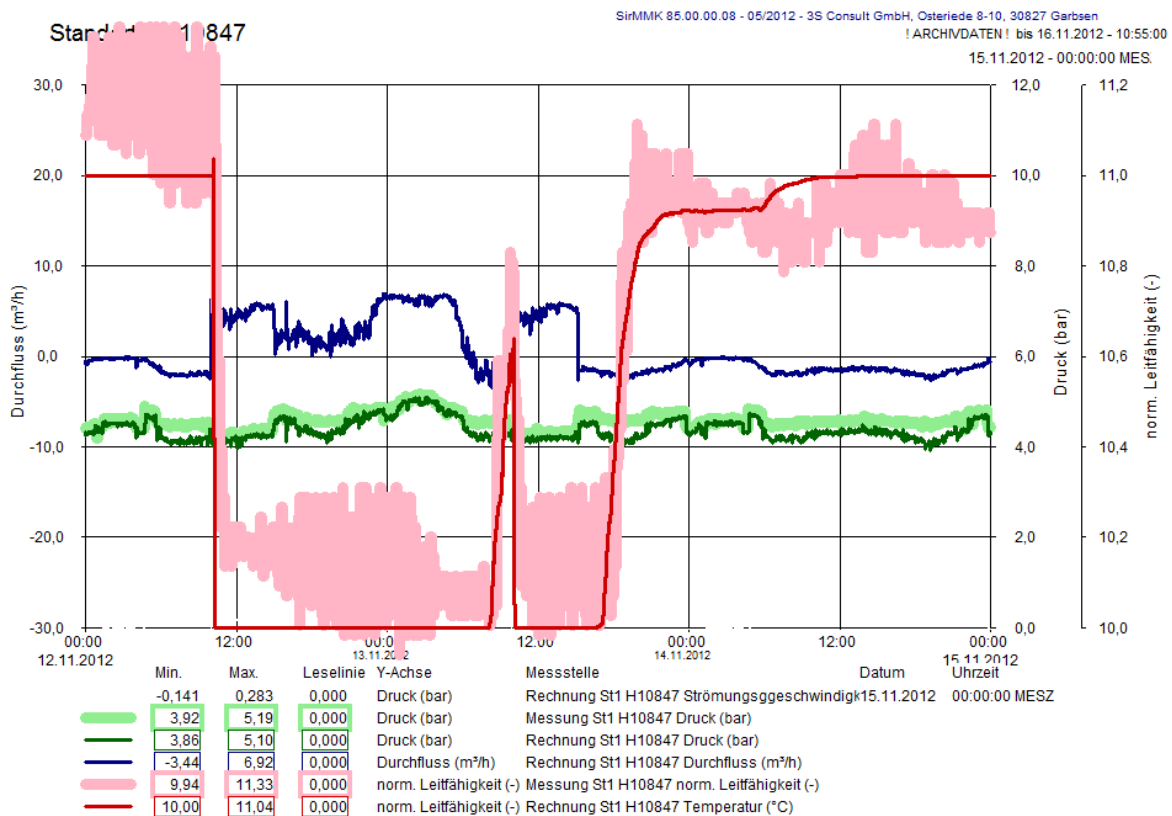


Abbildung 28 Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H10847



Die erste Messstelle, die beim Versuch am 12.11.2012 mit Fernwasser angeströmt wurde, ist die Messstelle am Hydrant H10847. Die Front erreicht die Messstelle am 12.11.12 um 10:25 Uhr. Die Leitfähigkeit sinkt daraufhin auf Fernwasserniveau ab. Zum Zeitpunkt 13.11.2012 weist die Leitfähigkeit einen zwischenzeitlichen Peak auf und erreicht annähernd die Leitfähigkeit des Wassers von der DEST. Zurückzuführen ist dieser Peak auf einen Durchflusswechsel. Der Durchflusswechsel ist im Zeitkurvendiagramm am wechselnden Vorzeichen zu erkennen. Die Abbildung 25 erklärt diesen Durchflusswechsel durch den im Zeitraum 13.11.12 von 5:30 bis 10:15 Uhr ausbleibenden Fernwasserzufluss.

Messstelle Hydrant H7261 (Abbildung 29)

Die Messstellen am Hydranten H7261 ist die zweite Messstelle, die beim Versuch am 12.11.12 mit dem Fernwasser angeströmt wird. Die Leitfähigkeitsschwankungen werden von der Rechnung hier noch relativ gut wiedergegeben. Die zeitlichen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bzgl. der Leitfähigkeitsschwankungen sind geringfügig. Hingegen sind Abweichungen Messung Rechnung bzgl. der Amplituden der Leitfähigkeitsschwankungen größer als an der Messstelle am Hydranten H10847.

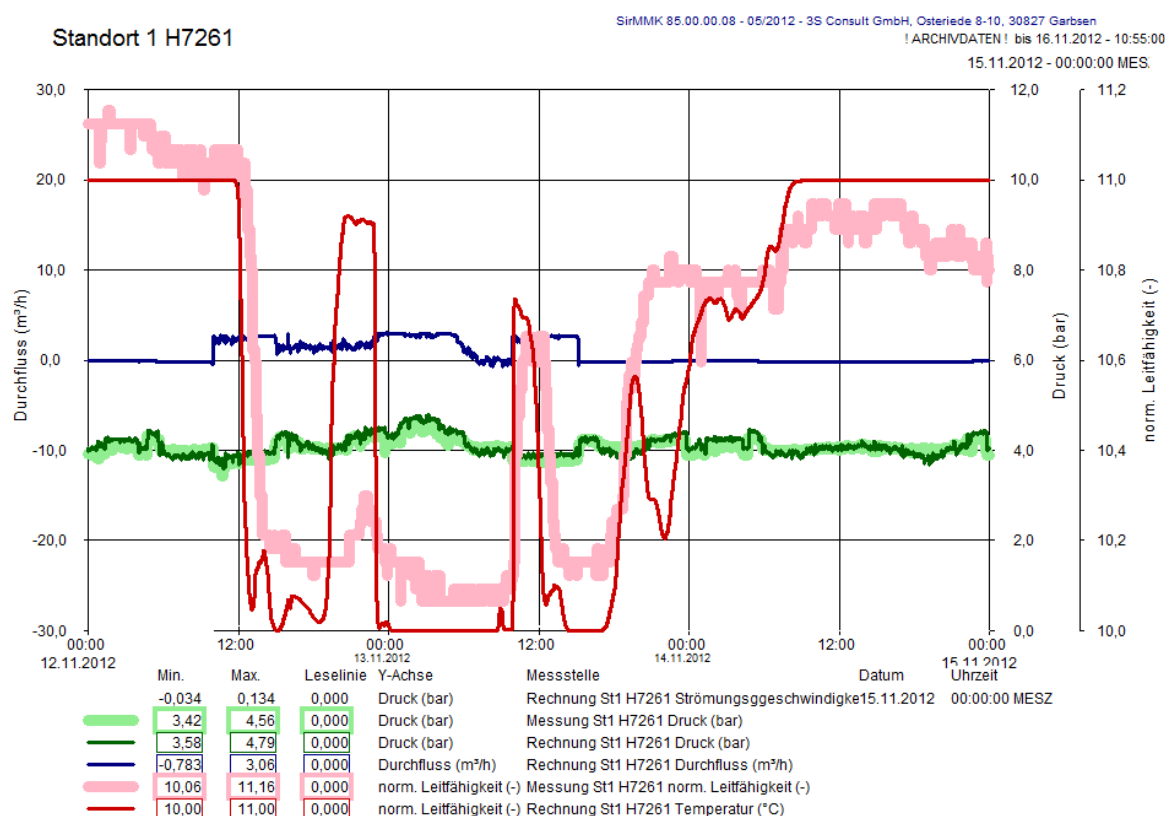


Abbildung 29 Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H7261

Messstelle Hydrant H8012 (Abbildung 30)

Die Abweichungen zwischen Messung und Rechnung bzgl. der Leitfähigkeit nehmen mit zunehmender Entfernung zum Zonentrennschieber zu. Daher sind die Abweichungen am Hydrant H8012 noch einmal größer als an den Messstellen an den Hydranten H10847 und H7261.



Während an den Messstellen an den Hydranten H10847 und H7261 der berechnete Durchfluss nur einzelne Durchflusswechsel aufweist, ist die Anzahl der Durchflusswechsel am Hydrant H8012 größer. Die zahlreichen Durchwechsel erklären die starken Schwankungen der Leitfähigkeit.

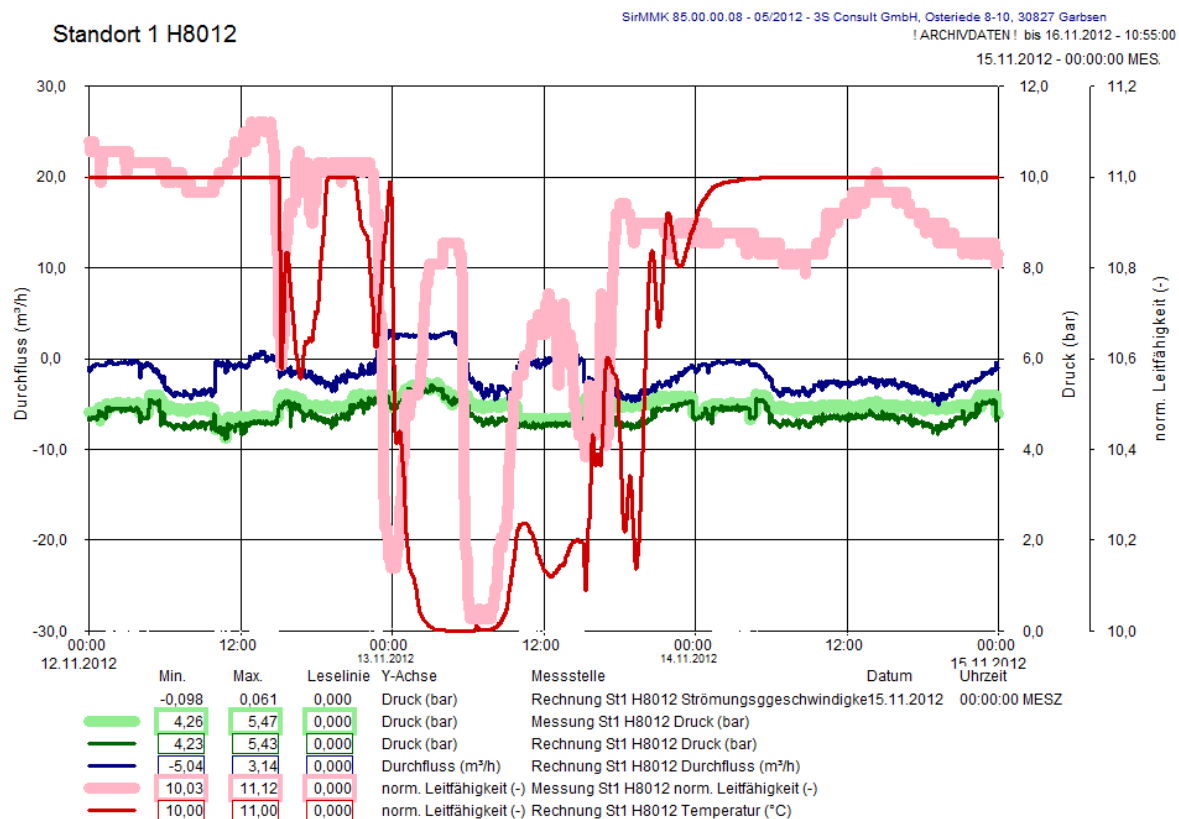


Abbildung 30 Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H8012

Messstelle Hydrant H20512 (Abbildung 31)

Die Messstelle am Hydrant H20512 wird - wie ausgangs des Ausbreitungsversuchs erwartet - von der FW-Front aufgrund der verlängerten Zeitdauer von Öffnen bis Schließen des Zonentrennschiebers erreicht. Dies bestätigen Messung und Rechnung. Die Rechnung weist aber darauf hin, dass aufgrund der Durchmischungsvorgänge die Messstelle nur mit verdünntem FW-Wasser (Konzentration < 100 %) erreicht wird. Aufgrund der unzureichenden Messgenauigkeit der mobilen Messstellen lässt sich leider nicht feststellen, ob dies auch von der Messung bestätigt wird.

Zu beachten ist die geänderte Skalierung für die normierte Leitfähigkeit. Offensichtlich war die Multiparametersonde schlecht kalibriert, so dass die Leitfähigkeitsmesswerte am Hydranten H20512 stark von den übrigen mobilen Messstellen abweichen.

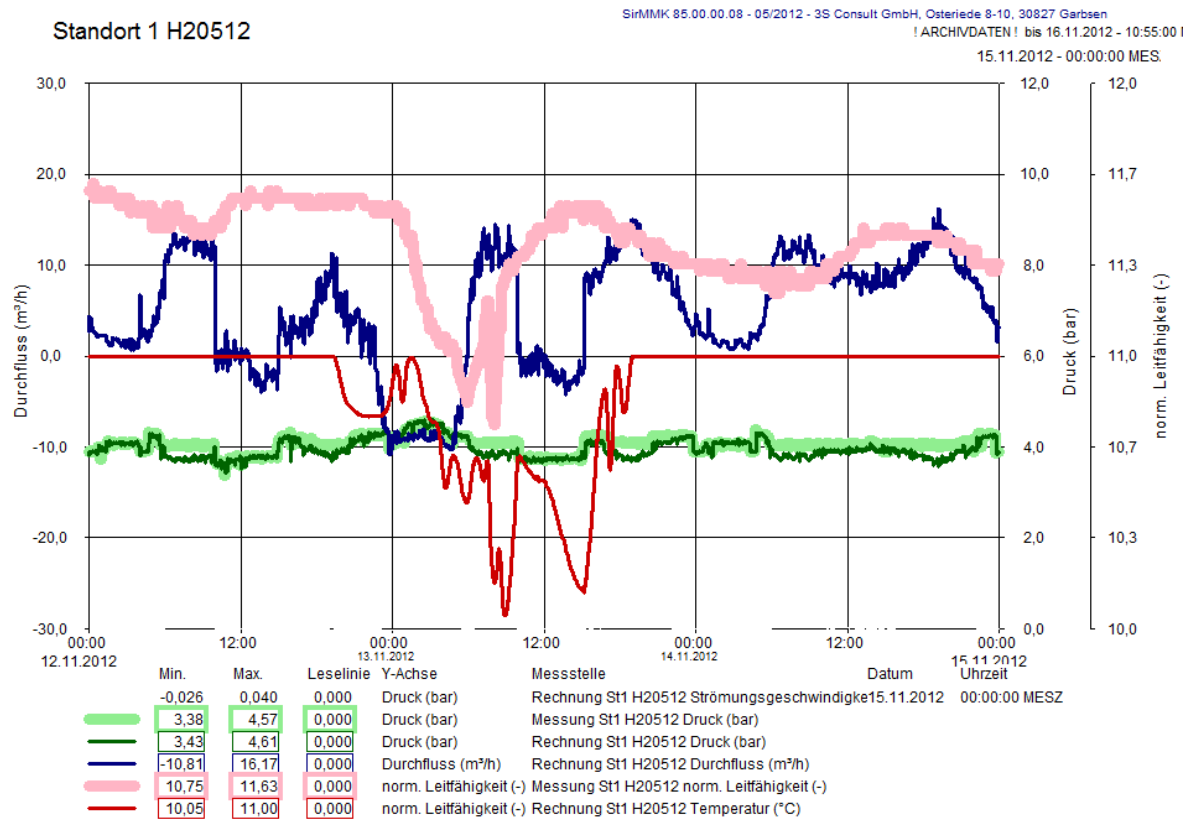
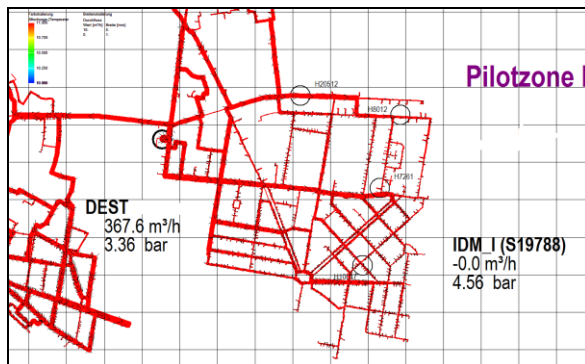


Abbildung 31 Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H20512

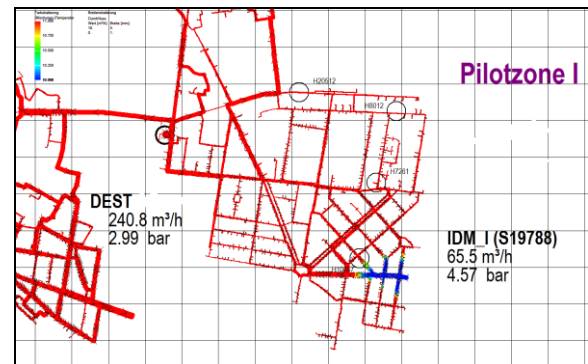


II.1.7.6.4 Netzdarstellung – Ausbreitung der Fernwasserfront

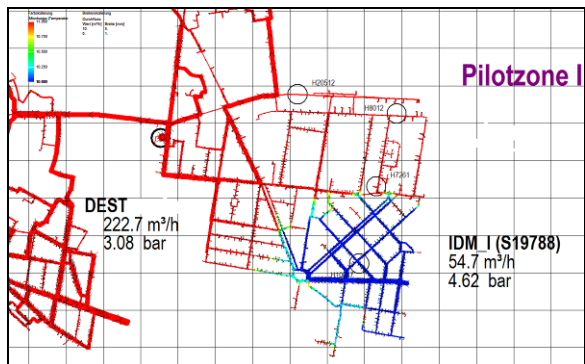
Auf den folgenden Seiten (Abbildung 32 bis Abbildung 33) ist die berechnete Ausbreitung der Fernwasserfront für unterschiedliche Zeitpunkte im Versuchszeitraum dargestellt.



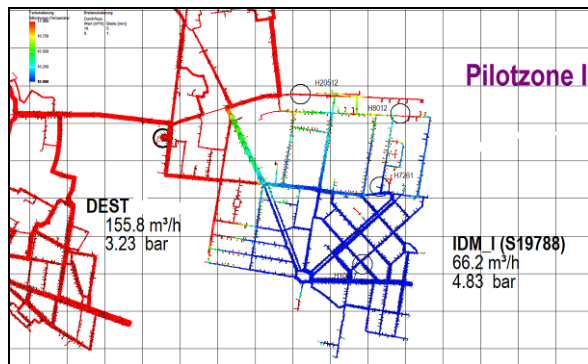
12.11. 10:00 Zonenschieber wird geöffnet



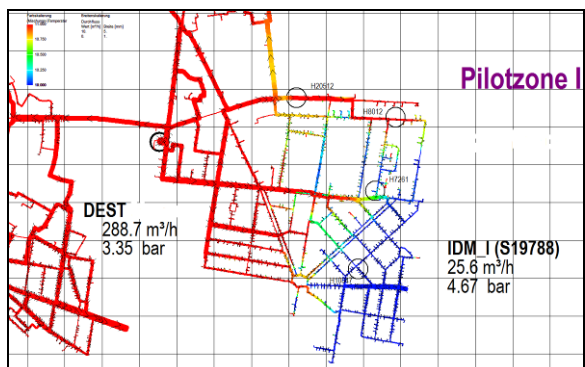
10:10:00 FW erreicht 1. Messstelle H10847



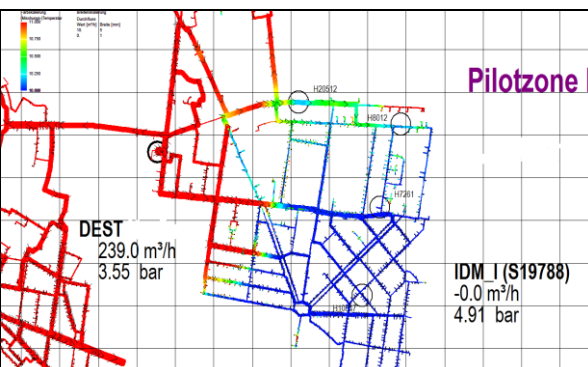
11:50:00 FW erreicht 2. Messstelle H7261



15:00:00 FW erreicht 3. Messstelle H8012



19:20:00 FW erreicht 4. Messstelle H20512



13.11. 15:20 Zonenschieber wird geschlossen

Abbildung 32 Ausbreitung des Fernwassers in der Pilotzone während Schieber geöffnet



Abbildung 33 Ausbreitung des Fernwassers im gesamten Versorgungsgebiet

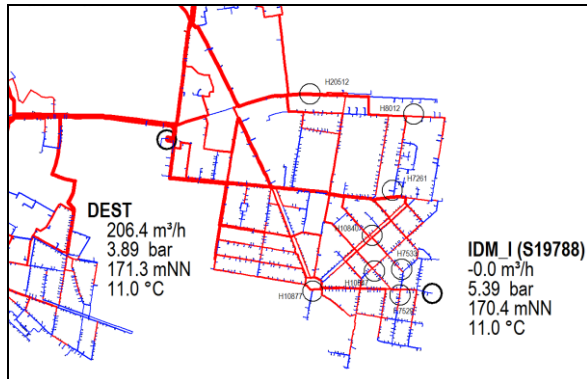


II.1.7.7 Messung / Rechnung – Erfahrungen aus der Versuchspraxis

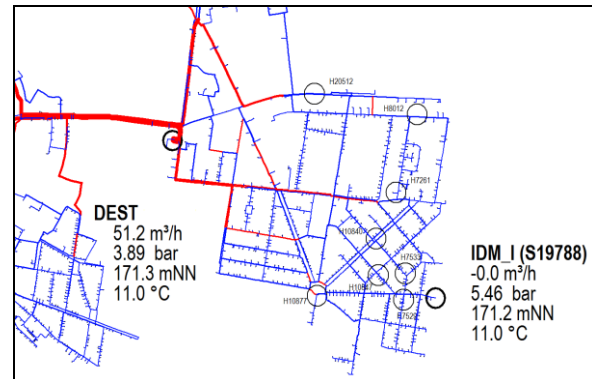
- Mit zunehmender Entfernung zur Eintragsstelle (Zonenschieber = ideelle Giftstoffeintragsstelle) nimmt die Abweichung zwischen gemessener und berechneter Leitfähigkeit zu.
- Der Zeitpunkt der eintreffenden Front wird genauer berechnet als der Zeitpunkt, an dem die Front wieder verdrängt wurde. Je länger die Ausbreitung andauert je größer die Abweichung.
- An den Messstellen, an denen ein Eintrag hydraulisch eine signifikante Änderung des Durchflusses nach sich zieht, sind die Abweichungen gering. An Messstellen, an denen das Strömungsfeld durch den Eintrag gar nicht oder nur wenig beeinflusst wird, sind die Abweichungen am größten.
- Auf Haupttransportleitungen sind die Abweichungen geringer. Im untergeordneten Nebentransportleitungsnetz sind Abweichungen größer. Die abnahmebedingten Durchflussfluktuationen können nicht berechnet werden, da das reale Abnahmeverhalten der einzelnen Verbraucher nicht ausreichend genau prognostiziert werden kann. Der Einfluss der Verbraucherschwankungen auf den Durchfluss einer Leitung ist geringer je größer die Last unterstrom der Leitung ist (die Verbraucherschwankungen mitteln sich aus). D.h. in Randzonen oder Endsträngen im Versorgungsnetz wo die Last unterstrom gering ist, sind die Abweichungen größer.
- Das Eintreffen der Front ist durch eine abrupte Leitfähigkeitsänderung gekennzeichnet. Das „Ausspülen“ der Front hingegen durch eine kontinuierlichere Leitfähigkeitsänderung. Grund hierfür ist die mit zunehmender Verweildauer des Fernwassers zunehmende Durchmischung der FW-Front. Je größer die Verweildauer je mehr Kreuzungsstellen durchläuft die FW-Front und je stärker die Durchmischung der FW-Front.
- In der Rechnung werden Mischvorgänge alleine an Kreuzungsstellen berücksichtigt. Übrige Mischvorgänge wie Dispersion und Diffusion werden vernachlässigt. Da die Messergebnisse keine großen Abweichungen zur Rechnung zeigen (Abfall bzw. Anstieg der Leitfähigkeit werden von Messung und Rechnung kongruent beschrieben), sind die Mischvorgänge an den Kreuzungsstellen folglich die dominanten Faktoren bzgl. der Durchmischung. Die übrigen Mischvorgänge, Dispersion und Diffusion, sind daher vernachlässigbar. Zu beachten ist dabei, dass die Ausbreitungsversuche mit einer sehr großen Einspeisemenge durchgeführt wurden, die zu entsprechend hohen Fließgeschwindigkeiten führte. Bei einer absichtlichen Kontamination mit einer hochkonzentrierten toxischen Substanz im Bereich laminarer Strömungsverhältnisse könnte der Einfluss von Dispersion und Diffusion wesentlich größer sein.
- Die Berechnung liefert plausible, nachvollziehbare und messungsvergleichbare Ergebnisse. Abweichungen zwischen Messung und Rechnung können ausgewertet und auf Ursachen zurückgeführt werden. Hinsichtlich der Ungenauigkeit der Messwerte (insbesondere hinsichtlich der divergenten Leitfähigkeitsmessung an den Messstellen ausgangs der Versuche und dem anhand der Messungen kaum identifizierbaren Zeitpunkt, wann die FW-Front verdrängt ist) sind die Ergebnisse der Simulation befriedigend - wenn nicht gut.



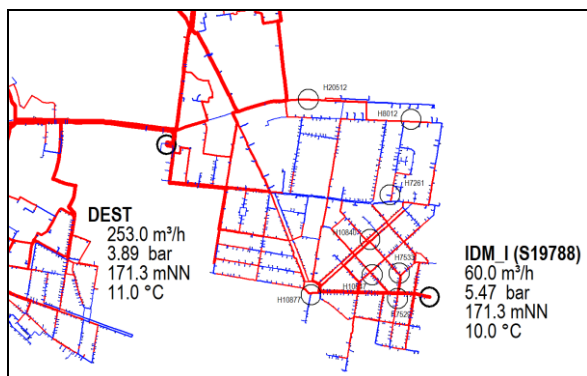
- Die nachfolgenden Netzdarstellungen (Abbildung 34) stellen das Strömungsfeld, laminar (blau) oder turbulent (rot), in den beiden Pilotzonen 1 und 2 für auserwählte Referenzbetriebszustände dar. In den überwiegenden Fällen ist das Strömungsfeld turbulent ($Re > 5.000$). Nur bei Nachtabnahme und Einspeisung über die DEST ohne FW-Zufluss sinkt die längengemittelte Reynoldszahl Re_m unter den Grenzwert von 2.300. Folglich, da die laminare Strömung eher in Ausnahmefällen auftritt, ist die Ausbreitung durch Dispersionseffekte eher von untergeordneter Bedeutung und sollte daher zu keinen signifikanten Abweichungen bzgl. der Ausbreitung der Leitfähigkeit in den unternommen Versuchen geführt haben - weder in Pilotzone 1 noch in Pilotzone 2.



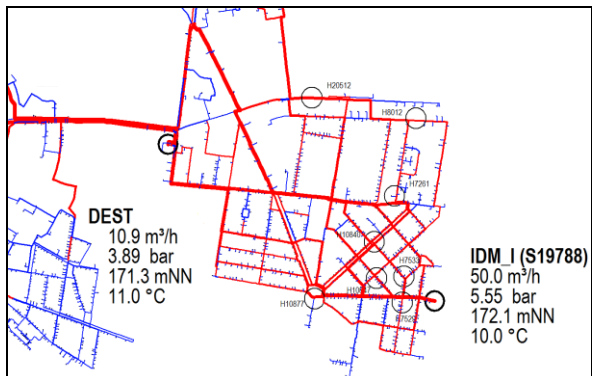
Spitzelast (DEST = 200 m³/h; FW = 0 m³/h), $Re_m = 5.221$



Nachtabnahme (DEST = 50 m³/h; FW = 0 m³/h), $Re_m = 1.083$



Spitzelast mit FW-Einspeisung (DEST = 250 m³/h; FW = 60 m³/h), $Re_m = 5.415$



Nachtabnahme mit FW-Einspeisung (DEST = 10 m³/h; FW = 50 m³/h), $Re_m = 5.492$

Abbildung 34 Verteilung turbulente (rot), laminare (blau) Strömung für untersch. Lastfälle

II.1.7.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Die Ermittlung einer Modellgüte bzgl. Kontamination und Qualität ist nur möglich mit Vergleich von Messung und Rechnung.
- Messung und Rechnung lieferte in allen 3 Versuchen an allen 4 Messstellen nachvollziehbare Ergebnisse.
- Die Berechnungen geben in allen 3 Versuchen an allen 4 Messstellen das Eintreffen der Fernwasserfront gut wieder.
- Die verbleibenden Unschärfen sind zurückzuführen auf die Modellierung des Verbraucherverhaltens; die Unschärfen nehmen im Verteilnetzbereich zu.



- Will man die Unschärfen verringern, muss man den Verbrauch messen: Kunden-individuell bzw. Kunden-typisiert.
- Das Modell der PZ-S ist validiert bzgl. der Anwendung: Ermittlung des Ausbreitungsbereichs einer Kontamination bzw. eines Qualitätsparameters in PZ-S bei gegebenem Einspeiseort und gegebener Einspeisemenge.
- Die verbleibende Unschärfe ist zeitlich $\leq 1,5$ h und örtlich ≤ 200 m; in der Unterverteilung können die Unschärfen ein Vielfaches betragen. Für Aussagen, die eine höhere Genauigkeit erfordern, ist das Modell nicht anwendbar.
- Ein Betreiber, der Modell gestützt Fragen zu Kontamination bzw. Qualität in seinem Netz bearbeiten will, braucht eine diesbezüglich validierte Rohrnetzberechnung.
- Rohrnetzberechnungen, die im STATuS-Kontext Entscheidungshilfen darstellen sollen, müssen vor dem Ernstfall regelmäßig, definiert und mit geprüftem Ergebnis Messung/Rechnung mit Prozessdaten versorgt worden sein.
- Zu den Prozessdaten gehören neben Druck- und Durchflussmessungen auch Messungen von geeigneten Qualitätsparametern an allen Einspeisestellen und an ausgewählten Stellen im Netz; die Qualitätsmessungen können temporär sein.
- Der Aufwand für in sich widerspruchsfreie Qualitätsausbreitungsversuche ist bezüglich Qualitätsmessungen, Versuchskonzeption und Versuchsdurchführung um mind. 1 Zehnerpotenz größer als die zugehörige Rohrnetzberechnung – unabhängig davon, ob diese online erfolgt oder offline per Rekonstruktion.
- Beim Einsatz von regelkonform kalibrierten stationären Rohrnetzberechnungsmodellen im STATuS-Kontext ist bezüglich der Ausbreitung von Qualitätsmerkmalen mit Unschärfen im Tagesgang Bereich von mehreren Stunden zeitlich und mehreren 100 m örtlich zu rechnen; die Ursache für diese Unschärfen ist das Strömungsfeld, welches bei unbekanntem Verbraucherverhalten im Verteilnetzbereich nicht genauer berechnet werden kann.



II.1.8 Netzspülung als Reaktion auf Kontamination des Wasserversorgungsnetzes [TP 4b-2-1]

II.1.8.1 Begriffe:

Gezielte Netzspülungen werden von vielen Wasserversorgungsunternehmen zur regelmäßigen Reinigung der Rohrleitungen von Ablagerungen durchgeführt. Im Falle einer Kontamination des Versorgungssystems durch absichtliches Einbringen einer toxischen Substanz oder durch betriebliche Störfälle ist die Reinigung der Rohre Grundvoraussetzung für die Wiederherstellung der Versorgung. Daher wird im Folgenden zwischen *routinemäßigem Spülen* (RS) und *Dekontaminationsspülungen* (DS) unterschieden.

Ein *Spülplan* besteht aus einer geordneten Abfolge von Spülungen. Der *Spülplan* bezieht sich auf ein vorher definiertes *Spülgebiet*. Das *Spülgebiet* kann im Falle einer Kontamination durch die Ausbreitung der Kontaminante im Leitungsnetz inklusive Sicherheitsabstand definiert sein oder wird beim routinemäßigen Spülen durch die Netztopologie und die Gliederung des Netzes in Transport- Hauptversorgungs-, Versorgungs- und Hausanschlussleitungen definiert. Zu jeder einzelnen *Spülung* gehören ein *Spülhydrant*, eine *Spülstrecke*, die die zu spülenden Leitungen enthält, sowie eine variable Anzahl von Schiebern, die zur Isolation der *Spülstrecke* während der Spülung temporär geschlossen werden. Ein *optimaler Spülplan* besteht aus einer strukturierten Vorgehensweise zur Reinigung des Spülgebietes, der die im folgenden Abschnitt aufgeführten Kriterien erfüllt und die zum Übergang zwischen den einzelnen Spülungen notwendigen Manipulationen am Leitungsnetz durch das Betriebspersonal (Übergang zum nächsten Spülhydranten mit Umsetzen der Messtechnik, Öffnen und Schließen von Netzschiebern) minimiert.

Die Minimierung des Aufwands für das Betriebspersonal ist im Falle einer notwendigen Dekontamination zwingend erforderlich für eine Minimierung der Gefährdung der Bevölkerung durch den Verbleib des kontaminierten Wassers im Versorgungssystem sowie eine möglichst rasche Wiederherstellung der Versorgung. Da die Durchführung routinemäßiger Spülprogramme mit hohem personellen Aufwand verbunden ist, stehen beim routinemäßigen Spülen vor allem Kriterien der Wirtschaftlichkeit und zur Minimierung der Betriebskosten im Vordergrund.

II.1.8.2 Kriterien

Um eine effiziente und zuverlässige Reinigung der Rohrleitungen durch die Spülungen zu gewährleisten ist die Beachtung unterschiedlicher Kriterien von Bedeutung, die in der folgenden Tabelle 6 aufgeführt sind:

Tabelle 6: Allgemeine Kriterien für optimales Spülprogramm

Kriterium	Sollwerte	Bedeutung
Spülstreckenlänge	400 m – 800 m	Obergrenze: Isolation der Spülstrecke durch Abschiebern muss möglich sein, Begrenzung des Druckverlustes entlang der Spülstrecke, Auswertung der Messungen Untergrenze: Wirtschaftlichkeit, Verringerung der Gefahr von Resuspendierung



Kriterium	Sollwerte	Bedeutung
		in vorgelagerten Leitungen durch hohe Fließgeschwindigkeiten
Min. Fließgeschwindigkeit bei Spülung <i>min v_s</i>	0,3 - 0,5 m/s	Für die Spülstrecke: erforderlich Fließgeschwindigkeit, um alle Ablagerungen zu lösen. Wird durch die hydraulische Leistungsfähigkeit der Spülhydranten und der Spülstrecke sowie der Hydraulik des vorgelagerten Netzes bestimmt.
Max. Fließgeschwindigkeit im Normalbetrieb <i>max v</i> (Durchschnittsverbrauchstag)	0,3 m/s	Kriterium für die Notwendigkeit von RS. Wenn <i>min v</i> regelmäßig überschritten wird -> keine Ablagerungsbildung
Zugänglichkeit der Spülhydranten	hoch	Hydranten müssen gut erreichbar und die Möglichkeit des Abschlags des Spülwassers muss gegeben sein.

Die Kriterien für Spülpläne RS und DS können sich in folgenden Punkten unterscheiden:

Während beim routinemäßigen Spülen die Versorgung sämtlicher Anwohner auch während der Spülung aufrechterhalten werden soll, ist bei einer Dekontaminationsspülung davon auszugehen, dass die Versorgung bereits für das betroffene Gebiet vollständig eingestellt wurde und der kontaminierte Teil des Netzes durch Schließen von Schiebern isoliert ist. Das Kriterium Aufrechterhaltung der Versorgung spielt in diesem Fall keine Rolle.

II.1.8.3 Softwaremodul FlushPlan

II.1.8.3.1 Übersicht

Das Modul FlushPlan beinhaltet unterschiedliche Funktionalität, die in folgender Auflistung dargestellt und in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben ist:

- Erstellung des vollständigen Graphen
- Ermittlung der spülbaren/nichtspülbaren Stränge
- Ermittlung von Spülgebieten anhand existierender Fließgeschwindigkeiten
- Ermittlung des Segmentgraphen
- Ermittlung minimaler Spülpfade (von Hydrant zu Hydrant)
- Ermittlung von Spülstrecken mit Spülplan

II.1.8.3.2 Erstellung des vollständigen Graphen

Das Modul FlushPlan basiert auf einem hydraulischen Simulationsmodell, oder in Ausnahmefällen auf einem Geoinformationssystem (GIS), welches neben den üblichen Netzdaten auch Angaben über die genaue Lage von Netzschiebern und Hydranten beinhalten muss. Das ist nicht selbstverständlich, da unterschiedliche Softwareprodukte auch unterschiedliche Datenstrukturen verwenden. So beinhaltet zum Beispiel das weltweit wohl am meisten verbreitete Open Source Programm EPANET, das von der US Environmental Protection Agency (EPA) entwickelt wird, keine Möglichkeit zur Verwaltung von Hydranten und Netzschiebern. Schieber können höchstens als normale Ventile (Valves) abgebildet werden, Hydranten



müssten als eigene Modellknoten mitgeführt werden. Problematisch dabei ist, dass durch die Berücksichtigung solcher Knoten (Hydranten) und Kanten (Netzschieber) die Modellgröße um ein Vielfaches (bis Faktor 3) ansteigen würde (Walski, 2006). Für jeden Netzschieber kämen zwei Knoten hinzu, für jeden Hydranten einer. Die Modellgröße ist allgemein von großer Bedeutung für das Handling der Modelle (Übersichtlichkeit, Speicherbedarf, Datenmanagement, Schnelligkeit der GUI, etc.) und im Speziellen entscheidend für die Rechenzeit der hydraulischen Simulation.

Die meisten kommerziellen Simulationsprogramme ebenso wie Geoinformationssysteme gehen daher einen anderen Weg bei der Modellierung von Netzschiebern und Hydranten. Netzschieber und Hydranten sind in diesem Fall den Leitungen zugeordnete Eigenschaften. Es besteht eine 1: n Fremdschlüsselbeziehung zwischen Rohr und Netzschieber/Hydrant. Jeder Netzschieber/Hydrant ist dadurch eindeutig einer Rohrleitung zugeordnet. Einer Rohrleitung kann dagegen eine beliebige Anzahl von Netzschiebern/Hydranten zugeordnet sein. Neben der Zuordnung wird außerdem am Netzschieber/Hydrant vermerkt, an welcher Position der Rohrleitung das Element liegt. Darüber hinaus können je nach Modell Netzschieber und Hydranten beliebige zusätzliche Attribute aufweisen, wie z.B. Typ (Kugelhahn, Schieber, etc.), Stellung (Auf/Zu), usw. beim Netzschieber Typ (Unterflur, Überflur), Löschwassermenge, etc. am Hydrantenobjekt.

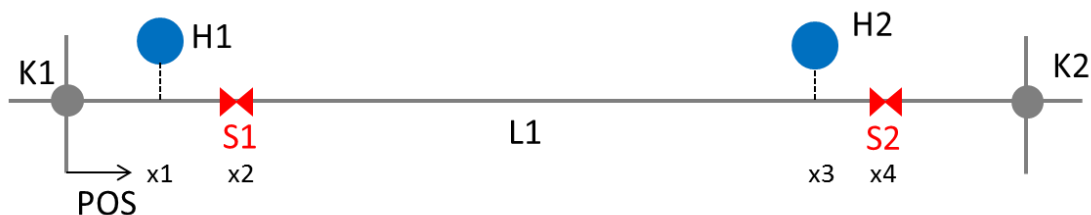


Abbildung 35 Modellbildung mit dem Rohr zugeordneten Netzschiebern/Hydranten

In Abbildung 35 ist beispielhaft die Modellierung einer Rohrleitung (L1), die am Knoten K1 beginnt und am Knoten K2 endet mit zwei Netzschiebern (S1, S2) und zwei Hydranten dargestellt. Das zugehörige Datenmodell zeigen die folgenden Tabellen

Tabelle 7: Datenmodell Rohre mit zugeordneten Netzschiebern und Hydranten

LINK

ID	VON	NACH	TYPE
L1	K1	K2	ROHR

NODE

ID	TYPE
K1	KNOT
K2	KNOT

NSCH

ID	PIPE	POS
S1	L1	X2
S2	L1	X3

HYDR

ID	PIPE	POS
H1	L1	X1
H22	L1	X4



Die Objekte NSCH (Netzschieber) und HYDR (Hydrant) sind dabei keine Knoten und Kanten im Sinne eine Knoten-Kanten-Modells (Graphen) sondern Objekte, die einer Rohrleitung (Kante) zugeordnet sind.

Die Modellierung ohne Leitungsobjekte auf Kanten (z. B. EPANET) setzt dagegen voraus, dass jeder Netzschieber als eigene Kante und jeder Hydrant als eigener Knoten modelliert wird. Die entsprechende Darstellung der Leitung mit zwei Netzschiebern und zwei Hydranten ist Abbildung 36 zu entnehmen.



Abbildung 36 Vollständige Modellbildung mit Schiebern und Hydranten als Kanten und Knoten

In diesem Fall entfallen die Tabellen NSCH und HYDR. Die Objekte NSCH und HYDR sind spezielle Ausprägungen einer Kante bzw. eines Knotens. Die zugehörige Datenstruktur zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 8 Datenmodell für Modellbildung mit Netzschiebern und Hydranten als Kanten und Knoten

LINK

ID	VON	NACH	TYPE
L1	K1	H1	ROHR
L2	H1	K2	ROHR
S1	K2	K3	NSCH
L3	K3	H2	ROHR
L4	H2	K4	ROHR
S2	K4	K5	NSCH
L5	K5	K6	ROHR

NODE

ID	TYPE
K1	KNOT
H1	HYDR
K2	KNOT
K3	KNOT
H2	HYDR
K4	KNOT
K5	KNOT
K6	KNOT

Wie aus Abbildung 36 und Tabelle 8 ersichtlich ist, wird bei der im Sinne eines Knoten-Kanten-Modells vollständigen Modellierung die durchgehende Rohrleitung L1 aus Abbildung 35 durch das Einbinden der Hydranten und Netzschieber als Knoten und Kanten in einzelne, kürzere Leitungsabschnitte (L1 bis L5) unterteilt. Für die hydraulische Simulation hat diese Variante den Nachteil, dass, z.B. im Knotenverfahren oder dem Global Gradient Algorithmus (implementiert in EPANET) jeder zusätzliche Knoten (K2 bis K5 in Abbildung 36) eine zusätzliche Zeile und Spalte bei der Berechnung des stationären Gleichgewichtszustandes im iterativ zu lösenden nichtlinearen Gleichungssystem erzeugt. Da die Rechenzeit nichtlinear mit der Modellgröße zunimmt, ist im Allgemeinen eine solche Vorgehensweise nicht zweck-



mäßig. Bevorzugt wird daher Variante I. Falls mindestens ein Netzschieber geschlossen ist, wird bei der Berechnung die gesamte Leitung getrennt. Befinden sich keine weiteren Hausanschlussleitungen mit Entnahmen auf der Leitung, hat es keinen Einfluss auf das Ergebnis der Berechnung, welcher Schieber getrennt ist. In ähnlicher Weise wird mit den Hydranten vorgegangen. Hydranten sind im Normalfall geschlossen. Daher genügt im Allgemeinen für die Arbeit mit dem Modell die Information, dass an der entsprechenden Stelle auf der Rohrleitung ein Hydrant angeschlossen ist. Für besondere Berechnungsarten wie Löschwasserberechnungen oder Berechnungen zur Überprüfung der hydraulischen Verhältnisse während einer Spülung wird dann der Hydrant temporär zum Netzknoten oder die Hydrantenentnahme wird auf den näher gelegenen Anfangs- oder Endknoten der Leitung übertragen.

Der erste Schritt zur Initialisierung von FlushPlan für ein gegebenes hydraulisches Simulationsmodell besteht demnach in der Einbindung von sogenannten Punktoobjekten auf Kanten (Netzschiebern/Hydranten). Dazu werden zunächst sämtliche Punktoobjekte, die einer Kante zugeordnet sind, ermittelt und gemäß ihrer Position auf der Rohrleitung sortiert. Die Lage der Punktoobjekte wird im Datenmodell von SIR 3S nicht absolut sondern als Linienkoordinate, die den Abstand vom Anfangsknoten entlang der Leitung beinhaltet, gemessen. Jedem Rohr ist eine Polylinie zugeordnet, die die Lage des realen Leitungselementes in Form von Wegpunkten mit x-y-Koordinaten repräsentiert. Die Leitung wird nun an allen Stellen, an denen sich ein Punktoobjekt befindet, geteilt und mit dem Punktoobjekt verbunden.

So entstehen zunächst aus einer Polylinie mit m zugeordneten Punktoobjekten $m+1$ neue Polylinien, die an den Stellen der Punktoobjekt lagemäßig miteinander verknüpft sind. Als nächstes werden für die neu entstanden Polylinien neue Rohre generiert, wobei zwei Fälle unterschieden werden:

1.) Beim Punktoobjekt handelt es sich um einen Hydranten:

Der Hydrant wird als neuer Knoten in den Netzgraphen eingefügt. Zwei der neuen Rohre, die aus dem Split der ursprünglichen Rohrpolylinie hervorgegangen sind, verwenden den Hydrantenknoten als Anfangs- bzw. Endknoten (siehe z.B. H1 und Rohre L1 und L2 in Abbildung 36).

2.) Beim Punktoobjekt handelt es sich um Netzschieber:

In diesem Fall werden an Stelle des Punktoobjektes zwei neue Knoten erzeugt, die jeweils als Anfangs-/Endknoten für die neue Schieberkante dienen und mit den gesplitteten Rohrleitungen verbunden sind. In Abbildung 36 werden für das ursprüngliche, in Abbildung 35 dargestellte Punktoobjekt S1 die beiden neuen Knoten K2 und K3 erzeugt und jeweils auf einer Seite mit der neuen Kante S1 und auf der anderen Seite mit den neuen Teilstücken L2 und L3 der gesplitteten Rohrleitung verbunden. K2 und K3 haben die gleichen Lagekoordinaten und wurden nur zum Zwecke der besseren Darstellbarkeit in Abbildung 36 etwas auseinandergezogen

Der Graph des so entstandenen vollständigen Netzmodells dient als Basis für die Implementierung der Algorithmen in FlushPlan. Bevor die Verwendung des Graphen eingegangen wird, seien einige topologische Eigenschaften des vollständigen Graphen G_V im Vergleich zum Netzgraph G , der zum Modell mit Punktoobjekten auf Kanten gehört, angeführt:

- Anzahl Knoten: $n_{G_V} = n_G + n_H + 2 n_S$ (1)

Dabei bezeichnen:

n_{G_V} : Anzahl der Knoten von G_V



- n_G : Anzahl der Knoten von G
- n_H : Anzahl der Hydranten
- n_S : Anzahl der Netzschieber
- Anzahl der Kanten: $m_{Gv} = m_G + n_H + 2 n_S$ (2)
- mit
- m_{Gv} : Anzahl der Kanten in Gv
- m_G : Anzahl der Kanten in G
- Anzahl der Zusammenhangskomponenten: $n_{C,G} = n_{C,Gv}$ (3)
- Die Anzahl der Maschen (L: Loops) von G und Gv ist gleich: $n_{L,G} = n_{L,Gv}$
- Beweis:
- $n_{L,G} = m_G - n_G + n_{C,G};$ (4)
- $n_{L,Gv} = m_{Gv} - n_{Gv} + n_{C,Gv};$ (5)
- (1), (2) und (3) in (4): $n_{L,Gv} = m_G + n_H + 2 n_S - (n_G + n_H + 2 n_S) + n_{C,G} = m_G - n_G + n_{C,G} = n_{L,G}$
- Bei der Abbildung von G auf Gv handelt es sich um einen Homöomorphismus. Das bedeutet, dass die wesentlichen topologischen Eigenschaften bei der Abbildung von G nach Gv erhalten bleiben.

II.1.8.3.3 Ermittlung der spülbaren/nicht spülbaren Stränge

Die Spülung einer Rohrleitung setzt voraus, dass sich am Ende der Spülstrecke ein Hydrant befindet. Im Allgemeinen bestehen Wasserversorgungssysteme aus vermaschten (Gitter) und verästelten (Wald) Teilnetzen. Während in vermaschten Ringsystemen das Wasser aus mindestens zwei Richtungen zum Spülhydranten fließen kann und eine definierte, eindeutige Zuflussrichtung für die Spülung mit klarer Wasserfront nur durch entsprechendes Abschiebern gewährleistet werden kann, ist in verästelten Teilnetzen die Fließrichtung allein durch die Topologie der Rohrleitungen vorgegeben. Graphentheoretisch betrachtet fließt das Wasser von der „Wurzel“ des Baumes zu den „Blättern“. Bei der Wurzel handelt es sich um den Verbindungsknoten mit dem vermaschten Netz (z.B.: Abzweig mit T-Stück), die Blätter stellen in der Regel die Kundenanschlüsse an das Leitungsnetz dar. Für jedes Rohr eines Verästelungsnetzes ist, unabhängig von der Komplexität der Baumstruktur, somit die Fließrichtung a priori bekannt. Das Abschiebern einer Leitung des Waldes würde unmittelbar zur Unterbrechung der Versorgung der unterstrom des Schiebers gelegenen Kunden führen. „Unterstrom“ ist im Fall eines Verästelungsnetzes gleichzusetzen mit „topologisch weiter entfernt von der Wurzel“. Dieser Sachverhalt impliziert aber auch, dass ein Verästelungsnetz nur dann vollständig gespült werden kann, wenn jedes Blatt (jeder Endknoten) einen Hydranten darstellt. Anders ausgedrückt muss am Ende jeder Stichleitung des Baumes ein Hydrant liegen.

Da dies auf reale Versorgungssysteme nicht immer zutrifft, wurde ein Modul implementiert, welches den spülbaren Teilgraphen G_S von G_v ermittelt. Der Algorithmus basiert auf dem Modul Graphendekomposition, welches zur Zerlegung eines allgemeinen Netzgraphen in einzelne Teilkomponenten mit unterschiedlichen topologischen Eigenschaften, dient (Deuerlein 2008). Die Untergliederung des Graphen G_v ist schematisch in Abbildung 37 dargestellt. Der Graph G_v wird zunächst hinsichtlich mehrerer möglicher Zusammenhangskomponenten analysiert. Vorher wurden sämtliche Einspeiseknoten (Behälter, Reservoirs, Pumpstationen etc.) über virtuelle Kanten mit einem virtuellen Bezugsknoten verbunden. Im Normalfall sollte der so modifizierte Graph nur aus einer Zusammenhangskomponente ($C_{Gv,main}$) bestehen.



Werden zusätzliche Komponenten ermittelt bedeutet dies, dass Teilgebiete existieren, die von der Versorgung abgeschnitten sind ($C_{Gv,1} \dots C_{Gv,nc}$).

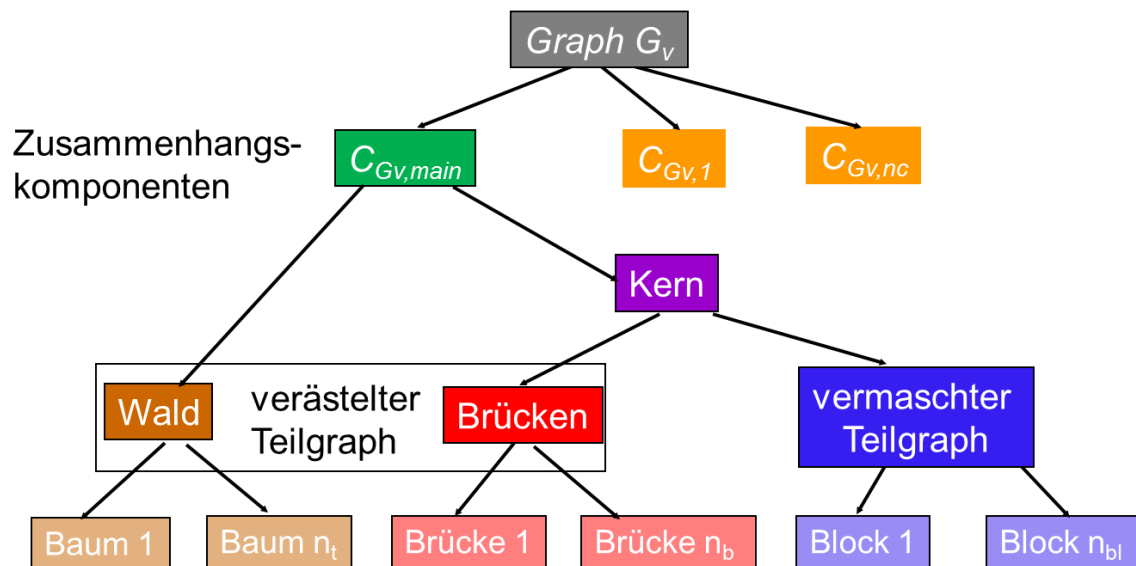


Abbildung 37 Schematische Darstellung zur Dekomposition des Netzgraphen

Jede Zusammenhangskomponente wird weiter in einen vermaschten und einen verästelten Teilgraphen untergliedert. Der vermaschte Teilgraph besteht aus einem oder mehreren Blöcken, innerhalb derer sich alle Rohre in Schleifen befinden. Das bedeutet, dass jeder Knoten eines vermaschten Blockes durch mindestens zwei alternative Leitungen versorgt werden kann. Die Komponenten des verästelten Teilgraphen bestehen aus Brücken und Bäumen. Ein Baum zeichnet sich dadurch aus, dass er genau eine Verbindung mit dem vermaschten Netz hat, während Brückenkomponenten mindestens zwei disjunkte vermaschte Blöcke verbinden.

Die Ermittlung des nicht spülbaren Teilgraphen G_{NS} wird ausschließlich anhand topologischer Kriterien durchgeführt. Es wird also vereinfachend angenommen, dass jede einem Hydranten vorgelagerte Leitung auch mit einer ausreichenden Fließgeschwindigkeit gespült werden kann. Eine hydraulische Überprüfung dieser Annahme z.B. durch hydraulische Simulationsrechnung, wird im Rahmen der hier vorgestellten Entwicklungen nicht durchgeführt.

Die Ermittlung von G_{NS} konzentriert sich demnach zunächst auf den Wald des Versorgungsnetzes. Im Zuge der Graphenzerlegung werden bereits für die Bäume verkettete Listen mit Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen erstellt. Diese werden verwendet, um für jeden Baum von den Blättern zur Wurzel fortschreitend alle Rohre zu markieren bis ein Hydrant oder die Wurzel des Baumes erreicht sind. Nach Ende des Algorithmus ist der Teilgraph G_{NS} markiert.

Ermittlung von Spülgebieten anhand existierender Fließgeschwindigkeiten und Rohrdurchmesser

Wichtigstes Kriterium, ob eine Leitung zu Ablagerungen neigt, ist die Fließgeschwindigkeit. Vom TZW wurde die maximale Fließgeschwindigkeit an einem Durchschnittsverbrauchstag $\max v_{TASI}$ als Bezugsgröße vorgegeben. Die tatsächlich erreichte maximale Fließgeschwindigkeit sämtlicher Rohre im Modell wird über die hydraulische Simulation der Tagesspitze ermittelt. Die Festlegung des Grenzwertes v_{Gr} für die maximale Fließgeschwindigkeit am



Durchschnittstag, ab der nicht mehr mit Ablagerungen zu rechnen ist erfolgt benutzerdefiniert über den Eingabedialog. Praktikable Werte liegen zwischen 0.3 m/s und 0.5 m/s.

Zur Ermittlung der Spülgebiete werden die Rohre in zwei Mengen unterteilt:

- 1.) Rohre, für die gilt: $\max v_{TASI} < v_{Gr}$: -> zu spülende Leitungen
- 2.) Rohre, für die gilt: $\max v_{TASI} \geq v_{Gr}$: -> nicht zu spülende Leitungen

Es können zusätzliche weitere Kriterien bei der Auswahl der Spülgebiete berücksichtigt werden wie z.B. der Rohrdurchmesser. Ab einem gewissen Rohrdurchmesser können Leitungen nicht mehr auf herkömmliche Weise gespült werden, da der dazu erforderliche Abschlag des Spülwassers das Fassungsvermögen der Kanalisation übersteigen würde.

Die so ermittelten Spülgebiete können je nach Größe in weitere Einzelspülgebiete untergliedert werden.

II.1.8.3.4 Ermittlung der Segmentgraphen

Ein weiteres wichtiges Analysewerkzeug stellen unterschiedlich definierte Segmentgraphen dar. Die verschiedenen Definitionen beziehen sich auf die Definition trennender Elemente. Trennende Elemente können sowohl Schieber als auch Hydranten sein. Ein Segment besteht aus dem maximal zusammenhängenden Teilgraphen, die keine trennenden Elemente beinhalten. Z.B.: sind durch die Zerlegung des Gesamtsystems in Segmente mit ausschließlich Schiebern als trennendes Element die kleinsten Einheiten des Rohrnetzes, die im Falle eines Rohrbruchs stillzulegen sind, definiert.

Zur Ermittlung der Segmente werden sämtliche trennenden Elemente vom ursprünglichen Netzgraphen entfernt. Der resultierende Graph zerfällt in einzelne Teilgebiete (Segmente), die sich leicht mit Hilfe graphentheoretischer Algorithmen ermitteln lassen.

Im Hinblick auf die Sicherheit der Kunden der Trinkwasserversorgung im Falle einer Kontamination spielt die Ermittlung des kleinstmöglichen Segments, das inklusive Sicherheitsabstand den kontaminierten Teil des Systems beinhaltet, eine wichtige Rolle.

Sind die Segmente bekannt, lassen sich auch sehr leicht die zur Isolation des Teilsystems notwendigen Schieber angeben. Der Zusammenhang der Segmente untereinander lässt sich effizient durch den sogenannten Segmentgraphen analysieren. Im Segmentgraphen wird jedes Segment, unabhängig von der tatsächlichen Anzahl der Knoten und Kanten mit Hilfe eines Knotens, dem sogenannten Segmentknoten, analysiert. Im Gegensatz zur Ermittlung der Segmente beinhaltet der Segmentgraph die ursprünglich trennenden Elemente (z. B.: Netzschieber). Sie stellen den Zusammenhang zwischen den Segmentknoten her, die jeweils mit sämtlichen Endknoten trennender Elemente, die sich im gleichen Segment befinden, über eine virtuelle Kante verbunden werden.

Neben der Ermittlung der isolierbaren Segmente können auch andere Segmentdefinitionen von Interesse sein. Eine Ermittlung der Segmente, die durch Trennung des Netzes an Stellen, an denen Hydranten angebracht sind, liefert z.B. eine Untergrenze für die Unterteilung des Netzes in Spülstrecken. Eine weitere Unterteilung ist möglich, wenn Hydranten und Schieber gleichzeitig als trennende Elemente dienen.

II.1.8.3.5 Ermittlung der Spülstrecken und Berechnung des Spülplans



Die Ermittlung der Spülstrecken erfolgt immer für ein vorher definiertes Spülgebiet (siehe 0). Dazu werden zunächst die in das Spülgebiet einspeisenden Knoten identifiziert. Dies kann entweder anhand zuvor berechneter Durchflüsse oder mit Hilfe des Gesamtgraphen erfolgen. Die einspeisenden Knoten werden über virtuelle Kanten mit einem virtuellen Bezugsknoten für das Spülgebiet verbunden. Eine anschließend durchgeführte Zerlegung des Spülgebietsgraphen nach Abbildung 37 liefert unter anderem die Zerlegung des Spülgebiets in vermaschte Blöcke und Brücken bzw. Äste des Waldes. Während in den Brücken und Ästen die Fließrichtung eindeutig durch die Topologie vorgegeben ist, müssen in den vermaschten Blöcken zur Festlegung eindeutiger Fließwege (unidirectional flushing) in den Spülstrecken Netzscheiber geschlossen werden.

Die Reihenfolge der Spülungen der Blöcke ist durch den sogenannten BlockGraphTree (BGT), der im Zuge der Graphenzerlegung berechnet wird, vorgegeben. Der Algorithmus arbeitet sich von der Wurzel des BGT zu den Blättern vor. In den Brücken gehören zu einer Spülung jeweils der Anfangsknoten (in der Regel Hydrant der letzten Spülung) und der Spülhydrant. In den Blöcken sind außerdem die zu schließenden und zu öffnenden Schieber beim Übergang von einer Spülung zur anderen anzugeben. Da im vermaschten Bereich jeder Punkt topologisch gesehen von mindestens zwei Seiten erreicht werden kann und somit keine eindeutige Fließrichtung vorgegeben ist, werden zusätzliche Vorgaben für die Reihenfolge der Spülungen berücksichtigt.

Die im Rahmen des Vorhabens implementierte Version folgt innerhalb der vermaschten Bereiche den zuvor mit Hilfe einer hydraulischen Netzberechnung ermittelten Durchflussmengen. Die Vorgehensweise ist maschenorientiert. Das bedeutet, dass jeweils sämtliche Leitungen einer Masche gespült werden, danach folgen die angrenzenden Maschen. Zuerst werden die Maschen mit den größten Durchflüssen gespült. Dazu wurde eine Prioritätswarteschlange (priority queue) implementiert, in die die Verzweigungsknoten mit ihren Einspeisungen in die nächste Masche eingetragen werden. Ist die Spülung einer Masche abgeschlossen wird die Masche mit der nächstgrößten Einspeisung abgearbeitet. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass immer mit klarer Wasserfront gespült wird.

An den vermaschten Bereich anschließende Verästelungsnetze werden nach Fertigstellung der gesamten Masche gespült (Endstrangspülung). Für die Verästelungsnetze (Bäume des topologischen Waldes) gilt wie für die Brücken, dass keine Schieber zu schließen sind. Durch die Entfernung der nicht spülbaren Leitungen aus dem Graphen nach 77 ist garantiert, dass sich an den Blättern der Bäume jeweils ein Hydrant befindet. Die Vorgehensweise wurde für die Pilotzone PZ-S getestet [TP 4b-2-2] und ist beispielhaft für eine Masche in der folgenden Abbildung 38 dargestellt.

Die gelb markierten Schieber könnten für diese Spülung geöffnet werden. Später werden sie allerdings wieder benötigt und bleiben daher geschlossen. Nicht dargestellt ist hier die Endstrangspülung, die sich an Spülung SP 3 anschließen würde. Die Unterteilung der Maschen erfolgt anhand benutzerdefinierter Kriterien. Beispielsweise kann die bevorzugte Spülstreckenlänge angegeben werden. Außerdem kann durch entsprechende Festlegung der Kriterien festgelegt werden, dass die Spülstrecke keinen Durchmesserwechsel aufweisen soll. Dies ist wichtig, um eine ausreichend hohe Wandschubspannung durch entsprechende Fließgeschwindigkeiten zu garantieren. Werden unterschiedliche Durchmesser gleichzeitig gespült führt dies dazu, dass die Leitung mit dem geringeren Durchmesser die maximal mögliche Entnahme am Hydranten kontrolliert. Die dabei erzielbare Fließgeschwindigkeit in der



vorgelagerten, größeren Leitung kann dann unter Umständen zu gering für eine Reinigung des Rohres sein.

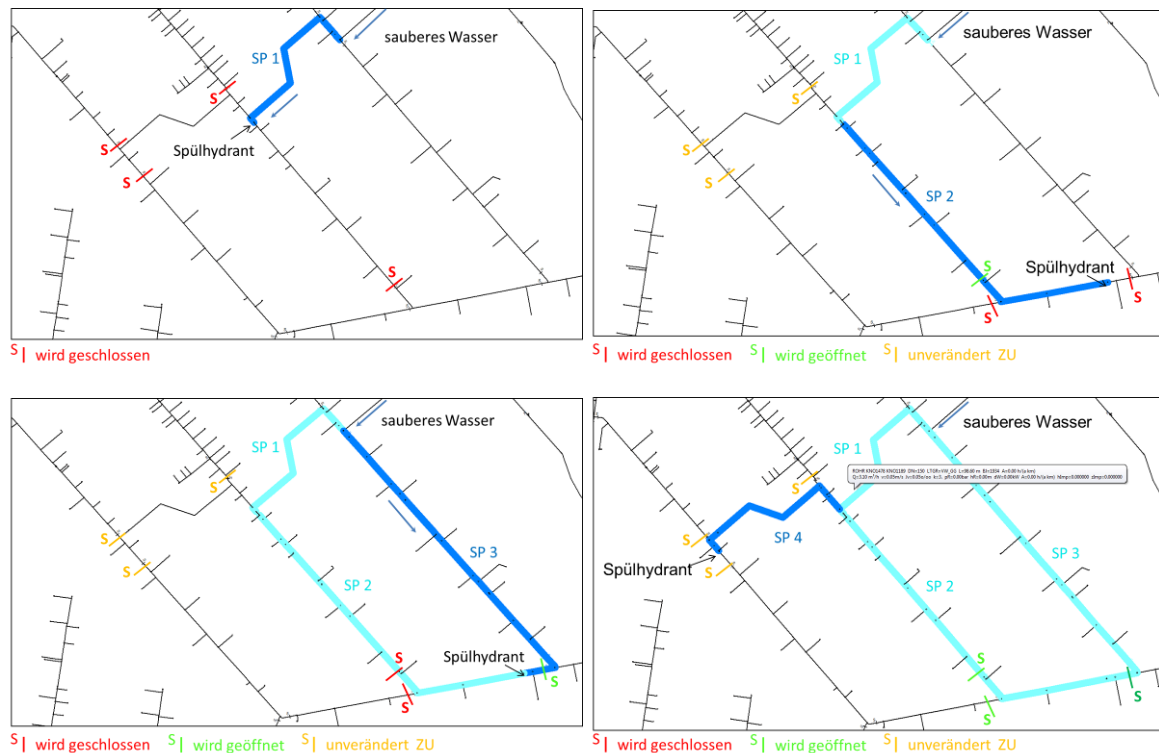


Abbildung 38 Vorgehensweise bei der Spülung mit klarer Wasserfront

Wie dem Beispiel oben zu entnehmen ist, sind nicht alle Schieberstellungen eindeutig bestimmt. Für die Spülung SP 2 könnten z.B. die gelb markierten Schieber wieder geöffnet werden. Für die Spülung hätte dies den Vorteil, dass die Spülstrecke über mehrere alternative Leitungen angespült werden könnte und somit höhere Spülfließgeschwindigkeiten zu erreichen wären. Andererseits entsteht durch zusätzliches Öffnen und Schließen der Schieber ein größerer Aufwand für das Betriebspersonal. Die Schieber müssen für die Spülung von SP 4 wieder geschlossen werden. Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Effizienz bei der Durchführung der Spülungen und Intensität der Spülung. Dieser lässt sich im Einzelfall nur durch eine zusätzliche hydraulische Untersuchung der Spülung und Abwägung der Teilziele beheben. Es wird daher ausdrücklich empfohlen, FlushPlan im Zusammenhang mit einem hydraulischen Simulationsmodell zu betreiben. Die Integration ins GIS ist zwar möglich, hydraulische Betrachtungen bleiben dabei allerdings unberücksichtigt.

II.1.9 Befragung von Wasserversorgern, Erarbeitung des Fragebogens zur Selbstevaluierung von Wasserversorgungsunternehmen bezüglich Gefährdung (TP 3a-1)

Die Ergebnisse der oben ausführlich geschilderten Arbeiten flossen in die Erstellung eines Leitfadens für Wasserversorgungsunternehmen zur Selbstevaluation bezüglich des Kontaminationsrisikos ein. Der Abschnitt zur Beurteilung des Verteilungsnetzes wurde jedoch nicht wie ursprünglich geplant in Form eines Fragebogens behandelt, da aufgrund der Heterogenität der Wasserversorgungsnetze das ursprüngliche Vorgehen nicht mehr als zielführend erachtet wurde. Der Leitfaden enthält nun eher eine Art Check-Liste, mit deren Hilfe interes-



sierte Wasserversorgungsunternehmen sich einen Überblick über Werkzeuge, bereitzustellenden Daten, und Möglichkeiten der Werkzeuganwendung verschaffen können.

In die Erarbeitung des Leitfadens gingen neben den Forschungsarbeiten auch Gespräche mit Wasserversorgungsunternehmen ein. Unter anderem fanden z. B: ausführliche Diskussionen mit der Wasserversorgung Zürich statt. Auf den Inhalt des Leitfadens wird hier nicht näher eingegangen, da dieser auch die Arbeiten der Projektpartner beinhaltet und als eigenständiges Dokument veröffentlicht wird.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Mittel wurden größtenteils für Personalkosten eingesetzt. Bedingt durch die Aufgabenstellung waren etwa in gleichem Umfang Arbeiten zur Entwicklung von Algorithmen und Implementierung der Software sowie Arbeiten zum Testen, zur Planung und Durchführung der Versuche sowie zur Erstellung und Pflege der Modelle erforderlich.

Sachkosten entstanden in geringem Umfang für die Anschaffung projektbezogener Literatur.

Zur Durchführung der Versuche und zum Austausch mit Forschungspartnern und beteiligten Wasserversorgungsunternehmen war außerdem eine relativ große Zahl von Dienstreisen notwendig. Darüber hinaus wurden internationale Dienstreisen zur Vorstellung der (Zwischen-)Ergebnisse auf internationalen Konferenzen durchgeführt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die szenariorientierte Struktur und Breite des Forschungsvorhabens überstieg in Umfang und Komplexität der Fragestellungen bei Weitem den üblichen von Wasserversorgungsunternehmen finanzierbaren Projektrahmen. Die Fragestellungen gingen in vielen Teilbereichen über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Eine Durchführung des Projektes ohne entsprechende Förderung wäre nicht möglich gewesen.

Die hydraulische Systemanalyse stellt für die Arbeitspakete 2 (Risikoanalyse), 3 (Prävention) und 4 (Umstrukturierung, Reaktion) eine wichtige Grundlage dar, ohne die die Durchführung des Gesamtvorhabens nicht möglich gewesen wäre.

Die Ausbreitungsversuche in Kombination mit der Online-Simulation liefern für weitergehende Untersuchungen wegweisende Ergebnisse. Insbesondere kann die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen der Anwendbarkeit von Online-Simulationsmodellen besser beantwortet werden. Die während der Versuche erhobenen Daten liefern auch zukünftig eine wichtige Referenzdatenbasis.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Durch die Entwicklungen im Rahmen des Vorhabens konnte die Software SIR 3S an verschiedenen Stellen verbessert und erweitert werden. Interesse an einem Softwaretool zur Ermittlung von Spülstecken wurde bereits von mehreren Wasserversorgern geäußert. Es ist geplant, nach Projektende, gemeinsam mit dem TZW, die prototypischen Entwicklungen zur Marktreife weiterzuführen.

Die Marktchancen von Softwarelösungen, die sich rein auf die Sicherheitsfragestellungen beziehen, werden von 3S Consult eher kritisch beurteilt. Insbesondere kleinere Wasserver-



sorger sind momentan nach Einschätzung von 3S wirtschaftlich nicht in der Lage, größere Projekte zur Sicherheit der Trinkwasserversorgung zu finanzieren. Daher wurde bei den Entwicklungen Wert darauf gelegt, dass die einzelnen Verfahren auch sinnvoll im alltäglichen Betrieb eingesetzt werden können.

Die erzielten Ergebnisse beinhalten Potenzial auch für Anwendungen außerhalb der Sicherheitsforschung (dual benefit). Gerade durch den immensen Rehabilitationsdruck, sich ändernde demografische Randbedingungen und knappe finanzielle Mittel steht die Wasserversorgungsbranche vor enormen Herausforderungen. Die im Rahmen von STATuS entwickelten Algorithmen und Softwarebausteine sollen helfen, den täglichen Betrieb von Wasserversorgungsunternehmen effizienter und sicherer zu machen. Ein Beispiel hierfür sind die optimierten Spülpläne zur Vermeidung von Braunwasserereignissen. 3S Consult sieht hier einen größeren möglichen Anwenderkreis und damit ein erhöhtes Marktpotenzial. Nach Beendigung des Vorhabens sollen einzelne Bausteine zur Marktreife weiterentwickelt und teilweise mit Partnern (TZW) kommerziell genutzt und vertrieben werden.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Bearbeitung des Vorhabens war keine vergleichbare Arbeit oder Fortschritte auf dem Gebiet bekannt.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Konferenzbeiträge:

Deuerlein, J.; Wolters, A.; Meyer-Harries, L. and Simpson, A. R.: "Graph decomposition in risk analysis and sensor placement for water distribution network security", 12th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis, WDSA 2010, American Society of Civil Engineers, Tucson, Arizona, 12-15 September, 2010.

Deuerlein, J.; Wolters, A.: "Online Hydraulic Simulation as Operative Tool for Improving Water Network Security", Computing and Control for the Water Industry 2011: "Urban Water Management – Challenges and Opportunities", Exeter, UK, 5.09. – 07.09.2011.

Riegel, M.; Käser, G.; Korth, A. and Deuerlein, J.: Comprehensive drinking water supply risk assessment in respect to CBRN threats. St. Louis, 2012.

Deuerlein, J.; Simpson, A. R.: "A modified global gradient algorithm based on topological decomposition" 14th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis, WDSA 2012, ASCE, Adelaide, Australia, 24-27 September, 2012.

Beitrag zu Tagungsband:

Deuerlein, J. and Wolters, A.: Graph decomposition as operative tool in hydraulic system analysis – security aspects. In: Water Contamination Emergencies - Monitoring, Understanding and Acting, Ulrich Borchers (Editor), K Clive Thompson (Editor), ISBN: 978-1-84973-156-0, RSC Publishing, Cambridge, 2011.

Poster:

Deuerlein, J.; Wolters, A. and Simpson, A. R.: „Graph Decomposition as Operative Tool in Hydraulic Systems Analysis – Security Aspects“. 5th International Conference on Water Contamination Emergencies: monitoring, understanding, acting. Mülheim an der Ruhr, Germany, 11-13 October, 2010. Poster Presentation.



Eine weitere Veröffentlichung zum Thema Spülplanoptimierung ist für Mitte des Jahres 2013 geplant. Außerdem soll das anlässlich Konferenz WDSA 2012 vorgetragene Thema weiterentwickelt und in einem internationalen Fachjournal veröffentlicht werden.



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Graphentheoretische Analyse der städtischen Pilotzone (PZ-S).....	12
Abbildung 2	Konzentrationsverlauf nach Einbringung an Bücke (links) und im vermaschten Bereich (rechts).....	13
Abbildung 3	Tagesganglinien für Versorgungsgebiete unterschiedlicher Größe.....	16
Abbildung 4	Matrix zur Risikoabschätzung (DVGW, 2008).....	18
Abbildung 5	Klassifizierung der Verbraucher (Hausanschlüsse) im hydraulischen Simulationsmodell.....	21
Abbildung 6	Verteilung der relativen Eintrittswahrscheinlichkeit	22
Abbildung 7	Stationäre Flussverteilung in der PZ-S.....	23
Abbildung 8	Injektionsrisiko / Schadensausmaß / Eintrittswahrscheinlichkeitsverteilung	24
Abbildung 9	Netzstatistik für grün markierten vermaschten Block.	28
Abbildung 10	Auswirkung unidirektionaler Abtrennung von Hausanschlussleitungen	28
Abbildung 11	Markierung der Injektionsstelle und Eingabe der max. Ausbreitungszeit zur Ermittlung des zu spülenden Netzbereichs	32
Abbildung 12	Pumpendrehzahl und Druckverlauf, Einbringung von 12 m ³ /h am Hausanschluss.....	33
Abbildung 13	Injektionsmenge und Druckverlauf im Taucherflaschenszenario (ZVWKK).....	34
Abbildung 14	Taucherflaschenszenario für Anschlag im vermachten Netz der WL	34
Abbildung 15	Multiparametersonde (Fa. Gero)	38
Abbildung 16	Multiparametersonde an Unterflurhydrant.....	40
Abbildung 17	Anschluss Multiparametersonde an Messkoffer.....	41
Abbildung 18	Schacht mit Messtechnik (Planskizze von KWL)	43
Abbildung 19	Schachtverlegung (Aufnahmedatum: 03.08.2012).....	43
Abbildung 20	Schema Datenübertragung.....	44
Abbildung 21	Problemstellung Übertragungszeitverzug der temporären Messstellen	46
Abbildung 22	Steuerung des SIR 3S Simulationsmodells.....	49
Abbildung 23	Abhängigkeit der Messabweichung von der Fließgeschwindigkeit (11/2011 WVGW).....	54
Abbildung 24	Messstandorte des dritten Ausbreitungsversuchs am 12.11.2012	60
Abbildung 25	Versuch 12.11.2012 - Einspeisemengen	62
Abbildung 26	Einspeisemengen und Druck an der DEST.....	62
Abbildung 27	Einspeisemengen IDM _I (Zonentrennschieber) und Druck	63



Abbildung 28	Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H10847	63
Abbildung 29	Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H7261	64
Abbildung 30	Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H8012	65
Abbildung 31	Zeitkurven für Druck - Durchfluss – normierte Leitfähigkeit an Messstelle H20512	66
Abbildung 32	Ausbreitung des Fernwassers in der Pilotzone während Schieber geöffnet	67
Abbildung 33	Ausbreitung des Fernwassers im gesamten Versorgungsgebiet.....	68
Abbildung 34	Verteilung turbulente (rot), laminare (blau) Strömung für untersch. Lastfälle.....	70
Abbildung 35	Modellbildung mit dem Rohr zugeordneten Netzschiebern/Hydranten	74
Abbildung 36	Vollständige Modellbildung mit Schiebern und Hydranten als Kanten und Knoten.....	75
Abbildung 37	Schematische Darstellung zur Dekomposition des Netzgraphen	78
Abbildung 38	Vorgehensweise bei der Spülung mit klarer Wasserfront	81

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht zum Teilvorhaben „Systemanalytische Untersuchungen zur Vulnerabilität von Wasserversorgungsnetzen“ im Verbundprojekt „Schutz der Trinkwasserversorgung vor Anschlägen mit CBRN-Stoffen (STATuS)“ <i>Phase 1: Konzeption und Strukturierung der Elemente des Risikomanagement-Ansatzes</i> <i>Phase 2: Grundlegende Untersuchungen zur beispielhaften Umsetzung der Elemente des Risikomanagementansatzes</i>	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Käser, Georg Dr. Wolters, Andreas Dr. Deuerlein, Jochen	5. Abschlussdatum des Vorhabens Februar 2013
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Schriftlicher Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) 3S Consult GmbH Osteriede 8 – 10 30827 Garbsen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 13N10623
	11. Seitenzahl 86
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 35
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 38
16. Zusätzliche Angaben -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Zentrale Einrichtung der öffentlichen Trinkwasserversorgung sind mögliche Ziele terroristischer Anschläge. Die städtischen Rohrnetze der Wasserversorgung sind komplexe, über Jahrzehnte gewachsene Systeme der technischen Infrastruktur. Der Schutz vor Anschlägen und die Beherrschung möglicher vorsätzlicher Kontaminationsereignisse setzen die genaue Kenntnis der hydraulischen Funktionsweise der gesamten Anlage voraus. Diese ist nur durch den Einsatz entsprechender mathematische Simulationsmodelle erreichbar. Ziel des Vorhabens war es daher, durch Anwendung systemanalytischer Verfahren zunächst die Gefährdung der Bevölkerung durch Anschläge auf die Trinkwasserversorgung mit CBRN-Stoffen einzuschätzen und Möglichkeiten zur Prävention zu entwickeln. Aufbauend auf den Ergebnissen standen dann in der zweiten Bearbeitungsphase die Projektierung und Inbetriebnahme eines Online-Simulationsmodells zur Netzüberwachung für eine ausgewählte Pilotzone eines realen Versorgungssystems und die Entwicklung des Softwaretools FlushPlan zur automatischen Ermittlung von Spülplänen im Vordergrund. Zur Validierung des Onlinesimulationsmodells wurde eine umfangreiche Versuchsreihe durchgeführt, während der, stellvertretend für eine reale Kontamination, der Transport und die Durchmischung unterschiedlicher Qualitätsparameter im Netz untersucht wurden. Die Auswertungen zeigten, dass durch die Online-Simulation der tatsächliche Betriebszustand relativ genau erfasst werden kann und damit eine Prognose der Ausbreitung einer Kontamination mit einer gewissen Unschärfe, die von verschiedenen Faktoren, wie z.B. Datengrundlage, Heterogenität des Versorgungsgebietes, etc. abhängt, möglich ist. Begleitend wurden verschiedene Softwareentwicklungen/-erweiterungen durchgeführt, die auch über die reine Sicherheitsfragestellung hinaus im täglichen Betrieb von Wasserversorgungsunternehmen nützlich sind.	
19. Schlagwörter Risikoanalyse, Hydraulische Simulation, Online-Überwachung, Online-Simulation, Spülplanoptimierung,	
20. Verlag -	21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Final report to the subproject „System analytical investigations of the vulnerability of water supply networks“ within the cooperative project „Security of Drinking Water Supply with Respect to CBRN-threat scenarios (STATuS)“ <i>Phase 1: Concept and Structuring of the Elements of the Risk Management Approach</i> <i>Phase 2: Basic Studies for the exemplary Implementation of the Risk Management Approach</i>	
4. author(s) (family name, first name(s)) Käser, Georg Dr. Wolters, Andreas Dr. Deuerlein, Jochen	5. end of project February 2013
	6. publication date Scheduled
	7. form of publication Written Report
8. performing organization(s) (name, address) 3S Consult GmbH Osteriede 8 – 10 30827 Garbsen	9. originator's report no.
	10. reference no. 13N10623
	11. no. of pages 86
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 35
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 38
16. supplementary notes -	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract Central parts of the public drinking water supply systems are possible targets of malevolent attacks. The urban pipe networks of the central water supply are complex and parts of the technical infrastructure that have been growing over decades. The protection against deliberate contamination and the management of threat scenarios are possible only if the hydraulics of the entire system is known at any time and any place. This I can be achieved only by use of mathematical simulation models for both planning and operations. The first objective of the project was the investigation of the risk of the population for being threatened by deliberate contamination of the central water supply with CBRN-substances by use of system analytical tools. The results of the study were used for the development of protection measures. These include constructional and topological modifications of the pipe system as well as installation on monitoring systems. For that purpose an online simulation model for a chosen pilot zone of a real world network was projected and implemented. For validation a number of field tests were carried out. As surrogate for the contaminant the electrical conductivity of the water that originated from different sources was used. The results showed that the online simulation is able to reproduce the actual state of the reals system and to forecast the spread of contamination with satisfying accuracy if the model parameters are chosen properly. In case of a contamination event unidirectional flushing of the affected area is proposed as a response. The third objective was the development the software tool FlushPlan for the automatic identification of flushing plans. A prototype was implemented and successfully tested for the project pilot zone. Besides that a number of additional software tools were implemented that are useful also under normal operational conditions.	
19. keywords Risk Analysis, Hydraulic Simulation, Online-Monitoring, Online-Simulation, Optimal Flushing	
20. publisher -	21. price -