

SOFTSEN – Softwarebasierte Abschätzung der Entlastungsfrachten

Wolfgang Rauch¹, Günther Leonhardt¹, Stefan Fach¹, Carolina Engelhard¹, Manfred Kleidorfer¹ und Heiko Kinzel²

¹ Arbeitsbereich Umwelttechnik, Institut für Infrastruktur, Universität Innsbruck,
Technikerstraße 13, A 6020 Innsbruck

² hydro-IT GmbH, Technikerstraße 13, A 6020 Innsbruck

Kurzfassung: Die genauere Kenntnis der aus Kanalisationssystemen in Vorfluter eingeleiteten Mischwasserfrachten wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Eine messtechnische Erfassung ist in der Praxis jedoch nur zeitlich begrenzt möglich und außerdem mit sehr hohen Kosten verbunden. Als Alternative bietet sich der kombinierte Einsatz von Simulationsmodellen mit Messungen an. Auf Basis bereits erfasster Standardmessdaten (z. B. Durchflüsse, Wasserstände) und den Ergebnissen einer Messkampagne können damit kontinuierlich und in Echtzeit Mischwasserentlastungsmengen und -frachten berechnet werden. Die Integration in eine Software mit Anbindung an das SCADA-System erlaubt einen automatischen Betrieb dieser Modelle sowie eine laufende Überprüfung der Ergebnisse anhand der Standardmessdaten. Dies ermöglicht in weiterer Folge eine permanente Anpassung der Modelle sowie eine Kontrolle des Systemverhaltens. Zudem können Bandbreiten der Unsicherheiten für die berechneten Frachten ermittelt werden. Die Methodik sowie der Prototyp der Software werden derzeit in einer Fallstudie erprobt.

Key-Words: Mischwasserbehandlung, Stofffrachten, Simulationsmodelle, Online-Betrieb, Software SoftSen

1 Einleitung

Die Einleitung von Mischwasser im Fall von Starkregenereignissen verursacht mitunter hohe Belastungen der betroffenen Gewässer, sowohl in hydraulischer als auch in stofflicher Hinsicht. Diesem Umstand

wird in der Planung von Mischwasserkanalisationen durch die Errichtung von Speichervolumina und die Einhaltung eines Mindestwirkungsgrades der Weiterleitung (vergl. RGBI. 19, ÖWAV, 2007) Rechnung getragen.

Im Sinne einer vertieften Betrachtung, sowohl der Emissions- als auch der Immissionssituation, ist eine genauere Kenntnis der in den Vorfluter eingeleiteten Mischwassermengen und Stofffrachten wichtig. So könnte unter anderem im Zuge der Umsetzung der EU Wasserrahmenrichtlinie (EU, 2000) Bedarf an solchen Daten entstehen (z. B. Bewertung des aktuellen Zustands, Nachweis zum Verschlechterungsverbot, Evaluierung von Maßnahmen zur Erreichung eines guten Zustands).

Die permanente messtechnische Erfassung von Mischwasserüberläufen, v. a. der Stofffrachten, erfordert jedoch einen hohen technischen und finanziellen Aufwand. Aus diesem Grund wurden solche Messstellen bisher fast ausschließlich für Forschungszwecke errichtet (z. B. Gruber et al., 2006). Darüber hinaus ist die messtechnische Erfassung der entlasteten Mischwassermengen aufgrund der hydraulischen Gegebenheiten in den Bauwerken mit großen Unsicherheiten verbunden (z. B. Sitzenfrei et al., 2008).

Die Methode, Computermodelle für die Berechnung von Entlastungen in Mischsystemen zu verwenden, wird schon seit geraumer Zeit erfolgreich verwendet. Im deutschsprachigen Raum (D-A-CH) werden daher Dimensionierungen von erforderlichen Mischwasserbehandlungsmaßnahmen im Nachweisverfahren durchgeführt, in Österreich z. B. durch die Bestimmung des Wirkungsgrades der Weiterleitung nach ÖWAV-Regelblatt 19 (ÖWAV, 2007).

Im Rahmen des Forschungsprojekts „SoftSen“ wurde nun eine Methodik entwickelt, die auf Basis von üblicherweise ohnehin erfassten Standardmessdaten und Simulationsmodellen eine kontinuierliche Berechnung von Mischwasserentlastungsfrachten erlaubt. Ziel ist also nicht die Planung von Anlagen sondern eine online Information des Verhaltens von Mischwasserentlastungen. Die Methodik wurde in einer gleichnamigen Software umgesetzt und ein Prototyp für den Testbetrieb bei einem Kanalnetzbetreiber installiert. Die Integration dieser Software in das SCADA-System der Abwasserreinigungsanlage ermöglicht, dass die

Mischwasserbehandlung, in ähnlicher Form wie die Abwasserreinigungsanlage selbst, online überwacht werden kann. Dies erlaubt auch eine Kontrolle der Funktion der Anlage im Sinne einer automatischen Überwachung. Zudem können die Daten hinsichtlich einer Überprüfung der Leistungsfähigkeit statistisch ausgewertet werden.

2 Konzept

Das Grundkonzept der Methodik besteht in der Abbildung des Kanalsystems sowie der wesentlichen Prozesse in einem dynamischen, konzeptionellen Modell. Als Ergebnis liefert das Modell neben anderen Größen vor allem die ereignisspezifischen Entlastungsmengen und -frachten (von ausgewählten Schmutzstoffen) an den jeweiligen Mischwasserüberlaufbauwerken. Dieses Konzept der Verknüpfung von Messdaten aus dem realen System und Simulationsergebnissen mit Hilfe der Software SoftSen ist in Abbildung 1 dargestellt.

Zur Erstellung des Modells müssen die notwendigen Informationen über das System wie abflusswirksame Flächen, Kanalnetz, Entlastungsbauwerke etc. vorhanden sein. Die Kalibrierung erfordert sowohl Eingangsdaten (z. B. Niederschlag) als auch Messungen (z. B. Durchflüsse, Konzentrationen) zum Vergleich mit Modellergebnissen. Auf die Modelle wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Je nach Verfügbarkeit der Eingangsdaten, z. B. aus dem SCADA-System der Anlage, kann das Modell online (in Echtzeit) betrieben oder auch zu einem späteren Zeitpunkt gestartet werden. Wichtig ist jedoch die kontinuierliche Simulation längerer Zeiträume, um die Möglichkeiten der laufenden Überprüfung und Verbesserung ausnützen zu können. Ein Online-Betrieb bietet den Vorteil, dass die Ergebnisse, also die Mischwasserentlastungsfrachten, quasi in Echtzeit und somit fast gleichzeitig mit anderen Messdaten zur Verfügung stehen. Solche Systeme werden auch als softwarebasierte Sensoren bezeichnet, wovon sich auch der Name des Forschungsprojektes und der entwickelten Software ableitet. Die Qualität der Ergebnisse hängt wie bei jeder Modellierung stark von der Güte und vom Umfang der Eingangs- und Kalibrierungsdaten ab.

Reales System

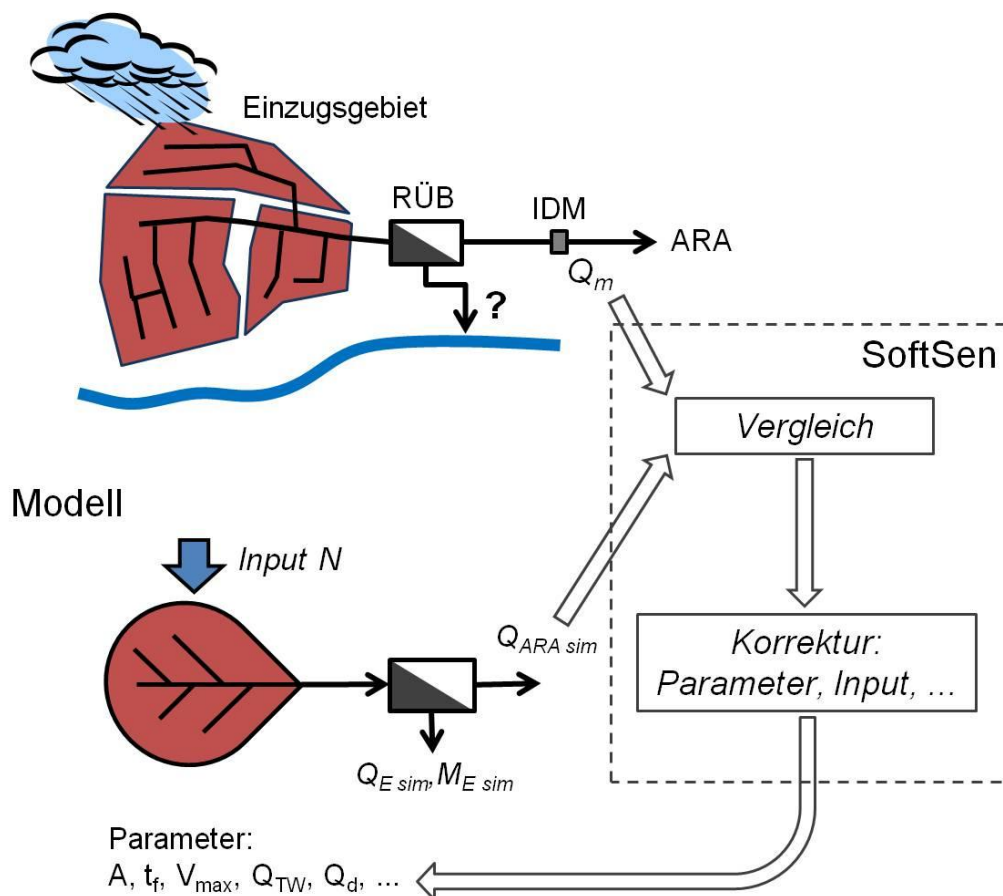


Abbildung 1: Verknüpfung von realen Messdaten und Ergebnissen des Simulationsmodells zur Gewinnung neuer Informationen mit Hilfe der Software SoftSen (N: Niederschlag, Q_m : gemessener Durchfluss, Q_{sim} : simulierter Durchfluss, M_{sim} : simulierte Stofffrachten, E: Entlastung)

Wie in Abbildung 1 dargestellt sind zum Betrieb des deterministischen Modells zumindest Inputdaten (z. B. Niederschlag) notwendig. Stehen darüber hinaus weitere Daten (z. B. Systemzustände wie Wasserstände, Durchflüsse, Entlastungsmengen) zur Verfügung kann das Modell laufend überprüft und verbessert werden (Abbildung 1). Außerdem können so laufend Informationen über die Qualität der Ergebnisse gewonnen werden.

Stehen derartige Daten nicht dauernd zur Verfügung, sondern nur für einzelne Ereignisse, können dennoch wertvolle Informationen hinsichtlich Unsicherheit der Modellvorhersagen gewonnen werden. Dies ist in Kapitel 6 ausgeführt.

3 Modell

Das im vorherigen Kapitel erwähnte Simulationsmodell muss mehrere Anforderungen erfüllen. Einerseits sollten die wesentlichen Prozesse wie Abflussbildung, Abflusskonzentration, Akkumulation und Mobilisation von Schmutzstoffen, etc. adäquat abgebildet werden, andererseits soll die Rechenzeit möglichst kurz sein. Daher bieten sich konzeptionelle Modelle an (vergl. Fach et al., 2007, Rauch und Kleidorfer, 2010).

Die Modelle für den Prototyp wurden in der Software CityDrain 3 (Burger et al., 2010) umgesetzt, die für diesen Zweck auch um den Bereich Schmutzfrachtmodellierung erweitert wurde. In CityDrain 3 stehen verschiedene Teilmodelle als sogenannte Blöcke zur Verfügung, aus denen das Gesamtmodell eines Entwässerungssystems zusammengesetzt werden kann.

3.1 Hydrologisches Modell

Die Abflussbildung auf der Oberfläche wird durch eine modifizierte Schwellenwert-Methode (Rauch et al., 2002), die Abflusskonzentration im Einzugsgebiet durch die Isochronenmethode (Butler und Davies, 2004) im Modell abgebildet. Für die Modellierung des Transports in den Hauptsammlern steht das Muskingum-Routing (Roberson et al., 1995) zur Verfügung. Die Entlastungsbauwerke werden durch ihr maximales Speichervolumen und den idealisierten, d. h. zeitlich konstanten Drosselabfluss charakterisiert. Die Entlastungsmenge wird aus der Massenbilanz ermittelt. Falls notwendig, können auch andere Systemkomponenten oder Bauwerke wie z. B. Pumpwerke durch entsprechende Modellbausteine eingefügt werden.

3.2 Schmutzfrachtmodell

Für das Schmutzfrachtmodell wurde der sogenannte *build-up – washoff*-Ansatz gewählt (Butler und Davies, 2004). Dieser geht von einer Akkumulation von Stoffen im Einzugsgebiet und im Kanalsystem bei Trockenwetter, beginnend nach jedem Regenereignis, aus. Die Akkumulationsrate nimmt jedoch stetig ab, so dass die Stoffmenge nach einer bestimmten Trockenwetterperiode ein Maximum erreicht, das einem

Gleichgewicht zwischen Akkumulation und Mobilisation entspricht. Die Mobilisation der zuvor akkumulierten Stoffe bei Regen erfolgt in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität und der Masse der noch vorhandenen Stoffe im System. Die im Regenwasserabfluss mobilisierten Stoffe werden danach mit dem Trockenwetterabfluss voll durchmischt durch das System transportiert.

Grundsätzlich können im Rahmen der SoftSen-Methodik auch andere Modellkonzepte verwendet werden. So gibt es z. B. auch Schmutzstoffmodelle, die nicht Niederschläge sondern Abflüsse als Eingangsdaten benötigen.

Da ein beträchtlicher Teil der Schmutzstoffe im Mischwasser aus dem Abwasser stammt, sollte auch der Trockenwetterabfluss als Tagesganglinie mit den dazugehörenden Stoffkonzentrationen bekannt sein. Da die Daten den typischen Tagesverlauf wiedergeben sollten, ist üblicherweise eine zeitliche Auflösung von nicht mehr als ein bis zwei Stunden erforderlich.

Abhängig von den dominierenden Prozessen im jeweiligen Einzugsgebiet können die Stoffkonzentrationen und in weiterer Folge die Frachten im entlasteten Mischwasser auch durch reine Mischungsrechnung aus Regen- und Trockenwetterabfluss ermittelt werden.

3.3 Kalibrierung

Die Parameter der Modelle müssen auf jeden Fall durch eine sorgfältige Kalibrierung ermittelt werden.

Für die Kalibrierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle sind jedenfalls Regendaten in hoher zeitlicher Auflösung (z. B. 5 Minuten) sowie Messungen in den Entlastungsbauwerken (Durchfluss oder Wasserstand im Bauwerk) erforderlich. Zusätzlich können auch Durchflussmessungen im Kanalsystem verwendet werden.

Die Kalibrierung der Schmutzfrachtmodelle erfordert Messungen der Stoffkonzentrationen bei Regenereignissen, idealerweise zeitgleich an mehreren Stellen im Kanalsystem.

4 Umsetzung in einer Fallstudie

Die Methodik wird derzeit erstmals für das westlich von Innsbruck gelegene Kanalsystem des Abwasserverbands Zirl und Umgebung (Tirol) umgesetzt. Für dieses System wurde auch der Prototyp des Programms SoftSen entwickelt.

4.1 Beschreibung des Einzugsgebietes

Der Abwasserverband Zirl und Umgebung (AV Zirl) übernimmt in seinem Kanalsystem das Abwasser aus 14 Gemeinden. Von den insgesamt 17 Teileinzugsgebieten werden neun im Mischverfahren, die anderen im Trennverfahren entwässert. Die Mischwasserentlastungsbauwerke befinden sich jeweils vor der Einleitung der Ortskanalisation in den Verbandssammler (siehe Abbildung 2). Die Ausbaugröße der vom Verband betriebenen Abwasserreinigungsanlage (ARA) beträgt rund 60 000 Einwohnergleichwerte (EW). Der Trockenwetterabfluss einiger Teileinzugsgebiete ist stark von abwasserintensiven Gewerbebetrieben geprägt.

Von den neun Teileinzugsgebieten, die im Mischverfahren entwässert werden, befinden sich sieben in der breiten Talsohle des Inntals und zwei auf einer höher gelegenen Hangterrasse. Dieser Umstand ist bei der räumlichen Verteilung von Niederschlägen zu berücksichtigen. Die ersten sieben Gebiete nutzen als Vorfluter den Inn, die anderen beiden kleine Zubringer, wovon einer im Bereich der Einleitung nur Restwasser führt.

Im Kanalsystem des AV Zirl sind rund 90 Sensoren zur Messung von Durchflüssen und Wasserständen installiert. Die Messdaten dieser Sensoren können laufend über eine Schnittstelle aus dem SCADA-System der Anlage abgefragt werden.

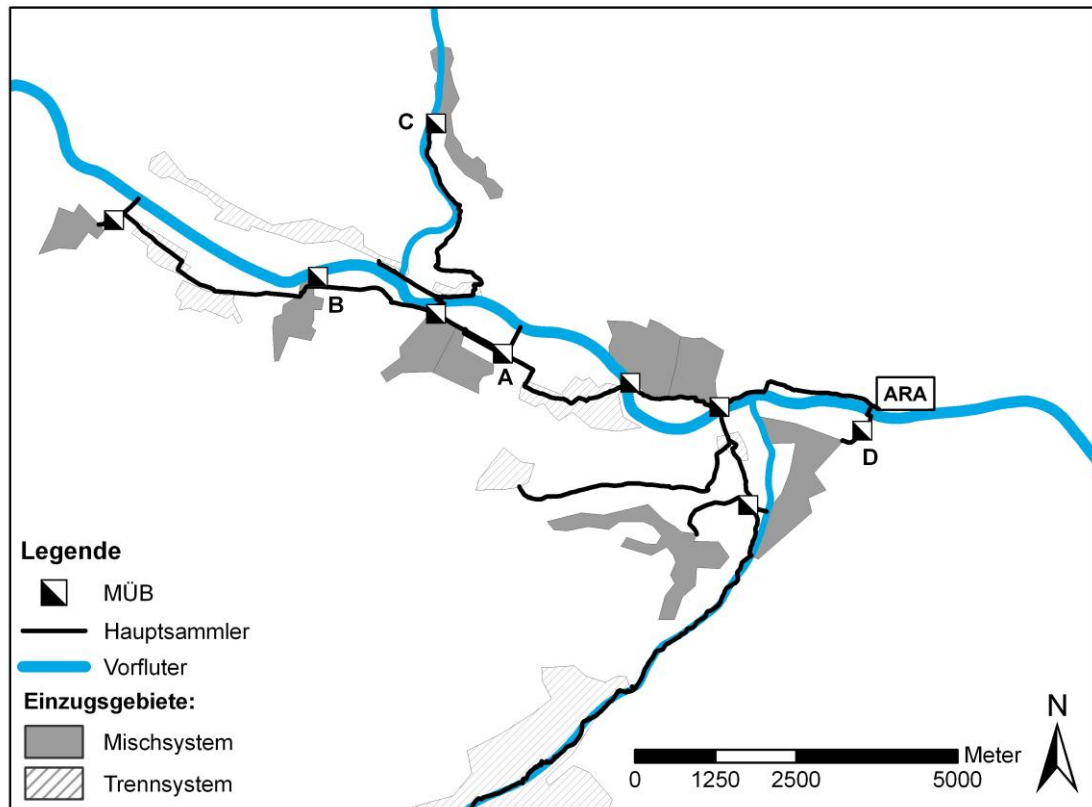


Abbildung 2: Lage der Teileinzugsgebiete und Mischwasserüberlaufbauwerke (MÜB) des AV Zirl; die Orte der Probenahme sind mit den Buchstaben A bis D gekennzeichnet.

Tabelle 1: Eigenschaften der Einzugsgebiete der untersuchten Messstellen

| Mess-stelle | Kanal-system | Einwohner* | Beschäftigte* | abflusswirksame Fläche (ha) |
|-------------|--------------|------------|---------------|-----------------------------|
| A | MS | 1200 | 100 | 18 |
| B | MS | 900 | 100 | 6 |
| C | MS & TS | 800 | 300 | 5 |
| D | MS | 2500 | 1500 | 16 |

* Abschätzung anhand der Daten von STATISTIK AUSTRIA, 2001

MS: Mischsystem, TS: Trennsystem

4.2 Messkampagne

Um zusätzlich zu den umfangreichen SCADA-Daten weitere Informationen über das System und auch Daten für die Kalibrierung der Schmutzfrachtmodelle zu gewinnen, wurden im Einzugsgebiet vier Niederschlagsmesser aufgestellt und eine Messkampagne durchgeführt (siehe auch Fach et al., 2010).

Von den zehn Mischwasserentlastungsbauwerken im Verbandssammler wurden vier aufgrund ihrer Bedeutung und ihrer Eignung für eine Probenahme ausgewählt (siehe Tabelle 1). Die Probenahme erfolgte mittels automatischer Probenehmer, welche - soweit möglich - im Zulauf zu den Bauwerken die Proben zogen. Bei den automatischen Probenehmern wurden sowohl Vakuumsysteme als auch solche mit Peristaltikpumpe eingesetzt. An Messstelle D (s. Abbildung 2) musste die Probe aufgrund der Unzugänglichkeit des eigentlichen Zulaufs im Durchlaufbecken im Bereich des Zulaufs gezogen werden. Alle Probenehmer waren vor unbefugtem Zugriff geschützt, da sie auf abgesperrtem Gelände standen. Die Installation der Probenehmerschläuche erfolgte durch das Fachpersonal der Kläranlage, da einige Ansaugpunkte (A, C) tief unter der Geländeoberkante im Kanal lagen. An diesen Punkten war auch eine Wartung im Falle von Verstopfungen nur durch das Kläranlagenpersonal möglich. Des Weiteren wurde an jeder Messstelle ein Regenmesser installiert, an Messstelle A ein Geonor T200B, dessen Messsystem auf einem vibrierenden Draht beruht, und an den anderen drei Stellen Regenwippen. Während mit dem Geonor T200B das ganze Jahr über Niederschlag gemessen werden kann, wurden die Wippen nur von April/Mai bis Oktober betrieben. Zusätzlich zu den Messungen an den Mischwasserentlastungsbauwerken wurden im Kläranlagenzulauf ein automatischer Probenehmer und zwei Online-Sonden installiert. Eine Online-Sonde war eine UV/Vis-Sonde zur Messung von abfiltrierbaren Stoffen (AFS) und Chemischem Sauerstoffbedarf (CSB), die andere eine ionensensitive Sonde zur Messung von Ammonium.

Es wurden drei Arten von Proben gezogen, 24 Stunden Mischproben des Trockenwetters, Tagesganglinien des Trockenwetters (bestehend

aus 2 Stunden Mischproben) und Regenwetterproben (bestehend aus 10 min Mischproben).

4.2.1 Ergebnisse

Der Boxplot der 24h- Mischproben des Trockenwetters (bestehend aus 8 bis 12 Messungen je Messstelle) zeigt die Variabilität und die durchschnittliche Belastung der vier Messstellen und des Zulaufs der ARA. Der Vergleich des Medians der in den 24h-Mischproben gemessenen Konzentrationen mit dem Median der Konzentration in Mischkanalisationen in Zentraleuropa des DWA Datenpools (beschrieben in Brombach et al., 2005) zeigt, dass Messstelle D hoch belastetes Abwasser aufweist: bei allen Parametern liegt der Median über dem des Datenpools (s. Tabelle 2). Messstelle D repräsentiert dabei das Einzugsgebiet mit dem höchsten Industrieanteil (s. Tabelle 1). Die anderen drei Messstellen liegen zumeist im gleichen Bereich und bei den Gesamtparametern (CSB gesamt, Stickstoff gesamt, Phosphor gesamt) immer unter dem Median, während die Ammoniumkonzentrationen gleich oder größer als der Median des Datenpools sind (s. Abbildung 3 links). Auffällig sind die geringen Konzentrationen bei CSB gesamt und AFS an Messstelle A (s. Tabelle 2) und die sehr variablen und teilweise sehr hohen Konzentrationen der beiden Parameter an Messstelle C.

Die Probenahme für die Trockenwetter-Ganglinien war deutlich aufwändiger, da für alle vier Messstellen und den ARA Zulauf gleichzeitig Messungen erhalten werden sollten. Wenn also an einer Messstelle Probleme auftraten, musste die Probenahme für alle wiederholt werden. Daher gibt es für die Trockenwetter-Ganglinie nur zwei Messungen je Messstelle. Teilweise sind die Abweichungen zwischen den beiden Messungen gering (z. B. Stickstoffparameter an Messstelle C, s. Abbildung 4 rechts), meist jedoch hoch (z. B. CSB gesamt Messstelle D, s. Abbildung 4 links). Die Messungen zeigen ein Nachtminimum und meist nur schwache Peaks (Beispiel Ammonium-Ganglinie zusammengesetzt aus allen Werten der Messstellen A-D, siehe Abbildung 3 rechts).

Tabelle 2: Median der 24h Mischproben Trockenwetter und Mittelwert der Tagesganglinie TW im Vergleich mit Median Zentraleuropa

| | | CSB _{ges} | CSB _{filt} | AFS | N ges | NH ₄ | P ges | PO ₄ |
|-------|----|--------------------|---------------------|------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| | | mg/l | mg/l | mg/l | mg N/l | mg N/l | mg P/l | mg P/l |
| A | a) | 284 | 147 | 74 | 34 | 18 | 4,1 | 3,1 |
| | b) | 340 | 124 | 97 | 40 | 25 | 6,4 | 4,5 |
| B | a) | 408 | 215 | 109 | 41 | 33 | 6,4 | 5,4 |
| | b) | 419 | 188 | 167 | 62 | 37 | 9,5 | 7,0 |
| C | a) | 696 | 201 | 348 | 31 | 17 | 4,7 | 3,4 |
| | b) | 506 | 71 | 197 | 30 | 15 | 5,0 | 2,3 |
| D | a) | 662 | 382 | 231 | 52 | 34 | 8,3 | 6,34 |
| | b) | 992 | 343 | 233 | 61 | 31 | 9,9 | 7,4 |
| TW ZE | | 454 | | 206 | 51,15 | 20,4 | 6,57 | |

a) Median 24h Mischproben

b) Mittelwert Ganglinie (2h Mischproben)

TW ZE: Median Trockenwetter Konzentration DWA Datenpool Brombach et al., 2005

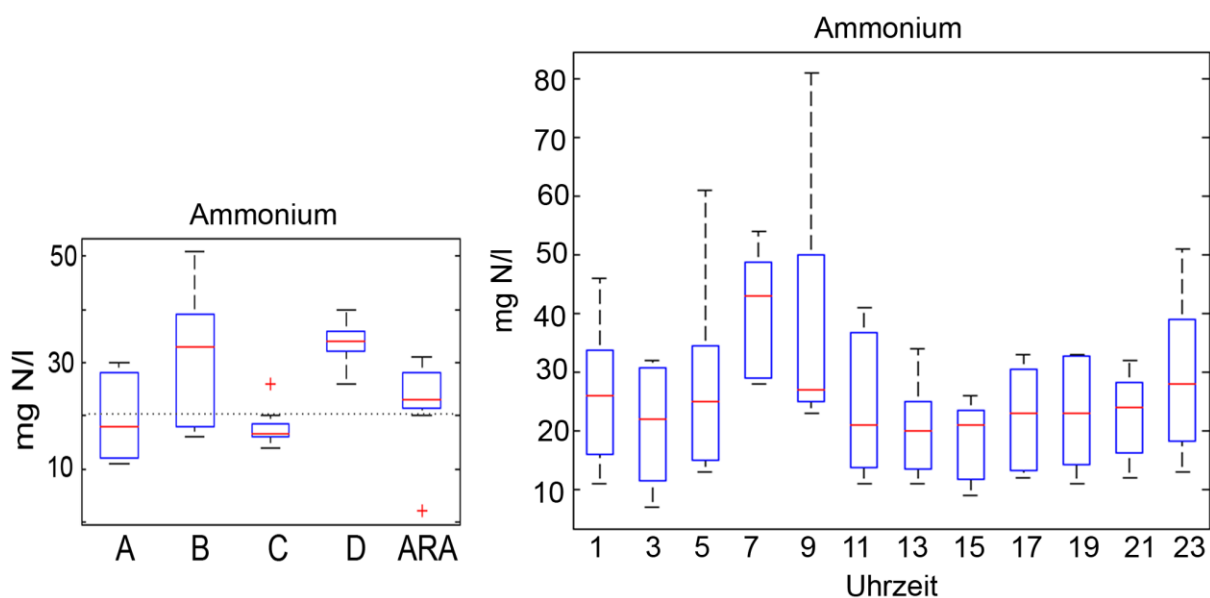


Abbildung 3: Ammonium im Trockenwetter: Boxplot der Messergebnisse der 24h-Mischproben (links) (gestrichelte Linie: Median der Trockenwetterkonzentration für Zentraleuropa, DWA Datenpool) und der Ganglinien der MÜBs aus 2h Mischproben (rechts)

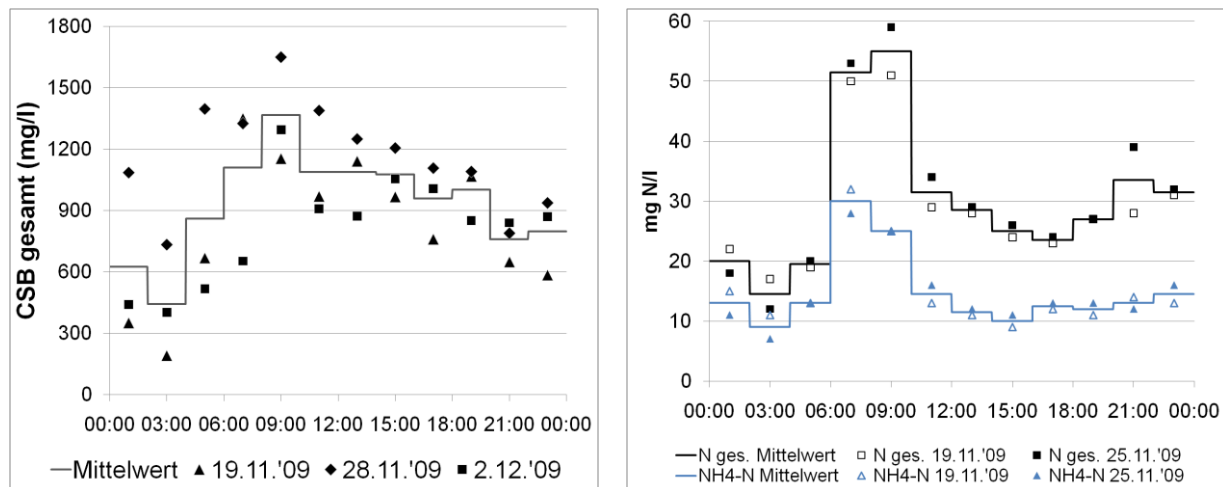


Abbildung 4: Beispiel für eine Trockenwetter-Ganglinie mit hohen Abweichungen zwischen den einzelnen Messwerten (rechts: CSB_{gesamt} Messstelle D) und geringen Abweichungen (links: N_{gesamt} und NH₄ bei Messstelle C)

Die Probenahme von Niederschlagsereignissen ist von der Logistik her anspruchsvoller als die bei Trockenwetter. Es muss nicht nur die Probenahme an sich funktionieren, sondern auch der richtige Zeitpunkt für den Start der Messkampagne zu Beginn eines ausreichend starken Regenereignisses gewählt werden. Von vier beprobten Ereignissen konnte von einem sehr gute Proben für alle vier Messstellen und bei einem weiteren bei zwei Messstellen gute Proben gewonnen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die geringen Konzentrationen von CSB_{gesamt} und AFS im Trockenwetter von Messstelle A (s. Tabelle 2) möglicherweise mit Sedimentation im Kanal zusammenhängen - wenn der Zufluss an der Messstelle aufgrund des Regens ansteigt, steigen die Konzentrationen von CSB_{gesamt} und AFS (Beispiel für ein schwaches Regenereignis mit längerer vorhergehender Trockenperiode in Abbildung 5). Für die anderen Messstellen ist die Datenlage zu schlecht, um Aussagen zu treffen.

Der Aufwand für die Messkampagne war, obwohl sie extra einfach und klein gehalten wurde, allein für die Aufstellung und Wartung der Probenehmer 30 Mann-Tage und es mußten 1200 km an Wegen zurückgelegt werden (s. Tabelle 3). Dazu addieren sich noch die Kosten für die Analyse und für die Wartung der Sonden und der Regenmesser.

Dadurch ergaben sich letztlich Kosten von deutlich über 20 000 Euro allein für die Messungen.

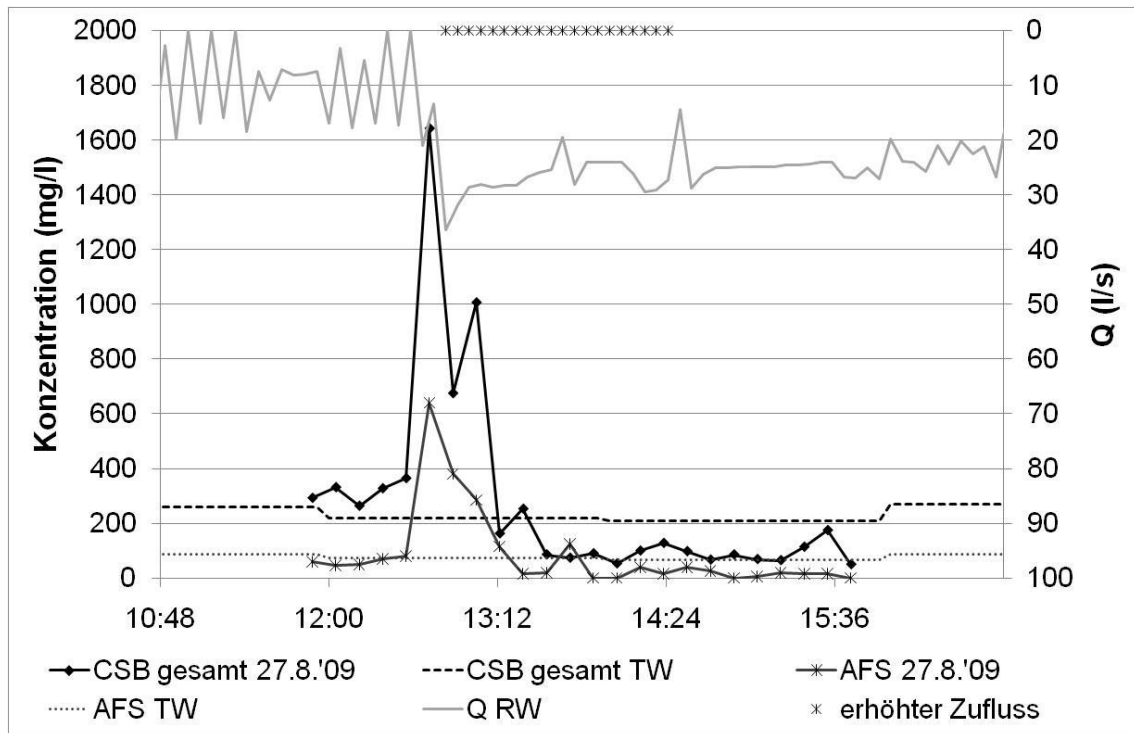


Abbildung 5: Niederschlagsereignis 27.8.2009 an Messstelle A, mit mittleren Konzentrationen im Trockenwetter (TW) und Niederschlagsanteil des Abflusses (Q RW).

Tabelle 3: Aufwand Messkampagne

| | Anzahl verwertbarer Probensätze | Arbeitsaufwand | Fahrtstrecke |
|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------|
| 24h Mischproben | 9 | 7 h/Probesatz | 170 km/Probesatz |
| Tagesganglinie | 2 | 15 h/Probesatz | 320 km/Probesatz |
| Regenereignisse | 1,5 | 24 h/Probesatz | 467 km/Probesatz |
| Gesamt | | 30 Arbeitstage | 1200 km |

4.3 Modell

Das Modell wurde in der Software CityDrain 3 (Burger et al., 2010) erstellt.

Da sich die Sensoren-Ausstattung der neun Entlastungsbauwerke stark unterscheidet, variiert auch die Datenverfügbarkeit für die Kalibrierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle. Bei fünf Bauwerken stehen zuverlässige Messungen der Entlastungsmengen zur Verfügung, mit denen vor allem die effektiv abflusswirksamen Flächen der zugehörigen Einzugsgebiete gut kalibriert werden können. Stehen nur Wasserstandsmessungen zur Verfügung, kann daraus abgeleitet werden, ob bzw. wann eine Entlastung stattgefunden hat. Dies ist bei drei Bauwerken bzw. Teileinzugsgebieten der Fall. Messungen des Drosselablaufs zur Kläranlage sind in der Regel für eine Kalibrierung nicht ausreichend. Dies trifft bei einem Entlastungsbauwerk im System zu. Hier wurde lediglich eine Verminderung der reduzierten Fläche gegenüber den Planungsunterlagen vorgenommen. Die Größenordnung dieser Verminderung wurde ähnlich wie in den anderen Teileinzugsgebieten gewählt.

Die Kalibrierung der Parameter für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung erfolgte mit den Niederschlagsdaten der vier Regenmesser und den hydraulischen Daten aus dem SCADA-System. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Entlastungsmengen gelegt.

Die Parameter der Schmutzfrachtmodelle wurden anhand der Ergebnisse der Regenwetter-Probenahme kalibriert. Die Parameter wurden dann auf benachbarte Einzugsgebiete übertragen. Für eine zuverlässigere Bestimmung der Parameter der Schmutzfrachtmodelle sollten weitere Messungen durchgeführt werden.

Die Kalibrierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle für Teileinzugsgebiete mit Messungen der Entlastungsmenge sowie der Schmutzfrachtmodelle wurde mit der GLUE-Methodik (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation; Beven, 2009) durchgeführt. Dies erlaubt gleichzeitig eine Unsicherheitsbetrachtung der Modellergebnisse.

Aufgrund der guten Ausstattung einiger Überlaufbauwerke mit Durchfluss- und Wasserstandsmessungen wurde eine neue Methode zur Ermittlung des Niederschlags in den Teileinzugsgebieten entwickelt (Leonhardt et al., 2010). Diese basiert auf einem inversen Modell des Entlastungsbauwerks und des zugehörigen Teileinzugsgebietes.

Bei vier Entlastungsbauwerken werden sowohl der Ablauf zur ARA, der Wasserstand bzw. das gespeicherte Volumen und die Entlastungsmenge durch Messungen in kleinen Zeitschritten von wenigen Minuten komplett erfasst. Durch Lösung der Massenbilanz kann so der Zufluss zum Entlastungsbauwerk des Teileinzugsgebietes, d. h. der Abfluss aus dem Einzugsgebiet, ermittelt werden. Durch Abziehen des Trockenwetterabflusses wird der Regenabfluss bestimmt. Aus letzterem kann mit Hilfe eines invers formulierten Niederschlag-Abfluss-Modells der effektive (abflusswirksame) Gebietsniederschlag berechnet werden. Dieser Niederschlag steht dann als Input für das Schmutzfrachtmodell sowie die Modelle benachbarter Teileinzugsgebiete zur Verfügung.

Diese Methode bietet den Vorteil, dass für jedes Teileinzugsgebiet, das ausreichend mit Sensoren ausgestattet ist, ein eigener Niederschlag berechnet werden kann, wodurch der räumlichen Variabilität Rechnung getragen wird. Zusätzlich gehen die Fehler der Niederschlagsmessung nicht in das Modell ein, sondern nur jene der Durchflussmessung, welche deutlich kleiner sind. Wichtig ist dabei eine möglichst genaue Abschätzung des aktuellen Trockenwetterabflusses, um den Regenabfluss zuverlässig bestimmen zu können. Die Trennung Trockenwetterabfluss – Regenabfluss erfolgt mit Hilfe einer typischen Trockenwetter-Tagesganglinie in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten. Überschreitet der gemessene Abfluss diesen Wert, wird davon ausgegangen, dass es sich um Regenabfluss handelt. Diese fixe Festlegung eines Grenzwerts zwischen Trockenwetter- und Regenabfluss führt natürlich zu kleinen Fehlern in der Abschätzung des Regenabflussvolumens. Letztere wirken sich jedoch bei großen – und somit für Entlastungen relevanten – Ereignissen nur in geringem Maße aus.

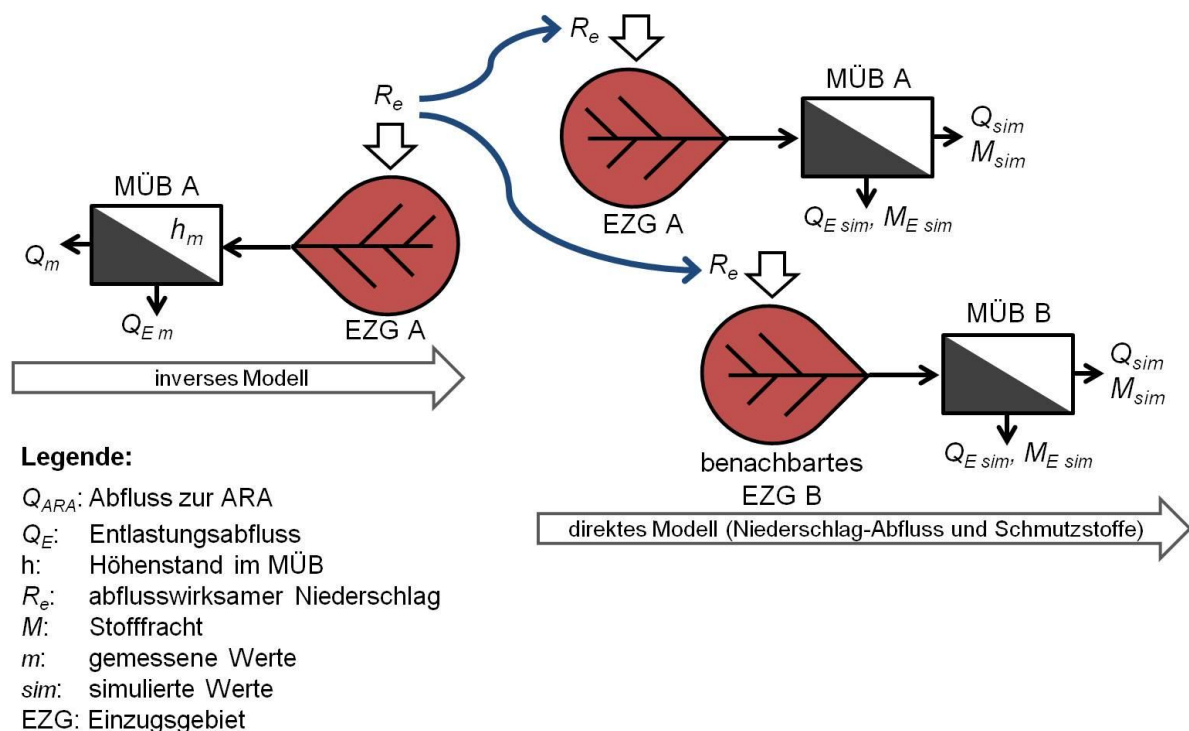


Abbildung 6: Konzept der Anwendung eines inversen Modells als Ersatz für permanente Niederschlagsmessungen. Der abflusswirksame Gebietsniederschlag als Output des inversen Modells dient als Input für das Schmutzstoffmodell und die Modelle (Niederschlag-Abfluss- und Schmutzstoffmodelle) benachbarter Teileinzugsgebiete.

Zur Ermittlung dieser Trockenwetter-Tagesganglinie wurden die Messdaten von Trockenwettertagen analysiert und eine Einteilung nach Sommer- und Winterhalbjahr sowie Arbeitstagen und Wochenenden gewählt. Für diese vier Klassen wurde jeweils aus den 85-Perzentilen der 15-Minuten-Mittelwerte aller Tage mit Trockenwetterabfluss eine Tagesganglinie erstellt.

Die Parameter für die inversen Modelle wurden aus den kalibrierten Niederschlag-Abfluss-Modellen übernommen. Niederschlagsdaten sind daher nur für die Kalibrierung, jedoch nicht für den laufenden Betrieb von SoftSen notwendig. Mit Hilfe aktueller Niederschlagsdaten ließe sich das Modell aber immer wieder neu kalibrieren.

Die inversen Modelle können derzeit für vier Teileinzugsgebiete eingesetzt werden. Für die übrigen fünf Gebiete wird jeweils der berechnete Niederschlag eines benachbarten Gebietes übernommen.

4.4 Ergebnisse

Als Ergebnis stehen grundsätzlich zu allen Mischwasserentlastungen Daten zur Verfügung, auch für jene, die nur teilweise mit Sensoren ausgestattet sind. Zusätzlich berechnet das Modell Stoffkonzentrationen in allen Teilströmen.

Mit Hilfe von SoftSen stehen diese Daten so wie jene von realen Sensoren in Echtzeit zur Verfügung. In Zukunft können sie auch über längere Zeiträume statistisch ausgewertet werden.

Die hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet können durch die Modelle gut repräsentiert werden. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 9, in der der Ablauf zur ARA sowie der Entlastungsabfluss am Mischwasserüberlaufbauwerk C für zwei Niederschlagsereignisse dargestellt sind. Zusätzlich zeigt die Abbildung auch den gemessenen Niederschlag. Die Modellergebnisse sind sowohl für ein „konventionelles“ Niederschlag-Abfluss-Modell (mit gemessenem Niederschlag als Input) als auch für die oben beschriebene Kombination aus inversem und direktem Modell dargestellt.

Ein Niederschlagsereignis am Beginn der dargestellten Regenserie war offenbar im Einzugsgebiet etwas stärker als vom Regenmesser erfasst und kann daher nur von der Kombination aus inversem und direktem Modell wiedergegeben werden. Kurzfristige Spitzen im Ablauf zur ARA, die über dem (geregelten) Drosselabfluss liegen, können beide Modelle nicht abbilden, da nur ein fixer, idealisierter Drosselabfluss implementiert ist. Die Entlastung wird im dargestellten Ereignis von den Modellen zwar überschätzt, doch zeigt eine Betrachtung längerer Zeiträume sowohl Über- als auch Unterschätzungen und im Mittel eine gute Übereinstimmung des Entlastungsvolumens (siehe Abbildung 9).

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse des Schmutzfrachtmodells für die Parameter Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), Ammonium-Stickstoff (NH_4) und abfiltrierbare Stoffe (AFS) sowie die aus den Proben bestimmten Konzentrationen. In diesem Fall konnte die Verdünnung des Trockenwetterabflusses durch den Regenabfluss gut wiedergegeben werden, die hohen AFS-Konzentrationen am Beginn des Ereignisses jedoch nicht. Wie schon erwähnt, sollten die Ergebnisse des Schmutz-

frachtmodells durch weitere Messungen überprüft bzw. weitere Kalibrierungsdaten erhoben werden. Aufgrund der viel stärkeren Abstraktion der realen Prozesse im Modell sowie der größeren Fehler bei der Messung bzw. Probenahme können jedoch keine so guten Übereinstimmungen wie bei Niederschlag-Abfluss-Modellen erwartet werden.

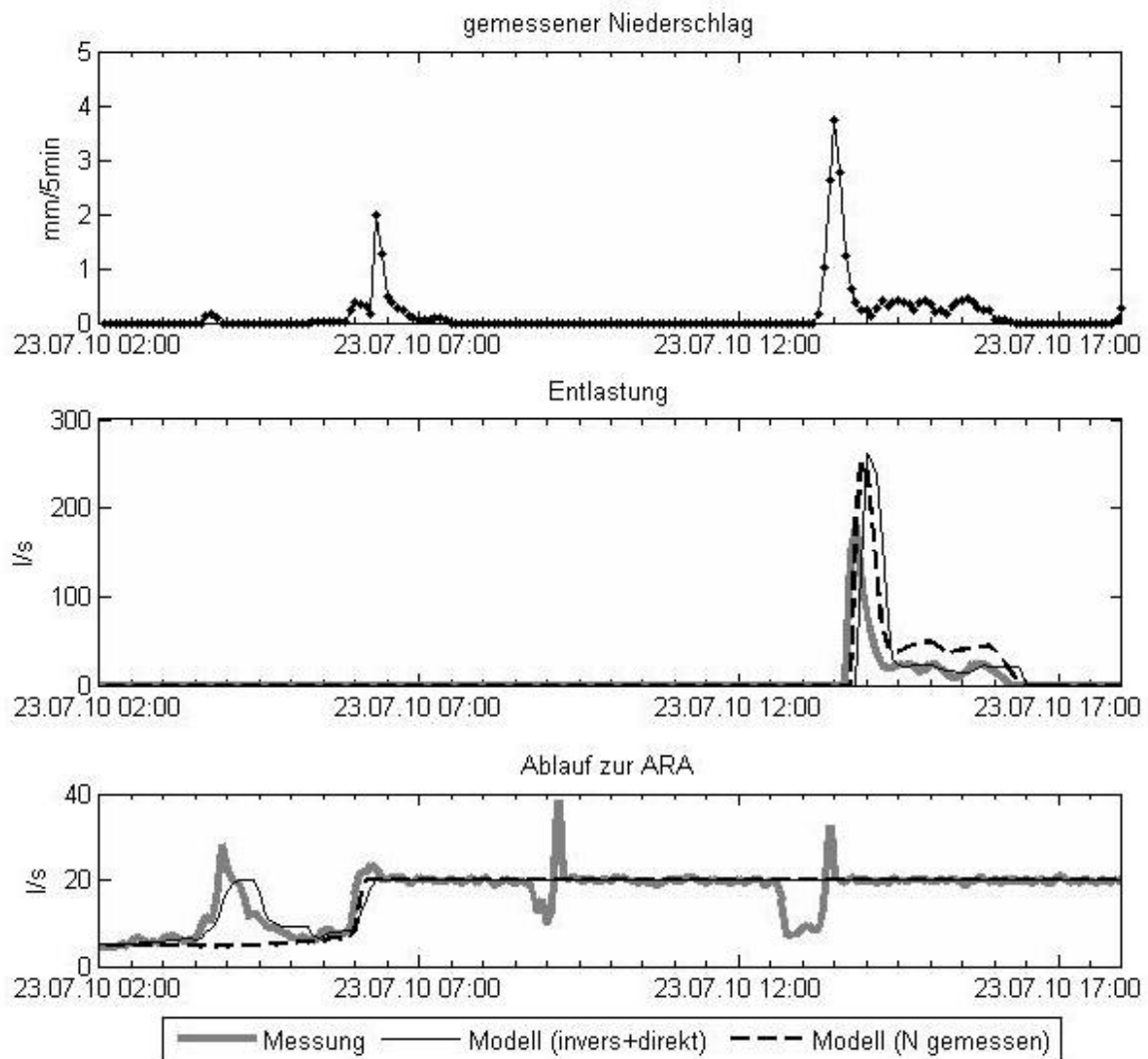


Abbildung 7: Gemessener Niederschlag sowie Modellergebnisse und Messdaten des Entlastungsabflusses sowie des Ablaufs zur ARA am Mischwasserüberlaufbauwerk C.

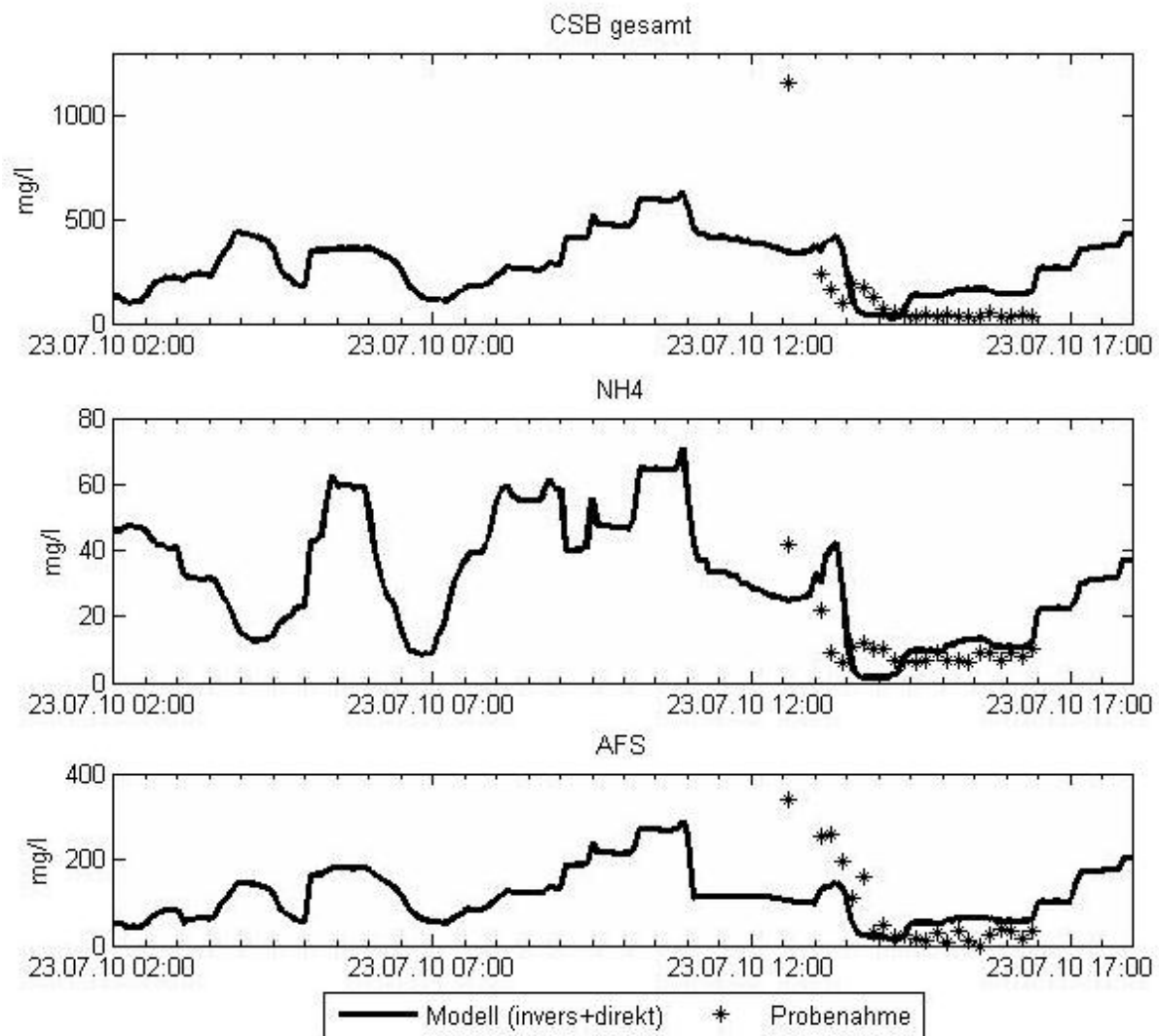


Abbildung 8: Modellergebnisse und Auswertungen der Messkampagne für das Niederschlagsereignis mit Entlastung am Mischwasserüberlaufbauwerk C.

Abbildung 9 zeigt schließlich das kumulative Entlastungsvolumen für eine Periode von 99 Tagen. Aufgrund einer Lücke in den Niederschlagsdaten konnten für 13 Tage keine Ergebnisse mit dem „konventionellen“ Niederschlag-Abfluss-Modell berechnet werden. Dies ist bei den dargestellten Messdaten und Ergebnissen des SoftSen-Modells (Kombination aus inversem und direktem Modell) berücksichtigt. Das SoftSen-Modell überschätzt zwar im Gegensatz zum „konventionellen“ Modell die gemessene Gesamtmenge um etwa 11 %, ist jedoch im größeren Teil des Zeitraums näher an der Messung als letzteres.

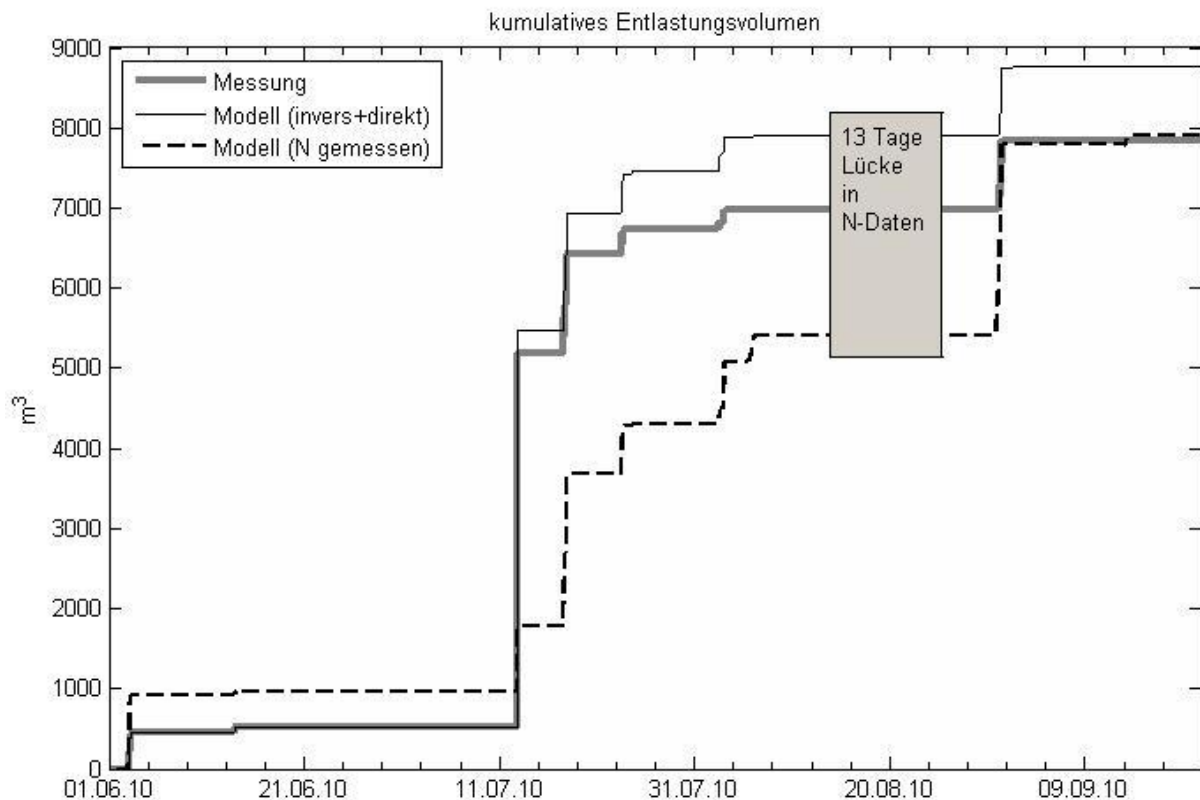


Abbildung 9: Kumulatives Entlastungsvolumen für eine Periode von 99 Tagen am Mischwasserüberlaufbauwerk C: Ergebnisse der beiden Modelle (Kombination aus inversem und direktem Modell, direktes Modell mit Niederschlag als Input) und Messdaten.

In Tabelle 4 sind für diesen Zeitraum von 99 Tagen Entlastungsmengen und mit beiden Modellen berechnete Stofffrachten zusammengestellt.

Tabelle 4: Entlastungsmengen und mit den beiden Modellen berechnete Stofffrachten für die in Abbildung 9 dargestellte Periode für das Mischwasserüberlaufbauwerk C

| | Volumen in m ³ | CSB ges. in kg | NH ₄ in kg | AFS in kg |
|--------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------|--------------|
| Messung | 7847 | - | - | - |
| SoftSen-Modell | 8766 | 352 | 46 | 140 |
| „konventionelles“ Modell | 7914 | 310 | 32 | 131 |

5 Software

Aus dem Projekt SoftSen ist eine gleichnamige Software hervorgegangen, die auf der Pilotstudienanlage installiert wurde. Die Software SoftSen wurde zum Einsatz auf Rechnern in Kontrollräumen von ARAs konzipiert. Die für die Berechnungen benötigten Daten werden online vom SCADA-System der ARA bezogen.

Die Aufgaben der Software teilen sich in zwei Bereiche. Die erste Aufgabe ist das Füllen einer Datenbank mit allen Messwerten und Berechnungsergebnissen des Messsystems der ARA und des Modells für die statistische Auswertung der Zeitreihen z. B. zur Ermittlung von Entlastungsfrachten. Durch diese Verschmelzung aus realen Messdaten und berechneten Werten ist eine Informationslage gegeben, die weit über das Anzeigen einiger weniger Messwerte hinausgeht.

Die zweite Aufgabe ist die Online-Ausgabe des aktuellen Systemgeschehens. Hierzu werden in einem Schema der Anlage die wichtigsten Daten auf einen Blick dargestellt. Im Unterschied zur Visualisierung des SCADA-Systems werden hier aber nicht nur Messdaten, sondern auch die berechneten Werte angezeigt.

Dies bietet die Möglichkeit, Fehler bzw. Störungen im Kanalsystem sehr frühzeitig zu erkennen. Durch den Vergleich von berechneten und gemessenen Daten können Abweichungen vom „Normalen“ schon im Anfangsstadium von Störungen (z. B. Blockaden im Kanalsystem) erkannt werden. Entsprechende Verfahren sind Gegenstand aktueller Forschungen.

An die Software SoftSen werden vielfältige Anforderungen gestellt. Um den Anforderungen an Geschwindigkeit und schneller Anpassbarkeit der Software Rechnung zu tragen, wurde bei der Implementierung eine Mischung der Programmiersprachen C++ und Python verwendet. Als Zielplattform wurde das auch im Kontrollraum der Fallstudienanlage verwendete Windows gewählt. Da in einer Cross-Plattform-Umgebung entwickelt wurde, ist die Software aber auch auf Unix-Derivaten wie z. B. Linux lauffähig.

auf die Daten wird ein Standardverfahren verwendet, das im Netzwerk der ARA verschiedene Systeme nutzen, um die SCADA-Daten zu lesen. Auf diese Weise wurden Störungen im Betrieb der Anlage während der Entwicklungsphase ausgeschlossen und sind damit auch im späteren Betrieb der Software sehr unwahrscheinlich.

Die Struktur von SoftSen gliedert sich in vier Funktionsbereiche (siehe Abbildung 12):

- Beziehen und Aufbereitung der Daten für die Simulation
- Durchführung der Simulation und Analyse der Ergebnisse
- Ablage aller relevanten Daten in der Datenbank
- Statistische Auswertung (Jahressummen, Durchschnittswerte, usw.) der Daten aus der Datenbank

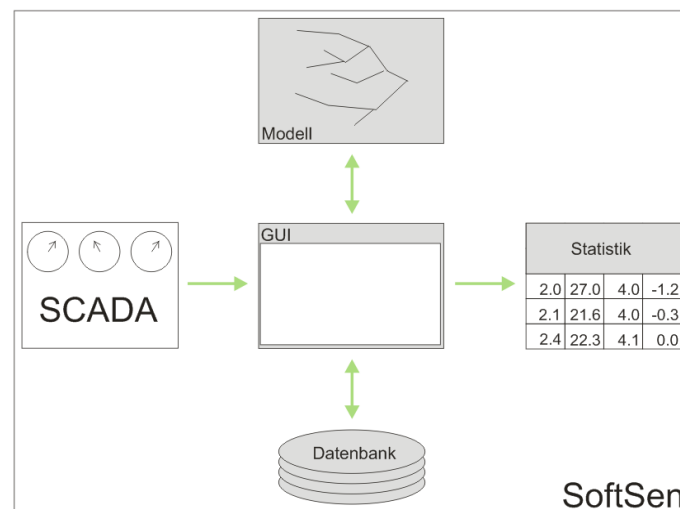


Abbildung 12: Schematischer Aufbau der Software (GUI: graphical user interface)

6 Abschätzung der Unsicherheiten des Modells

Ein wesentliches Element der Erstellung eines Modells ist die Kalibrierung. Dabei werden durch Vergleich von Messdaten und Modellergebnissen die Parameter des Modells abgeschätzt. Dies kann entweder durch einfache visuelle Vergleiche oder auch durch Einsatz

mathematischer Optimierungsfunktionen erfolgen. Ergebnis ist ein „optimaler“ Parametersatz des Modells, mit dem – für die Kalibrierungsdaten – eine weitgehende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erreicht werden soll.

In den letzten Jahren haben sich aber zunehmend komplexere Methoden der Unsicherheitsanalyse etabliert (Beven, 2009). Diese Methoden wie z. B. GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) bestimmen für die Modellparameter nicht nur die optimalen Werte, sondern darüber hinaus eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameterwerte. Dafür sind zwar nur die üblichen Kalibrierungsdaten vonnöten, jedoch sind die Auswertungen komplexer und auch numerisch aufwendiger. Sind für die Modellparameter Wahrscheinlichkeitsverteilungen bekannt, dann kann die Unsicherheit der Modellaussagen einfach bestimmt werden. Dazu sind zufällig Parameterwerte aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu bestimmen und mit diesen Werten eine Simulation durchzuführen. Wird dieser Vorgang (Simulation mit zufälligen Parameterwerten) genügend oft durchgeführt, so ergibt sich auch für die Modellergebnisse eine Wahrscheinlichkeitsverteilung – die entsprechend der Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit der Modellergebnisse ausdrückt (siehe Abbildung 13). Man bekommt also nicht nur ein spezifisches Ergebnis der Simulation (hier der Mischwasserentlastung), sondern vielmehr eine Bandbreite der wahrscheinlichen Ergebnisse (z. B. ausgedrückt über die 20 %- und 80 % Perzentilen). Rauch et al. (eingereicht) zeigen die Anwendung einer derartigen Methode für online Modelle der Siedlungsentwässerung.

Diese Methodik zur Bestimmung der Unsicherheit kann hinsichtlich eines Alarmmodells für Messfehler und Systemstörungen erweitert werden. Dazu sind aber zusätzliche Messdaten des Systemverhaltens notwendig. Liegen die Messdaten nicht mehr innerhalb der Bandbreiten der wahrscheinlichen Berechnungsergebnisse, so sind entweder die Messdaten oder Inputdaten falsch (= Messfehler) oder das Modell ist nicht mehr gültig (= Systemstörung). Eine Differenzierung dieser beiden Möglichkeiten ist nur mit weiteren Informationen möglich. Dies ist derzeit Gegenstand von Untersuchungen.

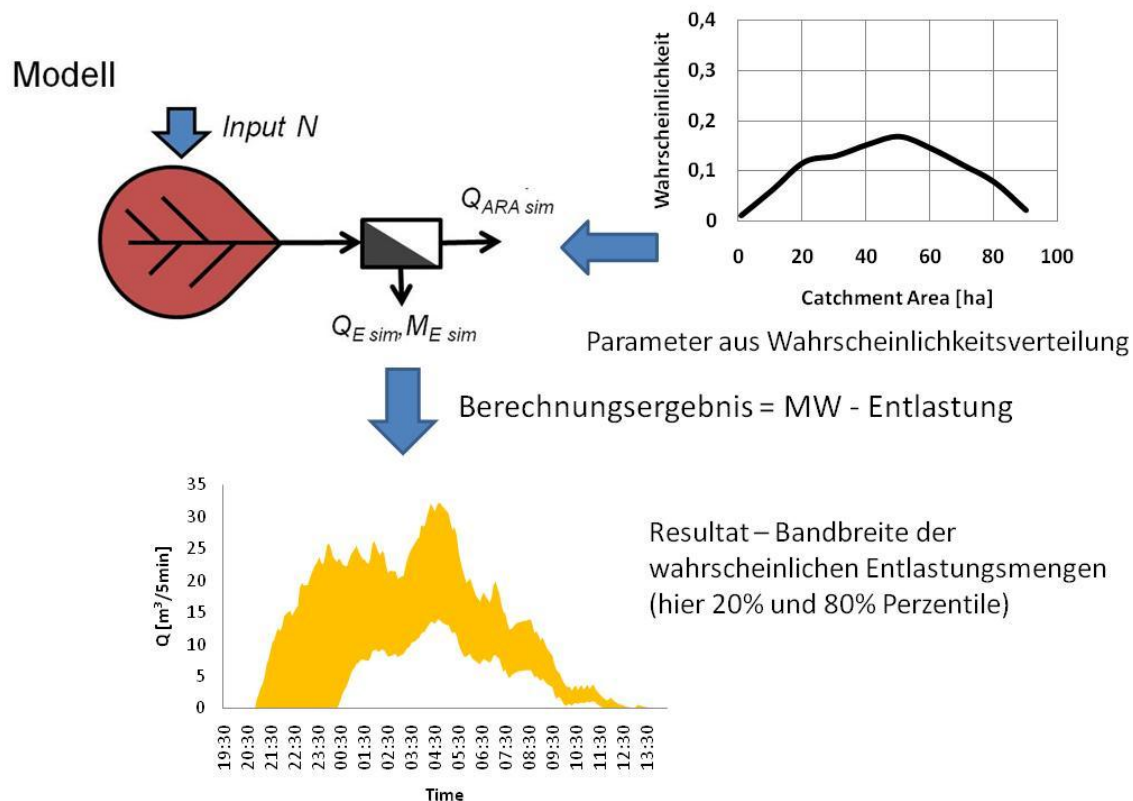


Abbildung 13: Online Simulation mit Berücksichtigung der Unsicherheiten

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ergebnis des Forschungsprojektes SoftSen ist eine Methodik und der Prototyp einer gleichnamigen Software, um mit Hilfe eines Simulationsmodells und Standardmessdaten, wie sie üblicherweise über das SCADA-System eines Kanalbetreibers zur Verfügung stehen, in Echtzeit Informationen über ereignisspezifische Mischwasserentlastungsfrachten zu generieren. Dabei werden die Standardmessdaten auch zur laufenden Kontrolle und Korrektur der Modelle herangezogen, was eine deutliche Qualitätssteigerung bedeutet. Der Prototyp wird derzeit bei einem Betreiber getestet und weiter verbessert.

Zur Erstellung und vor allem zur Kalibrierung der Simulationsmodelle ist in der Regel eine Messkampagne notwendig, um Informationen über die stoffliche Dynamik im Einzugsgebiet zu erhalten. Auf Basis dieser Ergebnisse können mit SoftSen kontinuierlich Mischwasserentlastungs-

frachten berechnet werden. Auch wenn die Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet sind, ergeben sich einige Vorteile gegenüber einer messtechnischen Erfassung der Entlastungsfrachten. Messungen oder Messkampagnen stellen immer nur Momentaufnahmen dar und sind kosten- und personalintensiv. Auch eine permanente Erfassung mit Online-Sonden ist, vor allem aus Kostengründen, nur in Ausnahmefällen umsetzbar. SoftSen stellt daher für Betreiber eine langfristig kostengünstigere Alternative dar. Darüber hinaus ist die Erstellung und Kalibrierung von Simulationsmodellen auch für andere Zwecke, wie z. B. den Nachweis nach ÖWAV-Regelblatt 19, sinnvoll oder sogar erforderlich. Außerdem ist auch der kontinuierliche Nachweis über die Leistungsfähigkeit des Systems – wie er zur Absicherung des Betreibers immer wichtiger wird – problemlos erreichbar. So ist es möglich, die Ursachen für Probleme, wie sie aus Änderung der Flächen und der Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur im Einzugsgebiet, Änderung von Restwassermengen bei der Wasserkraftnutzung, Klimawandel etc. entstehen können, zu benennen und rechtfertigen zu können.

Weitere Vorteile sind die Möglichkeiten zur frühzeitigen Erkennung von Störungen (im System oder auch bei Sensoren) oder zukünftigen Engpässen.

Daneben ist durch den Einsatz von SoftSen eine Generierung von Wissen über das System nicht nur in Planungsphasen sondern kontinuierlich gegeben, was bei der frühzeitigen Identifizierung von (zukünftigen) Engpässen sehr hilfreich ist.

Danksagung

Die Machbarkeitsstudie SOFTSEN wurde durch Fördermittel der Tiroler Zukunftsstiftung unterstützt. Die Autoren bedanken sich auch beim Abwasserverband Zirl und Umgebung für die Unterstützung und die gute Kooperation im Rahmen der Durchführung.

Hinweis

Teile dieses Textes wurden in ähnlicher Form bereits in den Wiener Mitteilungen, Band 233, Kanalmanagement 2011; ISBN 978-3-85234-116-3 abgedruckt.

8 Literatur

- Beven, K. (2009). Environmental modelling: an uncertain future? , Routledge London, ISBN 0415463025.
- Brombach, H., Weiss, G. und Fuchs, S. (2005). A new database on urban runoff pollution: comparison of separate and combined sewer systems. In: Water Science & Technology, 51(02), S. 119-128.
- Burger, G., Fach, S., Kinzel, H. und Rauch, W. (2010). Parallel computing in conceptual sewer simulations. In: Water Science and Technology, 61(2), S. 283-291.
- Butler, D. und Davies, J.W. (2004). Urban Drainage. 2. Auflage, Spon Press, London.
- EU (2000). Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Fach, S., Engelhard, C., G., L. und W., R. (2010). Erfahrungen im Rahmen einer qualitativen Messkampagne für einen Abwasserverband. In: Wiener Mitteilungen,(220), S. J1-J23.
- Fach, S., Kleidorfer, M. und Rauch, W. (2007). Anforderungen an Modelle und deren Kalibrierung. In: Forum Umwelttechnik und Wasserbau, Band 1, innsbruck university press (IUP), Innsbruck.
- Gruber, G., Sprung, W., Flamisch, N., Pressl, A. und Winkler, S. (2006). Langzeiterfahrungen mit dem Betrieb von Kanal-Online-Messstationen. In: Wiener Mitteilungen, 196, S. 1-28.
- Leonhardt, G., Fach, S., Engelhard, C., Kinzel, H. und Rauch, W. (2010). Deriving Spatially Distributed Rainfall from Flow Measurements in a Sewer System. In: 1st Austrian National Young Water Professionals Conference, Vienna, Austria.
- ÖWAV (2007). ÖWAV-Regelblatt 19, Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen.
- Rauch, W., Gujer, W. und Krebs, P. (2002). Grundlagen der Siedlungsentwässerung. Skriptum; Universität Innsbruck, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, Technische Universität Dresden.
- Rauch, W. und Kleidorfer, M. (2010). Vom Bleistift zum Prozessor: Wandel der Modelle in der Siedlungsentwässerung. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 10(3-4), S. 43 - 50.

- Rauch, W., Schöpf, M., Mair, M., Leonhardt, G. und Kleidorfer, M. (eingereicht).
Uncertainty in online predictions of urban drainage models. Für:
Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage, Porto
Allegre, Brasilien, Sept. 2011.
- Roberson, J.A., Cassidy, J.J. und Chaudhry, M.H. (1995). Hydraulic Engineering.
John Wiley Sons, Inc., New York.
- Sitzenfrei, R., Fach, S. und Rauch, W. (2008). Auswirkungen von
Vereinfachungen bei der Bestimmung von Mischwasserentlastungen, quo
vadis Polen? In: Wiener Mitteilungen, 209, S. H1 - H23.
- Statistik Austria (2001). Regionalstatistik auf der Basis von geographischen
Rastern. Daten aus der Großzählung 2001.

Korrespondenz an:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Rauch
Universität Innsbruck
Arbeitsbereich Umwelttechnik, Institut für Infrastruktur
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck
ÖSTERREICH
Tel.: +43 / (0)512 / 507 – 6920
Fax. +43 / (0)512 / 507 – 2911
E-mail: Wolfgang.Rauch@uibk.ac.at