



## **Förderprogramm Ressourceneffiziente**

### **Abwasserbeseitigung NRW**

Förderbereich 6: Forschungs- und Entwicklungsprojekt zur  
Abwasserbeseitigung (ResA-6)

## **Abschlussbericht**

**Ableitung von extremen Niederschlagsereignissen im  
urbanen Raum:**

**Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen**

Gefördert durch:

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,  
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz  
des Landes Nordrhein-Westfalen**



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

**LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau**  
Bergische Universität Wuppertal  
[www.hydro.uni-wuppertal.de](http://www.hydro.uni-wuppertal.de)

## Projektbearbeitung

Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau  
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
Bergische Universität Wuppertal



### Projektleitung:

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

### Bearbeitung:

Svenja Kemper, M.Sc.

Andrea Mayer, M.Sc.

### Projektpartner:

Technische Betriebe Solingen



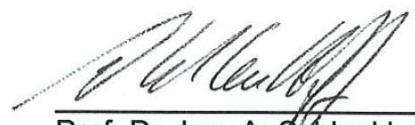
### Kontakt:

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

Bergische Universität Wuppertal  
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen  
Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen  
LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau

Pauluskirchstraße 7  
42285 Wuppertal  
Fon: +49 (202) 439 – 4234  
Fax: +49 (202) 439 – 4196  
E-Mailadresse: schlenkhoff@uni-wuppertal.de

Wuppertal, im August 2016



Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

## I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis .....	I
II.	Abbildungsverzeichnis .....	II
III.	Tabellenverzeichnis .....	VI
IV.	Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole.....	VII
1	Einleitung.....	1
2	Zielsetzung .....	4
3	Physikalische Modellversuche – handelsübliche Aufsätze .....	5
3.1	Physikalisches Modell .....	5
3.1.1	Versuchsprogramm .....	7
3.2	Ergebnisse.....	11
3.2.1	Abflussbedingungen auf der Straße .....	11
3.2.2	Effizienz der Straßenabläufe .....	13
4	Steigerung der (typspezifischen) Effizienz .....	31
5	Feldversuche .....	38
6	Numerische Modellversuche.....	42
7	Bewertung der Ergebnisse und Ausblick.....	46
8	Literaturverzeichnis.....	48
	Anhang.....	50

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Straßenlängs- und querschnitt .....	2
Abbildung 2: Straßenabläufe (verändert nach FGSV (2005)) .....	3
Abbildung 3: Aufsatztypen nach FGSV (2005), Angaben in mm.....	3
Abbildung 4: Physikalisches Modell im Wasserbaulabor der Uni Wuppertal .....	6
Abbildung 5: Messtechnik (links: Radarmessgerät, oben rechts: Ultraschallsonde, unten rechts: Plattform-Wägezelle mit Becken) .....	7
Abbildung 6: Physikalisches Modell - Standardaufsatz.....	8
Abbildung 7: Abflussquerschnitt Bordrinne .....	11
Abbildung 8: Wassertiefen Labor.....	12
Abbildung 9: Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen $S_L = 5,0 \%$ , $S_T = 2,5 \%$ , $Q = 9 \text{ l/s}$ (physikalische Modellversuche).....	13
Abbildung 10: Effizienz $E$ in Abhängigkeit von $Q$ (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche).....	14
Abbildung 11: Effizienz $E$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche).....	14
Abbildung 12: $E_S$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche).....	15
Abbildung 13: $E_O$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche).....	15
Abbildung 14: Effizienz $E$ in Abhängigkeit von $Q$ (Pultaufsatz Multitop, physikalische Modellversuche).....	16
Abbildung 15: $E$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche) .....	17
Abbildung 16: $E_S$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche).....	17
Abbildung 17: $E_O$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche).....	18
Abbildung 18: $E$ in Abhängigkeit von $Q$ (Budatop, physikalische Modellversuche) .....	18
Abbildung 19: $E$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche) .....	19

Abbildung 20: $E_s$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche).....	19
Abbildung 21: $E_o$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche).....	20
Abbildung 22: $E$ in Abhängigkeit von $Q$ (Norguss GD, physikalische Modellversuche) .....	20
Abbildung 23: $E$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche).....	21
Abbildung 24: $E_s$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche).....	21
Abbildung 25: $E_o$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche).....	22
Abbildung 26: $E$ in Abhängigkeit von $Q$ (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche).....	22
Abbildung 27: $E$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche).....	23
Abbildung 28: $E_s$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche).....	23
Abbildung 29: $E_o$ in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche).....	24
Abbildung 30: Skizze Seitenansicht Bergeinlauf .....	24
Abbildung 31: Physikalisches Modell - Vergleich der Aufsätze ( $S_L = 7,5 \%$ , $Q = 15 \text{ l/s}$ ) .....	25
Abbildung 32: Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche $S_L = 2,5 \%$ ) .....	26
Abbildung 33: Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 5,0 \%$ ) .....	27
Abbildung 34: Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5 \%$ ) .....	27
Abbildung 35: Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 10,0 \%$ ) .....	27
Abbildung 36: Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 2,5 \%$ ) .....	28
Abbildung 37: Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 5,0 \%$ ).....	29

Abbildung 38: Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5\%$ ).....	29
Abbildung 39: Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche, $S_L = 10,0\%$ ).....	29
Abbildung 40: Akkumulation des Regenabflusses auf der Straße.....	30
Abbildung 41: Entwicklung des Aufsatzes MEIDRAIN® (Fließrichtung: rechts oben nach links unten, Quelle: MeierGuss (2015)) .....	32
Abbildung 42: Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche, $S_L = 2,5\%$ ) .....	32
Abbildung 43: Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche, $S_L = 5,0\%$ ) .....	33
Abbildung 44: Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5\%$ ) .....	33
Abbildung 45: Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche, $S_L = 10,0\%$ ).....	33
Abbildung 46: Standardaufsatz nach DIN 19583 (physikalisches Modell, $S_L = 100\%$ , $Q = 12$ l/s) .....	34
Abbildung 47: MEIDRAIN® (physikalisches Modell, $S_L = 100\%$ , $Q = 12$ l/s) .....	34
Abbildung 48: Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5\%$ , Effizienz $E$ , Fließrichtung von links nach rechts) .....	35
Abbildung 49: Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5\%$ , $E_S$ ) .....	36
Abbildung 50: Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche, $S_L = 7,5\%$ , $E_O$ ) .....	36
Abbildung 51: Variantenbetrachtung, $S_L = 7,5\%$ , $Q = 9$ l/s (physikalisches Modell) .....	37
Abbildung 52: Versuchsaufbau Feldversuche, Aufsatz nach DIN 19583 500 x 500 .....	38
Abbildung 53: Messeinrichtung im Zulauf (Feldversuche).....	39
Abbildung 54: Volumenmessung (Feldversuche).....	40
Abbildung 55: DIN 19583, $Q = 9$ l/s (links: Labor ( $S_L = 5\%$ ), rechts: Feld ( $S_L = 6\%$ )) .....	40
Abbildung 56: Variantenbetrachtung zur Steigerung der Effizienz im Feld.....	41
Abbildung 57: Aufsätze als STL-Datei (links: Aufsatz nach DIN 19583, rechts: ACO Multitop) .....	42
Abbildung 58: Numerisches Modell .....	43

---

Abbildung 59: Labor vs. Numerik (links: Wassertiefen, rechts: Fließgeschwindigkeiten).....	44
Abbildung 60: Am Aufsatz vorbeifließende Wassermenge (Labor vs. Numerik) .....	44
Abbildung 61: Numerisches Modell Straßenablauf-Aufsatz Multitop (Seitenansicht) .....	45
Abbildung 62: Verlegung von Straßenablauf-Aufsätzen durch Schmutz oder Laub (links) und gefüllter Schlammeimer (rechts).....	47

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zufluss je Straßenablauf nach FGSV (2005) / KOSTRA-DWD 2000 (2000).....	8
Tabelle 2: Untersuchte Pultaufsätze, Fließrichtung von links nach rechts.....	9
Tabelle 3: Effizienz $E$ : Feldversuche vs. Laborversuche (Aufsatz nach DIN 19583) .....	40
Tabelle 4: Effizienz $E$ : Feldversuche vs. Laborversuche (mit Makrorauheit 4) .....	41



## IV. Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
1D	Eindimensional	
2D	Zweidimensional	
$A$	Durchflossene Fläche	$m^2$
$B_R$	Breite der Modellrinne	m
$B_S$	Breite des Straßenablauf-Aufsatzes	mm
BEGU	Beton-Guss	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
$D$	Dauerstufe	min
$dx$	Zellgröße in x-Richtung	mm
$dy$	Zellgröße in y-Richtung	mm
$dz$	Zellgröße in z-Richtung	mm
$E$	Effizienz	[-]
$E^*$	Typspezifische Effizienz	[-]
$E_0$	Verhältnis von über den Aufsatz hinwegfließendem Wasser zum Gesamtzufluss	[-]
$E_S$	Verhältnis von am Aufsatz vorbeifließendem Wasser zum Gesamtzufluss	[-]
$H_R$	Höhe der Modellrinne	m
$h$	Wassertiefe	m
$k$	Oberflächenrauheit	mm
$k_{st}$	Strickler-Beiwert	$m^{1/3}/s$
$L_R$	Länge der Modellrinne	m
$L_S$	Länge des Straßenablauf-Aufsatzes	mm
MB	Mesh Block	

---

$Q$	Durchfluss	l/s
$Q_I$	Vom Aufsatz aufgenommenes Wasservolumen pro Zeit	l/s
$Q_O$	Über den Aufsatz fließendes Wasservolumen pro Zeit	l/s
$Q_S$	Am Aufsatz vorbeifließendes Wasservolumen pro Zeit	l/s
$Q_{Zu}$	Frontaler Zufluss (zum Aufsatz)	l/s
$S_L$	Längsneigung	[-]
$S_T$	Querneigung	[-]
$T$	Wiederkehrzeit	a
$v$	Fließgeschwindigkeit	m/s
$v_m$	Mittlere Fließgeschwindigkeit	m/s
$W$	Abflussbreite auf der Straße	m

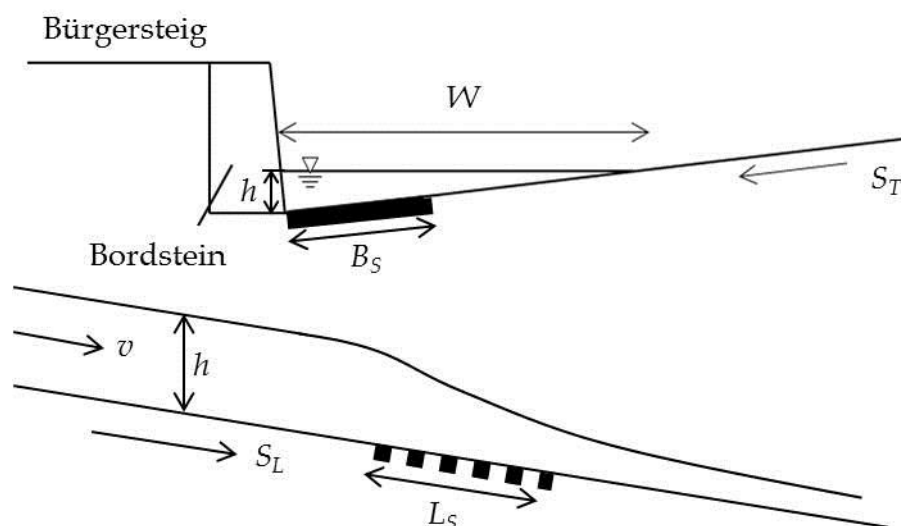
# 1 Einleitung

Nach dem aktuellen Synthesebericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung IPCC werden Starkniederschläge zukünftig in ihrer Intensität und Anzahl aufgrund des Klimawandels zunehmen (IPCC 2014). Daraus ergibt sich ein akuter Handlungsbedarf im Umgang mit extremen Niederschlagsereignissen und daraus resultierenden Sturzfluten im urbanen Raum, wie vergangene Ereignisse, z.B. am 26. Juli 2008 in Dortmund (ca. 200 mm in 4 Stunden (Schlenkhoff & Oertel (2009)) oder am 28. Juli 2014 in Münster (ca. 300 mm in 7 Stunden, LANUV (2014)) bereits deutlich gezeigt haben. Als Sturzfluten werden Überschwemmungen bezeichnet, die aus Starkregenereignissen resultieren und im Gegensatz zu Flussüberschwemmungen, die meist in Gewässernähe auftreten, überall auftreten können (Kron 2009).

Die klassische Stadtentwässerung in Deutschland erfolgt üblicherweise über eine unterirdisch verlaufende Kanalisation, in die der Regenabfluss über Straßenabläufe einfließen kann. Nach DIN EN 752 (2008) und DWA-A 118 (2006) werden die Entwässerungssysteme für Regenereignisse mit Wiederkehrzeiten von  $T = 1a$  bis  $T = 10 a$  dimensioniert. In Zukunft müssen Stadtentwässerungssysteme in der Lage sein, den Regenabfluss auch im Überschreitungsfall nicht nur unterirdisch aufzunehmen, sondern auch gezielt an der Oberfläche zu sammeln und einem Vorfluter zuzuführen. Im gemeinsamen „Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge“ von DWA und BWK wird empfohlen, „auf kommunaler Ebene ein ganzheitlich ausgerichtetes „Risikomanagement Sturzfluten“ zu erarbeiten“ (BWK 2013). Mithilfe sogenannter bidirektional gekoppelter Modelle kann die Interaktion zwischen dem Abfluss im Kanal (1D-Modell) und dem Oberflächenabfluss (2D-Modell) abgebildet werden und dient somit als Planungselement für neue Entwässerungsstrukturen. Nach dem Merkblatt DWA-M 119 (DWA 2015) ist es sinnvoll, zunächst mit einer Grobanalyse durch zum Beispiel GIS-gestützte Verfahren Überflutungsschwerpunkte zu identifizieren und nur für diese dann eine 1D-/2D gekoppelten Modellierung durchzuführen. Verbindungselement zwischen Oberfläche und Kanalisation sind dabei die Straßenabläufe und Schachtdeckel. An diesen Kopplungspunkten kann das Wasser von der Oberfläche in die Kanalisation gelangen oder auch aus überlasteten Kanälen wieder an die Oberfläche austreten. Nach DWA (2013) müssen die hydraulischen Kenndaten der Öffnungen bekannt sein, um die Austauschvorgänge realitätsnah beschreiben zu können.

Über die Leistungsfähigkeit bzw. Effizienz von Straßenabläufen liegt im deutschsprachigen Raum praktisch nur eine einzige Veröffentlichung vor (Thiele, 1983), die auch Grundlage für die spätere Richtlinie RAS-Ew (Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung) (FGSV, 2005) wurde. Dabei lag der Schwerpunkt der Arbeit auf der Leistungsfähigkeit der Straßenrinne als hydraulisches Bauwerk und nicht explizit auf der Leistungsfähigkeit der Straßenabläufe.

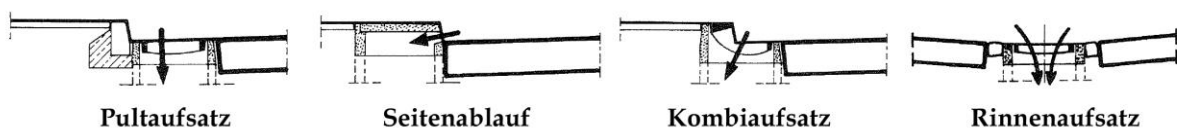
Auch international gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die die hydraulischen Verhältnisse des Einströmens sowie die Leistungsfähigkeit der Abläufe beschreiben. In Colorado, USA wurde zum Beispiel die Leistungsfähigkeit von vor Ort vorhandenen Ablauftypen im Labor untersucht und mit den lokal gültigen Bemessungsregeln (HEC 22 - Hydraulic Engineering Circular No. 22 – Urban Drainage Design Manual) verglichen, woraus sich Unsicherheiten in den Gleichungen der Bemessungsrichtlinie ergaben. Die Autoren entwickelten Gleichungen zur Bestimmung der Effizienz der Straßenabläufe in Abhängigkeit der untersuchten Geometrien (Comport & Thornton, 2012; Guo, 2000). Ähnliche Untersuchungen wurden an der Technical University of Catalonia, Spanien durchgeführt (Gomez & Russo, 2006). In den genannten internationalen Untersuchungen überschreiten die untersuchten Wassermengen deutlich die im Rahmen des Projekts relevanten Abflüsse. Die aktuelle Bemessungsrichtlinie für die Dimensionierung der Straßenentwässerung bildet die Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung (RAS-Ew) (FGSV, 2005). Die Straßenabläufe, auch als Straßeneinläufe bezeichnet, nehmen das über Straßenrinnen oder -mulden zufließende Oberflächenwasser auf und leiten es über Anschluss- oder Sammelleitungen weiter. Nach FGSV (2005) sollen genormte Fertigteile, bestehend aus Aufsatz und Unterteil, verwendet werden. Für die Ermittlung des Abstandes der Straßenabläufe wird bei Stadtstraßen eine angeschlossene Fläche von  $400 \text{ m}^2$  angesetzt (FGSV, 2005). Die Leistungsfähigkeit der Straßenabläufe hängt neben der Einlaufgeometrie von der Längs ( $S_L$ ) - und Querneigung ( $S_T$ ) der Straße sowie dem Regenabfluss auf der Straße  $Q$  ab. In Abhängigkeit davon ergeben sich die Wasserspiegelbreite  $W$ , die Wassertiefe  $h$  und die Fließgeschwindigkeit  $v$  (vgl. Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Straßenlängs- und querschnitt

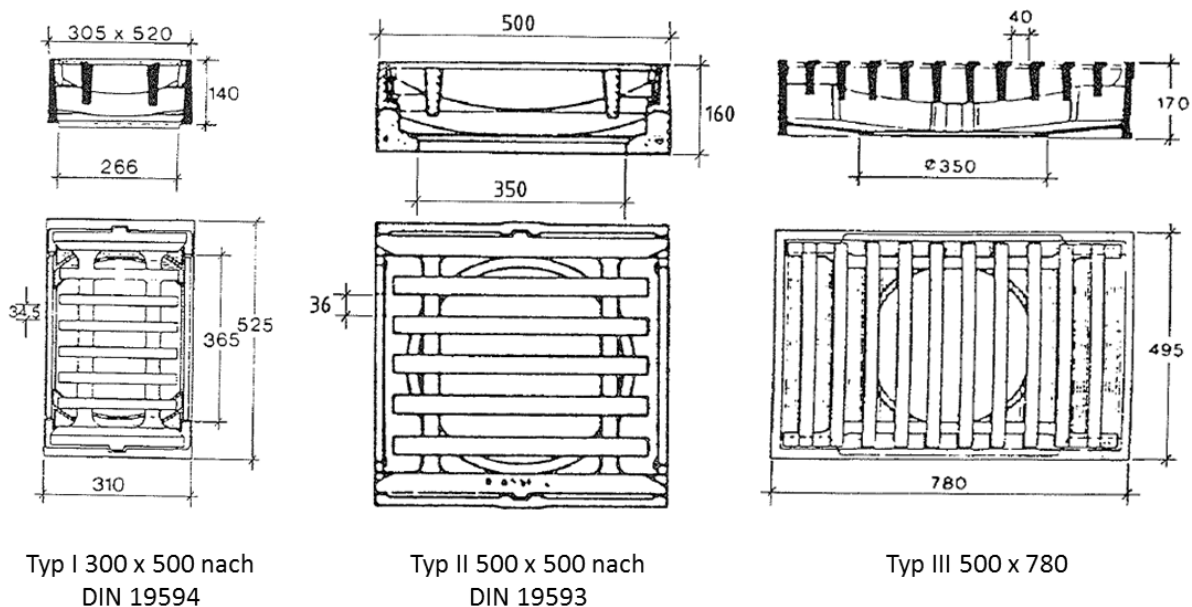
Eingangsparameter für die Bemessungstabellen der RAS-Ew (FGSV 2005) sind neben der gewählten Einlaufgeometrie die Längs- und Querneigung der Straße sowie eine maximal

zulässige Wasserspiegelbreite. Das Tabellenwerk liefert den möglichen Zufluss, damit die Wasserspiegelbreite nicht überschritten wird, sowie die von den Abläufen aufgenommene Wassermenge. Anhand dieser Werte wird der Längsabstand der Abläufe berechnet. Nach RAS-Ew wird angenommen, dass sich nach fünf bis zehn Abläufen gleichförmige Zustände auf der Straße einstellen. Diese Annahme gilt aber nur, wenn die Straßengeometrie unverändert bleibt. Ändert sich z.B. die Längsneigung, gilt diese Annahme nicht mehr. Vier verschiedene Ablaufstrukturen werden nach FGSV (2005) unterschieden: Pult- und Rinnenaufsätze, in die das Wasser von oben hineinfließt, Seitenabläufe, in die die Wasser seitlich einfließt und Kombi- aufsätze, in die das Wasser von oben und seitlich fließt (Abbildung 2).



**Abbildung 2:** Straßenabläufe (verändert nach FGSV (2005))

Die am häufigsten eingesetzten Ablaufstrukturen sind die Pultaufsätze. In den Bemessungstabellen der RAS-Ew sind dafür drei verschiedene Aufsätze hinterlegt (Abbildung 3). Im Rahmen des Projekts werden Pultaufsätze mit den Abmessungen  $B_S \times L_S = 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  sowie  $500 \text{ mm} \times 780 \text{ mm}$  untersucht.



**Abbildung 3:** Aufsatztypen nach FGSV (2005), Angaben in mm

## 2 Zielsetzung

Aus Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass nicht nur bei Starkniederschlägen sondern auch bei ungünstigen Kombinationen von intensiven Niederschlägen und Abflusseinschränkungen oder räumlichen Besonderheiten erhebliche Wassermengen über die Straße ablaufen, obwohl das Kanalnetz lokal keinesfalls voll ausgelastet bzw. überlastet ist. Weiterhin wurde beobachtet, dass Wasser insbesondere bei steilen Straßen **über** die Straßenabläufe oder an diesen **vorbei** läuft und nicht unmittelbar in das Kanalnetz gelangt (mündliche Auskunft der Technischen Betriebe Solingen).

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die aufgeworfenen Fragen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit von in Deutschland eingesetzten Straßenablauf-Aufsätzen in einem Untersuchungsprogramm systematisch abzuarbeiten und den Status Quo zu dokumentieren. Mithilfe der gewonnenen Ergebnisse können die in Kapitel 1 genannten bidirektional gekoppelten Modelle realistischer gestaltet werden und führen damit zu einem verbesserten Planungselement für dringend notwendige Überflutungsvorsorgemaßnahmen für Starkregenereignisse in Stadtgebieten. Auf Grundlage der Ergebnisse kann ermittelt werden, wieviel Wasser an der Oberfläche verbleibt, so dass geeignete Maßnahmen zum Überflutungsschutz von Gebäuden und Infrastrukturen umgesetzt werden können.

Solange die unterirdischen Entwässerungssysteme noch nicht vollständig gefüllt sind, können leistungsfähige Straßenabläufe zu einer Reduzierung des auf der Oberfläche abfließenden Wassers führen. Ziel der Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens ist es weiterhin, Strukturen zu finden, die das Schluckvermögen erhöhen und kostengünstig in der Praxis eingesetzt werden können.

In physikalischen Modellversuchen werden für definierte Randbedingungen wie Längs- und Querneigung der Straße sowie Zufluss mithilfe geeigneter Messtechnik die Leistungsfähigkeiten verschiedener Aufsätze bestimmt und dokumentiert. Zahlreiche Hersteller von Straßenablauf-Aufsätzen im deutschsprachigen Raum wurden hierzu angefragt, ihre Produkte zur Verfügung zu stellen und bei der Entwicklung neuer Strukturen mitzuarbeiten.

Feldversuche im Stadtgebiet von Solingen unter Mitarbeit der Technischen Betriebe Solingen (TBS) zeigen das Abflussverhalten von Straßenablauf-Aufsätzen unter realen Bedingungen und dienen als Validierung der Laborversuche.

Orientierende numerische dreidimensionale Simulationen sollen außerdem die Anwendbarkeit von CFD Software zur detaillierten Untersuchung der Strömungsverhältnisse am Straßenablauf aufzeigen. Mithilfe numerischer Modellversuche können zeit- und kostengünstig zusätzliche Untersuchungen mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt werden.

### 3 Physikalische Modellversuche – handelsübliche Aufsätze

#### 3.1 *Physikalisches Modell*

Im Wasserbaulabor der Bergischen Universität Wuppertal wurden zur Untersuchung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen physikalische Modellversuche durchgeführt. Das Modell besteht aus einer rechteckigen Rinne aus Acrylglas mit den Abmessungen  $B_R \times L_R \times H_R = 1,50 \text{ m} \times 10,00 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$  (Abbildung 4). In eine Aussparung am linken Rand des Rinnenbodens können im Maßstab 1:1 handelsübliche Aufsätze mit Abmessungen bis zu  $B_S \times L_S = 500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$  eingebaut werden. Die Längsneigung  $S_L$  sowie die Querneigung  $S_T$  können variabel eingestellt werden. Die Oberfläche des Rinnenbodens ist mit Dachpappe beklebt, wodurch die Straßenoberfläche mit einer Rauheit von etwa  $k \approx 1,5 \text{ mm}$  nachgebildet wird. Mit zwei Pumpen können bis zu  $Q = 50 \text{ l/s}$  aus einem Tiefbecken durch Rohrleitungen in ein an die Rinne angeschlossenes Hochbecken gepumpt werden, von wo aus das Wasser auf die Rinne gelangt. Das gesamte aus dem Modell abfließende Wasser fließt über einen Leitkanal wieder in das Tiefbecken. Die Zuflussregulierung erfolgt stufenlos mithilfe von zwei Drosseln und einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät.

Oberhalb des Straßenablaufs werden die Wassertiefen mit drei Ultraschallsensoren aufgezeichnet (Abbildung 5, rechts oben). Gemessen wird in Längsrichtung an drei Punkten: 0,1 m, 0,9 m und 1,7 m oberhalb der Aufsatzes. Der Abstand der Ultraschallsensoren zum Modellrand beträgt 0,25 m. Mit Hilfe eines Radarmessgerätes werden die Oberflächengeschwindigkeiten im Oberwasser des Einlaufs gemessen (Abbildung 5, links). Die Geschwindigkeiten werden 1,0 m oberhalb des Aufsatzes gemessen. An dieser Stelle liegen bereits gleichförmige Abflussbedingungen vor. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt über die gesamte Rinnenbreite mit Messpunkten alle 6 cm. Über eine kontinuierliche Gewichtsmessung mit Plattform-Wägezellen werden jeweils drei Volumenströme messtechnisch erfasst: (1) das vom Straßenablauf aufgenommene Wasser  $Q_I$ , (2) das am Aufsatz vorbeifließende Wasser  $Q_S$  und (3) das über den Aufsatz hinwegfließende Wasser  $Q_O$  (Abbildung 4). Es gilt:

$$Q = Q_I + Q_S + Q_O \quad (1)$$

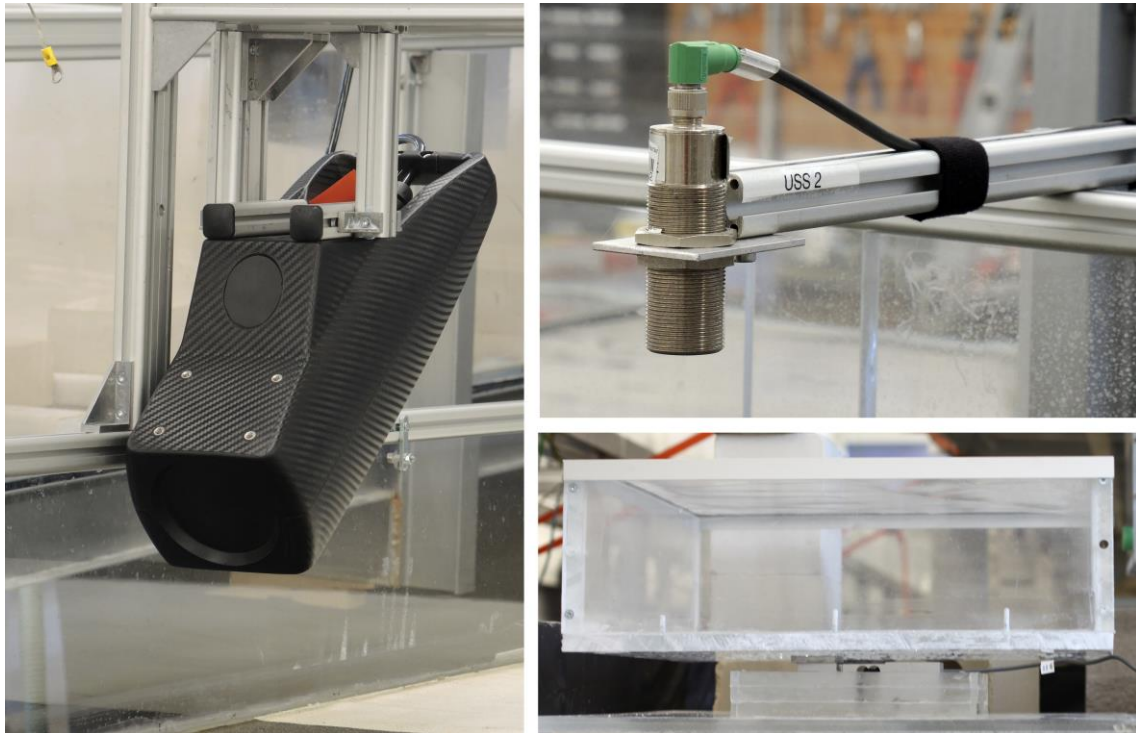
In drei Becken (Abbildung 5, rechts unten) wird jeweils über eine Messdauer von 30 Sekunden das ablaufende Wasser aufgefangen und die Gewichtszunahme über die Zeit aufgezeichnet, woraus der jeweilige Abfluss bestimmt werden kann.

In allen Versuchsläufen liegt schießender Abfluss vor, so dass vom unteren Modellrand her keine Randeinflüsse vorhanden sind. Nach einer Zulaufstrecke von etwa 6 m stellen sich auf der Rinne gleichförmige Abflussbedingungen ein, so dass im Bereich des Straßenablaufs nach 8,5 m Zulaufstrecke kein Einfluss durch den oberen Modellrand besteht.



**Abbildung 4:** Physikalisches Modell im Wasserbaulabor der Uni Wuppertal





**Abbildung 5:** Messtechnik (links: Radarmessgerät, oben rechts: Ultraschallsonde, unten rechts: Plattform-Wägezelle mit Becken)

### 3.1.1 Versuchsprogramm

Die Querneigung der Rinne wird auf  $S_T = 2,5 \%$  festgesetzt, was einer typischen Straßenquerneigung entspricht. Vier verschiedene Längsneigungen  $S_L$  werden untersucht: 2,5 %, 5,0 %, 7,5 % und 10,0 %.

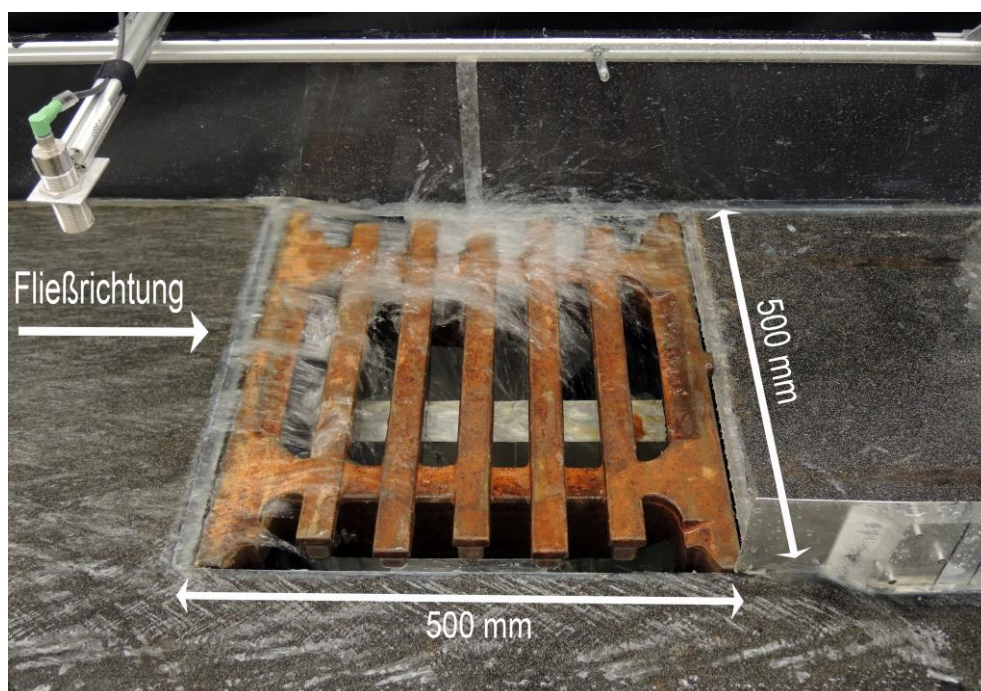
Bei einer angeschlossenen Fläche von 400 m<sup>2</sup> je Straßenablauf, die nach FGSV 2005 empfohlen wird, ergeben sich auf der Grundlage von Niederschlagsspenden beispielhaft für drei Städte in Nordrhein-Westfalen nach KOSTRA-DWD 2000 (2000) die in Tabelle 1 aufgeführten Zuflüsse zu einem Straßenablauf (ohne Abflussbeiwert, Zeitspanne Januar bis Dezember). Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass das von oberhalb liegenden Straßenabläufen nicht aufgenommene Oberflächenwasser zusätzlich den unterhalb liegenden Abläufen zufließt (siehe Abbildung 40).

Um auch extreme Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten bis zu  $T = 100$  a zu berücksichtigen, werden Zuflüsse in Stufen von  $\Delta Q = 3$  l/s zwischen  $Q = 3$  l/s und  $Q = 21$  l/s untersucht.

Fünf handelsübliche Pultaufsätze werden untersucht (Abbildung 6, Tabelle 2). Vier Aufsätze mit den Abmessungen  $B_S \times L_S = 500$  mm x 500 mm und ein sogenannter Bergeinlauf mit den Abmessungen  $B_S \times L_S = 500$  mm x 780 mm. Es werden Aufsätze der Festigkeitsklasse D400 mit Einsatzbereichen mit vorwiegender Beanspruchung durch Straßenverkehr sowie ein Aufsatz der Festigkeitsklasse C250 untersucht. In Tabelle 2 sind die geometrischen Eigenschaften der untersuchten Pultaufsätze gegeben.

**Tabelle 1:** Zufluss je Straßenablauf nach FGSV (2005) / KOSTRA-DWD 2000 (2000)

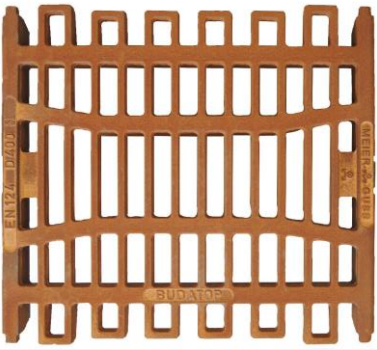


<b>T [a]</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>5,0</b>	<b>10,0</b>	<b>20,0</b>	<b>50,0</b>	<b>100,0</b>
<b>D [min]</b>	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]	Q [l/s]
	<b>Wuppertal</b>							
<b>5</b>	4,30	6,80	9,29	12,59	15,08	17,58	20,88	23,37
<b>10</b>	3,84	5,46	7,07	9,21	10,82	12,44	14,58	16,20
<b>15</b>	3,30	4,56	5,81	7,47	8,72	9,98	11,64	12,89
	<b>Düsseldorf</b>							
<b>5</b>	3,60	6,22	8,83	12,29	14,90	17,52	20,98	23,59
<b>10</b>	3,44	5,12	6,78	8,99	10,66	12,34	14,55	16,22
<b>15</b>	3,04	4,33	5,62	7,32	8,61	9,90	11,60	12,89
	<b>Münster</b>							
<b>5</b>	4,21	6,54	8,86	11,94	14,26	16,58	19,66	21,98
<b>10</b>	3,72	5,21	6,70	8,68	10,18	11,67	13,65	15,14
<b>15</b>	3,18	4,33	5,49	7,01	8,168	9,32	10,85	12,00

**Abbildung 6:** Physikalisches Modell - Standardaufsatz

**Tabelle 2:** Untersuchte Pultaufsätze, Fließrichtung von links nach rechts

<b>Aufsätze 500 x 500 D 400</b>	Einlauf- querschnitt [cm <sup>2</sup> ]	Schlitz- weite [mm]	Gewicht inkl. Rahmen [kg]	Preis/Stk. [€] (inkl. Rahmen)*
<b>Standradeinlauf nach DIN 19583</b> Rahmen: BEGU/Gusseisen 	980	36	106	200 - 270
<b>ACO MULTITOP (Pultform)</b> Rahmen: BEGU 	1.040	24	75,6	ca. 270

\* Nach Angaben der Hersteller im jeweiligen Produktkatalog (Stand: August 2016)

<p><b>MeierGuss BUDATOP (Pultform)</b> Rahmen: Gusseisen</p> 	1.160	25	62	ca. 160
<p><b>EJ NORGUSS GD5050 (Pultform)</b> Rahmen: Gusseisen</p> 	970	26	58/71	ca. 200
<p><b>Aufsätze 500 x 780 C 250</b></p>				
<p><b>Bergeinlauf (Pultform)</b> Rahmen: Gusseisen</p> 	1.567	34,5	109	360 - 400

## 3.2 Ergebnisse

### 3.2.1 Abflussbedingungen auf der Straße

Der Regenabfluss auf der Straße wird von Straßenrinnen, die entlang oder zwischen Verkehrsflächen angelegt sind, aufgenommen und zu den Straßenabläufen weitergeleitet. Nach FGSV (2005) wird zwischen Bordrinnen, Pendelrinnen, Spitzrinnen, Muldenrinnen, Kastenrinnen und Schlitzrinnen unterschieden. Die Straßenrinne im physikalischen Modell ist als Bordrinne ausgeführt. Bordrinnen werden aus einem Bordstein und einem Streifen der Fahrbahnbefestigung gebildet, welcher zur Fahrbahn gehört und die gleiche Längs- und Querneigung wie die anschließende Verkehrsfläche hat.

Der Abflussquerschnitt des auf der Straße abfließenden Wassers bei Bordrinnen entspricht einem Dreiecksquerschnitt (Abbildung 7).

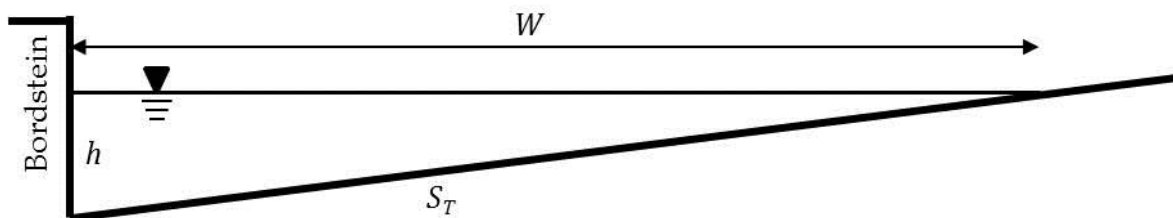


Abbildung 7: Abflussquerschnitt Bordrinne

Zur Beschreibung der Abflussbedingungen auf der Straße wurden Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen oberhalb der Straßenabläufe gemessen. An der Messstelle liegen nahezu stationär gleichförmige Abflussbedingungen vor. Für die Abflussbreite  $W$  auf der Straße gilt:

$$W = \frac{h}{S_T} \quad (2)$$

mit  $S_T$  = Querneigung [-],  $h$  = Wassertiefe am Bordstein [m],  $W$  = Abflussbreite auf der Straße [m]. Mithilfe der angepassten Manning-Strickler Gleichung nach Izzard (1946) (Gleichung 3) sowie der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 4) können in Abhängigkeit der Straßengeometrie und des Zuflusses  $Q$  die hydraulischen Größen Wassertiefe  $h$  und mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m$  berechnet werden.

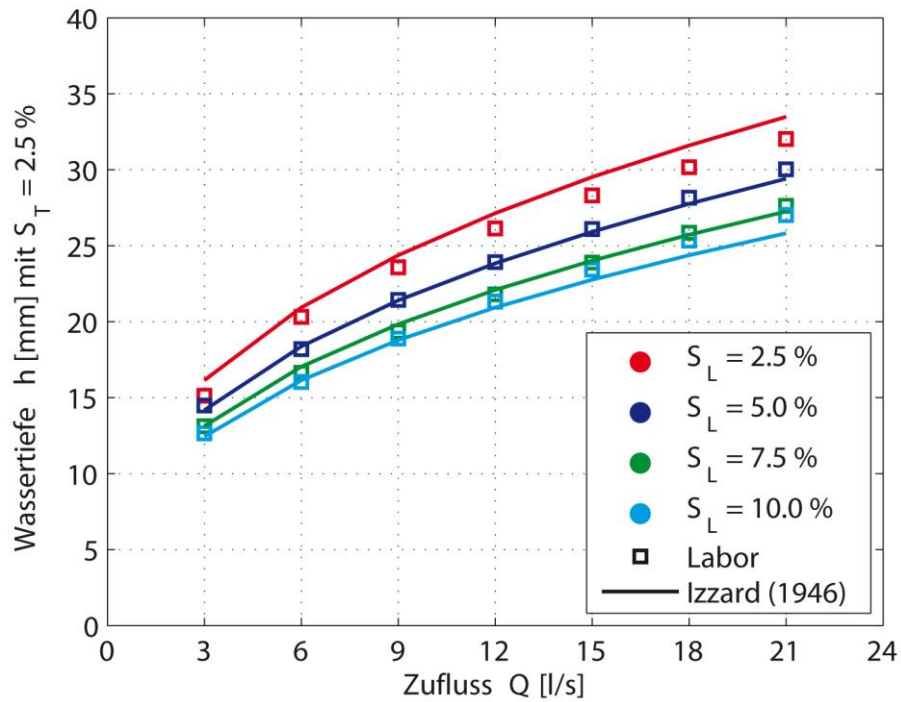
$$Q = 0,375 \cdot k_{st} \cdot S_T^{5/3} \cdot S_L^{1/2} \cdot W^{8/3} \quad (3)$$

mit  $Q$  = Zufluss [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $k_{st}$  = Strickler-Beiwert [ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ ],  $S_L$  = Längsneigung.

$$Q = v_m \cdot A \quad (4)$$

mit  $v_m$  = mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s] und  $A$  = Abflussquerschnitt [ $\text{m}^2$ ].

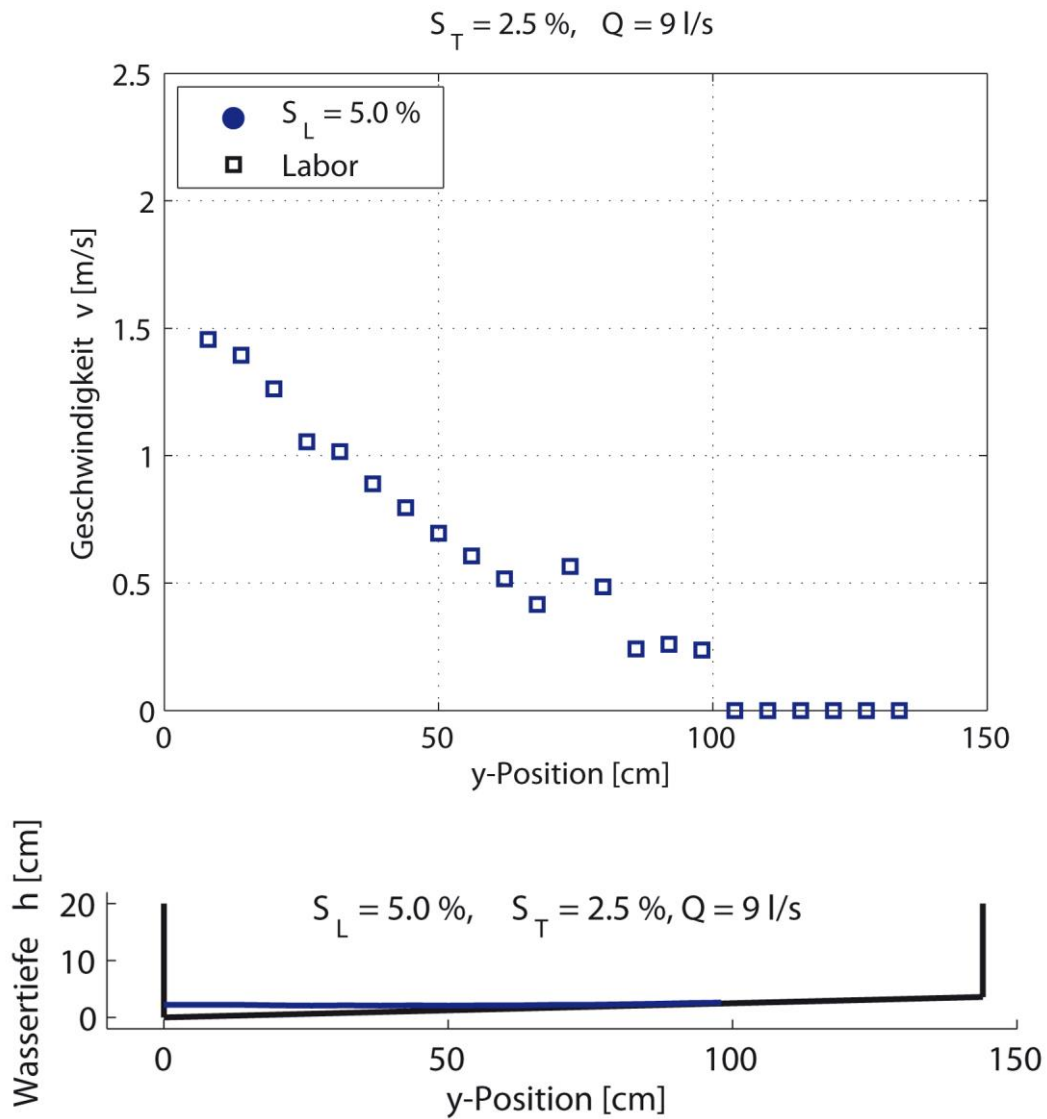
In Abbildung 8 sind die mit Gleichung (2) und (3) berechneten Wassertiefen im Vergleich zu den im Labor gemessenen Wassertiefen dargestellt. Es wurde mit  $k_{st} = 76 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  gerechnet.



**Abbildung 8:** Wassertiefen Labor

Die Wassertiefen am Bordstein liegen zwischen 10 und 35 mm bei Fließgeschwindigkeiten zwischen 1-2 m/s. Die Geschwindigkeit wurde über die gesamte Abflussbreite alle 6 cm zusammen mit der zugehörigen Wassertiefe gemessen. Die Ergebnisse sind für eine Längsneigung von  $S_L = 5\%$  und einen Zufluss von  $Q = 9$  l/s in Abbildung 9 dargestellt.

Es liegen in allen Versuchsläufen schießende Abflusszustände vor.



**Abbildung 9:** Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen  $S_L = 5,0\%$ ,  $S_T = 2,5\%$ ,  $Q = 9\text{ l/s}$  (physikalische Modellversuche)

### 3.2.2 Effizienz der Straßeneinläufe

Die **Leistungsfähigkeit** von Pultaufsätzen wird definiert als die vom Aufsatz aufgenommene Wassermenge  $Q_I$  [l/s].

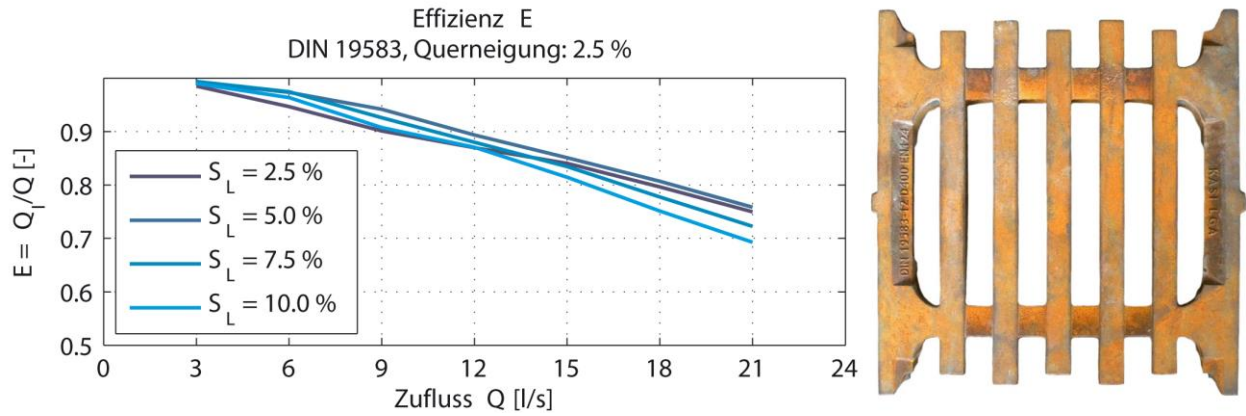
Die **Effizienz** der Pultaufsätze wird definiert als das Verhältnis von aufgenommenem Wasser zu zufließendem Wasser:

$$E = \frac{Q_I}{Q} [-] \tag{5}$$

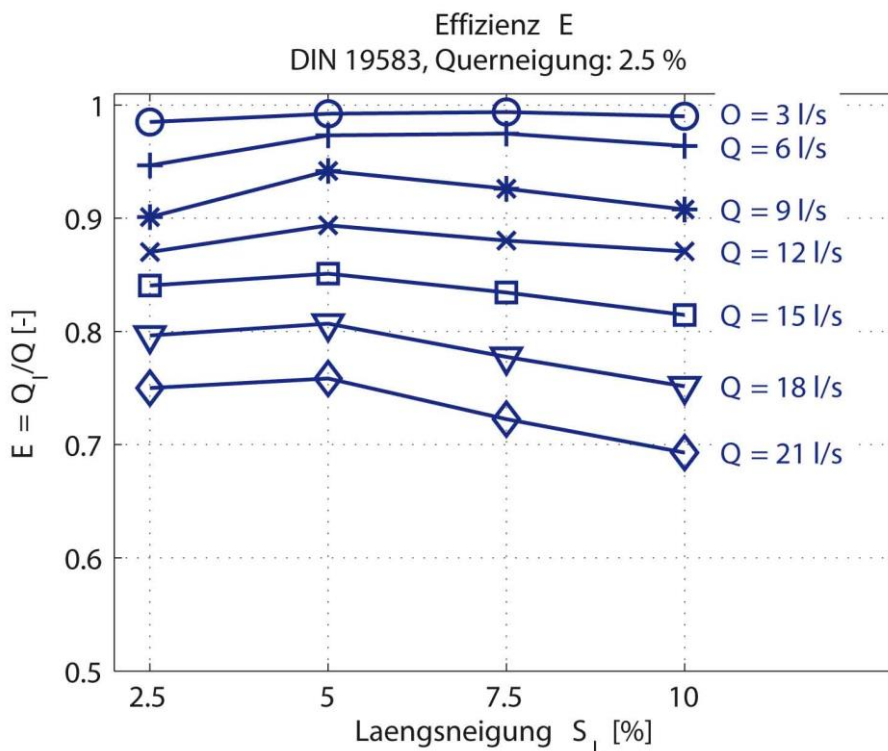
Zur Bestimmung der Effizienz der Aufsätze wurde neben der gesamten zufließenden Wassermenge  $Q$  die vom Aufsatz aufgenommene, die am Aufsatz vorbeifließende sowie die über den Aufsatz hinwegfließende Wassermenge messtechnisch erfasst. Es gilt:

$$Q = Q_I + Q_o + Q_s \tag{6}$$

mit  $Q_i$  = vom Aufsatz aufgenommene Wassermenge,  $Q_o$  = über den Aufsatz hinwegfließende Wassermenge und  $Q_s$  = am Straßenablauf vorbeifließende Wassermenge. In Abbildung 10 bis Abbildung 13 sind die Ergebnisse für den Standardablauf nach DIN 19583 in Abhängigkeit der Längsneigung  $S_L$  und Zufluss  $Q$  dargestellt.

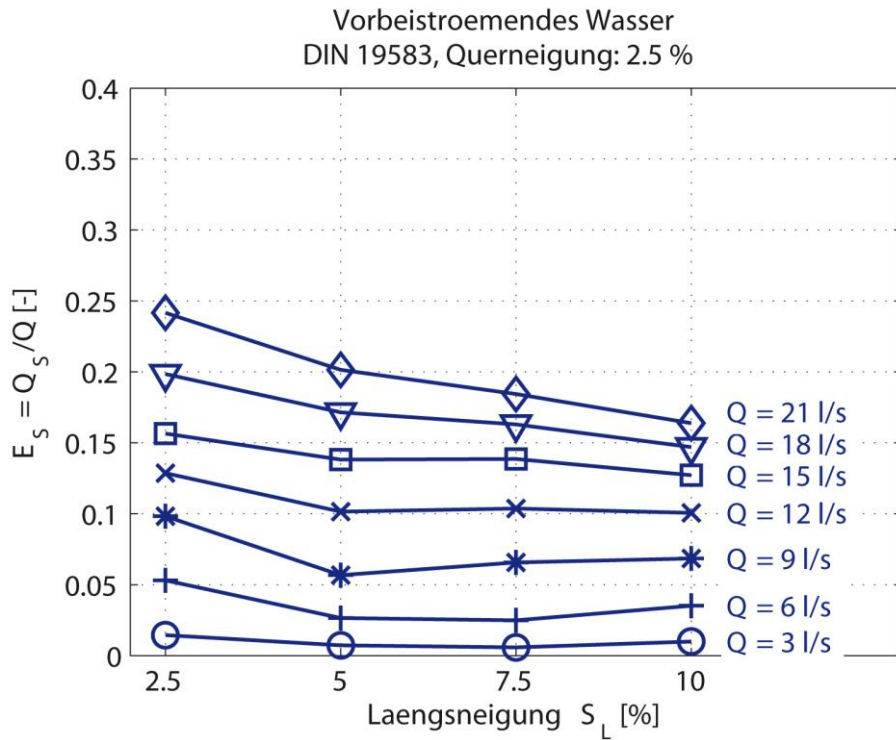


**Abbildung 10:** Effizienz  $E$  in Abhängigkeit von  $Q$  (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche)

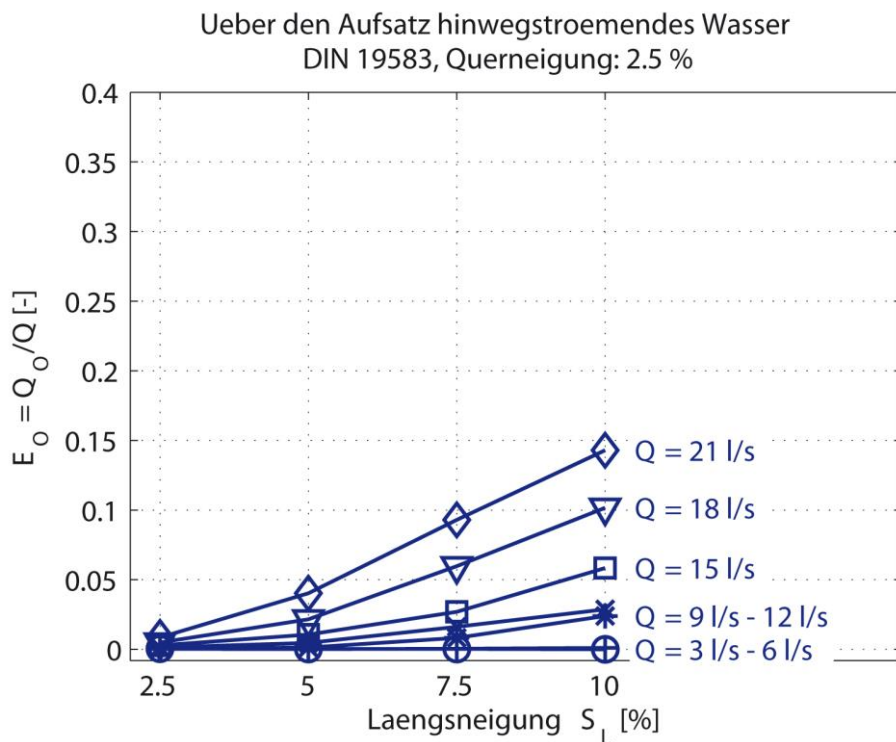


**Abbildung 11:** Effizienz  $E$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche)





**Abbildung 12:**  $E_S$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche)

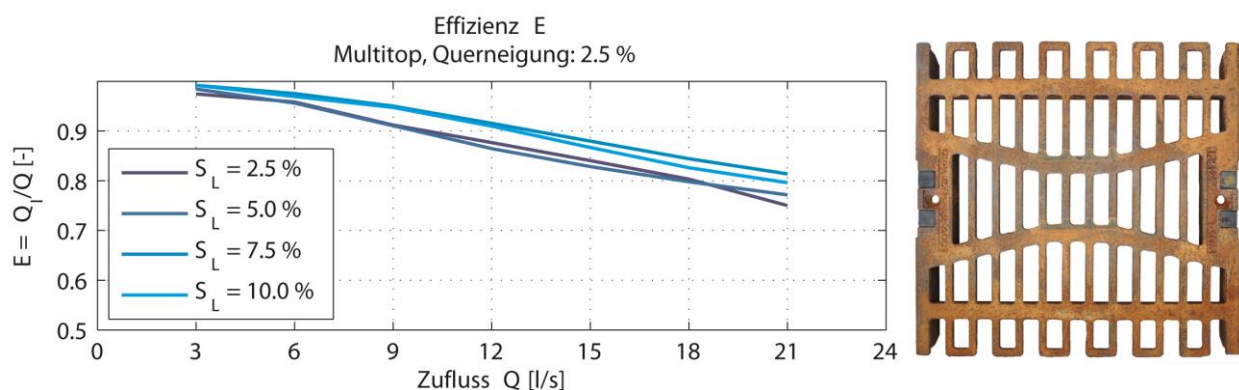


**Abbildung 13:**  $E_0$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Pultaufsatz nach DIN 19583, physikalische Modellversuche)

Mit größer werdendem Längsgefälle nimmt die Geschwindigkeit zu und damit verringert sich bei gleichem Abfluss die Abflussbreite auf der Straße. Dadurch wird der Anteil, der an dem Straßenablauf vorbeifließt, geringer (Abbildung 12, Abbildung 16, Abbildung 20, Abbildung 24, Abbildung 28). Aufgrund der zunehmenden Anströmgeschwindigkeiten nimmt der Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers jedoch zu (Abbildung 13, Abbildung 17, Abbildung 21, Abbildung 25). Diese beiden Effekte heben sich nahezu gegenseitig auf, sodass der Einfluss der Längsneigung in der Gesamtbetrachtung nur sehr gering ist. Bei Zuflüssen  $Q \geq 9$  l/s ist eine leichte Abnahme der Effizienz mit zunehmendem Längsgefälle zu beobachten, da hier der Anteil des über den Aufsatz hinwegströmenden Wassers schneller ansteigt als der Anteil des vorbeifließenden Wassers abnimmt (z.B. Abbildung 10, Abbildung 11). Dies gilt für alle untersuchten Aufsätze. Die Effizienz nimmt mit größer werdendem Zufluss ab und liegt beim Standardaufsatz zwischen  $E \approx 70$  % ( $Q = 21$  l/s) und  $E \approx 99$  % ( $Q = 3$  l/s), für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers gilt  $E_0 < 15$  %.

Der Anteil des am Aufsatz vorbeifließenden Wassers ist nur abhängig von der Breite des Aufsatzes und der Straßengeometrie sowie des Zuflusses, aber unabhängig von der Form des Aufsatzes. Daher ergeben sich für alle untersuchten Aufsätze unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit im Labor sowie eines sehr geringen Anteils, der noch auf der Länge des Aufsatzes in den Straßenablauf abfließt, die gleichen Ergebnisse für das Verhältnis des seitlich vorbeifließenden Wassers zum Gesamtzufluss (Abbildung 12, Abbildung 16, Abbildung 20, Abbildung 24, Abbildung 28). Der Anteil des seitlich am Aufsatz vorbeifließenden Wassers nimmt mit größer werdendem Zufluss zu und liegt bei maximal  $E_S \approx 25 - 30$  % ( $Q = 21$  l/s,  $S_L = 2,5$  %).

In Abbildung 14 bis Abbildung 17 sind die Ergebnisse der Laborversuche für den Aufsatz Multitop in gleicher Weise wie für den Standardaufsatz dargestellt. Der Aufsatz Multitop und ebenso der Aufsatz Budatop (Abbildung 18 bis Abbildung 21) haben im Vergleich zum Standardaufsatz nach DIN 19583 schmale Längs- und auch Querstreben. Die Öffnungsfläche ist insgesamt größer als die des Standardaufsatzes, die Schlitzweite jedoch geringer.



**Abbildung 14:** Effizienz  $E$  in Abhängigkeit von  $Q$  (Pultaufsatz Multitop, physikalische Modellversuche)

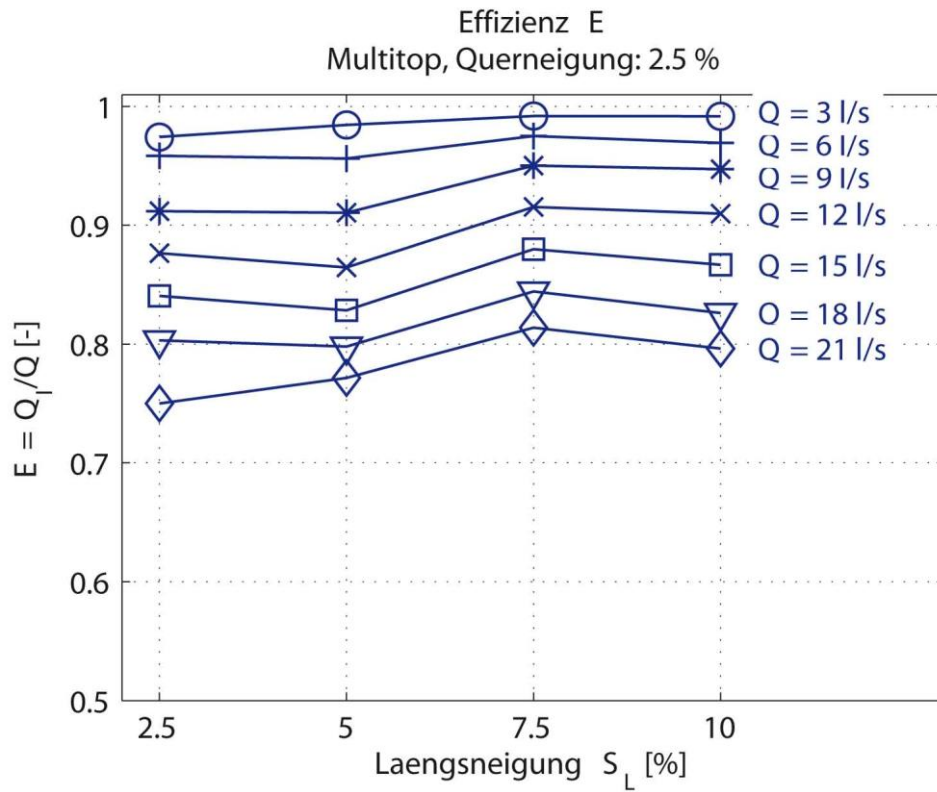


Abbildung 15:  $E$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche)

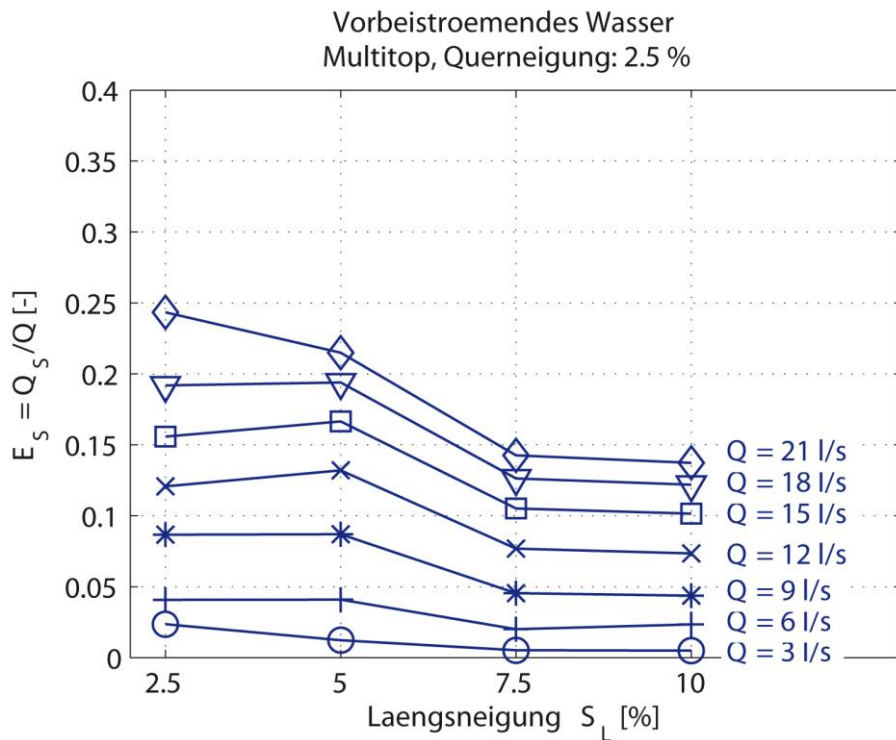
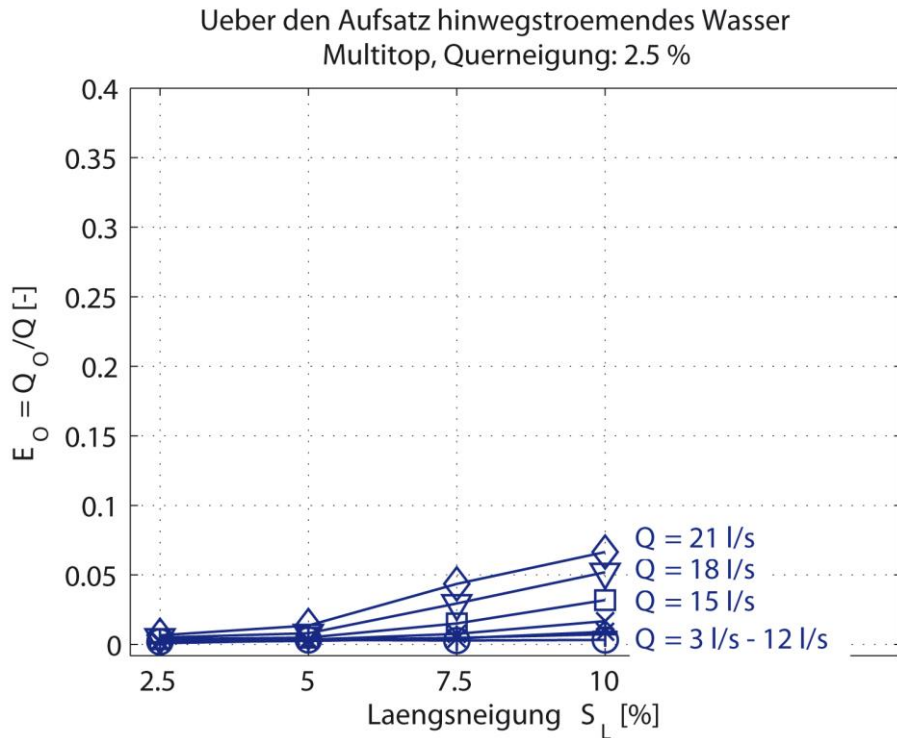


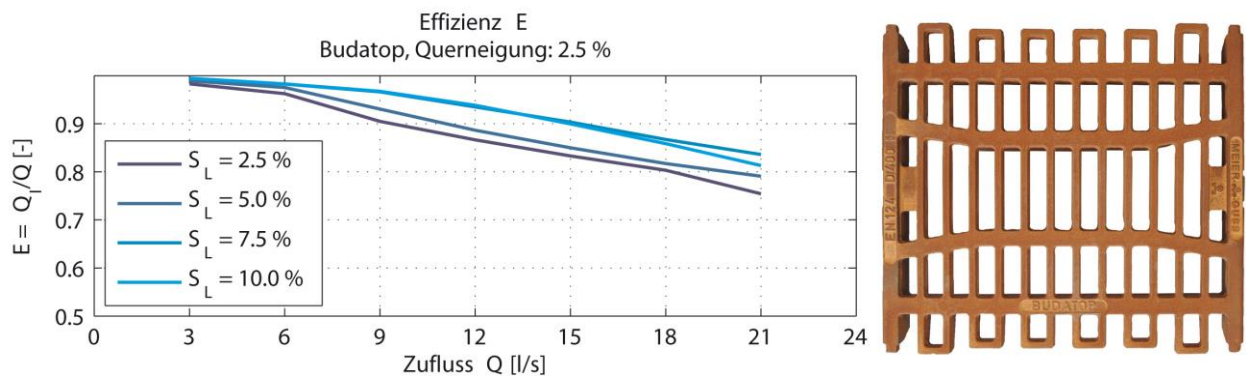
Abbildung 16:  $E_s$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche)



**Abbildung 17:**  $E_o$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Multitop, physikalische Modellversuche)

Die Effizienz liegt beim Aufsatz Multitop zwischen  $E \approx 75\%$  ( $Q = 21$  l/s) und  $E \approx 99\%$  ( $Q = 3$  l/s), für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers gilt  $E_o < 7\%$ .

Aufgrund der relativ schmalen Streben fließt bei den Aufsätzen Multitop und Budatop weniger Wasser auf den Längsstreben über den Aufsatz hinweg als beim Standardaufsatz. Die Krümmung der inneren Längsstreben führt außerdem dazu, dass das Wasser abgelenkt wird und somit in den Aufsatz fließt, anstatt über den Aufsatz hinweg zu fließen.



**Abbildung 18:**  $E$  in Abhängigkeit von  $Q$  (Budatop, physikalische Modellversuche)

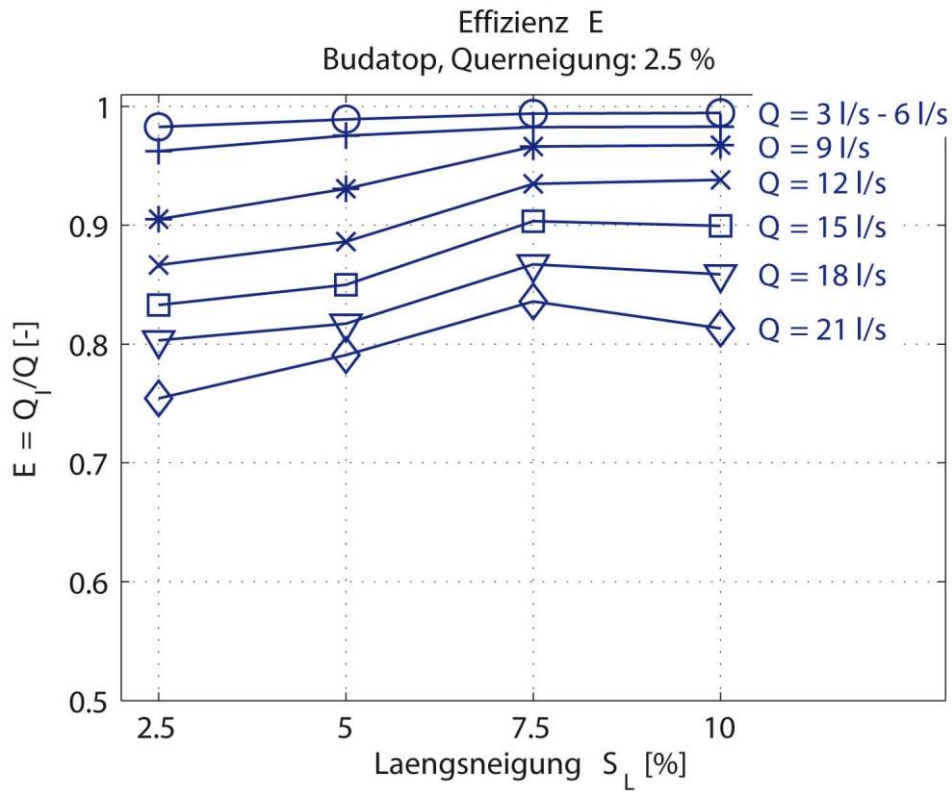


Abbildung 19:  $E$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche)

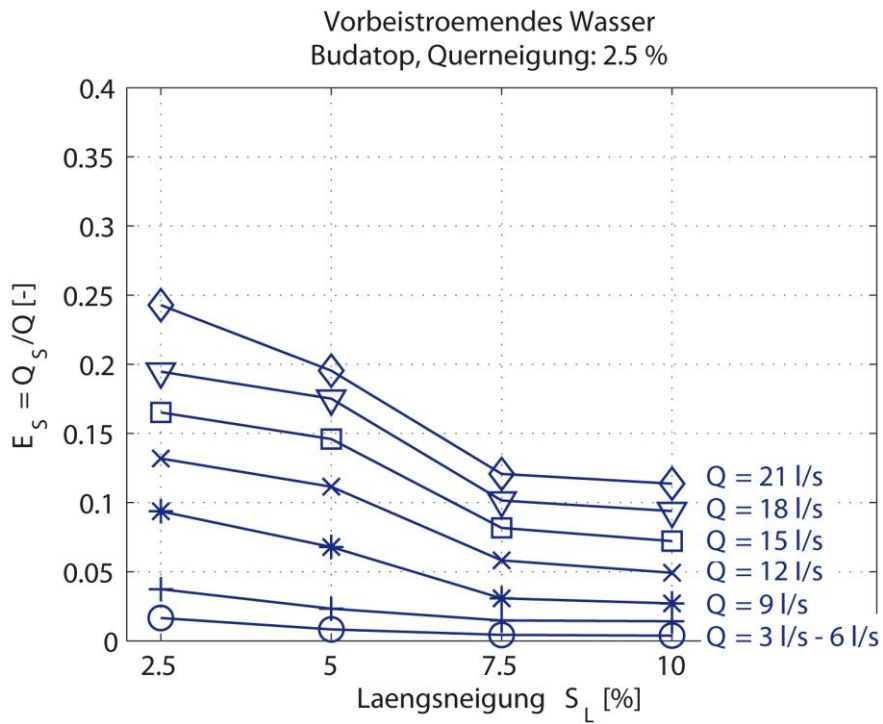
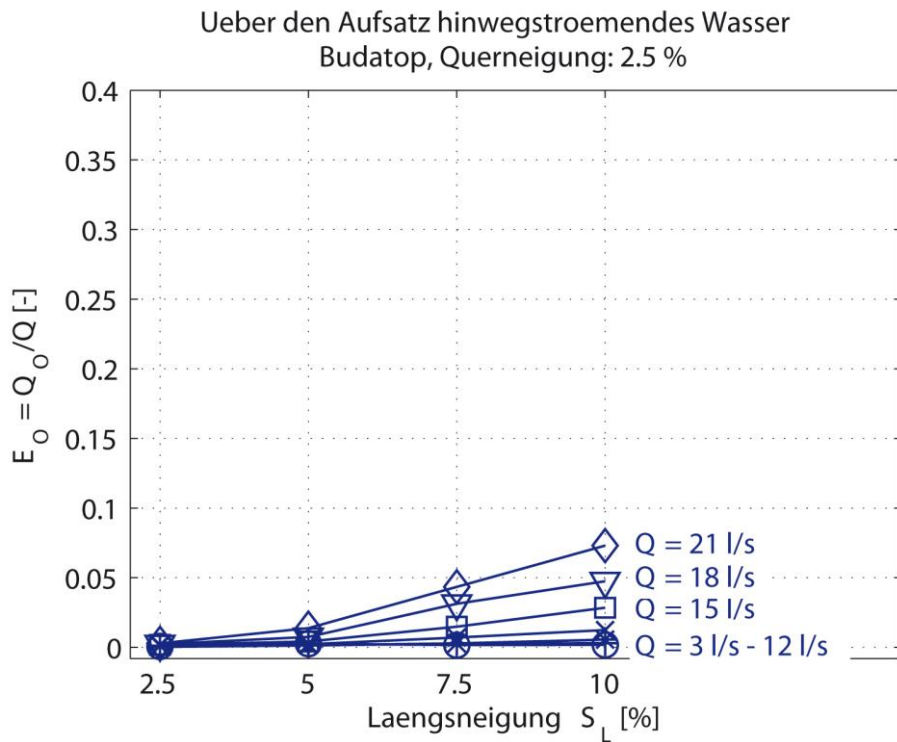


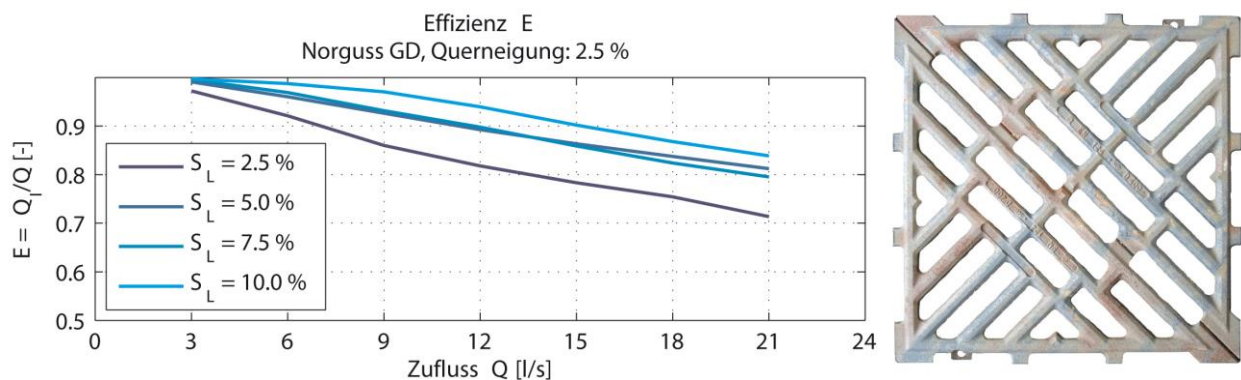
Abbildung 20:  $E_s$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche)



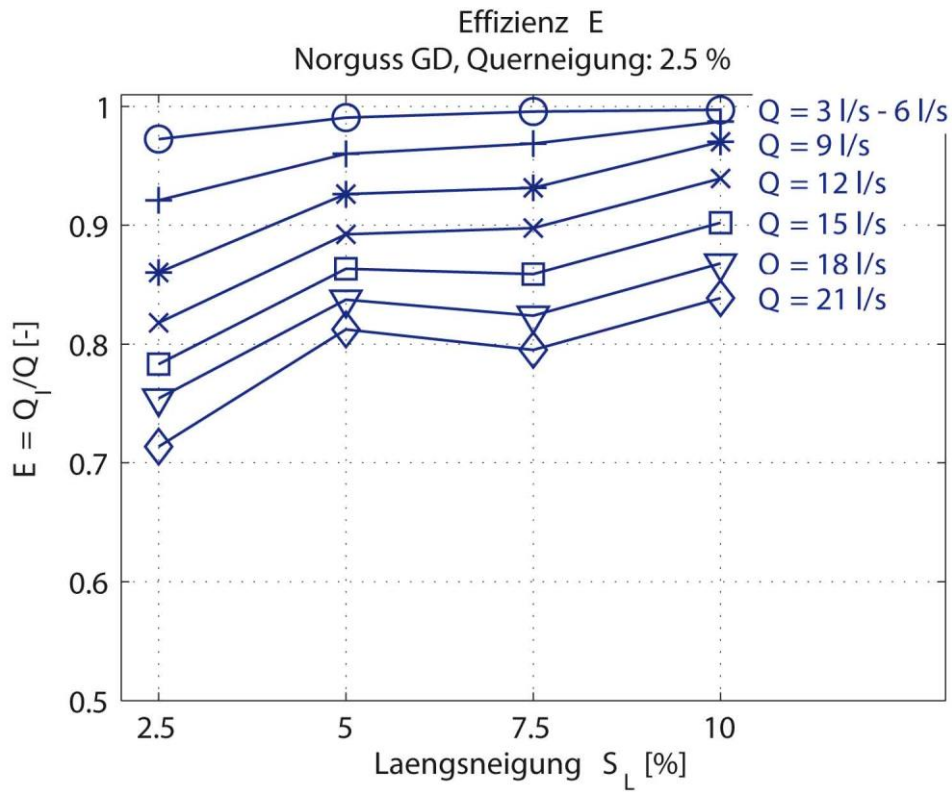
**Abbildung 21:**  $E_0$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Budatop, physikalische Modellversuche)

Die Effizienz liegt beim Aufsatz Budatop zwischen  $E \approx 75\%$  ( $Q = 21$  l/s) und  $E \approx 99\%$  ( $Q = 3$  l/s), für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers gilt  $E_0 < 7,5\%$ .

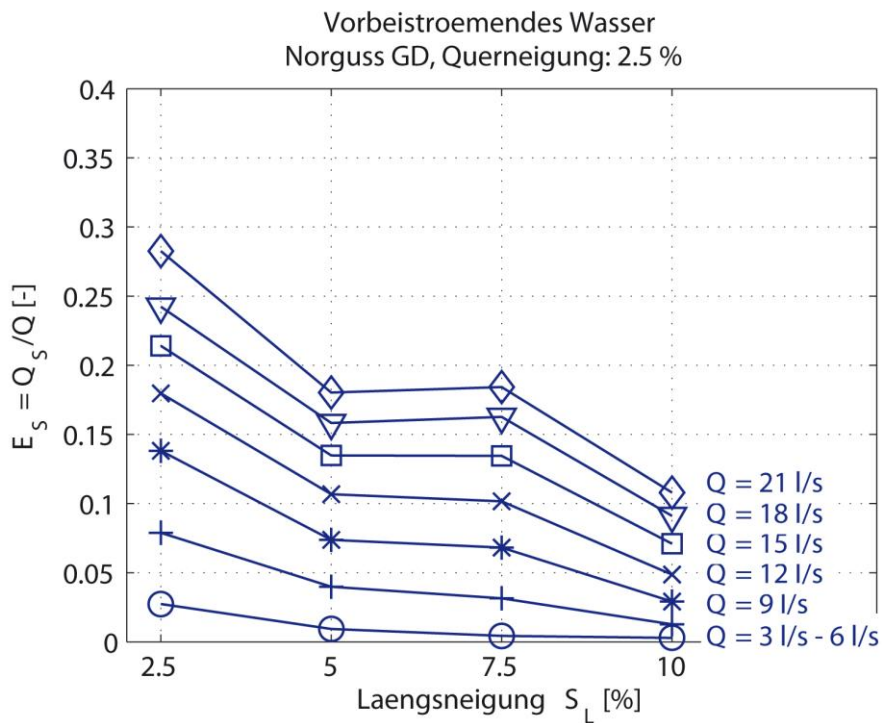
Der Aufsatz Norguss GD weist im Gegensatz zu den bisher genannten Pultaufsätzen mit Querstreben ausschließlich diagonal zur Fließrichtung verlaufende Streben auf, die ähnlich breit sind wie die der Aufsätze Multitop und Budatop, die Schlitzweite ist ebenfalls vergleichbar groß. Die Öffnungsfläche ist etwa gleich groß wie die des Standardaufsatzes. In Abbildung 22 bis Abbildung 25 sind die Ergebnisse des Aufsatzes Norguss GD gegeben.



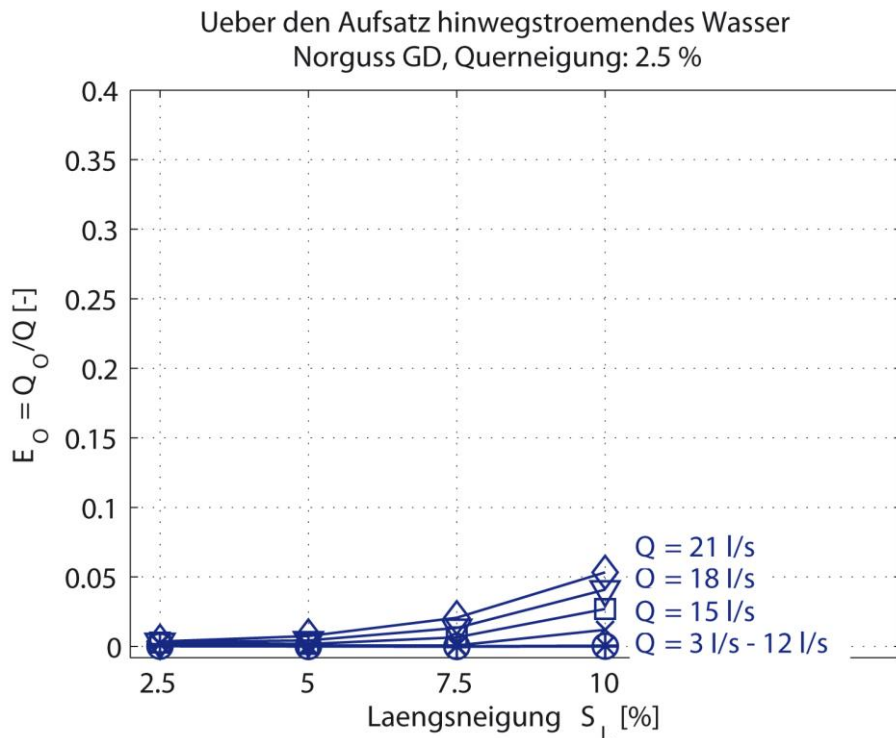
**Abbildung 22:**  $E$  in Abhängigkeit von  $Q$  (Norguss GD, physikalische Modellversuche)



**Abbildung 23:**  $E$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche)



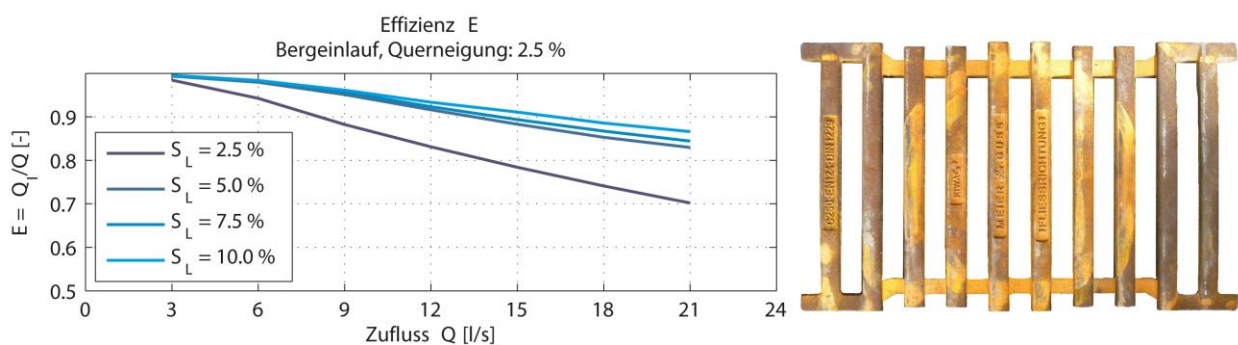
**Abbildung 24:**  $E_s$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche)



**Abbildung 25:**  $E_0$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Norguss GD, physikalische Modellversuche)

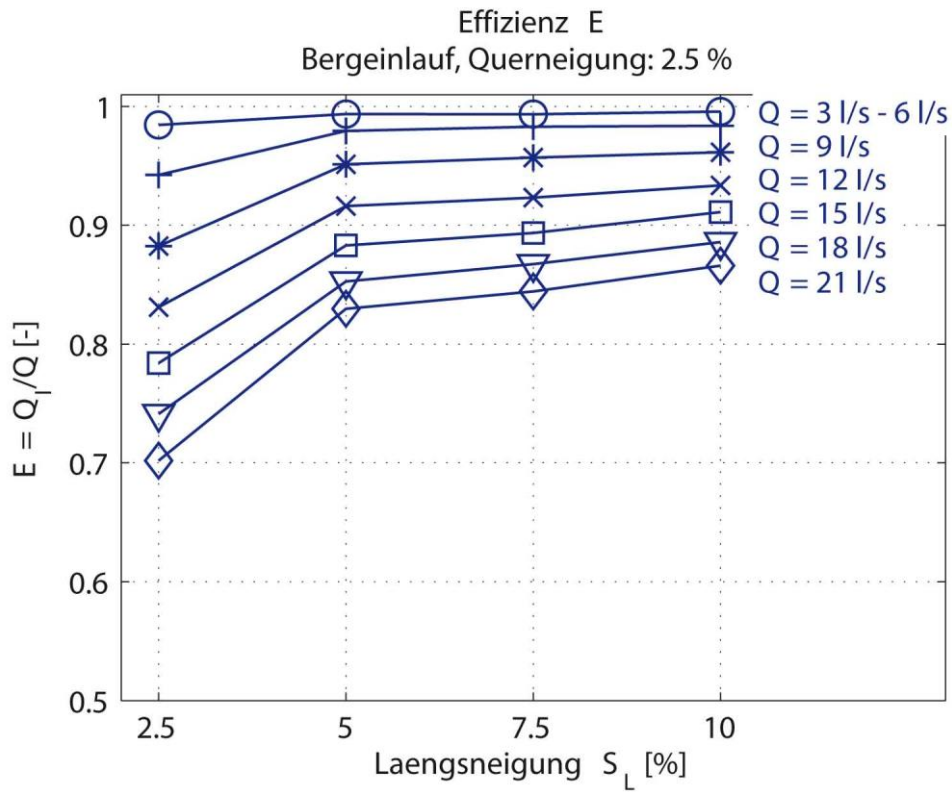
Der Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers ist im Vergleich zu den bisher beschriebenen Aufsätzen mit vorwiegend querverlaufenden Streben geringer. Jedoch fließt geringfügig mehr Wasser am Aufsatz vorbei, da die Öffnungsfläche an der dem Bordstein abgewandten Seite kleiner ist und auf der Länge des Aufsatzes weniger dem Straßenablauf zufließt. Die Effizienz liegt beim Aufsatz Norguss GD zwischen  $E \approx 70\%$  ( $Q = 21$  l/s) und  $E \approx 99\%$  ( $Q = 3$  l/s), für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers gilt  $E_0 < 5,5\%$ .

Beim Bergeinlauf (Abbildung 26 bis Abbildung 29) ist zu erkennen, dass auch bei hohen Längsneigungen von  $S_L = 10\%$  und großen Zuflüssen nahezu das gesamte, auf den Aufsatz zufließende Wasser aufgenommen wird (Abbildung 29). In diesem Fall hat nur noch die vorbeifließende Wassermenge eine abmindernde Wirkung auf die Effizienz, wodurch sich die verhältnismäßig geringe Effizienz bei einem geringen Längsgefälle von  $S_L = 2,5\%$  erklären lässt (Abbildung 26).

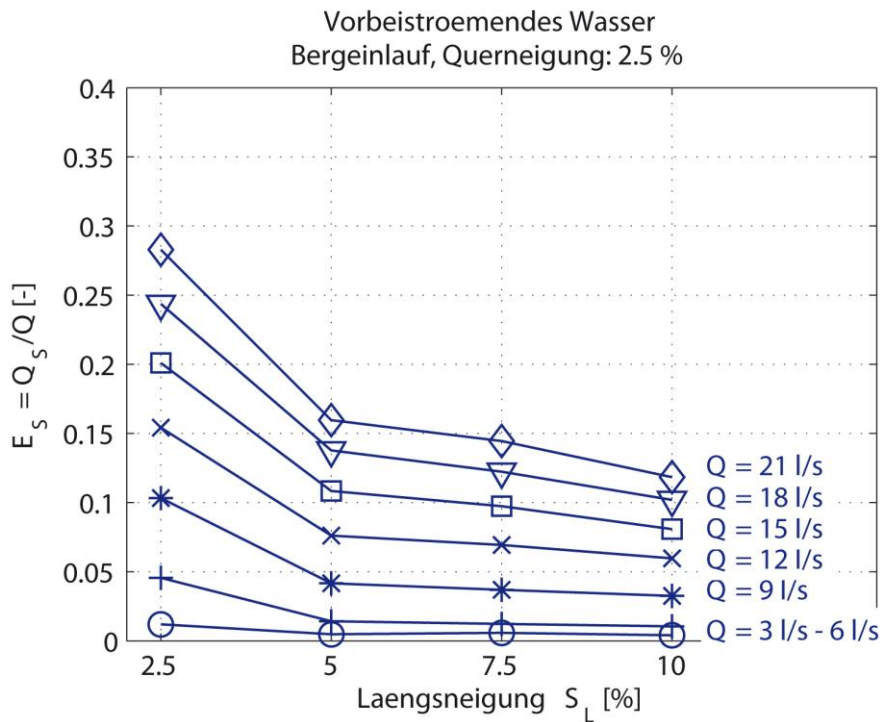


**Abbildung 26:** E in Abhängigkeit von Q (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche)

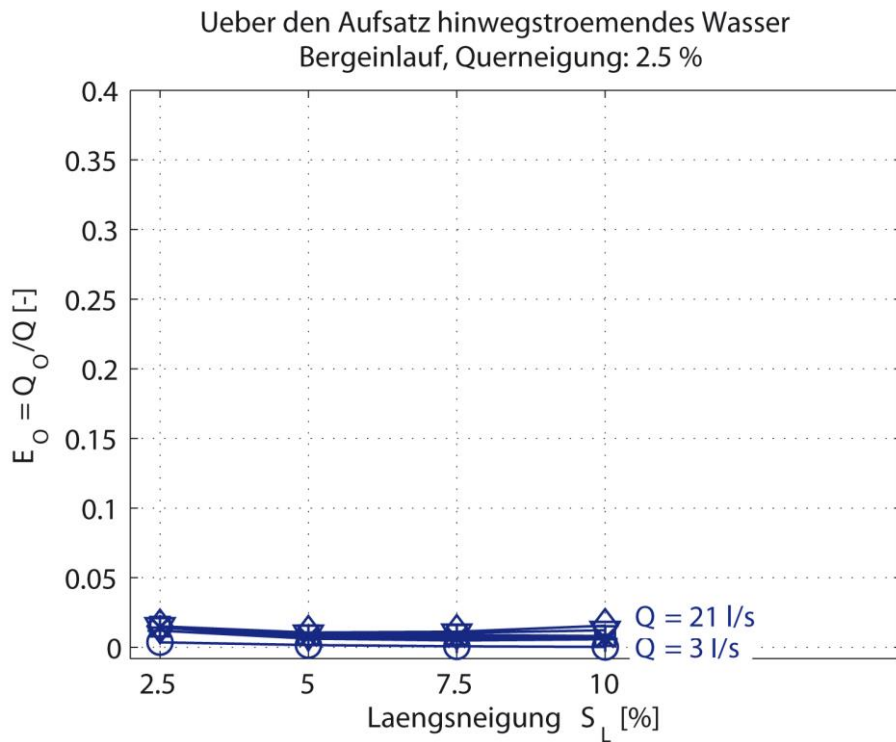




**Abbildung 27:** E in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche)

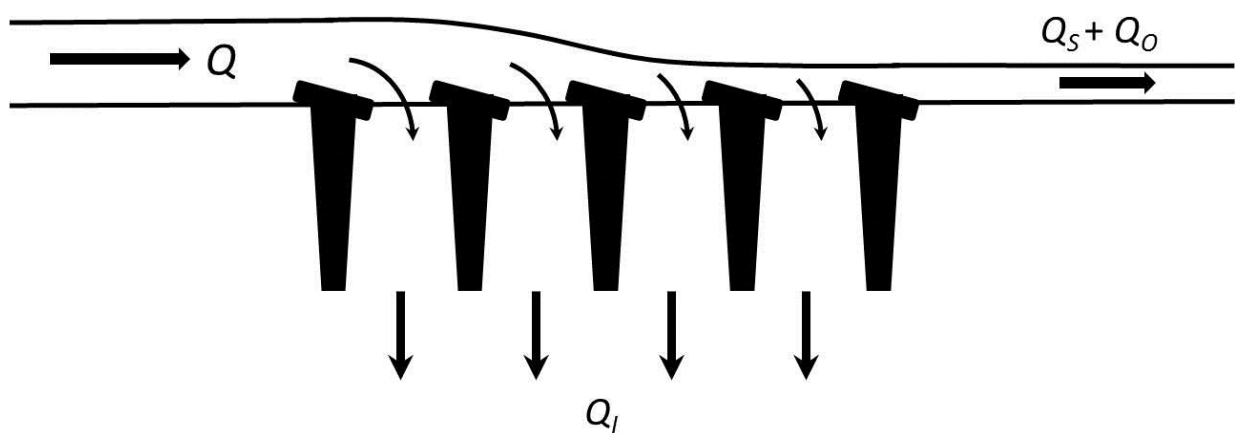


**Abbildung 28:** Es in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche)

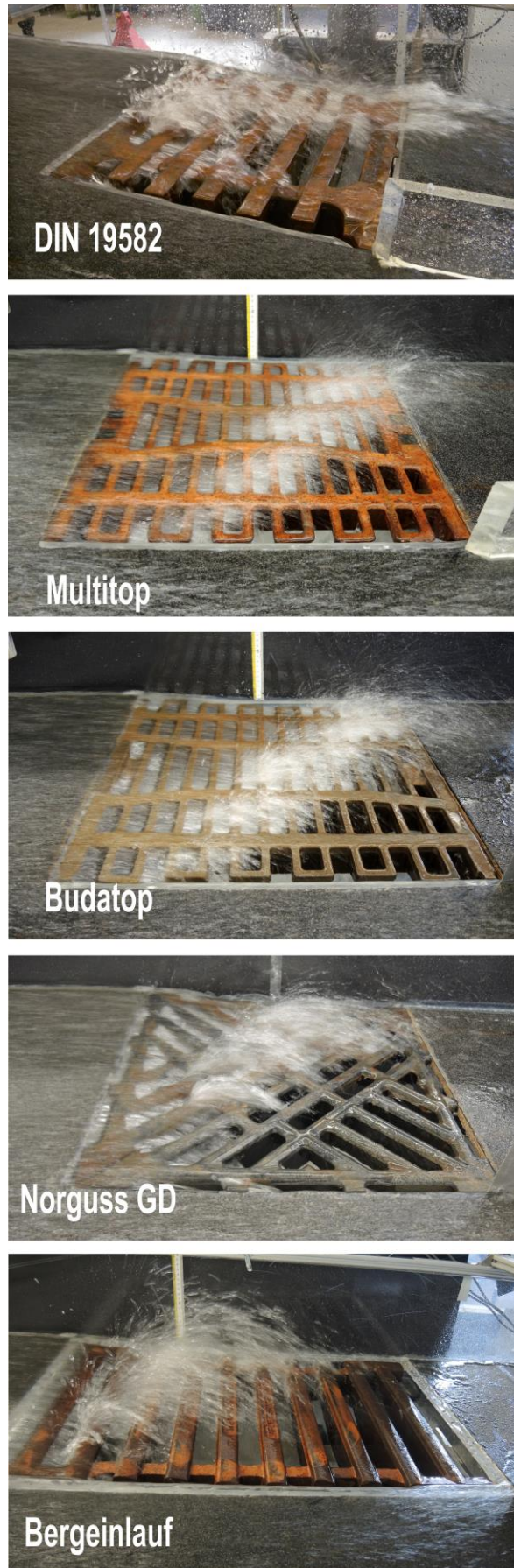


**Abbildung 29:**  $E_0$  in Abhängigkeit der Längsneigung (Bergeinlauf, physikalische Modellversuche)

Die Effizienz liegt beim Bergeinlauf zwischen  $E \approx 70\%$  ( $Q = 21$  l/s) und  $E \approx 100\%$  ( $Q = 3$  l/s), für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers gilt  $E_0 < 1,6\%$ . Insgesamt ist der Bergeinlauf bei hohen Längsneigungen leistungsfähiger als die bisher beschriebenen Aufsätze. Zum einen hat die größere Öffnungsfläche einen positiven Effekt auf die Effizienz, zum anderen ist die Form der Querstreben hydraulisch günstig ausgebildet (Abbildung 30).



**Abbildung 30:** Skizze Seitenansicht Bergeinlauf

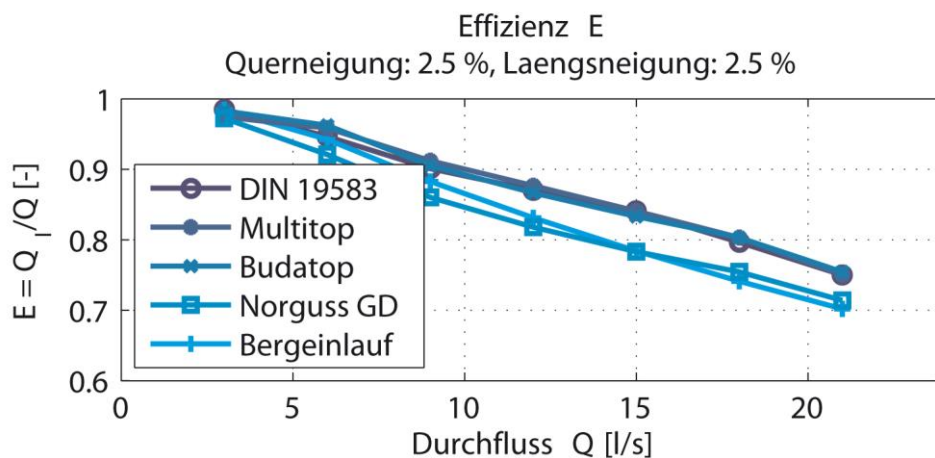


**Abbildung 31:** Physikalisches Modell - Vergleich der Aufsätze ( $S_L = 7,5 \%$ ,  $Q = 15 \text{ l/s}$ )

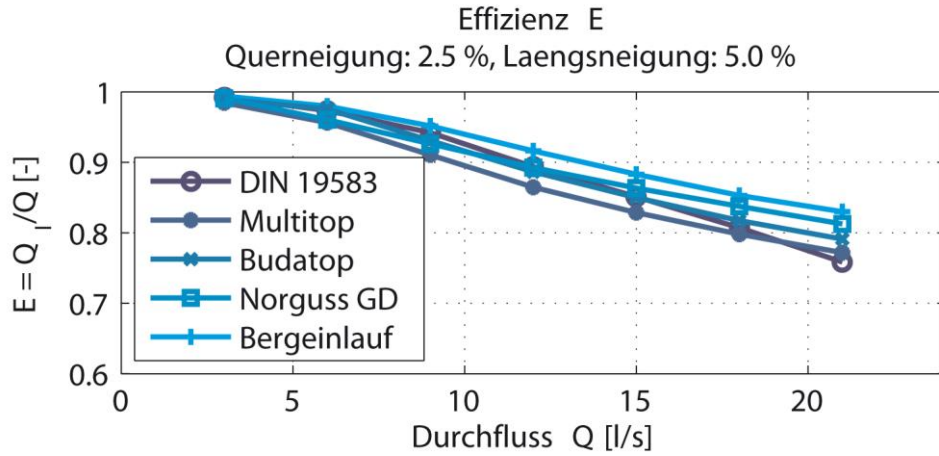
Die Köpfe der Querstreben sind in Fließrichtung geneigt, so dass der auftreffende Wasserstrahl eher nach unten abgelenkt wird, anstatt über zur Straßenoberfläche parallel verlaufende Querstreben-Köpfe aufgrund der hohen Geschwindigkeiten hinwegzufließen.

Wie in Abbildung 31 zu sehen ist, ist bei den Aufsätzen 500 x 500 zu erkennen, dass hauptsächlich die vordere Hälfte des Aufsatzes und die dem Bordstein zugewandte Hälfte des Aufsatzes abflusswirksam sind. Die untere, der Straße zugewandte Ecke ist für das Schluckvermögen unwirksam.

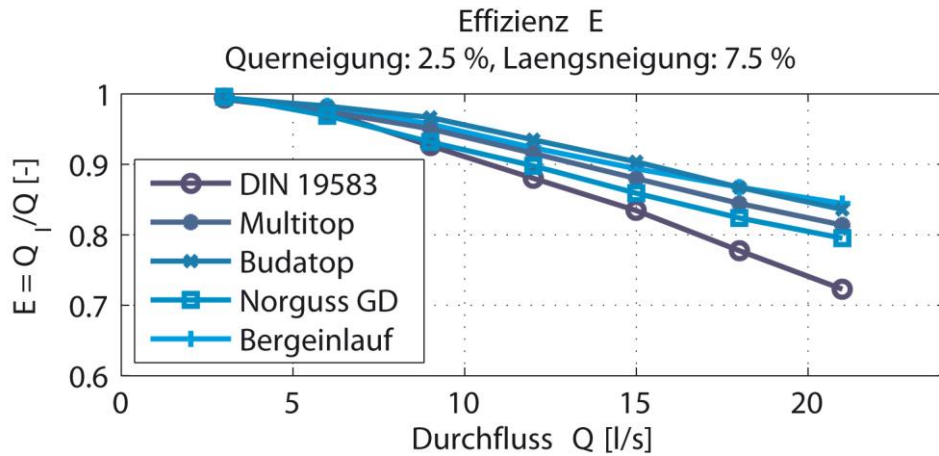
In Abbildung 32 bis Abbildung 35 ist die Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses sowie der Längsneigung für alle untersuchten Aufsatztypen zusammengefasst und vergleichend dargestellt. Bei Längsneigungen von 2,5 % und 5 % sind kaum Unterschiede in der Effizienz zu erkennen (Abbildung 32, Abbildung 33). Bei Längsneigungen ab 7,5 % weist der Standardaufsatz nach DIN 19583 Effizienzen auf, die bei großen Zuflüssen bis zu 10 % geringer sind als die anderen untersuchten Geometrien mit gleichen Abmessungen (500 mm x 500 mm, Abbildung 34, Abbildung 35). Der Bergeinlauf liefert aufgrund seiner größeren Öffnungsfläche und der geneigten Querstreben bei hohen Längsneigungen die besten Ergebnisse, was bei der Betrachtung der typspezifischen Effizienz deutlicher zu erkennen ist.



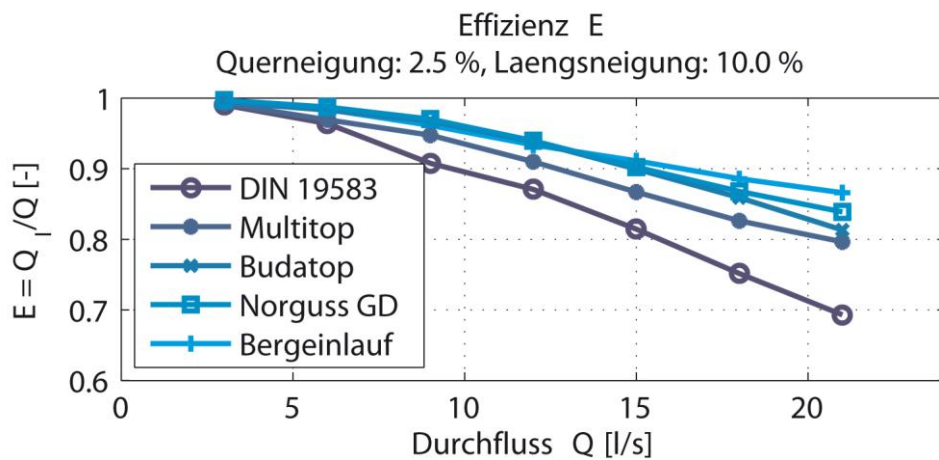
**Abbildung 32:** Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche  $S_L = 2,5 \%$ )



**Abbildung 33:** Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 5,0 \%$ )



**Abbildung 34:** Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5 \%$ )



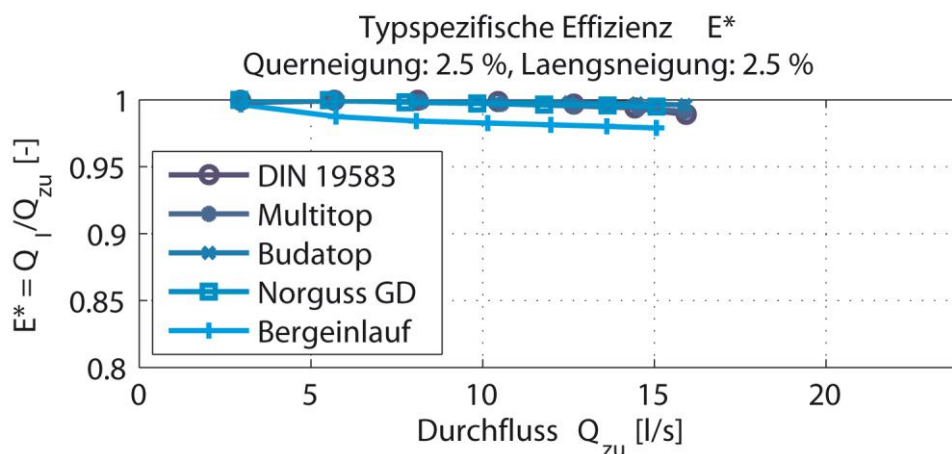
**Abbildung 35:** Effizienz in Abhängigkeit des gesamten Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 10,0 \%$ )

Zur Beschreiben der typspezifischen Effizienz der Aufsätze wird nicht der gesamte zufließende Abfluss  $Q$  angesetzt, sondern nur der Anteil des Zuflusses, der auf der Breite  $B_S$  dem Aufsatz zufließt (frontaler Zufluss  $Q_{zu}$ ). Die typspezifische Effizienz ergibt sich zu:

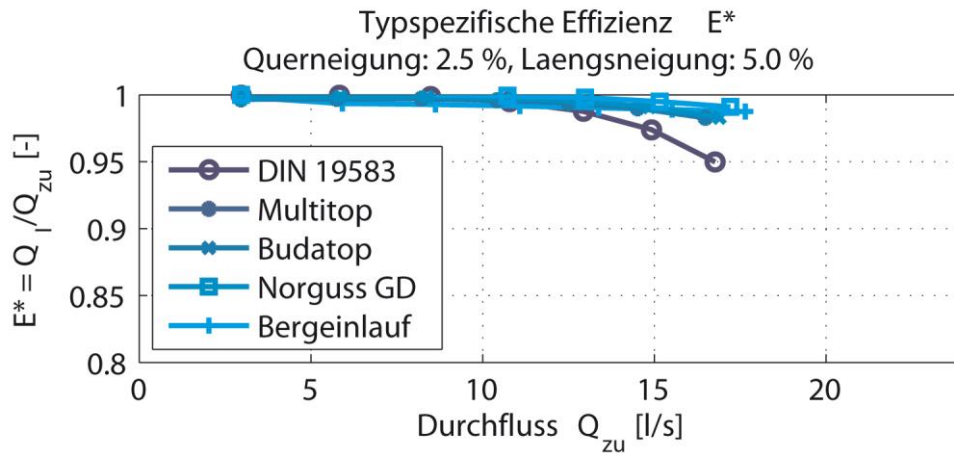
$$E^* = \frac{Q_I}{Q_{zu}} [-] \quad (4)$$

Bei dieser Betrachtungsweise wird der am Aufsatz vorbeifließende Anteil vernachlässigt, da dieser unabhängig vom Aufsatztyp ist und nur durch die Querneigung der Straße beeinflusst wird. Auf die typspezifische Effizienz hat die Längsneigung einen deutlichen Einfluss, im Gegensatz zur gesamten Effizienz, bei der der Einfluss nur sehr gering ist. In Abbildung 36 bis Abbildung 39 ist die typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses für alle untersuchten Längsneigungen gegeben. Bei geringen Längsneigungen von  $S_L \leq 5,0 \%$  sind kaum Unterschiede zu erkennen, nahezu 100 % des frontal zufließenden Wassers wird von allen Aufsätzen aufgenommen. Zu erkennen ist, dass insbesondere für große Längsneigungen von  $S_L \geq 7,5 \%$  Unterschiede in der typspezifischen Effizienz auftreten.

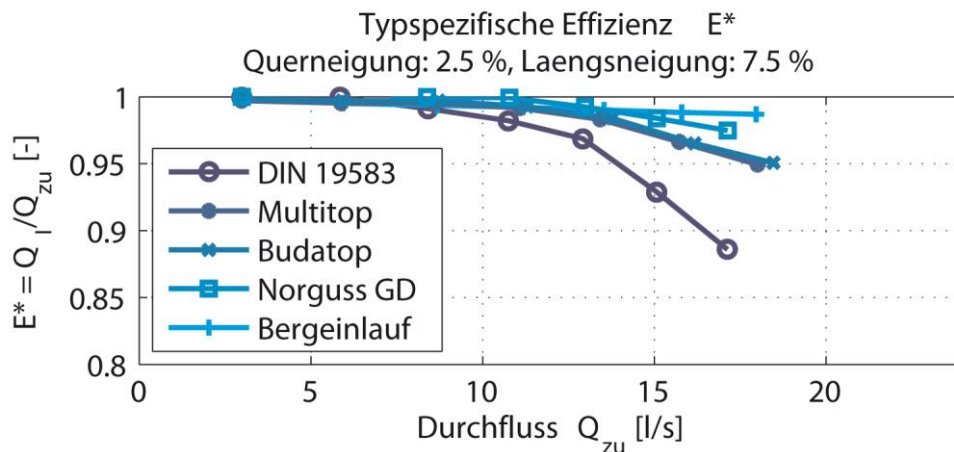
Die Differenz der typspezifischen Effizienz zwischen Bergeinlauf und Standardaufsatz nach DIN 19583 liegt bei bis zu  $\Delta E^* = 15 \%$  (Abbildung 39,  $Q = 21 \text{ l/s}$  ( $Q_{zu} \approx 17-18 \text{ l/s}$ )). Dabei spielt, wie bereits beschrieben, der größere Einlaufquerschnitt aber auch die Anordnung der Streben eine Rolle. Die weiteren Aufsätze 500 x 500 mit vom Standardaufsatz abweichenden Geometrien mit schmalen Quer- und Längsstreben sowie diagonalen Streben liefern für alle Längsneigungen und Durchflüsse Effizienzen gleicher Größenordnung ( $90 \% \leq E^* \leq 100 \%$ ), die über dem Standardaufsatz aber unter dem Bergeinlauf liegen.



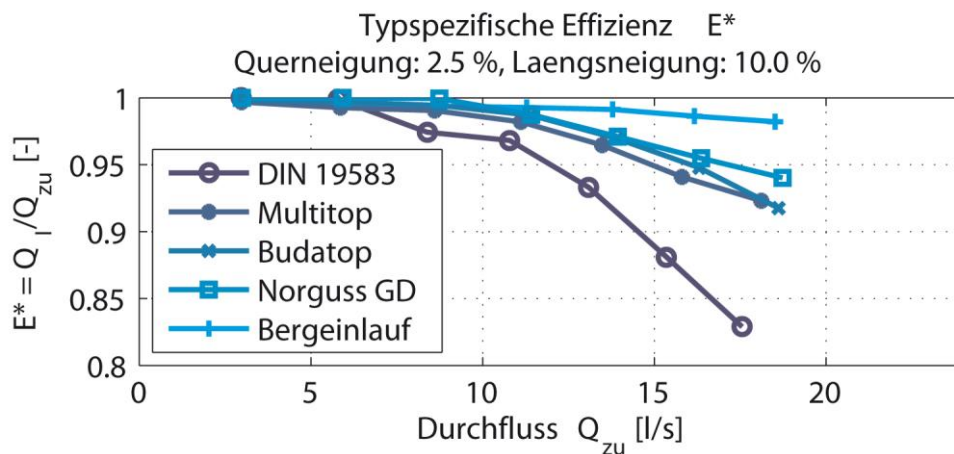
**Abbildung 36:** Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 2,5 \%$ )



**Abbildung 37:** Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 5,0 \%$ )



**Abbildung 38:** Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5 \%$ )

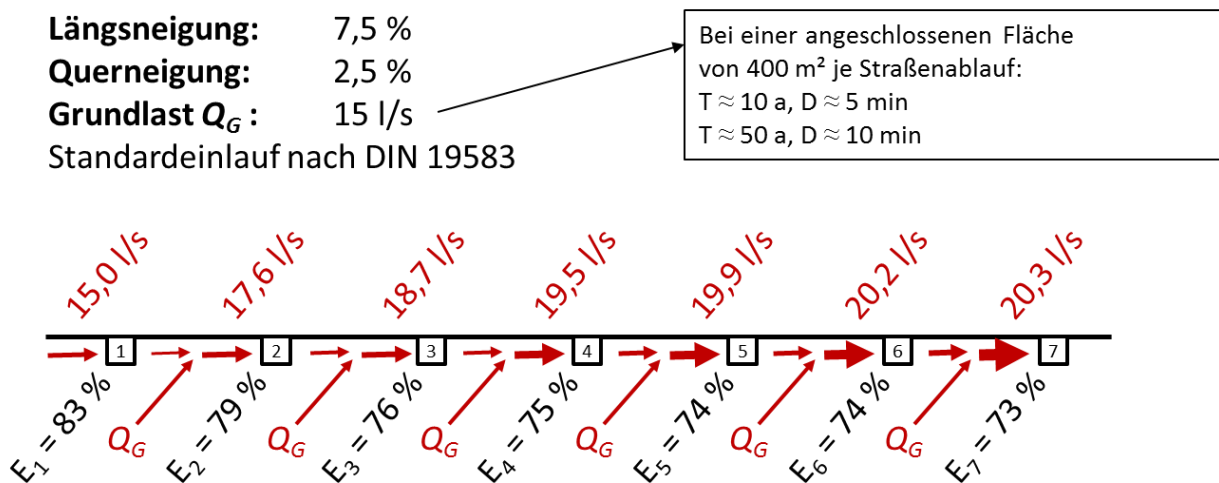


**Abbildung 39:** Typspezifische Effizienz in Abhängigkeit des frontalen Zuflusses (physikalische Modellversuche,  $S_L = 10,0 \%$ )

Bis zu 30 % des gesamten zufließenden Regenabflusses werden von den Straßeneinläufen nicht aufgenommen (Abbildung 35, Standardaufsatz,  $Q = 21 \text{ l/s}$ ), sondern fließen entweder am Aufsatz vorbei oder über diesen hinweg. Dieser Anteil fließt dann dem nächsten Straßeneinlauf zusätzlich zu. Schon nach wenigen Straßeneinläufen kann sich somit die aufzunehmende Wassermenge deutlich erhöhen, was eine Berücksichtigung von Ereignissen auch deutlich oberhalb der Bemessungsergebnisse notwendig macht.

In Abbildung 40 sind beispielhaft für ein Regenereignis  $T \approx 10 \text{ a}$ ,  $D \approx 5 \text{ min}$  bzw.  $T \approx 50 \text{ a}$ ,  $D \approx 10 \text{ min}$  (vgl. Tabelle 1) die akkumulierten Abflüsse auf der Straße dargestellt ( $S_L = 7,5 \%$ ,  $S_T = 2,5 \%$ , Standardaufsatz nach DIN 19583).

Aus den physikalischen Modellversuchen geht hervor, dass sich bei einer Grundlast von  $Q = 15 \text{ l/s}$  eine Effizienz von  $E = 83 \%$  ergibt. Dem nächsten Straßeneinlauf fließen somit zusätzlich  $\Delta Q = 2,6 \text{ l/s}$  zu, so dass sich ein akkumulierter Zufluss von  $Q = Q_G + \Delta Q = 15 \text{ l/s} + 2,6 \text{ l/s} = 17,6 \text{ l/s}$  ergibt. Bereits dem fünften Straßeneinlauf fließen bei gleichbleibender Straßengeometrie 30 % mehr Wasser zu als dem ersten Ablauf ( $Q_5 = 19,9 \text{ l/s} \approx 15 \text{ l/s} + 5 \text{ l/s}$ ).



**Abbildung 40:** Akkumulation des Regenabflusses auf der Straße



## 4 Steigerung der (typspezifischen) Effizienz

Zur Steigerung der gesamten Effizienz bzw. der typspezifischen Effizienz der Aufsätze bei hohen Längsneigungen wurden zwei Strategien verfolgt. Zum einen wurde in Zusammenarbeit mit der Firma MeierGuss auf Basis der bereits gewonnenen Erkenntnisse eine neue Aufsatzgeometrie entwickelt, um die typspezifische Effizienz zu steigern. Außerdem wurde untersucht, ob die Reduzierung der Fließgeschwindigkeit vor dem Aufsatz zu einer Steigerung der gesamten Effizienz führt.

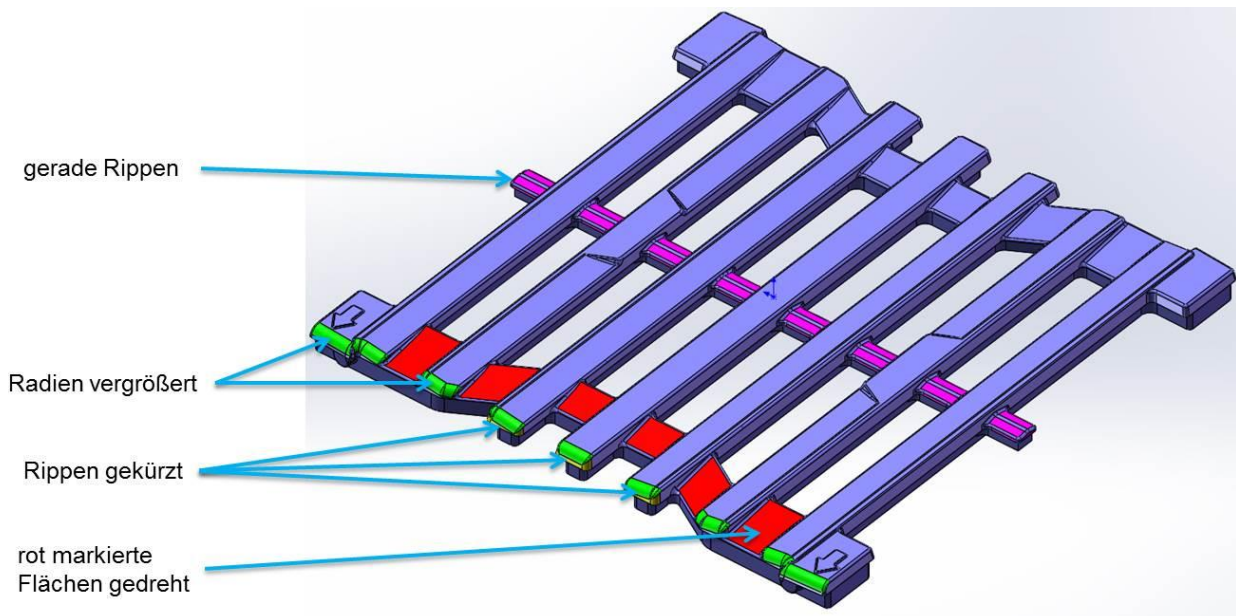
In Zusammenarbeit mit der Firma MeierGuss wurde der Aufsatz MEIDRAIN<sup>®</sup> weiterentwickelt, um die typspezifische Effizienz zu erhöhen. Nach orientierenden Vorversuchen mit einer Vorgängerversion des Aufsatzes MEIDRAIN<sup>®</sup> mit Längsstreben und Öffnungen in Längsrichtung, die ein gutes Einströmverhalten mit hoher Effizienz vermuten ließen, wurde der endgültige in Abbildung 41 dargestellte Aufsatz MEIDRAIN<sup>®</sup> entwickelt.

Eigenschaften des Aufsatzes MEIDRAIN<sup>®</sup>:

- Aufsatz Klasse D400, 500x500 Pultform
- Schlitzweite: 31 mm
- Schlitzlänge: ca. 165 mm
- Einlaufquerschnitt: 955 cm<sup>2</sup>
- Preis/Stk. (inkl. Rahmen): ca. 280 € (Herstellerangaben, Stand: August 2016)

Die Schlitzweite der Öffnungen sowie die Länge der Öffnungen liegen innerhalb der nach DIN EN 124 geforderten Grenzen.

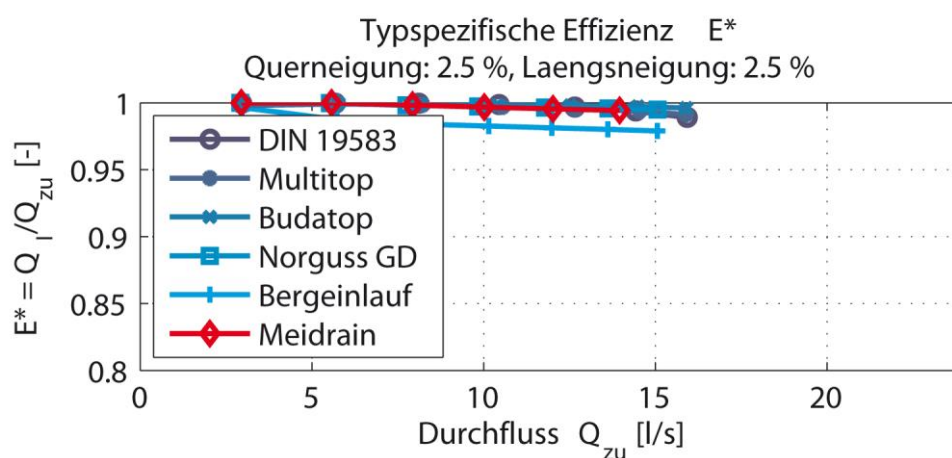
Im Vergleich zu den in Kapitel 3 beschriebenen Aufsatzgeometrien besitzt der MEIDRAIN<sup>®</sup> hauptsächlich Längsstreben. Ob objektive oder subjektive Beeinträchtigungen für Radfahrer gegeben sind, muss von dem Hersteller geprüft werden. Die Längsstreben sind jeweils zur mittleren Längsstrebe (Rippe) hin geneigt, so dass das Wasser nicht, wie beim Standardaufsatz nach DIN 19583 beobachtet, über die Längsstreben hinwegfließen kann, sondern in den Ablauf abgelenkt wird. Die querverlaufende mittlere Rippe ist gerade, jedoch vertieft angeordnet. Die Querstreben am Rand des Aufsatzes sind nach innen gewölbt, so dass ein vergrößerter Einlaufquerschnitt am oberen Aufsatzrand entsteht. Aus diesem Grund sind auch die mittleren drei Längsstreben gekürzt worden. Die vergrößerte Öffnungsfläche führt zu einem verbesserten Schluckvermögen.



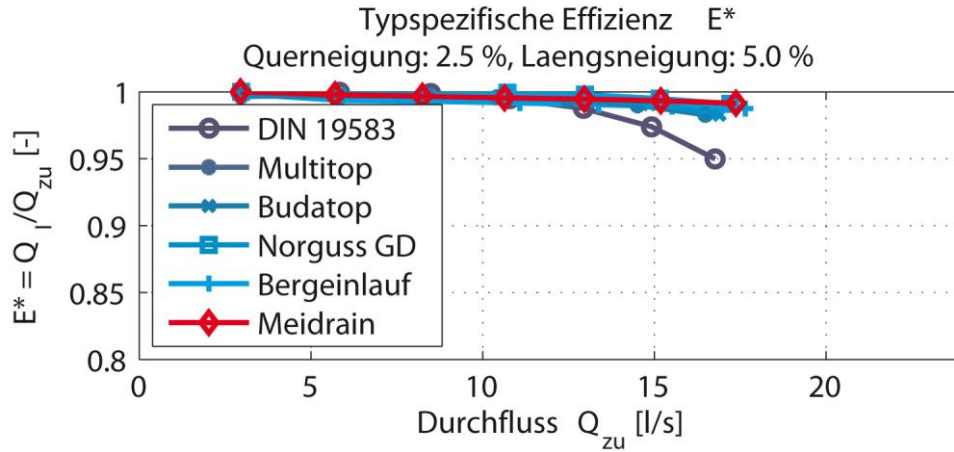
**Abbildung 41:** Entwicklung des Aufsatzes MEIDRAIN® (Fließrichtung: rechts oben nach links unten, Quelle: MeierGuss (2015))

Da die typspezifische Effizienz bei geringen Längsneigungen ( $S_L \leq 5\%$ ) bei allen Aufsätzen bereits bei nahezu 100 % liegt, ist eine Steigerung der typspezifischen Effizienz für diese Randbedingungen nicht mehr möglich und notwendig (Abbildung 42, Abbildung 43).

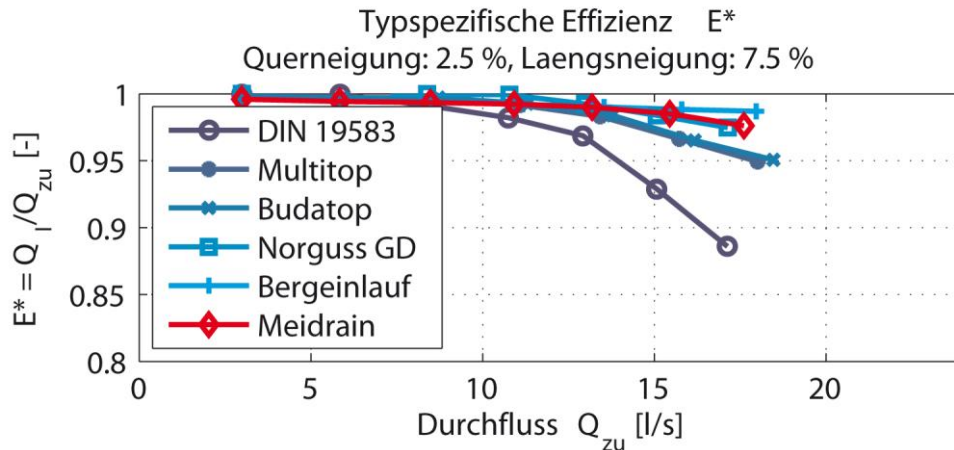
Der Aufsatz MEIDRAIN® weist vor allem bei hohen Längsneigungen und hohen Abflüssen eine deutlich verbesserte Effizienz auf, die in etwa der des Bergeinlaufs entspricht (Abbildung 44, Abbildung 45). Die typspezifische Effizienz konnte im Vergleich zum Standardaufsatz bei einer Längsneigung von  $S_L = 10\%$  und einem frontalen Zufluss von  $Q_{zu} \approx 17,5$  l/s von  $E^* \approx 83\%$  auf  $E^* \approx 96\%$  mit  $\Delta E^* \approx 13\%$  gesteigert werden. Auch im Vergleich zu den weiteren untersuchten Aufsätzen konnte die typspezifische Effizienz um bis zu  $\Delta E^* \approx 5\%$  gesteigert werden.



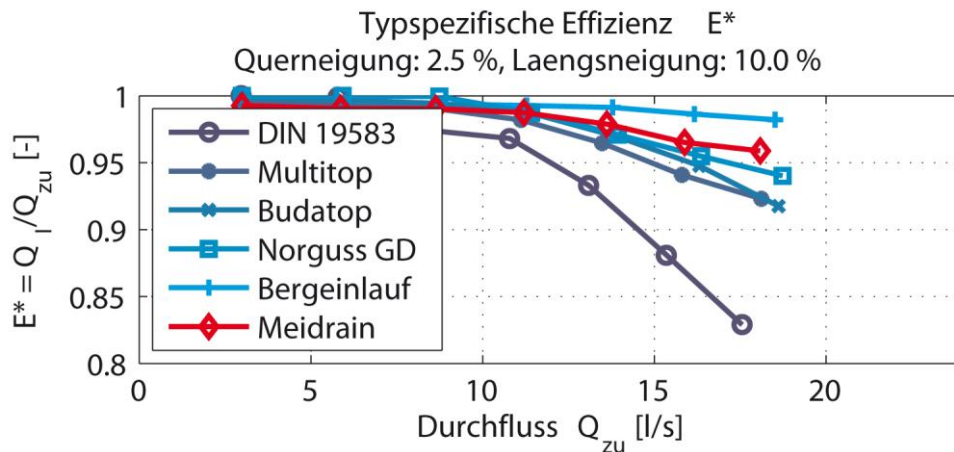
**Abbildung 42:** Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche,  $S_L = 2,5\%$ )



**Abbildung 43:** Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche,  $S_L = 5,0 \%$ )



**Abbildung 44:** Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5 \%$ )



**Abbildung 45:** Typspezifische Effizienz MEIDRAIN® (physikalische Modellversuche,  $S_L = 10,0 \%$ )

In Abbildung 46 ist das Einströmverhalten des Standardaufsatzes nach DIN 19583 bei einer hohen Längsneigung von 10 % und einem mittleren Durchfluss von 12 l/s dargestellt. In Abbildung 47 ist bei gleichen Randbedingungen der Aufsatz MEIDRAIN® abgebildet. Zu erkennen ist, dass der Wasserstrahl im Falle des MEIDRAIN® besser nach unten abgelenkt wird und nicht wie beim Standardaufsatz auf eine Querstrebe trifft und nach oben und unten abprallt. Es ist weniger spritzendes Wasser zu beobachten.



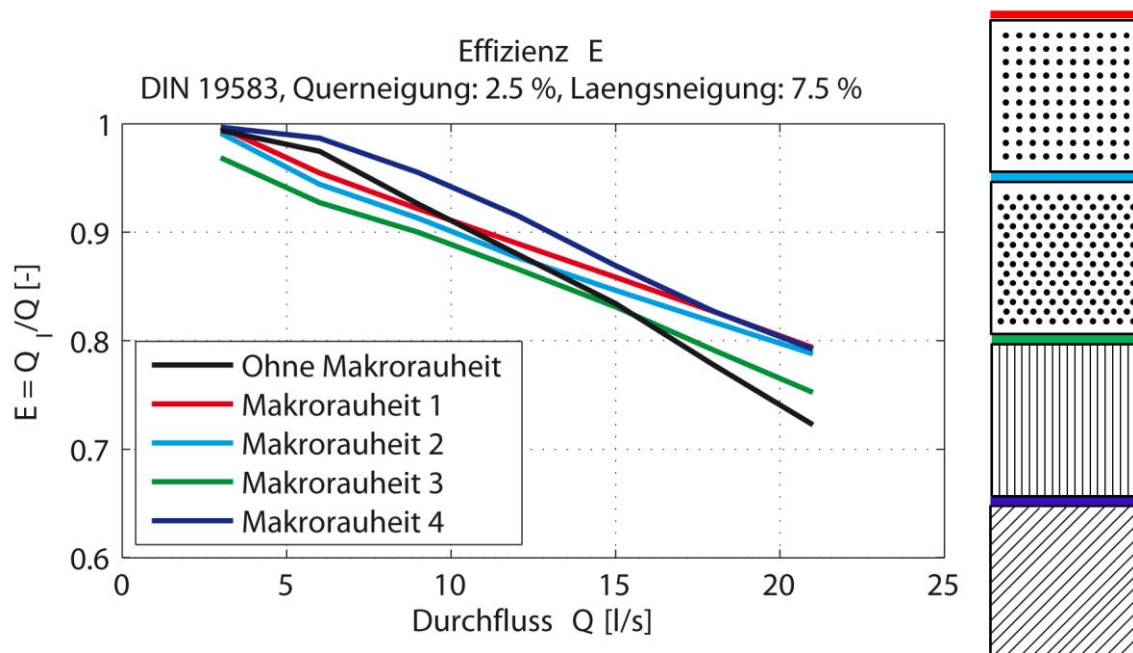
**Abbildung 46:** Standardaufsatz nach DIN 19583 (physikalisches Modell,  $S_L = 100 \%$ ,  $Q = 12 \text{ l/s}$ )



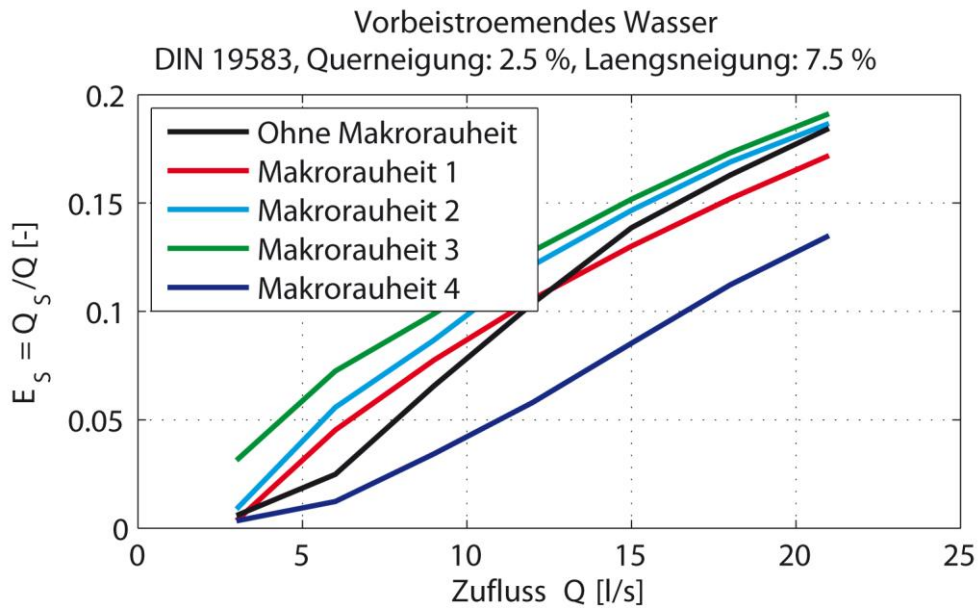
**Abbildung 47:** MEIDRAIN® (physikalisches Modell,  $S_L = 100 \%$ ,  $Q = 12 \text{ l/s}$ )

Zur Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten vor dem Aufsatz wurden vier verschiedene Makrorauheiten auf einer Fläche von 500 mm x 500 mm vor dem Aufsatz aufgebracht. Die Untersuchungen wurden für den Standardaufsatz nach DIN 19583 mit einer Längsneigung von 7,5 % durchgeführt.

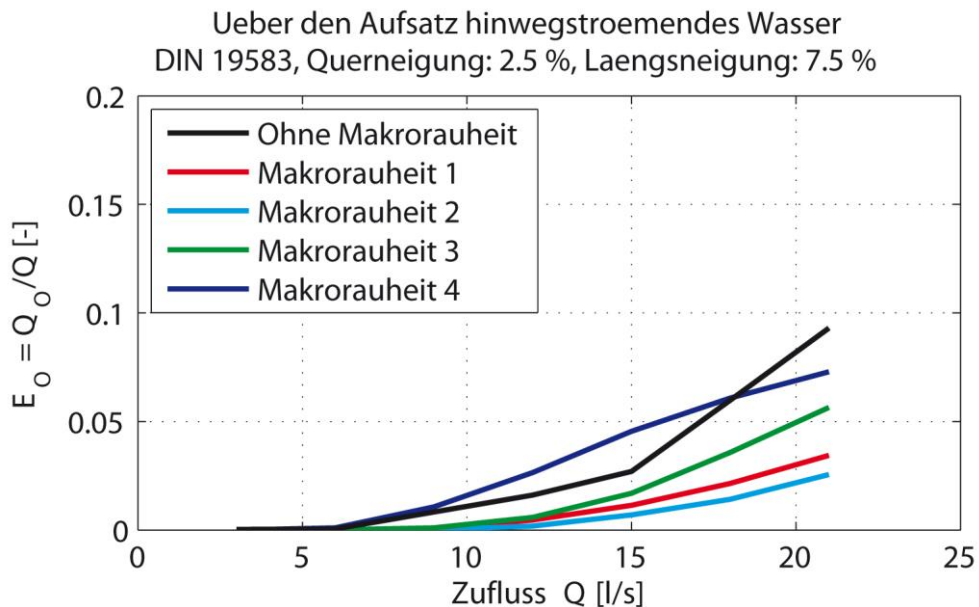
In Abbildung 48 ist die gesamte Effizienz  $E$  in Abhängigkeit des Durchflusses  $Q$  der physikalischen Modellversuche gegeben. Mit der Ausführungsvariante 4 mit einer diagonal ausgerichteten Riffelung konnte die Effizienz insgesamt gesteigert werden. Bei einem Zufluss von  $Q = 21$  l/s wird der absolute Wert der Effizienz  $E$  um fast 10 % erhöht, von  $E \approx 70$  % auf  $E \approx 80$  %. Wie in Abbildung 49 zu erkennen ist, fließt bei einem Aufsatztyp 4 deutlich weniger Wasser an dem Straßenablauf vorbei, die Fließbreite wird durch die diagonale Riffelung in Richtung Bordstein reduziert. Dadurch erhöht sich der frontale Zufluss (Abbildung 51, unten) und der Anteil des über den Straßenablauf hinwegströmenden Wassers ist größer (Abbildung 50). In diesem Fall ist der Effekt der Reduzierung der Abflussbreite stärker als die Auswirkungen der Erhöhung des frontal zufließenden Wassers, sodass in der Gesamtbetrachtung der Effizienz der Makrorauheit 4 die größte Steigerung aufweist. Die weiteren drei untersuchten Makrorauheiten 1 – 3 liefern bei kleinen Durchflüssen von  $Q \leq 12$  l/s keine Steigerung der Effizienz, da hier der gegenteilige Effekt zur Makrorauheit 4 erzielt wird, die Fließbreite wird größer und der Anteil des am Aufsatz vorbeifließenden Wassers ist größer als ohne Makrorauheit und der Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers ist dementsprechend kleiner. Erst mit größer werdenden Durchflüssen und einer etwa gleichen Menge an vorbeifließendem Wasser mit und ohne Makrorauheit ist eine positive Beeinflussung der Effizienz zu beobachten. Der Anteil des über den Aufsatz hinwegströmenden Wasser kann reduziert werden.



**Abbildung 48:** Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5$  %, Effizienz  $E$ , Fließrichtung von links nach rechts)

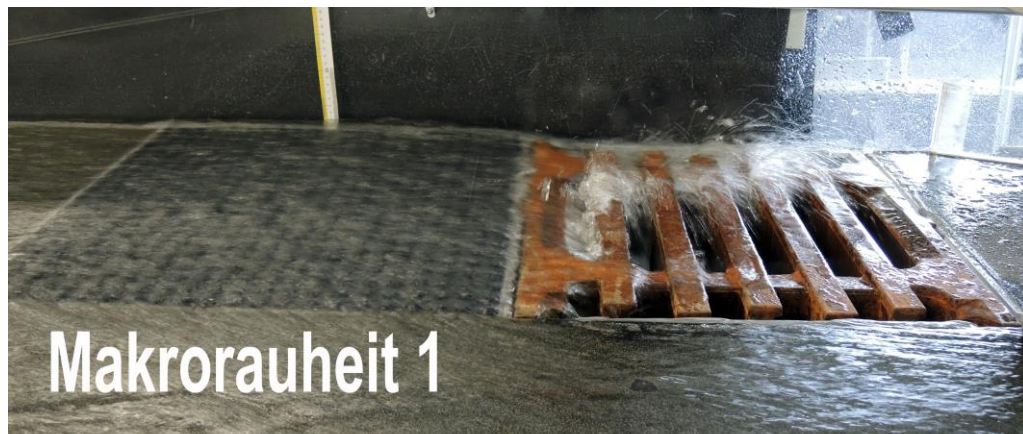


**Abbildung 49:** Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5 \%$ ,  $E_S$ )



**Abbildung 50:** Variantenbetrachtung (physikalische Modellversuche,  $S_L = 7,5 \%$ ,  $E_O$ )

In Abbildung 51 sind Fotos der Modellversuche im Labor für alle vier Makrorauheiten für eine Längsneigung von  $S_L = 7,5 \%$  und einen Durchfluss  $Q = 9 \text{ l/s}$  vergleichend dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei der Ausführungsvariante Makrorauheit 4 mehr Wasser auf dem Aufsatz abfließt, da der seitliche Abfluss reduziert wurde. Bei der Variante Makrorauheit 2 fließt am wenigsten Wasser über den Aufsatz hinweg, was auch in Abbildung 50 zu erkennen ist.



**Abbildung 51:** Variantenbetrachtung,  $S_L = 7,5 \%$ ,  $Q = 9 \text{ l/s}$   
(physikalisches Modell)

## 5 Feldversuche

Zur Validierung der physikalischen Modellversuche wurden in Zusammenarbeit mit den Technischen Betrieben Solingen (TBS) Feldversuche in der Wittekindstraße in Solingen unter „realen“ Abflussbedingungen durchgeführt. Die Straße weist eine Längsneigung von etwa 6 % und eine Querneigung von etwa 2,5 % auf. Untersucht wurde ein Standardaufsatz nach DIN 19583 mit den Abmessungen  $B_S \times L_S = 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 52).

Mithilfe von zwei Hydranten wurde eine definierte Wassermenge (Frischwasser), gemessen mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät (Abbildung 53), etwa 35 m oberhalb des Straßenablaufs auf der Straße zum Abfluss gebracht. Vor dem Ablauf konnte sich bereits ein stationär gleichförmiger Abfluss einstellen. Neben einer Fotodokumentation wurden Fließgeschwindigkeiten und Abflussbreiten oberhalb des Ablaufs sowie die durch den Ablauf abfließenden Wassermengen messtechnisch erfasst.



**Abbildung 52:** Versuchsaufbau Feldversuche, Aufsatz nach DIN 19583 500 x 500



Die Wittekindstraße weist bezüglich der Grundstücks- und Straßentwässerung einige Besonderheiten auf. Das auf den angrenzenden Grundstücken anfallende Regenwasser wird zunächst auf jedem Grundstück gesammelt und in einen Versickerungsgraben in der Mitte der Straße geleitet. Außerdem sind auf der Straße jeweils zwei Straßenabläufe hintereinander angeordnet. Der vordere Straßenablauf entwässert in die Kanalisation, der zweite, nachgeschaltete Straßeneinlauf leitet das Wasser in den Versickerungsgraben. Im Rahmen der Versuche wurde der erste Ablauf höhengleich abgedeckt, sodass nur der zweite Ablauf wirksam wurde. So konnte die durch den Ablauf abfließende Wassermenge in dem Versickerungsgraben aufgefangen (Abbildung 54) und per Volumenmessung bestimmt werden.



**Abbildung 53:** Messeinrichtung im Zulauf (Feldversuche)

Die Ergebnisse der Feldversuche im Vergleich zu den Laborversuchen sind in Tabelle 3 dargestellt (beide für  $S_L = 6\%$ ). Bei den Feldversuchen konnte ein ähnliches Einströmverhalten am Straßenablauf wie im Labor beobachtet werden (Abbildung 55). Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeiten insbesondere im Feld können die Laborversuche durch die Feldversuche bestätigt werden, die Abweichungen der Ergebnisse der Feldversuche zu den Laborversuchen liegen unter 10 %.



**Abbildung 54:** Volumenmessung (Feldversuche)

**Tabelle 3:** Effizienz  $E$ : Feldversuche vs. Laborversuche (Aufsatz nach DIN 19583)

$Q$ [l/s]	3	6	9	12	13,8	15	18	21
$E$ [-] Labor	0,99	0,97	0,93	0,88	0,86	0,84	0,79	0,74
$E$ [-] Feld	0,97	0,98	0,95	0,93	0,93	-	-	-



**Abbildung 55:** DIN 19583,  $Q = 9$  l/s (links: Labor ( $S_L = 5\%$ ), rechts: Feld ( $S_L = 6\%$ ))

Neben dem IST-Zustand wurde ebenfalls in den Feldversuchen eine Variante zur Steigerung der Effizienz untersucht. Beispielhaft wurde die Makrorauheit 4 (Platte mit diagonaler Riffelung) zur Reduzierung der Fließgeschwindigkeiten vor dem Straßenablauf eingesetzt (Abbildung 56).



**Abbildung 56:** Variantenbetrachtung zur Steigerung der Effizienz im Feld

Da die Laborversuche nur für eine Längsneigung von  $S_L = 7,5 \%$  durchgeführt wurden, die Straße aber eine Längsneigung von  $S_L = 6 \%$  aufweist, kann der Vergleich zu den Laborversuchen nur näherungsweise erfolgen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Feldversuche ( $S_L = 6 \%$ ) und die der Laborversuche ( $S_L = 7,5 \%$ ) mit Makrorauheit 4 gegeben.

**Tabelle 4:** Effizienz  $E$ : Feldversuche vs. Laborversuche (mit Makrorauheit 4)

$Q$ [l/s]	3	6	9	12	13,8	15	18	21
$E$ [-] Labor*	0,99	0,98	0,95	0,91	-	0,86	0,82	0,79
$E$ [-] Feld	0,97	0,96	0,94	0,89	0,89	-	-	-

\*  $S_L = 7,5 \%$

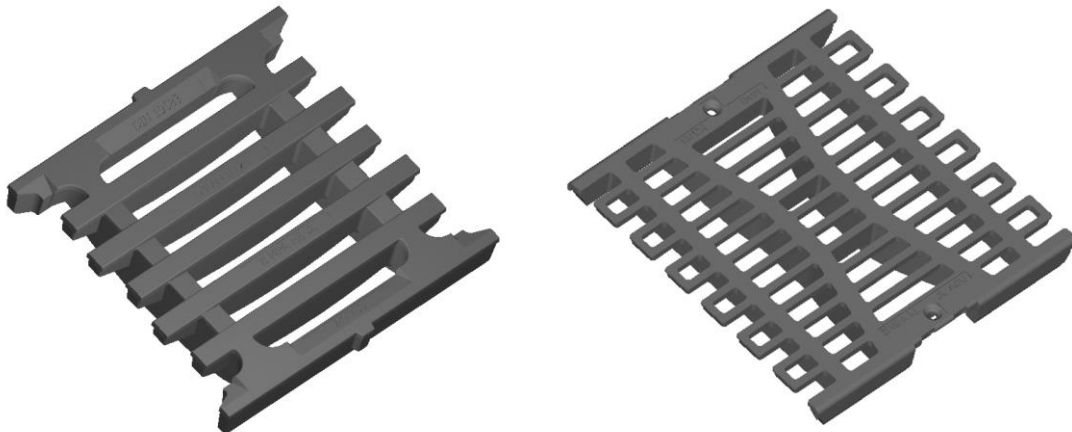
Die Feldversuche mit Makrorauheit liefern unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten durch die Messtechnik sowie leicht abweichende Einbaubedingungen vergleichbare Ergebnisse zu den physikalischen Modellversuchen mit Abweichungen unter 10 % auf.

## 6 Numerische Modellversuche

Die dreidimensionalen numerischen Modellversuche wurden mit der CFD Software FLOW-3D (Fa. Flow Science) durchgeführt, welche auf die Berechnung von zwei- und dreidimensionalen Strömungen mit freier Oberfläche spezialisiert ist.

Die freie Oberfläche wird mithilfe der *Volume of Fluid (VOF)* Methode beschrieben (Hirt & Nichols, 1981). Die *FAVOR (Fractional Area / Volume Obstacle Representation)* Methode dient der Beschreibung der Berechnungsgeometrie (Flow Science Inc., 2015). Dabei wird die Geometrie dem zugrundeliegenden Berechnungsnetz angepasst. Somit ist die Wahl der Zellgrößen des Berechnungsnetzes entscheidend für die Abbildung der geometrischen Randbedingungen. Die Geometrie der Aufsätze wird als STL-Datei (STL = Stereolithography) eingeladen (Abbildung 57). Aufgrund der sehr feingliedrigen Struktur der Aufsätze werden Zellgrößen mit maximal 4 mm Kantenlänge im Bereich des Aufsatzes gewählt, um die korrekte Abbildung der Geometrie zu gewährleisten und eine im Projektrahmen zu vertretende Rechenzeit zu erreichen.

Zwei verschiedene Aufsätze werden untersucht, der Aufsatz nach DIN 19583 sowie der Aufsatz Multitop. Die STL-Dateien wurden für diese beiden Aufsätze von der Firma ACO Tiefbau zur Verfügung gestellt. Die geometrischen Abmessungen des numerischen Modells entsprechen exakt denen des physikalischen Modells (Maßstab 1:1).

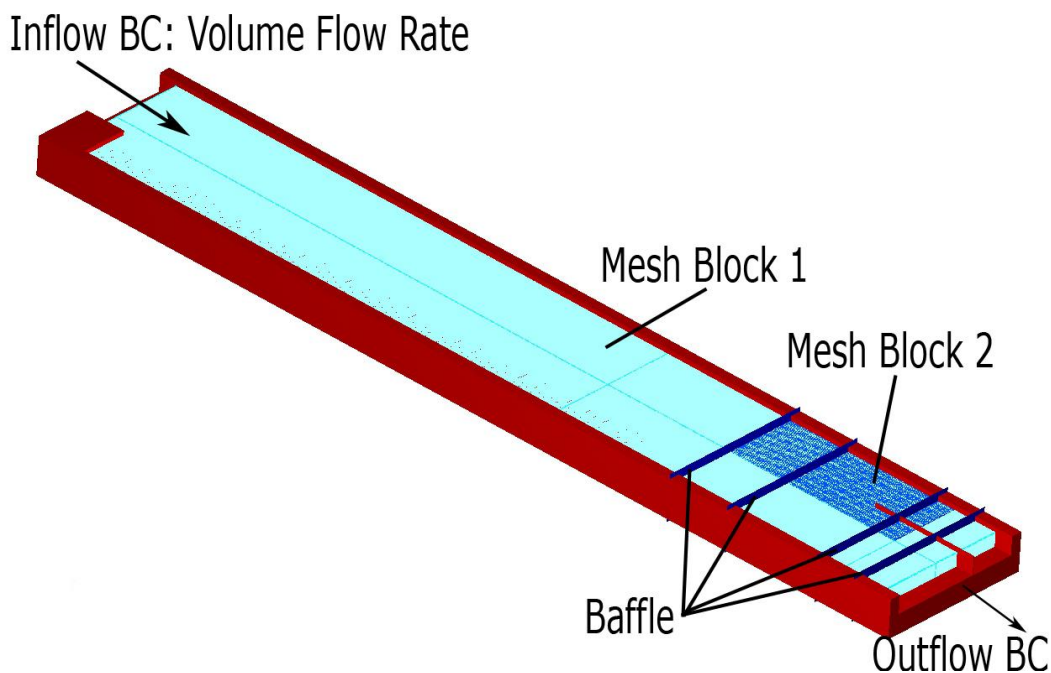


**Abbildung 57:** Aufsätze als STL-Datei (links: Aufsatz nach DIN 19583, rechts: ACO Multitop)

Das im Rahmen des FuE-Projekts erstellte numerische Modell besteht aus zwei Netzblöcken. Die Netzauflösung von *Mesh Block 2* im Bereich des Aufsatzes ist deutlich feiner aufgelöst als der umliegende *Mesh Block 1* (siehe Abbildung 58). Die Zellgrößen von Block 1 (MB 1) werden in Fließrichtung (positive x-Richtung) kontinuierlich kleiner, ebenso in y-Richtung zum Bordstein hin. Die Zellgrößen von Block 2 (MB 2) sind in der x-y-Ebene konstant. Die Zuflussrandbedingung ist als *Volume Flow Rate* definiert, die Unterwasserrandbedingung als *Outflow*, ebenso die Randbedingung für den Ausfluss aus dem Straßenablauf an der Unterseite der Modellgeometrie. Berechnungen mit verschiedenen Rauheiten (Oberflächenrauheit Rinne und

Aufsatz) wurden durchgeführt. Die Fließgeschwindigkeiten und Wassertiefen aus der Numerik wurden mit den gemessenen Laborwerten verglichen.

Die Oberflächenrauheit der Modellrinne ergibt sich demnach zu  $k = 1,5$  mm und die Rauheit des Aufsatzes zu  $k_f = 0,3$  mm. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde der Einfluss verschiedener Netzaufösungen (für MB 1 und 2) zum Nachweis der Netzunabhängigkeit sowie drei verschiedene Turbulenzmodelle ( $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell, RNG Turbulenzmodell,  $k$ - $\omega$ -Turbulenzmodell) untersucht.



**Abbildung 58:** Numerisches Modell

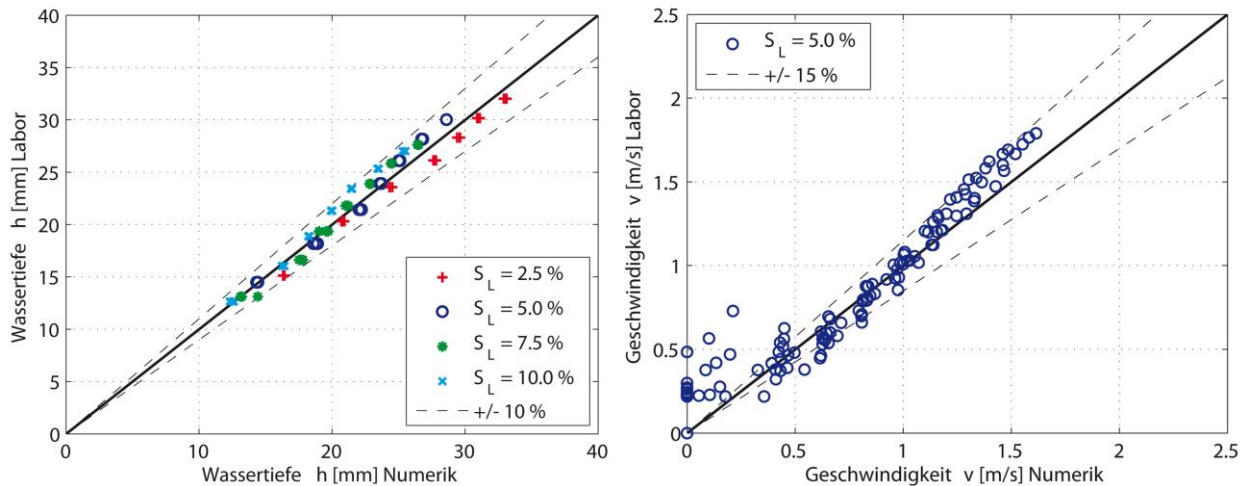
Die Strömungsverhältnisse im Oberwasser des Aufsatzes, die charakterisiert sind durch hohe Fließgeschwindigkeiten mit geringen Wassertiefen und ausschließlich schießendem Abfluss können mit dem numerischen Modell gut abgebildet werden. Die Abweichungen zu den Laborversuchen betragen maximal 10 % für die Wassertiefen und 15 % für die Fließgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 59, links: Wassertiefen, rechts: Fließgeschwindigkeiten). Die im physikalischen Modell eingesetzte Messtechnik weist im Bereich des Übergangs von „nass“ zu „trocken“ Unsicherheiten auf, so dass sich bei sehr geringen Geschwindigkeiten größere Abweichungen der im Labor gemessenen Geschwindigkeiten zu den im numerischen Modell berechneten Geschwindigkeiten im Randbereich zur Straße ergeben.

Die in Abbildung 59 dargestellten Ergebnisse wurden für Zellgrößen von  $dx = dy = 8 - 12$  mm,  $dz = 3$  mm (MB1) und  $dx = dy = 4$  mm,  $dz = 3$  mm (MB2) mit dem RNG Turbulenzmodell (*Renormalized group*, basierend auf  $k$ - $\epsilon$ -Turbulenzmodell) berechnet. Die Gesamtanzahl der Berechnungszellen beträgt ca. 26 Mio. Zellen.

**PC Eigenschaften:** Intel® Core™ i7-4770 CPU 3,40 GHz, 32 GB RAM

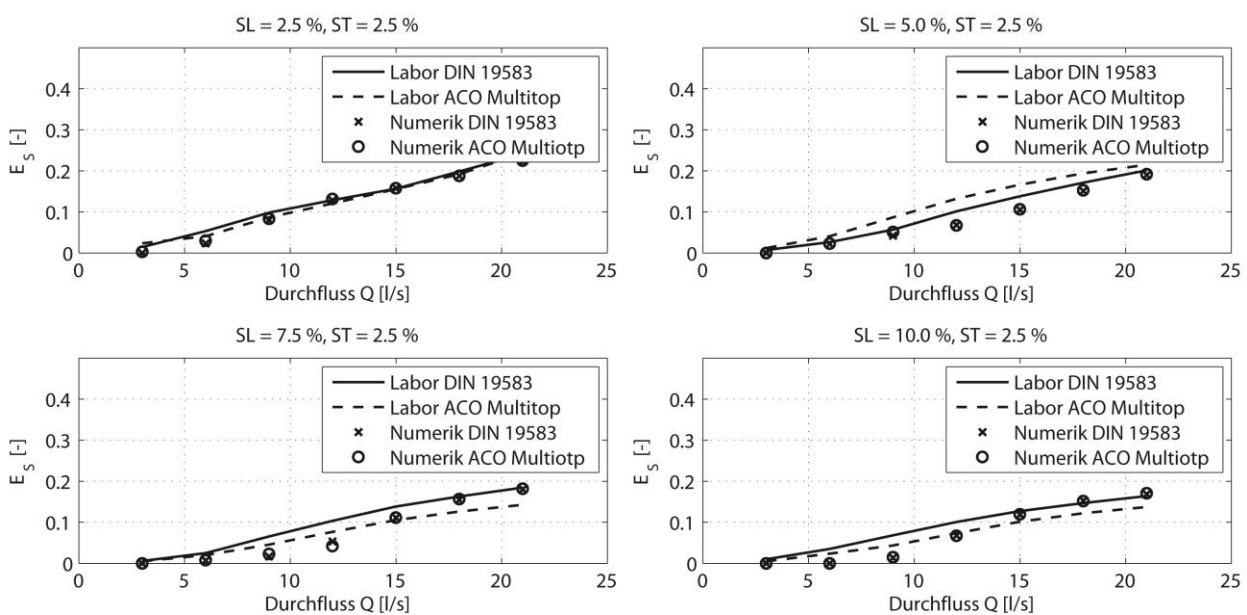
**Simulationszeit:** 15 Sekunden (erreichen eines stationären Zustands) je Modelllauf

**Rechenzeit:** ca. 50 - 100 Stunden je Modelllauf



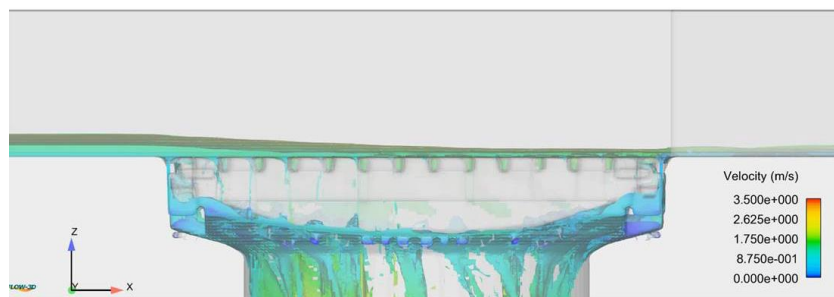
**Abbildung 59:** Labor vs. Numerik (links: Wassertiefen, rechts: Fließgeschwindigkeiten)

Die Abflussbreite und damit auch die am Aufsatz vorbeifließende Wassermenge kann mit dem numerischen Modell ebenfalls gut berechnet werden, wie der Vergleich zwischen physikalischem Modell und Numerik in Abbildung 60 zeigt. Die Abweichungen zwischen Numerik und Labor liegen bei hohen Durchflüssen unter 15 %, bei geringen Abflüssen ergeben sich Abweichungen bis zu 20 %. Der am Aufsatz vorbeifließende Anteil des gesamten Durchflusses  $Q$  liegt wie bereits in Kapitel 3.2.2 beschrieben bei bis zu  $E_S \approx 25 - 30\%$ .



**Abbildung 60:** Am Aufsatz vorbeifließende Wassermenge (Labor vs. Numerik)

Aufgrund der sehr hohen Rechenzeiten waren weitere Modellversuche im Rahmen des Projektes z. B. mit noch feiner aufgelösten Rechnernetzen mit Zellgrößen  $dz < 4$  mm, die durch die sehr geringen Fließtiefen und hohen Geschwindigkeiten auf dem Aufsatz möglicherweise notwendig werden, nicht möglich. Die orientierenden numerischen Modellversuche liefern prinzipiell gute Ergebnisse bezüglich des Einströmverhaltens am Aufsatz (Abbildung 61), allerdings ist die Größenordnung der durch den Aufsatz abfließenden Wassermenge und der über den Aufsatz fließenden Wassermenge noch nicht zufriedenstellen (Abweichungen von über 20 %), so dass hier für die praktische Anwendbarkeit weitere Untersuchungen notwendig werden.



**Abbildung 61:** Numerisches Modell Straßenaufsatz Multitop (Seitenansicht)

## 7 Bewertung der Ergebnisse und Ausblick

Vor dem Hintergrund vermehrt auftretender Starkregenereignisse, die überall auftreten können und nahezu jeder davon betroffen sein kann, wird der Umgang mit Starkregen im urbanen Raum immer wichtiger und es besteht akuter Handlungsbedarf. Nach MunichRe (2015) liegen die typischen individuellen Schadenssummen zwar in moderaten Eurobeträgen, allerdings reicht der Gesamtschaden aus der Vielzahl der Ereignisse im langjährigen Mittel an die der Flusshochwasser heran. Zur Untersuchung der hydraulischen Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen, den Verbindungselementen zwischen Oberfläche und unterirdischem Kanalnetz, wurden physikalische und numerische Modellversuche durchgeführt. Zur Bestätigung der unter realen Bedingungen durchgeführten Modellversuche wurden außerdem Feldversuche unter nahezu realen Bedingungen realisiert.

Mit den dargestellten Untersuchungen konnte die Effizienz von handelsüblich eingesetzten Aufsätzen quantifiziert werden. Mit den gewonnenen Ergebnissen wurde eine weitere Wissenslücke im Umgang mit Starkregen im urbanen Raum wissenschaftlich untersucht. Hiermit kann in Zukunft eine fundierte Auswahl der Straßenabläufe für ein ganzheitlich ausgerichtetes „Risikomanagement Sturzfluten“ erfolgen, wie im Praxisleitfaden „Starkregen und urbane Sturzfluten“ von BWK und DWA (BWK 2013) gefordert. Die Ergebnisse dienen weiterhin als ein Teil der Eingangsdaten für zukünftige Entwässerungsplanungen. Diese Planungen können z.B. mithilfe bidirektional gekoppelter Modelle, mit denen die Ausbreitung sowie die Strömungsverhältnisse des an der Oberfläche abfließenden Regenabflusses besser beschrieben werden können, durchgeführt werden.

Hybride Simulationen vereinen die Vorteile von physikalischen und numerischen Modellversuchen. Die physikalischen Modellversuche zur Ermittlung der Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen weisen eine hohe Anschaulichkeit auf und liefern vergleichsweise schnell Ergebnisse bei bestehendem Versuchsaufbau. Abhängig von der verfügbaren Messtechnik ist die Auswertung verschiedener Größen jedoch eingeschränkt, mit numerischen Modellen ist hingegen die Auswertung beliebiger Größen an allen Orten möglich. Außerdem können im numerischen Modell veränderte geometrische Randbedingungen wie angepasste Aufsätze, Längs- und Querneigungen, etc. vergleichsweise schnell umgesetzt werden, im physikalischen Modell ist dies nur begrenzt möglich. Die orientierenden numerischen Modellversuche haben prinzipiell die Anwendbarkeit numerischer dreidimensionaler Modelle für die Simulation der Strömungsvorgänge an Straßenabläufen aufgezeigt, auch wenn weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich des Einströmverhaltens am Aufsatz besteht.

Die physikalischen Modellversuche haben gezeigt, dass die Effizienz neuartiger Aufsätze im Vergleich zu dem häufig verbauten Standardaufsatz 500 x 500 nach DIN 19583 teilweise bis zu 10 % höher ist. Im Rahmen von Neubau- oder auch Sanierungsmaßnahmen erscheint es hier empfehlenswert, Alternativen zum Standardaufsatz einzubauen. Die Anschaffungskosten sind, wie Tabelle 2 zu entnehmen, in vergleichbarer Größenordnung wie der Standardaufsatz. Der Einlaufquerschnitt spielt hier eine maßgebende Rolle, aber auch die Anordnung der Querstre-



ben hat einen maßgeblichen Einfluss, wie die Ergebnisse des angepassten Aufsatzes MEIDRAIN® gezeigt haben. Für Straßen mit hohem Längsgefälle oder dort wo relativ gesehen erhöhte Ansprüche an die Ableitung von Oberflächenwasser in das Kanalsystem gestellt werden, ist ein Aufsatz mit hoher Schluckfähigkeit und guter Effizienz, wie es zum Beispiel beim Bergeinlauf aufgrund der größeren Öffnungsfläche und der geneigten Querstreben gegeben ist, zu empfehlen.

Zu beachten ist, dass durch die begrenzte Breite der Aufsätze von maximal 500 mm insbesondere bei Straßen mit geringem Längsgefälle nahezu immer ein gewisser Anteil unabhängig vom Aufsatztyp am Straßenablauf vorbei fließt, eine Ausnahme bilden hier Straßenabläufe in Senkenlage (hier nicht näher betrachtet).

Die Feldversuche haben gezeigt, dass die im Labor gemachten Beobachtungen auch unter nahezu realen Bedingungen auf der Straße (z.B. keine Verschmutzung des Aufsatzes) beobachtet werden können.

Die Ergebnisse des FuE-Projektes sind ein wichtiger Baustein in der Gesamtbetrachtung „Umgang mit Starkregen im urbanen Raum“. Ein vollständiger Schutz durch eine veränderte Anordnung von Aufsätzen oder einer optimierten Aufsatzgeometrie vor Überschwemmungen aus Starkregen kann nicht erzielt werden. Allerdings haben die Ergebnisse gezeigt, dass insbesondere bei Regenereignissen im Bereich des Bemessungsfalls das auf der Straße abfließende Wasser durch effiziente Aufsätze verringert werden kann.

Die Aussagekraft der durchgeführten Untersuchungen wird in der Diskussion mit Fachleuten anerkannt. Nichts desto trotz treten innerhalb der Fachwelt regelmäßig zwei weitere zentrale Fragen auf. Zum einen ist der Schlammeimer sehr häufig und insbesondere im Herbst gefüllt (Abbildung 62, rechts), so dass zu untersuchen ist, ob hierdurch eine Abflussbegrenzung im ableitenden System auftritt. Zum anderen legt sich Laub und Schmutz auf dem Aufsatz ab. Zu untersuchen ist, wie sich die Verringerung des Einlaufquerschnitts auf die Leistungsfähigkeit auswirkt. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.



**Abbildung 62:** Verlegung von Straßenablauf-Aufsätzen durch Schmutz oder Laub (links) und gefüllter Schlammeimer (rechts)

## 8 Literaturverzeichnis

- BWK (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten – Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge, BWK-Fachinformation 1/2013.
- Comport, B.C.; Thornton, C.I. (2012): Hydraulic Efficiency of Grate and Curb Inlets for Urban Storm Drainage, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(10), 878-884.
- DIN 19583 (2012): Aufsätze 500 x 500 für Straßenabläufe, Klasse C 250 und Klasse D 400, Teil 1: Zusammenstellung, Teil 2: Einzelteile, Oktober 2012, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DIN EN 752 (2008): Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, April 2008. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin.
- DWA (2013): Methoden der Überflutungsberechnung: Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe ES-2.6 „Abfluss- und Schmutzfrachtsimulation“, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2013(60), Nr. 6, 506-511.
- DWA-A 118 (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsblatt DWA-A 118, DWA-Regelwerk, März 2006. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DWA-M 119 (2015): Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge – Analyse von Überflutungsgefährdungen und Schadenspotenzialen zur Bewertung von Überflutungsrisiken. Entwurf Merkblatt DWA-M 119, DWA-Regelwerk, Juli 2015, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, e.V., Köln.
- Flow Science Inc. (Editor) (2015): FLOW-3D User's manual. Version 11.1.
- Gómez, M.; Russo, B. (2005): Comparative study among different methodologies to determine storm sewer inlet efficiency from test data, 10<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark.
- Guo, J.C.Y. (2000): Design of grate inlets with a clogging factor, *Advances in Environment Research*, 4, 181-186, Elsevier Science.
- Hirt, C.W.; Nichols, B.D. (1981): Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds)]. IPCC, Genf, Schweiz.

Izzard, C.F. (1946): Hydraulics of runoff from developed surfaces, Highway Res. Board Proceedings, 129-150.

KOSTRA-DWD-2000 (2000): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000). Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

LANUV (2014): Starkregen in Nordrhein-Westfalen: Münster mit 292 Litern je Quadratmeter rekordverdächtig. Pressemitteilung, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz, Düsseldorf.

Schlenkhoff, A.; Oertel, M. (2009): Über Starkregen und Sturzfluten – Wenn Böden und Entwässerungssysteme nichts mehr aufnehmen können. BUW-Output II / 2009, Bergische Universität Wuppertal.

Thiele, F. (1983): Fahrbahnlängsentwässerung im Straßengerinne mit kontinuierlichen oder diskreten partiellen Entnahmen und ein Entwurf für zukünftige Richtlinien zur Bemessung, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt.

#### **Internetquellen:**

MunichRE (2015):

<https://www.munichre.com/touch/naturalhazards/de/naturalhazards/hydrological-hazards/flash-flood/risk-situation/index.html>

---

## Anhang

### A Veröffentlichungen

Kemper, S.; Mayer, A.; Schlenkhoff, A. (2016): Modellversuche zur Untersuchung der Effizienz von Straßenabläufen, eingereicht: Korrespondenz Abwasser / Korrespondenz Wasserwirtschaft

Schlenkhoff, A.; Kemper, S.; Mayer, A. (2015): Physikalische Modellversuche zur hydraulischen Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen. gwf-Wasser|Abwasser, 05-2015, Jahrgang 156, S. 550-554.

Kemper, S.; Mayer, A.; Schlenkhoff, A. (2015): Modellversuche zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen bei Starkregenereignissen. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2015 (8), Nr. 2, S. 74-75.

Schlenkhoff, A.; Peterseim, S.; Czickus, S.; Müller, M. (2014): Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen im Kontext des Klimawandels, bbr – Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie, Ausgabe 11-2014, 65. Jahrgang, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.