



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff (Hrsg.)
LuFG „Wasserwirtschaft und Wasserbau“
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Andrea Mayer

Einflüsse auf die Niederschlags-Abfluss-Berechnung
von bidirektional gekoppelten Kanalnetz- und Ober-
flächenabflussmodellen – Vergleichende numerische
Analysen

Bericht Nr. 24, 2021



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

EINFLÜSSE AUF DIE NIEDERSCHLAGS-
ABFLUSS-BERECHNUNG VON BIDIREKTIONAL
GEKOPPELTEN KANALNETZ- UND
OBERFLÄCHENABFLUSSMODELLEN
- VERGLEICHENDE NUMERISCHE ANALYSEN

von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Andrea Mayer, M.Sc.

aus Wipperfürth

© 2021 LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal
Vervielfältigungen nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors

Eingereicht am: 14. April 2021

Prüfung am: 06. August 2021

Erster Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff
LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau
Bergische Universität Wuppertal

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Höttges
Lehrgebiet Wasserwirtschaft und Bauinformatik
Fachhochschule Aachen

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber
LuFG Umweltverträgliche Infrastrukturplanung,
Stadtbauwesen
Bergische Universität Wuppertal

Weiteres Mitglied: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort
LuFG Geotechnik
Bergische Universität Wuppertal

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet
Wasserwirtschaft und Wasserbau

Band 24

Andrea Mayer

**Einflüsse auf die Niederschlags-Abfluss-Berechnung
von bidirektional gekoppelten Kanalnetz-
und Oberflächenabflussmodellen –
Vergleichende numerische Analysen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8348-4

ISSN 0179-9444

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort (Hrsg.)

Die vorliegende Dissertation gibt einen Überblick über Möglichkeiten und Grenzen einer gekoppelten Simulation von Kanalnetz- und Oberflächenabfluss nach Starkregen. Hierbei liegt der Fokus der Arbeit auf Regenwasser, welches bei häufigerem Starkregen zwar mit einer bestimmten Intensität zunehmend oberflächlich abfließt, wobei aber der Abfluss im Kanalnetz dennoch nicht unerheblich zum Gesamtabfluss beiträgt. Die Aufteilung des Abflusses und insbesondere die Interaktion der beiden Abflusssysteme sind Gegenstand intensiver Forschung. Die Relevanz ergibt sich aus einer erhöhten Anforderung zum Überflutungsschutz, welcher als eine der dringlichsten kommunalen Aufgaben im Zuge der Klimawandelanpassung verstanden werden muss.

Derzeit stellen sich zahlreiche Fragen, wie die Abflussprozesse modelliert und welche methodischen Ansätze verwendet werden können. Aus der historischen Entwicklung der Bemessungsansätze heraus haben sich in der Siedlungswasserwirtschaft (Ableitung des Regenwassers im Kanalnetz bis zur Bemessungsgrenze) in den letzten Jahren sogenannte hydrodynamische Kanalnetzsimulationen etabliert, die aber nur solange den Abflussprozess richtig wiedergeben, wie der Abfluss vollständig im Kanalnetz abgeleitet werden kann. Dabei wird die Abflussbildung an der Oberfläche durch fest definierte Größen, wie die angeschlossene Fläche und mit spezifischen Abflussbeiwerten bestimmt. Die Abflussbildung an der Oberfläche ist somit gewissermaßen als parametrischer Ansatz in die Kanalnetzrechnung eingebunden, ohne dass die tatsächlichen Prozesse der Abflussbildung und Abflusskonzentration betrachtet werden.

Auf der anderen Seite wurden in den letzten Jahren die bewährten Methoden der Wasserwirtschaft, wie die der Niederschlags-Abfluss-Modellierung und der Strömungssimulation zum Hochwasserschutz bei Fließgewässern auf die Skalengröße der Oberflächenabflüsse im urbanen Raum und somit in die Siedlungswasserwirtschaft transformiert. Die Anwendung dieser Methoden im kleinräumigen, urbanen Raum wurde allerdings erst mit den zunehmenden genauer erfassten Geländehöhen ermöglicht, weil im Gegensatz zum Flusshochwasser, Wasserstände im urbanen Bereich in der Größenordnung der Bordsteinkantenhöhe ermittelt werden müssen. Diese hohe Auflösung des Geländes bedingt zugleich einen nochmals höheren Bedarf an Rechenleistung, so dass lange Zeit die beiden Modellfamilien parallel eingesetzt wurden.

Zudem verwenden die beiden Modellfamilien unterschiedliche Ansätze für die Parametrisierung der Abflussbildung. Die heute zur Verfügung stehenden gekoppelten Modelle, insbesondere das hier verwendete Simulationsmodell *++SYSTEMS* (DYNA und GeoCPM) wurde Anfang der 2010er Jahre entwickelt und steht seit etwa fünf Jahren auch der breiten kommunalen Praxis zur Verfügung. Allerdings erfordert die Kopplung dieser beiden Abflusssysteme zusätzlich noch die Kenntnis über die hydraulische Performance der Koppelglieder (Schacht und Straßenablauf). Ohne über diese Parameter und ihre Sensitivität Kenntnis zu besitzen kann bei der Simulation der Überflutung durch gekoppelte Modelle kein Vorteil generiert werden. Die fehlenden Bausteine für die Modellierung der Koppelglieder liegen allerdings seit kurzem vor, so dass die Nutzung dieser Modellansätze überhaupt erst einer Validierung zugeführt werden kann.

Zudem bedarf es eines neuen Gesamtverständnisses der Abflussbildung von den betrachteten Flächen im urbanen Raum, um Abflussbildung, Fließzeiten, Abflusskumulation, Abflussspitzen und Abflussvolumina zu betrachten und einzuordnen. Zu diesem Gesamtverständnis leistet die vorliegende Arbeit einen wertvollen Beitrag.

Wuppertal, September 2021

Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

Danksagung

Diese Arbeit habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau der Bergischen Universität Wuppertal angefertigt. Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

An vorrangiger Stelle bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff für die Unterstützung, die vielen Ratschläge und den fachlichen Austausch. Er gab mir die Freiheit eigene Ideen einzubringen und die Möglichkeit Erfahrungen zu sammeln. Gleichzeitig stand mir seine Tür jederzeit offen und er hat sich immer Zeit für Diskussionen genommen.

Außerdem möchte ich meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Jörg Höttges von der Fachhochschule Aachen für die Begutachtung der Arbeit und dem damit verbundenen Zeitaufwand danken. Weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Felix Huber, der den Vorsitz der Prüfungskommission übernommen hat, sowie Prof. Dr.-Ing. Matthias Pulsfort, der als weiteres Mitglied in der Prüfungskommission tätig war.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Felix Huber zusätzlich für die Genehmigung des halbjährigen Sabbaticals im Zuge meiner Tätigkeit als Qualitätsbeauftragte der Fakultät bedanken. Dadurch stand ausreichend Zeit für die Erstellung der Arbeit zur Verfügung, sodass ein zeitnaher Abschluss möglich war.

Des Weiteren geht mein Dank an die Technischen Betriebe Solingen für die Bereitstellung der notwendigen Daten. Hier im Speziellen an Sandra Krüger für die schnellen Rückmeldungen und ihre Flexibilität. Außerdem bedanke ich mich bei Maren Hellmig vom Ingenieurbüro Beck GmbH & Co. KG für die vielen Telefonate und den fachlichen Austausch.

Mein ausdrücklicher Dank gilt ebenfalls meinen Eltern und der Familie. Für ihre Geduld und Rücksichtnahme sowie Unterstützung in jeder Art.

Auch meinen Freunden möchte ich danken für das Verständnis und die offenen Ohren. Ich

bin dankbar für die tatkräftigen Unterstützungen bei der Durchsicht der Arbeit und den Hilfestellungen bei der Lösung von technischen Problemen.

Abschließend bedanke ich mich bei meinem Partner Adrian Borner. Im Besonderen für das geduldige Zuhören und seine Rücksichtnahme. Er zeigte immer Verständnis und schaffte es mich auch in schwierigen Zeiten aufzumuntern und zu motivieren.

Wuppertal, September 2021

Andrea Mayer

Kurzfassung

Die Kombination aus immer häufiger und intensiver auftretenden Starkniederschlägen sowie dem durch die Urbanisierung steigenden Befestigungsanteil von Flächen führt verstärkt zu Überflutungsereignissen. Bereits bei Niederschlägen, die aufgrund ihrer geringeren Intensität nicht als Starkregenereignis bewertet werden, kommt es zu einem Oberflächenabfluss. Grund hierfür ist hauptsächlich der veränderte Wasserkreislauf, der sich durch geringere Versickerung und Verdunstung des Oberflächenwassers auf versiegelten Flächen ergibt. Inwieweit bzw. an welchen Stellen dieser Oberflächenabfluss zu gefährlichen Überflutungen führen kann, ist nicht bekannt. Um überflutungsgefährdete Stellen zu lokalisieren und geeignete Maßnahmen zu erarbeiten, sind numerische Berechnungen mit gekoppelten Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodellen möglich. Allerdings stehen viele verschiedene Varianten in der Modellerstellung sowie in der Einstellung der Parameter zur Verfügung, die Einfluss auf die Ergebnisse nehmen. Diese Einflüsse sind trotz ihrer zunehmenden Anzahl bislang nicht in systematischen Analysen untersucht worden. Im Zuge dieser Arbeit werden Berechnungsverfahren gewählt, welche die Abflussbildung abhängig von der Art der jeweiligen Flächen entweder im Kanalnetzmodell oder im Oberflächenmodell ermitteln. Die Abflussbildung von Flächen, die direkt in das Kanalsystem entwässern, wie beispielsweise Dachflächen, erfolgt über das Kanalnetzmodell. Für Flächen, auf denen ein Oberflächenabfluss entsteht, findet die Abflussbildung im Oberflächenmodell statt. So kann die natürliche Situation im Modell bestmöglich abgebildet werden. Außerdem können mithilfe der numerischen Berechnungen die Effekte von geplanten Maßnahmen zum Überflutungsschutz untersucht und optimiert werden.

Die gekoppelten Berechnungen von Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell liefern umfangreiche und detaillierte Ergebnisse zu den hydraulischen Abflüssen im Kanalnetz und auf der Oberfläche. Dabei spielen die Daten, die zur Modellerstellung verwendet werden, eine wichtige Rolle. Nur wenn diese detailliert und auf dem aktuellen Stand sind, kann das Modell zuverlässige Ergebnisse liefern. Des Weiteren können die berechneten Ergebnisse über eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten beeinflusst werden. Um zuverlässige und realistische Ergebnisse zu erhalten, sind Kalibrierungen mithilfe von Messwerten erforderlich. Diese Messergebnisse liefern idealerweise Niederschlagsereignisse unterschiedlicher Intensitäten sowie die dazugehörigen

Kanal- und Oberflächenabflüsse.

In dieser Arbeit wurde das Wohngebiet Am Siebels in Solingen als Pilotgebiet gewählt. Es handelt sich um ein kleines Gebiet von ungefähr 5 ha, das im Trennsystem entwässert. In diesem Pilotgebiet wurde Messtechnik zur Erfassung des Niederschlages und des Kanalabflusses installiert. Die gemessenen Niederschlagsereignisse wurden in den numerischen Berechnungen abgebildet und das Modell anhand dieser Messungen kalibriert und validiert. Eine Kalibrierung konnte für die gemessenen Niederschlagsereignisse gut durchgeführt werden. Allerdings gilt diese Kalibrierung nur für Niederschlagsereignisse mit einer Wiederkehrzeit von $T \approx 1$ a, da keine größeren Niederschläge gemessen wurden. Aus diesem Grund wurden drei Modellregen unterschiedlich hoher Intensitäten mit Blockverteilung gewählt, um den Einfluss der verschiedenen Einstellungsmöglichkeiten in der Berechnungssoftware abbilden zu können. Zusätzlich zum Wohngebiet Am Siebels wurden drei weitere Untersuchungsgebiete betrachtet, die zwischen 127 und 327 ha groß sind. Da für diese Gebiete keine Messwerte vorlagen, wurden für die Berechnungen ebenfalls die drei Blockregen angesetzt. So konnte der Einfluss der Modellparameter auf die Abflüsse innerhalb von größeren Berechnungsgebieten dargestellt werden. Der qualitative Verlauf der Abflussganglinien im Kanal lässt sich grundsätzlich mit denen des Pilotgebietes vergleichen. Es zeigt sich, dass sich die Sensitivität der einzelnen Parameter deutlich voneinander unterscheidet. Außerdem können die Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Einstellungen sehr groß sein, sodass zur realitätsnahen Darstellung des Abflusses zwingend Messwerte für die Kalibrierung der Modelle erforderlich sind. Nur so können überflutungsgefährdete Bereiche zuverlässig abgeschätzt und mögliche Maßnahmen effektiv berechnet werden.

Grundsätzlich steht zur Bewertung eines Einzugsgebietes auch eine Analyse mithilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) zur Verfügung. Hierüber können beispielsweise Senken und Fließwege identifiziert werden. Die GIS-Analyse kann relativ schnell durchgeführt werden und liefert eine gute Übersicht des Berechnungsgebietes. Allerdings handelt es sich bei der GIS-Analyse um eine belastungsunabhängige Auswertung. Des Weiteren kann das Kanalnetz nicht berücksichtigt werden, sodass der Oberflächenabfluss falsch eingeschätzt wird. Je nach Niederschlagsereignis nimmt das Kanalnetz Wasser von der Oberfläche auf, oder im Fall von Überlastung staut Wasser an die Oberfläche über. Dieser Effekt kann mit einer gekoppelten Berechnung abgebildet werden, sodass die Interaktion zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell berücksichtigt wird. Damit geht allerdings auch eine höhere Bearbeitungs- und Berechnungszeit einher.

Durch die realitätsnahe Abbildung des Kanalnetzes und der Oberfläche sowie der Austauschpunkte zwischen beiden Modellen, kann die Herkunft des Wassers sehr genau bestimmt werden. So kann neben dem zufließenden Kanalnetz auch der oberflächliche Abfluss zu überflutungsgefährdeten Stellen im Einzugsgebiet untersucht werden. Auf diese Weise lassen sich Maßnahmen wirksamer planen. Auch die Belastung des abfließenden Wassers kann aufgrund der Flächennut-

zung der Herkunftsflächen abgeschätzt und berücksichtigt werden. Mögliche Maßnahmen sind individuell zu planen und können mithilfe der gekoppelten zweidimensionalen Berechnung auf ihre Wirksamkeit überprüft werden.

Abstract

The combination of increasing frequency and intensity of heavy rainfall with a rising ratio of paved areas due to urbanisation leads to an increase in flooding events. Even in the case of precipitation, which is not classified as a heavy rain event because of its lower intensity, a surface runoff occurs. The main reason for this is the change in the water cycle, which results from less leakage and evaporation of surface water on paved surfaces. It is not known to what extent or at which locations this surface runoff leads to dangerous pluvial flooding.

Numerical calculations with coupled sewer network and surface runoff models are possible tools to locate areas at risk of pluvial flooding and to develop suitable measures. But there are a lot of different ways to create a model, which impact the results. These factors are currently not sufficiently distinguished regarding their influence, which complicates the reliability of conclusions. In the course of this work, calculation methods were chosen which compute the runoff formation depending on the respective areas either by means of the sewer network model or the surface model. The runoff formation of surfaces which drain directly into the sewer system, such as roof surfaces, is carried out via the sewer network. For areas where surface runoff occurs, the runoff formation is calculated in the surface model. In this way, the models represent the natural situation in the best possible way. In addition, numerical calculations can be used to investigate and optimize the effects of planned protection measures for pluvial floods.

The coupled calculations of the sewer system and surface runoff model provide comprehensive and detailed results on the hydraulic runoff in the sewer system and on the surface. The quality of the data is important for the creation of the model. Only if the data are detailed and up-to-date the model can generate reliable results. Furthermore, the calculated results can be influenced by a variety of settings. In order to obtain reliable and realistic results, calibrations based on in-situ measurements real measured values are necessary. At best, these measurement results provide rainfall events of different intensities as well as the corresponding sewer network and surface runoff.

In this work, the housing area Am Siebels, a small area of about 5 ha that drains in a separate sewer system, was chosen as a pilot scheme. In this pilot area, measurement technology was installed to record rainfall and sewer runoff. The measured rainfall events were used wit-

hin the numerical calculations to calibrate and validate the model by comparing the calculated sewer network runoff with measurements. The calculated results showed good agreement with the measured data. However, this calibration only applies to precipitation events with a return time of $T \approx 1$ year because no heavy rainfall was measured. For this reason, three model rainfall events of different intensities with block distribution were selected in order to be able to show the sensitivity of the different setting options. In addition to the pilot scheme Am Siebels, three further study areas were calculated. They have a size between 127 and 327 ha. The three block rainfall events were also used for all calculations of the further areas because there are no measured values available for these areas. In this way, the influence of the model parameters on the runoff can be displayed in the context of larger calculation areas. The qualitative course of the discharges in the sewer system can be compared to those of the pilot area. It appears that the sensitivity of the individual parameters differs significantly. In addition, the deviations originating from different settings can be very large. So measured values for the calibration of the models are absolutely necessary for a realistic representation of the discharge. Only in this way can the risk of pluvial flooding be reliably estimated and potential measures effectively be calculated.

A Geographical Information System (GIS) is also available for assessing a drainage area, which can be used to identify sinks and flow paths. A GIS carries out results relatively quickly and provides a good overview of the calculation area. However, the GIS analysis is a load-independent evaluation. Furthermore, the sewer system cannot be taken into account. Consequently, the surface runoff is incorrectly estimated. Depending on the precipitation event, the sewer system absorbs water from the surface or, in the case of an overload of the sewer system, water overflows to the surface. This effect can be shown by a coupled calculation, so that the interaction between the sewer system and surface runoff is taken into account. However, this also involves a longer processing and calculation time.

By means of a realistic representation of the sewer system and the surface and the interchange points between the two models, the origin of the water can now be determined very precisely. Thus, the inlet to the sewer system and the surface runoff to flood-prone areas in the catchment can be investigated. These are the reasons why measures can be planned more effectively. The pollution of runoff water can also be estimated and taken into account based on the manner of use of the areas of origin. Potential measures need to be planned individually. Their effectiveness can be checked with coupled two-dimensional calculations.

Variablen und Symbole

Variable	Definition	Einheit
α	Rückgangskonstante	1/Min
A_{\min}	Mindestfläche	m ²
Δt	Zeitdifferenz	Min
D	Dauerstufe	Min
$DYMAX$	Abweichung des maximalen Abflusses	%
E	Effizienz	%
f	Infiltrationsrate	1/(s · ha)
f_0	Anfangsversickerung	1/(s · ha)
f_e	Endversickerung	1/(s · ha)
h	Wasserstand	mm
h_n	Niederschlagsintensität	1/(s · ha)
k	Rauheit	mm
K	Rückgangskonstante	1/Min
n	Verhältnis von Anfangs- und Endversickerung	–
$r_{\text{aufnehmbar}}$	Aufnehmbarer Niederschlag je Straßenablauf	1/(s · ha)
$r_{\text{zufießend}}$	Berechneter zufießender Niederschlag zu einem Straßenablauf	1/(s · ha)
R	Regenspende	1/(s · ha)
R_{eff}	Effektiv abflusswirksamer Niederschlag	1/(s · ha)
s	Speicherfüllung	mm

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Variable	Definition	Einheit
t	Zeit	Min
t'	Vorheriger Zeitschritt	Min
t_0	Startzeit	Min
T	Wiederkehrzeit	a
p	Infiltrationsrate nach Horton	1/(s · ha)
P	Versickerung	1/(s · ha)
p_0	Anfangsversickerung	1/(s · ha)
p_e	Endversickerung	1/(s · ha)
Q	Abfluss	l/s
Q_I	Abfluss in den Straßenablauf	l/s
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
v_{\max}	Maximale Fließgeschwindigkeit	m/s
VOL	Abweichung des Abflussvolumens	%
WS	Bodenspeicher	mm

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	VII
Variablenverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XXIX
I Einführung	1
1 Motivation	3
2 Siedlungsentwässerung	7
2.1 Allgemeines	7
2.2 Dimensionierung	8
3 Grundlagen der numerischen Abflussberechnung	11
3.1 Allgemeines	11
3.2 Abflussbildung und Abflusskonzentration	11
3.2.1 Besonderheit der verwendeten Software	12
3.3 Kanalnetzmodell	14
3.4 Oberflächenabflussmodell	14
3.5 Kopplung von Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell	14
3.6 Modellierungsvarianten	15
3.6.1 Allgemeines	15
3.6.2 Kanalnetzmodell mit Abflussbildung über das Kanalnetzmodell (UnK) . .	15
3.6.3 Oberflächenmodell mit Abflussbildung über das Oberflächenmodell (UnO)	16
3.6.4 Überflutungsberechnung mit der kombinierten Methode	16

3.6.5	Gekoppeltes Kanalnetz- und Oberflächenmodell mit Abflussbildung über das Kanalnetzmodell (GeK)	17
3.6.6	Gekoppeltes Kanalnetz- und Oberflächenmodell mit Abflussbildung über das Oberflächenmodell (GeO)	17
3.6.7	Gekoppeltes Kanalnetz- und Oberflächenmodell mit Abflussbildung über das Kanalnetz- und Oberflächenmodell (GeKO)	17
3.7	Kalibrierung	19
3.8	++SYSTEMS	20
3.8.1	Programmmodule	20
3.8.2	GeoCPM	20
4	Methodik	23
4.1	Ziel der Arbeit	23
4.2	Vorgehensweise	24
II	Untersuchungsgebiete	27
5	Grundlegende Annahmen	29
5.1	Allgemeines	29
5.2	Flächennutzung	29
5.3	Behandlungspflichtige Flächen	30
5.4	Wahl der Untersuchungsgebiete	31
6	Wohngebiet Am Siebels (Pilotgebiet)	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Flächennutzungsarten und -kategorien	36
6.3	Belastungskategorien der Flächen	37
6.4	Darstellung der Fließwege mit Geographischem Informationssystem	38
6.5	Mess- und Auswertungsstellen	39
6.5.1	Allgemeines	39
6.5.2	Messtechnik	39
6.5.3	Auswahl der Niederschlagsereignisse	42
7	Übersicht über die weiteren Untersuchungsgebiete	43
7.1	Allgemeines	43
7.2	Kanalnetz	43
7.3	Flächennutzungsarten und -kategorien	46

7.4	Belastungskategorien der Flächen	49
7.5	Darstellung der Fließwege mit Geographischem Informationssystem	52
7.6	Mess- und Auswertungsstellen	55
III	Numerische Modellierung	57
8	Grundlagen	59
8.1	Parameteruntersuchung	59
8.2	Modellregen	59
9	Modellerstellung	63
9.1	Kanalnetzmodell	63
9.1.1	Allgemeines	63
9.1.2	Befestigungsanteil der angeschlossenen Flächen	63
9.2	Oberflächenmodell	64
9.2.1	Allgemeines	64
9.2.2	Netzauflösung	65
9.2.3	Oberflächenrauheit	70
9.2.4	Versickerung	70
9.3	Kopplung des Kanalnetz- und Oberflächenmodells	76
9.3.1	Austauschpunkte	76
9.3.2	Implementierung von Sinkkästen	76
IV	Ergebnisanalyse	79
10	Wohngebiet Am Siebels	81
10.1	Allgemeines	81
10.2	Feldmessungen	81
10.3	Kalibrierung des Berechnungsmodells Am Siebels	83
10.4	Validierung des Berechnungsmodells Am Siebels	86
10.5	Anteilige Abflüsse	87
10.5.1	Abflüsse aus Kanalnetz- und Oberflächenmodell	87
10.5.2	Abflüsse von Flächenkategorien des Oberflächenmodells	87
10.6	Implementierung von Sinkkästen	90
10.7	Parameterstudie und Sensitivitätsanalyse	92
10.7.1	Befestigungsanteil der angeschlossenen Flächen	92

10.7.2 Oberflächenrauheit	94
10.7.3 Anfangs- und Endversickerung	97
10.8 Wasserbilanz	100
11 Vergleichende Analyse	103
11.1 Allgemeines	103
11.2 Anteilige Abflüsse aus Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell	103
11.3 Implementierung der Sinkkästen	109
11.4 Parameterstudie und Sensitivitätsanalyse	112
11.4.1 Befestigungsanteil der angeschlossenen Flächen	112
11.4.2 Oberflächenrauheit	114
11.4.3 Anfangs- und Endversickerung	116
11.5 Wasserbilanzen	120
11.6 Plausibilitätsprüfung	125
11.7 Analyse des Kanalabflusses	126
11.8 Analyse des Oberflächenabflusses	131
11.8.1 Fließweganalyse	131
11.8.2 Wasserstände auf der Oberfläche	133
11.8.3 Abfluss von verschmutzten Flächen	135
11.9 Lokalisierung überflutunggefährdeter Stellen	142
11.10 Analyse unterschiedlicher Modellregen	143
11.10.1 Blockregen- und Euler-Verteilung	143
11.10.2 Synthetische Niederschlagsreihen	146
V Sanierungsmöglichkeiten und Berechnungshinweise	149
12 Sanierungsmöglichkeiten	151
12.1 Grundlagen der Sanierung	151
12.2 Maßnahmen	152
12.2.1 Allgemeines	152
12.2.2 Sanierungen des Kanalnetzes	153
12.2.3 Sanierungen der Oberfläche	154
12.3 Beispielhafte Lokalisierung von möglichen Maßnahmen	155
12.3.1 Allgemeines	155
12.3.2 Zufluss über die Oberfläche	156
12.3.3 Zufluss über das Kanalnetz	157
13 Berechnungshinweise	161

VI	Schlussbetrachtung	165
14	Zusammenfassung	167
15	Weiterer Forschungsbedarf	171
	Literaturverzeichnis	175
VII	Anhang	181
A	Modellgebiet Am Siebels	183
A.1	Gemessene Niederschlagsereignisse	184
A.2	Anteilige Abflüsse	185
A.2.1	Abflüsse aus Abflussbildung im Kanalnetz- und Oberflächenmodell	185
A.2.2	Abflüsse von den Flächenkategorien des Oberflächenmodells	186
A.3	Implementierung der Sinkkästen	187
A.4	Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen	188
A.5	Oberflächenrauheit	189
A.6	Anfangs- und Endversickerungswerte	190
A.7	Vergleich von Messwerten und Berechnungsergebnissen	191
B	Modellgebiet Demmeltrath	193
B.1	Berechnungsergebnisse	193
B.2	Fließwege aus ++SYSTEMS	195
B.3	Wasserstände und Überstauschächte aus ++SYSTEMS	196
C	Modellgebiet Klauberger Bach	197
C.1	Netzauflösung	197
C.2	Berechnungsergebnisse	198
C.3	Fließwege aus ++SYSTEMS	206
C.4	Wasserstände und Überstauschächte aus ++SYSTEMS	209
D	Modellgebiet Städtgesmühler Bach	213
D.1	Netzauflösung	213
D.2	Berechnungsergebnisse	214
D.3	Fließwege aus ++SYSTEMS	222
D.4	Wasserstände und Überstauschächte aus ++SYSTEMS	225
E	Plausibilitätsprüfung durch Ortsbegehung	229
E.1	Allgemeines	229

E.2 Einzugsgebiet Demmeltrath	230
E.3 Einzugsgebiet Klauberger Bach	239
E.4 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach	247
Lebenslauf	257

Abbildungsverzeichnis

3.1	Schematische Darstellung des Verlaufes der Abflussbildung, Quelle: Modifiziert nach DWA-M 165-1 (ENTWURF) (2020)	12
3.2	Schematische Darstellung der Berechnungsweise des alten und neuen Verfahren in ++SYSTEMS, Quelle: WAGNER (2014)	13
3.3	Ungekoppelte Modellierungsvarianten, Quelle: HOCHSCHULE BREMEN (2017) . .	15
3.4	Kombinierte Methode, Quelle: HOCHSCHULE BREMEN (2017)	16
3.5	Gekoppelte Modellierungsvarianten, Quelle: HOCHSCHULE BREMEN (2017) . . .	18
4.1	Übersichtsgrafik über die verwendete Methodik: Es werden nur die in dieser Arbeit betrachteten Punkte dargestellt, Quelle: Eigene Darstellung	25
5.1	Übersicht über die Lage der Modellgebiete innerhalb des Stadtgebietes Solingen, Quelle: Eigene Darstellung	31
6.1	Wohngebiet Am Siebels: Übersichtskarte mit Flächennutzungsarten und Grenze des Einzugsgebietes der Auswertungsstelle sowie die prozentualen Flächenanteile der gewählten Flächenkategorien (Dachfläche, versiegelte Fläche, Grünfläche, Waldfläche) bezogen auf das Einzugsgebiet der Auswertungsstelle, Quelle: Eigene Darstellung	36
6.2	Wohngebiet Am Siebels: Übersichtskarte über die Lage der definierten Belastungskategorien, Quelle: Eigene Darstellung	37
6.3	Wohngebiet Am Siebels: Belastungsunabhängige Fließwegdarstellung auf Grundlage des Geländemodells (erstellt mit einem Geographischen Informationssystem), Gebäude werden nicht berücksichtigt, Quelle: Eigene Darstellung	38
6.4	Regentopf der Firma Onset Computer Corporation, Quelle: Eigene Darstellung .	41
6.5	Fotografie der Fernüberwachungsstation, Quelle: Eigene Darstellung	41
7.1	Übersichtskarten der Regenwasserkanalnetze sowie der Grenzen der Einzugsgebiete der Auswertungsstellen für die Einzugsgebiete Demmeltrath, Klauberger Bach und Städtgesmühler Bach, Quelle: Eigene Darstellung	44

7.2	Übersichtskarten der Flächennutzungsarten mit Grenzen des Einzugsgebietes der Auswertungsstellen sowie prozentuale Flächenanteile der gewählten Flächenkategorien (Dachfläche, versiegelte Fläche, Grünfläche, Waldfläche) bezogen auf das Einzugsgebiet der Auswertungsstelle für die Einzugsgebiete Demmeltrath, Klauberger Bach und Städtgesmühler Bach, Quelle: Eigene Darstellung	47
7.3	Übersichtskarten über die Lage der definierten Belastungskategorien, Quelle: Eigene Darstellung	50
7.4	Belastungsunabhängige Fließwegdarstellung auf Grundlage des Geländemodells für die Einzugsgebiete Demmeltrath, Klauberger Bach und Städtgesmühler Bach (erstellt mit einem Geographischen Informationssystem), Gebäude werden nicht berücksichtigt, Quelle: Eigene Darstellung	53
8.1	Für die numerischen Berechnungen verwendete Blockregen inkl. der jeweiligen Summenlinie, Quelle: Eigene Darstellung	61
9.1	Einzugsgebiet Demmeltrath: Qualitative Darstellung der Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Elemente und Kanten im Oberflächenmodell. Die Ausdünnung des Oberflächenmodells erfolgt durch Angabe der minimalen Dreiecksfläche, Quelle: Eigene Darstellung	66
9.2	Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Größen von Dreieckselementen auf die Berechnungsergebnisse, Quelle: Eigene Darstellung	67
9.3	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Größen von Dreieckselementen auf die Berechnungsergebnisse, Quelle: Eigene Darstellung	68
9.4	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Größen von Dreieckselementen auf die Berechnungsergebnisse, Quelle: Eigene Darstellung	68
9.5	Darstellung unterschiedlicher Netzgrößen mit berechneten Wasserständen auf der Oberfläche, Quelle: Eigene Darstellung	69
9.6	Verlauf der Infiltrationskurven nach Horton für konstante und veränderliche Anfangs- und Endinfiltration bzw. Rückgangskonstante, Quelle: Eigene Darstellung	72

9.7	Verlauf der Infiltrationsfähigkeit P in $++SYSTEMS$ unter Berücksichtigung des Bodenspeichers und des Ansatzes nach Horton mit konstanter Anfangsinfiltration $p_0 = 167 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ und Endinfiltration $p_e = 17 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ und unterschiedlichen Rückgangskonstanten α für jeden Blockregen (20 Minuten Vorlaufzeit, 30 Minuten Nachlaufzeit) bei Verwendung des Ansatzes Abflussbildung vor Abflusskonzentration, Quelle: Eigene Darstellung	75
9.8	Verschiedene Möglichkeiten zur Implementierung von Sinkkästen im numerischen Modell, Quelle: Eigene Darstellung	77
10.1	Wohngebiet Am Siebels: Geschwindigkeits-Wasserstands-Beziehung der gemessenen Kanalabflusswerte (Rohdaten), Quelle: Eigene Darstellung	82
10.2	Wohngebiet Am Siebels: Ganglinien des gemessenen Wasserstandes h und der gemessenen Geschwindigkeit v im Kanal für den 29.08.2018 bis 30.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	83
10.3	Wohngebiet Am Siebels mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfung: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für das Gesamtmodell sowie die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell, der Abflussbildung im Oberflächenmodell sowie den jeweiligen Flächenkategorien des Oberflächenmodells für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	89
10.4	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	91
10.5	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	93
10.6	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke [versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche] für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	95
10.7	Wohngebiet Am Siebels: Wasserstandsganglinie im Schacht an der Auswertungstelle für beide Rauheitsklassen der Oberflächendreiecke für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	96
10.8	Wohngebiet Am Siebels: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung ($\text{l/s}\cdot\text{ha}$) der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	98

10.9	Wohngebiet Am Siebels: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung (l/s-ha) der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, nur Oberflächenabfluss mit Beregnung der unbefestigten Flächen, Quelle: Eigene Darstellung	99
10.10	Wohngebiet Am Siebels: Darstellung der Wasserbilanz aufgeteilt nach Oberflächenmodell (blau-grüne Säulen) und Kanalnetzmodell (rot-orange Säulen) für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	101
11.1	Einzugsgebiet Demmeltrath, mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell, der Abflussbildung im Oberflächenmodell sowie den jeweiligen Flächenkategorien des Oberflächenmodells für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	105
11.2	Übersichtskarten über den Belastungsgrad des Kanalnetzes für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten für die Einzugsgebiete Demmeltrath, Klauberger Bach und Städtgesmühler Bach, Quelle: Eigene Darstellung	106
11.3	Einzugsgebiet Demmeltrath: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	111
11.4	Einzugsgebiet Demmeltrath, ohne Sinkkästen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	113
11.5	Einzugsgebiet Demmeltrath mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen [versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche], Quelle: Eigene Darstellung	115
11.6	Einzugsgebiet Demmeltrath mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung (l/s-ha) der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	118
11.7	Einzugsgebiet Demmeltrath mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung (l/s-ha) der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, nur Oberflächenabfluss mit Beregnung der unbefestigten Flächen, Quelle: Eigene Darstellung	119

11.8 Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung der Wasserbilanz aufgeteilt nach Oberflächenmodell (grün-blaue Säulen) und Kanalnetzmodell (rot-orange Säulen) für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	122
11.9 Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung der Wasserbilanz aufgeteilt nach Oberflächenmodell (blau-grüne Säulen) und Kanalnetzmodell (rot-orange Säulen) für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	123
11.10 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung der Wasserbilanz aufgeteilt nach Oberflächenmodell (blau-grüne Säulen) und Kanalnetzmodell (rot-orange Säulen) für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	124
11.11 Einzugsgebiet Demmeltrath, mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Gesamtabflusses für Blockregen mit 54 mm/h bevor und nachdem das Modell aufgrund der Plausibilitätsprüfung angepasst wurde, Quelle: Eigene Darstellung	125
11.12 Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	133
11.13 Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	134
11.14 Einzugsgebiet Demmeltrath: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell und der Abflussbildung im Oberflächenmodell aufgeteilt nach den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	137
11.15 Darstellung der Bilanzierungsgrößen zur Bewertung des Abflusses der Flächen mit unterschiedlichen Belastungskategorien jeweils für die drei Blockregen und die drei Berechnungsgebiete, Quelle: Eigene Darstellung	141
11.16 Unterschiedliche Modellregen-Verteilungen mit jeweils einer Niederschlagssumme von 54 mm und einer Dauerstufe von 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	144
11.17 Einzugsgebiet Demmeltrath: Vergleich des Gesamtabflusses im Kanal für unterschiedliche Niederschlagsverteilungen mit einer Niederschlagssumme von 54 mm/h, Quelle: Eigene Darstellung	145
11.18 Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung der Wasserbilanz aufgeteilt nach Oberflächenmodell (blau-grüne Säulen) und Kanalnetzmodell (rot-orange Säulen) für die Niederschläge mit Block-, Euler Typ I- und Euler Typ II-Verteilung mit jeweils 54 mm Niederschlagssumme und einer Dauerstufe von 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	147

12.1	Einzugsgebiet Demmeltrath: Übersicht über die Lage der zu sanierenden Bereiche auf Grundlage der Wasserstände im Oberflächenmodell für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	156
12.2	Einzugsgebiet Demmeltrath, Position D1: Zuflussgebiete zum Garagenplatz, auf dem bei einem Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten hohe Wasserstände auftreten, Quelle: Eigene Darstellung	157
12.3	Einzugsgebiet Demmeltrath: Übersicht über die Lage der Überstauschächte für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten sowie deren weitere Bezeichnung, Quelle: Eigene Darstellung	158
12.4	Einzugsgebiet Demmeltrath: Markiertes Kanalnetz, das bei einem Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten einen Zufluss zu den Überstauschächten liefert, Quelle: Eigene Darstellung	158
A.1	Wohngebiet Am Siebels: Gemessener Niederschlag vom 29.08.2018, 5-Minuten-Werte inkl. Summenlinie, Quelle: Eigene Darstellung	184
A.2	Wohngebiet Am Siebels: Gemessener Niederschlag vom 06.10.2019, 5-Minuten-Werte inkl. Summenlinie, Quelle: Eigene Darstellung	184
A.3	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell und der Abflussbildung im Oberflächenmodell für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	185
A.4	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für das Gesamtmodell sowie die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell und der Abflussbildung im Oberflächenmodell für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	185
A.5	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von der jeweiligen Flächenkategorie für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	186
A.6	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von der jeweiligen Flächenkategorie für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	186
A.7	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	187

A.8	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	187
A.9	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	188
A.10	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	188
A.11	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke [Versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche] für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	189
A.12	Wohngebiet Am Siebels: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke [Versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche] für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	189
A.13	Wohngebiet Am Siebels: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung ($l/s\text{-ha}$) der Oberflächendreiecke für den gemessenen Naturregen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	190
A.14	Wohngebiet Am Siebels: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung ($l/s\text{-ha}$) der Oberflächendreiecke für den gemessenen Naturregen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	190
A.15	Wohngebiet Am Siebels: Vergleich der gemessenen Abflussganglinie mit der numerisch berechneten Abflussganglinie an der Kanalmesstelle für den Regen vom 29.08.2018, Quelle: Eigene Darstellung	191
A.16	Wohngebiet Am Siebels: Vergleich der gemessenen Abflussganglinie mit der numerisch berechneten Abflussganglinie an der Kanalmesstelle für den Regen vom 06.10.2019, Quelle: Eigene Darstellung	191
B.1	Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	195

B.2	Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	195
B.3	Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	196
B.4	Einzugsgebiet Demmeltrath: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	196
C.1	Einzugsgebiet Klaubberger Bach: Qualitative Darstellung der Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Elemente und Kanten im Oberflächenmodell. Die Ausdünnung des Oberflächenmodells erfolgt durch Angabe der minimalen Dreiecksfläche, Quelle: Eigene Darstellung	197
C.2	Einzugsgebiet Klaubberger Bach, mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfung: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell, der Abflussbildung im Oberflächenmodell sowie den jeweiligen Flächenkategorien des Oberflächenmodells für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	198
C.3	Einzugsgebiet Klaubberger Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	199
C.4	Einzugsgebiet Klaubberger Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen [Versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche], Quelle: Eigene Darstellung	200
C.5	Einzugsgebiet Klaubberger Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	201
C.6	Einzugsgebiet Klaubberger Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, nur Oberflächenabfluss mit Beregnung der unbefestigten Flächen, Quelle: Eigene Darstellung	202

C.7	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	203
C.8	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell und der Abflussbildung im Oberflächenmodell aufgeteilt nach den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	204
C.9	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	206
C.10	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	207
C.11	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	208
C.12	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	209
C.13	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	210
C.14	Einzugsgebiet Klauberger Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	211
D.1	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Qualitative Darstellung der Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Elemente und Kanten im Oberflächenmodell. Die Ausdünnung des Oberflächenmodells erfolgt durch Angabe der minimalen Dreiecksfläche, Quelle: Eigene Darstellung	213
D.2	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell, der Abflussbildung im Oberflächenmodell sowie den jeweiligen Flächenkategorien des Oberflächenmodells für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	214

D.3	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell abhängig vom Befestigungsanteil der an den Kanal angeschlossenen Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	215
D.4	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Oberflächenmodell abhängig von den Rauheiten der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen [Versiegelte Fläche / Grünfläche / Waldfläche], Quelle: Eigene Darstellung	216
D.5	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	217
D.6	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen: Abflussganglinien in Abhängigkeit von der Anfangs- und Endversickerung der Oberflächendreiecke für die gewählten Blockregen, nur Oberflächenabfluss mit Beregnung der unbefestigten Flächen, Quelle: Eigene Darstellung	218
D.7	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die verschiedenen Implementierungsvarianten der Sinkkästen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	219
D.8	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Berechnete Abflussganglinien des Kanalabflusses für die anteiligen Abflüsse aus der Abflussbildung im Kanalnetzmodell und der Abflussbildung im Oberflächenmodell aufgeteilt nach den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen für die gewählten Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	220
D.9	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	222
D.10	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	223
D.11	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung der Fließwege auf dem Oberflächenmodell mithilfe der Fließgeschwindigkeiten aus der numerischen Berechnung für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	224
D.12	Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 18 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	225

D.13 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 36 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	226
D.14 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Darstellung Wasserstände auf dem Oberflächenmodell sowie der Überstauschächte für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	227
E.1 Einzugsgebiet Demmeltrath: Übersicht über die Lage der Untersuchungsstellen auf Grundlage der Wasserstände im Oberflächenmodell für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	230
E.2 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 1: Kirchengelände mit Parkplatz in der Schlagbaumer Straße, Quelle: Eigene Darstellung	231
E.3 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 2: Durchfahrt durch ein Gebäude zu einem Parkplatz in der Schlagbaumer Straße, Quelle: Eigene Darstellung	232
E.4 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 3: Garagenhof und Parkplatzfläche in der Schlagbaumer Straße, Quelle: Eigene Darstellung	233
E.5 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 4: Gewerblicher Innenhof in der Nibelungenstraße, Quelle: Eigene Darstellung	234
E.6 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 5: Gewerblicher Innenhof in der Ketzberger Straße, Quelle: Eigene Darstellung	235
E.7 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 6: Verrohrung des Lochbaches unter der Frankenstraße hindurch, Quelle: Eigene Darstellung	236
E.8 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 7: Gewerblicher Innenhof in der Georgestraße, Quelle: Eigene Darstellung	237
E.9 Einzugsgebiet Demmeltrath, Position 8: Verrohrung des Lochbaches im Bereich der Kreuzung Focher Straße und Carl-Ruß-Straße, Quelle: Eigene Darstellung	238
E.10 Einzugsgebiet Klauberger Bach: Übersicht über die Lage der Untersuchungsstellen auf Grundlage der Wasserstände im Oberflächenmodell für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	239
E.11 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 1: Privater Innenhof in der Klauberger Straße, Quelle: Eigene Darstellung	240
E.12 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 2: Sackgassen-Ende der Emilienstraße sowie Friedhofsgelände, Quelle: Eigene Darstellung	241
E.13 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 3: Private Gärten am Ende der Emiliestraße, Quelle: Eigene Darstellung	242
E.14 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 4: Innenhof mit Garagen in der Emiliestraße, Quelle: Eigene Darstellung	243

E.15 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 5: Innenhof mit Garagen in der Gertrudisstraße, Quelle: Eigene Darstellung	244
E.16 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 6: Gewerblicher Innenhof in der Cronenberger Straße, Quelle: Eigene Darstellung	245
E.17 Einzugsgebiet Klauberger Bach, Position 7: Gewerblicher Innenhof in der Kuller Straße, Quelle: Eigene Darstellung	246
E.18 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Übersicht über die Lage der Untersuchungsstellen auf Grundlage der Wasserstände im Oberflächenmodell für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	247
E.19 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 1: Grundschule in der Meigener Straße, Quelle: Eigene Darstellung	248
E.20 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 2: Firmen-Parkplatz und umliegendes Gelände in der Schützenstraße bzw. Vogtlandstraße, Quelle: Eigene Darstellung	250
E.21 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 3, Ortsbesichtigung: Großer Innenhofbereich mit Parkmöglichkeiten und Grün- bzw. Waldflächen in der Klingensstraße, Quelle: Eigene Darstellung	251
E.22 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 3, Berechnungsergebnisse: Großer Innenhofbereich mit Parkmöglichkeiten und Grün- bzw. Waldflächen in der Klingensstraße, Quelle: Eigene Darstellung	252
E.23 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 4: Unterführung durch Gebäude in die Anliegerstraße Hippergrund, Quelle: Eigene Darstellung	253
E.24 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach, Position 5: Gewerblicher Innenhof und parallel verlaufender Fußweg in der Schwertstraße, Quelle: Eigene Darstellung . . .	254

Tabellenverzeichnis

2.1	Beispiele für Bemessungsregenhäufigkeiten für Rohre, die ohne Überlastung lediglich vollgefüllt sind, Quelle: DIN EN 752 (2017)	8
2.2	Beispiele für Bemessungskriterien für kanalindizierte Überflutungen und stehendes Wasser aus Überflutungen, Quelle: DIN EN 752 (2017)	9
5.1	Zuordnung der vorhandenen Flächennutzungsarten zu den gewählten Flächenkategorien, Quelle: Eigene Darstellung	30
5.2	Übersicht über alle Untersuchungsgebiete: Gesamtgröße und befestigter Anteil bezogen auf das gesamte Berechnungsgebiet, Gesamtgröße und Größen der Teilgebiete bezogen auf das Einzugsgebiet der Auswertungsstelle sowie Übersicht über vorhandene Messtechnik und verwendete Berechnungsregen, Quelle: Eigene Darstellung	33
6.1	Übersicht der gemessenen und berechneten Niederschlagsereignisse im Untersuchungsgebiet Am Siebels, Quelle: Eigene Darstellung	42
9.1	Kenndaten der verwendeten Workstations und die beispielhaften Berechnungszeiten für das Berechnungsgebiet Demmeltrath mit einem Blockniederschlag von 54 mm/h (20 Minuten Vorlaufzeit, 30 Minuten Nachlaufzeit), Quelle: Eigene Darstellung	70
9.2	Anfangsversickerung, Endversickerung und Rückgangskonstante in Abhängigkeit von den Bodenarten für den Ansatz nach Horton/Paulsen, Quelle: Modifiziert nach NEUMANN (1976)	71
10.1	Darstellung des Einflusses der einzelnen Parameter auf die verschiedenen Flächen(kategorien), Quelle: Eigene Darstellung	84
10.2	Einordnung der Abweichungsmaße in ein Bewertungsschema, Quelle: Modifiziert nach DWA-M 165-1 (ENTWURF) (2020)	84
10.3	Ergebnis der Kalibrierung des Modells anhand der fünf Niederschlagsereignisse mit der größten Abflussspitze, inklusive Bewertungskriterien nach DWA-M 165-1 (ENTWURF) (2020), Quelle: Eigene Darstellung	85

10.4 Validierung des Modells für die übrigen vier gemessenen Niederschlagsereignisse anhand der Bewertungskriterien nach DWA-M 165-1 (ENTWURF) (2020), Quelle: Eigene Darstellung	86
11.1 Übersicht über die berechneten Überstauschächte und maximalen Überstauvolumina für alle Einzugsgebiete mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen nach Anpassungen des Modells durch Plausibilitätsprüfung, Quelle: Eigene Darstellung	127
11.2 Einzugsgebiet Demmeltrath mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen nach Anpassungen des Modells durch Plausibilitätsprüfung: Auflistung der Überstauschächte mit Namen, Überstauvolumen und Überstauintensität für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	129
11.3 Einzugsgebiet Klauberger Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfung nach Anpassungen des Modells durch Plausibilitätsprüfung: Auflistung der Überstauschächte mit Namen, Überstauvolumen und Überstauintensität für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	130
11.4 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach mit Sinkkästen als Dreiecksverknüpfungen nach Anpassungen des Modells durch Plausibilitätsprüfung: Auflistung der Überstauschächte mit Namen, Überstauvolumen und Überstauintensität für den Blockregen mit 54 mm in 60 Minuten, Quelle: Eigene Darstellung	131
11.5 Maximal auftretende Fließgeschwindigkeiten auf dem Oberflächenmodell der drei Einzugsgebiete, Quelle: Eigene Darstellung	132
11.6 Einteilung von Gefahrenklassen in Abhängigkeit von den ermittelten Wasserständen auf der Oberfläche, Quelle: DWA-M 119 (2016)	134
B.1 Einzugsgebiet Demmeltrath: Bilanzierungsgrößen (unvollständig) der Wassermengen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen jeweils für die drei Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	194
C.1 Einzugsgebiet Klauberger Bach: Bilanzierungsgrößen (unvollständig) der Wassermengen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen jeweils für die drei Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	205
D.1 Einzugsgebiet Städtgesmühler Bach: Bilanzierungsgrößen (unvollständig) der Wassermengen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Belastungskategorien der Flächen jeweils für die drei Blockregen, Quelle: Eigene Darstellung	221