



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

Svenja Kemper

Hydraulische Leistungsfähigkeit
von Straßenablauf-Aufsätzen

Bericht Nr. 22, 2018



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

HYDRAULISCHE LEISTUNGSFÄHIGKEIT VON STRASSENABLAUF-AUFSÄTZEN

von der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der Bergischen Universität Wuppertal

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von

Svenja Kemper, M.Sc.

aus Düsseldorf

© 2018 LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal
Vervielfältigungen nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Autors

Eingereicht am: 11. Oktober 2017

Prüfung am: 15. Dezember 2017

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

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Mario Oertel
LuFG Wasserbau
Fachhochschule Lübeck

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

Weiteres Mitglied: Univ.-Prof. Dr. Armin Seyfried
LuFG Computersimulation für Brandschutz und
Fußgängerverkehr
Bergische Universität Wuppertal

Bericht – Lehr- und Forschungsgebiet
Wasserwirtschaft und Wasserbau

Band 22

Svenja Kemper

**Hydraulische Leistungsfähigkeit
von Straßenablauf-Aufsätzen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5870-3

ISSN 0179-9444

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort (Hrsg.)

Starkregenereignisse und daraus resultierender Hochwasserabfluss treten in den letzten Jahren vermehrt auf und führen in den Städten regelmäßig zu Schäden. Die Städte und Kommunen stehen damit vor großen Herausforderungen der Klimawandelanpassung und müssen für eine Optimierung bzw. einen Ausbau der städtischen Infrastruktur sorgen. Das unterirdische Kanalsystem kann aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nur für begrenzte Abflüsse ausgelegt werden. Gleichzeitig wurden die oberirdischen Fließwege oft durch eine unachtsame Stadtbauplanung unterbrochen oder vollständig beseitigt. Für beide Teilsysteme gilt es nun diese zu reaktivieren und dabei vor allem die Interaktion zwischen den beiden Abflusssystemen zu nutzen. Seit einigen Jahren stehen mit einer neueren Generation von gekoppelten hydrodynamischen Simulationsmodellen auch die planerischen Werkzeuge der Siedlungswasserwirtschaft für eine integrale Bemessung zur Verfügung. Allerdings zeigt sich bei der Anwendung, dass gerade die Koppelstellen, wie Straßenabläufe oder Kanaldeckel, einen wesentlichen Einfluss auf die Interaktion ausüben. Für eine optimale Aufteilung der Abflusströme und deren hydraulischen Dimensionierung ist daher die Kenntnis des hydraulischen Verhaltens eine notwendige Voraussetzung.

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer Initiative der Technischen Betriebe Solingen, die beobachtet haben, dass es auch dann schon zu oberirdischem Abfluss auf Straßen kommt, wenn die Leistungsfähigkeit des Kanalsystems noch nicht erreicht wurde. Dies wurde auf eine unzureichende Leistungsfähigkeit der Straßenabläufe zurückgeführt. Die Recherche zeigte, dass eine systematische, analytische oder numerische Untersuchung zur Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Straßenabläufen nicht vorlag.

Die vorliegende Dissertation greift diese Fragestellung auf und fokussiert auf den Straßenablauf (Gully) als das wesentliche hydraulische Element der Einlaufbegrenzung zum Kanalsystem. Der Fließvorgang in das System selbst stellt sich dabei als erstaunlich komplex dar. Es liegt in der Regel ein schießender Zufluss mit relativ hohen Geschwindigkeiten und geringen Wassertiefen vor, der über eine komplexe dreidimensionale Geometrie führt. Die hydraulische Leistungsfähigkeit wird daher in dieser Arbeit in umfangreichen physikalischen und numerischen Modellversuchen bestimmt und für die simulationstechnische Dimensionierung parametrisiert. Der planende In-

genieur erhält durch diese Dissertation ein Werkzeug für die Bestimmung der Austauschgrößen zwischen oberirdischen und unterirdischen Abflusssystemen. Der parametrisierte Ansatz kann leicht in Simulationsmodelle integriert werden.

Wuppertal, Januar 2018

Andreas Schlenkhoff

„WICHTIG IST, DASS MAN NIE AUFHÖRT ZU FRAGEN.“

Albert Einstein (1879 - 1955)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau der Bergischen Universität Wuppertal. Ich bedanke mich bei allen Personen, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt und begleitet haben. Besonders herzlich bedanke ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Andreas Schlenkhoff für die Betreuung und Unterstützung der Arbeit, die freundschaftliche Zusammenarbeit und sein Vertrauen in mich und meine Arbeit. Er stand mir stets mit fachlichem Rat seit Beginn meiner wissenschaftlichen Laufbahn zur Seite und gab mir die benötigten zeitlichen und finanziellen Freiheiten, die zur Erstellung dieser Dissertation nötig waren. Ebenso bedanke ich mich sehr herzlich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Mario Oertel, meinem zweiten Gutachter, der mich schon während meiner Studienzeit für das Fach Wasserbau und die wissenschaftliche Arbeit begeistern konnte. Er war stets mit einem offenen Ohr und wertvollen Hinweisen für mich da. Für die Übernahme des Vorsitzes sowie die Teilnahme an der Prüfungskommission danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Felix Huber und Herrn Univ.-Prof. Dr. Armin Seyfried. Ein besonderer Dank gilt meinen lieben Kollegen am LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau sowie am Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen. Eine freundschaftliche Zusammenarbeit mit sowohl fachlichen Diskussionen als auch vielen private Gesprächen mit nützlichen Ratschlägen haben mir sehr geholfen und die Arbeit erleichtert. Allen studentischen Hilfskräften danke ich sehr für ihren unermüdlichen und unersetzbaren Einsatz bei allen Laborarbeiten.

Für viele Gespräche zu praxisrelevanten Inhalten sowie den Anstoß für die grundlegenden Untersuchungen danke ich den Mitarbeitern der Technischen Betriebe Solingen.

Für die besondere Geduld und Zeit sowie das Ertragen meiner Launen während der Erstellung dieser Arbeit bin ich meinem Mann Tobias von ganzem Herzen dankbar. Ebenso herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Schwester, meiner Familie und engen Freunden für den Rückhalt und die moralische Unterstützung. Die vielen aufmunternden Worte und das Vertrauen in das Gelingen der Arbeit waren unersetzlich. Danke!

Wuppertal, Januar 2018

Svenja Kemper

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Strömungsprozessen an Straßenabläufen mit Pultaufsatz. In physikalischen und numerischen Modellversuchen (hybrides Modellkonzept) konnte der Einfluss hydraulischer und geometrischer Größen auf die Leistungsfähigkeit von ausgewählten Pultaufsätzen im Maßstab 1:1 analysiert werden.

Die Validierung der numerischen Modellversuche wurde unter Verwendung einer vereinfachten Geometrie eines Straßenablauf-Aufsatzes mit Querstreben durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die maßgeblichen Strömungsprozesse (z. B. die Abflussmenge durch die einzelnen Schlitzte, der Grad der Überdeckung sowie die Geschwindigkeiten und Wassertiefen) mit guter Übereinstimmung zu Laborversuchen im 3D numerischen Modell abgebildet werden können.

Wie sich herausgestellt hat, wird die Leistungsfähigkeit bei Verwendung der exakten Aufsatz-Geometrie (Importiert als *stl*-Datei und Erzeugung der Berechnungsgeometrie mit der FAVORTM-Methode) im numerischen Modell im Vergleich zu den Experimenten unterschätzt. Die Ergebnisanalyse lässt die Annahme zu, dass die Fehler durch Modellierungsfehler und damit einer nicht ausreichend genauen Geometrieabbildung zustande kommen. Die beobachteten Abweichungen zu den Laborergebnissen nehmen mit zunehmender Fließgeschwindigkeit zu, so dass eine Anpassungsfunktion für die simulierte Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit hergeleitet wurde. Für die Kalibrierung der Funktionsparameter sind physikalische Modellversuche notwendig. Es wurde gezeigt, dass mit der kalibrierten Funktion weitere, nicht im Labor untersuchte Modellkonfigurationen simuliert und quantitativ ausgewertet werden können.

Es hat sich als zielführend erwiesen, im Bezug auf die Beurteilung der Einflussgrößen ausschließlich den frontalen Zufluss auf der Breite des Pultaufsatzes zu betrachten und damit die typspezifische Effizienz E_T einzuführen. Die Modellversuche haben gezeigt, dass drei strömungsmechanisch maßgebende Zustände auftreten, welche in Flow Cases eingeteilt wurden. Flow Case 1: keine Überströmung ($E_T \approx 1$), Flow Case 2: teilweise Überströmung ($E_T < 1$), Flow Case 3: vollständige Überströmung des Straßenablauf-Aufsatzes ($E_T \ll 1$).

Die hydraulischen Größen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit, die sich in Abhängigkeit der Straßengeometrie (Längs- und Querneigung) und des Regenabflusses ergeben, wurden als maßgebliche Einflussgrößen identifiziert. Es konnte belegt werden, dass mit zunehmender Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit die typspezifische Effizienz abnimmt. Die Experimente haben gezeigt, dass neben der Aufsatzlänge die Ausrichtung der Querstreben sowie die Schlitzbreite die Leistungsfähigkeit maßgeblich beeinflussen (geometrische Einflussgrößen). Insbesondere bei hohen Längsneigungen wird basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit der Einsatz von sogenannten Bergeinläufen empfohlen. Ist der Einbau von „längeren“ Aufsätzen nicht möglich, hat sich herausgestellt, dass Aufsätze mit Längs- oder Diagonalstreben eine erhöhte Leistungsfähigkeit bei steilen Straßen aufweisen. In eher flachen Bereichen konnte in den Experimenten hingegen bei Pultaufsätzen mit Querstreben und einer großen Schlitzbreite die größte Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden.

Basierend auf den Ergebnissen der physikalischen Modellversuche wurde eine Berechnungsformel zur Vorhersage der Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz von Pultaufsätzen bei schießendem und rückstaufreiem Abfluss in die Kanalisation hergeleitet und eine gute Übereinstimmung der approximierten Werte mit den Ergebnissen der Modellversuche nachgewiesen. Die Anwendbarkeit auf weitere, nicht untersuchte Aufsatz-Typen, konnte damit innerhalb der Anwendungsgrenzen bestätigt werden. Als Eingangsgrößen für die Berechnungsformel wurden die hydraulischen Größen Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit sowie die geometrischen Größen Aufsatzbreite, Aufsatzlänge, Öffnungsfläche und Strebenanordnung definiert.

Mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann quantifiziert werden, wie viel Wasser nach Niederschlagsereignissen durch die Straßenabläufe in die Kanalisation abfließt und wie viel Wasser aufgrund einer begrenzten Leistungsfähigkeit der Straßenabläufe an der Oberfläche zum Abfluss kommt. Damit wird den Ingenieurbüros oder Kommunen ein wichtiges Werkzeug für die Planung von an den Klimawandel angepassten Entwässerungsstrukturen an die Hand gegeben.

Abstract

The present work deals with the hydraulic efficiency of street inlets with grates. The hydraulic and geometrical parameters that influence the hydraulic capacity were investigated on a 1:1 scale with physical model test runs as well as 3D numerical model test runs.

In order to validate the numerical model, a simplified geometry of a grate inlet with cross bars was used. Good agreement to physical model test runs could be proven regarding the main flow characteristics such as water depth, flow velocity and intercepted discharge through each opening.

It was found that the capacity simulated on the basis of the exact geometry of a street inlet (calculation geometry created according to the FAVORTM-method based on a CAD-drawing) underestimates the measured capacity. The analysis of the results allows the assumption that the errors are caused by an insufficient calculation geometry. The observed deviations to the physical model results increase with increasing flow velocity. In order to use the simulated results quantitatively, a fitting function depending on the flow velocity was developed. Results of the physical model test runs were used to calibrate the functional parameters. It was shown that model setups that were not tested in laboratory could be simulated and quantitatively evaluated using the calibrated fitting function.

To assess the influencing parameters it was proven to be sufficient to take into account only the frontal flow on the width of the grate. On this basis, the type-specific efficiency E_T was introduced. According to the model test runs, three main flow conditions were observed and classified in three Flow Cases. Flow Case 1: no overflow ($E_T \approx 1$), Flow Case 2: partial overflow ($E_T < 1$), Flow Case 3: full overflow of the grate ($E_T \ll 1$).

Water depth and flow velocity, both depending on the street geometry (longitudinal and transverse slope) and the surface runoff, were identified as the main influencing hydraulic parameters. It could be proven that the type-specific efficiency of street inlets decreases with increasing water depth and flow velocity. The model test runs have demonstrated that – in addition to the grate length – the arrangement of the bars and the width of the bar openings greatly affect the hydraulic capacity of grate inlets. It could be shown that – especially with high longitudinal

slopes – so-called mountain inlets or grate inlets with longitudinal or diagonal bars lead to the best capacity. Based on the experiments performed, grate inlets with cross bars and large cross bar opening widths are recommended in flat areas.

A calculation formula to estimate the hydraulic capacity and type-specific efficiency was developed using the results of the physical model test runs. The formula is limited to supercritical flow conditions with no backwater effects caused by the underground drainage system. Good agreement between estimated and measured results could be proven. The applicability to estimate the efficiency of non-tested grate inlets could be confirmed within the limitations. The developed function depends on water depth, flow velocity and street inlet geometry (grate width, grate length, opening area and arrangement of bars).

The results of the present work provide detailed information concerning the hydraulic efficiency of street inlets in order to quantify the amount of the intercepted flow to the underground drainage systems as well as the remaining surface flow on the street. They allow a more realistic urban flood risk management for heavy rainfall events.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XVIII
Variablenverzeichnis	XIX
I Einleitung	1
1 Motivation	3
2 Starkniederschlagsereignisse und Sturzfluten	5
2.1 Starkniederschläge	5
2.2 Sturzfluten	8
3 Siedlungsentwässerung	11
3.1 Typisches kommunales Entwässerungssystem	11
3.2 Bemessungsgrundlagen	14
3.3 Ansätze für den Überflutungsschutz	17
4 Stand der Forschung	19
4.1 Überflutungsberechnungen	19
4.2 Leistungsfähigkeit und Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen im rückstaufreien Zustand	21
5 Forschungsansatz	29
5.1 Forschungsnotwendigkeit	29

5.2	Ziel der Arbeit	30
5.3	Hybride Simulationen im Wasserbau	31
II	Hydraulische Modellversuche	33
6	Physikalisches Modell	35
6.1	Allgemeines	35
6.2	Messtechnik	37
6.2.1	Verwendete Messtechnik	37
6.2.2	Plattform-Wägezellen	38
6.2.3	Ultraschallsensoren	38
6.2.4	Radarmessgerät	39
6.3	Auswahl der Modellparameter	40
6.4	Modellläufe	40
7	Numerisches Modell	45
7.1	Allgemeines	45
7.2	Verwendete Software	47
7.3	Straßenmodell mit Pultaufsatz	48
7.4	Modellläufe	50
III	Ergebnisanalyse	53
8	Ergebnisse der physikalischen Modellversuche: Regenabfluss auf der Straße	55
8.1	Allgemeines	55
8.2	Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten	56
8.2.1	Allgemeines	56
8.2.2	Wassertiefen	57
8.2.3	Fließgeschwindigkeiten	58
8.3	Reproduzierbarkeit	60
8.4	Beschreibung des Abflusses auf der Straße: analytischer Ansatz	60
8.5	Charakteristik des Regenabflusses	63
9	Ergebnisse der physikalischen Modellversuche: Effizienz von Straßenablauf-	
	Aufsätzen	65
9.1	Messdatenverarbeitung	65
9.2	Reproduzierbarkeit	67
9.3	Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen	67

9.4	Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Ansätzen aus der Literatur	71
10	Ergebnisse der numerischen Modellversuche	75
10.1	Allgemeines	75
10.2	Verifikation und Validierung des numerischen Modells	75
10.2.1	Abschätzung des numerischen Fehlers aus räumlicher und zeitlicher Diskretisierung	75
10.2.2	Vergleich mit analytischer Lösung (Endüberfall)	78
10.2.3	Vergleich mit physikalischen Modellversuchen (Kanten-Modell)	80
10.2.4	Vergleich des Einflusses verschiedener Turbulenzmodelle	82
10.2.5	Vergleich mit physikalischen Modellversuchen (Straßenmodell mit Pultaufsatz)	87
10.2.6	Ergebnisdiskussion	90
10.2.7	Hybrides Modellkonzept: Übertragung der Ergebnisse	94
10.3	Kalibrierung: Anpassung der Oberflächenrauheit	95
10.4	Einfluss der Oberflächenspannung	96
11	Vertiefte Diskussion der Einflussgrößen auf die Effizienz von Straßenabläufen mit Pultaufsatz	101
11.1	Allgemeines	101
11.2	Hydraulische Einflussgrößen	102
11.3	Geometrische Einflussgrößen	111
11.4	Theoretische Betrachtung der Strömungsvorgänge am Pultaufsatz: Einfluss der Öffnungsbreite B_X in Fließrichtung auf die Leistungsfähigkeit	118
12	Berechnungsformel für die Leistungsfähigkeit und typspezifische Effizienz	125
12.1	Allgemeines	125
12.2	Herleitung der Berechnungsformel	126
12.3	Beurteilung der Anpassungsgüte	133
12.4	Plausibilitätsbetrachtung und Anwendung auf weitere Pultaufsätze	136
IV	Schlussbetrachtungen	141
13	Beispielanwendung: gekoppelte Überflutungsberechnung	143
13.1	Allgemeines	143
13.2	Modellgebiet und Modelleigenschaften	143
13.3	Ergebnisse	146

14 Zusammenfassung	149
15 Weiterer Forschungsbedarf	155
Literaturverzeichnis	157
V Anhang	165
A Systemskizzen des physikalischen Modells	167
B Überprüfung der Anwendbarkeit der Wägezellen unterhalb des Mindestanwendungsbereichs	169
C Fotos ausgewählter Modellläufe	171
D Wassertiefen im physikalischen Modell	177
E Numerisches Modell: Netzverfeinerungsstudie	181
F Ergebnisse der numerischen Simulationen	185
F.1 Seitlich am Straßenablauf vorbeifließender Abfluss Q_S	185
F.2 Vergleich der mittleren Fließgeschwindigkeit (Labor und Numerik)	186
F.3 Frontaler Zufluss Q_F für verschiedene Querneigungen	187
G Freistrah auf vertikale Wand	189
H Goodness-of-Fit: Parameterbestimmung 1	191
Lebenslauf	197

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeitungsartikel der Westdeutschen Zeitung (Ausgabe Wuppertal) vom 08. Juni 2016	4
2.1	Erscheinungsformen konvektiver Niederschläge nach HATZFELD (2006)	7
3.1	Straßenrinnenformen nach FGSV (2005)	12
3.2	Straßenablauf für Trockenschlamm nach DIN 4052 (2006)	13
3.3	Aufsatztypen für Straßenabläufe (unten: verändert nach FGSV (2005))	13
3.4	Elemente des Überflutungsschutzes nach DWA (2008) und BWK (2013)	17
3.5	Vier-Elemente-Ansatz zum Umgang mit verschiedenen Regenerenignissen nach DIGMAN ET AL. (2014)	18
4.1	Hydraulische Zustände der Interaktion zwischen Oberfläche und Kanalisation an Straßenabläufen, verändert nach DJORDJEVIĆ ET AL. (2005)	21
4.2	Vergleich der empirischen Ansätze zur Berechnung der Effizienz (Standardaufsatz nach DIN 19583)	25
6.1	Foto des physikalischen Modells	36
6.2	Detailansicht physikalisches Modell: Pultaufsatz (Typ I)	37
7.1	Numerisches Modell: Straße mit Pultaufsatz	49
7.2	STL-Modell der Aufsätze Typ I und II	50
8.1	Messpunkte im physikalischen Modell (rot: Geschwindigkeitsmessung, blau: Messung der Wassertiefen)	56
8.2	ML23: Wassertiefen	58
8.3	ML236: Oberflächengeschwindigkeiten	59
8.4	Fließquerschnitt des Regenabflusses bei Bordrinnen (unmaßstäbliche Skizze)	61
8.5	Inkrementeller Durchfluss dQ (unmaßstäbliche Skizze)	62
8.6	Berechnete Reibungsbeiwert k_{st} für alle Modelläufe (links) und Abflusskurve oberhalb des Straßenablaufs bei einer Querneigung von $S_T = 2,5\%$ und Längsneigungen zwischen $S_L = 2,5\%$ und $10,0\%$ (rechts)	63

8.7	Dimensionslose Kennzahlen (Froudezahl und Reynoldszahl) für alle im physikalischen Modell untersuchten hydraulischen Fälle	64
9.1	ML236-I: Rohdaten der Wägezellen	65
9.2	Abweichung der Messergebnisse mit Wägezellen	66
9.3	E in Abhängigkeit des Zuflusses Q ($S_T = 2,5$ %)	68
9.4	E_S in Abhängigkeit des Zuflusses Q ($S_T = 2,5$ %)	68
9.5	E_O in Abhängigkeit des Zuflusses Q ($S_T = 2,5$ %)	69
9.6	Definition der Volumenströme (links) und seitlich in den Aufsatz abfließender Anteil in Abhängigkeit des Zuflusses Q (rechts)	70
9.7	E_T in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses Q_F ($S_T = 2,5$ %)	70
9.8	Vergleich der Laborergebnisse mit den berechneten Leistungsfähigkeiten mit in der Literatur verfügbaren Gleichungen	72
9.9	ML23-III: Graphischer Vergleich $Q/h - E$	73
9.10	ML2-I/VI: Vergleich der Labormessungen mit den Tabellenwerten nach RAS-Ew (FGSV, 2005)	74
10.1	Berechnungsgeometrie und Rechenetz (FLOW-3D) für zwei Netz-Varianten, Berechnungsgeometrie erzeugt mit der FAVOR TM -Methode	76
10.2	Einfluss der räumlichen Diskretisierung auf Wassertiefe und durch den Aufsatz abfließende Wassermenge (ML235m)	77
10.3	Endüberfall (Freistrah) mit $S_L = 5,0$ %, $Q = 3$ l/s	80
10.4	Modellgeometrie: Kanten-Modell	81
10.5	Wasserspiegellage Kanten-Modell: Ergebnisse der Laborversuche (x) und Ergebnisse der numerischen Modellversuche (durchgezogene Linie)	82
10.6	Vergleich des gemessenen und simulierten Durchflusses durch jede Öffnung im Kanten-Modell in dimensionsloser Form	83
10.7	Vergleich der Ergebnisse mit verschiedenen Turbulenzmodellen (Kanten-Modell, $S_L = 5,0$ %, $q = 17,6$ (l/s)/m)	84
10.8	Längsschnitt Kanten-Modell (Geschwindigkeit v [m/s], $S_L = 5,0$ %, $q = 17,6$ (l/s)/m)	86
10.9	Vergleich der gemessenen (Labor) und simulierten (Numerik) Wassertiefen und Geschwindigkeiten ($S_T = 2,5$ %)	87
10.10	Vergleich der gemessenen (Labor) und simulierten (Numerik) Volumenströme Q_S und Q_O ($S_T = 2,5$ %)	88
10.11	Vergleich des gemessenen (Labor) und simulierten (Numerik) Volumenstroms Q_I ($S_T = 2,5$ %)	88
10.12	Überdeckung des Pultaufsatzes: Labor vs. Numerik	89

10.13	Einfluss der Methode zur Modellierung der Neigung im numerischen Modell: Auswertung der Wassertiefen und Volumenströme für Modelllauf ML237n-II	93
10.14	Regressionsanalyse der relativen Abweichungen und Korrektur der Ergebnisse der numerischen Simulationen (in grau: nicht angepasste Ergebnisse, farbig: mit Gleichung 10.10 korrigierte Werte)	96
10.15	Vergleich der simulierten Wassertiefen mit verschiedenen Oberflächenrauheiten k_R	96
10.16	Einfluss der Oberflächenspannung auf die Wassertiefen im Oberwasser des Straßenaflaufs mit $S_T = 2,5\%$	97
10.17	Q_I mit und ohne Oberflächenspannung: $S_L = 5,0\%$, $S_T = 0\%$	98
10.18	Längsschnitt KANTE ($S_L = 5,0\%$, $S_T = 0\%$, $Q = 31\text{ l/s}$)	99
11.1	Definitionsskizze zu Flow Case 1 bis 3	102
11.2	Abhängigkeit der hydraulischen Größen h , v und W von S_T und S_L für $Q = 12\text{ l/s}$ (simulierte Werte als <i>Marker</i> dargestellt, analytisch berechnete Werte: durchgezogene Linie)	103
11.3	Abhängigkeit der Effizienz von der Längsneigung (Auswertung der physikalischen Modellversuche für $S_T = 2,5\%$, $Q = 18\text{ l/s}$, Aufsatz Typ I)	104
11.4	Im physikalischen Modell untersuchte hydraulische Fälle in Abhängigkeit von h und v (links) und im numerischen Modell untersuchte hydraulische Fälle in Abhängigkeit von h und v (rechts), in rot hervorgehoben sind die in beiden Modellen untersuchten hydraulischen Fälle	105
11.5	Typspezifische Effizienz E_T in Abhängigkeit von der Wassertiefe h und der Fließgeschwindigkeit v für eine Aufsatzbreite $B_A = 0,5\text{ m}$	106
11.6	Zuordnung Flow Case in Abhängigkeit von der Wassertiefe h und der Fließgeschwindigkeit v für eine Aufsatzbreite $B_A = 0,5\text{ m}$ mit $E_T > 0,985$: Flow Case 1, $E_T \leq 0,985$: Flow Case 2	107
11.7	Q_F in Abhängigkeit von h und v für eine Aufsatzbreite $B_A = 0,5\text{ m}$	108
11.8	Abhängigkeit der typspezifischen Effizienz von der Querneigung (Aufsatz Typ I)	109
11.9	Einfluss der Aufsatzbreite B_A auf die typspezifische Effizienz E_T , Auswertung der Ergebnisse der physikalischen und numerischen Modellversuche	112
11.10	Einfluss der Aufsatzlänge L_A auf die typspezifische Effizienz E_T , Ergebnisse der physikalischen Modellversuche (gestrichelte Linie: Grenze zwischen Flow Case 1 und 2)	113
11.11	Nahaufnahme der Strömung am Pultaufsatz im physikalischen Modell (ML245-I/VI) zur Untersuchung des Einflusses der Aufsatzlänge auf die typspezifische Effizienz	114

11.12	Einfluss der Öffnungsfläche auf die typspezifische Effizienz E_T , Ergebnisse der physikalischen Modellversuche (gestrichelte Linie: Grenze zwischen Flow Case 1 und 2)	115
11.13	Nahaufnahme der Strömung am Pultaufsatz im physikalischen Modell (ML225-II/III) zur Untersuchung des Einflusses der Öffnungsfläche auf die typspezifische Effizienz	116
11.14	Einfluss der Strebenanordnung auf die typspezifische Effizienz E_T , Ergebnisse der physikalischen Modellversuche (gestrichelte Linie: Grenze zwischen Flow Case 1 und 2)	117
11.15	Nahaufnahme der Strömung am Pultaufsatz im physikalischen Modell (ML235-I/II/IV/V) zur Untersuchung des Einflusses der Strebenanordnung auf die typspezifische Effizienz	118
11.16	Endüberfall, (typische) Druckverteilung (verändert nach HAGER (1994))	119
11.17	Geschwindigkeitsprofil an verschiedenen x -Positionen des Kanten-Modells: $S_L = 5,0 \%$, $Q = 3 \text{ l/s}$	120
11.18	Definitionsskizze der strömungsmechanischen Zustände längs der Einlaufstruktur mit Querstreben	121
11.19	Geschwindigkeitsprofil an verschiedenen x -Positionen des Kanten-Modells: $S_L = 5,0 \%$, $Q = 3 \text{ l/s}$	123
12.1	Kurvenbildvergleich und Identifikation der Näherungsfunktion	127
12.2	Typspezifische Effizienz E_T : Vergleich der Laborergebnisse mit den mit Gleichung 12.2 berechneten Werten	129
12.3	Leistungsfähigkeit $Q_{I,f}$: Vergleich der Laborergebnisse mit den mit Gleichung 12.3 und 12.5 berechneten Werten	131
12.4	Parameterstudie für a_2 , $b_{2,1}$ und $b_{2,2}$	132
12.5	Leistungsfähigkeit $Q_{I,f}$: Vergleich der Laborergebnisse mit den mit Gleichung 12.7 berechneten Werten	133
12.6	Typspezifische Effizienz E_T : Vergleich der Laborergebnisse mit den mit Gleichung 12.6 berechneten Werten	134
12.7	Aufsatz Typ I: Effizienz E (Vergleich der empirischen Ansätze aus der Literatur mit Laborergebnissen und der hergeleiteten Berechnungsformel)	135
12.8	Funktionaler Verlauf der typspezifischen Effizienz für drei Aufsätze ($S_T = 2,5 \%$)	137
12.9	Vergleich der approximierten Werte mit der typspezifischen Effizienz eines Pultaufsatzes, der nicht in die Herleitung der Berechnungsformel eingeflossen ist ($S_T = 2,5 \%$)	138
12.10	Typ VIII: Flow Case 2 (links), Flow Case 3 (rechts)	139

13.1	Ausschnitt des Modellgebiets	145
13.2	Maximale Wassertiefen aus gekoppelter Überflutungsberechnung im Modellgebiet	147
13.3	Wassertiefen, Geschwindigkeiten und Zuordnung zu einem Flow Case (heller Farbton: außerhalb der Modellgrenzen)	148
A.1	Systemskizze des Wasserkreislaufs	167
A.2	Systemskizze Draufsicht Modellrinne	167
A.3	Systemskizze des physikalischen Modells: Modellrinne mit Strafenablauf-Aufsatz	168
B.1	Messergebnisse der Testmessungen unterhalb der vom Hersteller angegebenen Mindestanwendungsbereichs (zu den dargestellten Ergebnisse muss jeweils noch das Leergewicht der Becken G_{Becken} addiert werden)	169
C.1	Beispielfotos: ML223	172
C.2	Beispielfotos: ML226	173
C.3	Beispielfotos: ML243	174
C.4	Beispielfotos: ML246	175
D.1	Wasserspiegellage: $S_L = 2,5 \%$, $S_T = 2,5 \%$	178
D.2	Wasserspiegellage: $S_L = 5,0 \%$, $S_T = 2,5 \%$	178
D.3	Wasserspiegellage: $S_L = 7,5 \%$, $S_T = 2,5 \%$	179
D.4	Wasserspiegellage: $S_L = 10,0 \%$, $S_T = 2,5 \%$	179
E.1	Wassertiefen [m] (Mesh Block 2)	182
E.2	tiefengemittelte Geschwindigkeit [m/s] (MeshBlock 2)	183
E.3	relative Abweichung [%]: Wassertiefe (a und b) und tiefengemittelte Geschwindigkeit (c und) (MeshBlock 2)	184
F.1	Mittlere Geschwindigkeit v : Vergleich der Ergebnisse der physikalischen und numerischen Modellversuche	186
F.2	Q_F in Abhängigkeit von h und v für eine Aufsatzbreite $B_A = 0,5$ m für Querneigungen von $1,5 \%$ bis $5,0 \%$, Ergebnisse der numerischen Modellversuche	187
H.1	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ I	192
H.2	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ II	193
H.3	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ III	193
H.4	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ IV	194
H.5	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ V	194
H.6	Modifikation/Parameterbestimmung 1: Typ VI	195

Tabellenverzeichnis

2.1	Warnstufen des DWD bei Starkregen	5
2.2	Zuordnung Starkregenindex - Wiederkehrintervall T nach SCHMITT (2014)	6
3.1	Klassifizierung von Straßenablauf-Aufsätzen nach DIN EN 124 (2015)	14
3.2	Schlitzmaße nach DIN EN 124 (2015) für Pult-, Rinnen und Kombiausätze	14
3.3	Bemessungskriterien für den Nachweis von Entwässerungssystemen	16
3.4	Bemessungskriterien für kanalindizierte Überflutungen nach DIN EN 752 (2017)	16
4.1	Modelleigenschaften experimenteller Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Straßenabläufen in der Literatur	27
6.1	Zufluss Q [l/s] je Straßenablauf bei $A_E = 400 \text{ m}^2$, Regenspenden nach KOSTRA-DWD-2010	40
6.2	Modellläufe physikalisches Modell	42
6.3	Im physikalischen Modell untersuchte Straßenablauf-Aufsätze	43
7.1	Modellläufe numerisches Modell	51
10.1	Auflösung der Rechnernetze für Mesh Block 2 der untersuchten Netz-Varianten	76
10.2	Eigenschaften des Kanten-Modells im physikalischen und numerischen Modell	81
10.3	Ergebnisse der numerischen Simulation (FLOW-3D) mit verschiedenen Turbulenzmodellen (Modelllauf ML224n-II) des Straßenmodells mit Pultaufsatz	85
11.1	Hydraulische Einflussgrößen auf die Effizienz (Beurteilung: (+): nimmt zu, (-): nimmt ab, (0): kein Einfluss)	110
11.2	Geometrische Abmessungen verschiedener Pultaufsätze zur Untersuchung des Einflusses der Aufsatzbreite	111
11.3	Abfluss $Q_{I,i}$ bei überdeckter Strömung im Kanten-Modell: Ergebnisse der numerischen Simulationen (FLOW-3D) für $Q = 3 \text{ l/s}$ und $Q = 6 \text{ l/s}$	122
12.1	Numerisch approximierten Parameter a und b	128

12.2	Empirische Parameter in Abhängigkeit des Aufsatztyps	130
12.3	Parameter S in Abhängigkeit der Strebenanordnung	131
12.4	Abweichungen der approximierten Werten von den Laborergebnissen zur Beurteilung der Anpassungsgüte der hergeleiteten Berechnungsformel	135
12.5	Geometrische Abmessungen der Aufsätze für die Plausibilitätsbetrachtung	136
12.6	Eigenschaften der Pultaufsätze zum Nachweis der Anwendbarkeit auf weitere Aufsatz-Typen	138
13.1	Verlustbeiwert c für Aufsatz Typ I, berechnet mit den Ergebnissen der physikalischen Modellversuche	145

Variablenverzeichnis

Variable	Definition	Einheit
a	Parameter	–
A	durchflossene Querschnittsfläche	m^2
A_A	auf die Aufsatzbreite bezogene durchflossene Querschnittsfläche	m^2
A_E	zu entwässernde Fläche	m^2
A_g	Gesamtfläche des Straßenablauf-Aufsatzes	m^2
A_0	Öffnungsfläche des Straßenablauf-Aufsatzes	m^2
b	Parameter	–
B_A	Breite des Straßenablauf-Aufsatzes	m
B_B	Breite des Messbeckens	mm
B_R	Breite der Modellrinne	m
b_R	Breite der Straßenrinne	m
B_S	Stegbreite	m
B_X	Schlitzbreite	m
c	Überfallbeiwert	–
C	Courant-Zahl	–
dx	Zellabmessung in x -Richtung	m
dy	Zellabmessung in y -Richtung	m

Variable	Definition	Einheit
dz	Zellabmessung in z -Richtung	m
dQ	inkrementeller Durchfluss	m^3/s
D	Dauer eines Regenerereignisses, Dauerstufe	Min
D_{hy}	hydraulischer Durchmesser	m
E	Effizienz	–
E_O	Anteil des über den Straßenablauf hinwegfließenden Abflusses vom Gesamtabfluss	–
E_S	Anteil des am Straßenablauf vorbeifließenden Abflusses vom Gesamtabfluss	–
E_T	typespezifische Effizienz	–
E_w	Anteil des frontalen Zuflusses vom Gesamtabfluss	–
FC	Flow Case	–
Fr	Froudezahl	–
Fr_0	Froudezahl bei Normalabfluss	–
Fr_A	aufsatzbezogene Froudezahl	–
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
G	Parameter	–
h	Wassertiefe	m
h_0	Wassertiefe bei Normalabfluss	m
h_A	auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Wassertiefe	m
h_{gr}	Grenzwassertiefe	m
h_k	Wassertiefe an der Überfallkante	m
h_n	Niederschlagshöhe	mm
h_R	Höhe der Straßenrinne	m
h_{USS}	Wassertiefe an der Position der Ultraschallsensoren	m
H_B	Höhe des Messbeckens	mm
H_{Bk}	Bruchkantenhöhe	m

Variable	Definition	Einheit
H_R	Höhe der Modelrinne	m
I_{WSL}	Neigung der Wasserspiegellage	m
k	Oberflächenrauheit	mm
k_A	Oberflächenrauheit des Straßenablauf-Aufsatzes	mm
k_R	Oberflächenrauheit der Modelrinne	mm
k_{st}	Manning-Strickler Beiwert	$m^{1/3}/s$
l	Überfalllänge	m
L_A	Länge des Straßenablauf-Aufsatzes	m
L_B	Länge des Messbeckens	mm
L_R	Länge der Modelrinne	m
LC	Load Cell (Wägezelle)	–
m	Abminderungsfaktor	–
n	Anzahl	–
n_d	Anzahl der Diagonalstreben	–
n_l	Anzahl der Längsstreben	–
n_t	Anzahl der Querstreben	–
p_0	atmosphärischer Luftdruck	Pa
q	spezifischer Durchfluss	$(m^3/s)/m$
Q	Durchfluss	m^3/s
Q_a	abgeminderter Durchfluss	m^3/s
Q_F	frontaler Zufluss	m^3/s
Q_I	Abfluss in den Straßenablauf	m^3/s
$Q_{I,f}$	frontal in den Straßenablauf einfließender Abfluss	m^3/s
$Q_{I,s}$	seitlich in den Straßenablauf einfließender Abfluss	m^3/s
Q_O	über den Straßenablauf hinwegfließender Abfluss	m^3/s
Q_S	am Straßenablauf vorbeifließender Abfluss	m^3/s

Variable	Definition	Einheit
r_n	Niederschlagsspende	(l/s)/ha
R^2	Bestimmtheitsmaß	–
R	Verhältnswert	–
R_A	Verhältnis von Öffnungsfläche zur Gesamtfläche	m
R_{hy}	hydraulischer Radius	m
R_w	Anteil des frontal in den Straßenablauf einfließenden Abflusses vom frontalen Zuflusses	–
R_x	Anteil des seitlich in den Straßenablauf einfließenden Abflusses vom gesamten Seitenabfluss	–
Re	Reynoldszahl	–
S	Parameter zur Berücksichtigung der Strebenanordnung	–
S_L	Längsneigung	–
S_T	Querneigung	–
t	Zeit	Min
t_e	Strahldicke	m
T_e	Endtiefenverhältnis	m
T	Wiederkehrintervall, Jährlichkeit	a
T_F	Temperatur eines Fluids	°C
USS	Ultrasonic Sensor (Ultraschallsensor)	–
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
v_A	auf die Aufsatzbreite bezogene mittlere Fließgeschwindigkeit	m/s
v_0	mittlere Fließgeschwindigkeit bei Normalabfluss	m/s
v_o	„splash-over“-Geschwindigkeit	m/s
v_*	(Wand-)Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m ³
W	Wasserspiegelbreite	m
We	Weberzahl	–

Variable	Definition	Einheit
x	Raumrichtung, Dimension	m
X	Position in x -Richtung (dimensionslos)	–
\bar{x}	Mittelwert	
y	Raumrichtung, Dimension	m
y^+	dimensionsloser Wandabstand	–
z	Raumrichtung, Dimension	m
Z	Position in z -Richtung (dimensionslos)	
α	Winkel	°
β	Parameter	–
γ	Wichte	N/m ³
ϵ	relative Abweichung	–
κ	Karman-Konstante	–
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Standardabweichung	
σ_O	Oberflächenspannung	N/m
τ_0	Wandschubspannung	kN/m ²
Δ	Differenz / absolute Abweichung	