

**wasserWerkstatt Christian Karpf  
Ingenieurbüro für ökologische Wasserwirtschaft**

**Entwicklung und Erprobung eines Messkonzeptes und einer  
Analysesoftware zur Lokalisierung von Fremdwasser in ländlichen  
Kanalnetzen**

**Abschlussbericht zum Forschungsprojekt gefördert unter dem  
Az: 30613 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

**von**

**Dr.-Ing. Christian Karpf und Dipl.-Ing. Felix Gutte**

**Dresden, Dezember 2015**



**Projektkennblatt  
der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30613</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>87.115 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung und Erprobung eines Messkonzeptes und einer Analysesoftware zur Lokalisierung und Reduzierung von Fremdwasser in ländlichen Kanalnetzen</b>				
<b>Stichworte</b>	Wasser, Abwasser, Kanalisation				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>24 Monate</b>	<b>12.04.2013</b>	<b>31.07.2015</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	wasserWerkstatt Dr.-Ing. Christian Karpf Hubertusstr. 59 01129 Dresden			Tel	0351-4827373
				Fax	0351-4827374
				Projektleitung	Dr.-Ing. Christian Karpf
				Bearbeiter	Dipl.-Ing. Felix Gutte
<b>Kooperationspartner</b>	Stadtverwaltung Radeberg, ZV Obere Röder				

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Die Einleitung von unbelastetem Wasser (Fremdwasser) in Abwasseranlagen stellt ein ökonomisches und ökologisches Problem dar. Überlastungen des Kanalnetzes und die erhöhte Belastung der Kläranlagen führen zu stofflichen und hydraulischen Belastungen der Gewässer. Ziel der Betreiber von Abwasseranlagen ist es daher, Fremdwassereinleitungen zu lokalisieren und zu unterbinden. Aufgrund der Größe von Kanalnetzen ist die Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen zur Reduzierung der Fremdwassereinleitungen sehr kostenintensiv. Besonders in kleinen ländlichen Gemeinden sind oft akute Fremdwasserprobleme bei beschränkten finanziellen Mitteln zur Sanierung gegeben.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Messkonzept und eine Software entwickelt werden, die eine Analyse der Fremdwassersituation in Bezug auf die Grundwasserinfiltration und Drainagezuflüsse verbessert. Durch die Messung der Grundwasserpegel in Hausbrunnen und die automatisierte Auswahl und Kalibrierung geeigneter Modellansätze wurde eine kanalabschnittsgenaue Berechnung von Fremdwasserzuflüssen realisiert.

Die neue Methode ist im Hinblick auf einen ressourcenschonenden Einsatz von Finanzmitteln im Bereich der Kanalsanierung von großer Bedeutung. Des Weiteren wird besonders in ländlichen Regionen mit der gezielten Reduzierung von Fremdwasser und der damit verbundenen Reduzierung von Entlastungsereignissen und Kanalüberstau ein essentieller Beitrag zum Schutz der Gewässer geleistet.

In Zusammenarbeit mit einem Betreiber wurde die Messmethode erprobt und die im Projekt entwickelte Software angewandt werden. Ziel ist es, die Fremdwasseranalyse in ländlichen Einzugsgebieten weiterzuentwickeln und damit einen Beitrag zur effizienten Sanierung bestehender Systeme zu leisten.

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das Arbeitsprogramm umfasste folgende Punkte:

Arbeitspaket 1

- Verarbeitung der Daten des Einzugsgebietes (Methoden: Datenbanken, GIS)

Arbeitspaket 2

- Konstruktion und Test der Messgeräte zum Monitoring des Grundwasserstandes
- Installation und Betreuung der Messgeräte zur Messung der Grundwasserpegel (Messkampagne)

Arbeitspaket 3

- Programmierung und Test der Software zur Datenaufbereitung, Grundwasserinterpolation und Fremdwasseranalyse (Methoden: Software R, Regression, Clusteranalyse)

Arbeitspaket 4

- Datenauswertung, Ergebnisdarstellung und Dokumentation



### **Ergebnisse und Diskussion**

Die Fremdwasseranalyse kann durch die Betrachtung der Grundwassersituation und eine Modellierung der Fremdwasserabflüsse wesentlich verbessert werden.

In Hausbrunnen kann eine relativ einfach und kostengünstige Messung der Grundwasserpegel durchgeführt werden kann. Der Einsatz von Datenloggern und Drucksensoren erleichtert die Datensammlung in hohem Maße. Es wurde zudem festgestellt, dass die eingesetzten Geräte sehr zuverlässig funktionieren und nur wenig Datenausfälle verzeichnet wurden.

Die Auswertung der Grundwasserdaten wurde weitestgehend automatisiert. Allerdings müssen die Messwerte manuell geprüft werden (Ganglinienkontrolle), um unplausible Werte zu kennzeichnen (z.B. Absenkung der Wasserspiegel durch Pumpenbetrieb).

Die Interpolation der Grundwasserstände und das Verschneiden mit dem Kanalnetz ist automatisierbar. Bei den Berechnungen wurde das Verfahren der linearen Interpolation der Grundwasserflurabstände als solide Methode identifiziert. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt weniger von der Genauigkeit der Messungen ab, sondern von deren räumlichen Verteilung der Messstellen ab. Da die Standortwahl von der Lage der Brunnen in dem Einzugsgebiet abhängt ist eine optimale Standortwahl nicht immer gegeben. Die Definition von Randbedingungen, die bestimmte Kenntnisse zur Hydrogeologie in die Interpolation integrieren (z.B. durch virtuelle Grundwasserpegel) können eine Verbesserung der Interpolation bewirken.

Grundwasserspiegellagen im Bereich der Kanäle stellen neben der Fremdwasseranalyse eine Information dar, die für Sanierungsmaßnahmen und Inspektionen genutzt werden können. Durch das Verschneiden von Grundwasserdaten und Kanalnetz können potenzielle Gebiete erhöhter Infiltrations- und Drainagezuflüsse ermittelt werden.

Die Simulation der Fremdwasserabflüsse ist mit dem gewählten Modell sehr gut möglich. Die automatische Kalibrierung verhindert zudem eine subjektive Beeinflussung. Des Weiteren erscheint eine Aufteilung des Berechnungsansatzes in eine Infiltrations- und Drainagemodell als hilfreicher Ansatz, um Sanierungsschwerpunkte im öffentlichen oder privaten Bereich zu ermitteln. Hinsichtlich der Kalibrierung von Parametern sollten weitere vertiefende Untersuchungen vorgenommen werden. Ggf. ist eine genauere Modellanpassung durch verbesserte Berechnungsalgorithmen und Klassifizierungsmethoden möglich.

Die Ergebnisse der Simulationen erlauben eine gebietsweise Einschätzung der Fremdwassersituation. Prinzipiell könnten auch die Berechnungsergebnisse für einzelne Kanalabschnitte verwertet werden. Allerdings wird eingeschätzt, dass dieser hohe Detaillierungsgrad aufgrund der derzeit noch gegebenen Modellgenauigkeit nicht belastbar ist. Empfohlen werden kann daher die Zusammenfassung der berechneten Werte für Teilgebiete.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Temperaturmessungen zur Verifikation der Modellberechnungen eingesetzt. Es konnte festgestellt werden, dass Temperaturmessungen einfache und robuste Messverfahren sind, die ein großes Potenzial zur Identifizierung von Fremdwassermengen und Herkunftsquellen haben.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Vorhabensergebnisse werden im Rahmen der Arbeit des IB wasserWerkstatt verbreitet und in die praktische Anwendung überführt. Dazu zählen folgende Aktivitäten:

- Wissenschaftliche Arbeiten (Masterarbeit Thomas Käseberg, 2014, Bachelorarbeit Niklas Taupitz, 2014)
- Vorträge („Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Kanalisation“, TU Dresden, 28.4.2015)
- Kooperationen mit Ingenieurbüros und wissenschaftlichen Einrichtungen im Bereich Kanalnetz (TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, IB Holinger, Niederlassung Dresden)
- Projekte (Fremdwasseranalyse AZV Wilischthal, Projektabschluss Dezember 2015)
- Website (in Vorbereitung unter: [www.wasserwerkstatt-dresden.de](http://www.wasserwerkstatt-dresden.de))

### **Fazit**

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode entwickelt, die auf Basis eines Messsystems und einer Software basiert und eine zielgerichtete Analyse des Fremdwasseraufkommens in ländlichen Entwässerungsgebieten ermöglicht. Es wurden wesentliche Erkenntnisse zur Messtechnik, Datenaufbereitung und Modellanwendung gewonnen. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial von Grundwassermessungen und die hohe Aussagekraft von Simulationsrechnungen.

Durch die neue Methode wird eine gezielte Fremdwasserlokalisierung und -sanierung unterstützt. Dadurch können wesentliche ökologische (Gewässerschutz) und ökonomische Zielstellungen (Kosten, Nutzen) erreicht werden.

Auf Basis der methodischen Entwicklungen und erzielten Erkenntnissen wird ein hohes Potenzial in der Weiterentwicklung von Modellen und einfachen Messverfahren gesehen.



1 Zusammenfassung.....	7
2 Veranlassung und Zielstellung.....	8
3 Stand der Wissenschaft.....	9
3.1 Begriffe und Bedeutung von Fremdwasser.....	9
3.1.1 Fremdwasser in ländlich geprägten Einzugsgebieten.....	10
3.1.2 Methoden der Fremdwasseranalyse.....	11
3.1.3 Modellierung von Fremdwasserzuflüssen.....	12
3.2 Problemidentifikation.....	13
4 Vorgehensweise.....	15
4.1 Arbeitsprogramm.....	15
4.2 Vorhabensablauf.....	15
5 Datengrundlage und Methoden.....	16
5.1 Vorhandene Daten des Modellgebietes.....	16
5.2 Messdaten .....	16
5.3 Statistische Verfahren .....	17
5.3.1 Methode der kleinsten Quadrate.....	17
5.3.2 Regression.....	17
5.3.3 Clusteranalyse.....	17
5.4 Grundwasserinterpolation.....	18
5.5 Methoden der Fremdwasseranalyse .....	18
5.6 Modellgrundlagen.....	19
5.6.1 Infiltrationsmodell.....	19
5.6.2 Drainagemodell.....	20
5.6.3 Oberflächengewässer und Niederschlag.....	20
5.6.4 Kalibrierung.....	21
6 Ergebnisse.....	23
6.1 Abfluss Kanalnetz .....	23
6.1.1 Trockenwetterabfluss und Fremdwasser im Betrachtungsgebiet .....	23
6.2 Grundwasser .....	24
6.2.1 Ganglinien und Korrelation.....	24
6.2.2 Interpolation der Grundwasserspiegellage.....	26
6.3 Modellierung.....	28
6.3.1 Grenzwert zwischen Infiltrations- und Drainageabfluss.....	28
6.3.2 Kalibrierung der Infiltrationsparameter.....	30
6.3.3 Kalibrierung der Drainageparameter.....	30
6.3.4 Vergleich der Ergebnisse mit Messdaten.....	31
.....	32
6.3.5 Verifikation mit Temperaturmessungen.....	32
6.4 Sanierungsschwerpunkte.....	33
7 Diskussion der Ergebnisse.....	34
7.1 Erreichung der Zielsetzung .....	34
7.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung.....	35
7.3 Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	36
8 Fazit.....	37
9 Literatur.....	37
10 Anhang.....	39



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.1: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens.....	15
Abbildung 6.1: Mittlere Tagesganglinien im Betrachtungsgebiet an Trockenwettertagen.....	23
Abbildung 6.2: Separation der Abflussganglinie.....	24
Abbildung 6.3: Ganglinien der Grundwassermessstellen.....	25
Abbildung 6.4: Schwankungsbreite der Grundwasserpegel im Betrachtungszeitraum.....	25
Abbildung 6.5: Mittlerer Grundwasserstand und Abfluss im Untersuchungsgebiet bei Trockenwetter .....	26
Abbildung 6.6: Grundwassereinfluss im Untersuchungsgebiet.....	26
Abbildung 6.7: Grundwassereinfluss im Betrachtungsgebiet (Zeitraum Dez. 2013-Feb. 2015).....	27
Abbildung 6.8: Schwankung des Grundwassers im Bereich der einzelnen Haltungen des Kanalnetzes (Zeitraum Dez. 2013-Feb. 2015).....	27
Abbildung 6.9: Anstieg des Grundwassers (Mittelwert aller Haltungen, Stundenwerte) im Januar 2015 .....	28
Abbildung 6.10: Anzahl der grundwasserbeeinflussten Haltungen (Sohniveau der Kanäle unter Grundwasserspiegel) und Fremdwasserabfluss .....	29
Abbildung 6.11: Mittlerer Grundwasserstand und Fremdwasserabfluss im Untersuchungsgebiet ..	30
Abbildung 6.12: Verteilung der Drainagekoeffizienten der 10 besten Parameterkombinationen.....	31
Abbildung 6.13: Simulierter und bilanzierter Fremdwasserabfluss im Untersuchungsgebiete.....	32
Abbildung 6.14: Mittlere tägliche Abwassertemperatur und Drainageabflüsse (Messung in 3 Teilnetzen).....	33

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Übersicht methodischer Ansätze der Fremdwasseranalyse (in Anlehnung an Karpf, 2012).....	12
Tabelle 5.1: Vorhandene Daten.....	16
Tabelle 5.2: Daten der Messkampagne.....	16
Tabelle 6.1: Schmutzwasseraufkommen.....	23
Tabelle 6.2: Parameter des Drainage-Modells und berechnete Fremdwasserspenden.....	30



## **1 Zusammenfassung**

Der Zufluss von Grund-, Drainage- und Oberflächenwasser in Entwässerungskanäle wird als Fremdwasser bezeichnet und stellt ein zunehmend ökologisches und ökonomisches Problem in vielen ländlichen Einzugsgebieten dar. Die Minimierung wird behördlich gefordert und ist aus Kostengründen ein wichtiges Ziel der Betreiber von Kanalnetzen und Kläranlagen.

In dem Forschungsvorhaben wurde eine neue Methode zur Analyse von Fremdwasserzuflüssen entwickelt und in einem ländlichen Untersuchungsgebiet angewandt. Kern der Methode sind Grundwasserpegeldaten, die anhand von Messungen in Hausbrunnen gewonnen wurden. Anhand der zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Grundwasserpegelmessungen wurde die Grundwasseroberfläche im Gebiet interpoliert und mit den Kanälen des Entwässerungsnetzes verschnitten. Durch Modellrechnungen wurde das Fremdwasseraufkommen für die Kanäle ermittelt und es wurden detaillierte Aussagen zur Dynamik und Verteilung der Fremdwasserzuflüsse abgeleitet.

Die Messung der Grundwasserstände und die Modellierung des Fremdwasseraufkommens stellen effektive Methoden zur Fremdwasseranalyse in ländlichen Gebieten dar. In der Weiterentwicklung der Methoden und der Nutzbarmachung von einfachen und kostengünstigen Messverfahren zur Bilanzierung der Fremdwasserabflüsse wird ein großes Potenzial zur Bewältigung der ökonomischen und ökologischen Herausforderungen in kleinen Einzugsgebieten gesehen.



## **2 Veranlassung und Zielstellung**

Die Einleitung von unbelastetem Wasser (Fremdwasser) in Abwasseranlagen stellt ein ökonomisches und ökologisches Problem dar. Überlastungen des Kanalnetzes und die erhöhte Belastung der Kläranlagen führen zu stofflicher und hydraulischer Belastung der Gewässer. Ziel der Betreiber von Abwasseranlagen ist es daher, Fremdwassereinleitungen zu lokalisieren und zu unterbinden. Aufgrund der Größe von Kanalnetzen ist die Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen zur Reduzierung der Fremdwassereinleitungen sehr kostenintensiv. Besonders in kleinen ländlichen Gemeinden sind oft akute Fremdwasserprobleme bei beschränkten finanziellen Mitteln zur Sanierung gegeben.

Im Rahmen des Projektes sollte ein Messkonzept und eine Software entwickelt werden, die eine Analyse der Fremdwassersituation wesentlich erleichtert. Durch die Messung von Grundwasserpegeln und die Anwendung geeigneter Berechnungsmodelle sollte eine kanalabschnittsgenaue Lokalisierung von Fremdwasserzuflüssen realisiert werden.

Die Zielstellung des Vorhabens kann wie folgt zusammengefasst werden.

- Entwicklung von kostengünstigen Messmethoden zur Ermittlung der hydrologischen Situation in ländlichen Einzugsgebieten
- Entwicklung einer modellgestützten Methode zur räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Analyse/Berechnung der Fremdwasserzuflüsse in ländlichen Kanalnetzen

Das übergeordnete Ziel des Projektes ist es, die Fremdwasseranalyse in ländlichen Einzugsgebieten weiterzuentwickeln und damit einen Beitrag zur ökonomisch und ökologisch effektiven Sanierung bestehender Systeme zu leisten.



## 3 Stand der Wissenschaft

### 3.1 Begriffe und Bedeutung von Fremdwasser

Als Fremdwasser werden nach Definition der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK, 2003) unerwünschte Zuflüsse von nicht behandlungsbedürftigem Wasser in Kanalisationen bezeichnet, die Abwasseranlagen unnötig belasten und damit die Systemfunktion beeinträchtigen. Wesentliche Fremdwasserquellen sind Grund- und Drainagewasser, Zuflüsse von Niederschlagswasser in Schmutzwasserkanäle bei Trennkanalisationen und Zuflüsse von Oberflächenwasser (z.B. bei Hochwasser).

Fremdwassereinleitungen stellen einen Kostenfaktor für die Siedlungsentwässerung und Abwasserbehandlung dar. Einerseits erfordern erhöhte Volumenströme höhere Investitions- und Betriebskosten. Andererseits sinkt die Effizienz der Abwasserreinigung mit zunehmendem Fremdwasseranteil am Abwasserstrom (z.B. Kroiss und Prendl, 1996; Decker, 1998; Michalska und Pecher, 2000; Schulz et al., 2005).

In Trennsystemen, die i.d.R. in ländlich geprägten Regionen errichtet wurden, bedeuten erhöhte Fremdwassereinleitungen oft Überlastungen der Kanalisation (Einstau, Überstau, Überflutung), Pumpwerke und Kläranlagen und infolge dessen direkte Belastungen der Gewässer. In vielen Gebieten besteht ein akuter Handlungsbedarf, der durch steigende Grundwasserstände und eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen verschärft wird.

Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Sanierung ist eine Analyse des Ist-Zustands und eine möglichst exakte Lokalisierung und Quantifizierung der Fremdwasserquellen. Bisher entwickelte Verfahren der Fremdwasseranalyse sind relativ kostenintensiv aufgrund großer Aufwendungen bei der messtechnischen Erfassung und Datenauswertung. Des Weiteren erlauben Analyseergebnisse keine konkreten Aussagen zur direkten Lokalisierung der Fremdwasserquellen, da die Methoden auf einer Betrachtung von Einzugsgebieten beruhen und eine kanalabschnittsgenaue Aussage nicht möglich ist. Direkte Messungen an Kanalabschnitten sind sehr kostenintensiv und für viele Betreiber finanziell nicht leistbar. Der finanzielle Rahmen wird zudem durch den demografischen Wandel (besonders in Ostdeutschland, z.B. Region Lausitz, Grenzregionen) verschärft, sodass Investitionen in Entwässerungssysteme erschwert werden.



Im Folgenden werden die Bedingungen in ländlich geprägten Regionen, Methoden und Modellansätze der Fremdwasseranalyse, Probleme und der im Projekt verfolgte Lösungsansatz dargestellt.

### **3.1.1 Fremdwasser in ländlich geprägten Einzugsgebieten**

Kanalnetze im ländlichen Raum zeichnen sich durch hohe Kanallängen je angeschlossenen Einwohner aus und sind oft als Trennsysteme, d.h. als 2-Kanalsystem, bei dem Niederschlags- und Schmutzwasser getrennt abgeleitet werden, ausgeführt. Neben Grund- und Drainagewasser gilt auch Niederschlagswasser, das Schmutzwasserkanälen zufließt, als Fremdwasser. Oft sind aufgrund der geringeren Dimensionen der Schmutzwasserkanäle Überlastungen bei Niederschlagsereignissen zu beobachten, die dem Fehlanchluss von Entwässerungsflächen, aber auch dem Zufließen von Niederschlagswasser zu Schachtöffnungen im Straßenbereich zuzuschreiben sind. Des Weiteren führen die Infiltration von Grundwasser in schadhafte Kanäle und Drainageeinleitungen zu Spitzenabflüssen, die eine schadlose Ableitung des Abwassers verhindern. Überstau, Überflutung und unkontrollierte direkte Einleitungen von Abwasser in Gewässer und deren Schädigung sind die Folge. Dauerhafte Grundwasser- und Drainageeinleitungen bewirken zudem eine Beeinträchtigung der Abwasserbehandlung und damit gleichfalls eine erhöhte Belastung der Gewässer. Vorgaben zu maximalen Fremdwassermengen werden in dem Arbeitsblatt der DWA A118 (DWA, 2006) gemacht. Trotz der Bemühungen, Kanalnetze regelkonform auszubauen, sind vielerorts und besonders im ländlichen Raum Probleme mit zu großen Fremdwassermengen zu verzeichnen (Hennerkes, 2007).

Da Fremdwasserquellen sehr vielfältig und über das gesamte Einzugsgebiet verteilt sind, erscheint Fremdwasser als diffuses schwer lokalisierbares Problem. Dementsprechend werden Untersuchungen zum Fremdwasseraufkommen und zur Lokalisierung von Fremdwasserzuflüssen in der Regel über kostenintensive lokale Messungen im Kanalnetz und Auswertungen mit den Methoden der Fremdwasseranalyse realisiert.



### 3.1.2 Methoden der Fremdwasseranalyse

Zur Abschätzung der Fremdwassermengen können verschiedene Methoden genutzt werden (Tabelle 3.1).

Quantitative Aussagen sind mithilfe von hydraulischen, chemischen und modelltechnischen Methoden ableitbar. Hydraulische Methoden basieren auf einer Bilanzierung des Gesamtabflusses im Kanalnetz, wobei Informationen zum Abfluss, zum Schmutzwasseraufkommen und zum Niederschlagsgeschehen vorhanden sein sollten. Bei den chemischen Verfahren werden Konzentrationen abwasserrelevanter Parameter, die sich in der Kanalisation relativ stabil verhalten, zur Quantifizierung herangezogen. Auch Messdaten wie z.B. Trübung und elektrische Leitfähigkeit, die mit chemischen Parametern stark korrelieren, werden zur Analyse herangezogen (Aumond und Joannis, 2008).

Zu den qualitativen Methoden, d.h. Methoden, die zur Lokalisierung von Fremdwasserquellen dienen, können die Auswertung visueller Verfahren (Kanal-TV, Signalnebelverfahren), die Anwendung statistischer Analysen, Modellberechnungen und die Nutzung von Grundwasserdaten gezählt werden. Visuelle Techniken sind kostenintensiv, dienen dem direkten Auffinden der Fremdwasserzuflüsse und bilden somit eine wichtige Entscheidungsgrundlage für Sanierungsmaßnahmen. Statistische Methoden wurden z.B. im Rahmen des EU-Projektes APUSS (Franz *et al.*, 2004; Franz, 2007) angewandt.



Tabelle 3.1: Übersicht methodischer Ansätze der Fremdwasseranalyse (in Anlehnung an Karpf, 2012)

Art der Methode	Beispiele	
quantitativ	hydraulisch	Nachtminimummethode (Fischer, 1990; ATV-DVWK, 2003) Tagesmittelmethode (Hager et al., 1985) Jahresschmutzwasseranfall (Schmidt, 2000) Dreiecksmethode (LFU, 2001) Methoden der Basisabflusssparation (LFU, 2001; Wittenberg und Brombach, 2002; Vaes et al., 2005; Ertl et al., 2008)
	chemisch	chemische Methode (Hager et al., 1985; Kracht und Gujer, 2004; Aumond und Joannis, 2008; Bares et al., 2008) Isotopenmethode (De Benedittis und Bertrand-Krajewski, 2005)
Qualitativ	Auswertung visueller Inspektionen statistische Analysen (Franz, 2007) Auswertung von Grundwasserdaten und Niederschlagsdaten (Kümmel, 2011)	
quantitativ und qualitativ	Modellierung (Karpf, 2012)	

### 3.1.3 Modellierung von Fremdwasserzuflüssen

Zur Beschreibung der Niederschlagsabflüsse können zahlreiche Prozessmodelle der Abflussbildung und Abflusskonzentration Anwendung finden. Einen Überblick bietet ATV (1986) und ATV/DVWK (1987). Physikalisch basierte Modelle zur Abbildung der Grundwasserinfiltration sind bei Gustafsson (2000), Karpf und Krebs (2004), de Silva *et al.* (2004), Rodriguez *et al.* (2004) und Wolf *et al.* (2005) beschrieben und basieren auf dem dynamischen Grundgesetz der Geohydraulik (Gesetz von DARCY z.B. in Busch *et al.*, 1993). Konzeptionelle Modellansätze können je nach Datenlage auch Anwendung finden (z.B. Belhadj *et al.*, 1995; Gustafsson *et al.*, 1999; Wittenberg und Brombach, 2002; Karpf und Krebs, 2004; Rossmann, 2004; Hennerkes, 2006; Raynaud *et al.*, 2008).

Der Vorteil eine Modellierung von Fremdwasserzuflüssen besteht vor allem in der Nutzbarmachung von komplexen fremdwasserrelevanten Daten und Informationen und der Möglichkeit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Wie dargestellt, sind zahlreiche Modelle zur Abbildung der Prozesse einsetzbar. Eine breite Anwendung findet bislang nur die Niederschlags-Abfluss-Modellierung in entsprechenden Kanalnetzrechnungsprogrammen. Einschränkend muss bemerkt werden, dass N/A-Modellierungen in kleinen Einzugsgebieten weniger häufig eingesetzt werden als



in städtisch geprägten Gebieten, da der Aufwand für Modellaufbau und -kalibrierung hoch ist. Es wird jedoch eingeschätzt, dass die Etablierung von modellbasierten Ansätzen, die speziell auf ländliche Einzugsgebiete ausgerichtet sind, erfolgreich angewandt werden können und wesentliche Kosteneinsparungen bei der Analyse der Fremdwassersituation bedeuten.

### 3.2 Problemidentifikation

Die Vielzahl der vorhandenen Methoden und Ansätze sollte nicht über den Fakt hinweg täuschen, dass bisherige Methoden der Fremdwasseranalyse sehr kostenintensiv sind, insbesondere wenn eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung erforderlich ist, um gezielt Kanalnetzabschnitte zu sanieren bzw. Konzepte zu erarbeiten, die wirtschaftlich umsetzbar und ökologisch vertretbar sind.

Ein häufig auftretendes Problem, das mit Fremdwasseranalysen in Verbindung steht, ist die Verfügbarkeit von Daten. Oft müssen fehlende Daten durch kostspielige Messungen bereit gestellt werden und vorhandene Daten sind nicht nutzbar, wenn elementare additive Daten nicht erfasst wurden.

Die Entwicklung geeigneter Konzepte ist besonders im ländlichen geprägten Einzugsgebieten dringlich. Dort ist ein erhöhtes Pro-Kopf-Fremdwasseraufkommen aufgrund wesentlich größerer spezifischer Kanallängen auszumachen (Karpf und Krebs, 2007). Hinzu kommt, dass Probleme in ländlichen Einzugsgebieten, die auf Fremdwasser zurückgeführt werden (Überlastungen der Kanalnetze, Gewässergefährdungen), durch klimatische und demografische Entwicklungen verschärft werden.

Konventionelle Methoden der Fremdwasseranalyse werden in ländlichen Regionen kaum angewandt. Dies ist vor allem dem Aufwand zuzuschreiben, der mit der Anwendung verbunden ist. Ein Bedarf der Fremdwasseranalyse ist allerdings in hohem Maße gegeben. Vor allem seitens der Betreiber ist das Interesse groß, Fremdwasserzuflüsse exakt zu lokalisieren und zu charakterisieren, um zielgerichtet Sanierungsmaßnahmen zu planen.

Fremdwassereinleitungen zu lokalisieren und zu reduzieren ist eine dringliche Aufgabe, um unnötige hydraulische und stoffliche Belastungen der Gewässern zu unterbinden. Von konkretem Interesse ist dabei in ländlichen Gebieten die Lage falsch angeschlossener Entwässerungsflächen und die Lage von Hausdrainagen und schadhafte Kanäle.



Im Projekt erfolgte eine Fokussierung auf die Quantifizierung und Lokalisierung von Grundwasser- und Drainagezuflüssen in das Kanalnetz.



## 4 Vorgehensweise

### 4.1 Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasste folgende Punkte:

#### Arbeitspaket 1

- Verarbeitung der Daten des Untersuchungsgebietes (Daten des Pumpwerkes, Netzdaten, Daten zum Schmutzwasseraufkommen)

#### Arbeitspaket 2

- Konstruktion und Test der Messgeräte zum Monitoring des Grundwasserstandes
- Installation und Betreuung der Messgeräte zur Messung der Grundwasserpegel (Messkampagne)

#### Arbeitspaket 3

- Programmierung und Test der Software zur Datenaufbereitung, Grundwasserinterpolation und Fremdwasseranalyse

#### Arbeitspaket 4

- Datenauswertung, Ergebnisdarstellung und Dokumentation

### 4.2 Vorhabensablauf

Da Vorhabensablauf ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

Arbeitspaket	2013			2014				2015		
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
AP 1 Datenerhebung und Datenaufbereitung										
AP 2 Messgeräte und Monitoring										
AP 3 Programmierung Analysemodul										
AP 4 Modellanwendung und Bericht										

Abbildung 4.1: Zeitlicher Ablauf des Vorhabens



## 5 Datengrundlage und Methoden

### 5.1 Vorhandene Daten des Modellgebietes

Die vorhandenen Daten sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

Tabelle 5.1: Vorhandene Daten

Daten	Quelle
Hauptpumpwerk	Betreiber des Kanalnetzes/
- Volumen (5min Werte, 12/2013-1/2015)	Abwasserzweckverband
- Füllstand (5min Werte, 12/2013-1/2015)	
Informationen zu weiteren Pumpwerken	
Trinkwasserverbrauch (Jahreswert)	Gemeindeverwaltung/ TW- Versorger
Bevölkerungszahlen (Straßenweise)	
GIS-Daten	Abwasserzweckverband/ Betreiber des
- Angaben zu Kanälen und Schächten	Kanalnetzes
- Grundstücks- und Gebäudebegrenzungen	
DGM (digitales Geländemodell)	Land Sachsen, Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung

Im Anhang ist das Gebiet dargestellt.

### 5.2 Messdaten

Eine Übersicht der Messstellen sind in Tabelle 5.2 und im Anhang zu finden.

Tabelle 5.2: Daten der Messkampagne

Daten	Quelle
15 Grundwassermessstellen in Hausbrunnen	wasserWerkstatt
- Füllstand (5min Werte, Sensor Keller PR-36XW)	
- 12/2013-1/2015)	
1 Regenschreiber	
- Niederschlagshöhe (5min Werte, Auflösung 0,2mm)	
4 Temperaturmessgeräte (verschiedene Standorte)	
- Temperatur (Auflösung 10s)	
- 6/2014-12/2014	
GIS Daten	
- geodätische Höhe der Hausbrunnen (Lasernivellement, Bezug Schachthöhe des Kanalnetzes)	
- Koordinaten GPS	



## 5.3 Statistische Verfahren

### 5.3.1 Methode der kleinsten Quadrate

Bei der Methode der kleinsten Quadrate werden die Quadrate die Differenzen zwischen Soll (Messung) und Istwert (Modell) gebildet und aufaddiert. Je geringer die Summe der Quadrate der Residuen ist, desto höher ist die Qualität der Modellanpassung. Durch die quadratische Funktion werden große Abweichungen stärker „bestraft“ als kleinere. Die Methode wurde im Rahmen der Modellkalibrierung eingesetzt.

### 5.3.2 Regression

Mit einer Regressionsanalyse wird ein linearer oder nichtlinearer Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable und einer oder mehreren unabhängigen Variablen durch eine mathematische Funktion beschrieben. Bei mehreren unabhängigen Variablen wird das Verfahren als multiple Regression bezeichnet.

$$y_i = \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \beta_0 + \varepsilon_i$$

$\beta_1, \beta_n$	<i>Koeffizienten</i>
$\beta_0$	<i>Konstante</i>
$x_1, x_n$	<i>unabhängige Variablen</i>
$y_i$	<i>abhängige Variable</i>
$\varepsilon_i$	<i>Residuum</i>

Die abhängige Variable stellt die Eingangsgröße (Zielgröße) dar, die durch den funktionalen Zusammenhang der unabhängigen Variablen, Koeffizienten und Konstanten beschrieben werden kann.

Zur Ermittlung der Koeffizienten werden die quadratischen Abweichungen der Residuen minimiert (Methode der kleinsten Quadrate). Die Regressionsanalyse wurde im Rahmen der Modellkalibrierung eingesetzt.

### 5.3.3 Clusteranalyse

Die Clusteranalyse ist ein datenreduzierendes statistisches Verfahren, das multivariate und durch einen festen Satz von Merkmalen beschriebene Untersuchungsobjekte nach Maßgabe ihrer



Ähnlichkeit in homogene Gruppen (Cluster) einteilt. Die Gruppeneinteilung (Clustering) erfolgt durch die Ermittlung von Abständen zwischen den Objekten (Merkmalsträger) anhand der zugeordneten Merkmale (Variablen). Als Distanzmaß kann z.B. die euklidische Distanz genutzt werden (Petzold, 2008), wenn es sich bei den untersuchten Merkmalen ausschließlich um metrische verhältnisskalierte Daten handelt. Die Nutzung unterschiedlich skaliertes Merkmalseigenschaften erfordert eine Standardisierung der Variablen (Merkmale). Ggf. ist auch eine Transformation der Variablen erforderlich. Die Methode wurde im Rahmen der Modellkalibrierung eingesetzt.

#### **5.4 Grundwasserinterpolation**

Die Interpolation der Grundwasserspiegellage wurde im Rahmen des Projektes mit verschiedenen stochastischen und deterministischen Verfahren erprobt (Käseberg, 2015). Anhand der Ergebnisse einer Kreuzvalidierung wurde die lineare Interpolation unter Berücksichtigung der Geländehöhe (digitales Geländemodell) als Verfahren für die Interpolation der Grundwasserspiegel ausgewählt.

#### **5.5 Methoden der Fremdwasseranalyse**

##### *Trockenwetterseparation*

Die Ermittlung des Trockenwetterabflusses ist Grundlage für die Ermittlung der Fremdwasserabflüsse im Gebiet (Gesamtabfluss an Fremdwasser im Gebiet).

Für die Ermittlung von Trockenwettertagen (Tage ohne Niederschlagsabflüsse), wurden Tagesganglinien der Messungen des Hauptpumpwerkes ausgewertet. Die Separation erfolgte in 2 Teilschritten.

1. Mithilfe von Niederschlagsmessungen wurden Trockenwettertage identifiziert und Trockenwetterganglinien (stündliche Auflösung) berechnet. Die Tagesganglinien an Trockenwettertagen dienen zur Ermittlung typischer Spannbreiten des Trockenwetterabflusses.

2. Basierend auf den Tagesganglinien wurden Trockenwettertage im gesamten Untersuchungszeitraum bestimmt (auch für Perioden ohne Niederschlagsmessungen).

Die stündlichen Abflusswerte dienen weiterhin zur Ermittlung der Schmutzwasserabflüsse an Wochenend- und Werktagen.



## Quantifizierung

Die Bilanzierung der grundwasser- bzw. drainagebedingten Fremdwasserabflüsse erfolgte durch Differenzbildung zwischen Trockenwetterabflüssen und Schmutzwasseraufkommen (Gleichung 1).

$$Q_{F,IN,DR} = Q_{T,24} - Q_{S,24} - Q_{PW} \quad \text{Gleichung 1}$$

$Q_{F,IN,DR}$	<i>Fremdwasserabfluss durch Grundwasser/ Drainagen</i>
$Q_{S,24}$	<i>mittlerer täglicher Schmutzwasserabfluss</i>
$Q_{T,24}$	<i>mittlerer täglicher Trockenwetterabfluss</i>
$Q_{PW}$	<i>mittlerer täglicher Zufluss durch Pumpwerke</i>

## 5.6 Modellgrundlagen

Der Abfluss im Kanalnetz kann durch einen multiplen Ansatz berechnet werden (Gleichung 2).

$$Q = Q_{IN} + Q_{DR} + Q_N + Q_{OF} + Q_S \quad \text{Gleichung 2}$$

$Q$	<i>Abwasserabfluss</i>
$Q_{IN}$	<i>Infiltration</i>
$Q_{DR}$	<i>Drainage</i>
$Q_N$	<i>Niederschlag</i>
$Q_{OF}$	<i>Oberflächenwasser</i>
$Q_S$	<i>Schmutzwasser</i>

### 5.6.1 Infiltrationsmodell

Kern des Infiltrationsansatzes ist der Infiltrationsfaktor  $K_{IN}$  (Gleichung 3).

$$K_{IN} = \frac{k_F \cdot A_L}{\Delta Z} \quad \text{mit} \quad \text{Gleichung 3}$$

$\Delta Z = f(\text{Flächenform, Flächenlage, Kanalbettung})$

$K_{IN}$	<i>Infiltrationsfaktor</i>
$A_L$	<i>Schadensfläche pro Kanalmeter</i>
$k_F$	<i>hydraulische Leitfähigkeit</i>
$\Delta Z$	<i>Wirkungsausbreitung</i>

Der Parameter  $K_{IN}$  repräsentiert eine kanalspezifische Größe, die Schadensformen, Schadensausdehnung, hydraulische Leitfähigkeit des Bodens und Wirkungsausbreitung der Leckagen beinhaltet. Der Infiltrationsfaktor stellt daher ein Maß für das Infiltrationspotenzial und für die Schadhafteigkeit eines Kanals dar.



Die Infiltrationsrate ( $Q_{IN}$ ) wird in Anlehnung an das Gesetz von DARCY durch Gleichung 4 beschrieben. Potenzialdifferenzen zwischen Wasserstand im Kanal und Grundwasserstand stellen die treibende Kraft der Infiltration dar. Die Länge des Kanalrohres wurde einbezogen, da die Schadensfläche als längenspezifischer Parameter in den Infiltrationsfaktor  $K_{IN}$  eingeht (siehe Gleichung 3). Des Weiteren ist ein Exponent in Anlehnung an den Ansatz von TORICELLI (Ausfluss aus einer Öffnung) zur besseren Modellanpassung in den Ansatz aufgenommen worden.

$$Q_{IN}(\Delta H) = K_{IN} \cdot \Delta H^{K1} \cdot L \quad \text{Gleichung 4}$$

$$\Delta H = H_{GW} - H_{Kanal}$$

$Q_{IN}$	<i>Infiltrationsvolumenstrom</i>
$K_{IN}$	<i>Infiltrationsfaktor</i>
$L$	<i>Kanallänge</i>
$\Delta H$	<i>Potenzialdifferenz</i>
$K1$	<i>Parameter</i>
$H_{GW}$	<i>Grundwasserstand</i>
$H_{Kanal}$	<i>Wasserstand im Kanal (vereinfacht: Kanalsole)</i>

### 5.6.2 Drainagemodell

Das Modell wurde analog zum Infiltrationsansatz entworfen. Da die Höhe der Drainage nicht bekannt ist, muss die Höhe im Rahmen der Kalibrierung ermittelt bzw. festgelegt werden (Gleichung 5).

$$Q_{DR}(\Delta H) = K_{DR} \cdot \Delta H^{K2} \quad \text{Gleichung 5}$$

$$\Delta H = H_{GW} - H_{initial}$$

$Q_{DR}$	<i>Drainagevolumenstrom</i>
$K_{DR}$	<i>Drainagefaktor</i>
$L$	<i>Kanallänge</i>
$\Delta H$	<i>Potenzialdifferenz</i>
$K2$	<i>Parameter</i>
$H_{GW}$	<i>Grundwasserstand</i>
$H_{initial}$	<i>initialer Wasserstand (Höhe der Drainage)</i>

### 5.6.3 Oberflächengewässer und Niederschlag

Zuflüsse durch Oberflächengewässer können durch potenzialgesteuerte Ansätze ähnlich dem Infiltrations- und Drainageansatz implementiert werden. Niederschlagsabflüsse können durch Ansätze der Niederschlags/Abfluss- Modellierung einbezogen werden. Auf die Modelle wird im



Weiteren nicht eingegangen, da im Rahmen des Vorhabens eine Fokussierung auf Fremdwasserabflüsse durch Infiltration und Drainagen erfolgte.

#### 5.6.4 Kalibrierung

Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf ein vereinfachtes Modell (Gleichung 6) in dem Oberflächenwasserzuflüsse und Niederschlagszuflüsse nicht betrachtet wurden.

$$Q = Q_{IN} + Q_{DR} + Q_S$$

Gleichung 6

$Q_T$     *Trockenwetterabfluss*  
 $Q_{IN}$    *Infiltration*  
 $Q_{DR}$    *Drainage*  
 $Q_S$     *Schmutzwasser*

Die Kalibrierung erfolgt in drei Schritten:

1. Festlegung des Grenzwertes, ab welchem mit Drainagezuflüssen gerechnet wird
2. Kalibrierung der Infiltrationsparameter
3. Kalibrierung der Drainageparameter

*Schritt 1: Festlegung des Grenzwertes für Drainagezuflüsse*

- 1.1 Der Grenzwert wird anhand des Verlaufs der Fremdwasserabflüsse in Relation zum Grundwasserpegel festgelegt. Aus der Festlegung des Grenzwertes ergeben sich weiterhin die Abflüsse, die nur durch Infiltration von Grundwasser bedingt sind (Fremdwasserabfluss unterhalb des Grenzwertes).



## Schritt 2: Kalibrierung der Infiltrationsparameter

- 2.1 Die Variable K1 (Gleichung 4) wird festgelegt (Standardwert 1,0).
- 2.2 Der mittlere  $K_{IN}$ -Wert wird mittels Regression (Gleichung 4) für den Gesamtabfluss der Infiltration im Gebiet bestimmt (Regressionsmodell bis Grenzwert Drainagezuflüsse).
- 2.3 Mit dem ausgewählten Parameter K1 aus 2.1 wird die Infiltrationsvariable dhl nach Gleichung 7 berechnet.  
$$dhl = \Delta H^{K1} \cdot L \quad \text{Gleichung 7}$$
- 2.4 Die Infiltrationsvariable dhl wird anhand einer Clusteranalyse in 4 Gruppen ähnlicher Dynamik und Spannbreite unterteilt.
- 2.5 Der mittlere  $K_{IN}$ -Parameter (Schritt 2.2) wird genutzt um die Spannbreite der differenzierten  $K_{IN}$ -Parameter festzulegen. (Standard: 10 Werte von 50% - 150% des mittleren  $K_{IN}$ -Wertes)
- 2.6 Für alle Kombinationen der differenzierten  $K_{IN}$ -Parameter (10) und Infiltrationsvariablen (4) werden die Ergebnisse der Infiltrationsgleichung (Gleichung 4) ermittelt ( $10^4$  Kombinationen).
- 2.7 Mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird die beste Kombination der  $K_{IN}$ -Parameter durch Vergleich mit den Messwerten (bilanzierte Fremdwasserabflüsse im Gesamtgebiet) ermittelt.
- 2.8 Berechnung des Infiltrationsvolumenstroms mit den kalibrierten Parametern (beste Parameterkombination).

## Schritt 3: Kalibrierung der Drainageparameter

- 3.1 Bestimmung der initialen Höhe, ab welchem mit einem Drainageabfluss gerechnet wird. Die initiale Höhe entspricht den Grundwasserständen am Netzknoten, ab welchem Drainagezuflüsse modelliert werden.
- 3.2 Analog zu Schritt 2.1 wird der K2 Wert festgelegt.
- 3.3 Analog zu Schritt 2.2 wird der mittlere  $K_{DR}$ -Wert anhand Gleichung 5 bestimmt. Der Drainagezufluss (Zielgröße der Regression) ergibt sich aus der Differenz von Fremdwasserabfluss und modellierten Infiltrationszuflüssen nach Schritt 2.8.
- 3.4 Analog zu Schritt 2.3 wird die Drainagevariable dh nach Gleichung 8 bestimmt.  
$$dh = \Delta H^{K2} \quad \text{Gleichung 8}$$
- 3.5 Analog zu Schritt 2.4 wird die Drainagevariable dh mit einer Clusteranalyse in 4 Gruppen aufgeteilt.
- 3.6 Analog zu Schritten 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 werden die differenzierten  $K_{DR}$ -Parameter und Drainagezuflüsse bestimmt.



## 6 Ergebnisse

### 6.1 Abfluss Kanalnetz

#### 6.1.1 Trockenwetterabfluss und Fremdwasser im Betrachtungsgebiet

In Abbildung 6.1 sind mittlere Tagesganglinien für Trockenwetter dargestellt.

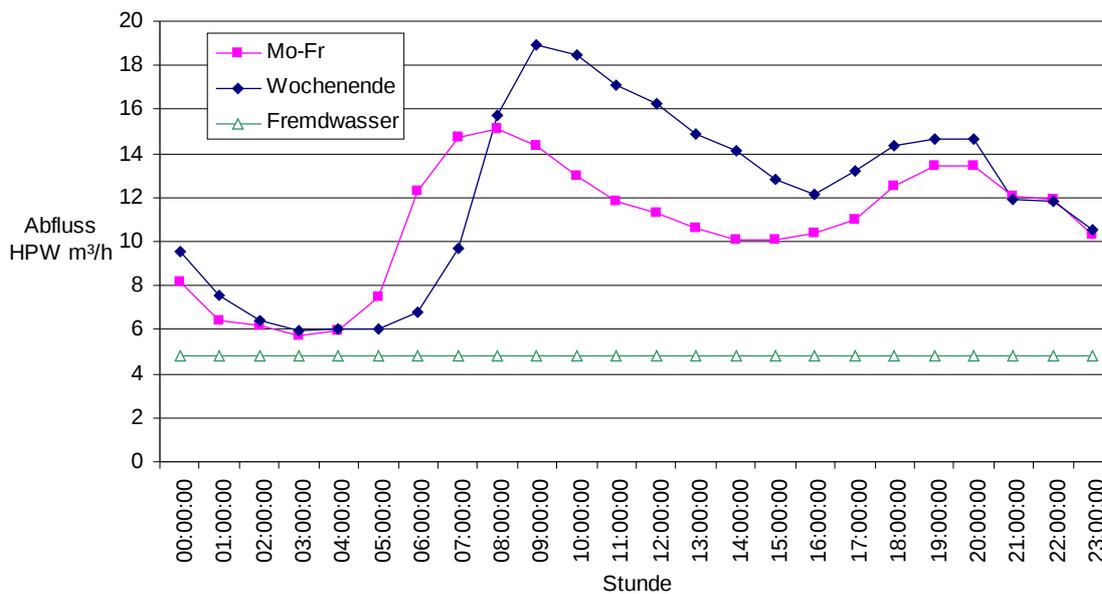


Abbildung 6.1: Mittlere Tagesganglinien im Betrachtungsgebiet an Trockenwettertagen

Da sich Wochenend- und Werktage (Mo-Fr) signifikant in der Dynamik und im Schmutzwasseraufkommen unterscheiden, wurde bei den Auswertungen das Schmutzwasseraufkommen unterschiedlich berücksichtigt.

Die Schmutzwasserabflüsse für das Gesamtgebiet ergaben sich entsprechend Tabelle 6.1.

Tabelle 6.1: Schmutzwasseraufkommen

Kriterium	Schmutzwasseraufkommen (m³/d)
Wochentage (Montag- Freitag)	145
Wochenendtage (Sonnabend/ Sonntag)	178
Gesamt (alle Tage)	155

Die Separation der Abflussganglinie für das Gesamtgebiet ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

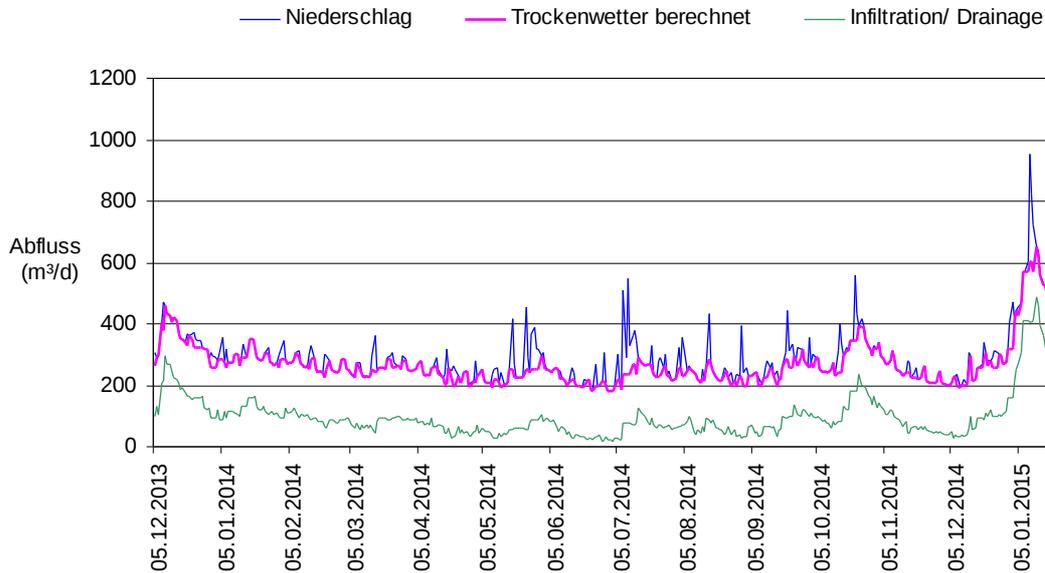


Abbildung 6.2: Separation der Abflussganglinie

Auf Basis des ermittelten Abflussanteils, welcher der Grundwasserinfiltration und Zuflüssen durch Hausdrainagen zugeordnet werden kann (Abbildung 6.2, „Infiltration/Drainage“), wird das Modell kalibriert.

## 6.2 Grundwasser

### 6.2.1 Ganglinien und Korrelation

Der Verlauf der Grundwasserpegel ist anhand Abbildung 6.3 nachvollziehbar.

Die Boxplots der skalierten Messwerte (Tageswerte) zeigen die Unterschiede in der Dynamik (Abbildung 6.4). Prinzipiell kann eine sehr ähnliche Schwankungsbreite der Grundwasserpegel im Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Größere Abweichungen zwischen den Messstellen sind in Bezug auf Extremwerte festzustellen.

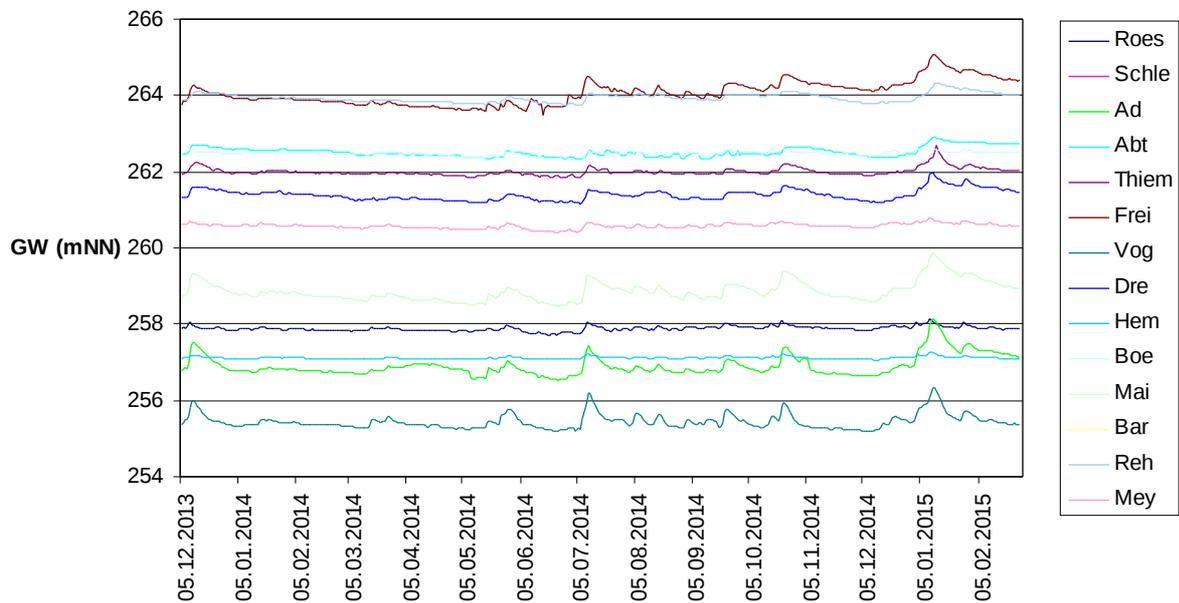


Abbildung 6.3: Ganglinien der Grundwassermessstellen

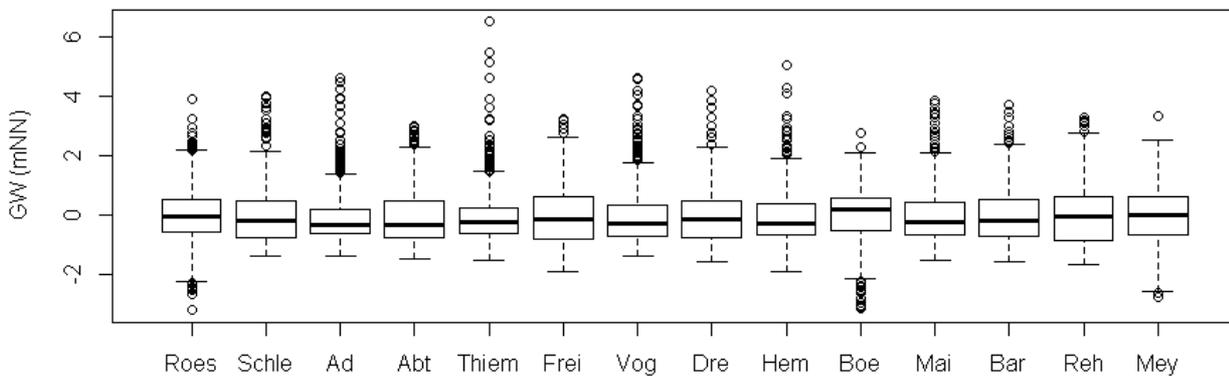


Abbildung 6.4: Schwankungsbreite der Grundwasserpegel im Betrachtungszeitraum

Die Gegenüberstellung der Abflussganglinie des zentralen Pumpwerks und Mittelwerte der Grundwasserspiegellage verdeutlicht den engen Zusammenhang zwischen Abwasseraufkommen und Grundwasserpegel (Abbildung 6.5). Infiltrierendes und durch Drainagen zufließendes Fremdwasser ist die Ursache für die enge Korrelation.

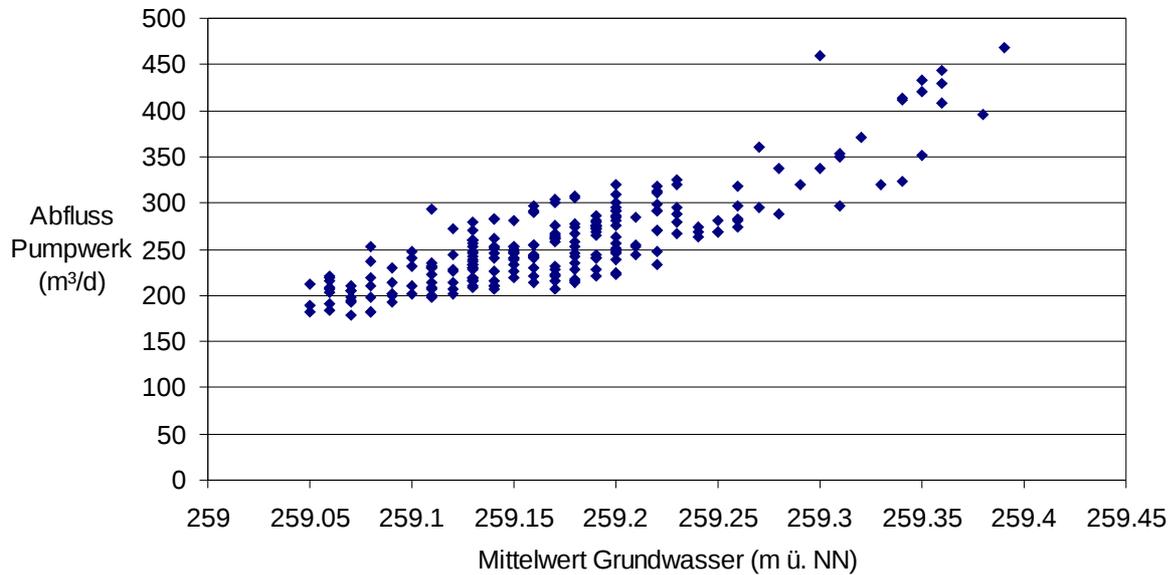


Abbildung 6.5: Mittlerer Grundwasserstand und Abfluss im Untersuchungsgebiet bei Trockenwetter

### 6.2.2 Interpolation der Grundwasserspiegellage

Die Lage des Kanalnetzes unterhalb des Grundwasserspiegels kann anhand der Untersuchungen ermittelt werden (Abbildung 6.6).

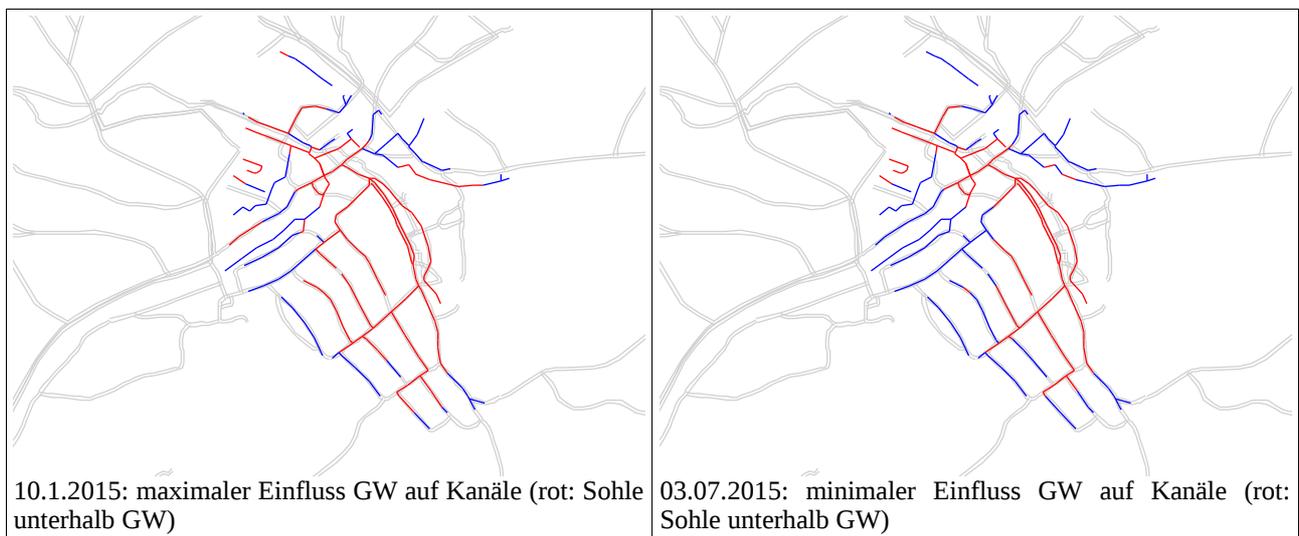


Abbildung 6.6: Grundwassereinfluss im Untersuchungsgebiet

Neben der Lokalisierung der Grundwassereinflussbereiche sind durch die Interpolationen Angaben zur Dauer des Grundwassereinflusses für die Haltungen möglich (Abbildung 6.7). Im



Untersuchungsgebiet kann festgestellt werden, dass die Grenze zwischen grundwasserbeeinflussten und nicht beeinflussten Kanälen relativ scharf verläuft und nur wenige Kanäle im Wechselbereich des Grundwassers liegen.

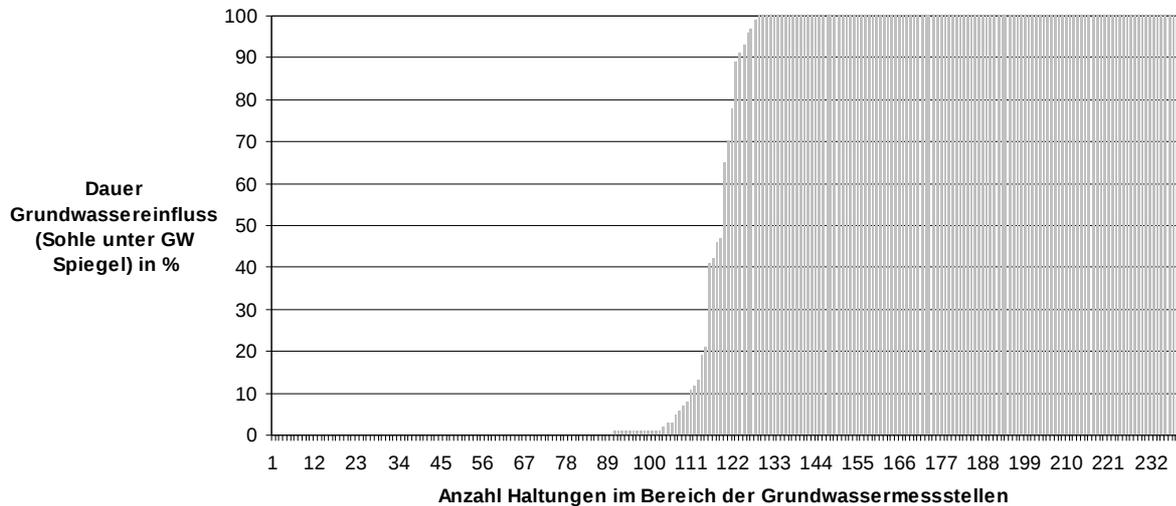


Abbildung 6.7: Grundwassereinfluss im Betrachtungsgebiet (Zeitraum Dez. 2013-Feb. 2015)

Ein für den Fremdwassereinfluss und Sanierungsmaßnahmen wichtiges Kriterium sind weiterhin die Schwankungen des Grundwassers im Bereich der Känäle. Die Interpolationen erlauben eine hochaufgelöste räumliche Einordnung der Grundwasserdynamik (Abbildung 6.8).

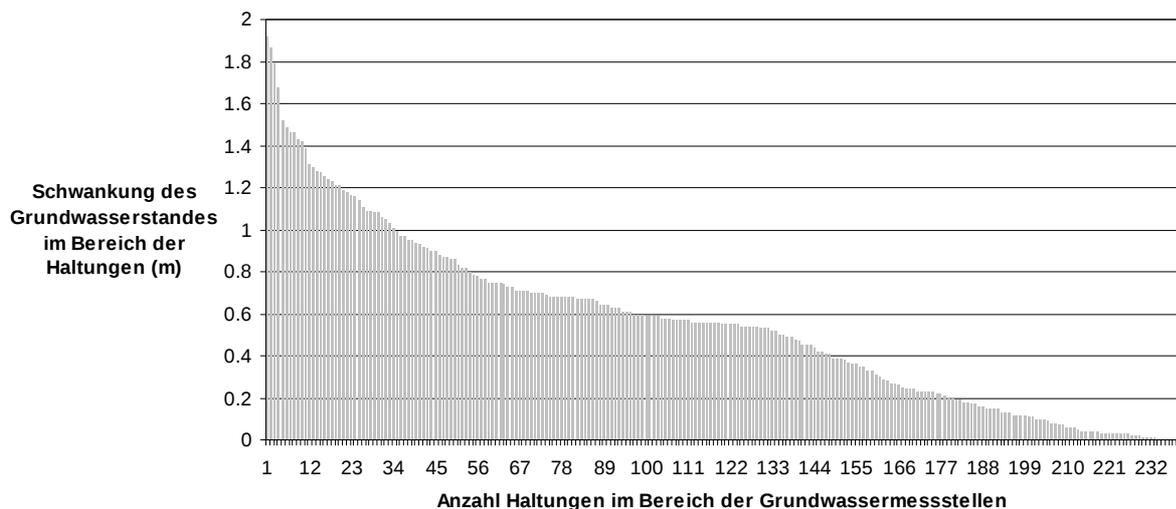


Abbildung 6.8: Schwankung des Grundwassers im Bereich der einzelnen Haltungen des Kanalnetzes (Zeitraum Dez. 2013-Feb. 2015)



Des Weiteren ist der Verlauf der Grundwasserspiegellage zeitlich hoch aufgelöst darstellbar, sodass auch sehr kurzzeitige Ereignisse abgebildet werden können (Abbildung 6.9).

Im Rahmen der Auswertungen zeigte sich, dass konkrete Betrachtungen zur Dynamik in dem Untersuchungsgebiet anhand von Stundenwerten erfolgen sollten. Im konkreten Fall konnte festgestellt werden, dass das Grundwassersystem sehr schnell auf Niederschläge reagiert und der Grundwasserstand deutlich ansteigt.

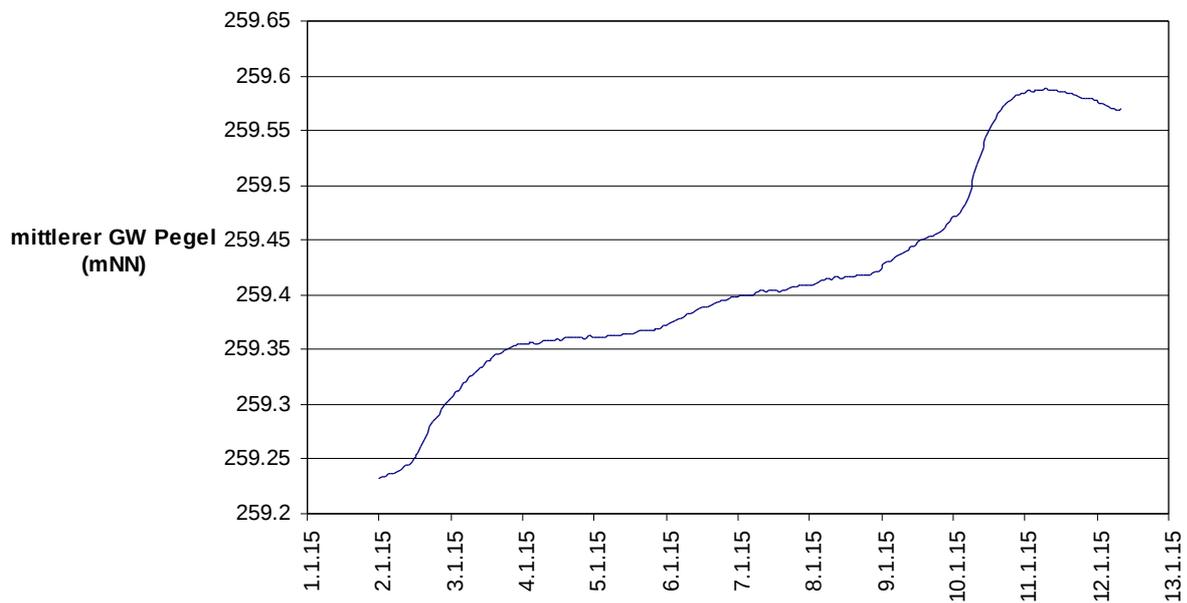


Abbildung 6.9: Anstieg des Grundwassers (Mittelwert aller Haltungen, Stundenwerte) im Januar 2015

## 6.3 Modellierung

### 6.3.1 Grenzwert zwischen Infiltrations- und Drainageabfluss

Wie in Abschnitt 5.6.4 erläutert besteht der Modellansatz aus einem Infiltrations- und Drainage-Teilmodell. Die Aufteilung erfolgt anhand der Festlegung von Grenzwerten für die jeweiligen Modelle. D.h. es wird festgelegt ab welchen Grundwasserspiegellagen mit der Grundwasserinfiltration in öffentliche Kanäle und Drainageabflüssen aus dem privaten Bereich zu rechnen ist.

Für das Untersuchungsgebiet zeigte sich anhand der Betrachtung von Ganglinien und Proberechnungen, dass mit dem Infiltrationsmodell für die öffentlichen Kanäle keine



zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden konnten, da trotz des sehr starken Einflusses von Grundwasser auf die öffentlichen Kanäle keine äquivalent hoher Infiltrationsvolumenstrom registriert wurde. Vielmehr zeigt sich (Abbildung 6.10), dass eine relativ geringe Zunahme der Anzahl grundwasserbeeinflusster Kanäle einen gravierenden Anstieg der Fremdwasserzuflüsse zur Folge hat.

Daraus wurde geschlossen, dass private Kanäle, deren Ausdehnung und Lage nicht bekannt ist, sowie direkte Zuläufe durch Drainagen und Brunnenüberläufe einen höheren Einfluss auf die Dynamik des Fremdwassers haben als undichte Kanäle des öffentlichen Netzes.

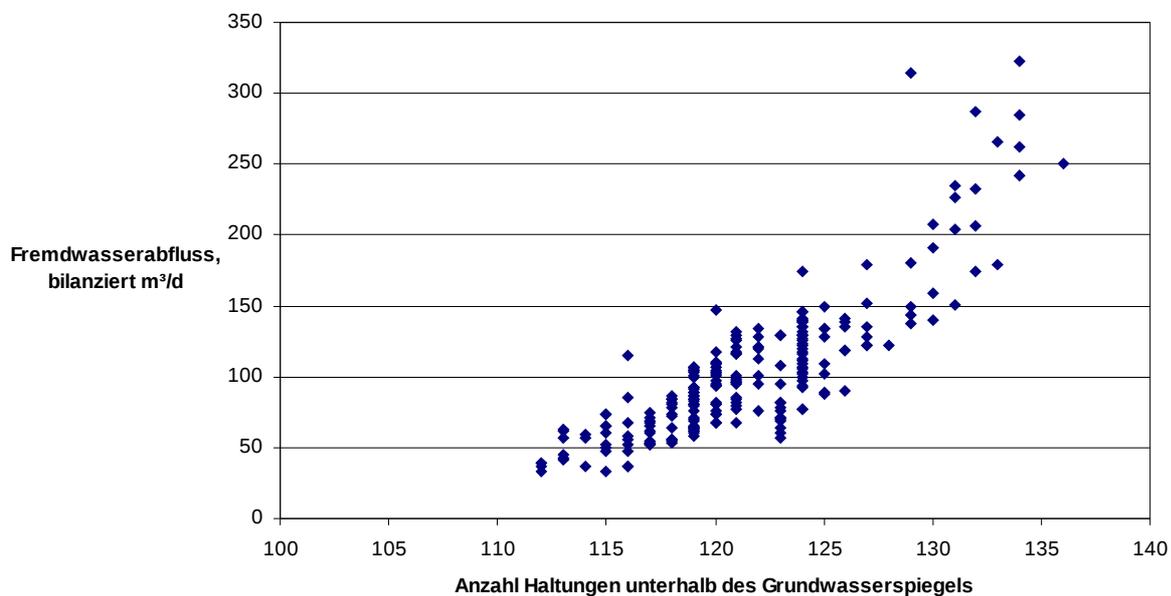


Abbildung 6.10: Anzahl der grundwasserbeeinflussten Haltungen (Sohnniveau der Kanäle unter Grundwasserspiegel) und Fremdwasserabfluss

Anhand der Gegenüberstellung von mittlerer Grundwasserspiegellage und bilanzierten Fremdwasserabflüssen wurden die Grenzwerte für die Modelle festgelegt (Abbildung 6.11). Folgende Annahmen wurden getroffen:

- < 50 m³/d: konstanter Basisabfluss infolge von Infiltration in das öffentliche Netz
- >50 m³/d Fremdwasser Drainagezuflüsse über private Entwässerungssysteme

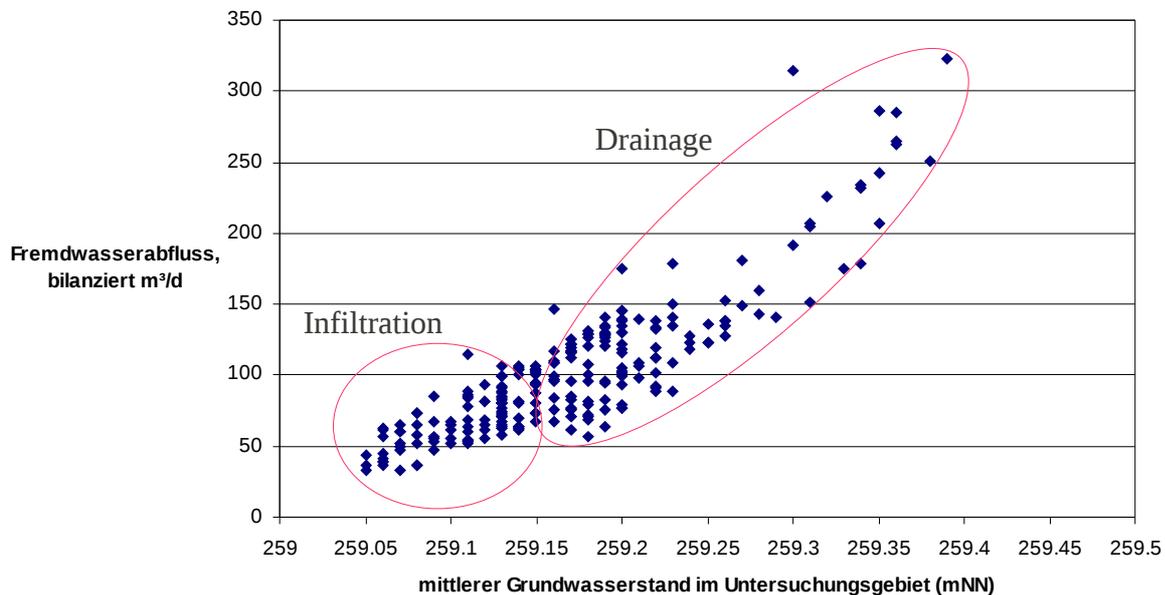


Abbildung 6.11: Mittlerer Grundwasserstand und Fremdwasserabfluss im Untersuchungsgebiet

### 6.3.2 Kalibrierung der Infiltrationsparameter

Die Kalibrierung der Infiltrationsparameter entfällt für das Untersuchungsgebiet. Der Infiltrationsvolumenstrom wurde als Basisabfluss mit in einer Höhe von 50 m<sup>3</sup>/d angenommen.

### 6.3.3 Kalibrierung der Drainageparameter

Die Kalibrierung erfolgte nach Abschnitt 5.6.4 . Die Parameter des Drainagemodells sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Parameter des Drainage-Modells und berechnete Fremdwasserspenden

Gruppe (Cluster)	Drainage-Koeffizient	Drainage-Exponent	Initiale Höhe	q <sub>f</sub> (l/d*m)
1	0,61	1,0	255,11 – 270,08	3,75
2	5,26	1,0	248,99 – 261,85	4,47
3	5,26	1,0	269,29 – 276,35	45,31
4	5,26	1,0	253,05 - 268,43	18,59

Höhere Koeffizienten bedeuten im Vergleich zu geringeren Koeffizienten eine größere Ausdehnung von Drainagen im Bereich der Haltungen. Im Hinblick auf die Fremdwasserzuflüsse ist zudem der lokale Grundwasserspiegel von Bedeutung. Die Fremdwasserspende in Bezug auf die



Kanalnetzlänge lässt einen ersten Rückschluss zu lokalen Schwerpunkten der Fremdwasserzuflüsse zu.

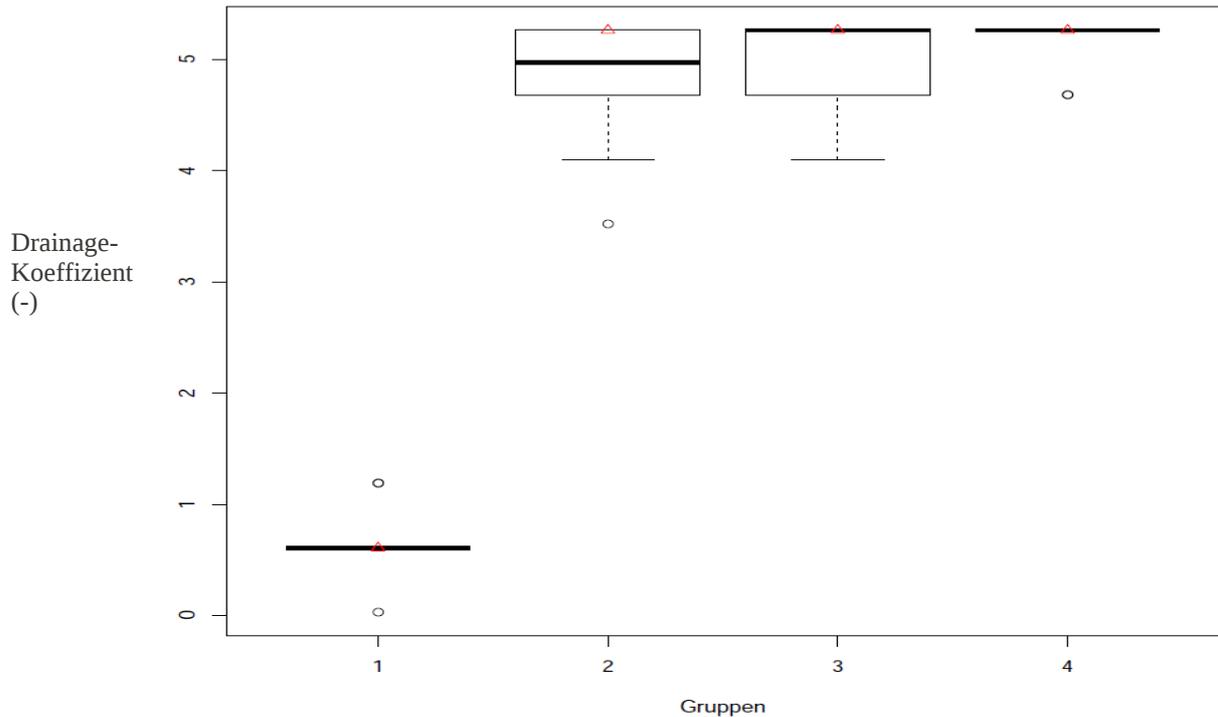


Abbildung 6.12: Verteilung der Drainagekoeffizienten der 10 besten Parameterkombinationen

In Abbildung 6.12 sind die Verteilungen der jeweils 10 besten Parameterkombinationen und die gewählte optimale Parameterkombination (Methode der kleinsten Quadrate, Abschnitt 5.6.4) dargestellt.

### 6.3.4 Vergleich der Ergebnisse mit Messdaten

Der Vergleich modellierter und bilanzierter Werte ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Die Zielgrößen (bilanzierter Fremdwasserabfluss) können durch die simulierten Werte gut nachgebildet werden.

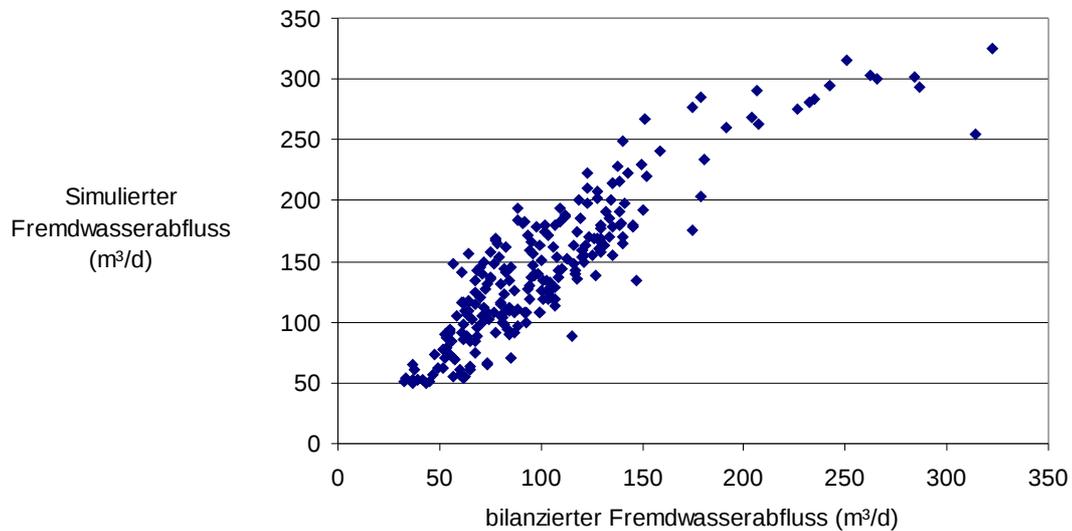


Abbildung 6.13: Simulierter und bilanzierter Fremdwasserabfluss im Untersuchungsgebiete

### 6.3.5 Verifikation mit Temperaturmessungen

Die Verifikation wurde neben dem Vergleich nach Abschnitt 6.3.4 anhand von Temperaturmessungen im Kanalnetz vorgenommen. Da Temperaturmessungen zur Betrachtung von Fremdwasserabflüssen in der Praxis nicht angewendet werden, bestehen hinsichtlich der Nutzung von Temperaturdaten zur Fremdwasseranalyse keine Erkenntnisse auf welche zurück gegriffen werden konnte.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit (Taupitz, 2014) und anhand der Untersuchungen im Einzugsgebiet wurden verschieden Berechnungen zur Nutzbarmachung von Temperaturdaten vorgenommen.

Aus den Messungen in 3 Teilnetzen im Untersuchungsgebiet konnten folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Temperaturdaten lassen Erkenntnisse zum Verlauf und zur Dynamik des Abwasserabflusses zu.
- Fremdwasserzuflüsse lassen sich auf Basis von Temperaturmessungen identifizieren.



- Bei der Auswertung müssen Außentemperaturen beachtet werden. Eine Vorgabe von Temperaturgrenzwerten erscheint sinnvoll, da in warmen und kalten Perioden das Verhältnis von Abwassertemperatur und Fremdwassertemperatur sehr unterschiedlich sein kann und sich ggf. auch umkehren kann.

In Abbildung 6.14 sind mittlere Abwassertemperaturen und Fremdwasserabflüsse der betrachteten 3 Teilnetze dargestellt. Der Temperaturbereich wurde mit 12,5 - 14 °C als optimaler Bereich identifiziert. Zu sehen ist, dass mit erhöhten Fremdwasserzuflüssen eine höhere Temperatur einhergeht. Einerseits lässt sich aus den Messungen ableiten, dass die Ermittlung der Fremdwasserabflüsse plausible ist (eine Änderung bewirkt die Veränderung der Abwassertemperatur), andererseits deutet der Temperaturanstieg an, dass es sich bei den Fremdwasserquellen offensichtlich um relativ schnell abfließendes Drainagewasser handelt, da bei einem grundwasserbedingten Fremdwasserzufluss die Temperaturen tendenziell abfallen müssten. (Grundwassertemperatur ca. 11,6 – 12,8°C im betrachteten Zeitraum)

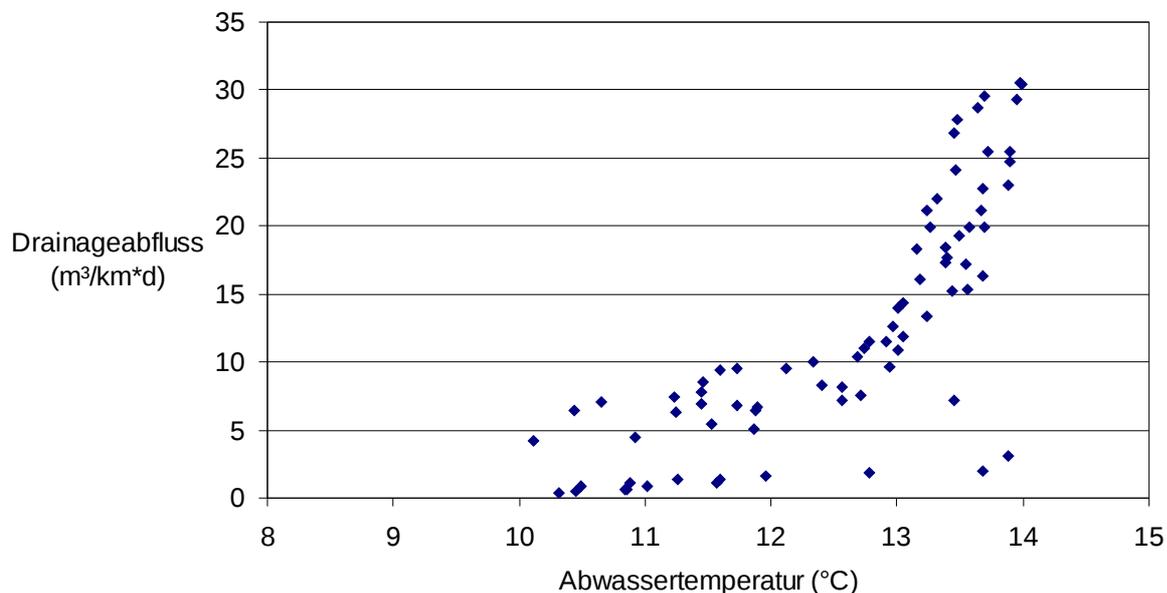


Abbildung 6.14: Mittlere tägliche Abwassertemperatur und Drainageabflüsse (Messung in 3 Teilnetzen)

#### 6.4 Sanierungsschwerpunkte

Für die Identifizierung von Gebieten mit erhöhten Fremdwasserabflüssen wurden die modellierten Werte der einzelnen Kanäle zusammengefasst. Im Anhang sind Darstellungen der Verteilung des Fremdwasserzuschlags (prozentuales Verhältnis von Fremdwasser /Schmutzwasseraufkommen)



und der Fremdwasserspende (Fremdwasserabfluss pro Kanalkilometer) zu sehen. Es wird deutlich, dass anhand der Simulationsergebnisse, Schwerpunktgebiete der Fremdwasserzuflüsse lokalisierbar sind.

## **7 Diskussion der Ergebnisse**

### **7.1 Erreichung der Zielsetzung**

Im Rahmen des Vorhabens sind zeitlich und räumlich hochaufgelöste Grundwassermessungen zur Fremdwasseranalyse herangezogen worden.

Die Zielsetzung des Projektes wurde erreicht. Neben dem Test und Einsatz geeigneter Messgeräte zur Messung der Grundwasserpegel in Hausbrunnen, wurde der Grundwasserspiegel interpoliert und der Fremdwasserabfluss simuliert. Durch die Berechnungen konnte eine sehr weitgehende Differenzierung der Fremdwasserabflüsse erreicht werden. Im Weiteren werden essentielle Erkenntnisse diskutiert.

Im Projekt konnte festgestellt werden, dass bei dem Vorhandensein von Brunnen eine relativ einfache und kostengünstige Messung durchgeführt werden kann. Der Einsatz von Datenloggern und Drucksensoren erleichtert die Datensammlung in hohem Maße. Es wurde zudem festgestellt, dass die eingesetzten Geräte sehr zuverlässig funktionieren und nur wenig Datenausfälle verzeichnet wurden.

Die Auswertung der Grundwasserdaten wurde weitestgehend automatisiert. Allerdings müssen die Messwerte manuell geprüft werden (Ganglinienkontrolle), um unplausible Werte zu kennzeichnen (z.B. Absenkung der Wasserspiegel durch Pumpenbetrieb).

Die Interpolation der Grundwasserstände und das Verschneiden mit dem Kanalnetz sind automatisierbar. Anhand von Vorberechnungen wurde das Verfahren der linearen Interpolation der Grundwasserflurabstände als solide Methode ausgewählt. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt weniger von der Genauigkeit der Messungen ab, sondern von der räumlichen Verteilung der Messstellen. Die hydrogeologische Situation kann nicht immer sehr genau abbildet werden, weil die Standortwahl von der Lage der Brunnen in dem Einzugsgebiet abhängt. Die Definition von



Randbedingungen, die bestimmte Kenntnisse zur Hydrogeologie integrieren (z.B. durch virtuelle Grundwasserpegel) können eine Verbesserung der Interpolation bewirken.

Grundwasserspiegellagen im Bereich der Kanäle stellen neben der Fremdwasseranalyse eine Information dar, die für Sanierungsmaßnahmen und Inspektionen (DWA, 2012) genutzt werden können. Durch das Verschneiden von Grundwasserdaten und Kanalnetz können potenzielle Gebiete erhöhter Infiltration- und Drainagezuflüsse ermittelt werden.

Die Simulation der Fremdwasserabflüsse ist mit dem Modell sehr gut möglich. Die automatische Kalibrierung verhindert zudem eine subjektive Beeinflussung. Des Weiteren erscheint eine Aufteilung des Berechnungsansatzes in ein Infiltrations- und Drainagemodell als hilfreicher Ansatz, um Sanierungsschwerpunkte im öffentlichen oder privaten Bereich zu identifizieren. Hinsichtlich der Kalibrierung von Parametern sollten weitere vertiefende Untersuchungen vorgenommen werden. Ggf. ist eine genauere Modellanpassung durch verbesserte Berechnungsalgorithmen und Klassifizierungsmethoden möglich.

Die Ergebnisse der Simulationen erlauben eine gebietsweise Einschätzung der Fremdwassersituation. Prinzipiell könnten auch die Berechnungsergebnisse für einzelne Kanalabschnitte verwertet werden. Allerdings wird eingeschätzt, dass dieser hohe Detaillierungsgrad aufgrund der derzeit noch gegebenen Modellgenauigkeit nicht belastbar ist. Empfohlen werden kann daher die Auswertung von längeren Kanalabschnitten und Teilgebieten.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Temperaturmessungen zur Verifikation der Modellberechnungen eingesetzt. Es konnte festgestellt werden, dass Temperaturmessungen einfache und robuste Messverfahren sind, die ein großes Potenzial zur Identifizierung von Fremdwassermengen und Herkunftsquellen haben.

## **7.2 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung**

Fremdwasserzuflüsse in Kanalnetzen ländlicher Einzugsgebiete verursachen eine Belastung von Gewässern und Kläranlage. Erhöhte Entlastungsfrachten an Regenüberläufen, die geringere Reinigungsleistung der Abwasserbehandlung und die erhöhten betrieblichen Kosten stellen wesentliche ökologische und ökonomische Probleme dar.



Durch die entwickelte Methode können folgende unmittelbar umweltrelevante Effekte (Reduzierung von Fremdwasser) und ökonomische Effekte (Kostensenkung, effektiver Einsatz von Finanzmitteln) erzielt werden.

- Informationen zur Grundwassersituation: detaillierte Informationen zu potenziellen fremdwasserrelevanten Gebieten/ Kanälen → gezielte Sanierungsplanung und Priorisierung von Maßnahmen
- Identifizierung der Fremdwasserquellen hinsichtlich der Herkunft: öffentliche oder private Entwässerungsanlagen
- Informationen zu Fremdwassermengen: Kosten/Nutzen für Maßnahmen
- Prognose des Fremdwasseraufkommens: Betrachtung von Extremereignissen und effektive Planung von Maßnahmen des Hochwasserschutzes (Grundhochwasser), Planung von Entwässerungssystemen, Neuanschlüssen, Pumpwerken etc., (Vermeidung von Unter-/Überdimensionierung)
- Ermittlung von Grundlageninformationen für Schmutzfrachtbetrachtungen: Planung von Retentionsmaßnahmen (direkter Gewässerschutz)

### **7.3 Verbreitung der Vorhabensergebnisse**

Die Vorhabensergebnisse werden im Rahmen der Arbeit des IB wasserWerkstatt verbreitet und in die praktische Anwendung überführt. Dazu zählen folgende Aktivitäten:

- Wissenschaftliche Arbeiten (Masterarbeit Thomas Käseberg, 2014, Bachelorarbeit Niklas Taupitz, 2014)
- Vorträge („Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Kanalisation“, TU Dresden, 28.4.2015)
- Kooperationen mit Ingenieurbüros und wissenschaftlichen Einrichtungen im Bereich Kanalnetz (TU Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, IB Holinger, Niederlassung Dresden)
- Projekte (Fremdwasseranalyse AZV Wilischthal, Projektabschluss Dezember 2015)
- Website (in Vorbereitung unter: [www.wasserwerkstatt-dresden.de](http://www.wasserwerkstatt-dresden.de))



## 8 Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode entwickelt, die auf Basis eines Messsystems und einer Software eine zielgerichtete Analyse des Fremdwasseraufkommens in ländlichen Entwässerungsgebieten ermöglicht. Es wurden wesentliche Erkenntnisse zur Messtechnik, Datenaufbereitung und Modellanwendung gewonnen. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial von Grundwassermessungen und die hohe Aussagekraft von Simulationsrechnungen.

Durch die neue Methode wird eine gezielte Fremdwasserlokalisierung und -sanierung unterstützt. Dadurch können wesentliche ökologische (Gewässerschutz) und ökonomische Zielstellungen (Kosten, Nutzen) erreicht werden.

Auf Basis der methodischen Entwicklungen und erzielten Erkenntnisse wird neben der Entwicklung der Modellansätze und Berechnungsverfahren ein hohes Potenzial in der Weiterentwicklung von einfachen Messverfahren gesehen, die räumlich und zeitlich hoch aufgelöst durchgeführt werden können.

## 9 Literatur

- ATV/DVWK (1986). Die Berechnung des Oberflächenabflusses in der Kanalnetzrechnung, Teil I - Abflußbildung, Arbeitsbericht ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6. Korrespondenz Abwasser, 33, Heft 2, 1986.
- ATV/DVWK (1987). Die Berechnung des Oberflächenabflusses in der Kanalnetzrechnung, Teil II - Abflußkonzentration Arbeitsbericht ATV-Arbeitsgruppe 1.2.6. gemeinsam mit dem DVWK, Korrespondenz Abwasser, 34, Heft 3, 1987.
- ATV-DVWK (2003). Fremdwassersituation in Deutschland. Bericht der Arbeitsgruppe ES 1.3. *Korrespondenz Abwasser*, 50(1), 70-81.
- Aumond M. und Joannis C. (2008). Processing sewerage turbidity and conductivity recorded in sewage for assessing sanitary water and infiltration/inflow discharges. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Bares V., Krejci P., Stransky D. und Sykora P. (2008). Long-term monitoring of infiltration/ inflow based on diurnal variation of pollutant flux. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Belhadj N., Joannis C. und Raimbault G. (1995). Modelling of rainfall induced infiltration into separate sewerage. *Water Science and Technology*, 32, 161-168.
- Busch K. F., Luckner L. und Tiemer K. (1993). *Geohydraulik*, ISBN 3-443-01004-0.
- deBenedittis J. und Bertrand-Krajewski J. L. (2005). Measurement of infiltration rates in urban sewer systems by use of oxygen isotopes. *Water Science & Technology*, 52(3), 229-237.
- Decker J. (1998). *Auswirkungen von Fremdwasser auf Abwasseranlagen und Gewässer*, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen.
- DWA (2006). Arbeitsblatt A118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen.
- DWA (2012). Merkblatt M182: Fremdwasser in Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden.
- DeSilva D., Burn S., Tjandraatmadja G., Moglia M., Davis P., Wolf L., Held I., Vollertsen J., Williams W. und Hafskjold L. (2004). Sustainable Management of Leakage from Wastewater Pipelines. *IWA Congress 2004*, Marrakesch, Marokko.
- Ertl T., Spazierer G. und Wildt S. (2008). Estimating groundwater infiltration into sewerages by using the moving minimum method - a survey in Austria. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- Franz T., Rutsch M. und Krebs P. (2004). Field data to estimate infiltration into sewer systems. *19th European junior scientist workshop*, Lyon.
- Franz T. (2007). Spatial classification methods for efficient infiltration measurements and transfer of measuring results, Dissertation, Dresden, University of Technology.
- Gomez M. und Russo B. (2005). Comparative Study among different methodologies to determine storm sewer inlet efficiency from test data. *10th International Conference on Urban Drainage*, Kopenhagen/Dänemark, 21-26 August 2005.



- Gustafsson L. G., Hernebring C. und Hammarlund H. (1999). Continuous modelling of inflow/infiltration in sewers with MouseNAM - 10 years of experiences. *Third DHI Software Conference*.
- Gustafsson L. G. (2000). Alternative drainage schemes for reduction of inflow/infiltration - prediction and follow-up of effects with the aid of an integrated sewer/aquifer model. *1st International Conference on Urban Drainage via Internet*.
- Hager W. H., Raymann B. und Bretscher U. (1985). Die Berechnung des Fremdwasseranfalls in Abwassersystemen. *gwf - Wasser/Abwasser*, 126(11), 582- 588.
- Hennerkes J. A. (2006). Reduzierung von Fremdwasser bei der Abwasserentsorgung, Dissertation, Fakultät Bauingenieurwesen, RWTH Aachen.
- Kampfmann, W. (2007). Modellgestützte Lokalisierung und Beseitigung von Fremdwasserquellen in Schmutzwasserkanälen am Beispiel Leichlingen, Bericht Phase 1 "Modellgestützte Lokalisierung", Abschlussbericht, November 2007.
- Karpf C. und Krebs P. (2004). Sewers as drainage systems - quantification of groundwater infiltration. *5th int. conference NOVATECH*, Lyon, 969-976.
- Karpf C. und Krebs P. (2007). Fremdwasseranalyse mittels Datenmodellen. *KA Abwasser Abfall*, 54(4), 362-368.
- Karpf, C. (2012). Hydraulische Modellierung der Interaktion zwischen Grundwasser und Kanalisation – Entwurf. Dissertation, TU Dresden, 2012.
- Kracht O. und Gujer W. (2004). Quantification of Infiltration into Sewers based Time Series of Pollutant Loads. *4th Conference Sewer Processes & Network*, Funchal, Madeira, 293-300.
- Käseberg, Thomas (2014). Nutzung von Grundwasserpegeldata zur Ermittlung von Fremdwasserzuflüssen. Masterarbeit. TU Dresden.
- Kroiss H. und Prendl L. (1996). Einfluss von Fremdwasser auf Planung und Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen. Fremdwasser in Abwasseranlagen, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft 18, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, TU Graz, 27-44.
- Michalska A. und Pecher K. H. (2000). Betriebliche und kostenmäßige Auswirkung des Fremdwassers auf Kanalisation und Kläranlage. *Gewässerschutz - Wasser - Abwasser 177*, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen, 27/1-27/17.
- Petzold T. (2008). *Datenanalyse mit R Ausgewählte Beispiele*, Lehrmaterial an der TU Dresden, nicht publiziert.
- Robert Kümmel. Nutzung von hydrodynamischen Simulationen zur Fremdwasseranalyse. Diplomarbeit, TU Dresden, 2011. LFU (2001). Regenwasserbehandlung und Kläranlagen- Leistungsreserven erkennen und nutzen. Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg.
- Raynaud O., Joannis C., Schoefs F. und Billard F. (2008). A model-based assessment of infiltration and inflow in the scope of controlling separate sanitary overflows at pumping stations. *11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.
- R Development Core Team (2008). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0.
- Rodriguez F., Morena F. und Andrieu H. (2004). Development of a distributed hydrological model based on urban databanks - Production processes of URBS. *Conference on Urban Drainage Modelling 2004*, Dresden, 561-570.
- Rossmann L. A. (2004). Storm water management model user's manual Version 5.0. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, CINCINNATI, OH 45268.
- Schmidt A. (2000). Mengen, Charakteristik und Probleme des Fremdwasseranfalls auf kommunalen Kläranlagen in NRW. *Gewässerschutz- Wasser- Abwasser 177*, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen.
- Schulz N., Karpf C. und Krebs P. (2005). Einfluss undichter Kanäle auf die Gewässerbelastung. *Gewässerschutz-Wasser-Abwasser Band 198*, 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Aachen, S.26/1-26/15, ISBN 3-932590-91-0.
- Taupitz, Niclas (2014). Quantifizierung von Fremdwasserabflüssen mittels Temperaturmessungen. Bachelorarbeit. TU Dresden.
- Vaes G., Willems P. und Berlamont J. (2005). Filtering method for infiltration flow quantification. *10th International Conference on Urban Drainage 2005*, Copenhagen/Denmark, 21-26.8.2005.
- Wittenberg H. und Brombach H. (2002). Hydrological determination of groundwater drainage by leaky sewer systems. *Int. Conf. on Water Resources and Environment Research Vol. II*, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten, TU Dresden, 138- 143.
- Wolf L., Klinger J., Hotzl H., Schrage C., Burn S., DeSilva D., Correll R., Rueedi J., Cronin A., Morris B., Vizintin G., Voett U., Hoering K. und Mohrlök U. (2005). Connecting urban surface water systems and groundwater – application of a new model chain to four case study cities. *9th International FZK/TNO Conference on Soil-Water Systems*, Bordeaux, France, 3–7 October 2005.

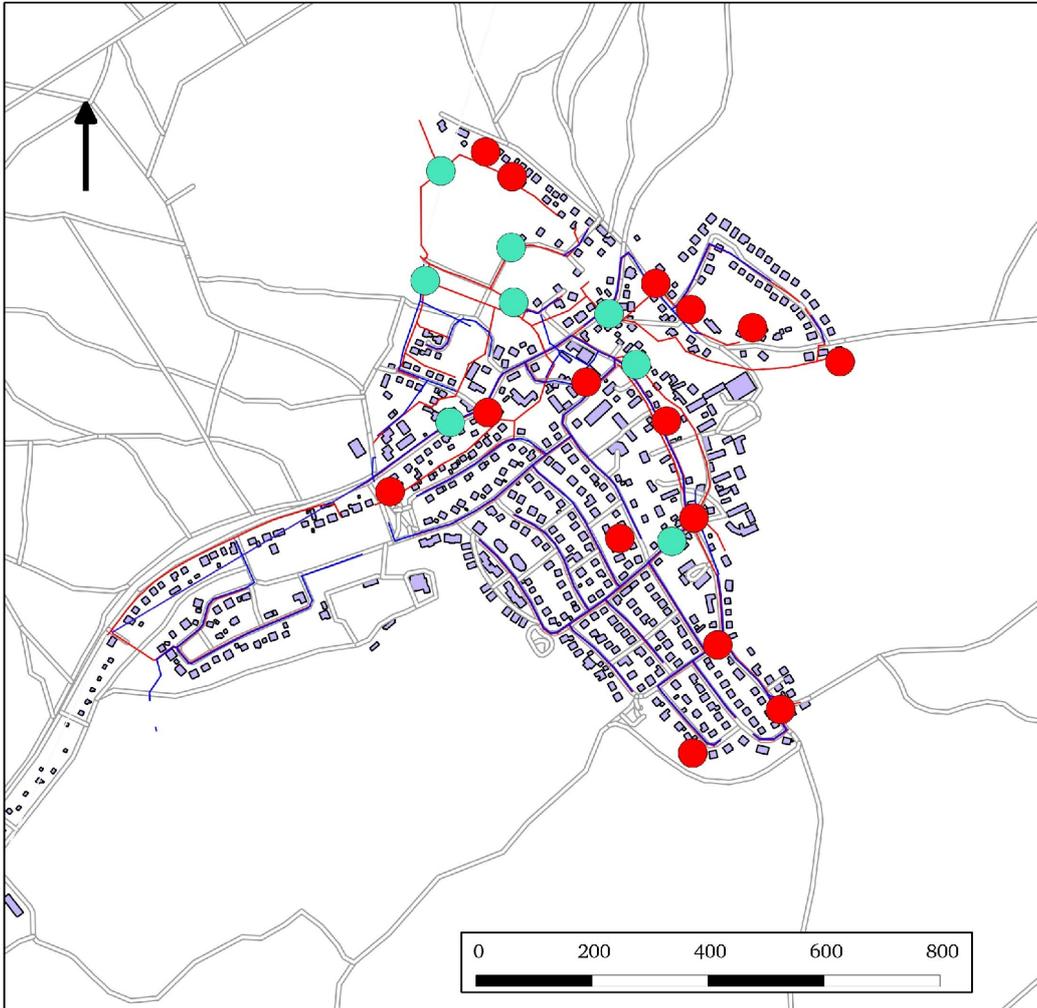
## Danksagung

Für die finanzielle Förderung des Projektes möchten wir der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unseren Dank aussprechen. Außerdem möchten wir dem Abwasserzweckverband Obere Röder und der Stadtverwaltung Radeberg für die Unterstützung bei den Messungen, den unkomplizierten Zugang zu den Anlagen und die Bereitstellung von Daten herzlich danken. Gleichfalls ein großer Dank gilt den Bewohnern des Untersuchungsgebietes für die Ermöglichung von Messungen auf privaten Grundstücken.



## **10 Anhang**





### Legende

MS Kanalnetz



MS Grundwasser



Kanäle

— Regenwasser

— Schmutzwasser

Projekt: Entwicklung und Erprobung eines Messkonzeptes und  
Entwicklung einer Analysesoftware zur Lokalisierung von  
Fremdwasser in ländlichen Einzugsgebieten

Darstellung Untersuchungsgebiet mit Messstellen

Bearbeitung: Christian Karpf

Erstelldatum: Dezember 2015

Maßstab: 1:10 000

wasserWerkstatt

Dr.-Ing. Christian Karpf

Hubertusstr. 59

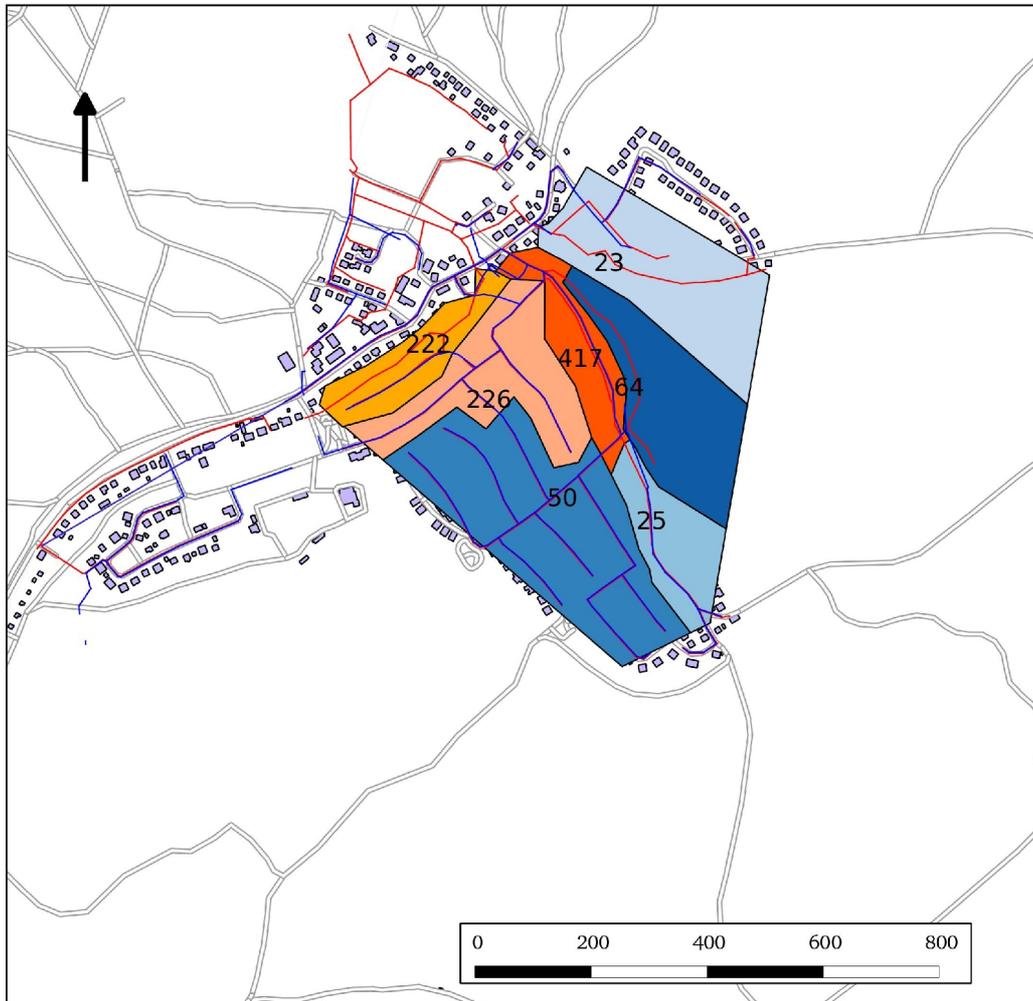
01129 Dresden

Tel. +49 351 482 7373

Fax. +49 351 482 7374

[christian.karpf@wasserwerkstatt-dresden.de](mailto:christian.karpf@wasserwerkstatt-dresden.de)

[www.wasserwerkstatt-dresden.de](http://www.wasserwerkstatt-dresden.de)



### Legende

Fremdwasserzuschlag (%)

-  417
-  226
-  222
-  64
-  50
-  25
-  23

Projekt: Entwicklung und Erprobung eines Messkonzeptes und  
Entwicklung einer Analysesoftware zur Lokalisierung von  
Fremdwasser in ländlichen Einzugsgebieten

Darstellung Fremdwasserzuschlag

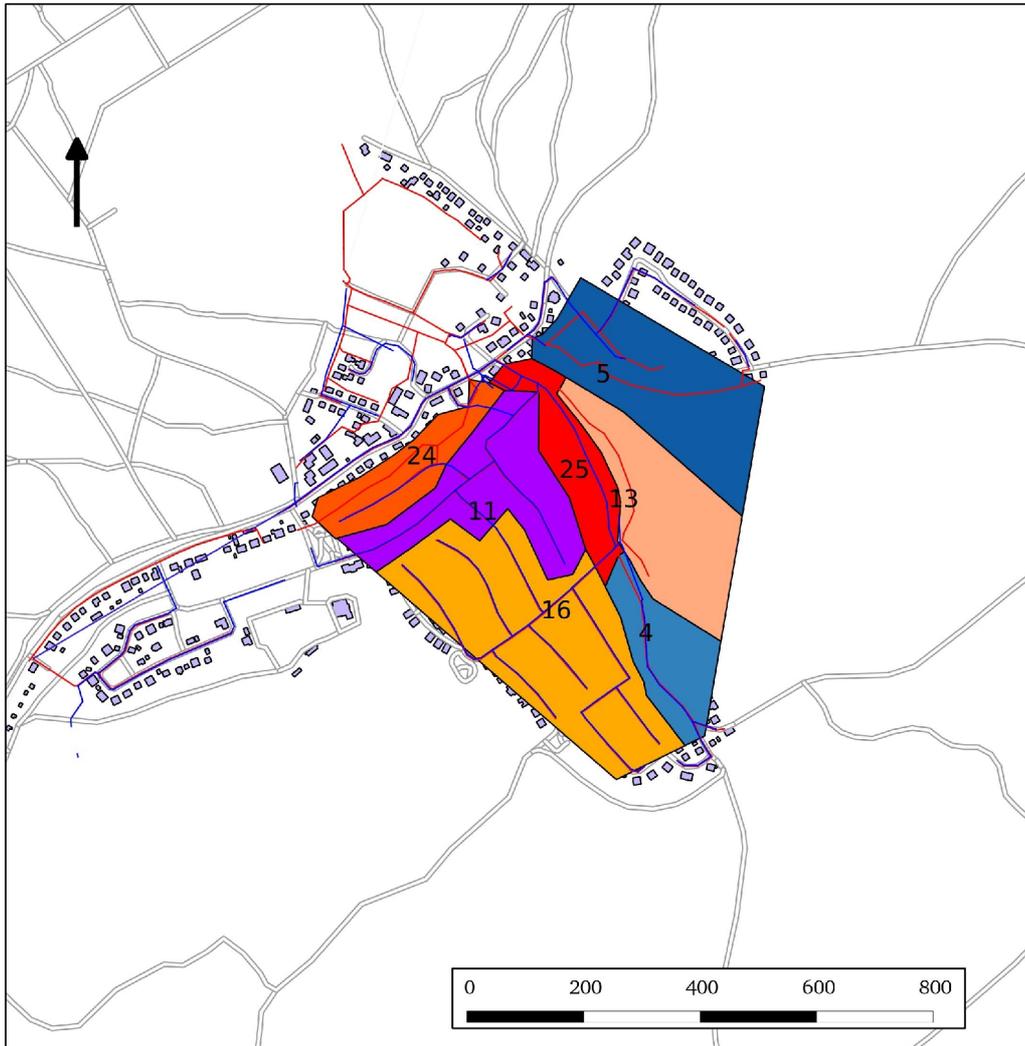
Bearbeitung: Christian Karpf

Erstelldatum: Dezember 2015

Maßstab: 1:10 000

wasserWerkstatt  
Dr.-Ing. Christian Karpf  
Hubertusstr. 59  
01129 Dresden

Tel. +49 351 482 7373  
Fax. +49 351 482 7374  
christian.karpf@wasserwerkstatt-dresden.de  
www.wasserwerkstatt-dresden.de



### Legende

Fremdwasser (m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>\*d)

- 25
- 24
- 16
- 13
- 11
- 5
- 4

Projekt: Entwicklung und Erprobung eines Messkonzeptes und  
Entwicklung einer Analysesoftware zur Lokalisierung von  
Fremdwasser in ländlichen Einzugsgebieten

Darstellung Fremdwasserspende

Bearbeitung: Christian Karpf

Erstelldatum: Dezember 2015

Maßstab: 1:10 000

wasserWerkstatt  
Dr.-Ing. Christian Karpf  
Hubertusstr. 59  
01129 Dresden

Tel. +49 351 482 7373  
Fax. +49 351 482 7374  
christian.karpf@wasserwerkstatt-dresden.de  
www.wasserwerkstatt-dresden.de