

Unsicherheitsbetrachtung der Grundlagendaten des Einzugsgebiets „Graz-West“

Masterarbeit zum Erwerb des akademischen Titels Diplomingenieur der Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-Bauingenieurwissenschaften

Maximilian Zillig

Verfasst am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Graz

Betreuer der Masterarbeit:
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr. techn. Dr.h.c. Harald Kainz

Mitbetreuender Assistent:
DI Valentin Gamerith

Graz, Mai 2010

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Maximilian Zillig)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Valentin Gamerith und Univ.-Prof.-DDipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Harald Kainz.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Kurzfassung

Seit 2002 wird vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau mit Unterstützung der Stadt Graz eine Kanal-Online-Messstation an einem Mischwasserüberlauf am Ende des Einzugsgebiets „Graz-West“ betrieben. Dabei werden kontinuierlich hochauflösende Daten zu Abfluss und Schmutzstoffkonzentration aufgezeichnet. Weiters sind in dem Einzugsgebiet nun seit Kurzem insgesamt 3 digitale Regenmessstationen installiert. Im Rahmen einer gemeinsamen betreuten Vertiefungsarbeit an der TU Darmstadt wurde ein hydrologisches Schmutzfrachtmodell des Einzugsgebietes erstellt.

Sowohl Messdaten als auch Grundlagendaten (z.B. angeschlossene Flächen, Abflussparameter etc.) sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten können eine Vielzahl von Ursachen haben und ihre Erfassung bzw. Abschätzung ist Thema vieler aktueller wissenschaftlicher Publikationen.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, eine eingehende Literaturrecherche zum Thema Unsicherheiten durchzuführen und auf Basis von Methoden und Literaturwerten eine Abschätzung der Unsicherheiten der Mess- und Grundlagendaten für das Einzugsgebiet „Graz-West“ durchzuführen. Weiters sollen Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Modellierung dargestellt werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Unsicherheiten in den Regendaten im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte liegen. Der Vergleich der Daten aus der Simulation mit einem hydrologischen Modell zeigte, dass im Zulauf eine relativ gute Übereinstimmung vorhanden ist, für den Entlastungsabfluss aber noch deutlicher Bedarf für eine Modellkalibrierung besteht.

Die in der Arbeit dargestellten Methoden und die durchgeführten Auswertungen können zukünftig auch als Basis für detailliertere Betrachtung der Unsicherheiten in den vorhandenen Modellen – also über die Unsicherheit der Grundlagendaten hinausgehend – herangezogen werden.

Abstract

Since 2002 the Institute of Urban Water Management and Landscape Water Engineering with support of the city Graz is operating a Sewer-Online-Gauging-Station in a combined sewer overflow at the end of the "Graz West" catchment area. It will be continuously high-resolution data on runoff and contaminant concentration recorded. Three digital rain monitoring stations have been installed recently in the catchment area. Through a co-managed work recess at the Technical University Darmstadt, a hydrologic model of the watershed pollution load was created for the catchment area.

Data and basic data, like discharge parameters and connected surfaces, are subject to uncertainties. These uncertainties may have a variety of causes and their collection or assessment is the subject of many recent scientific publications.

The aim of this thesis is to conduct a thorough literature review on the subject of uncertainty and to estimate based on methods and literature data the uncertainties of the measurement and basic data for the catchment area "Graz-West". Further opportunities will be presented to account for uncertainties in modeling.

It was shown that the uncertainties in the rainfall data are in the specified values of the literature. The comparison of data from the simulation with a hydrological model showed that a relatively good match exists in relation to the inlet, but there is treatment needed to calibrate the model the discharge outlet.

In the work presented methods and the evaluations can be used as basis for more detailed consideration of the uncertainties in the existing models, in the future.

Inhaltsverzeichnis

1	VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
1.1	Überblick über die Vorgehensweise.....	2
2	GRUNDLAGEN	3
2.1	Messfehler und Messunsicherheit.....	3
2.1.1	Arten von Messfehler	4
2.1.2	Ursachen von Messfehler	6
2.2	Wichtige Statistische Begriffe.....	7
2.2.1	Messreihe	7
2.2.2	Stichprobe	7
2.2.3	Arithmetischer Mittelwert und Erwartungswert	7
2.2.4	Wahrer Wert x_w – Fehler Δx	8
2.2.5	Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts.....	8
2.2.6	Fehlergrenzen.....	9
2.2.7	Fehlerfortpflanzung.....	9
2.3	Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse.....	10
2.3.1	Wertebereich und Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter.....	10
2.3.2	Screening-Verfahren.....	11
2.3.3	Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse	11
2.3.4	Screening-Verfahren nach Morris	12
2.3.5	Unsicherheitsanalyse.....	13
2.3.6	Regressionsanalyse.....	14
2.3.7	Korrelationsanalyse	16
2.3.8	Rangkorrelation	16
2.4	Beschreibung des Einzugsgebiets.....	17
2.4.1	Simulationsmodelle des Einzugsgebiets	18
2.5	Beschreibung der Messstationen.....	19
2.5.1	Niederschlagsmessstationen	19
2.5.2	Kanal-Online-Messstation	21
2.6	Unsicherheiten in den Flächenkenngößen	24
2.6.1	Verfahren zur Ermittlung von Einzugsgebietsflächen	24
2.6.2	Ermittlung von Einzugsgebietsflächen	24

2.6.3	Unsicherheiten von Abflussbeiwerten	25
2.7	Bauwerkskenngrößen und deren Auswirkungen	25
2.8	Unsicherheiten in der Niederschlagsbelastung	26
2.8.1	Niederschlagsmessung und deren Fehler und Unsicherheiten	27
2.8.2	Regionalisierung der Niederschlagsbelastung und Dichte eines Messnetzes	28
2.9	Unsicherheiten in Abflusswerten	29
2.9.1	Mischverfahren	30
2.9.2	Volumenstrommessung	31
3	ANNAHMEN UND AUSWERTUNG NIEDERSCHLAGS-MESSUNGEN	33
3.1	Methodik.....	33
3.1.1	Auswahl der Betrachteten Ereignisse	33
3.2	Ergebnisse	34
3.2.1	Ermittlung Mittelwert und Fehler Jahresniederschlag	34
3.2.2	Systematischer Fehler Niederschlagschreiber	36
3.2.3	Ermittlung Mittelwert und Fehler Regenereignisse	38
4	ANNAHMEN UND AUSWERTUNG ABFLUSS- UND HÖHEN- STANDSMESSUNGEN.....	42
4.1	Auswertung Zulaufdaten	42
4.2	Auswertung Entlastungsdaten	44
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	47
6	TABELLEN- UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	49
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	51

1 Veranlassung und Zielsetzung

Kanäle wie auch sämtliche für die Entsorgung notwendige abwassertechnische Systeme sind die wichtigsten Bestandteile der städtischen Infrastruktur. Die anfallenden Schmutz- und Regenwässer müssen schadlos gesammelt, abtransportiert und vor der Einleitung in Oberflächengewässer dementsprechend gereinigt werden. Der Gewässerschutz wie auch der Schutz der Bevölkerung vor Krankheiten hat hierbei oberste Priorität.

Für den Abtransport der kommunalen Abwässer können Trenn- und Mischsysteme verwendet werden, die Reinigung erfolgt in Kläranlagen nach physikalischen, biologischen und chemischen Verfahren. Das gesamte System kann als Schnittstelle zwischen den natürlichen Gewässern und der städtischen Infrastruktur angesehen werden. Bei der Auslegung eines abwassertechnischen Systems stehen eine Vielzahl von Maßnahmen, wie zum Beispiel Speicherbauwerke, oder das Rückhalten von Abwässern, durch das Abkoppeln von befestigten Flächen und Versickerungen der Regenwässern zur Verfügung.

Bei jeder Neu- bzw. Umplanung ist notwendig ein Zielsystem zu generieren. Zur Findung dessen können Defizitanalyse, Analyse des Ist-Zustands und sämtliche externe Vorgaben (Regelwerke, Gesetze, Aufsichtsbehörden) den Rahmen der Planung unter der Einbeziehung der im Planungsprozess beteiligten Personen bzw. Personengruppen herangezogen werden. Die Problematik hierbei besteht darin, dass jegliche Parameter wie Niederschlag, Flächenkenngrößen, Bauwerkskenngrößen und Abflusswerte die für die Planung herangezogen werden, mit Fehlern und Unsicherheiten behaftet sind.

Vor allem bei den in den aktuellen Regelwerken geforderten modelltechnischen Nachweise in der Dimensionierung von Kanalsystemen, wie zum Beispiel der Überflutungshäufigkeiten (ÖWAV Regelblatt 11, 2009) oder die dem Nachweis von Wirkungsgraden (ÖWAV Regelblatt 19, 2007), können Unsicherheiten in den Eingangs- und Vergleichsdaten maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Eine Betrachtung der Unsicherheiten ist jedoch in den Regelwerken nicht explizit gefordert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche die Unsicherheiten der einzelnen Parameter, nach ihrer Herkunft und Klassifizierung erfasst und abgeschätzt, um im Weiteren die Erkenntnisse am Einzugsgebiet „Graz-West“ anzuwenden.

In vorangegangenen Arbeiten wurden bereits Modelle für das Einzugsgebiet entwickelt. Schneider (2007) und Fuchsberger (2009) entwickelten ein hydrologisches Modell in der Software SMUSI (Muschalla, 2006) . Veit (2009) erstellte ein hydrodynamisches Modell in der Software SWMM (Rossmann, 2007).

Um die Modelle an die vorhandenen Messdaten angleichen zu können, wurden die vorhanden Flächenkenngrößen und Bauwerkskenngrößen variiert, und die simulierten Ergebnisse den vorhandenen Messdaten angenähert („Kalibrierung des Modells“). Diese Variation der beiden Kenngrößen kann als Unsicherheit in der Modellierung angesehen werden, gibt jedoch keinen Aufschluss darüber, in wie weit die Unsicherheiten der Niederschlagsmessung und der Abflussmessung abgedeckt werden, oder Erhöhungen notwendig sind.

Das Ziel der Arbeit war es, einen Überblick und Zusammenfassung für die Betrachtung von Unsicherheiten in Mess- und Grundlagendaten zu schaffen. Am Beispiel der vorhandenen Messdaten des Einzugsgebiets „Graz West“ sollen auf Basis der Niederschlags- und Abflussdaten exemplarisch mögliche Unsicherheitsbandbreiten dargestellt und deren möglichen Auswirkungen diskutiert werden.

Dabei soll auch verdeutlicht werden, dass selbst bei einer hervorragenden Datenlage die in den Berechnungen zu erwartenden Resultate sinnvollerweise mit einer Unsicherheitsbandbreite angegeben werden sollten.

1.1 Überblick über die Vorgehensweise

Im Zuge diese Arbeit wird eine detaillierte Literaturrecherche über Fehler und Unsicherheiten von Messdaten durchgeführt, mit dem Ziel einen Überblick zu geben, welche Arten von Fehlern und Unsicherheiten auftreten können und worin ihre Ursachen liegen.

Das erste Kapitel beinhalten eine allgemeine Übersicht, wie Fehler und Unsicherheiten beschrieben werden, und eine Erklärung der statistischen Begriffe die zur Definition dieser notwendig sind. Weiters gibt es eine Beschreibung der verschiedenen Methoden, die zur Ermittlung der Abweichungen zur Verfügung stehen, und wie diese angewendet werden.

Der nächste Arbeitsschritt befasst sich mit dem Einzugsgebiet „Graz West“ und den dort installierten Messeinrichtungen, beschreibt nach welchen Prinzipien die Messstationen arbeiten und in welcher Form die Daten aufgezeichnet werden. Im Anschluss werden die verschiedenen Eingangsparameter – die auch in der Modellierung verwendet werden - beschrieben, ihre möglichen Fehler und Unsicherheiten aufgezeigt, und dargestellt, in welcher Größenordnung diese laut Literatur zu erwarten sind. Danach wird die Auswertung der Messdaten zu Niederschlag und Abfluss aus dem Einzugsgebiet umgesetzt, grafisch dargestellt, die Ergebnisse zusammengefasst und mit Werten der Literatur verglichen. Abschließend wird ein Ausblick über die Möglichkeiten der Weiterverarbeitung der ermittelten Daten gegeben.

Zusammenfassend zeigt die folgende Auflistung die bearbeiteten Themen, die im Zuge der Literaturrecherche erarbeitet wurde, und für die Auswertung der Daten notwendig waren:

- Allgemeine Beschreibung von Messfehlern und Messunsicherheiten
- Überblick über wichtige statistische Begriffe
- Methoden zur Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse
- Beschreibung des Einzugsgebiets, der Messtation und der vorhandenen Daten
- Detailliertere Betrachtung, welche Unsicherheiten nach Literaturwerten für die Niederschlags- und Abflussdaten aus dem Einzugsgebiet zu erwarten sind

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen beschrieben, die aufgrund einer eingehenden Literaturrecherche als Ausgangsbasis dieser Arbeit herangezogen wurden. Eine detaillierte Beschreibung und Definition der Arten von Messfehlern und Messunsicherheiten ist hierfür Voraussetzung. Des Weiteren wird darauf eingegangen welche Verfahren im Vorfeld durchgeführt werden können, um die Entscheidungsfindung für alle Beteiligten zu erleichtern und die Ergebnisse des Zielsystems eingrenzen zu können. Es wird gezeigt welche Möglichkeiten und Verfahren für die einzelnen Eingangsparameter zur Verfügung stehen, um die Auswirkung dieser auf das Zielsystem abbilden zu können.

Die Eingangsparameter die im Allgemeinen im Zuge einer Planung zur Verfügung stehen sind Flächenkenngößen und Bauwerkskenngößen. Niederschlagsmessungen und Messungen im Kanalsystem (Höhenstands- und/oder Abflussmessungen) werden für die Nachweise nach den neuen Regelwerken gefordert bzw. benötigt, sind aber oft nicht oder in nur unzureichender Form verfügbar.

2.1 Messfehler und Messunsicherheit

Der Umgang mit verschiedenen Messgeräten ist in der heutigen Zeit unumgänglich, jedoch ist nur in den seltensten Fällen eine physikalische Messung frei von Abweichungen vom „wahren“ Wert. Diese Abweichungen finden ihren Ursprung meistens in der Unvollkommenheit der Messgeräte und dem Umgang mit ihnen. Somit steht die Minimierung dieser Abweichung an oberster Stelle. Die Wahl des passenden Messgerätes für eine Messreihe hat bereits großen Einfluss auf die Ergebnisse. So sind Digitale-Instrumente in der Regel für schnell veränderliche Größen ungeeignet, oder Analog-Instrumente nur beliebig genau ablesbar.

Neben der Genauigkeit der verwendeten Messgeräte spielt aber auch deren Einfluss auf den gemessenen Vorgang eine Rolle. So kann das Messinstrument z.B. als zusätzlicher „Verbraucher“ elektrischer Energie auftreten, sein Einfluss muss dann rechnerische eliminiert werden, was weitere Ungenauigkeiten nach sich ziehen kann. Eine Messung bedeutet immer einen Energie-(Informations) fluss vom Messobjekt zum Messgerät (Reichert H., 2004).

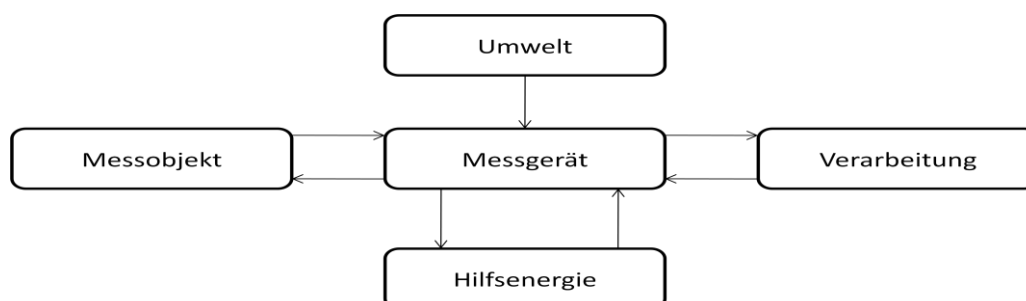


Abbildung 2-1 Beeinflussende Komponenten (Reichert H., 2004)

Rückwirkung auf das Messobjekt können z.B. durch:

- Belastung bei Strom/Spannungsmessung
- Thermische Störung bei Temperaturbelastung

entstehen.

Umwelteinflüsse können z.B. sein:

- Fremdfelder
- Temperatur
- Feuchte

2.1.1 Arten von Messfehler

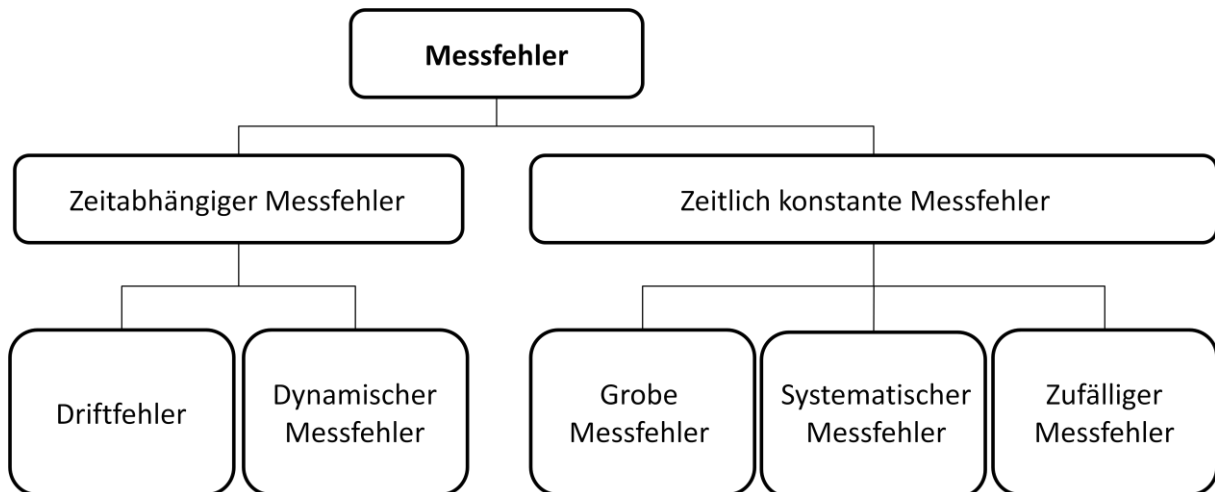


Abbildung 2-2 Arten von Messfehler (Reichert H., 2004)

Wie in der Abbildung 2-2 ersichtlich unterteilen sich Messfehler in zeitlich abhängige und in zeitlich konstante Messfehler, in den folgenden Abschnitten werden nur die drei Komponenten der zeitlich konstante Messfehler, wie in Abbildung 2-3 dargestellt betrachtet.

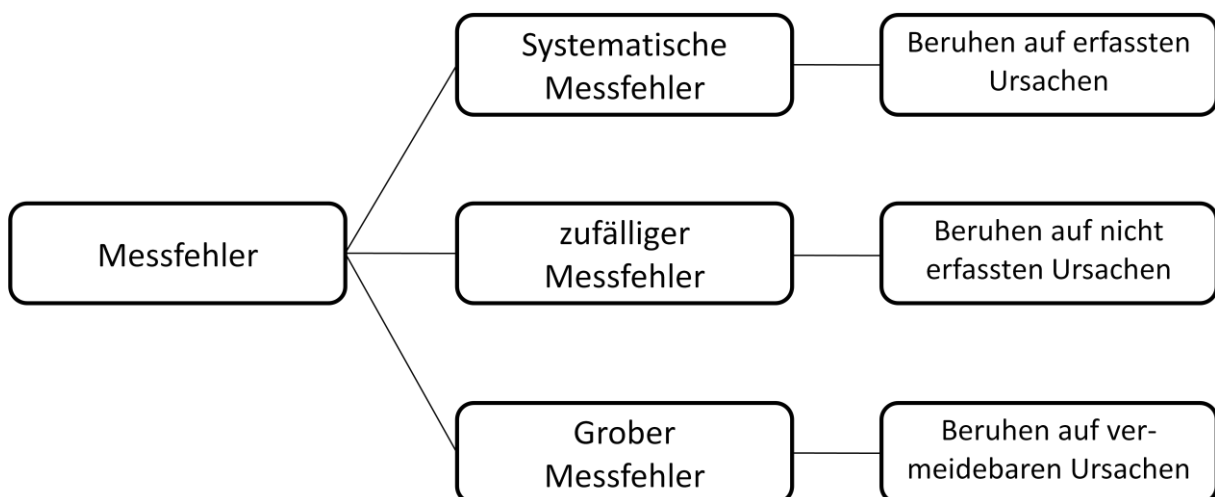


Abbildung 2-3 zeitlich konstante Messfehler (Reichert H., 2004)

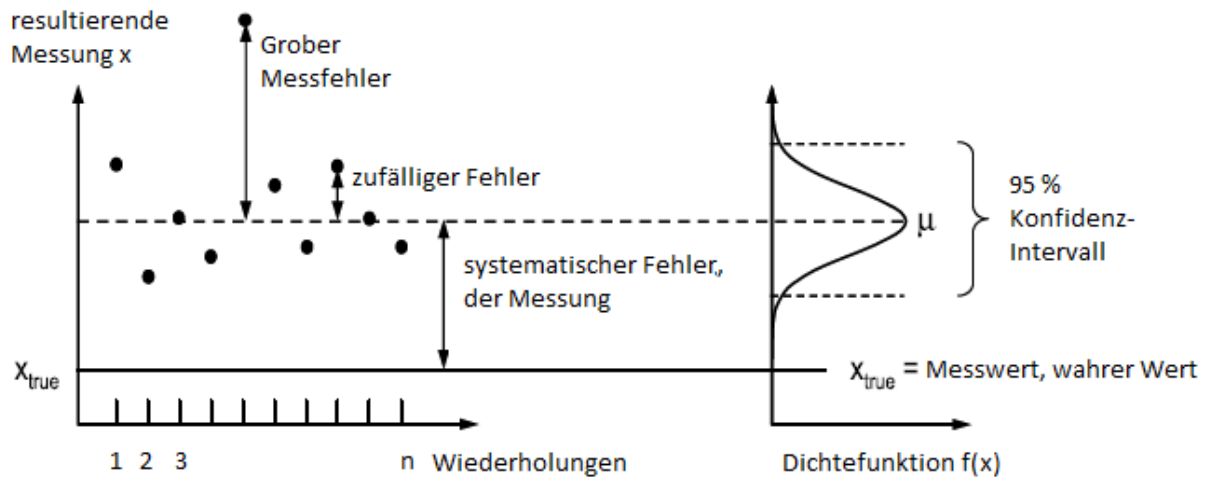


Abbildung 2-4 Übersicht der Fehlerarten aus Gujer, W. (2008, nach Thomann (2002)), modifiziert

2.1.1.1 Grobe Messfehler

Unter groben Messfehlern versteht man die bei der Bedienung und Ablesung von Messgeräten auftretenden Fehlüberlegungen, Irrtümer oder Missverständnisse, die bei der Protokollierung der Messdaten, durch Rechen- und Vorzeichenfehler, oder Programmierfehler in den Auswertungsprogrammen und dergleichen entstehen.

Grobe Messfehler sind keine eigentlichen Messfehler, weil sie meistens durch den Messenden verursacht werden und grundsätzlich durch sorgfältiges und aufmerksames Arbeiten (z.B. systematische und tabellarische Dokumentation, Messwert und Nebenrechnungen trennen, Plausibilitäts-Kontrolle beim Messen, grafische Darstellung) vermieden werden können.

Grobe Fehler sind daran zu erkennen, dass in der Messtabelle oder in der graphischen Darstellung einer der Messwerte eine sehr große Abweichung von den übrigen Messwerten aufweist. Messwerte, die einen groben Fehler aufweisen, können aus dem Messprotokoll gestrichen werden, da sie eine Ausnahmeerscheinung darstellen und prinzipiell vermeidbar sind. Mit Hilfe mathematischer Berechnungen lassen sie sich nicht beseitigen.

2.1.1.2 Systematische Messfehler

Um systematische Fehler handelt es sich, wenn die aufgezeichneten Messdaten immer in eine Richtung vom „wahren“ Wert abweichen. Sie können durch mehrmaliges Messen weder entdeckt noch verringert werden und bewirken somit ein systematisches Abweichen in der Tendenz eines zu hohen oder zu niedrigen Messwertes, d.h. sie besitzen ein Vorzeichen.

Eine Verringerung von systematischen Fehlern kann nur durch das Verwenden besserer Messgeräte oder Änderung des Messverfahrens erzielt werden. Systematische Fehler können auch aus einer falschen Kalibrierung des Messgeräts resultieren und z.B. über Referenzmessungen bestimmt werden.

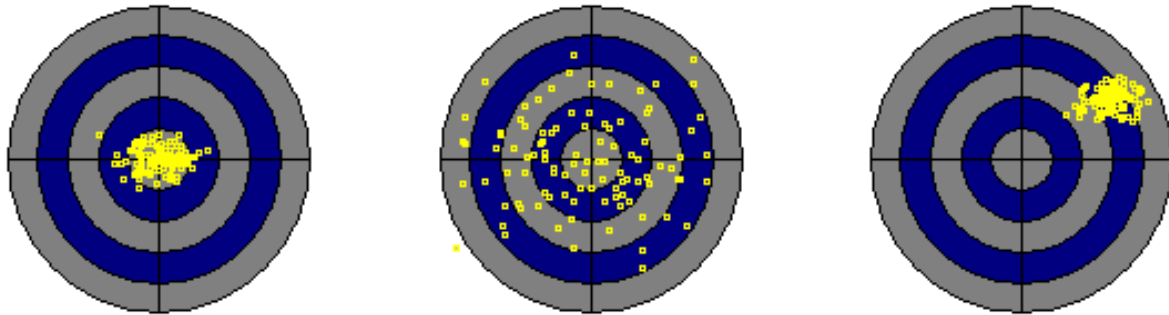


Abbildung 2-5 Systematischer Fehler (www.statistics4u.info, 2008)

In Abbildung 2.4 zeigt die linke Scheibe eine hohe Richtigkeit mit hoher Präzision, die Mittlere zeigt hohe Richtigkeit mit geringer Präzision und die Rechte geringe Richtigkeit mit hoher Präzision. Hier tritt ganz offensichtlich ein systematischer Fehler auf (www.statistics4u.info, 2008).

2.1.1.3 Zufällige Messfehler

Als Zufällige Messfehler bezeichnet man in der Statistik die Streuung der Einzelmessungen neben der erklärten Abweichung (Systematischer Fehler), die aus dem angenommenen Modell heraus zu erklären ist. Im Allgemeinen darf unterstellt werden, dass der aktuelle Wert des zufälligen Fehlers durch Überlagerung mehrerer oder auch vieler in etwa gleichgroßer Störungen erzeugt worden ist. Nach Aussage des Zentralen Grenzwertsatzes der Statistik dürfen die zufälligen Fehler zumindest approximativ als normalverteilt betrachtet werden. Ändern sich die Kenndaten der so postulierten Normalverteilung während des Aufzeichnens der Einzelmessungen nicht, so arbeitet die Messapparatur im Sinne der Terminologie der Statistik stationär (woerterbuch.babylon.com, 2009).

Durch spezielle Rechenverfahren besteht die Möglichkeit zufällige Fehler abzuschätzen, je höher die Anzahl der Messungen ist, desto präziser kann die Abweichung ermittelt werden.

2.1.1.4 Statistische Fehler

Als statistischen Fehler bezeichnet man eine regelmäßige Abweichung des Messwertes vom „wahren“ Messwert mit gleich großer Tendenz nach oben und unten, sie können daher durch wiederholte Messungen (Messreihe) beeinflusst werden. Die Aussagekraft einer einzelnen wissenschaftlichen Messung ist somit aus statistischer Sicht ohne Angabe ihrer Unsicherheit völlig wertlos.

2.1.2 Ursachen von Messfehler

Abbildung 2-6 zeigt eine übersichtliche Darstellung der verschiedenen Fehlerarten, auf welchen Ursachen diese basieren und wie mit ihnen umgegangen wird. Die Fehlerquellen können auf vermeidbare, erfasste und nicht erfasste Ursachen zurückgeführt werden. Treten grobe und grundsätzlich vermeidbare Messfehler auf, können diese eliminiert werden, und sind dadurch im Messergebnis nicht mehr enthalten. Bestimmbare systematische Fehler werden korrigiert und scheinen im Endergebnis nicht mehr auf. Nicht bestimmbar Fehler können systematischer und zufälliger Art sein, sind nicht korrigierbar und müssen daher als Messunsicherheit dem Messergebnis angehängt werden.

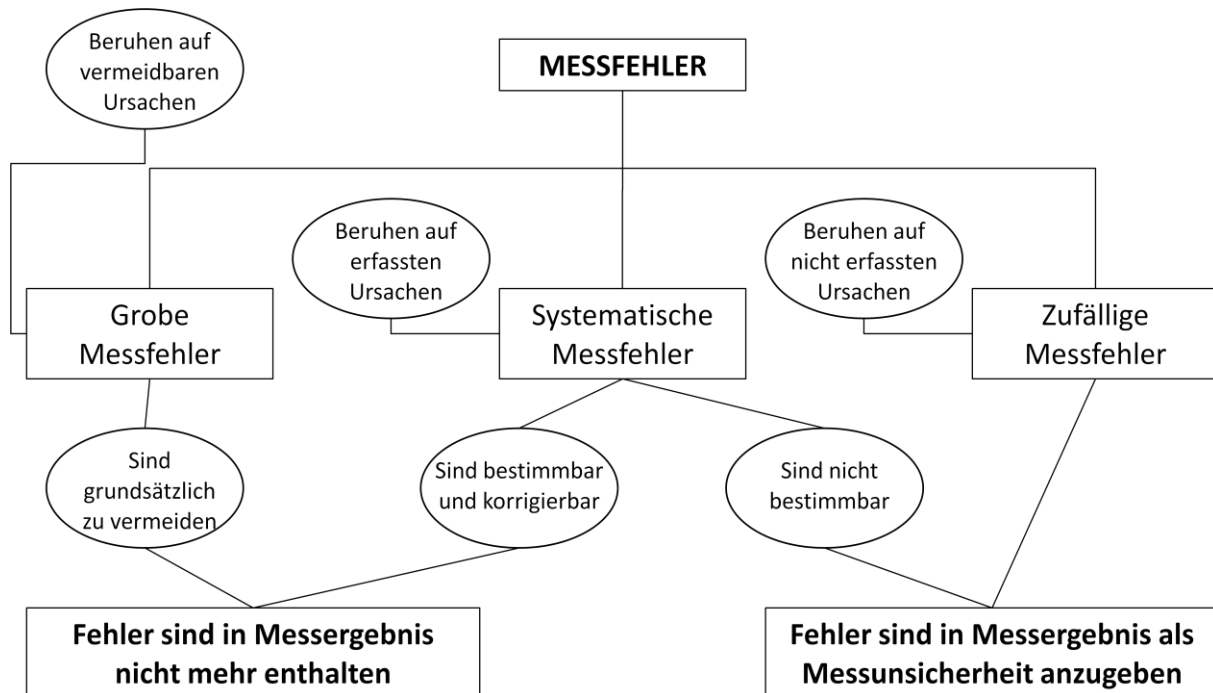


Abbildung 2-6 Ursachen von Messfehlern (Reichert H., 2004)

2.2 Wichtige Statistische Begriffe

2.2.1 Messreihe

Definition einer Messreihe:

Bei einer Messreihe wird die selbe Messung unter möglichst identischen Randbedingungen n -mal wiederholt (Reichert H., 2004).

Durchführen einer Messreihe reduziert also die statistischen Fehler. Es muss aber genau darauf geachtet werden, dass es sich tatsächlich um eine Messreihe handelt (Reichert H., 2004).

2.2.2 Stichprobe

Die erhaltenen Messresultate sind eine Stichprobe aus der Menge aller möglichen Messresultate. Jede Stichprobe hat eine gewisse, noch zu berechnende Wahrscheinlichkeit, dass sie die Grundgesamtheit repräsentiert. Stichproben werden üblicherweise als Histogramme dargestellt. Die gemessenen Daten x werden in Klassen eingeteilt (Reichert H., 2004).

2.2.3 Arithmetischer Mittelwert und Erwartungswert

Bei den Daten einer Messreihe nach obiger Definition werden die einzelnen Messwerte X_i aufgrund des statistischen Fehlers von einander abweichen. Die Messwerte streuen um ihren Mittelwert \bar{x} , der sich mit wachsender Zahl n der Messungen dem wahren Wert x_e (dem Erwartungswert der Messgröße) nähert (Reichert H., 2004).

Das arithmetische Mittel ist die einfachste Art der Mittelung, und sollte nur verwendet werden wenn keine gesonderte Gewichtung der Abweichungen benötigt wird.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Gleichung 2-1

2.2.4 Wahrer Wert x_w – Fehler Δx

Der Mittelwert \bar{x} einer Messreihe gilt als wahrer Wert x_w . Die Differenz von Messwert x und dem wahren Wert x_w ergibt den dazugehörigen Fehler Δx .

$$\Delta x = x - x_w$$

Gleichung 2-2

Der tatsächlich gemessene Messwert soll natürlich so gut wie möglich dem wahren Wert nahe kommen. Prinzipiell kennt man aber den wahren Wert nicht. Das Messergebnis wird deshalb unsicher sein (Reichert H., 2004).

Nur in den seltensten Fällen entspricht der arithmetische Mittelwert dem wahren Wert, daher ist es sinnvoll die zufällige Abweichung Δx_i des Mittelwertes von jedem einzelnen Messwert zu bilden.

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}; i = 1, 2, \dots, n$$

Gleichung 2-3

2.2.5 Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts

Die Genauigkeit einer Messung ist durch ihren zufälligen Fehler nicht eindeutig zu beurteilen, da es zu keiner Gewichtung der Fehler kommt. Aus statistischen Überlegungen kann hierfür die Standardabweichung, das Quadrat der mittleren Fehler, herangezogen werden, da hier durch die Quadrierung weiter entfernte Punkte deutlich stärker gewichtet werden, als nähere. Zusätzlich können sich Fehler wegen ihrer betragsmäßigen Addierung nicht aufheben.

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{n-1} (\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots + \Delta x_n^2)}$$

Gleichung 2-4

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Gleichung 2-5

Der Faktor $n-1$ bewirkt, dass bei einer Messreihe bestehend aus nur einer Messung ($n=1$) die Fehlerberechnung keinen Sinn macht (Reichert H., 2004).

Es sei zu erwähnen, dass der arithmetische Mittelwert wie auch die Standardabweichung immer mit der gleichen Anzahl an Komastellen angegeben werden müssen. Die Standardabweichung kann ebenso als mittlerer oder absoluter Fehler bezeichnet werden, muss jedoch immer in Relation zum Mittelwert angesehen werden, somit gibt erst der Quotient $\frac{\Delta x}{\bar{x}}$ aus dem absoluten Fehler und dem arithmetischem Mittelwert eine tatsächlich Güteangabe über die Messung. Dieser sogenannte relative Fehler kann ebenso prozentuell als prozentualer Fehler angegeben werden.

Somit bleibt noch die Unsicherheit des Mittelwertes abzuschätzen. Es lässt sich zeigen, dass die Unsicherheit der Zielgröße (also des Mittelwertes) erhalten wird indem man die Standardabweichung σ_{n-1} durch \sqrt{n} dividiert. Die Resultierende Größe nennt man Standardabweichung des Mittelwertes m .

$$m = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Unsicherheit der Standardabweichung s_m

$$s_m = \frac{\Delta x}{\sqrt{n}} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

Um eine Messreihe eindeutig darstellen zu können, müssen neben dem arithmetischen Mittelwert und der Standardabweichung (statistischer Fehler m) der systematischen Fehler u addiert werden.

$$\Delta x = m + u \quad \text{Gleichung 2-8}$$

Nach Ermittlung des arithmetischen Mittelwertes und des Gesamtfehlers kann eine Messreihe wie folgend dargestellt werden.

$$x = \bar{x} \pm \Delta x \quad \text{Gleichung 2-9}$$

2.2.6 Fehlergrenzen

Die Fehlergrenzen kommen in der praktischen Messtechnik vor und kennzeichnen die vereinbarten oder garantierten zugelassenen äussersten Abweichungen nach oben oder unten von dem Wert, der eigentlich angezeigt werden soll. Garantiert der Hersteller eines Messgerätes, dass die Fehler der mit dem Messgerät unter festgelegten Bedingungen ermittelten Messwerte innerhalb vorgeschriebener Grenzen liegen, so heißen diese garantierten Grenzen die Garantiefehlergrenzen des Messgerätes.

Die Eichfehlergrenzen eines Messgerätes bezeichnen die grössten Abweichungen der Anzeige vom richtigen Wert, die nach der Eichordnung – beim Vergleich mit einem Normal – noch zulässig sind (Reichert H., 2004).

2.2.7 Fehlerfortpflanzung

In vielen Fällen ist es notwendig mehrere mit Fehlern behaftete Messgrößen zu kombinieren. Es wird zwischen Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division und Potenzierung unterschieden. Als Beispiel hierfür wäre die Abflussmessung angeführt: der Abfluss ergibt sich aus der Kontinuitätsgleichung. Höhenstandsmessung, Geschwindigkeitsmessung, Breite und ihre Fehler werden hier multipliziert, somit pflanzen sich die Fehler aus den Messungen fort.

Alle Abweichungen aller beteiligten Größen tragen voll zur Gesamtabweichung bei und beeinflussen sich nicht gegenseitig (Reichert H., 2004).

Haben die einzelnen Messgrößen x_1, x_2 bis x_n die Fehler dx_1, dx_2 bis dx_n und entsteht das Messergebnis y nach der Funktion $y=F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, so kann der Fehler dy des Messergebnisses durch ein totales Differential ausgedrückt werden (Reichert H., 2004).

- | | |
|-------------------------------|--|
| • Addition und Subtraktion | Addierung der absoluten Fehler |
| • Multiplikation und Division | Addierung der relativen Fehler |
| • Potenzierung | Multiplikation des Exponenten mit dem relativen Fehler |

2.3 Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden wird ein aus der Literatur zusammengestellter Überblick über verschiedene Methoden der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse gegeben. Die vorgestellten Methoden können in Folge mit den bestehenden Modellen zur Anwendung gebracht werden. Dies war nicht Zielsetzung im Rahmen dieser Diplomarbeit.

2.3.1 Wertebereich und Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter

Da Wahrscheinlichkeiten und Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter oft objektiv nicht feststellbar sind, müssen sie begründet hergeleitet werden. Werden im Rahmen von Sensitivitätsuntersuchungen stichprobenbasierte Verfahren (z.B. Monte-Carlo-Simulation) eingesetzt, ist die Festlegung eines Wertebereichs und der zugehörigen Verteilungsfunktion der Eingangsparameter obligatorisch. Dabei ist ebenso wie für die Maßnahmen gegebenenfalls eine Vorauswahl der zu untersuchenden Eingangsparameter zu überprüfen, um den weiteren Rechenaufwand zu minimieren. In vielen Anwendungsfällen wird die Quantifizierung einer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht vorgenommen und Erwartungen über unsicher Daten oder Ergebnisse allenfalls in verbaler Form ausgedrückt (Hoppe H.,2006). Dieser Umstand erzeugt meistens Unklarheit und keine ausreichend genaue Definition, wird von den beteiligten Personen verschieden verstanden bzw. wahrgenommen, und ist daher für eine Entscheidungsfindung ungeeignet. Die Angabe von quantitativen Wahrscheinlichkeiten ist der verbalen Beurteilung vorzuziehen, da diese eindeutig und nachvollziehbar sind, und von jedem gleich verstanden werden.

Die Festlegung eines Wertebereichs und einer Verteilungsfunktion für die Eingangsparameter hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und die daraus folgenden Planungsentscheidungen (Hoppe H.,2006). Die Festlegung des Wertebereichs ist in vielen Anwendungen im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Zielgrößen von größerer Bedeutung als die der Verteilungsfunktion (Saltelli et al., 2000). Grundlagen für die Festlegung von Wertebereichen und Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter von Modellen und von Nachweisverfahren im Rahmen abwassertechnischer Planungen sollten Erfahrungen von Experten, Auswertungen von Literaturangaben oder Messungen im Planungsgebiet bilden (Hoppe H.,2006).

Mögliche Verteilungsfunktionen für die Definition von Unsicherheiten in Eingangsparametern können:

- Gleichverteilung,
- Dreiecksverteilung,
- Normal-und log-Normalverteilung und
- Exponentialverteilung sein.

Möglichen Verfahren zur Bestimmung der Parametervektoren aus den Verteilungsfunktionen der Eingangsparameter sind z.B. (nach Reichert, 2009):

- Random-Sampling,
- Stratified- oder Grid Sampling
- Latin-Hypercube-Sampling
- Hammersley-Sampling

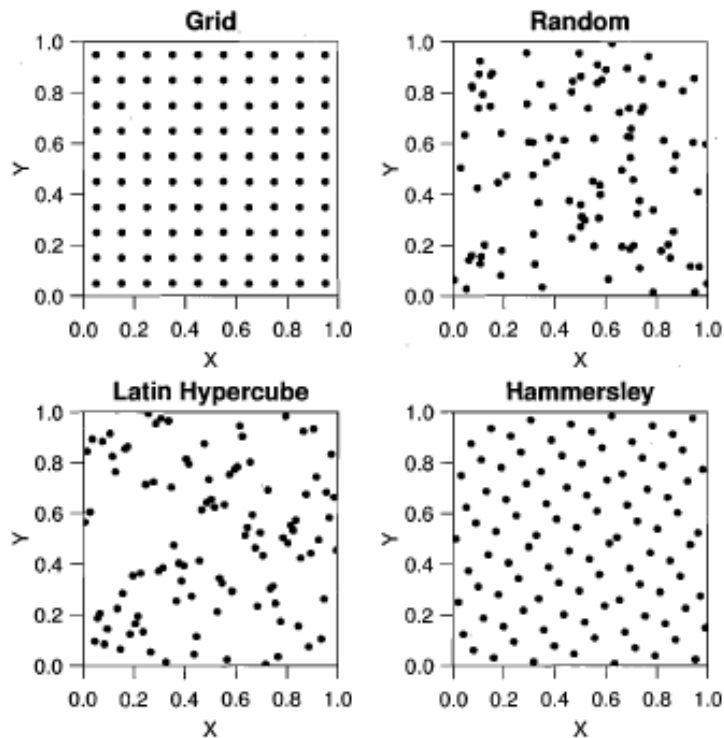


Abbildung 2-7 Verfahren zur Bestimmung der Parametervektoren aus den Verteilungsfunktionen (Reichert P., 2009)

2.3.2 Screening-Verfahren

Sind die Unsicherheitsbereiche der einzelnen Eingangsparameter zu Beginn einer Untersuchung bekannt, nicht aber ihr Einfluss, können mit Hilfe von Screening-Verfahren qualitative Kennwerte zur Einordnung der Eingangsparameter ermittelt werden. Diese ermöglichen ein Ranking der Eingangsparameter im Hinblick auf den Einfluss auf eine Zielvariable. Sie stellen jedoch kein quantitatives Maß dar, das einen direkten Vergleich der Eingangsparameter untereinander ermöglichen würde (Hoppe H., 2006).

Die einfachste Form eines Screening-Verfahrens entsteht durch die Variation eines einzelnen Eingangsparameters. Die gewonnenen Ergebnisse erlauben es nicht auf andere Parameter zu schließen. Das Verfahren muss über die gesamte Bandbreite für jeden Eingangsparameter separat durchgeführt werden, und ermöglicht keine Rückschlüsse untereinander. Screening-Verfahren, die diesen Nachteil nicht aufweisen, sind z.B. das "Morris OAT-Design" (Morris, 1991) und das von Cotter (1979) vorgeschlagene Screening-Verfahren.

Die Problematik der Screening-Verfahren ist ihr hoher Rechenaufwand und das Problem der Kompatibilität der einzelnen Berechnungsverfahren, wobei hier das Verfahren von Morris positiv hervorgehoben werden muss, welches daher in der Praxis die häufigste Anwendung findet.

2.3.3 Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

Die ermittelten Ergebnisse aus dem Screening-Verfahren, geben Aufschluss über die Empfindlichkeit der Zielvariablen oder Zielfunktion auf den Eingangsparameter, und werden in der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse weiter verarbeitet. Sensitivere Parameter

werden einer detaillierteren Untersuchung unterzogen. Der Ablauf der Unsicherheitsanalyse kann nach Hoppe (2006) wie folgt unterteilt werden:

- Entwicklung einer Eingangsmatrix
- Auswertung des Modells
- Aufzeigen des Einflusses der einzelnen Eingangsparemeter auf die Verteilung der Zielvariablen
- Ermittlung der Unsicherheit der Zielvariablen durch Ermittlung des Mittelwerts, der Standardabweichung oder der Varianz

In der darauffolgenden Sensitivitätsanalyse wird der Effekt der Unsicherheiten der Eingangsparemeter quantifiziert und durch grafische Methoden dargestellt. Detaillierte quantitative Untersuchungen der Zusammenhänge der Eingangsparemeter und der Zielvariablen sind nach Hoppe (2006) mit Methoden

- der Regressionsanalyse,
- der (schrittweisen) Korrelations- und partiellen Korrelationsanalyse und
- durch Rangtransformationen

durchführbar.

2.3.4 Screening-Verfahren nach Morris

Das Screening-Verfahren nach Morris (Morris, 1991) ist ein globales "one-factor-a-time"-Experiment (OAT-Experiment), mit dem Ziel, Eingangsparemeter zu identifizieren, die einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Verteilung der zu untersuchenden Zielvariablen (Y) haben, und hinsichtlich ihrer Verteilungsform einzuteilen (linear, nichtlinear). Jeder Eingangsparemeter wird in einem separaten Experiment ausgewertet, und der ermittelte Wertebereich wird ins übergeordnete Experiment implementiert.

Das Verfahren eignet sich auch für komplexe Modelle mit einer größeren Anzahl von Eingangsparemetern und erfordert keine Annahme hinsichtlich der Beziehung zwischen den Eingangsparemetern und der Zielvariablen. Morris schlägt die Berechnung einer vorgegebenen Anzahl unterschiedlicher Ausprägungen der Vektoren der zu untersuchenden Eingangsparemeter vor. Diese Ausprägungen werden so gewählt, dass der vollständige (vorgegebene) Wertebereich der Eingangsparemeter Berücksichtigung findet. Der Einfluss des i-ten Eingangsparemeters X_i wird durch die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung des "elementaren Effekts" $d_i(\mathbf{x})$ des i-ten Eingangsparemeter bestimmt (Hoppe H.,2006).

$$d_i(\mathbf{x}) = \frac{y(x_1, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(\mathbf{x})}{\Delta} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

Die Ausprägungen \mathbf{x} des standardisierten Eingangsvektors ($0 \leq x_i \leq 1$) der Dimension k (k unterschiedliche Eingangsparemeter) nehmen dabei p diskrete Werte wie folgt an (Hoppe H.,2006):

$$\left\{0, \frac{1}{p-1}, \frac{2}{p-1}, \dots, 1\right\} \quad \text{Gleichung 2-11}$$

Die (standardisierte) Variation Δ kann nach Morris aus einem festzulegenden Vielfachen n_m des Quotienten $\frac{1}{p-1}$ wie folgt bestimmt werden (Hoppe H.,2006):

$$\Delta = n_m * \frac{1}{p-1} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

Die standardisierten Eingangsparameter werden zur Auswertung des Modells entsprechend den vorgegebenen Wertebereichen skaliert, um die Eingangsparameter für die Modellberechnung zu erhalten (Hoppe H.,2006).

Vorgehensweise:

- Auswahl eines Ausgangsvektors \mathbf{x}^* aus dem festgelegten Wertebereich
- Wahl einer zufälligen Komponente des Vektors \mathbf{x}^* und Variation um $\Delta \rightarrow$ neuer Vektor $\mathbf{x}^{(1)}$
- mehrmalige Wiederholung der Schritte mit Vektor $\mathbf{x}^{(1)} \rightarrow \mathbf{x}^{(2)}, \dots, \mathbf{x}^{(k+1)}$

Durch diese Art der Simulation unterscheiden sich ein Vektor und der darauffolgende immer nur in einer Komponente und es können dadurch sämtliche "elementaren Effekte" für eine beliebige Anzahl an Komponenten ermittelt werden. In der Literatur wird empfohlen, zumindest zehn Ausgangsvektoren innerhalb des Wertebereichs, mit entsprechenden Minima und Maxima zu wählen um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Aus dem "elementaren Effekt" der einzelnen Komponenten wird im Anschluss der Mittelwert und dessen Standardabweichung ermittelt.

Ein hoher Betrag des Mittelwerts des "elementaren Effekts" eines Eingangsparameters ist ein Indikator für einen großen Einfluss auf die Zielvariable. Eine hohe Standardabweichung ist ein Hinweis auf eine Interaktion mit anderen Eingangsparametern oder auf einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Eingangsparameter und Zielvariable (Hoppe H.,2006).

2.3.5 Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheit der Ergebnisse der Modelle wird durch die Berechnung des (arithmetischen) Mittelwerts \bar{y} und der Standardabweichung s (σ)- bzw. den daraus abzuleitenden Größen Varianz s^2 (σ^2) und Variationskoeffizienten (s/\bar{y})- der Zielvariablen beschrieben. Werden die Zielvariablen getrennt von einander betrachtet, können diese Kenngrößen für die Zielvariable x_i auf der Basis der mit dem Umfang n durchgeführten Modellauswertungen wie folgt berechnet werden (Hoppe H.,2006):

$$y_i = y(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Gleichung 2-13}$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad \text{und} \quad s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad \text{Gleichung 2-14}$$

Die Ergebnisse für den Mittelwert und die Standardabweichung erlauben einen zusammenfassenden Überblick über die Unsicherheit der Zielvariable. Die Ergebnisse der Zielvariablen enthalten jedoch weitere Informationen, sodass die beiden Kenngrößen durch die Lagemaße Median, 0,25-Quantil, 0,75-Quantil, die Streuungsmaße Standardfehler des

Mittelwerts, Minimum und Maximum sowie die Verteilungsmaße Schiefe und Kurtosis ergänzt wurden (Brosius, 2002).

Median (oder Zentralwert) bezeichnet eine Grenze zwischen zwei Hälften. In der Statistik halbiert der Median eine Verteilung. Gegenüber dem arithmetischen Mittel, auch Durchschnitt genannt, hat der Median den Vorteil, robuster gegenüber Ausreißern (extrem abweichenden Werten) zu sein und sich auch auf ordinal skalierte Variablen anwenden zu lassen (wikipedia.org,2010).

Ein p-Quantil ist ein Lagemaß in der Statistik, wobei p eine reelle Zahl zwischen 0 und 1 ist. Das p-Quantil ist ein Merkmalswert, der die Verteilung einer Variablen bzw. Zufallsvariablen in zwei Teile teilt. Links vom p-Quantil liegen 100*p Prozent aller Beobachtungswerte bzw. 100*p Prozent der Masse der Zufallsvariablen. Rechts davon liegen 100*(1-p) Prozent aller Beobachtungswerte bzw. 100*(1-p) Prozent der Masse der Zufallsvariablen (wikipedia.org,2010).

Die Schiefe beschreibt die „Neigungsstärke“ einer statistischen Verteilung X. Sie zeigt an, ob und wie stark die Verteilung nach rechts (positive Schiefe) oder nach links (negative Schiefe) geneigt ist (wikipedia.org,2010).

Die Wölbung (Kurtosis) ist eine Maßzahl für die Steilheit bzw. „Spitzigkeit“ einer (eingipfligen) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, Wahrscheinlichkeitsfunktion oder Häufigkeitsverteilung (wikipedia.org,2010).

2.3.6 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist eine Sammlung von statistischen Analyseverfahren. Ziel ist es, Beziehungen zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen festzustellen (wikipedia.org,2010). Der Zusammenhang zwischen Eingangsparametern x und einer Zielvariable y wird wie folgt beschrieben.

Für die Eingangsparameter x_i und Zielvariable y:

$$x_i, y(x_i), i=1, 2, \dots, n$$

werden die Koeffizienten b_j der Regressionsgleichung in der Form:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j * x_j$$

Gleichung 2-15

\hat{y} = Regressand

$j = 1, 2, \dots, k$

b_j = Regressionskoeffizienten

b_0 = Absolutglied

k = Anzahl der Eingangsparameter

n = Stichprobenumfang

nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Wird berücksichtigt, dass der Regressionskoeffizienten von den Dimensionen der Eingangsparameter abhängig sind, kann aus der den ermittelten Koeffizienten des Regressionsmodells die Bedeutung der Eingangsparameter bestimmt werden. Als Maß für die Güte der Anpassung, die durch die Regression erreicht wird, dient das Bestimmtheitsmaß R^2 (coefficient of multiple determination), das sich aus dem Quotienten

der Summe der quadrierten Werte erklärten Abweichungen ESS (explained sum of squares) und der Summe der quadrierten Werte der gesamten Abweichung TSS (total sum of squares) ergibt (Hoppe H., 2006).

Hierbei gilt:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad \text{mit: } \bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \quad \text{Gleichung 2-16}$$

$$TSS = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{Gleichung 2-17}$$

$$ESS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad \text{Gleichung 2-18}$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad \text{Gleichung 2-19}$$

$$TSS = ESS + RSS \quad \text{Gleichung 2-20}$$

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} \quad \text{Gleichung 2-21}$$

Integriert man in das vorhandene Regressionsmodell die Standardabweichung, erhält man standardisierte Regressionskoeffizienten (SRC = standardized regression coefficient), deren absolute Werte ein Maß für die Veränderung der Zielvariablen im Hinblick auf die Eingangsgröße beschreiben, unter der Voraussetzung, dass die Eingangsparameter unabhängig von einander sind. Ein Vergleich der einzelnen Koeffizienten ist auf Grund der Regressionsanalyse möglich, da sich alle Werte in der gleichen Dimension auf das selbe Niveau beziehen, es lässt sich somit eine Rangordnung bezüglich der Auswirkungen eines Parameters erstellen. Eine genaue Beschreibung dieses Ansatzes findet sich in z.B. Saltelli, 2004, oder Hoppe H., 2006.

Bei der Durchführung einer Regressionsanalyse sollte man zu Beginn die Eingangsparameter mit dem vermutlich maßgeblichsten Einfluss auf die Zielvariable heranziehen und erst nach dem ersten Berechnungsdurchgang weitere Eingangsparameter in das Modell implementieren. Ist der erste Durchgang abgeschlossen, werden schrittweise, noch nicht betrachtete, Eingangsparameter integriert, hier sei erwähnt, dass es sinnvoll ist, Parameter auszuwählen, welche noch einen hohen Erklärungsbeitrag aufweisen.

2.3.7 Korrelationsanalyse

Im Rahmen der Korrelationsanalyse wird ein quantitatives Maß für einen Zusammenhang zwischen den Variablen bestimmt. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson PEAR (auch: r_{xy} oder correlation coefficient (CC)) für die Korrelation zweier (normalverteilter) Variablen, in diesem Fall der Eingangsparameter und der Zielvariablen, werden für eine Stichprobe vom Umfang n wie folgt bestimmt (Hoppe H.,2006):

$$PEAR = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Gleichung 2-22}$$

Bei mehr als einem Eingangsparameter ist es notwendig die partiellen Korrelationskoeffizienten (partial correlation coefficient (PCC)) zu bestimmen.

Der partielle Korrelationskoeffizient zwischen dem Eingangsparameter x_j und der Zielvariablen y entspricht dem Pearson-Koeffizienten für die neu zu bestimmende Variable $x_j - \hat{x}_j$ und $y - \hat{y}$ (Hoppe H.,2006).

Die Variablen \hat{x}_j und \hat{y} werden aus den folgenden Regressionsmodellen bestimmt:

$$\hat{x}_j = c_0 + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^k c_p x_p \quad \text{und} \quad \hat{y} = b_0 + \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq j}}^k b_p x_p \quad \text{Gleichung 2-23}$$

x_j und $y =$ Regressanden $j = 1, 2, \dots, k$ $c_p, b_p =$ Regressionskoeffizienten
 $c_0, b_0 =$ Absolutglieder $p = 1, 2, \dots, k$

Der partielle Korrelationskoeffizient beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Eingangsparameter und der Zielvariablen, wobei die linearen Effekte der übrigen Eingangsparameter unberücksichtigt bleiben (Hoppe H.,2006).

2.3.8 Rangkorrelation

Besteht kein linearer Zusammenhang zwischen den Variablen so liefern die Korrelations- und Regressionsverfahren in den meisten Fällen nur unbefriedigende Ergebnisse. Um einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen den Eingangsparametern und der Zielvariablen darstellen zu können, bedient man sich der Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten.

Ein Rangkorrelationskoeffizient ist ein parameterfreies Maß für Korrelationen, das heißt, er misst, wie gut eine beliebige monotone Funktion den Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreiben kann, ohne irgendwelche Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen zu machen. Anders als Pearsons Korrelationskoeffizient, benötigt er nicht die Annahme, dass die Beziehung zwischen den Variablen linear ist. Der Rangkorrelationskoeffizient ist robust gegenüber Ausreißern (wikipedia.org, 2010).

Einer unter mehreren Rangkorrelationskoeffizient ist jener nach Spearman, kurz SPEA (auch: r_s oder rank correlation coefficient (RCC)) genannt.

zur Bestimmung von r_s werden den Realisationen der Eingangsparameter x_k und der Zielvariablen y_k die Rangzahlen $R(x_k)$ und $R(y_k)$ zugeordnet, sodass jeder der beiden Reihen die kleinste Realisation den Rang 1 und die größte den Rang n erhält. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient wird durch die Berechnung des Pearson-Korrelationskoeffizienten für die Rangzahlen bestimmt:

$$SPEA = \frac{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \bar{R}(x)) * (R(y_i) - \bar{R}(y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \bar{R}(x))^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (R(y_i) - \bar{R}(y))^2}} \quad \text{Gleichung 2-24}$$

2.4 Beschreibung des Einzugsgebiets

Als Grundlage der nachfolgenden Beschreibung des Einzugsgebiets dienten im Wesentlichen die Arbeiten von Gamerith et al (2008) und Schneider (2007).

Das betrachtete Einzugsgebiet "Graz West" befindet sich in der Stadt Graz, westlichen der der Mur in den Stadtteilen Wetzelsdorf, Eggenberg und Gries und wird größtenteils als Mischsystem betrieben.

Das in Abbildung 2-8 blau eingezeichnete Einzugsgebiet zeigt die Einzugsfläche bis zum Jahr 2003. Das Einzugsgebiet erstreckt sich bis dahin über 335 ha von denen rund 109 ha befestigt sind. Weiteres ist dieses Gebiet (Stand 2003) mit rund 11800 Einwohnern besiedelt und umfasst ein Kanalnetz mit einer Gesamtlänge von 34 km. Am Ende des Einzugsgebietes befindet sich ein Mischwasserüberlauf, an dem sich auch die Kanal-Online-Messtation befindet (Veit J.,2009).

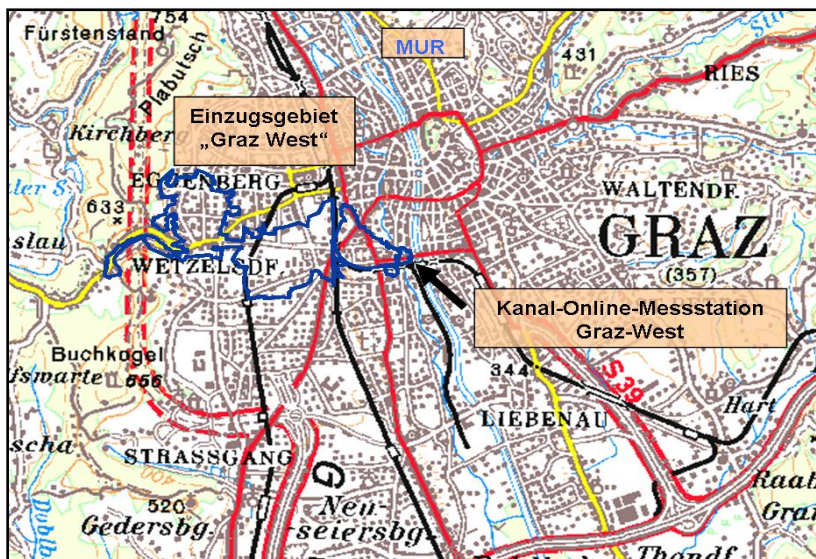


Abbildung 2-8: Lage des Einzugsgebietes "Graz West" (nach Haring, 2004)

Von 2003 bis 2006 wurde das Einzugsgebiet um das in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** rot dargestellte Kanalnetz vergrößert. Die Gesamteinzugsfläche veränderte sich dadurch um 122 ha auf 457 ha von denen 126 ha als befestigt angesehen werden können, und ist mit rund 19500 Einwohnern besiedelt. Das Gesamtnetz wurde durch

diese Maßnahme um 12,5 km Kanalnetz erweitert, weist eine Gesamtlänge von 46,5 km auf, und gliedert sich in 1363 Einzelkanalstränge.

Die Entlastung des Einzugsgebiet wird über einen Mischwasserüberlauf am Ende des Abwassersystems in die Mur gewährleistet. Mit $120\text{m}^3/\text{s}$ durchschnittlichem Abfluss gilt die Mur als ein relativ leistungsfähiges Gewässer. Die Oberflächenneigungsverhältnisse des Einzugsgebietes variieren zwischen 0 und 4 %, lediglich im Westen steigen diese auf bis zu 10% an. Der östliche Teil des Einzugsgebiets ist dicht verbaut, während der westliche Teil durch Siedlungen ohne größere Industriebetriebe charakterisiert ist. Einige kleinere und zwei größere Indirekteinleiter (eine Brauerei und ein pharmazeutischer Konzern) liegen im Einzugsgebiet. Die Bevölkerungsdichte liegt bei rund 43 Einwohnern pro Hektar bezogen auf die Gesamteinzugsfläche (Veit, 2009).

Die Jahresniederschlagshöhe beträgt in Graz durchschnittlich 830 mm/a.

Abbildung 2-9 zeigt die Ermittlung von Flächengrößen durch die Überlagerung eines Orthofotos mit dem Kanalkataster und dem zugehörigen Flächenwidmungsplan. Durch dieses Verfahren können relativ einfach Abflussbeiwerte (befestigt, unbefestigt, Dächer, etc.) für die einzelnen Teilflächen des Einzugsgebiets bestimmt werden.



Abbildung 2-9: Ausschnitt einer Überlagerung Orthofoto, Flächenwidmung und Kanalkataster des Einzugsgebiet (Gamerith et al., 2008)

2.4.1 Simulationsmodelle des Einzugsgebiets

Für das Einzugsgebiet „Graz West“ liegen sowohl ein hydrologisches Modell in der Software SMUSI , erstellt von Schneider (2007) und Fuchsberger (2009), wie auch ein hydrodynamisches Modell (Veit, 2009), erstellt in der Software SWMM vor.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Ergebnisse des teilkalibrierten hydrologischen Modells zum Vergleich mit den Messdaten und den ermittelten bzw. abgeschätzten Unsicherheitsbandbreiten verwendet. In diesem Modell wurde das Einzugsgebiet – für ein

hydrologisches Modell siehe detailliert - in 57 Teileinzugsgebiete und 56 Hauptkanalstränge aggregiert. Das Modell wurde in vorangegangenen Arbeiten auf den Zufluss zum Mischwasserüberlauf kalibriert, eine Kalibrierung des Entlastungsabflusses wurde bisher nicht durchgeführt.

2.5 Beschreibung der Messstationen

Seit 2002 werden im Einzugsgebiet drei Niederschlagsmessstationen (Niederschlagswippe) und eine Kanal-Online-Messstation (Abfluss- und Höhenstandsmessung, UV/VIS Spektrometersonde) betrieben. Im Zuge dieser Arbeit werden die aufgezeichneten Daten aus dem Jahr 2009 im Zeitraum von 1. Jänner 09 bis 31. Dezember 09 betrachtet, und einer Unsicherheitsanalyse unterzogen. Die Niederschlagsdaten der drei Wippensysteme wurden in mm/min beziehungsweise mm/5min aggregiert. Niederschlagsereignisse wurden automatisiert aus den Messreihen ermittelt. Zwei aufeinanderfolgende Ereignisse sind auf Basis der beobachteten Abflussbedingungen im Einzugsgebiet durch eine minimale Trockenzeit von 4 Stunden getrennt, als minimaler Niederschlag wurde 1 mm gewählt. Die so ermittelten Ereignisse wurden durchgehend nummeriert. Die nummerierten Regenereignisse wurden in drei Kategorien (schwaches, mittleres, starkes) Ereignis eingeteilt. Die Kanal-Online-Messstation liefert bei Trockenwetterabfluss im Messintervall von drei Minuten und im Mischwasserabfluss von einer Minute Daten, über Durchfluss (resultierend aus Höhenstands- und, Geschwindigkeitsmessung) und Schmutzstoffkonzentration.

2.5.1 Niederschlagsmessstationen

Der Niederschlag im Einzugsgebiet wird über drei digitale Niederschlagsmessstationen (Lutz, Klusemann und Karl-Morre), mit drei unterschiedlichen Standorten, aufgezeichnet. Die drei Geräte sind Wippensysteme, die aufgezeichnete Daten wurden zu mm/ 5-Minutenintervall aggregiert. Der Abstand zwischen den drei Stationen liegt bei rund 3 km Luftlinie.

Die Positionen der Regenschreiber sind der Abbildung 2-10 zu entnehmen.

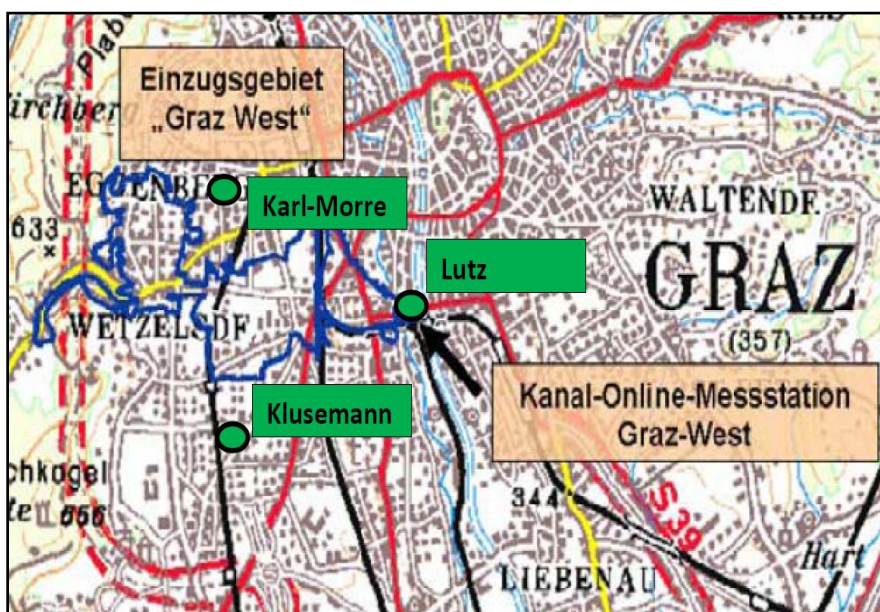


Abbildung 2-10: Positionen der Regenmessstationen (Haring, 2004, modifiziert)

Die drei Messstationen funktionieren nach dem Prinzip der Niederschlagswippe, in Abbildung 2-11 ist die Funktionsweise einer Niederschlagswippe dargestellt.

Wippengeräte zeichnen sich durch hohe Genauigkeit bei der Niederschlagserfassung im niedrigen bis mittleren Intensitätsbereich sowie durch Zuverlässigkeit aus. Sie sind jedoch auch für ihre tendenzielle Unterschätzung bei Niederschlägen mit hoher Intensität und auch für den Wasserverlust während der Bewegung der Wippe bekannt (Marsalek, 1981).

Der Niederschlag gelangt über die 500 cm² große Auffangfläche über den Auffangtrichter zur Einlaufdrossel und über das Einlaufknie in den Trichter. Der aufgefangene Regen tropft je nach Intensität in die Wippenschale. Beim Erreichen des Wippenschaleninhaltes von 5 cm³ kippt die Wippe durch das Gewicht des Wassers um. Damit entspricht ein Wippenumschlag einem Niederschlag von 0,1 mm. Die Wippenschalen entleeren sich in ein Auffanggefäß und werden in einen Sammelbehälter weitergeleitet. Der Sammelbehälter wird in bestimmten Zeitabständen von fachkundigem Personal geleert und das Volumen des im Sammelbehälter befindlichen Wassers bestimmt. Die ermittelte Wassermenge und die Anzahl der Wippungen liefern eine erste Aussage über die Funktionstüchtigkeit der Niederschlagswippe (nach Thaler, 2004).

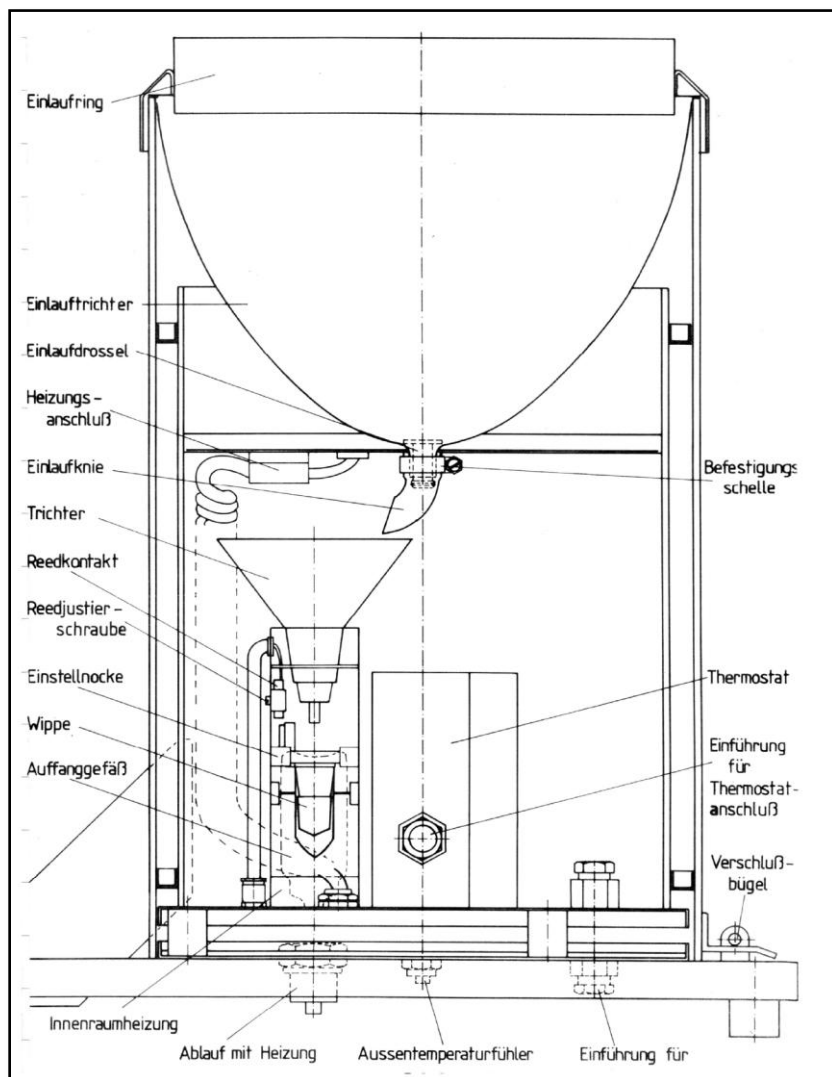


Abbildung 2-11: Detaillierter Aufbau einer Niederschlagswippe (Thaler, 2004)

2.5.2 Kanal-Online-Messstation

Folgende Beschreibung der Kanal-Online-Messstation bezieht sich größten Teils auf Publikationen von Gruber et al. (2004), Gamerith et al. (2008) und Haring (2004)

In Abbildung 2-12 ist die seit Oktober 2002 von der TU Graz betriebene Kanal-Online-Messstation schematisch dargestellt. Die Messstation liegt im Bereich des Mischwasserüberlaufs am Ende des Einzugsgebiets. Die Messstation wurde im Rahmen des interuniversitären Forschungsprojekts IMW (BMLUW, 2005) errichtet und liefert kontinuierlich zeitlich hochaufgelöste Daten zu Abfluss und Schmutzstoffkonzentrationen (Veit J., 2009).

Das Messintervall der Messstation beträgt im Trockenwetterfall drei Minuten, bei Mischwasserabfluss wird das Intervall auf eine Minute verkürzt.

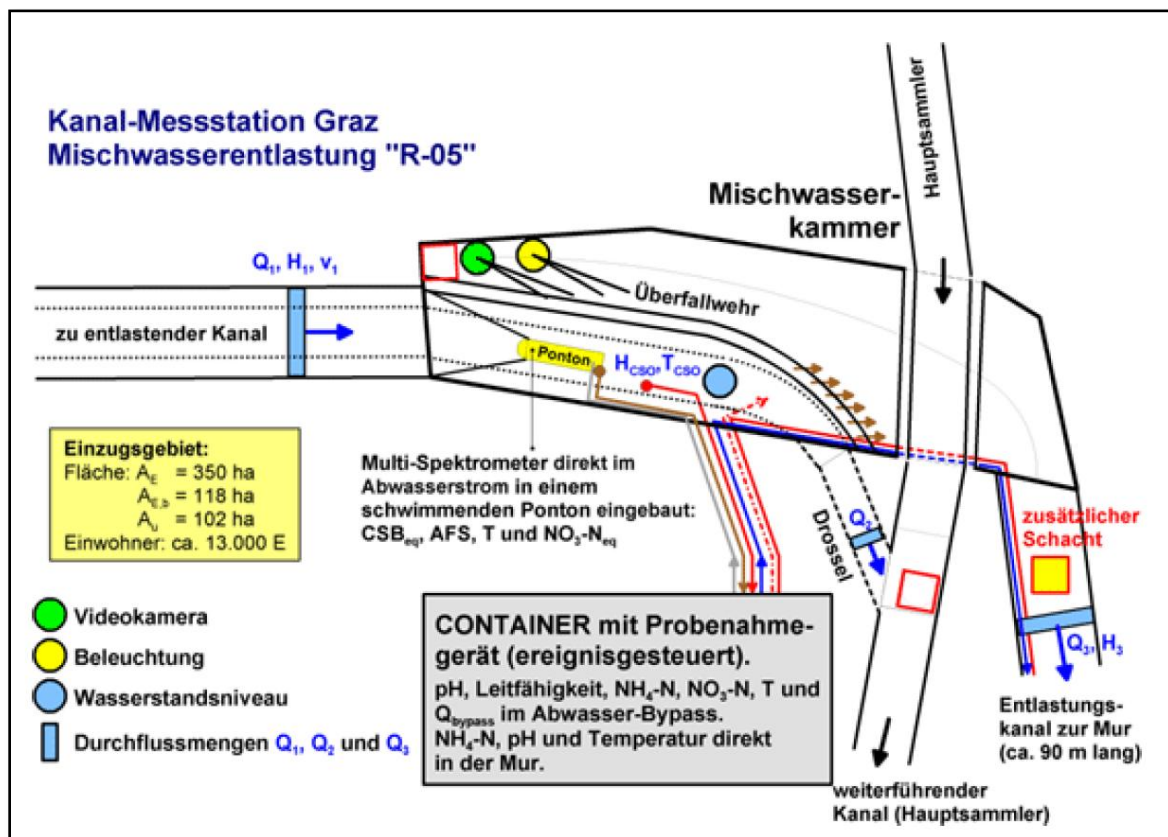


Abbildung 2-12: Übersicht über die Mess- und Überwachungssysteme in der Kanal-Monitoring-Messstation Graz (Gruber et al., 2004)

Die Abflussmessung des Mischwasserüberlaufs basiert auf einer Ultraschall-Höhenstandsmessung (Ultraschall-Korrelationsmessverfahren) und einer berührungslosen Radar-Messung der Oberflächengeschwindigkeit. Über die Profilgeometrie wird auf eine mittlere Geschwindigkeit rückgerechnet und der Abfluss aus Geschwindigkeit und durchflossener Fläche berechnet.

Aufgezeichnete Daten:

- Zulauf (Q_1) mittels Radarmessverfahren
- Wassermenge (Q_3) mittels Ultraschall-Korrelationsmessverfahren mit getrennter Wasserstandsmessung

Für den Drosselabfluss (Q_2) konnte kein geeignetes Messsystem gefunden werden.

Die Zulaufmengen vor dem Mischwasserüberlauf werden durch das Gerät FLO-DAR der Firma Flow-Tronic® aufgezeichnet. Abbildung 2-13 zeigt ein exemplarisches Foto eines Gerätes sowie verschiedene Einsatzmöglichkeiten.



Abbildung 2-13: Messgerät FLO-DAR (www.flow-tronic.com, 2010)

Tabelle 2-1 beinhaltet detaillierte Angaben vom Hersteller Marsh-McBirney® zu den Messgenauigkeiten der FLO-DAR Messeinrichtung.

Tabelle 2-1: Produktinformation FLO-DAR (www.flow-tronic.com, 2010)

	Geschwindigkeitsmessung	Füllstandsmessung	Überstaumessung
Methode	Radar	gepulstes Ultraschall-Echolot	Piezoresistiver Differenzdruckgeber
Messbereich	0.1 bis +6 Meter pro Sekunde	0.01 bis 1.5 Meter (Typ 4000-SR) 0.01 bis 6 Meter (Typ 4000-LR)	3.5 m
Messgenauigkeit	±0.5% vom Messwert ±Nullpunktstabilität	± 1% vom Messwert ±Nullpunktstabilität. Umfasst Nichtlinearität, Hysterese und Temperatureinflüsse	+/- 1% vom Messwert ±Nullpunktstabilität. Umfasst Nichtlinearität, Hysterese und Temperatureinflüsse
Nullpunktstabilität	±0.03 m/s	+/- 0.005 m	+/- 0.1 m
Auflösung	0.001 m/s	0.001 m	-

Flussberechnung

- Methode: Durchfluss $Q = V \times A$ (mittl. Geschwindigkeit mal benetzter Fläche)
- Modellgenauigkeit: ±5% vom Flusswert (für 10 bis 90% Füllgrad des Rohres und Füllstände größer als 50 mm)

Der Abfluss im Entlastungskanal wird über das Gerät OCM Pro der Firma Nivus® aufgezeichnet. Das Messprinzip dieses Gerätes basiert auf:

- Ultraschall-Laufzeit (Höhenmessung)
- Piezoresistive Druckmessung (Höhenmessung)
- Korrelation mit digitaler Mustererkennung (Fließgeschwindigkeit)

Die UV-VIS Spektrometersonde (spectro::lyser der Fima s::can) misst Absorptionen (von Licht) in einem Wellenlängenbereich von 200 bis 750 Nanometer. Auf Basis der Absorptionen in bestimmten Wellenlängenbereichen werden Konzentrationen direkt im Abflussstrom von chemischen Sauerstoffbedarf (CSB_{eq}) und abfiltrierbaren Stoffen (AFS_{eq}) rückgerechnet. Dafür wurde das Messgerät - in Abbildung 2-14 dargestellt - in einem Ponton eingebaut, das im Trockenwetterfall in der Schmutzwasserrinne des Zulaufkanals schwimmt.



Abbildung 2-14: Ponton in der Mischwasserüberlaufkammer (Gruber *et al.*, 2004)

Tabelle 2-2 ist eine Auflistung über die Parameter, Messmethode und Messposition.

Tabelle 2-2: Gemessene Parameter der Kanal-Online-Messstation Graz (Veit J.,2009)

PARAMETER	METHODE	POSITION
Q_{zulauf} , v_{zulauf}	Radar	Zulaufkanal
H_{zulauf}	Ultraschall	Zulaufkanal
$Q_{entlastet}$, $H_{entlastet}$	Ultraschall	Entlastungskanal
Wasserstand	Ultraschall	Überlaufkammer
CSB_{eq} , TOC_{eq} , AFS_{eq} , $NO_{3,eq}$ und Temperatur	Multi-Spektrometer	Schwimmendes Ponton
NH_4-N , NO_3-N , Leitfähigkeit und pH	ISE-Sonden	Über Bypass
Niederschlag	Wippe	Lutz Karl-Morre Klusemann

2.6 Unsicherheiten in den Flächenkenngrößen

Die Flächengrößen und Flächenbezugsgrößen sind neben dem Niederschlag eine der entscheidenden Datengrundlagen für abwassertechnische Berechnungen. Neben der Ermittlung der Einzugsgebietsflächen und deren Abflusswirksamkeit zur Bestimmung der Abflüsse von befestigten und unbefestigten Flächen im Rahmen der Modellierung der Abflussprozesse kommt der Erfassung u. a. auch bei der Baukosten- und Gebührenermittlung eine wichtige Funktion zu (Dudey, 2002; Wolf und Milojević, 2003).

Man unterscheidet die Flächen des Einzugsgebiets in

- die Fläche des Einzugsgebiets (A_E),
- das kanalisierte Einzugsgebiet ($A_{E,k}$),
- das nicht kanalisierte Einzugsgebiet ($A_{E,nk}$),
- die befestigten Flächen ($A_{E,b}$) oder reduzierte Fläche (A_{red}),
- die nicht befestigten Flächen ($A_{E,nb}$) und
- die betriebliche Einzugsgebietsflächen ($A_{E,G}$).

Der Begriff des Befestigungsgrads beschreibt das Verhältnis (γ) zwischen den befestigten Flächen $A_{E,b}$ und dem Einzugsgebiet A_E .

Die Abflusswirksamkeit der Flächen wird über anwendungsbezogene Abflussbeiwerte (ψ) beschrieben. Zur Bestimmung des Anteils der Einzugsgebietsflächen, von dem der Abfluss des Niederschlagswassers (Oberflächenabfluss) nach Abzug der Mulden- und Benetzungsverluste vollständig zum Abfluss in der Kanalisation kommt, wird die abflusswirksame undurchlässige Fläche (A_u) bestimmt.

$$h_N * A_E * \psi = h_N * A_u \quad \Leftrightarrow \quad A_u = A_E * \psi \quad \text{Gleichung 2-25}$$

h_N ... Niederschlagshöhe in mm ψ ... Abflussbeiwert

Abflussbeiwerte sind immer auf einen bestimmten Flächentyp bezogen, daher ist es wichtig dies kenntlich zu machen, und werden in mittlere Abflussbeiwerte und Spitzenabflussbeiwerte unterschieden.

2.6.1 Verfahren zur Ermittlung von Einzugsgebietsflächen

Bei der Ermittlung von Einzugsgebietsflächen wird zwischen den aus Plänen oder direkt im Einzugsgebiet messbare Größen ($A_{E,k}$, $A_{E,nk}$, $A_{E,b}$, $A_{E,nb}$, $A_{E,G}$) und dem Rechenwert der abflusswirksamen undurchlässigen Fläche unterschieden (Hoppe H., 2006).

In der Praxis kommen folgende Verfahren zur Anwendung:

- Ermittlung der Flächen aus analogen und digitalen Planunterlagen
- Luftbildauswertungen
- Terrestrische Geländeaufnahme
- Schätzverfahren (Musterflächenauswertung, empirische Schätzverfahren)
- Satellitenfernerkundungen

2.6.2 Ermittlung von Einzugsgebietsflächen

Die zur Ermittlung der Einzugsgebietsflächen erforderlichen amtlichen Planungsunterlagen werden durch die Vermessungsämter und die Katasterämter der Gemeinden und Städte

verwaltet und liegen überwiegend digital vor. Das Kombinieren von Kanalnetzplänen und amtlichen Kartenwerken ermöglicht eine Zuordnung der Flächen, und Flächenwidmungspläne geben Aufschluss über ihre Nutzung. Die abgebildete Erdoberfläche in Orthofotos und Luftbildern liefert Informationen über die Flächengrößen sowie ihre Nutzung (befestigt, nicht befestigt, Dachflächen, etc.). Terrestrische Aufnahmen weisen die geringste Unsicherheit auf, sind jedoch durch den hohen Aufwand sehr teuer, und nur in kleineren Einzugsgebieten anwendbar. Schätzverfahren (hohe Ungenauigkeit) basieren auf der Auswertung von Musterflächen und werden durch Planunterlagen und Ortsbegehungen gestützt, ein repräsentatives Gebiet dient als Musterfläche und wird auf das Gesamteinzugsgebiet übertragen. Daten aus Satellitenfernerkundungen haben eine Auflösung von 5-30 m und liefern keine ausreichende Detailschärfe.

2.6.3 Unsicherheiten von Abflussbeiwerten

Die Ermittlung der Abflusswirksamkeit durch die Bestimmung des Rechenwerts der abflusswirksamen undurchlässigen Flächen (A_u) kann nicht durch eine direkte Messung der Einzugsgebietsflächen vor Ort erfolgen (Hoppe H., 2006).

Üblicherweise werden die Teilflächen und ihre Nutzungsart bestimmt, und mit Literaturansätzen versehen, oder durch N-A-Messungen im Einzugsgebiet ermittelt, diese Unsicherheiten summieren sich mit der des Grads an befestigten bzw. nicht befestigten Flächen, und behaften den Abflussbeiwert.

Die Einteilung der Flächen erfolgt über ihr Oberflächenmaterial, eine genau Übersicht über die Materialien und die Bandbreiten ihrer Unsicherheiten für verschiedene Abflussbeiwerte findet sich zusammenfassend in Hoppe.H, (2006).

2.7 Bauwerkskenngrößen und deren Auswirkungen

Sonderbauwerke stellen Zwangspunkte im Rahmen von Kanalberechnungen dar, und unterteilen sich in die Geometrie des Bauwerks sowie den Regulierungsorganen. Die Erfassung der Bauwerksgeometrie erfolgt durch Vermessung der Sonderbauwerke.

Zur Abbildung der Bauwerke in Kanalnetzmodellen wird in der Regel auf vorhandene Bestandspläne bzw. Kanalkataster zurückgegriffen. Diese sollten als Ergebnis einer nach der Regeln der Technik durchgeführten aktuellen Vermessung für jedes Bauwerk vorliegen (Hoppe H., 2006).

Moderne (automatisierte) Messsysteme weisen im Bereich der Richtungsmessung Abweichungen von 0,46 mgon und bei Distanzmessungen von ± 1 mm bei Entfernungen von bis zu 7500 m auf. Es sollte nach Fertigstellung eines Bauwerks eine Vermessung durchgeführt werden, da diese auch Grundlage für den Betrieb und Unterhalt darstellt. Die Bauwerkspläne sind in den Maßstäben 1:100 und 1:50 herzustellen und bei Änderungen fortzuschreiben.

Als Grundlage für die Modellerstellung im Rahmen von Neubau-, Sanierungs- und Erneuerungsmaßnahmen dienen im wesentlichen die Informationen über:

- Länge der Berechnungsstrecke
- Gelände- und Sohlhöhen
- Querschnittsabmessungen und -formen
- Betriebsrauheit

- Beckenvolumen
- Zu- und Abflüsse

Unter Regulierungsorganen in Kanalisationssystemen werden Einrichtungen (Bauwerke, Geräte) die zur Beeinflussung des Abflusses durch Drosselung, Steuerung oder Regelung verstanden, es ist wichtig Informationen über die Einstellungen der Regulierungsorgane an Sonderbauwerken so wie deren Überprüfung im Betrieb sind zu erhalten bzw. ermitteln.

Tabelle 2-3 Klassifizierung der Messgenauigkeit bei Lage- und Höhenvermessungen nach DIN 18710-1 (1998)

Klasse nach DIN 18710-1	Standardabweichung σ_L bzw. σ_H	Bemerkung
Lagevermessungen		
L1	$50 \text{ mm} < \sigma_L$	sehr geringe Genauigkeit
L2	$15 \text{ mm} < \sigma_L \leq 50 \text{ mm}$	geringe Genauigkeit
L3	$5 \text{ mm} < \sigma_L \leq 15 \text{ mm}$	mittlere Genauigkeit
L4	$0.5 \text{ mm} < \sigma_L \leq 15 \text{ mm}$	hohe Genauigkeit
L5	$\sigma_L \leq 0.5 \text{ mm}$	sehr hohe Genauigkeit
Höhenvermessungen		
H1	$20 \text{ mm} < \sigma_H$	sehr geringe Genauigkeit
H2	$5 \text{ mm} < \sigma_H \leq 20 \text{ mm}$	geringe Genauigkeit
H3	$2 \text{ mm} < \sigma_H \leq 5 \text{ mm}$	mittlere Genauigkeit
H4	$0.5 \text{ mm} < \sigma_H \leq 2 \text{ mm}$	hohe Genauigkeit
H5	$\sigma_H \leq 0.5 \text{ mm}$	sehr hohe Genauigkeit

2.8 Unsicherheiten in der Niederschlagsbelastung

Der Begriff Niederschlag bezeichnet in der Meteorologie Wasser inklusive seiner Verunreinigungen, das infolge der Schwerkraft in flüssiger (Regen) oder fester Form (Hagel, Schnee, Graupel) aus Wolken auf die Erde fällt, oder sich direkt durch Kondensation (Tau) oder Resublimation (Reif) an Objekten absetzt (www.wikipedia.org, 2010).

Der Niederschlag stellt eine der wichtigsten Eingangsgrößen in der Urbanhydrologie dar. Der Querschnitt eines Mischwasserabflusskanals wird nur bei Regenereignissen voll ausgeschöpft, daher ist es notwendig, detaillierte Informationen zu den Niederschlagsmengen, Niederschlagshäufigkeiten und seine Intensität aufzuzeichnen.

Nach Hoppe (2006) wird der Niederschlag in den meisten Anwendungsfällen über

- die mittlere Jahresniederschlagshöhe
- die Niederschlagsintensität mit zugehöriger Dauerstufe und Wiederkehrintervallen
- Regenspektren und kontinuierliche (gemessene) Niederschlagsreihen als Eingangsgrößen von N-A-Berechnungen

beschrieben.

2.8.1 Niederschlagsmessung und deren Fehler und Unsicherheiten

Die Aufzeichnung von Niederschlagsdaten unterscheidet sich in punktuelle Niederschlagsmessung (Niederschlagsschreiber) und flächenhafte Erfassung (Weterradar). Die Erfassung von Niederschlagsmessreihen mittels Weterradar gewinnt immer mehr an Bedeutung, und ein kontinuierlicher Ausbau sollte angestrebt werden. Die Anzahl der verfügbaren Messreihen liegt dabei heute noch deutlich unter der Anzahl punktueller Messungen (Sevruk, 2002).

Punktuelle Niederschlagsschreiber funktionieren nach dem Prinzip einer Kippwaage (Wippe), einer Gewichtswaage, nach dem Schwimmerprinzip oder basieren auf der Zählung von Tropfen (Tropfenspektrografen).

Eine Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren findet sich u.a. in Dyck und Peschke (1995), Maniak (1995), Kreuls (1988), und Sevruk (2002).

Das Prinzip der Kippwaage (Tipping-bucket) wird an den drei Standorten (Lutz, Karl-Morre, und Klusemann) im Einzugsgebiet "Graz-West" betrieben, und gilt heute als das am häufigsten verwendete Geräte.

Nach Hoppe (2006) werden folgende systematische Fehler eines Niederschlagsschreibers unterscheiden:

- Windfehler durch Abdrift der Regentropfen,
- Benetzungsverluste,
- Spritzwasser,
- Aufstellungsfehler (z.B. Schrägstellung),
- fehlerhafte zeitliche Zuordnung,
- Fehler bei der Datenerfassung und Datenaufbereitung,
- Verdunstungsverluste in Sammelkannen,
- Verdunstung bei beheizten Niederschlagsschreibern,
- mechanische Fehler und fehlerhafte Kalibrierung.

Tabelle 2-4 gibt einen Überblick über die Arten und Größenordnungen von in der Literatur beschriebenen systematischen Fehler von Niederschlagsmessungen mit Wippensystem, mit der zusätzlichen Unterscheidung von Niederschlagsart Regen und Schnee.

Tabelle 2-4: Literaturangaben zu Größenordnungen der systematischen Fehler von Niederschlagsmessungen mit Wippensystem (Hoppe H.,2006)

Ursache	Größe des Fehlers in % und Art des Niederschlags	Quelle
Windfehler, Verluste durch die Deformation des Windfeldes	2-5 (Regen)	Dyck und Peschke, 1995
	2-10 (Regen)	Sevruk, 2002
	2-15 (Regen)	Sevruk, 1996
	9-15 (Regen)	Maniak, 1995
	15-35 (Schnee)	Dyck und Peschke, 1995
	60 (Schnee)	Goodison in Sevruk, 2002
	80 (Schnee)	Sevruk, 1996
Benetzungsverluste	2-5 (Regen)	Maniak, 1995
	5 (Regen)	Kreuls, 1988
	2-10 (Regen)	Sevruk, 1982
	5-10 (Regen)	Dyck und Peschke, 1995
Spritzwasserverluste	1-2 (Regen)	Sevruk, 1982
Verdunstung in Sammelkannen, Vorratsverdunstung	0-4	Sevruk, 1983
	1-3	Dyck und Peschke, 1995
	5-8	Maniak, 1995
Verdunstung bei beheizten Niederschlagsschreibern	30	Hanson et al., 1983 in Rauch et al., 1998
Verluste durch mechanische Fehler des Wippensystems (Design und Kalibrierung) in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität I	0-10 I>200mm/h	La Barbera et al., 2002
	15 I=5 mm/min	La Barbera et al., 2002
	10 I=5 mm/min	Maksimović et al., 1991
	10 I=0,1 mm/min	Niemczynowicz, 1986
	Mehrmessung +16	Niemczynowicz, 1986
Messfehler (gesamt)	5-10 k.A.	Schilling, 1991
	15-20 Jahresmittel	Sevruk, 1983
	1-7 Jahresmittel	Vasvari, 2003
	30-40 Jan. - Feb.	Sevruk, 1983
	5-10 Jun. - Aug.	Sevruk, 1983
	10-25 Jahresmittel	Maniak, 1995
	10-40 Monatsmittel	Maniak, 1995

2.8.2 Regionalisierung der Niederschlagsbelastung und Dichte eines Messnetzes

Neben der Betrachtung der Fehler der punktuellen Niederschlagsmessung ist bei der Verwendung von Niederschlagsmessungen im Rahmen hydrologischer Fragestellungen zu beachten, dass eine einzelne Punktmessung nur einen Ausschnitt des Niederschlagsgeschehens in dem betrachteten Einzugsgebiet widerspiegelt (Hoppe H., 2006).

Die Niederschlagsintensität kann lokal sehr variieren und wird durch punktuelle Messungen nur schlecht ausgedrückt, dieser Umstand kann durch die Integration der Ergebnisse von Langzeitsimulationen ausgeglichen werden.

Quirnbach und Schultz (2002) zeigten durch Vergleiche von punktuellen Niederschlagsmessungen mit Radarmessungen, dass punktuelle Niederschlagsmessungen bis zu einer Dichte von einem Niederschlagsschreiber je 16 km² (Abstand der Niederschlagsschreiber untereinander < 4 km) die räumliche Verteilung des Niederschlags für urbanhydrologische Fragestellungen zufrieden stellend beschreiben können (Hoppe H., 2006).

Die Positionierung der Niederschlagsschreiber im Einzugsgebiet "Graz-West" liegt bei rund 3 km untereinander, und ist somit ähnlich wie die in der Literatur empfohlenen 2 km - 4 km.

2.9 Unsicherheiten in Abflusswerten

„Abwasser“ ist Wasser, das dem natürlichen Kreislauf entnommen und das chemisch bzw. physikalisch nachteilig verändert wurde (Kainz und Kauch, 2007).

Anfallende Abwässer in Abwassersystemen haben verschiedene Verursacher, und werden dahingehen dementsprechend unterteilt:

- Häusliches Schmutzwasser (Q_H)
(Küche, Bad, WC, Waschmaschine, Geschirrspüler ...)
- Betriebliches Schmutzwasser (Q_G) ist Abwasser aus größeren Industrie und Gewerbebetrieben mit einem Anteil häuslichen Abwassers (Sanitärabwässer).
- Schmutzwasser (Q_S=Q_H+Q_G)
- Fremdwasser (Q_F) kann seinem Ursprung nicht eindeutig zugeordnet werden, z.B: Eindringen von Grundwasser in das Abwassersystem.
- Regenwasser (Q_R) ist das planmäßig in die Kanalisation gelangende Niederschlagswasser. Es wird in Kombination mit dem Schmutzwasser in einem gemeinsamen Kanal abgeleitet (Mischverfahren) oder in eigenen Kanalleitungen erfasst (Trennverfahren)
- Trockenwetterabfluss (Q_T) ist eine Mischung aus häuslichem Abwasser, einem Anteil von betrieblichem Abwasser sowie Fremdwasser.
- Mischwasser (Q_M) ist das in der Mischkanalisation bei Regenwetter vorhandene Wasser, bestehend aus Schmutz- und Regenwasser sowie Fremdwasser.

Demnach gilt

$$Q_S = Q_H + Q_G$$

$$Q_T = Q_H + Q_G + Q_F$$

$$Q_M = Q_H + Q_G + Q_F + Q_R$$

Die Ableitung der Abwässer kann auf verschiedene Weise erfolgen:

- Mischverfahren (Mischsystem, -kanalisation)
- Trennverfahren (Trennsystem, -kanalisation)

- Modifiziertes Mischverfahren
- Modifiziertes Trennverfahren
- Schmutzwasserkanalisation
- Sonderformen der Kanalisation

Im Kapitel 2.9.1 wird die Mischkanalisation kurz erläutert, da das Einzugsgebiet "Graz-West" über ein Mischsystem, die anfallenden Abwässer abführt.

2.9.1 Mischverfahren

Beim Mischverfahren werden Schmutz- und Regenwasser in einem gemeinsamen Entwässerungssystem (Mischsystem) abgeleitet. Der erforderliche Abflussquerschnitt des Mischwasserkanals wird vom Regenwasserabfluss bestimmt, da der Schmutzwasserabfluss nur wenige Prozente des maximalen Regenwasserabflusses beträgt. Um nicht zu große Kanalquerschnitte zu erhalten und um eine hydraulische Überlastung der Abwasserreinigungsanlage zu vermeiden, muss der Mischwasserabfluss durch Entlastungsbauwerke (Mischwasserüberläufe MÜ, Mischwasserüberlaufbecken MÜB) reduziert werden (Kauch/Kainz, 2007).

Renner, Kauch, Schribertschnig (1998) beschreiben die Vorteile und Nachteile der Mischkanalisation folgend:

Vorteile des Mischverfahrens:

- Geringere Herstellungskosten sowohl für die privaten Entwässerungsleitungen (Grundleitungen) und für öffentliche Kanäle.
- Nur ein Kanal im öffentlichen Bereich, daher insgesamt ein kürzeres Kanalnetz.
- Einfachere Bauwerke der Ortskanalisation, wie z.B. Einmündungen und Kreuzungen im Straßen- bzw. Bahnbereich und dergleichen.
- Geringerer Platzbedarf, daher besonders in engen Straßen vorteilhaft.
- Keine Fehlanschlussmöglichkeiten.
- Geringe Niederschläge gelangen vollständig zur Abwasserreinigungsanlage.
- Bei Starkregen kann durch richtige Wahl und Anordnung von Regenentlastungen zumindest der erste Spülwasserstoß ebenfalls der Reinigung zugeführt werden.
- Schon bestehende, im Mischsystem gebaute Grundleitungen können problemlos an das neue öffentliche Netz angeschlossen werden.

Nachteile des Mischverfahrens:

- Das Kanalprofil ist für die normale Schmutzwassermenge (Trockenwetterabfluss) zu groß, wodurch es zu Ablagerungen im Kanalnetz kommen kann. Deshalb ist eine häufige Reinigung, insbesondere der Anfangsstränge, erforderlich.
- Diese Ablagerungen sind schwer aufzuwirbeln und können somit erst durch starke Niederschläge natürlich abtransportiert werden. Es besteht die Gefahr, dass sie ungereinigt über die Regenentlastungsbauwerke in den Vorfluter gelangen.
- Im Allgemeinen muss der Mischwasserkanal wegen der Hausanschlüsse tiefer als ein ungefähr gleich großer Regenwasserkanal verlegt werden.
- Ohne Rückstausicherung besteht die Gefahr, dass Abwasser in Kellerräume gelangt.
- Viele Bauwerke der Kanalisation (Pumpstationen, Düker) müssen trotz vorgeschalteter Regenentlastung größer als für ein Schmutzwassersystem errichtet werden.
- Der Zufluss zur Abwasserreinigungsanlage unterliegt starken Schwankungen.

2.9.2 Volumenstrommessung

Die Messung des Volumenstroms ist ein wichtiger Bestandteil für die Auslegung von siedlungsabwassertechnischen Sonderbauwerken. Es bestehen verschiedene Verfahren den Volumenstrom zu messen.

- Unmittelbare Volumenzähler (Messkammer z.B. Trommelmesser)
- Mittelbare Volumenzähler (z.B. Turbinen-Durchflussmesser)
- Schwebekörper-Durchflussmesser
- Magnetisch Induktiver Durchflussmesser (MIDs)
- Ultraschalldurchflusssensor (USD)
- Coriolis-Massendurchflussmesser
- Wirbeldurchflussmesser
- Korrelationsdurchflussmesser
- Laminardurchflussmesser
- Durchflussmesser mit Strömungsmesssonden
- Durchflussmessung mit Drosselgeräten
- Messverfahren für offene Anlagen (Wehrmessung, bei der mittels der Überfallhöhe und der Wehrbreite b der Volumenstrom ermittelt wird)
- Thermische Massendurchflussmessung
- Luftmassensensor
- Laser-Doppler

Nicht alle Messverfahren sind gängig bzw. finden in der Industrie eine regelmäßige Anwendung. Die Online Messstation im Einzugebiet arbeitet nach den in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Prinzipien. Tabelle 2-5 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Verfahren und gibt Aufschluss über die Größenordnung der Abweichungen.

Tabelle 2-5 Beispiele für Abweichungen von Volumenstrommessungen in Kanalisationsnetzen (Hoppe H., 2006)

Literaturstelle	Abweichung und Erläuterung	
Emschergenossenschaft/Lippeverband (2004)	Erreichbare Genauigkeit bei sorgfältiger Kalibrierung	10%
Hoppe et al. (2002) Tracermessungen	Differenzen zwischen Tracermessungen und Einpunkt-Geschwindigkeitsmessung (Trockenwetter)	5.5 % bis 15.6%
Sitzmann (2001) Kanalisationsmesskampagnen	Trockenwetter Regenwetter	5% 10%
Uhl (1993) Unsicherheitsanalyse von Abflussmessungen an Regenüberlaufbecken	Variationskoeffizienten für: Abflüsse bei Trockenwetter Abflüsse Mischwasser Beckenzulauf Abflüsse Mischwasser Beckenablauf Durchflusssumme Beckenzulauf Durchflusssummebeckenablauf	30 % bis 100 % < 10 % < 15 % < 1.5 % < 1.0 %
Dallwig (1988) Verkehrsfehler unter Betriebsbedingungen verschiedener Durchflussmessverfahren	Venturikanal	12 % bis 20 %
	Khafagi-Gerinne/Trapez-Gerinne	13 % bis 20 %
	Wehre und Sohlschwellen	10 % bis 15 %
	Ausfluss aus Öffnungen	6 % bis 10 %
	Rechteckmesswehr	7 % bis 12 %
	Dreiecksmesswehr	6 % bis 10 %
	Induktive Messgeräte	2 % bis 4 %
	Geschwindigkeitsmessung Einpunktmessung	14 % bis 18 %
	Vielpunktmessung Tracer-Langzeitmessung	4 % bis 5 % 4 % bis 5 %

3 Annahmen und Auswertung Niederschlags-messungen

3.1 Methodik

Die von den Niederschlagsschreibern gemessenen Daten im Zeitraum 1.1.2009 bis 31.12.2009 werden im Zuge der Auswertung in einzelne Regenereignisse unterteilt. Ein Regenereignis beginnt mit der ersten Aufzeichnung, und endet wenn bis zum nächsten gemessenen Niederschlag mindestens 4 Stunden eingehalten werden. Somit ist die Dauer eines Ereignisses variabel und kann für die einzelnen Stationen auch abweichen. Im Anschluss wurde die Niederschlagssumme der Zeitspanne gebildet, und Ereignisse mit Niederschlagssummen kleiner 1 mm verworfen. Danach wurden die ausgewerteten Ereignisse der drei Niederschlagsschreiber verglichen, und die übereinstimmenden Ereignisse einander zugeordnet.

Durch diese Methode konnten 113 Regenereignisse im Jahr 2009 definiert werden, und in drei Kategorien (Schwach, mittel, stark) unterteilt werden. Das längste Regenereignis wurde beginnend am 23.Juni 2009 aufgezeichnet und hatte eine Dauer von 2545 Minuten (42,4 Std.). Eine Auflistung aller Ereignisse findet sich im Anhang.

Im ersten Arbeitsschritt wurden die Mittelwerte, Standardabweichungen (Absolutfehler), Relativfehler und prozentualer Fehler vom Jahresniederschlag und der Niederschlagssumme von acht ausgewählten Regenereignissen ausgewertet. Im Anschluss wurde der systematische Fehler der drei Messstationen untersucht sowie eine Beziehung zwischen Niederschlagsmenge und Fehler aufzuzeigen.

3.1.1 Auswahl der Betrachteten Ereignisse

Tabelle 3-1 Auflistung der betrachteten Ereignisse

Ereignis	Start	Ende	Regen schreiber	Dauer (min)			Sum Hn (mm)			Max Hn (mm/min)		
				KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ
-	date/time	date/time	-	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ
2009_2	21.01.2009 09:30	22.01.2009 02:18	3	954	1005	994	12.41	11.98	15.22	0.09	0.12	0.20
2009_4	27.01.2009 04:11	28.01.2009 00:59	3	1215	1226	1248	20.21	28.54	30.17	0.09	0.12	0.20
2009_8	07.02.2009 19:13	08.02.2009 12:24	3	1017	1029	992	16.56	14.20	18.52	0.09	0.12	0.18
2009_13	06.03.2009 02:34	06.03.2009 14:16	3	572	520	700	12.23	14.25	16.13	0.09	0.12	0.09
2009_15	29.03.2009 12:32	30.03.2009 10:47	3	935	1334	362	22.62	28.57	16.45	0.17	0.40	0.28
2009_21	28.04.2009 19:20	30.04.2009 10:52	3	1746	1130	1175	27.22	19.43	12.12	0.51	1.48	0.37
2009_22	29.04.2009 19:30	30.04.2009 09:57	2	0	867	656	0.00	22.19	21.74	0.00	0.55	0.85
2009_28	12.05.2009 16:44	12.05.2009 19:43	3	171	167	137	22.99	47.33	31.61	1.64	2.86	2.39
2009_29	13.05.2009 03:18	13.05.2009 07:43	2	190	257	0	2.08	2.79	0.00	0.17	0.13	0.00
2009_32	16.05.2009 13:32	16.05.2009 18:30	3	282	298	287	22.60	25.18	14.63	2.87	1.89	1.45

Tabelle 3-1 bietet eine Auflistung der ausgewählten Regenereignisse. Sie beinhaltet Start- und Endzeitpunkt sowie die Dauer des Ereignisses, den aufsummierten Gesamtniederschlag und den maximal gemessenen Niederschlag im Betrachtungszeitraum. Die Ereignisse 021 und 022 wurden zu einem Ereignis zusammengefasst. Bei Ereignis 029 wurde in der Auswertung der Station Lutz kein Ereignis verzeichnet.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Ermittlung Mittelwert und Fehler Jahresniederschlag

Abbildung 3-1 zeigt die Summenlinien der drei Niederschlagsmessstationen und des Mittelwerts, hier ist ersichtlich, dass Niederschlagsschreiber Karl-Morre (Blau) über den gesamten Betrachtungszeitraum sehr nahe am Mittelwert (oliv) der Messdaten liegt, während Niederschlagsschreiber Klusemann (gelb) und Lutz (rot) erhebliche Abweichungen vom Mittelwert aufweisen. Es zeigt sich, dass vor allem in den niederschlagsreichen Jahreszeiten von Mai bis September, erhöhte Abweichungen bei Klusemann und Lutz auftreten. Dieser Umstand wird in Kapitel 3.2.2 noch genauer erörtert.

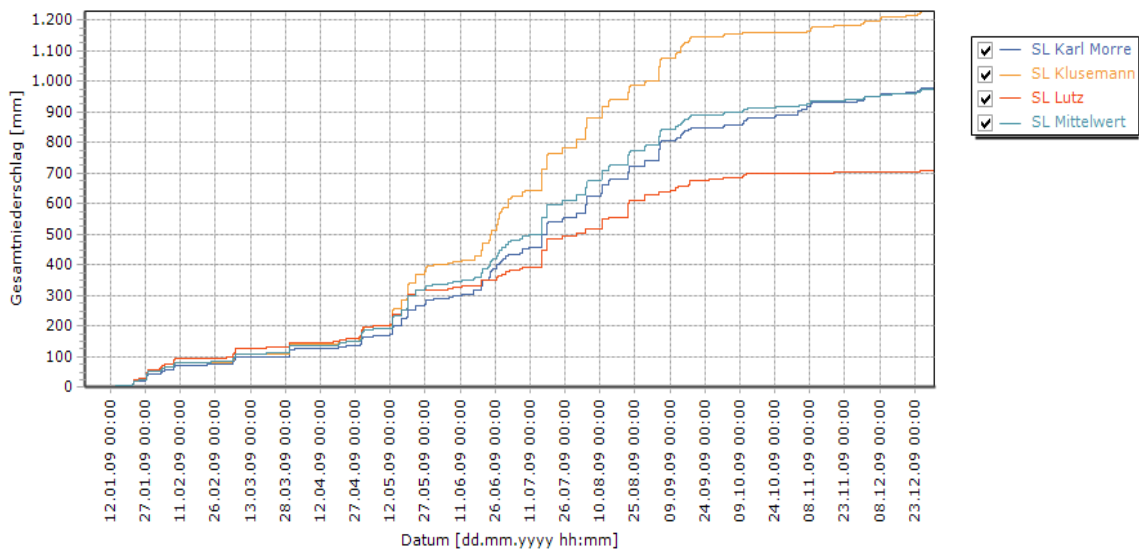


Abbildung 3-1 Vergleich Jahrgangslinie und Mittelwert (2009)

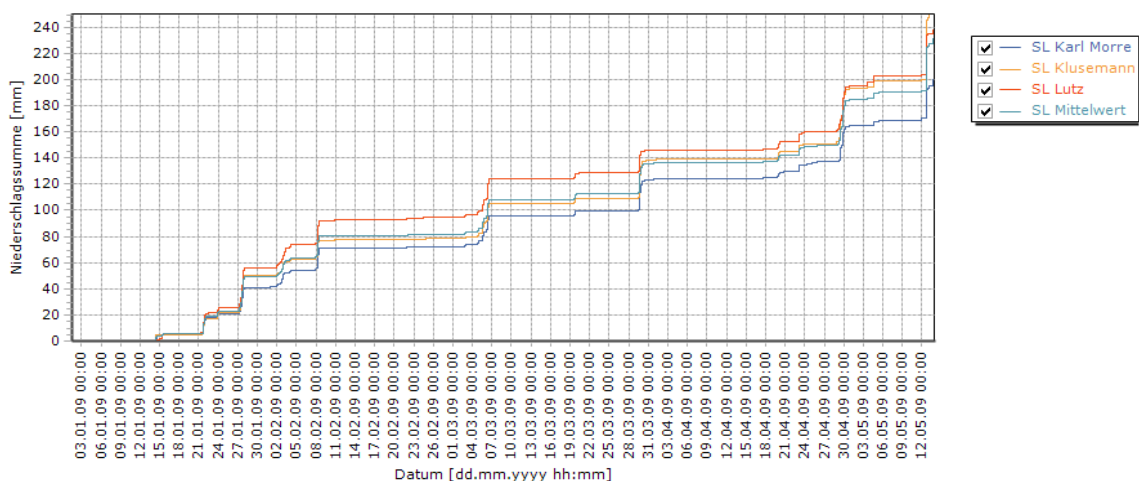


Abbildung 3-2 Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Januar-Mai 2009)

Eine detailliertere Betrachtung dieser Situation ist in den Abbildung 3-2 bis Abbildung 3-5 abgebildet, wo die Summenlinien in Unterschiedlichen Perioden dargestellt sind. Abbildung 3-3 zeigt dass in der niederschlagshäufigeren Zeit die Summenlinien der Messstationen

Klusemann und Lutz deutlich voneinander abweichen, und somit von einer Unregelmäßigkeit der Messdaten der beiden Stationen ausgegangen werden kann. Die Messstation Karl Morre liefert hingegen über das gesamte Jahr Daten die sehr nahe am Mittelwert liegen. In niederschlagsärmeren Perioden weisen die drei Regenschreiber ein relativ ähnliches Ergebnis auf, erst in den Sommermonaten mit häufigeren Niederschlägen und – im allgemeinen - größerer Niederschlagsintensität werden die Abweichungen unter den einzelnen Niederschlagsschreibern größer, nehmen aber in den Herbst- und Wintermonaten wieder ab.

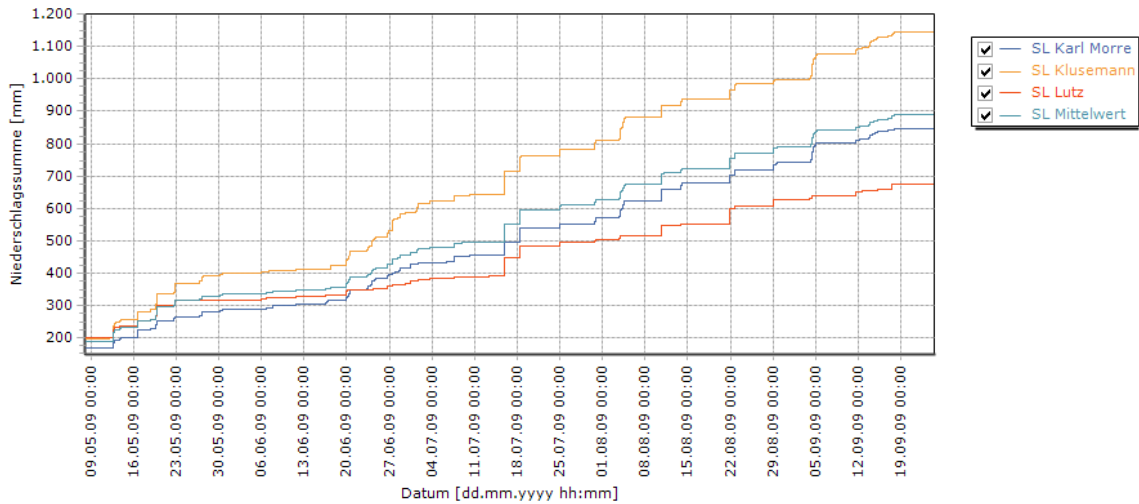


Abbildung 3-3 Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Mai-September 2009)

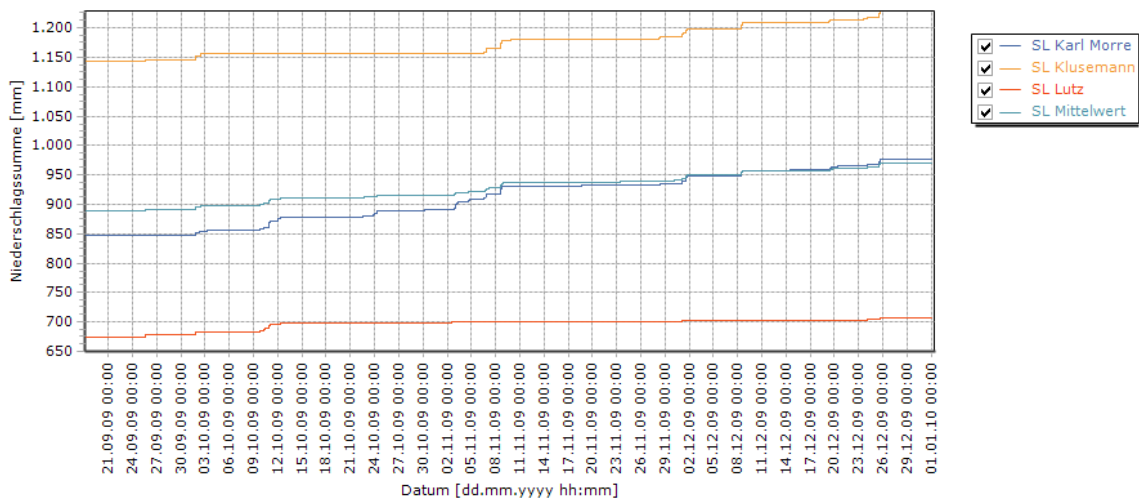


Abbildung 3-4 Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Sep.-Dez. 2009)

In Abbildung 3-5 wird die Jahresgesamtniederschlagssumme der drei Niederschlagsschreiber mit dem Mittelwert verglichen. Wie schon aus der Summenlinie ablesbar, zeigen sich auch hier die erheblichen Abweichungen der Stationen Klusemann und Lutz.

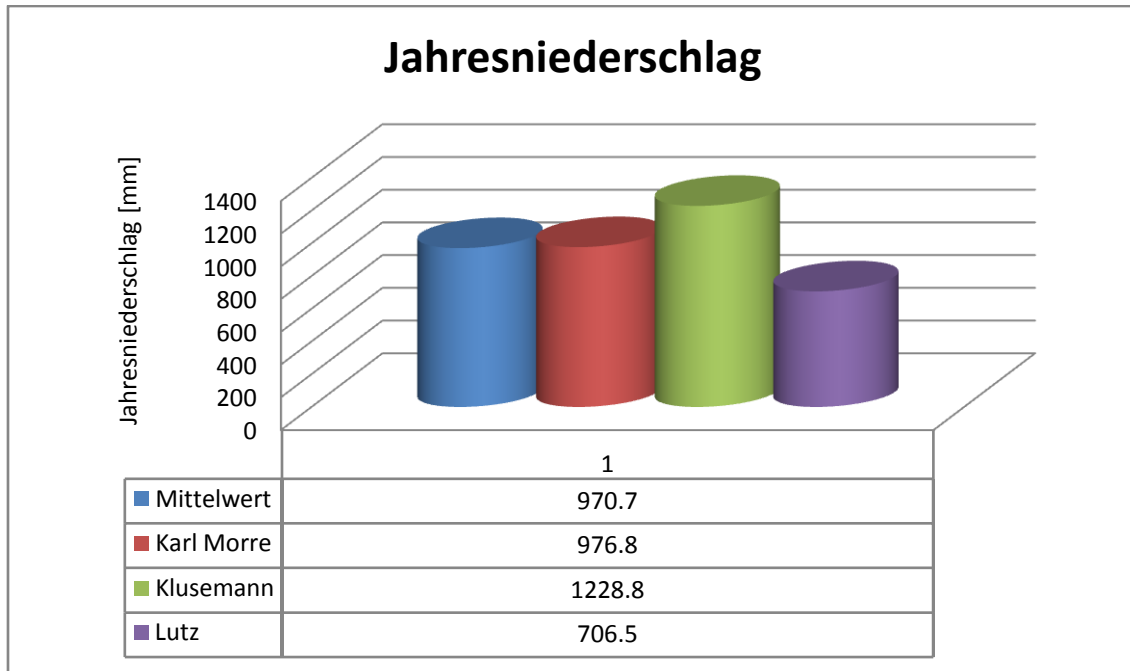


Abbildung 3-5 Vergleich Jahresniederschlag und Mittelwert (2009)

Tabelle 3-2 Fehler aus Jahresniederschlag

Absolutfehler	Rel.Fehler	%-Fehler
[mm]	[-]	[%]
261.2	0.3	26.9

Tabelle 3-2 zeigt, dass der absolute Fehler (Standardabweichung) bei $\pm 261,2$ mm, der relative Fehler bei $\pm 0,3$ und der prozentuale Fehler bei 26,9 % liegen. Diese aus der Jahresniederschlagssumme ermittelten Werte stimmen mit denen in der Literatur angegebenen Größenordnung überein.

3.2.2 Systematischer Fehler Niederschlagsschreiber

Nach den ermittelten Werten aus den Jahresniederschlagssummen sollte der systematische Fehler und die Größenordnung zwischen den einzelnen Niederschlagsschreibern (Karl Morre, Klusemann, Lutz) abgeschätzt werden. Hierzu wurden die positiven und negativen Differenzen der Messwert zum zugehörigen Mittelwert verglichen.

Abbildung 3-6 bis Abbildung 3-8 zeigen in welcher Größenordnung die Messabweichungen der drei Regenschreiber vom Mittelwert liegen. Es zeigt sich hier wieder deutlich, dass in der niederschlagshäufigeren Zeit zwischen Mai und September auch größere Abweichungen auftreten. Des Weiteren kann man den Abbildungen entnehmen, dass die Station Karl Morre relativ gleichverteilte Messungen liefert, hingegen zeichnet die Station Lutz tendenziell zu wenig, und die Station Klusemann tendenziell zu viel Niederschlag auf. Dies belegen auch die Summen der Differenzen in Tabelle 3-3. Die maximale Abweichung eines Messwerts vom Mittelwert liegt bei 5,8 mm, die minimale Abweichung bei 2,9 mm.

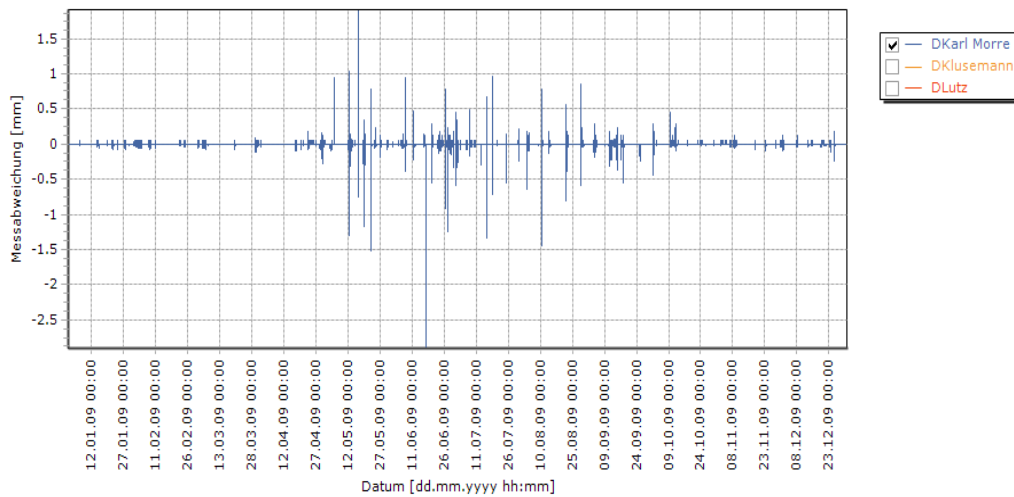


Abbildung 3-6 Messabweichungen vom Mittelwert Station Karl Morre

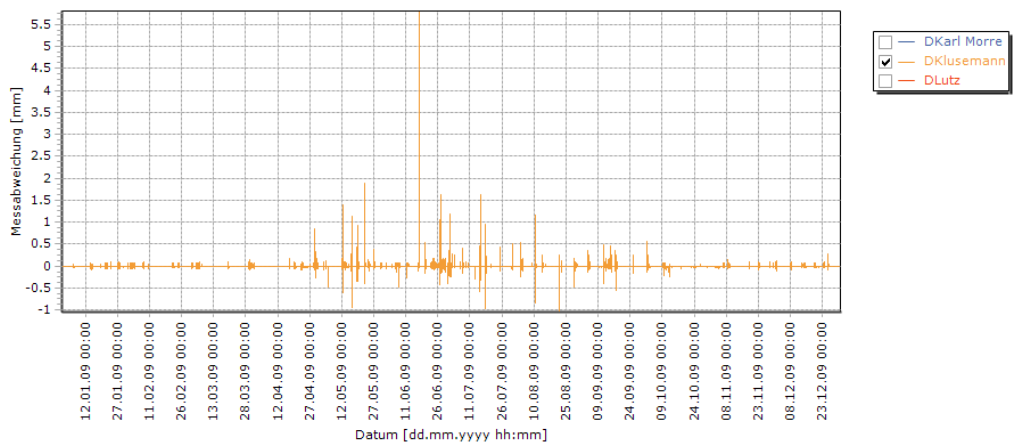


Abbildung 3-7 Messabweichungen vom Mittelwert Station Klusemann

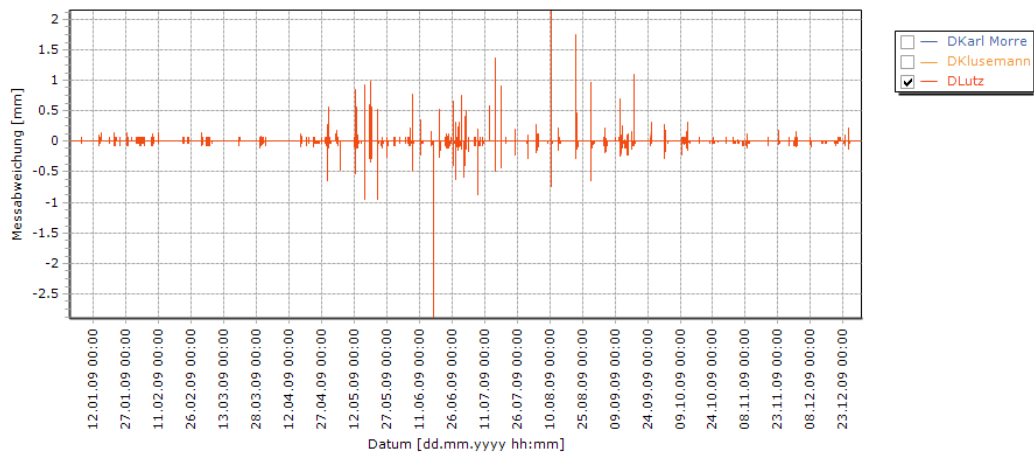


Abbildung 3-8 Messabweichungen vom Mittelwert Station Lutz

Tabelle 3-3 Summe Niederschlagsdifferenzen, Minima und Maxima (2009)

Station	Karl Morre	Klusemann	Lutz
	mm	mm	mm
Summe	6.09	258.1	-264.2
Maximum	1.91	5.81	2.15
Minimum	-2.9	-1.05	-2.9

3.2.3 Ermittlung Mittelwert und Fehler Regenereignisse

Die Messdaten der Regenereignisse wurden auf Basis eines Vergleichs der Niederschlagsstationen einer Unsicherheitsanalyse unterzogen. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3-4 zusammengefasst, die Ereignisse 013 und 028_029 wurden dabei als die markantesten Ereignisse ausgemacht, und sind im Folgenden detailliert beschrieben. Beschreibung unterzogen. Die grafische Darstellung des Vergleichs der übrigen Regenereignisse ist im Anhang zu finden.

Tabelle 3-4 zeigt die Auswertung der drei Messstationen. Man sieht hier sehr deutlich, dass bei einer Niederschlagsmenge von 13-16 mm ein Fehler von rund 13 % auftritt. Dieser Fehler scheint relativ unabhängig von der Dauer des Ereignisses zu sein. Die Ereignisse 21-22 und 28-29 weisen eine im Mittel annähernd gleich Niederschlagsmenge von 34-35 mm und Gesamtdauer rund 15 Stunden auf, die Größenordnung des Fehlers ist jedoch mit einer Differenz von 15 % (21 bzw. 36 %) nicht vergleichbar, dies zeigt dass der Fehler der Messungen mit steigender Niederschlagsmenge zunimmt.

Tabelle 3-4 Mittelwert und Fehler Regenereignisse

Ereignis	Mittelwert	KAMO	KLUS	LUTZ	Stabw	Rel. Fehler	%- Fehler	Gesamt -dauer	mittlerer Niederschlag
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[%]	min	mm/min
Ereignis 2009_002	13.2	12.4	12.0	15.2	1.8	0.14	13.6	1008	0.0131
Ereignis 2009_004	26.3	20.2	28.5	30.2	5.3	0.20	20.2	1248	0.0211
Ereignis 2009_008	16.4	16.6	14.2	18.5	2.2	0.13	13.4	1031	0.0159
Ereignis 2009_013	14.2	12.2	14.2	16.1	1.9	0.13	13.4	702	0.0202
Ereignis 2009_015	22.5	22.6	28.6	16.4	6.1	0.27	27.1	1335	0.0169
Ereignis 2009_021_022	34.2	27.2	41.6	33.9	7.2	0.21	21.1	932	0.0367
Ereignis 2009_028_029	35.6	25.1	50.1	31.6	13.0	0.37	36.5	899	0.0396
Ereignis 2009_032	25.6	25.7	31.0	20.2	5.4	0.21	21.1	1738	0.0147

Abbildung 3-9 zeigt den Vergleich des mittleren Niederschlags im Einzugsgebiet und den in Tabelle 3-4 ermittelten relativen Fehler. Der mittlere Niederschlag wurde aus dem Mittelwert der Niederschlagssummen, dividiert durch die Gesamtdauer des Ereignisses, gebildet. Die Gesamtdauer des Ereignisses ist nicht jene Dauer in der ein Messgerät Daten aufzeichnet, wie in Tabelle 3-1 aufgelistet, sondern die tatsächliche Dauer von der ersten bis zur letzten Messung aller Messeinrichtungen. Der Vergleich dieser beiden Wert zeigt keinen Anstieg

des relativen Fehler mit ansteigendem mittlerem Niederschlag, bestätigt jedoch erneut eine relative hohe Aussagekraft bis zu Niederschlagsmengen von 13-16 mm.

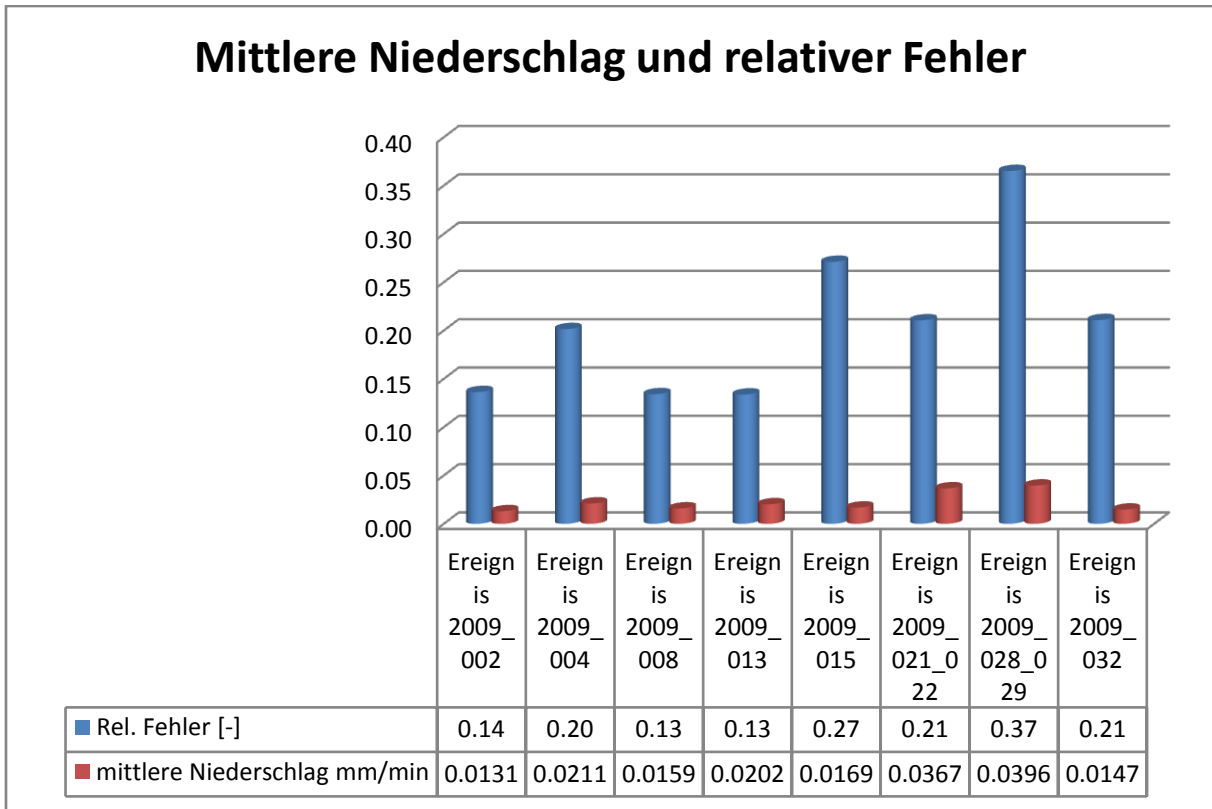


Abbildung 3-9 Mittlere Niederschlag und relativer Fehler

Die Auswertung der Niederschlagsereignisse 013 und 028_029 lieferten die minimal und maximal auftretenden Fehler der betrachteten Regenereignisse. Der minimale auftretende Fehler von 13,38 % in Ereignis 013, ist auf einen regelmäßigen Niederschlag im gesamten Betrachtungsgebiet zurückzuführen.

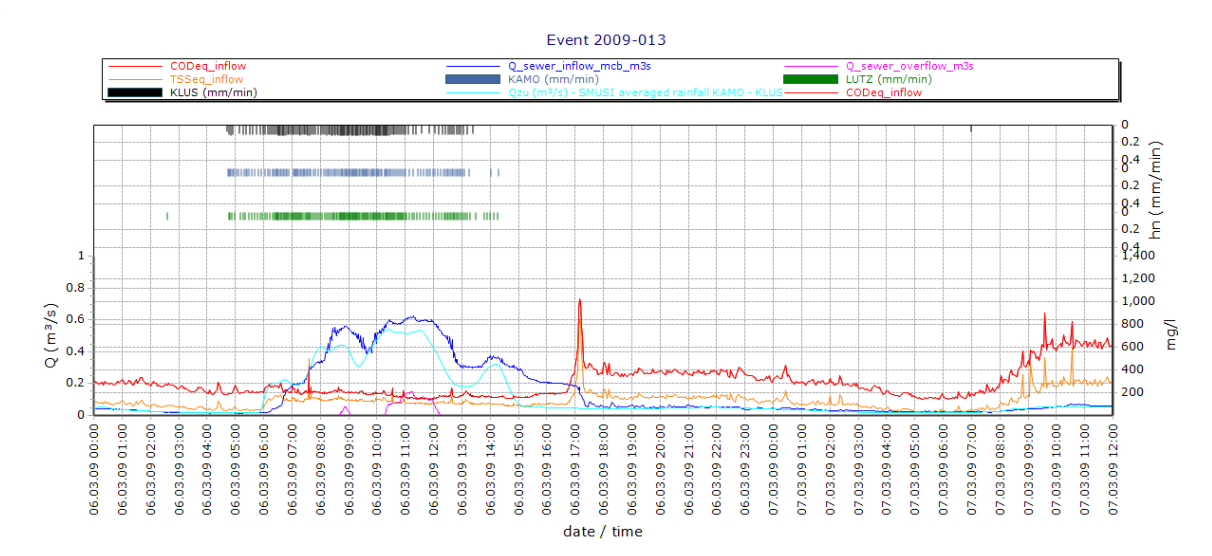


Abbildung 3-10 Darstellung der Abflussganglinien und Niederschlag Ereignis 013

Abbildung 3-10 zeigt die gemessenen Ganglinien für den Zufluss (blau), den Abfluss über den Entlastungskanal (magenta), und die Aufzeichnungen der drei Regenmessstationen in (schwarz, grün, dunkelblau) sowie den simulierten Abfluss aus dem hydrologischen Modell

(cyan). Die Aufzeichnung der Messstationen beginnt annähernd zum gleichen Zeitpunkt, der Niederschlag ist über die gesamte Periode in der gleichen Größenordnung, und liefern daher relative gute Ergebnisse. Abbildung 3-11 zeigt den Vergleich der Niederschlagssummen über die Dauer des gesamten Regenereignisse und ihren Mittelwert.

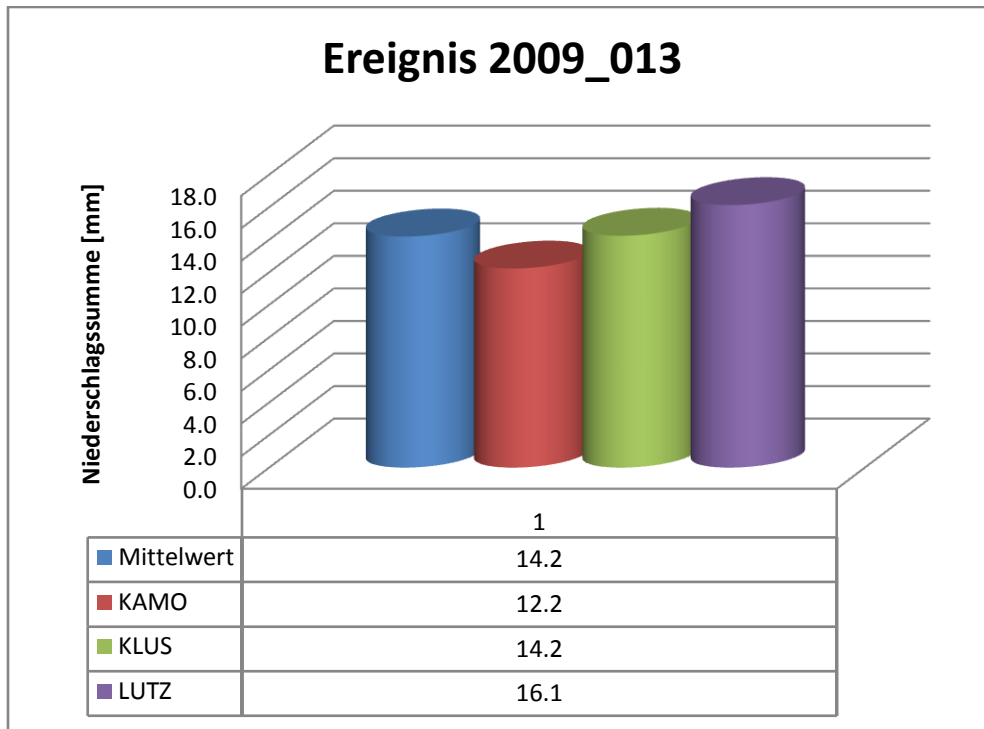


Abbildung 3-11 Vergleich Niederschlagssummen und Mittelwert Ereignis 2009_013

Abbildung 3-12 zeigt das Regenereignis 028_029, welches als starkes Regenereignis eingeordnet werden kann. Man erkennt deutlich, dass es sich um ein, über das Einzugsgebiet, ziehendes Regenereignis handelt, da die Aufzeichnungen an den Regenmessstationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten einsetzt.

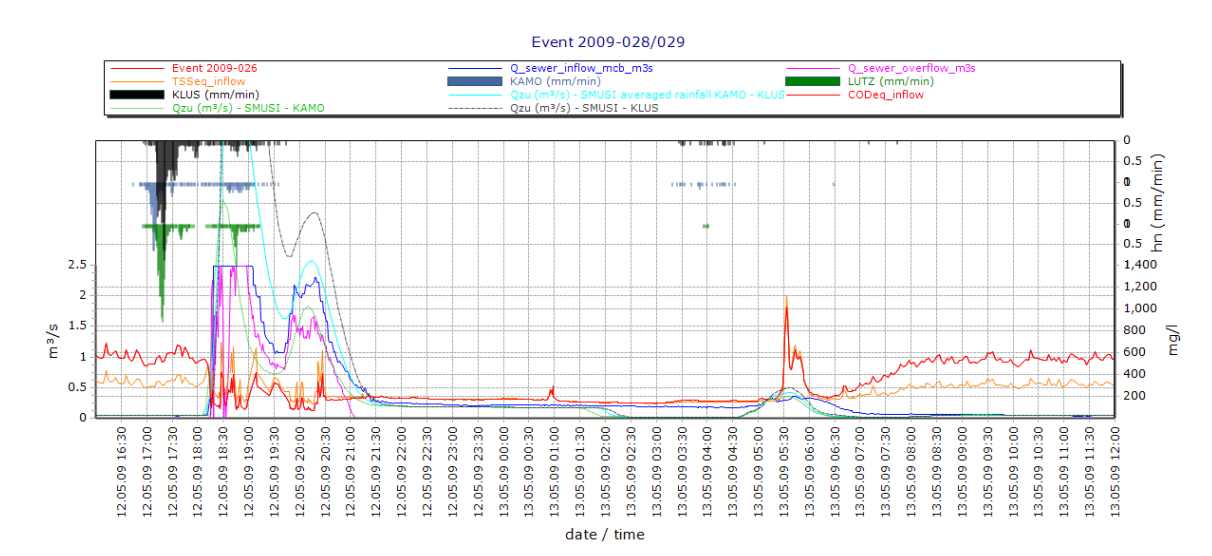


Abbildung 3-12 Darstellung der Abflussganglinien und Niederschlag Ereignis 028_029

Die Niederschlagsspitzen zu Beginn zeigen dass die Messstation Karl Morre deutlich geringere Werte aufgezeichnet an, und zusätzlich um 18:45 Uhr ein erhöhter Niederschlag im Bereich der Station Lutz aufgetreten ist. Der Vergleich der Niederschlagssummen in Abbildung 3-13 zeigt große Abweichungen vom Mittelwert. Die Messstation Klusemann zeichnete bei diesem Ereignis rund den doppelten Niederschlag im Vergleich zur Messeinrichtung Lutz.

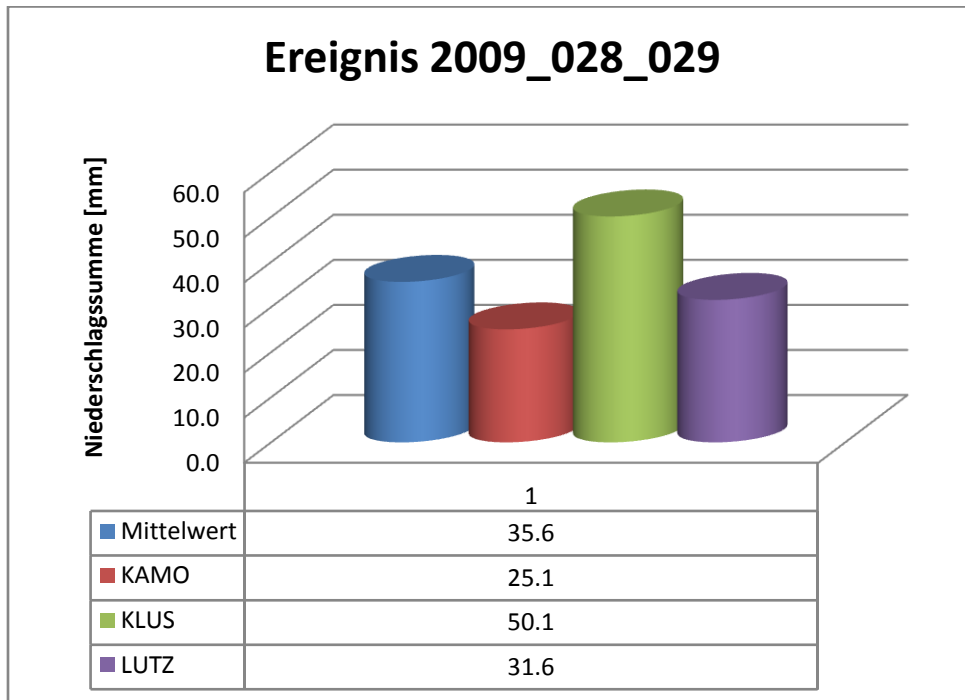


Abbildung 3-13 Vergleich Niederschlagssummen und Mittelwert Ereignis 2009_028_029

Bei diesem Ereignis wird deutlich, dass eine ungleichmäßige Überregnung starken Einfluss auf den gemessenen Regen hat. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Modellierung, wo dieses Phänomen oft unberücksichtigt bleibt.

4 Annahmen und Auswertung Abfluss- und Höhen-standsmessungen

Die Auswertung der gemessenen Daten für die Abfluss- und Höhenstandsmessung wurde separat für den Zulaufkanal und den Entlastungskanal durchgeführt, und mit den Daten der Simulation aus dem hydrologischen Modell verglichen. Die Zuflussmessung erfolgt durch das Gerät FLO-DAR der Firma Marsh-McBirney®, Die Messungen für die Entlastung durch das Gerät OCM Pro der Firma Nivus®. Die Auswertung wurde an den acht selben Ereignisse (002-032) wie in Kapitel 3 durchgeführt. Es wurden die im fünf Minutentakt gemessenen Werte mit den Simulationsergebnissen für das Einzugsgebiet verglichen. Hierbei sei erwähnt, dass das Modell ausschließlich für den Zulauf und nicht für die Entlastung durchgeführt wurde. Die ermittelten Ergebnisse wurde grafisch in Form von Ganglinien und Summenlinien samt den angenommenen Abweichung dargestellt.

4.1 Auswertung Zulaufdaten

Die Messungenauigkeiten der Messstation im Zulauf wurden anhand der Herstellerangaben mit $\pm 5\%$ angenommen, und die Ganglinien und Summenlinien zuzüglich der Abweichung bezogen auf die Messwert ausgewertet. Die angenommenen 5 % gelten unter stationären Bedingungen und im Freispiegelabfluss. Im regulären Betrieb sind daher höhere Abweichungen zu erwarten.

Gang- und Summenlinien wurden wie folgt dargestellt:

- Simulation (rot)
- Messergebnisse (blau)
- Messungenauigkeit (grau)

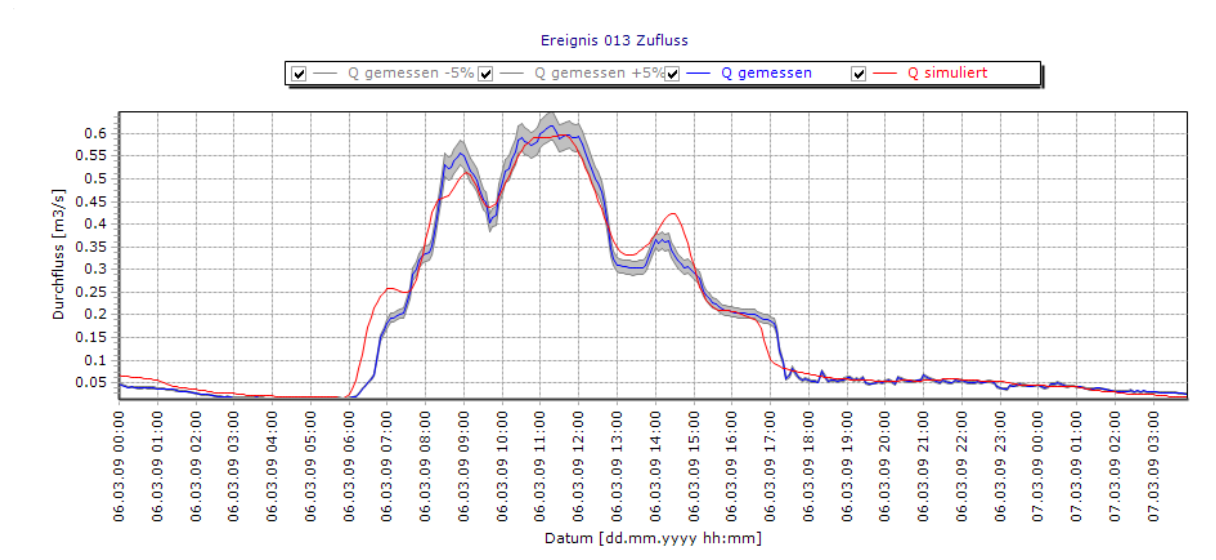


Abbildung 4-1 Ereignis 013 Ganglinie Zufluss

Abbildung 4-1 zeigt die Ganglinie der Simulationsergebnisse (rot) und die Messreihe (blau) sowie den Abweichungsbereich (grau) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Simulationsmodell bei geringen Abflüssen sehr genau mit den Messwerten kalibriert wurde. Vor allem bei raschem Anstieg und Absinken des Zuflusses weichen Simulation und

Messreihe von einander ab. Die Darstellung der Summenlinien in Abbildung 4-2 zeigt eine relativ gute Kalibrierung des Simulationsmodells über die Dauer des gesamten Ereignisses. Das Simulationsmodell liegt in Summe etwas über den Messwerten, wird aber von den angegebenen Messfehlern des Gerätes abgedeckt.

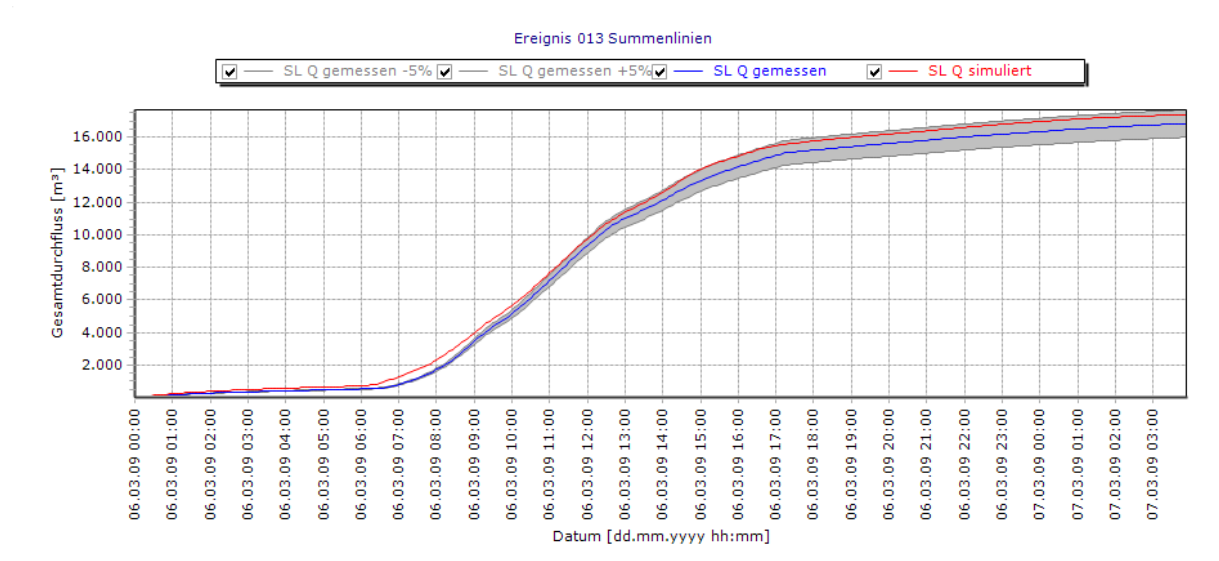


Abbildung 4-2 Ereignis 013 Summenlinie Zufluss

Der vom Messgerät maximal messbare Durchfluss liegt bei rund $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, dieser Wert wurde, höhere Zuflüsse konnten auf Grund der für die analoge Anbindung zum Mess-PC gewählten Einstellungen nicht aufgezeichnet werden. Diese Information erklärt die erheblichen Abweichungen der Simulation von den Messwerten, dargestellt in Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4. Bei Überschreitung der Messgrenze werden in den Messdaten NaN (not a number) Werte verzeichnet. Im Zuge der Auswertung und in den Darstellungen wurden diese Werte durch den Wert Null ersetzt. Ereignisse dieser Art liefern keine ausreichend genaue Information über die Qualität der Kalibrierung des hydrodynamischen Modells, da kein Vergleich durchgeführt werden kann.

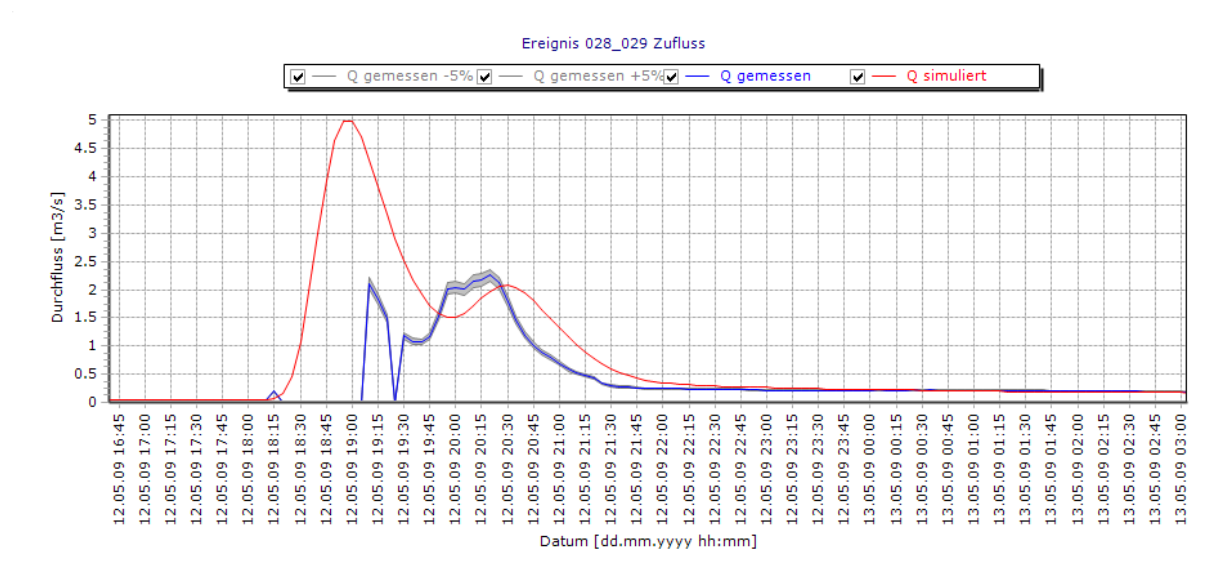


Abbildung 4-3 Ereignis 028_029 Ganglinie Zufluss

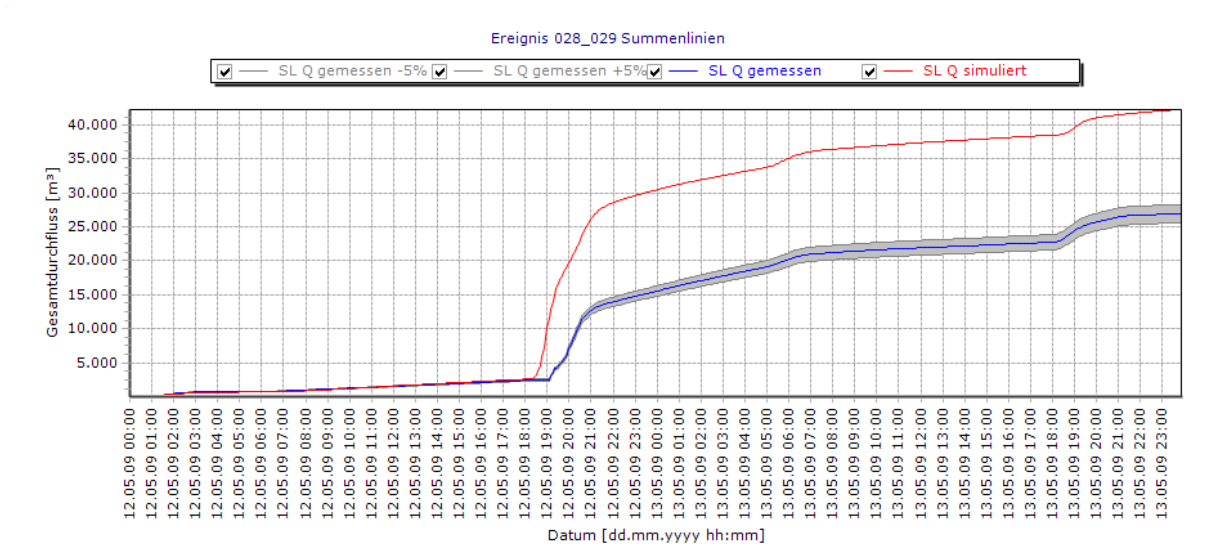


Abbildung 4-4 Ereignis 028_029 Summenlinie Zufluss – Verfälschung durch NaN Werte

Tabelle 4-1 zeigt einen Überblick über die ausgewählten Ereignisse und gibt Aufschluss über die Aussagekraft der Auswertung auf Grund von nicht messbaren Zuflussmessungen.

Tabelle 4-1 Aussagekraft der Ereignisse

Ereignis	Fehler im Messwert	Aussagekraft
002	Nein	Ja
004	Nein	Ja
008	Nein	Ja
013	Nein	Ja
015	Nein	Ja
021_022	Nein	Ja
028_029	Ja	Nein
032	Ja	Nein

Die Auswertungen der Ereignisse (002, 004, 008, 015, 021_22, 032) sind im Anhang angeführt.

4.2 Auswertung Entlastungsdaten

Die Messungenauigkeiten der Messstation im Entlastungskanal wurden in einer ersten Auswertung anhand der Herstellerangaben mit ± 1 % angenommen. Diese Annahme scheint unter den tatsächlichen Bedingungen nicht realistisch. Aus diesem Grund wurde eine Auswertung der Messergebnisse mit Abweichungen von ± 5 % und ± 10 % durchgeführt, und mit den Daten des hydrologischen Modells verglichen.

Dabei ist wichtig festzuhalten, dass das hydrologische Modell bisher nur auf den Zulauf und nicht auf den Entlastungsabfluss kalibriert wurde. Die Resultate zeigen eindeutig, dass eine weitere Kalibrierung des Modells auf die Überlaufcharakteristik notwendig ist.

Gang- und Summenlinien wurden wie bei der Auswertung des Zuflusses folgend gefärbt:

- Simulation (rot)
- Messergebnisse (blau)
- Messungenauigkeit (grau)

In Abbildung 4-5 sind die Ganglinien der Simulation (rot) und der Messdaten (blau) aus dem Entlastungskanal für das Regenereignis 002 dargestellt. Es ist ersichtlich dass die Abweichung zwischen gemessenen Werten und dem hydrologischen Modell bei rund 1000% liegen. Noch drastischer zeigt sich die Abweichung in Abbildung 4-6. Diese zeigt die Summenlinien der beiden Datenreihen. während der gemessene Gesamtabfluss bei 10 m³ liegt, wurde in der Simulation ein Wert von 1450 m³ ermittelt.

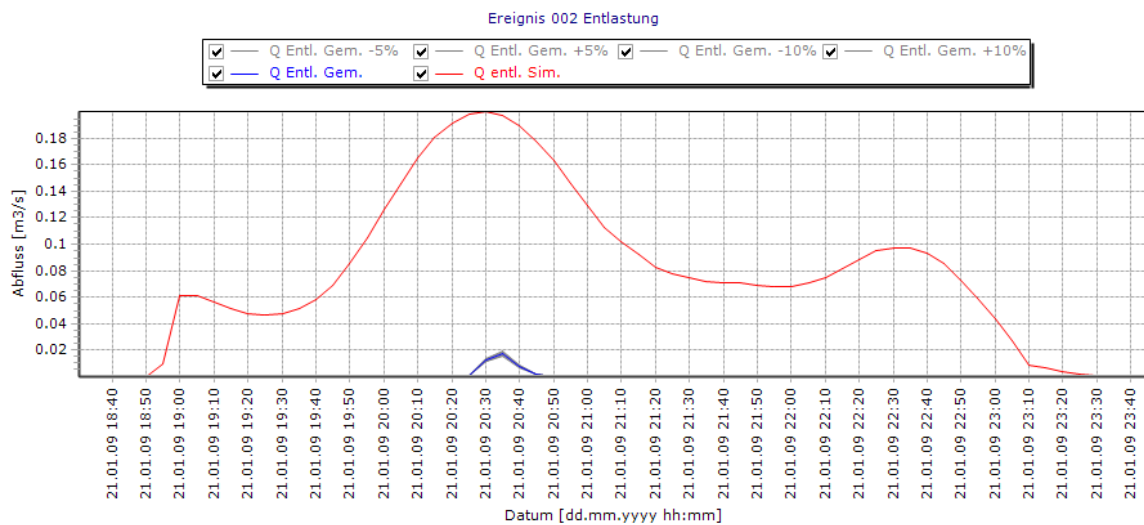


Abbildung 4-5 Ganglinie Ereignis 002

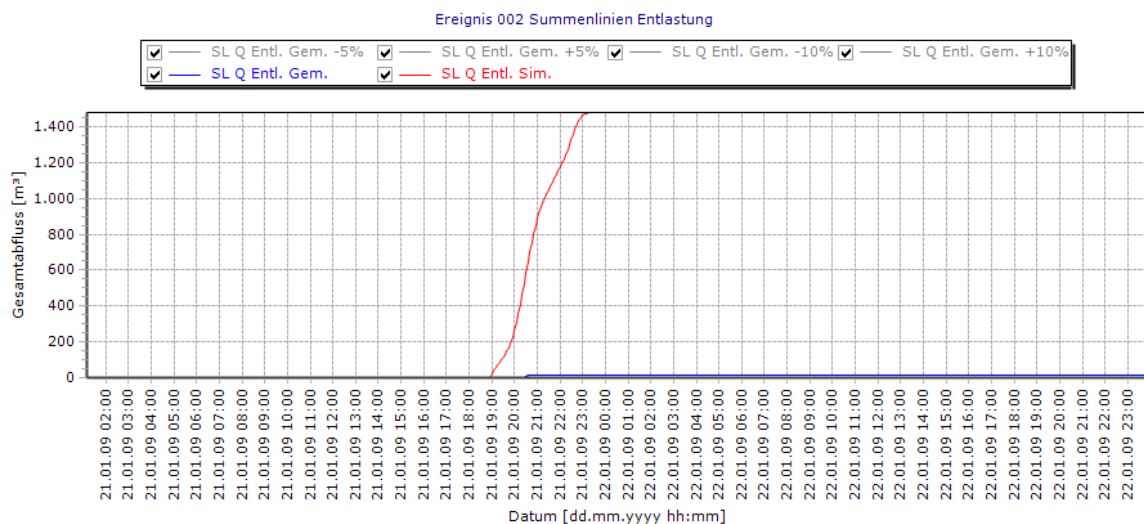


Abbildung 4-6 Summenlinie Ereignis 002

Abbildung 4-7 zeigt die Ganglinie des Regenereignis 015. Die Messeinrichtung im Entlastungskanal zeichnete einen Abfluss von bis zu 0,7 m³/s auf. Auch in der Simulation

konnte ein maximaler Abfluss von 0,65 m³/s ermittelt werden. Die Summenlinien des Ereignis 015 sind in Abbildung 4-8 dargestellt, es zeigt sich dass die Abweichungen über die gesamte Dauer des Ereignisses im Bereich von 10 % liegen, erst am Ende des Ereignisses kommt es zu Abweichungen größer 10 %.

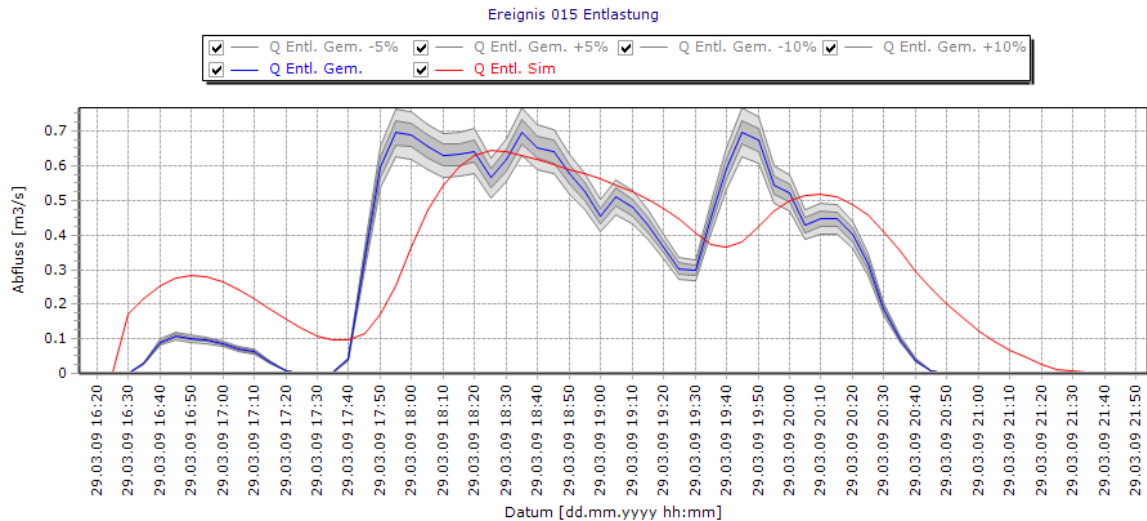


Abbildung 4-7 Ganglinie Ereignis 015

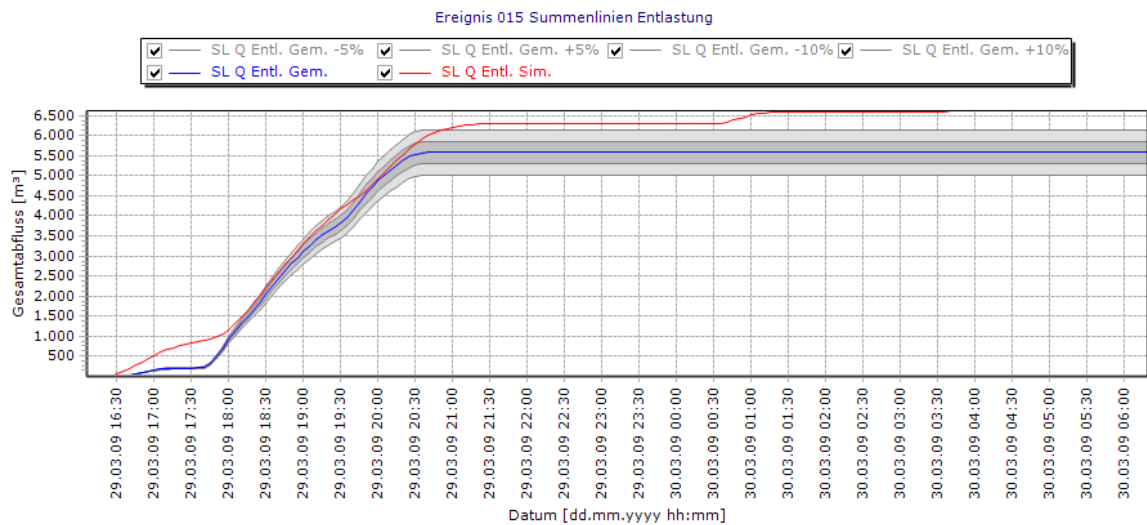


Abbildung 4-8+Summenlinie Ereignis 015

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Literaturrecherche zum Thema Unsicherheiten und Fehler durchgeführt. Zum besseren Verständnis wurden die verschiedenen Arten von Fehlern zusammengefasst und Methoden zur Erkennung ihres Ursprungs beschrieben. Daran anschließend wurde das Einzugsgebiets, die darin installierten Messeinrichtungen und ihre Funktionsweise beschrieben. Als Abschluss der theoretischen Ausarbeitung wurde ein Überblick über die in der Literatur angegebenen Wert der Fehler für Grundlagendaten, im speziellen Flächenkenngößen, Bauwerkskenngößen, Abfluss und Niederschlagsmessungen erarbeitet.

Weiters wurden die Messdaten aus dem des Einzugsgebiet "Graz-West" auf Unsicherheiten untersucht. Ziel war es, die gemessene Daten mit jenen des hydrologischen Modells des Einzugsgebiets zu vergleichen, um die Güte der vorangegangenen Kalibrierung des Modells unter Berücksichtigung der Messfehler abschätzen zu können. Die zur Verfügung gestellten Daten, aus drei Niederschlagsmessstationen, den Zuflussmessungen und den Abflussmessungen im Entlastungskanal der Kanal-Online-Messstation, wurden auf Aufzeichnungsfehler der Messstation untersucht, dementsprechend adaptiert und im Anschluss einer Unsicherheitsanalyse unterzogen. Die drei Niederschlagswippen wurden auf Abweichung im Betrachtungszeitraum für das gesamte Jahr 2009, acht ausgewählten Regenereignissen und auf systematische Fehler untersucht. Die Ereignisse wurden grundsätzlich so ausgewählt, dass eine möglichst gleichmäßige Überregnung des Gebiets zu erwarten war. An Hand eines ausgewählten Ereignisses wurde auch der Einfluss einer lokal ungleichmäßigen Überregnung dargestellt.

Die Auswertung der Niederschlagsdaten der drei Messstationen zeigt Abweichung der drei Stationen von rund 27 % für das Jahr 2009. Die Abweichungen bei den betrachteten Regenereignissen lagen bei 13,4 % im Minimum und bei 36,5 % im Maximum. Es stellte sich heraus dass die Geräte bei schwächeren Ereignissen verlässlicher arbeiten bzw. einheitlicher aufzeichnen als bei kurzen starken Ereignissen. Bei der bestehenden Kalibrierung weisen die Messstationen eine Abweichung in der Größenordnung der in der Literatur angegebenen Werte auf. Die großen Abweiche der Messstationen untereinander beruhen – auf Basis der durchgeführten Auswertungen - hauptsächlich auf systematischen Fehlern und könnten somit durch eine verbesserte Kalibrierung minimiert werden. Im Jahr 2009 zeichnete die Station Klusemann + 258 mm und die Station Lutz - 264 mm Jahresniederschlag im Vergleich zum Mittelwert der drei Stationen auf. Der absolute Fehler der Messreihe betrug etwa ± 260 mm/a. Die Auswertung der Regenereignisse brachte den kleinsten Absolutfehler in Ereignis 002 mit $\pm 1,8$ mm und den größten in Ereignis 028_029 mit $\pm 13,00$ mm.

Die Auswertung der Messdaten der Zuflussmessung und dem Entlastungskanals und der Vergleich der Daten mit dem hydrodynamischen Modell zeigt, dass die durchgeführte Kalibrierung des des Modells im Bereich des Zuflusses relativ gute Ergebnisse aufweist. Die in der Kalibrierung variierten Flächen- und Bauwerkskenngößen werden durch die von der Kanal-Online Messstation aufgezeichneten Daten plus den dem Gerät zugeschrieben Abweichungen, laut Hersteller, von 5 % großteils abgedeckt, und liefern für das Einzugsgebiet "Graz West" eine gute Aussagekraft. Zuflüssen über $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ konnten durch die aktuellen an der Messstation nicht erfasst werde. Dadurch konten Ereignisse mit höherem Abfluss auch nicht für die Bewertung herangezogen werden- lieferten sehr

ungenauere Ergebnisse, und könnten durch ein leistungsfähigeres Messinstrument besser abgebildet werden.

Der Vergleich der Messdaten des Entlastungskanals mit der Simulation lieferte unzureichende Ergebnisse. Bei geringen Abflüssen im Entlastungskanal lagen die Abweichungen weit über den angenommenen $\pm 10\%$ und stimmen somit auch nicht mit denen in der Literatur angegebenen Werten überein. Die Werte aus der Simulation lagen immer über gemessenen Werten. Eine Kalibrierung des hydrologischen Modells auf den Entlastungsabfluss ist auf jeden Fall noch durchzuführen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die Unsicherheiten in den Regendaten im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte liegen. Der Vergleich der Daten aus der Simulation mit einem hydrologischen Modell zeigte, dass im Zulauf eine relativ gute Übereinstimmung vorhanden ist, für den Entlastungsabfluss aber noch deutlicher Bedarf für eine Modellkalibrierung besteht.

Die in der Arbeit dargestellten Methoden und die durchgeführten Auswertungen können zukünftig auch als Basis für detailliertere Betrachtung der Unsicherheiten in den vorhandenen Modellen – also über die Unsicherheit der Grundlagendaten hinausgehend – herangezogen werden.

6 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Beeinflussende Komponenten (Reichert H., 2004)	3
Abbildung 2-2	Arten von Messfehler (Reichert H., 2004)	4
Abbildung 2-3	zeitlich konstante Messfehler (Reichert H., 2004)	4
Abbildung 2-4	Übersicht der Fehlerarten aus Gujer, W. (2008, nach Thomann (2002)), modifiziert	5
Abbildung 2-5	Systematischer Fehler (www.statistics4u.info, 2008)	6
Abbildung 2-6	Ursachen von Messfehlern (Reichert H., 2004)	7
Abbildung 2-7	Verfahren zur Bestimmung der Parametervektoren aus den Verteilungsfunktionen (Reichhert P., 2009).....	11
Abbildung 2-8:	Lage des Einzugsgebietes "Graz West" (nach Haring, 2004)	17
Abbildung 2-9:	Ausschnitt einer Überlagerung Orthofoto, Flächenwidmung und Kanalkataster des Einzugsgebiet (Gamerith <i>et al.</i> , 2008).....	18
Abbildung 2-10:	Positionen der Regenmessstationen (Haring, 2004, modifiziert)	19
Abbildung 2-11:	Detaillierter Aufbau einer Niederschlagswippe (Thaler, 2004)	20
Abbildung 2-12:	Übersicht über die Mess- und Überwachungssysteme in der Kanal- Monitoring-Messstation Graz (Gruber <i>et al.</i> , 2004)	21
Abbildung 2-13:	Messgerät FLO-DAR (www.flow-tronic.com, 2010)	22
Abbildung 2-14:	Ponton in der Mischwasserüberlaufkammer (Gruber <i>et al.</i> , 2004)	23
Abbildung 3-1	Vergleich Jahresganglinie und Mittelwert (2009)	34
Abbildung 3-2	Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Januar-Mai 2009) ...	34
Abbildung 3-3	Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Mai-September 2009)	35
Abbildung 3-4	Vergleich Niederschlagssummenlinie und Mittelwert (Sep.-Dez. 2009)	35
Abbildung 3-5	Vergleich Jahresniederschlag und Mittelwert (2009).....	36
Abbildung 3-6	Messabweichungen vom Mittelwert Station Karl Morre.....	37
Abbildung 3-7	Messabweichungen vom Mittelwert Station Klusemann	37
Abbildung 3-8	Messabweichungen vom Mittelwert Station Lutz	37
Abbildung 3-9	Mittlere Niederschlag und relativer Fehler	39
Abbildung 3-10	Darstellung der Abflussganglinien und Niederschlag Ereignis 013	39
Abbildung 3-11	Vergleich Niederschlagssummen und Mittelwert Ereignis 2009_013.....	40
Abbildung 3-12	Darstellung der Abflussganglinien und Niederschlag Ereignis 028_029	40
Abbildung 3-13	Vergleich Niederschlagssummen und Mittelwert Ereignis 2009_028_029.	41
Abbildung 4-1	Ereignis 013 Ganglinie Zufluss	42
Abbildung 4-2	Ereignis 013 Summenlinie Zufluss.....	43
Abbildung 4-3	Ereignis 028_029 Ganglinie Zufluss	43
Abbildung 4-4	Ereignis 028_029 Summenlinie Zufluss – Verfälschung durch NaN Werte	44
Abbildung 4-5	Ganglinie Ereignis 002	45
Abbildung 4-6	Summenlinie Ereignis 002	45
Abbildung 4-7	Ganglinie Ereignis 015	46
Abbildung 4-8+	Summenlinie Ereignis 015.....	46
Tabelle 2-1:	Produktinformation FLO-DAR (www.flow-tronic.com, 2010)	22
Tabelle 2-2:	Gemessene Parameter der Kanal-Online-Messstation Graz (Veit J.,2009) ...	23
Tabelle 2-3	Klassifizierung der Messgenauigkeit bei Lage- und Höhenvermessungen nach DIN 18710-1 (1998)	26

Tabelle 2-4:	Literaturangaben zu Größenordnungen der systematischen Fehler von Niederschlagsmessungen mit Wippensystem (Hoppe H.,2006).....	28
Tabelle 2-5	Beispiele für Abweichungen von Volumenstrommessungen in Kanalisationsnetzten (Hoppe H., 2006).....	32
Tabelle 3-1	Auflistung der betrachteten Ereignisse	33
Tabelle 3-2	Fehler aus Jahresniederschlag.....	36
Tabelle 3-3	Summe Niederschlagsdifferenzen, Minima und Maxima (2009)	38
Tabelle 3-4	Mittelwert und Fehler Regenereignisse	38
Tabelle 4-1	Aussagekraft der Ereignisse.....	44

7 Literaturverzeichnis

Brosius, F. (2002) *SPSS 11*. mitp. Verlag Bonn

Dallwig, H.-J. (1988) *Abwasserdurchflussmessung Anforderungen, Möglichkeiten und Realität*. Technische Berichte über Ingenieurhydrologie und Hydraulik, Institut für Wasserbau, Technische Hochschule Darmstadt.

DIN 18710-1 (1998) *Ingenieurvermessung Teil 1:Allgemeine Anforderungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Dudey, J. (2002) *Vorgehensweise und Auswirkungen der Einführung einer gesplitteten Abwassergebühr für Schmutzwasser und Regenwasser, der gemeindehaushalt (2002)*, Nr.10, Internet: http://www.pecher.de/relaunch/pecher_website/upload/Joachim_Dudey_2002a.pdf (08.03.2005)

Dyck, S. und Peschke, G. (1995) *Grundlagen der Hydrologie*, Verlag Bauwesen Berlin, 3. Auflage

Emschergenossenschaft/Lippeverband (2004) *Arbeitshilfe für die Durchführung von Kanalnetzberechnungen bei der Emschergenossenschaft/Lippeverband*, Emschergenossenschaft/Lippeverband, Essen.

FLOW-TRONIC S.A./N.V.(2010) <http://www.flow-tronic.com/portal/downloads/PDF/D%20TECSPEC%20FLO-DAR4000.pdf>, (6.5.2010).

Fuchsberger, M. (2009) *Erweiterung des Einzugsgebiets Graz West - Datenerhebung, Datenvalidierung und Modellbildung*. Bachelor-Projekt, TU Graz, Graz, Österreich.

Gamerith, V., Muschalla, D., Schneider, S., Gruber, G. und Sprung, W. (2008) *Hydrologische Schmutzfrachtmodellierung des Einzugsgebiets Graz West*. *Wiener Mitteilungen - Wasser, Abwasser, Gewässer* 209(Kanalmanagement 2008 - Betrieb und Mischwasser), K1-K15.

Gruber, G., Hochedlinger, M. und Kainz, H. (2004) *Quantifizierung von Schmutzfrachten aus Mischwasserentlastungen mit Online-Messtechnik*. *Wiener Mitteilungen - Wasser, Abwasser, Gewässer* 187(Datengewinnung, -verwaltung und -nutzung in der Wassergütewirtschaft), 93-118.

- Gujer, W. (2008) *System Analysis for Water Technology*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Haring, P. (2004) *Modellierung von Entlastungsfrachten an einem Mischwasserüberlaufbauwerk am Beispiel Graz - West*. Diploma thesis, TU Graz, Graz.
- Hoppe, H., Weilandt, M. und Berkhoff, H.-G. (2002) *Einsatz von Tracern zur Kontrolle von Volumenstrommessungen*, Schriftreihe Siedlungswasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum.
- Hoppe, H. (2006) *Unsicherheiten von Grundlegendaten im Rahmen integrierter Planungen urbaner Abwasserentsorgungssysteme*, Gesellschaft zur Förderung des Lehrstuhls für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik (LSU), Ruhr-Universität Bochum.
- Kainz, H. und Kauch, P. (2007) *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft*, ©MANZ Verlag Schulbuch GmbH, Wien.
- Kreuls, R. (1988) *Repräsentativität und Genauigkeit von Regenmess-Systemen*, Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz (SUG)
- La Barbera, P. , Lanza, L. G. und Stagi, L. (2002) *Tipping bucket mechanical errors and their influence on rainfall statistics and extremes*, Water Science and Technology, Vol. 45.
- Mainak, U. (1995) *Hydrologie und Wasserwirtschaft*, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, Germany.
- Maksimović, Č. , Bužek, L. und Petrović, J. (1991) *Corrections of rainfall data obtained by tipping bucket rain gauge*, Atmospheric Research, Vol. 27.
- Marsalek, J. (1981) *Calibration of the tipping-bucket rain gauge*. *Journal of Hydrology* 53(3-4), 343-354.
- Muschalla, D., Ostrowski, M.W., Pereira, C. and Schneider, S. (2006) *Dokumentation des Schmutzfrachtmodells SMUSI Version 5.0*, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

- Muschalla, D., Klawitter, A. und Ostrowski, M.W. (2008) *Vorlesungsunterlagen Ingenieurhydrologie 3*, ihwb - Institut fuer Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany.
- Niemczynowicz, J. (1986) *The dynamic calibration of tipping-bucket raingauges*, Nordic Hydrology, Vol. 17.
- NIVUS GmbH (2010) http://www.nivus.de/ximages/144845_okcpra4.pdf, (6.5.2010).
- OEWAV (2007) ÖWAV - Regelblatt 19 - *Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen*, p. 47, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Vienna, Austria.
- OEWAV (2009) ÖWAV - Regelblatt 11 - *Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen*, p. 97, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Vienna, Austria.
- Rauch, W., Thurner, N. und Harremoës, P. (1998) *Required accuracy of rainfall data for integrated urban drainage modeling*, Water Science Technology, Vol. 37.
- Reichert, P. (2004)
- Reichert, P. (2009) *Environmental System Analysis*, p. 276, EAWAG, Dübendorf, Switzerland.
- Renner, H., Kauch, P. und Schribertschnig, W. (1998) *Abwasser- und Abfalltechnik*, ©MANZ Verlag Schulbuch GmbH, Wien.
- Rossmann, L.A. (2006) *Strom Water Management Model Quality Assurance Report: Dynamic Wave Flow Routing*, USA EPA Cincinnati, OH, USA.
- Schneider, S. (2007) *Modellierung eines Mischwassernetzes auf der Grundlage von hoch aufgelösten Online-Messwerten und Auto-Kalibrierungsansätzen*, Vertiefearbeit, TU Darmstadt, Darmstadt, Deutschland.
- Schilling, W. (1991) *Rainfall data of urban hydrology: what do we need ?*, Atmospheric Research, Vol. 27.

- Sevruk, B. (1982) *Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement of operational use*, Operational Hydrology, world Metrological Organisation (WMO), Geneva, Switzerland.
- Sevruk, B. (1983) *Genauigkeit der konventionellen Regenmessung*, Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover, Heft 52.
- Sevruk, B. (1996) *Adjustment of tipping-bucket precipitation gauges measurements*, Atmospheric Research
- Sevruk, B. (2002) *WMO questionnaire on recording precipitation gauges: state-of-the-art*. Water Science and Technology, Vol. 45
- Sitzmann, D. (2001) *Konzeption, Abwicklung und Auswertung großer Kanalisationesmesskampagnen, Aktuelle Themen aus Hydromechanik*, Wasserbau und Hydrologie, Darmstädter Wasserbauliches Kolloquium (DAWAKO).
- Thaler, M. (2004) *Fehler bei der Messung und Kalibrierung von Niederschlagswippen*. Diploma Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria.
- Uhl, M. (1993) *Genauigkeit von Messungen. Grundlagen und Beispiele aus der Stadtentwässerung*. Schriftreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, SuG-Verlagsgesellschaft, Hannover.
- Vasvári, V. (2003) *Calibration of tipping bucket rain gauges using the example of the urban research area of the city Graz*, Proceedings of the 6th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, Pontresina, Switzerland.
- Veit, J. (2009) *Erstellung und Validierung eines hydrodynamischen Simulationsmodells für das Einzugsgebiet Graz West*. Diplomarbeit, TU Graz, Graz, Österreich.
- Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Median>, (6.5.2010)
- Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantil>, (6.5.2010)
- Wikipedia.org (2010) http://de.wikipedia.org/wiki/Schiefe_%28Statistik%29, (6.5.2010)
- Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Kurtosis>, (6.5.2010)

Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Regressionsanalyse>, (6.5.2010)

Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Rangkorrelationskoeffizient>, (6.5.2010)

Wikipedia.org (2010) <http://de.wikipedia.org/wiki/Niederschlag>, (6.5.2010)

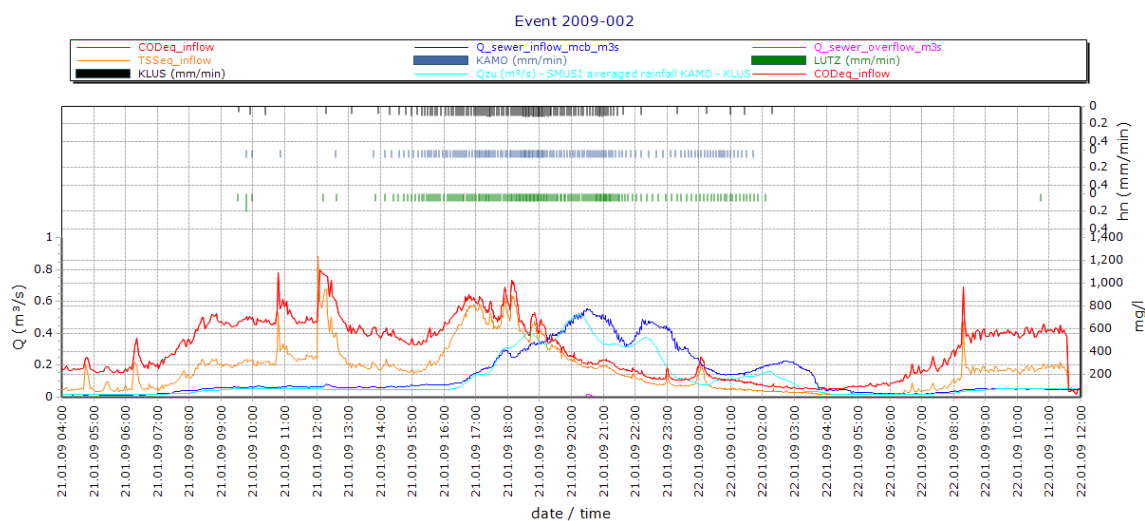
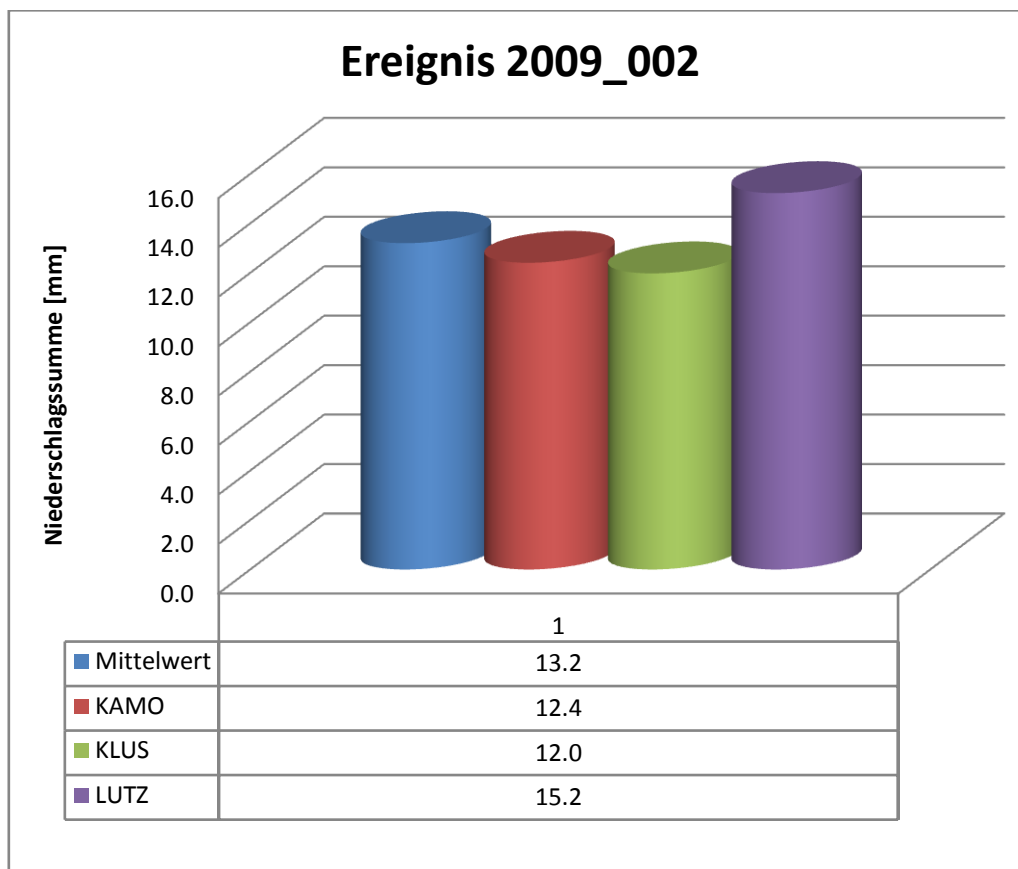
woerterbuch.babylon.com (2010)

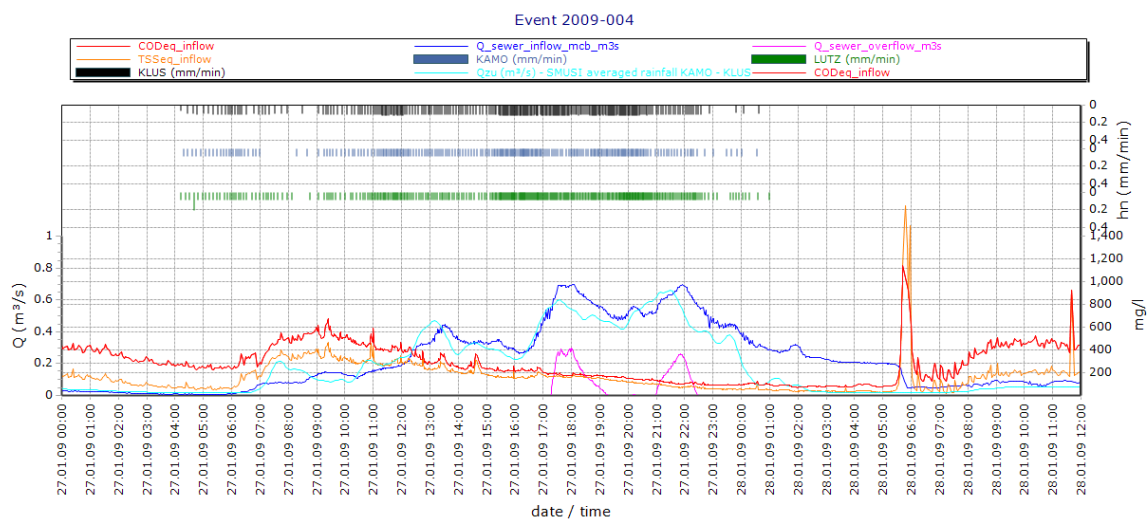
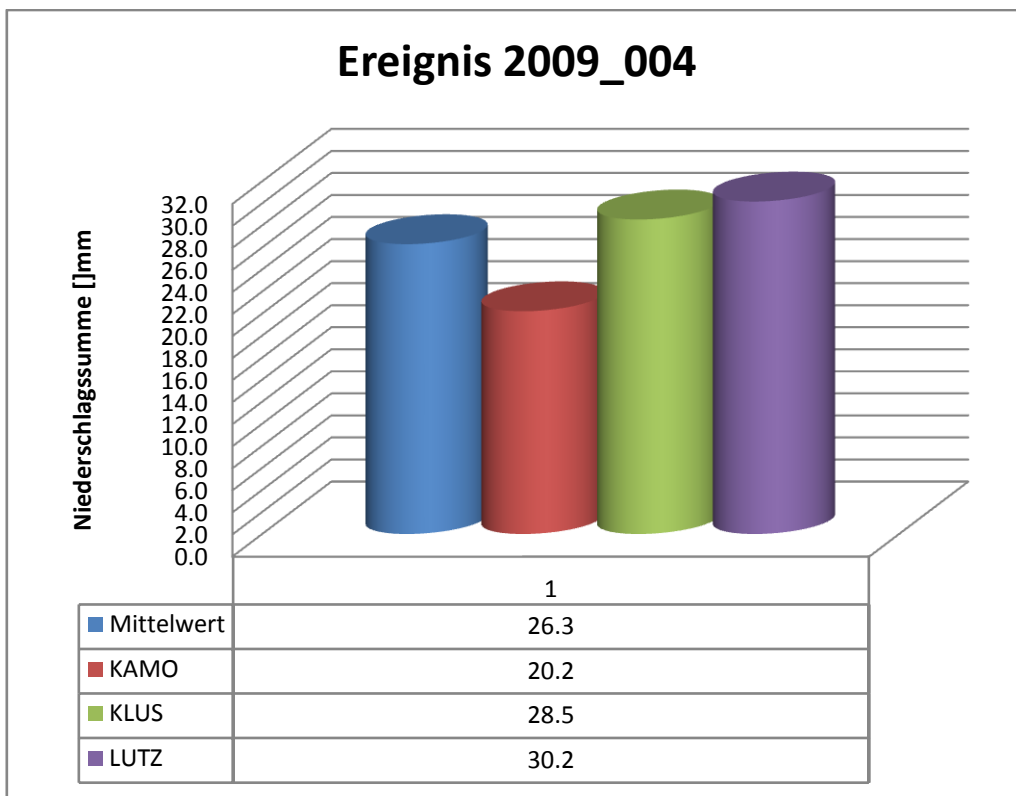
<http://woerterbuch.babylon.com/zuf%C3%A4lliger%20fehler/>, (6.5.2010).

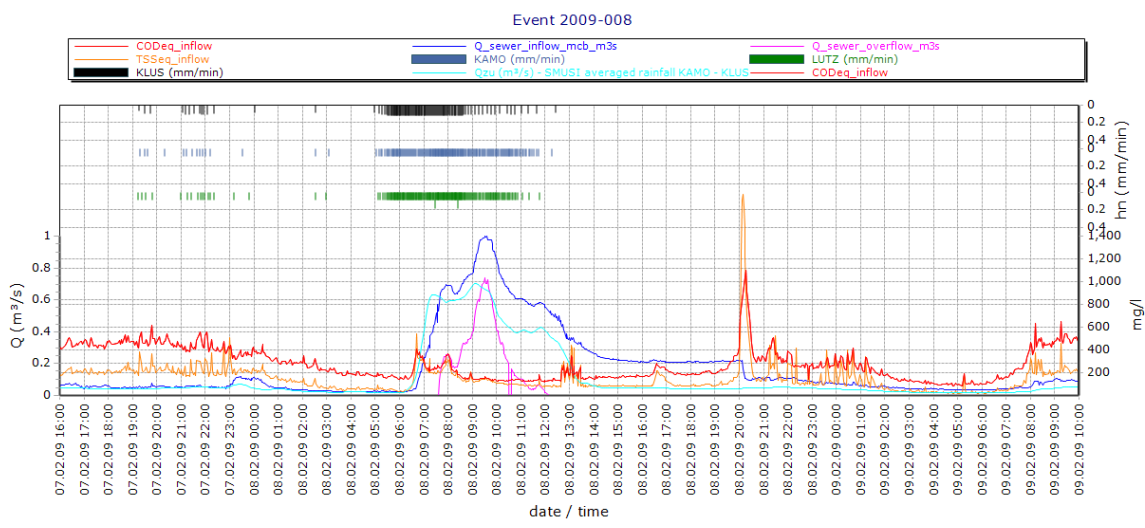
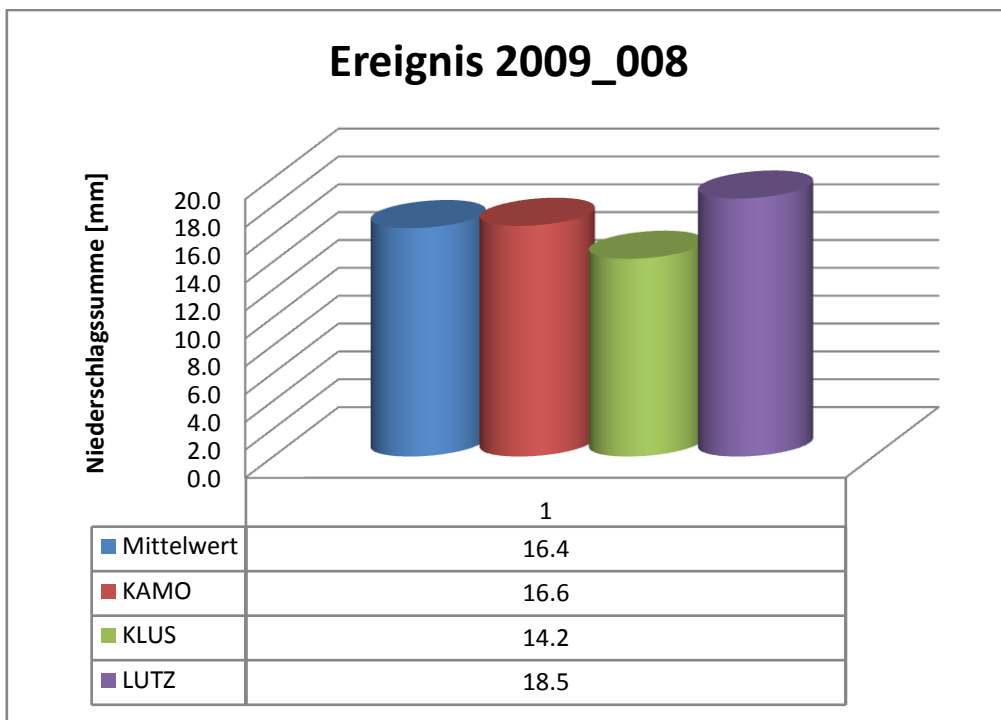
Wolf, M. und Milojević, N. (2003) *Dezentrale Niederschlagswasserentsorgung, Auswirkungen auf Baukosten und Bemessung*, KA-Abwasser, Abfall 2003 (50), Nr.5

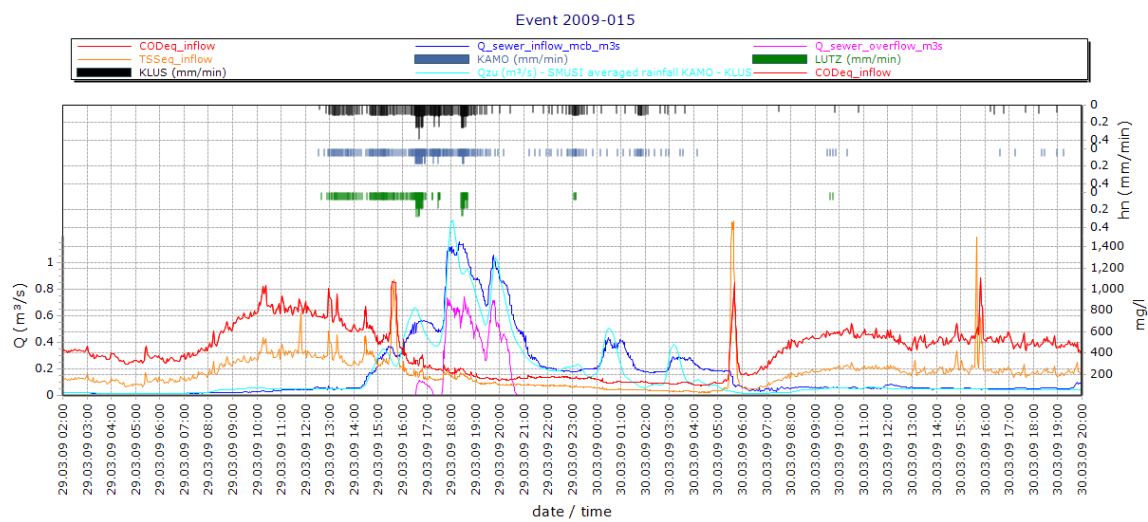
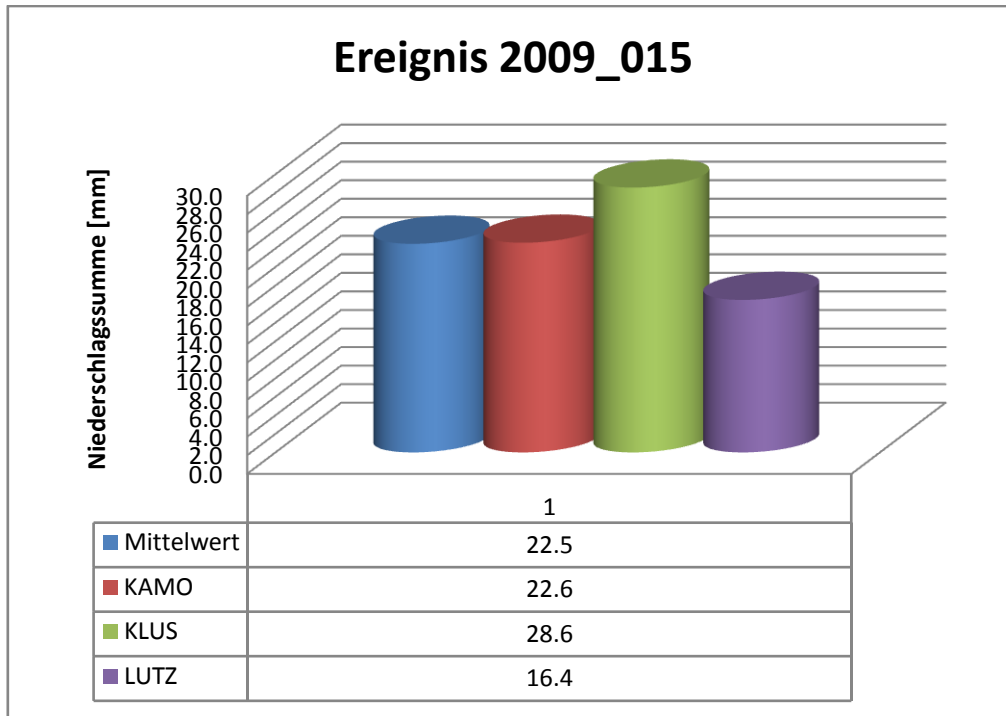
Anhang

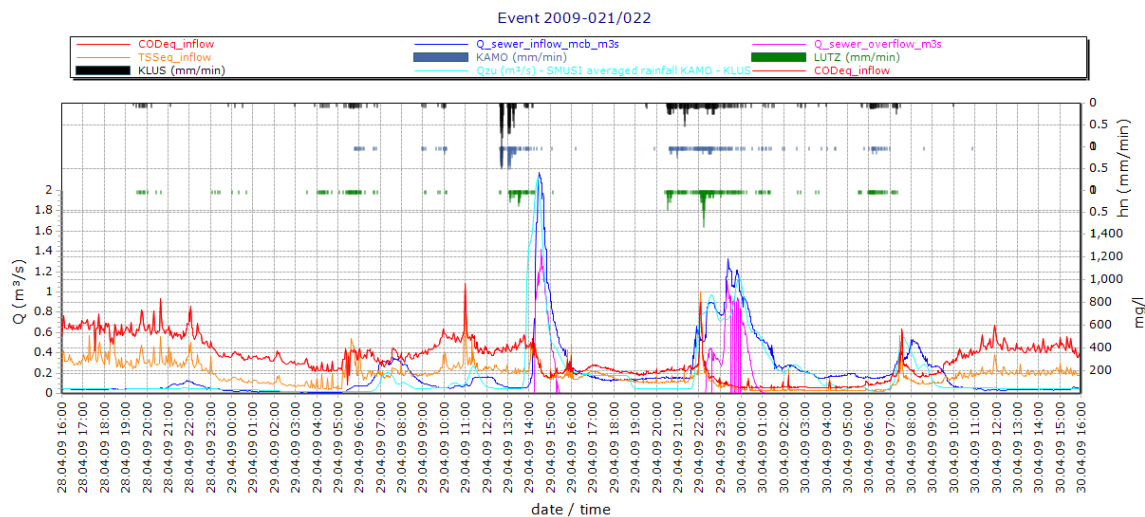
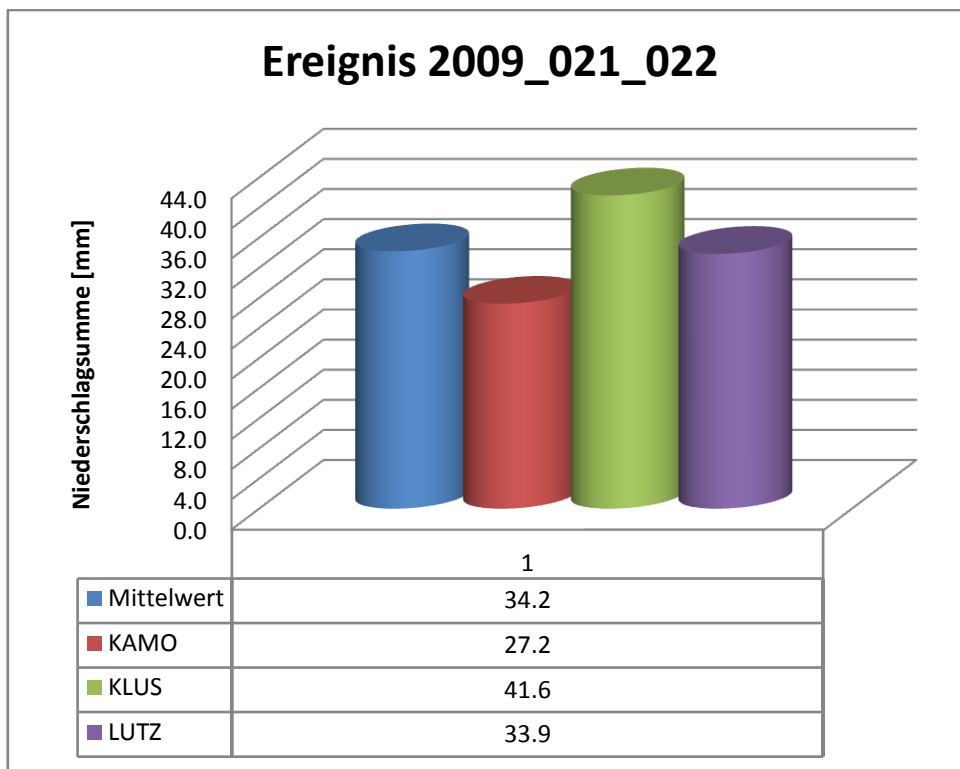
Vergleich der Niederschlagssummen und Mittelwerte der Ereignisse und Gegenüberstellung der Ganglinie mit dem Niederschlag

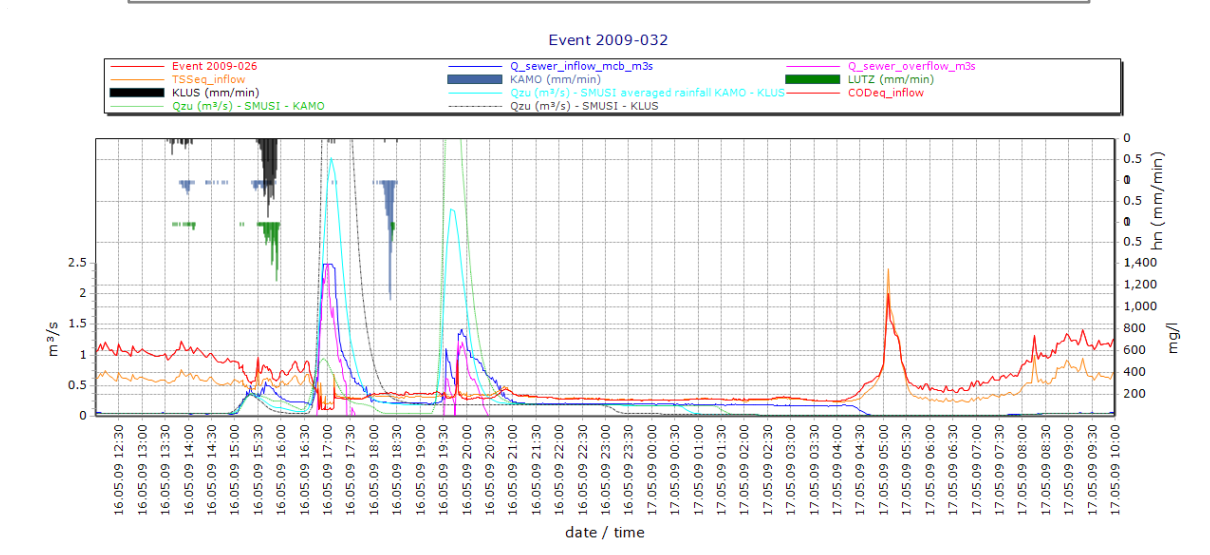
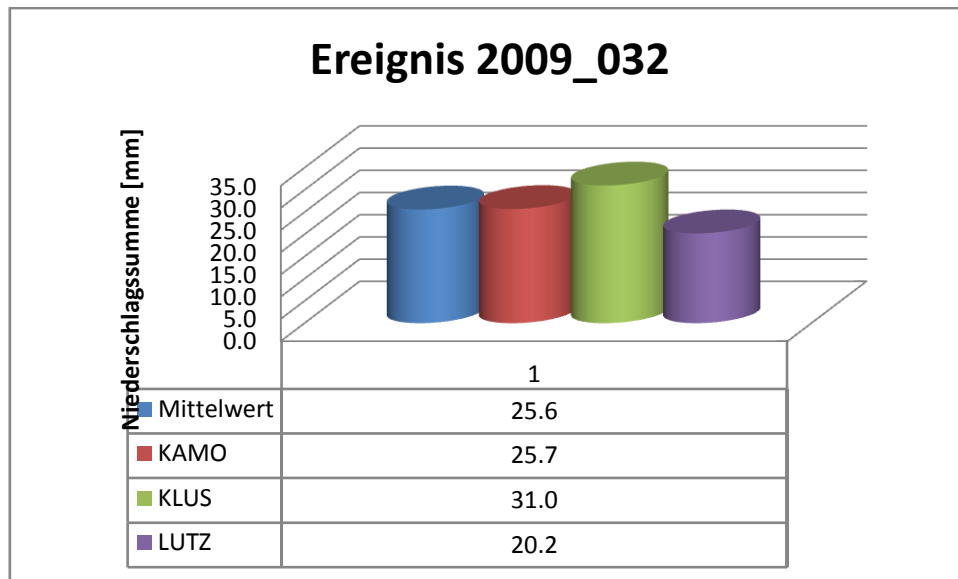












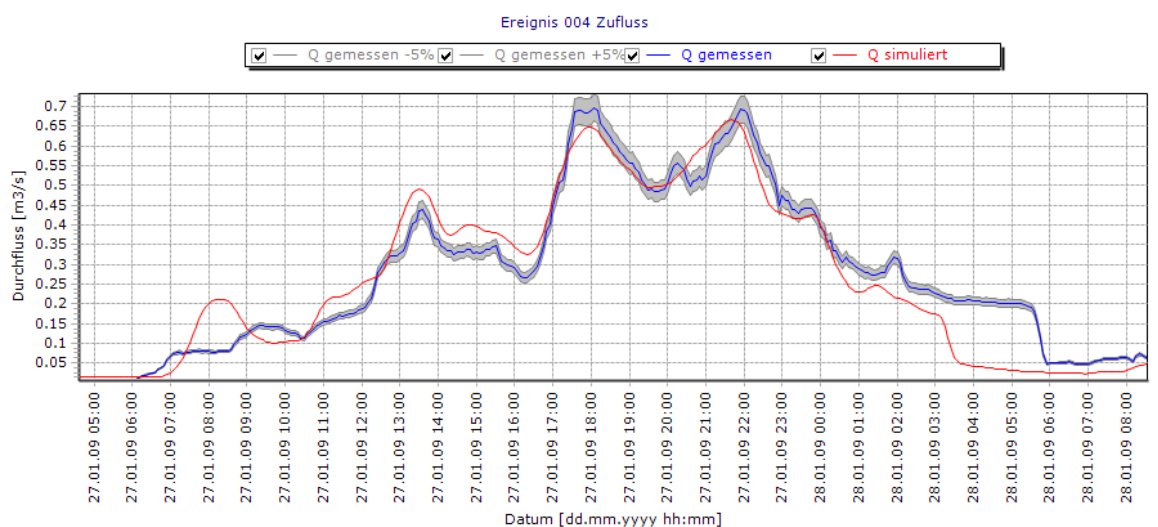
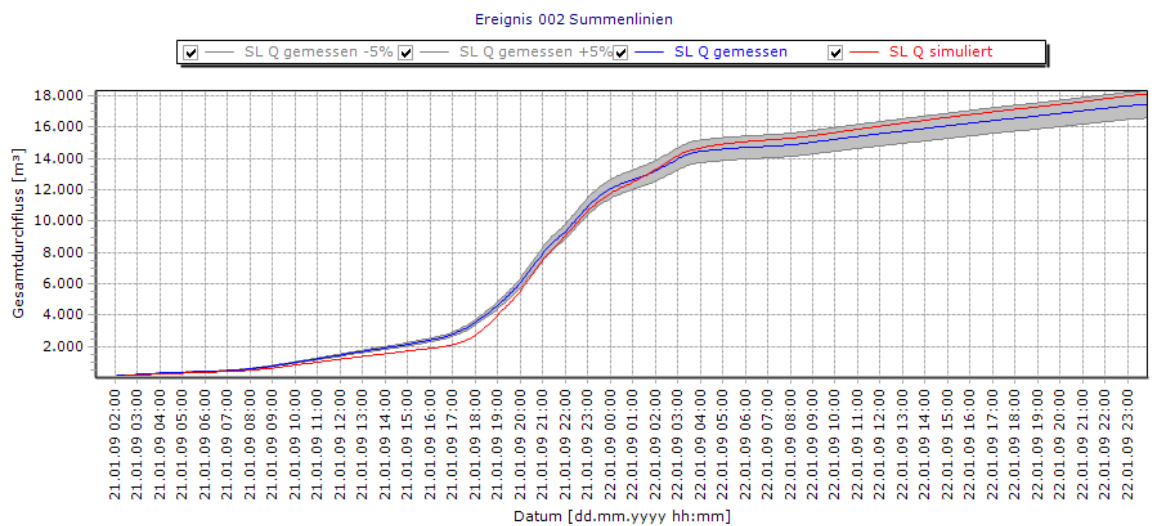
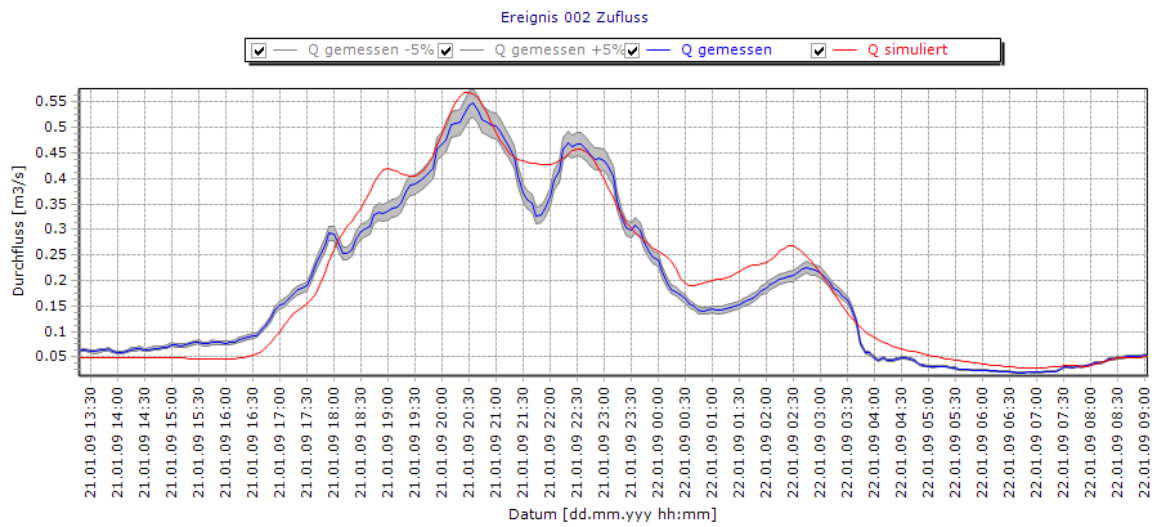
Auflistung Ereignis 001-070

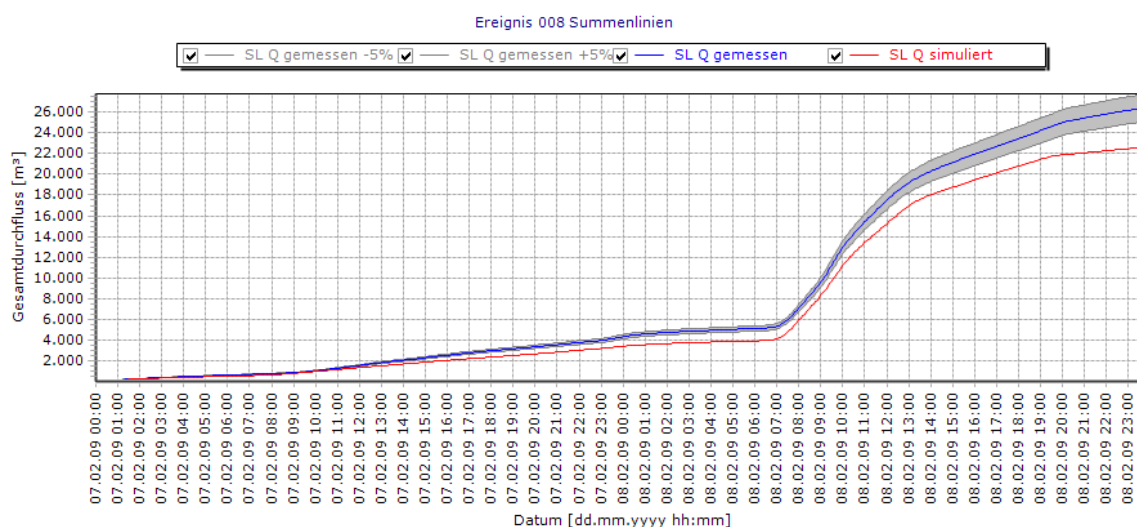
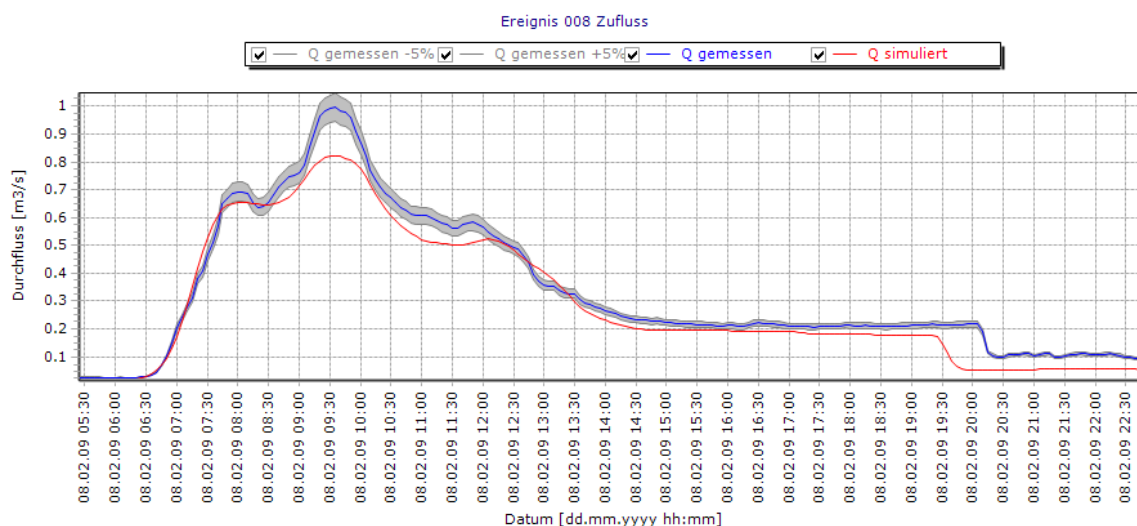
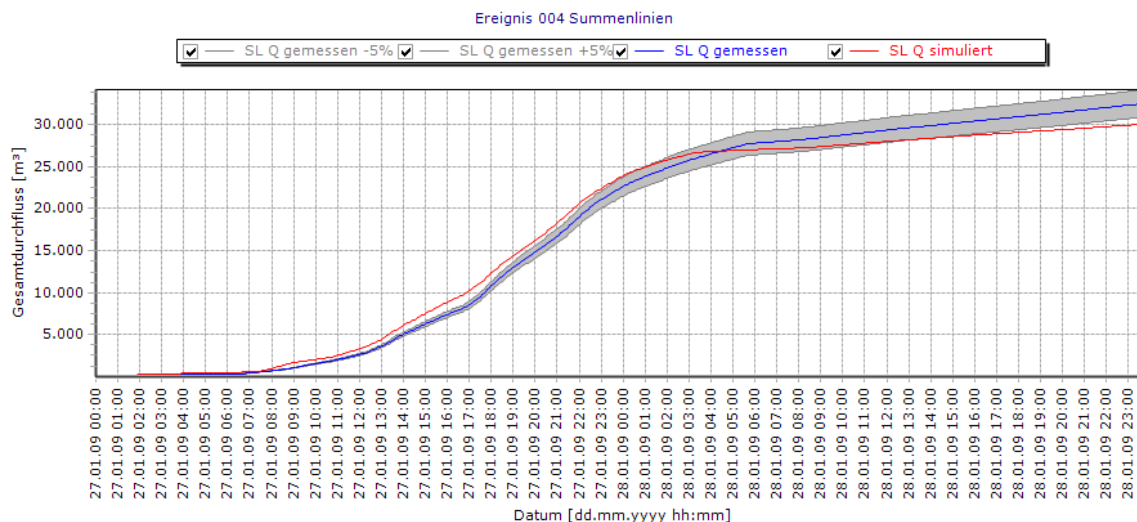
Event	Start (earliest)		End (latest)		No. Gauges	duration (min)			Sum Hn (mm)			Max Hn (mm/min)		
	date/time		date/time			-	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS
2009_1	14.01.2009 06:54	15.01.2009 14:02	3			660	279	1476	4.95	4.86	5.81	0.09	0.12	0.20
2009_2	21.01.2009 09:30	22.01.2009 02:18	3			954	1005	994	12.41	11.98	15.22	0.09	0.12	0.20
2009_3	23.01.2009 20:24	24.01.2009 00:58	3			171	196	272	3.21	4.22	4.21	0.09	0.12	0.09
2009_4	27.01.2009 04:11	28.01.2009 00:59	3			1215	1226	1248	20.21	28.54	30.17	0.09	0.12	0.20
2009_5	01.02.2009 17:19	03.02.2009 11:53	3			450	520	2407	2.08	1.76	14.74	0.09	0.11	0.09
2009_6	02.02.2009 07:31	03.02.2009 10:10	2			1591	1494	0	9.11	9.08	0.00	0.09	0.12	0.00
2009_7	03.02.2009 21:57	04.02.2009 04:13	3			358	362	371	1.91	2.07	2.66	0.09	0.11	0.09
2009_8	07.02.2009 19:13	08.02.2009 12:24	3			1017	1029	992	16.56	14.20	18.52	0.09	0.12	0.18
2009_9	21.02.2009 19:26	22.02.2009 08:56	2			779	0	810	1.22	0.00	1.65	0.09	0.00	0.09
2009_10	02.03.2009 16:47	03.03.2009 02:46	3			582	526	506	1.48	1.39	1.58	0.09	0.10	0.20
2009_11	04.03.2009 19:00	05.03.2009 00:42	3			336	328	330	2.60	2.68	2.84	0.09	0.11	0.09
2009_12	05.03.2009 09:09	05.03.2009 22:57	3			828	803	799	6.94	8.47	8.42	0.09	0.11	0.09
2009_13	06.03.2009 02:34	06.03.2009 14:16	3			572	520	700	12.23	14.25	16.13	0.09	0.12	0.09
2009_14	19.03.2009 15:13	19.03.2009 22:15	3			344	107	420	4.08	4.01	4.03	0.09	0.13	0.09
2009_15	29.03.2009 12:32	30.03.2009 10:47	3			935	1334	362	22.62	28.57	16.45	0.17	0.40	0.28
2009_16	17.04.2009 11:17	17.04.2009 13:47	1			0	0	150	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	0.18
2009_17	19.04.2009 20:33	20.04.2009 04:59	3			428	475	506	4.25	5.53	5.32	0.09	0.12	0.09
2009_18	23.04.2009 03:24	23.04.2009 06:56	3			146	157	208	5.02	4.46	5.78	0.26	0.12	0.09
2009_19	23.04.2009 17:44	23.04.2009 23:43	2			0	359	311	0.00	1.20	1.10	0.00	0.12	0.09
2009_20	24.04.2009 21:07	25.04.2009 06:45	1			578	0	0	1.04	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
2009_21	28.04.2009 19:20	30.04.2009 10:52	3			1746	1130	1175	27.22	19.43	12.12	0.51	1.48	0.37
2009_22	29.04.2009 19:30	30.04.2009 09:57	2			0	867	656	0.00	22.19	21.74	0.00	0.55	0.85
2009_23	30.04.2009 19:44	30.04.2009 20:26	1			0	0	42	0.00	0.00	1.37	0.00	0.00	0.09
2009_24	03.05.2009 15:24	03.05.2009 15:54	1			0	0	30	0.00	0.00	2.67	0.00	0.00	0.28
2009_25	04.05.2009 12:21	04.05.2009 16:24	3			136	171	198	2.69	4.61	4.58	0.17	0.25	0.09
2009_26	05.05.2009 11:24	05.05.2009 11:25	1			1	0	0	1.50	0.00	0.00	1.42	0.00	0.00
2009_27	11.05.2009 21:16	11.05.2009 23:54	1			158	0	0	1.56	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00
2009_28	12.05.2009 16:44	12.05.2009 19:43	3			171	167	137	22.99	47.33	31.61	1.64	2.86	2.39
2009_29	13.05.2009 03:18	13.05.2009 07:43	2			190	257	0	2.08	2.79	0.00	0.17	0.13	0.00
2009_30	13.05.2009 16:43	13.05.2009 17:58	3			72	70	28	3.90	4.52	2.57	0.17	0.25	0.18
2009_31	13.05.2009 22:15	14.05.2009 06:35	2			459	491	0	2.17	2.36	0.00	0.09	0.11	0.00
2009_32	16.05.2009 13:32	16.05.2009 18:30	3			282	298	287	22.60	25.18	14.63	2.87	1.89	1.45
2009_33	18.05.2009 18:49	18.05.2009 20:59	3			124	130	85	3.11	5.81	5.59	0.51	0.90	0.95
2009_34	19.05.2009 16:52	19.05.2009 22:24	3			313	314	175	24.78	49.95	42.97	0.85	2.09	1.86
2009_35	22.05.2009 16:14	22.05.2009 17:35	3			81	62	34	12.29	29.62	15.22	1.72	3.32	2.07
2009_36	26.05.2009 17:41	26.05.2009 23:21	2			331	328	0	5.11	8.38	0.00	0.26	0.56	0.00
2009_37	27.05.2009 04:25	27.05.2009 17:09	2			618	762	0	11.44	16.12	0.00	0.17	0.26	0.00
2009_38	30.05.2009 05:15	30.05.2009 16:05	3			601	632	61	7.11	8.32	1.47	0.09	0.12	0.09
2009_39	05.06.2009 22:11	06.06.2009 01:07	3			140	171	149	1.39	1.31	1.74	0.09	0.11	0.09
2009_40	06.06.2009 20:07	07.06.2009 08:21	3			108	727	58	3.89	3.23	2.86	0.26	0.11	0.37
2009_41	07.06.2009 19:00	07.06.2009 23:10	3			192	237	4	4.46	2.09	2.65	1.41	0.11	1.15
2009_42	11.06.2009 14:12	12.06.2009 04:17	3			32	830	22	5.15	4.28	4.65	0.76	0.11	0.56
2009_43	16.06.2009 14:16	16.06.2009 22:24	2			488	0	18	10.57	0.00	2.39	0.26	0.00	0.28
2009_44	17.06.2009 08:44	17.06.2009 08:45	1			0	1	0	0.00	12.57	0.00	0.00	8.71	0.00
2009_45	19.06.2009 21:43	20.06.2009 13:17	3			934	909	45	32.72	41.81	14.09	0.43	1.00	1.05
2009_46	22.06.2009 15:30	22.06.2009 19:32	3			204	229	204	2.26	1.18	1.46	0.09	0.11	0.09
2009_47	23.06.2009 07:38	25.06.2009 02:26	2			2545	608	0	35.36	13.74	0.00	0.26	0.26	0.00
2009_48	24.06.2009 00:06	25.06.2009 04:02	1			0	1676	0	0.00	30.15	0.00	0.00	0.26	0.00
2009_49	26.06.2009 18:17	26.06.2009 20:56	3			159	146	15	12.34	18.50	8.75	1.17	1.95	1.77
2009_50	27.06.2009 12:25	27.06.2009 16:51	3			238	260	20	1.13	34.61	4.30	0.17	2.71	1.05
2009_51	27.06.2009 20:57	27.06.2009 23:53	2			176	32	0	4.41	1.40	0.00	0.34	0.26	0.00
2009_52	28.06.2009 07:48	29.06.2009 05:21	3			1222	1293	3	12.57	15.63	1.11	0.17	0.26	0.47
2009_53	29.06.2009 11:13	29.06.2009 16:51	3			237	338	9	1.13	2.08	1.85	0.09	0.26	0.47
2009_54	30.06.2009 11:47	30.06.2009 13:34	2			89	0	59	9.67	0.00	9.31	0.34	0.00	1.26
2009_55	01.07.2009 10:00	01.07.2009 11:30	2			7	90	0	2.65	17.66	0.00	0.68	1.78	0.00
2009_56	01.07.2009 18:38	01.07.2009 20:13	3			71	95	3	3.02	10.20	1.68	0.51	1.10	0.66
2009_57	02.07.2009 11:42	02.07.2009 13:39	2			0	100	10	0.00	2.47	3.73	0.00	0.40	0.75
2009_58	03.07.2009 13:42	03.07.2009 14:19	2			26	37	0	1.21	4.26	0.00	0.09	0.40	0.00
2009_59	06.07.2009 11:43	06.07.2009 14:27	3			158	164	139	1.56	2.77	2.29	0.09	0.12	0.09
2009_60	07.07.2009 15:34	07.07.2009 17:52	3			105	132	58	14.61	13.20	4.25	1.56	1.46	0.37
2009_61	08.07.2009 00:38	08.07.2009 04:39	2			232	241	0	1.74	1.77	0.00	0.09	0.11	0.00
2009_62	08.07.2009 23:32	09.07.2009 00:41	2			59	67	0	1.13	1.64	0.00	0.09	0.12	0.00
2009_63	10.07.2009 02:07	10.07.2009 11:41	2			464	574	0	2.34	3.67	0.00	0.09	0.11	0.00
2009_64	13.07.2009 09:43	13.07.2009 09:46	1			0	0	3	0.00	0.00	1.60	0.00	0.00	0.87
2009_65	15.07.2009 19:06	16.07.2009 00:52	3			346	300	65	40.50	69.18	57.10	1.64	3.06	3.53
2009_66	18.07.2009 08:54	18.07.2009 13:44	3			290	268	183	42.83	47.45	36.89	1.57	1.83	2.00
2009_67	24.07.2009 23:18	25.07.2009 05:53	3			329	371	45	12.55	21.50	8.91	0.34	1.06	0.75
2009_68	30.07.2009 16:09	31.07.2009 00:02	3			473	367	324	18.24	26.39	9.37	0.51	0.97	0.28
2009_69	03.08.2009 15:51	04.08.2009 21:36	3			1581	1779	509	53.78	72.23	11.65	0.34	1.30	0.95
2009_70	04.08.2009 07:18	04.08.2009 14:11	1			0	0	413	0.00	0.00	1.65	0.00	0.00	0.18

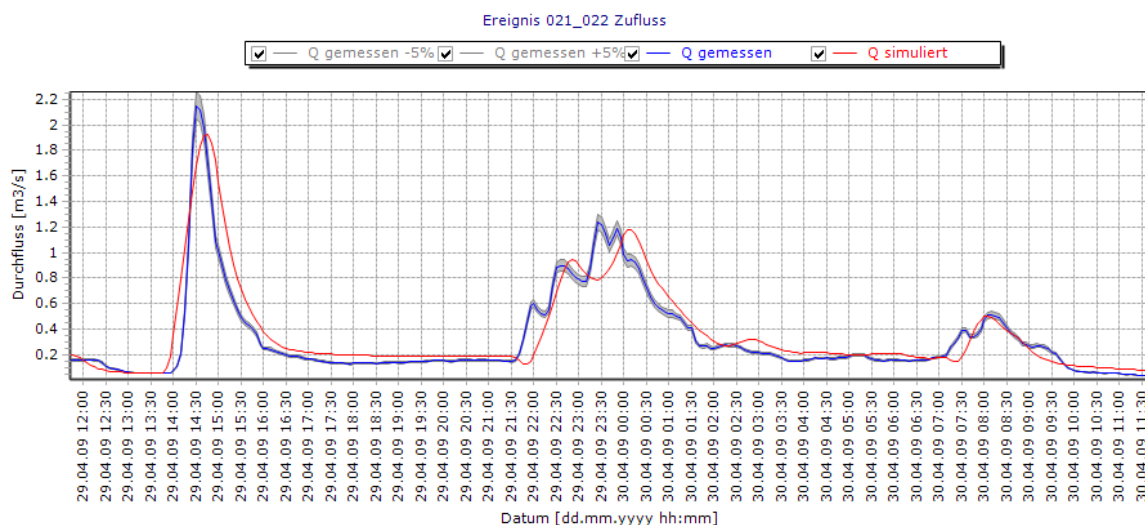
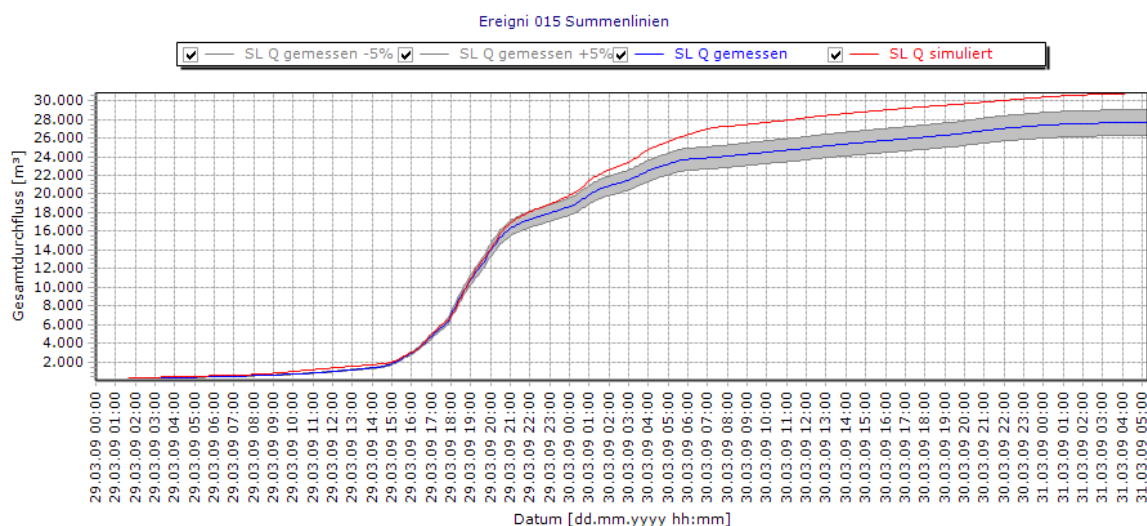
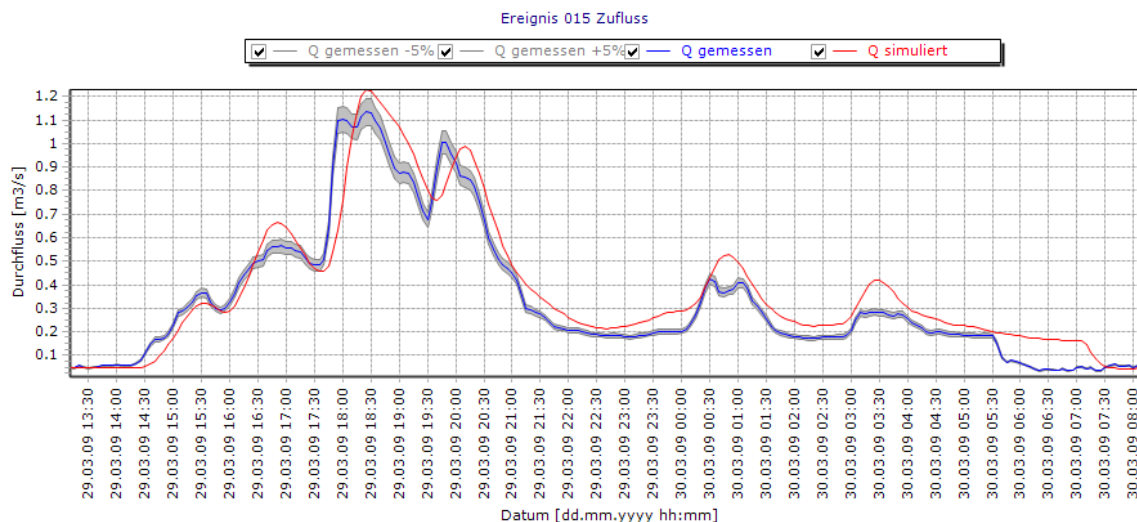
Auflistung Ereignis 070-113

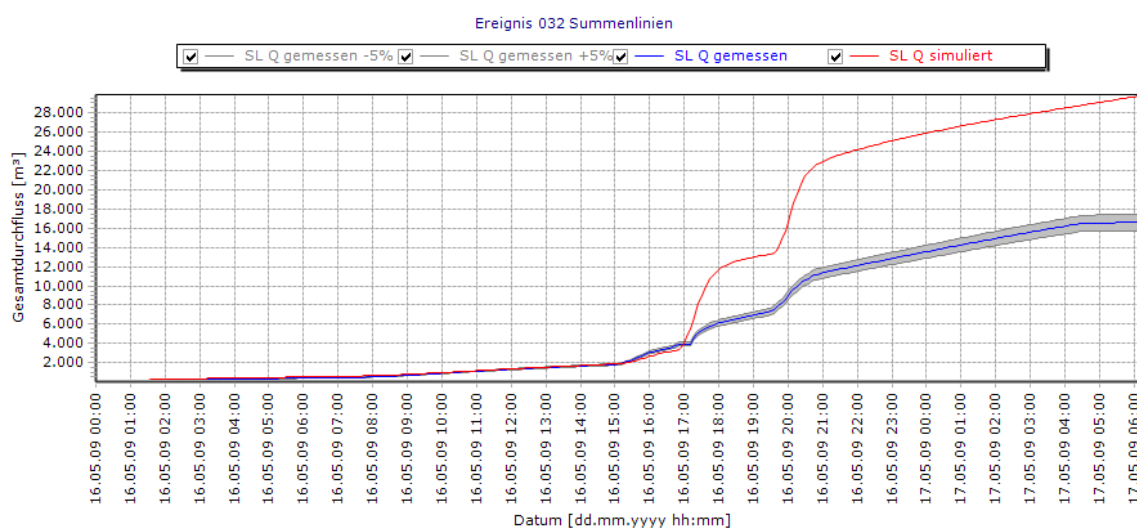
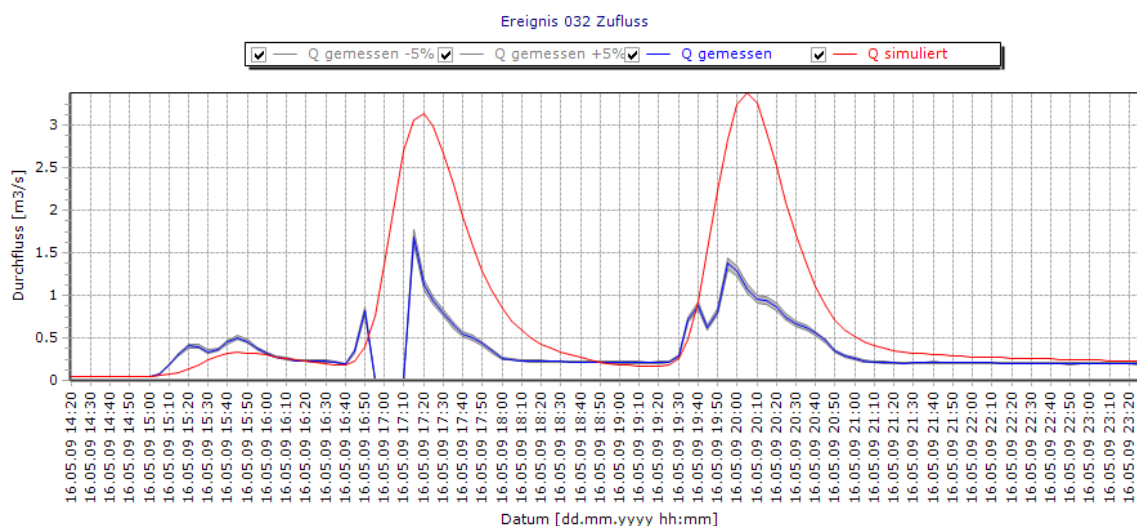
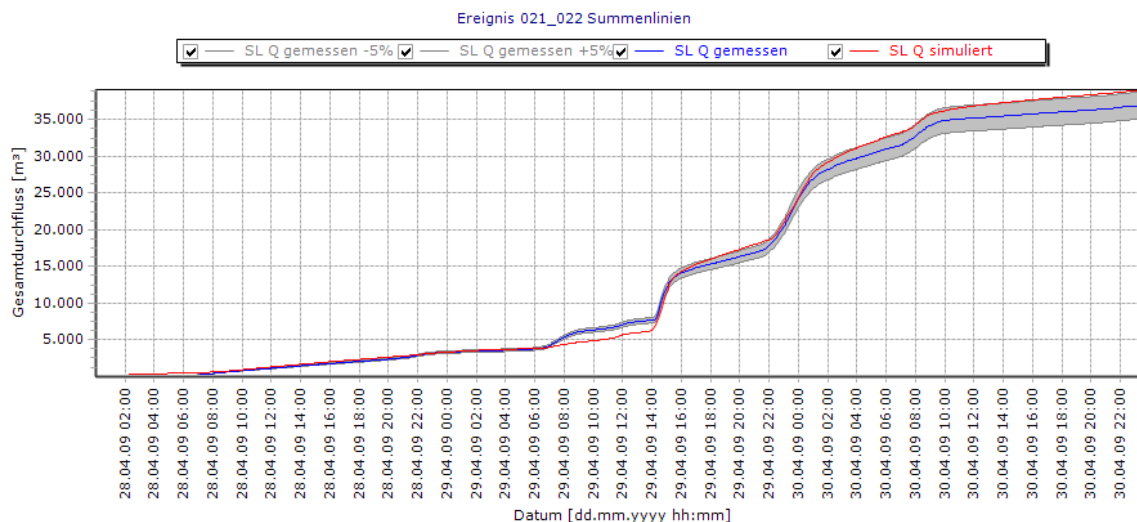
Event	Start (earliest)		End (latest)		No. Gauges	duration (min)			Sum Hn (mm)			Max Hn (mm/min)								
	date/time		date/time			-	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ	KAMO	KLUS	LUTZ					
2009_71	10.08.2009 16:31	10.08.2009 22:53	3			382	298	65				35.89	37.52	30.48				1.65	3.03	3.54
2009_72	13.08.2009 18:13	14.08.2009 05:16	3			663	657	314				18.79	19.65	5.33				0.26	0.39	0.37
2009_73	14.08.2009 12:24	14.08.2009 12:51	1			27	0	0				1.04	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_74	21.08.2009 19:55	21.08.2009 21:37	3			75	90	41				23.69	25.98	47.94				1.01	1.31	3.20
2009_75	22.08.2009 16:05	23.08.2009 01:03	3			538	288	87				17.32	19.69	7.47				0.26	0.41	0.95
2009_76	28.08.2009 23:42	29.08.2009 00:46	3			64	54	49				14.87	10.15	19.85				1.87	1.11	1.56
2009_77	29.08.2009 09:42	29.08.2009 22:47	2			785	429	0				5.80	3.28	0.00				0.34	0.12	0.00
2009_78	04.09.2009 00:18	05.09.2009 07:27	3			1827	1865	206				62.99	77.56	9.24				0.43	0.55	0.47
2009_79	04.09.2009 17:04	04.09.2009 17:22	1			0	0	18				0.00	0.00	1.47				0.00	0.00	0.28
2009_80	11.09.2009 13:02	11.09.2009 16:58	3			235	131	115				7.69	14.15	11.88				0.43	0.70	1.10
2009_81	12.09.2009 05:41	12.09.2009 08:36	2			37	169	0				1.04	1.08	0.00				0.09	0.12	0.00
2009_82	12.09.2009 15:03	12.09.2009 16:23	2			0	72	16				0.00	4.00	2.95				0.00	0.40	0.37
2009_83	13.09.2009 14:50	14.09.2009 05:09	2			859	848	0				14.39	20.09	0.00				0.17	0.27	0.00
2009_84	14.09.2009 09:25	14.09.2009 20:21	2			656	651	0				5.55	6.42	0.00				0.17	0.69	0.00
2009_85	15.09.2009 01:41	15.09.2009 05:43	3			241	239	89				4.92	5.24	2.41				0.43	0.70	0.56
2009_86	16.09.2009 20:37	17.09.2009 03:04	2			387	337	0				4.34	5.69	0.00				0.17	0.56	0.00
2009_87	17.09.2009 14:15	18.09.2009 03:21	3			628	772	26				5.12	10.73	15.55				0.17	0.70	1.65
2009_88	25.09.2009 13:48	25.09.2009 14:17	2			0	29	13				0.00	1.83	4.08				0.00	0.41	0.47
2009_89	01.10.2009 17:51	01.10.2009 23:16	3			325	93	93				3.88	5.73	3.71				0.43	0.97	0.46
2009_90	02.10.2009 07:23	02.10.2009 10:33	3			127	190	95				3.29	4.12	1.48				0.26	0.40	0.28
2009_91	09.10.2009 13:32	09.10.2009 19:31	1			359	0	0				3.27	0.00	0.00				0.68	0.00	0.00
2009_92	10.10.2009 03:02	10.10.2009 10:31	2			405	0	449				2.43	0.00	4.67				0.09	0.00	0.09
2009_93	10.10.2009 19:58	11.10.2009 03:38	2			460	0	228				10.23	0.00	6.14				0.17	0.00	0.09
2009_94	12.10.2009 00:02	12.10.2009 08:33	2			511	0	24				6.83	0.00	1.20				0.43	0.00	0.28
2009_95	12.10.2009 08:14	12.10.2009 08:20	1			0	0	6				0.00	0.00	1.86				0.00	0.00	0.56
2009_96	22.10.2009 14:20	22.10.2009 18:15	1			235	0	0				1.99	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_97	23.10.2009 17:53	24.10.2009 11:10	1			1037	0	0				8.50	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_98	30.10.2009 05:03	30.10.2009 05:40	1			37	0	0				1.39	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_99	02.11.2009 14:51	03.11.2009 16:23	1			1532	0	0				13.01	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_100	04.11.2009 13:15	04.11.2009 23:02	1			587	0	0				5.29	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_101	06.11.2009 11:15	07.11.2009 06:11	2			1133	1120	0				8.85	8.51	0.00				0.09	0.12	0.00
2009_102	08.11.2009 12:46	09.11.2009 05:08	2			978	891	0				13.44	13.94	0.00				0.17	0.25	0.00
2009_103	18.11.2009 15:06	18.11.2009 18:31	1			0	205	0				0.00	1.11	0.00				0.00	0.12	0.00
2009_104	28.11.2009 07:17	28.11.2009 10:15	2			133	175	0				1.65	3.05	0.00				0.09	0.12	0.00
2009_105	30.11.2009 01:35	30.11.2009 04:01	2			111	146	0				1.30	1.54	0.00				0.09	0.11	0.00
2009_106	01.12.2009 00:48	01.12.2009 09:32	2			515	524	0				4.68	6.57	0.00				0.09	0.13	0.00
2009_107	01.12.2009 14:13	01.12.2009 18:27	3			254	226	194				7.97	5.67	1.11				0.17	0.21	0.28
2009_108	08.12.2009 11:36	08.12.2009 14:29	2			155	173	0				8.49	10.48	0.00				0.17	0.13	0.00
2009_109	14.12.2009 13:30	14.12.2009 22:32	1			542	0	0				1.48	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_110	19.12.2009 08:12	19.12.2009 20:21	2			630	535	0				3.82	4.51	0.00				0.09	0.11	0.00
2009_111	20.12.2009 10:20	20.12.2009 12:23	1			123	0	0				2.00	0.00	0.00				0.09	0.00	0.00
2009_112	23.12.2009 23:31	24.12.2009 01:32	2			117	113	0				1.82	2.78	0.00				0.09	0.12	0.00
2009_113	25.12.2009 09:03	25.12.2009 17:14	3			483	295	127				9.35	11.37	2.50				0.26	0.41	0.47

Ganglinien und Summenlinien Ereignisse Zufluss









Ganglinien und Summenlinien Ereignisse Entlastungskanal

