

Förderprogramm Ressourceneffiziente

Abwasserbeseitigung NRW

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

Abschlussbericht

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

**Begrenzung des Schluckvermögens von Straßenabläufen
durch Verlegung und Verschmutzung**

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

Projektbearbeitung

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



Projektleitung:

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

Bearbeitung:

Dipl.-Biol. Jens Abrigata

Finja Grebien, M.Eng.

Dr.-Ing. Svenja Kemper

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 Juli 2018

Prof. Dr.-Ing. A. Schlenkhoff

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis	III
III.	Tabellenverzeichnis	V
IV.	Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole.....	VI
1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	1
2	Zielsetzung	3
3	Leistungsfähigkeit der Straßenablauf-Aufsätze mit Verlegung durch Laub (verdeckter Aufsatz).....	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Versuchsprogramm.....	6
3.3	Verlegungsmuster.....	9
3.4	Vergleich: Effizienz mit und ohne Verlegung.....	11
3.5	Ergebnisse: Einfluss der Pultaufsatz-Geometrie	18
3.6	Fazit.....	21
4	Leistungsfähigkeit der Straßenablauf-Aufsätze bei teilweise verstopftem Aufsatz	23
4.1	Allgemeines	23
4.2	Versuchsprogramm.....	23
4.3	Ergebnisse.....	25
5	Leistungsfähigkeit des Straßenablauf-Unterteils	31
5.1	Allgemeines	31
5.2	Versuchsprogramm.....	34
5.3	Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung.....	36
5.4	Leistungsfähigkeit Straßenablauf ohne Rückstau aus Kanalisation.....	39
5.5	Leistungsfähigkeit Straßenablauf mit Rückstau aus Kanalisation	39
5.6	Leistungsfähigkeit des Schlammeimers	43
6	Bewertung der Ergebnisse: Gesamtsystem Straßenablauf	47

7	Ausblick.....	49
8	Literaturverzeichnis.....	51

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlegter Straßenablauf-Aufsatz (links) und gefüllter Schlammeimer (rechts)...	2
Abbildung 2: verstopfter und verdeckter Straßenablauf-Aufsatz	3
Abbildung 3: Untersuchte Straßenablauf-Aufsätze, Fließrichtung von links nach rechts (links: Querstreben (PA_Q), mitte: Längsstreben (PA_L), rechts: Diagonalstreben (PA_D)).....	6
Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Laub (links: Initialzustand, rechts oben: Buchenblätter (A), Eichenblätter (B) und Platanenblätter (C), rechts unten: Lagerung der getrockneten Blätter)	8
Abbildung 5: Häufig wiederkehrende Muster der Verlegung im Laborversuch (A: $Q = 3$ l/s, B: $Q = 12$ l/s, C: $Q = 21$ l/s).....	9
Abbildung 6: Zwischenmuster der Verlegung im Laborversuch	10
Abbildung 7: Effizienz E in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_Q).....	13
Abbildung 8: Q_S (links) und Q_O (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_Q)	14
Abbildung 9: Effizienz E in Abhängigkeit von Q (PA_D (oben) und PA_L (unten)).....	15
Abbildung 10: Exemplarischer Vergleich der Verlegungsmuster bei hoher Standardabweichung ($\sigma = 0,2$)	16
Abbildung 11: Q_S (links) und Q_O (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_D).....	17
Abbildung 12: Q_S (links) und Q_O (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_L)	18
Abbildung 13: Effizienz E in Abhängigkeit von Q ohne Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5$ %, $S_L = 5,0$ %).....	19
Abbildung 14: Effizienz E in Abhängigkeit von Q mit Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5$ %, $S_L = 5,0$ %).....	19
Abbildung 15: Effizienz E in Abhängigkeit von Q ohne Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5$ %, $S_L = 7,5$ %).....	20
Abbildung 16: Effizienz E in Abhängigkeit von Q mit Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5$ %, $S_L = 7,5$ %).....	20
Abbildung 17: Längsschnitt Modell verstopfter Aufsatz.....	23
Abbildung 18: Beispielhafter Modelllauf.....	25
Abbildung 19: Effizienz E in Abhängigkeit des Verlegungsgrades C	26
Abbildung 20: Lage der zugesetzten Schlitzte	26

Abbildung 21: Straßenablauf für Trockenschlamm nach DIN 4052-2 (2006) mit Schlammeimer Form A4 nach DIN 4052-4 (2006)	31
Abbildung 22: Anordnung der Quellen im numerischen Modell.....	33
Abbildung 23: Randbedingungen im numerischen Modell	35
Abbildung 24: Untersuchte Füllmengen des Schlammeimers	36
Abbildung 25: Leistungsfähigkeit Anschlussleitung (oben: ohne Schlammeimer, unten: mit Schlammeimer)	37
Abbildung 26: Hydrostatischer Druck in Abhängigkeit des Durchfluss in der Anschlussleitung (links: ohne Schlammeimer, rechts: mit Schlammeimer)	38
Abbildung 27: Durchfluss im Rohr in Abhängigkeit des Zuflusses (links: ohne Schlammeimer, rechts: mit Schlammeimer)	38
Abbildung 28: Wasserspiegellage im Straßenablauf.....	39
Abbildung 29: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation	40
Abbildung 30: Wasserspiegellage im Straßenablauf in Abhängigkeit verschiedener Druckhöhen im Kanal	41
Abbildung 31: Wasserspiegellage im Straßenablauf in Abhängigkeit des Durchflusses im Kanal.....	42
Abbildung 32: Differenz zwischen WSL und Druckhöhe im Kanal in Abhängigkeit des Zuflusses Q	43
Abbildung 33: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation	44
Abbildung 34: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation ($Q = 20$ l/s)	44
Abbildung 35: Interaktion Oberfläche Kanal (Quelle: KEMPER (2018))	49

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Pultaufsätze.....	6
Tabelle 2: Zufluss Q [l/s] je Straßenablauf nach FGSV (2005) und KOSTRA-DWD 2010R (2017).....	7
Tabelle 3: Mittlerer Unterschied der Effizienz mit und ohne Verlegung.....	12
Tabelle 4: Mittlere Effizienz E mit Verlegung durch Laub.....	21
Tabelle 5: Verlegungsmuster und Effizienz E (verstopfter Aufsatz)	24
Tabelle 6: Ergebnisgrafiken Verstopfter Aufsatz	28

IV. Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
A_0	Öffnungsfläche	cm ²
B_R	Breite der Modellrinne	m
B_A	Breite des Straßenablauf-Aufsatzes	mm
C	Faktor (Grad der Verlegung)	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
d	Durchmesser	mm
D	Dauerstufe	min
ds	Stegbreite	mm
dx	Zellgröße in x-Richtung / Schlitzbreite	mm
dy	Zellgröße in y-Richtung	mm
dz	Zellgröße in z-Richtung	mm
E	Effizienz	[-]
H_R	Höhe der Modellrinne	m
h	Wassertiefe	m
k	Oberflächenrauheit	mm
L_R	Länge der Modellrinne	m
L_A	Länge des Straßenablauf-Aufsatzes	mm
MB	Mesh Block	
n	Stichprobenumfang	
P	Druckhöhe	m
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_{Rohr}	Durchfluss in der Anschlussleitung	l/s
Q_S	Am Aufsatz vorbeifließendes Wasservolumen pro Zeit	l/s
Q_F	Frontaler Zufluss (zum Aufsatz)	l/s
S_L	Längsneigung	[-]
S_T	Querneigung	[-]
t	Blechdicke	mm
T	Wiederkehrzeit	a
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
W	Abflussbreite auf der Straße	m
x	Messwert	
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert	
σ	Standardabweichung	
Δ	Differenz	

1 Einleitung

1.1 *Motivation*

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 Niederschlagsereignissen im urbanen Raum, wie vergangene Ereignisse z.B. am 26. Juli 2008 in Dortmund, am 28. Juli 2014 in Münster oder im Sommer 2016 in Süddeutschland gezeigt haben.

Aus Beobachtungen konnte festgestellt werden, dass nicht nur bei Starkniederschlägen, sondern schon bei ungünstigen Kombinationen aus intensiven Niederschlägen und Abflusseinschränkungen erhebliche Wassermengen über die Straße ablaufen, obwohl das Kanalnetz lokal keinesfalls überlastet ist. Insbesondere bei steilen Straßen fließt das Wasser über die Straßenabläufe hinweg bzw. an diesen vorbei und wird nicht unmittelbar in das Kanalnetz eingeleitet. Diese Beobachtungen konnten in physikalischen und numerischen Modellversuchen bestätigt und quantifiziert werden (vgl. Abschlussbericht „Ableitung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen Raum: Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen“, 2016). In den Untersuchungen wurde die Leistungsfähigkeit der Aufsätze unter Annahme eines Idealzustandes – freier Aufsatz und freier Abfluss ohne Rückstau aus Unterteil und Kanalisation – bestimmt.

In der Realität stellen sich die Verhältnisse aber oft anders dar, Laub und Astwerk lagert sich auf den Aufsätzen ab und verringert so den Einlaufquerschnitt. Besonders bei geringen Schlitzweiten kann Schmutz und Laub zur Verstopfung der Schlitze führen. Der Einfluss der Verlegung muss bei der Beschreibung der Leistungsfähigkeit des Aufsatzes berücksichtigt werden. Neben dem Aufsatz selbst können aber auch die dem Aufsatz nachgeschalteten Komponenten die Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs begrenzen. Die Schlammeimer sind häufig voll, so dass die Ausflussfläche des Eimers deutlich verringert wird. Auch ist unklar, ob die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung mit einer üblichen Nennweite DN150 ausreicht. Diese zentralen Fragestellungen tauchen regelmäßig in der Diskussion auf und es wird häufig angemerkt, dass die Umsetzung der theoretischen Werte in der Praxis zur Beeinträchtigung führen kann.

1.2 *Stand der Forschung*

Die aktuelle Bemessungsrichtlinie für die Dimensionierung der Straßenentwässerung bildet die Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung [RAS-Ew] (FGSV, 2005). Die Straßenabläufe nehmen das über Straßenrinnen oder –mulden zufließende Oberflächenwasser auf und leiten es über Anschlussleitungen zum Straßenkanal weiter.



Abbildung 1: Verlegter Straßenablauf-Aufsatz (links) und gefüllter Schlammeimer (rechts)

In der Richtlinie RAS-Ew wird eine mögliche Einengung des Abflussquerschnitts pauschal mit einem konstanten Sicherheitsfaktor von 1,5 berücksichtigt. Die Abflussmenge auf der Straße wird durch Multiplikation mit dem Sicherheitsfaktor erhöht.

International gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die die hydraulischen Verhältnisse des Einströmens sowie die Leistungsfähigkeit der Aufsätze unter Berücksichtigung eines sogenannte „Clogging Factors“ – Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von zugesetzten Aufsätzen, beschreiben.

An der University of Colorado, Denver, USA wurden diesbezüglich physikalische Modellversuche für vor Ort eingesetzte Straßenabläufe durchgeführt (GUO & MACKENZIE, 2012). Die Autoren empfehlen eine pauschale Reduzierung der Leistungsfähigkeit von 50 % bei einer Anordnung einzelner Pultaufsätze. Werden mehrere Pultaufsätze hintereinander angeordnet, wird eine Reduzierung des Beiwerts mit zunehmender Anzahl an Aufsätzen empfohlen. SPALIVIERO ET AL. (2000) empfehlen einen Abminderungsfaktor zwischen 0,7 und 1,0 (keine Verlegung). Nach BROWN ET AL. (2009) kann bei relativ steilen Straßen der Einfluss durch Verlegung bei Pultaufsätzen vernachlässigt werden.

2 Zielsetzung

Aufbauend auf den bereits durchgeführten physikalischen und numerischen Modellversuchen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen unter idealen Bedingungen sollen mit einem Untersuchungsprogramm die aufgeworfenen Fragen zur Aufnahmefähigkeit des Straßenablaufs unter Berücksichtigung von Verlegung, gefüllten Schlammeimern und der Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung orientierend abgeschätzt werden und gegebenenfalls weiterer Handlungs- und Untersuchungsbedarf identifiziert werden.



Abbildung 2: verstopfter und verdeckter Straßenablauf-Aufsatz

- Ermittlung der Leistungsfähigkeit mit Verlegung durch echtes Laub (verdeckter Aufsatz)
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit mit definiertem Verlegungsraster (verstopfter Aufsatz)
- Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Straßenablauf-Unterteils inkl. Schlammeimer und Anschlussleitung

3 Leistungsfähigkeit der Straßenablauf-Aufsätze mit Verlegung durch Laub (verdeckter Aufsatz)

3.1 Allgemeines

In einem umfangreichen Versuchsprogramm wird das Ablagerungsverhalten von echtem Laub am Straßenablauf-Aufsatz dokumentiert und die Leistungsfähigkeit des teilweise verdeckten Aufsatzes bestimmt. Die Leistungsfähigkeit ist dabei definiert als der Abfluss durch den Straßenablauf-Aufsatz Q_I . Die Effizienz E ist definiert als das Verhältnis des aufgenommenen Abflusses Q_I zum gesamten Zufluss Q mit:

$$E = \frac{Q_I}{Q} \quad (1)$$

Das physikalische Modell besteht aus einer rechteckigen Rinne aus Acrylglas mit Länge \times Breite \times Höhe = $L_R \times B_R \times H_R = 10,00 \text{ m} \times 1,50 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$. Die Breite der Modellrinne entspricht etwa der halben Breite eines Fahrstreifens. Die Straßenrinne ist als befahrbare Bordrinne ausgeführt, d.h. die Straßenrinne besitzt die gleiche Quer- und Längsneigung wie die anschließende Verkehrsfläche.

Die Oberfläche der Modellrinne ist mit Dachpappe beklebt, wodurch die Oberfläche einer Asphaltstraße nachgebildet wird (Oberflächenrauheit $k \approx 1,5 \text{ mm}$). Die Längsneigung S_L und die Querneigung S_T können variabel eingestellt werden. In eine Aussparung am unteren linken Rand des Bodens der Modellrinne können handelsübliche Pultaufsätze mit Abmessungen bis zu $L_A \times B_A = 1.000 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ eingebaut werden.

Mit zwei Pumpen können bis zu $Q = 50 \text{ l/s}$ aus einem Tiefbecken durch Rohrleitungen in ein an die Modellrinne angeschlossenes Hochbecken gepumpt werden, von wo aus das Wasser auf die Modellrinne gelangt. Das gesamte aus dem Modell abfließende Wasser fließt über einen Leitkanal wieder in das Tiefbecken. Die Zuflussregulierung erfolgt stufenlos mithilfe von Drosseln, der Durchfluss wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmessgerät kontrolliert.

Über eine kontinuierliche Gewichtsmessung mit Plattform-Wägezellen werden zwei Volumenströme messtechnisch erfasst: das am Straßenablauf vorbeifließende Wasser Q_S und das über den Aufsatz hinwegfließende Wasser Q_O . Das vom Straßenablauf aufgenommene Wasser Q_I wird wie folgt berechnet:

$$Q_I = Q - (Q_S + Q_O) \quad (2)$$

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 Modellrinne gleichförmige Abflussbedingungen ein, so dass im Bereich des Straßenablaufs nach 8,5 m Zulaufstrecke kein Einfluss durch den oberen Modellrand besteht.

3.2 Versuchsprogramm

Drei verschiedene Straßenablauf-Aufsätze in Pultform werden hinsichtlich der Leistungsfähigkeit bei teilweise verdecktem Aufsatz untersucht. Die Aufsätze unterscheiden sich in der Orientierung der Streben (siehe Abbildung 3): Querstreben (links, Standardaufsatz nach DIN 19583 (2012)), Längsstreben (mitte) und Diagonalstreben (rechts), die Fließrichtung ist jeweils von links nach rechts. Für die äußeren Abmessungen der Aufsätze gilt: $L_A \times B_A = 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$. Weitere Eigenschaften wie Öffnungsfläche oder Schlitzbreite sind in Tabelle 1 zusammengefasst.



Abbildung 3: Untersuchte Straßenablauf-Aufsätze, Fließrichtung von links nach rechts (links: Querstreben (PA_Q), mitte: Längsstreben (PA_L), rechts: Diagonalstreben (PA_D))

Tabelle 1: Eigenschaften der Pultaufsätze

	Öffnungsfläche [cm ²]	Schlitzbreite [mm]	Stegbreite [mm]
PA_Q	980	36	32
PA_L	955	31	32
PA_D	970	26	24

Die Längsneigung wird zwischen $S_L = 2,5 \%$ und $S_L = 10,0 \%$ mit $\Delta S_L = 2,5 \%$ variiert. Die Querneigung wird konstant mit $S_T = 2,5 \%$ eingestellt, was der Mindest- und Regelquerneigung von anbaufreien Hauptverkehrsstraßen entspricht (FGSV, 2006).

Bei einer angeschlossenen Fläche von 400 m^2 je Straßenablauf, die nach FGSV (2005) empfohlen wird, ergeben sich auf der Grundlage von Niederschlagsspenden nach KOSTRA-DWD 2010R (2017) die in Tabelle 2 aufgeführten Zuflüsse zu einem Straßenablauf (ohne Abflussbeiwert), beispielhaft für drei Städte in NRW. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass der von

oberhalb liegenden Straßenabläufen nicht aufgenommene Abfluss zusätzlich den unterhalb liegenden Straßenabläufen zufließt (Akkumulation).

Um auch starke Niederschlagsereignisse mit Jährlichkeiten bis zu $T = 100$ a bzw. die Akkumulation des Abflusses auf der Straße bei häufigeren Niederschlagsereignissen zu berücksichtigen, werden Zuflüsse zwischen $Q = 3$ l/s und $Q = 21$ l/s mit $\Delta Q = 3$ l/s untersucht.

Tabelle 2: Zufluss Q [l/s] je Straßenablauf nach FGSV (2005) und KOSTRA-DWD 2010R (2017)

T [a] \ D [min]	1,0	2,0	5,0	10,0	20,0	30,0	50,0	100,0
Wuppertal (Rasterzelle 51,12)								
5,0	6,93	9,60	12,93	15,60	18,13	19,73	21,60	24,13
10,0	5,53	7,20	9,40	11,07	12,73	13,73	15,00	16,67
15,0	4,58	5,87	7,60	8,89	10,18	10,93	11,91	13,20
Düsseldorf (Rasterzelle 52,8)								
5,0	6,40	8,27	10,93	12,93	14,93	16,13	17,60	19,60
10,0	5,07	6,47	8,27	9,67	11,00	11,80	12,87	14,20
15,0	4,22	5,33	6,80	7,91	9,02	9,69	10,49	11,60
Münster (Rasterzelle 42,16)								
5,0	6,53	8,80	11,87	14,13	16,40	17,73	19,33	21,60
10,0	5,27	6,73	8,73	10,20	11,67	12,53	13,67	15,13
15,0	4,36	5,51	7,07	8,22	9,38	10,09	10,93	12,09

Für die Durchführung der Laborversuche zur Verlegung von Straßenabläufen mit Laub wurde pro Modelllauf ein 400 g-Gemisch aus getrocknetem Laub abgewogen. Das Gemisch bestand jeweils zu gleichen Teilen aus kleinen Buchenblättern, mittelgroßen Eichenblättern und großen Platanenblättern. Vor Messbeginn wurden die abgewogenen Blätter eingeweicht, um ein Aufschwimmen der Blätter zu vermeiden. Die Blätter wurden vor Beginn des Experiments am äußeren Rand des physikalischen Modells platziert (Abbildung 4). Das Laub wurde auf einer Strecke von etwa 5 m zurechtgelegt und reichte bis direkt vor den jeweiligen Aufsatz.

Nach einer Vorlaufzeit von einer Minute nach Anschalten der Pumpe wurde die Messung für 30 Sekunden durchgeführt. Da eine Streuung der Messwerte wegen des „chaotischen“ Systems des sich anordnenden Laubs zu erwarten war, wurden mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt. Die Stichprobengröße je Einstellungskombination (Längsneigung, Durchfluss,

Aufsatz) wurde aufgrund des hohen zeitlichen Aufwands auf sechs Modellläufe (fünf Wiederholungsmessungen) festgesetzt.

In der späteren Datenauswertung wurde der Median sowie die Standardabweichung aller sechs Messwerte bestimmt. Der Median ist die Zahl, die in der Mitte der gemessenen Zahlenreihe liegt. Da bei den vorliegenden Messungen eine gerade Anzahl an Werten vorliegt, besteht der Median aus dem arithmetischen Mittel der beiden Zahlenwerte in der Mitte. Die Standardabweichung wurde ausgehend von einer Stichprobe abgeschätzt. Sie ist ein Maß dafür, wie weit die gemessenen Werte um den Mittelwert streuen. Die Standardabweichung wird wie folgt berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (3)$$

mit \bar{x} = arithmetischer Mittelwert und n = Stichprobenumfang.



Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Laub (links: Initialzustand, rechts oben: Buchenblätter (A), Eichenblätter (B) und Platanenblätter (C), rechts unten: Lagerung der getrockneten Blätter)

3.3 Verlegungsmuster

Bei der Verlegung von Straßenabläufen durch Laub wird im Laborversuch deutlich, dass die optisch wahrnehmbare Verlegung in bestimmten Mustern abläuft, die häufig wiederkehren und vom jeweiligen Durchfluss abhängig sind. Es lassen sich drei typische Muster dabei unterscheiden, dargestellt in Abbildung 5. So ist bei geringen Durchflüssen ($Q < 12$ l/s) zu beobachten, dass das gesamte Laub auf der Rinne verbleibt und zum größten Teil nicht bis zum Straßenablauf gelangt. Gleichzeitig bildet sich eine „Gasse“ aus Laub an der seitlichen Modellwand (Abbildung 5 A). Bei mittleren Durchflüssen ($Q \sim 12$ l/s) kann beobachtet werden, dass sich das Laub ungefähr zur Hälfte auf dem Aufsatz festsetzt. Die andere Hälfte des Laubs bildet zumeist noch eine (breitere) Rinne (Abbildung 5 B). Bei großen Durchflüssen ($Q = 21$ l/s) verbleibt ein großer Teil des Laubs auf dem Aufsatz (Abbildung 5 C). Dabei konnte beobachtet werden, dass ein nicht unerheblicher Teil des Laubs dann allerdings bereits aus der Rinne gespült wurde. Bei den hier nicht aufgeführten Durchflüssen können Zwischenmuster entstehen.

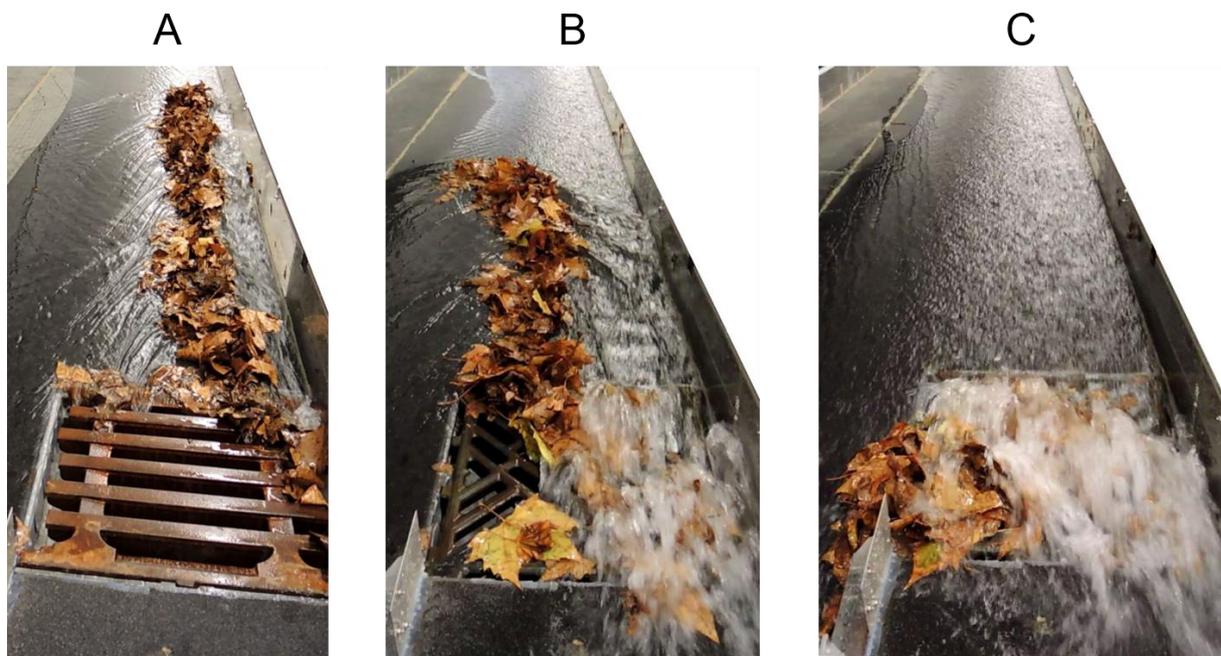
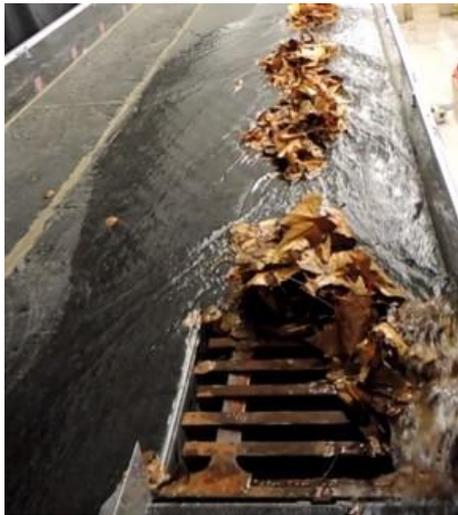


Abbildung 5: Häufig wiederkehrende Muster der Verlegung im Laborversuch
(A: $Q = 3$ l/s, B: $Q = 12$ l/s, C: $Q = 21$ l/s)

Als Beispiele für Zwischenmuster bei der Verlegung von Aufsätzen mit Laub, wurden exemplarisch sechs Verlegungsmuster gewählt (Abbildung 6). Bei allen sechs Beispielen beträgt die Längsneigung $S_L = 5$ %. Die Durchflüsse und Aufsätze variieren. Im Vergleich zu den in Abbildung 5 gezeigten häufig wiederkehrenden Verlegungsmustern können hier Ähnlichkeiten festgestellt werden. Teilweise überlagern sich die einzelnen Muster.



(a) $Q = 6 \text{ l/s}$



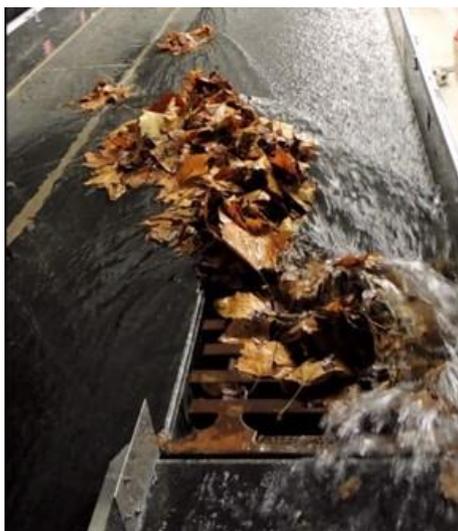
(b) $Q = 9 \text{ l/s}$



(c) $Q = 15 \text{ l/s}$



(d) $Q = 18 \text{ l/s}$



(e) $Q = 15 \text{ l/s}$



(f) $Q = 6 \text{ l/s}$

Abbildung 6: Zwischenmuster der Verlegung im Laborversuch

3.4 Vergleich: Effizienz mit und ohne Verlegung

In Abbildung 7 ist für den **Standardaufsatz PA_Q** die Effizienz für alle Modellläufe mit und ohne Verlegung dargestellt. Der absolute Effizienzunterschied ΔE wird wie folgt berechnet:

$$\Delta E = E_{frei} - E_{verlegt} \quad (4)$$

Es ist zu erkennen, dass die Effizienz bei einer Verlegung durch Laub in allen Modellläufen abnimmt. Für Durchflüsse zwischen $Q \approx 6$ l/s und $Q \approx 18$ l/s ist dabei eine deutliche Abnahme der Effizienz zu erkennen. Die Effizienzeinbußen liegen im Einzelfall bei bis zu 20 Prozent.

Bei sehr geringen Zuflüssen ($Q = 3$ l/s) wird aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten teilweise nur wenig Laub transportiert, sodass sich auch nur wenige Blätter auf den Aufsätzen absetzen. Der verbleibende Einlaufquerschnitt reicht dann immer noch aus, um den gesamten frontal zufließenden Abfluss aufzunehmen. Daher ergeben sich hier teilweise nur geringe Unterschiede in der Effizienz im Vergleich zum freien Aufsatz. Bei hohen Abflüssen mit $Q \geq 18$ l/s ist der gesamte Effizienzunterschied ΔE ebenfalls sehr gering. Hier ist zu erkennen, dass sich jedoch der Anteil des am Aufsatz vorbeifließenden Wassers und des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers im Vergleich zum freien Aufsatz insbesondere bei hohen Längsneigungen unterscheidet, dargestellt in Abbildung 8. Mit Laub fließt bei hohen Längsneigungen und großen Abflüssen mehr über den Aufsatz hinweg und weniger am Aufsatz vorbei als im freien Zustand. In diesen Fällen konnte im Laborversuch beobachtet werden, dass sich das Laub vor dem Aufsatz ansammelt und eine Art „Sprungschanze“ bildet und das Wasser damit eher über den Aufsatz hinweg geleitet wird und weniger Wasser durch den Aufsatz abfließen kann. Vor dem Straßenablauf bildet sich wie bereits beschrieben, eine Art „Gasse“ aus, wodurch das Wasser konzentriert am Bordstein abfließt und der Anteil des seitlich vorbeifließenden Abflusses abnimmt.

Auffällig ist, dass bei einer geringen Längsneigung ($S_L = 2,5$ %) die Streuung sehr groß ausfällt. Dies zeigt sich auch in den veränderten Anteilen des am Aufsatz vorbeifließenden und des über den Aufsatz hinwegfließenden Abflusses. Hier kann eine mögliche Erklärung in den geringen Fließgeschwindigkeiten und der verhältnismäßig großen Wasserspiegelbreite liegen. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeiten wird das Laub weniger stark transportiert.

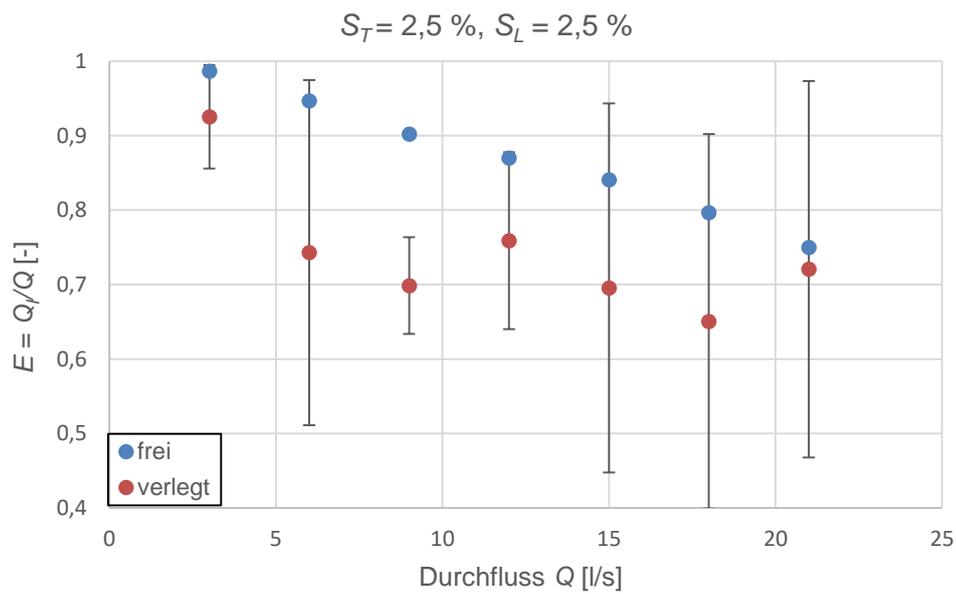
Für eine bessere Einschätzung des Effizienzunterschieds bei den unterschiedlichen Längsneigungen wurde der mittlere Unterschied, gemittelt über alle Durchflüsse, bestimmt (Tabelle 3).

Bei einer Längsneigung von $S_L = 2,5$ % ergibt sich ein mittlerer Unterschied von $\Delta E = 0,129$. Für $S_L = 5,0$ % gilt im Mittel $\Delta E = 0,095$, für eine Längsneigung von 7,5 % ergibt sich ein mittlerer Effizienzunterschied von $\Delta E = 0,120$ und für eine Längsneigung von 10 % ist der Unterschied im Mittel bei $\Delta E = 0,108$.

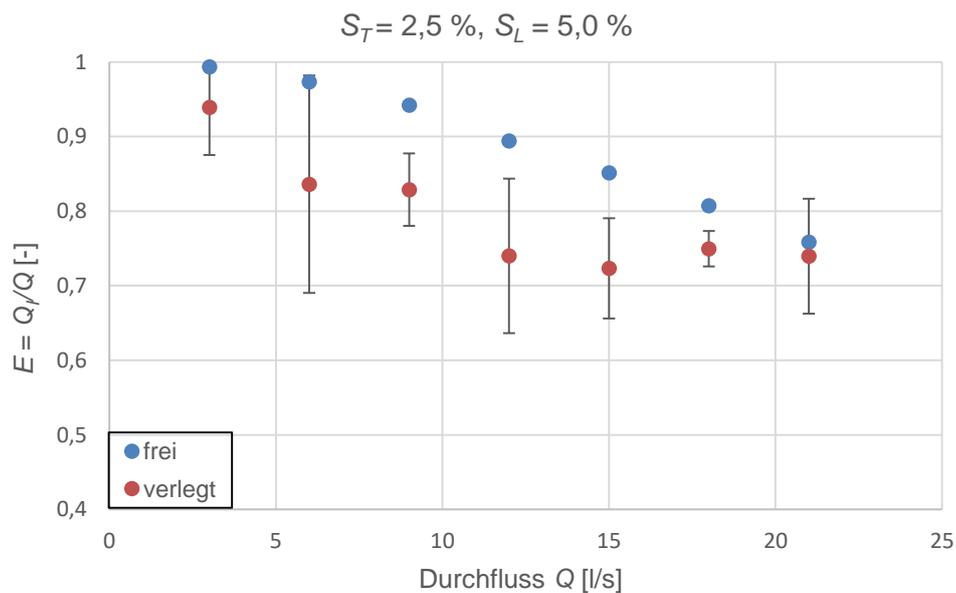
Tabelle 3: Mittlerer Unterschied der Effizienz mit und ohne Verlegung

Längsneigung [%]	Mittlerer Effizienzunterschied: ΔE [-]		
	PA_Q	PA_D	PA_L
2,5	0,129	N/A	N/A
5,0	0,095	0,065	0,101
7,5	0,120	0,129	0,057
10,0	0,108	N/A	N/A

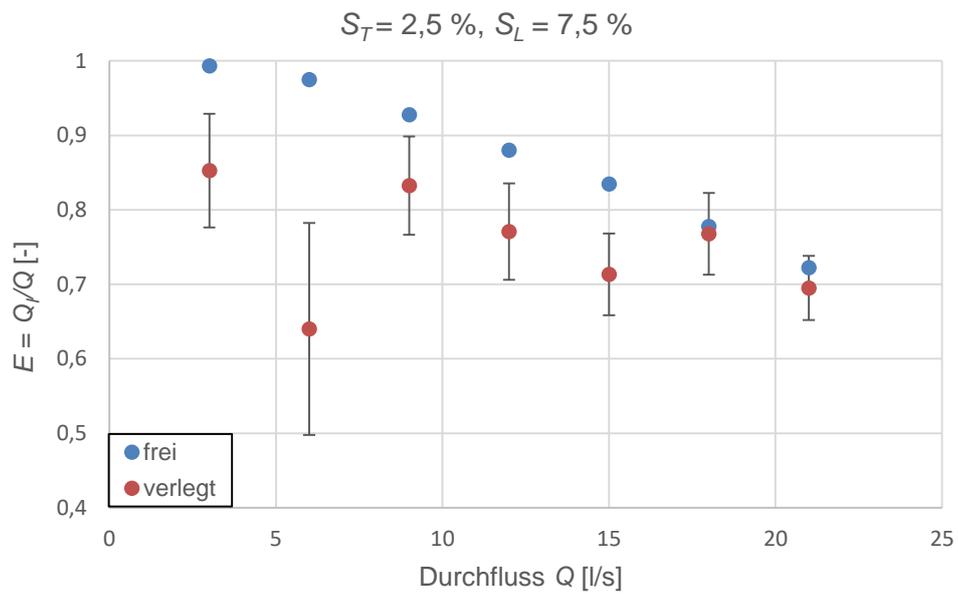
N/A = nicht verfügbar



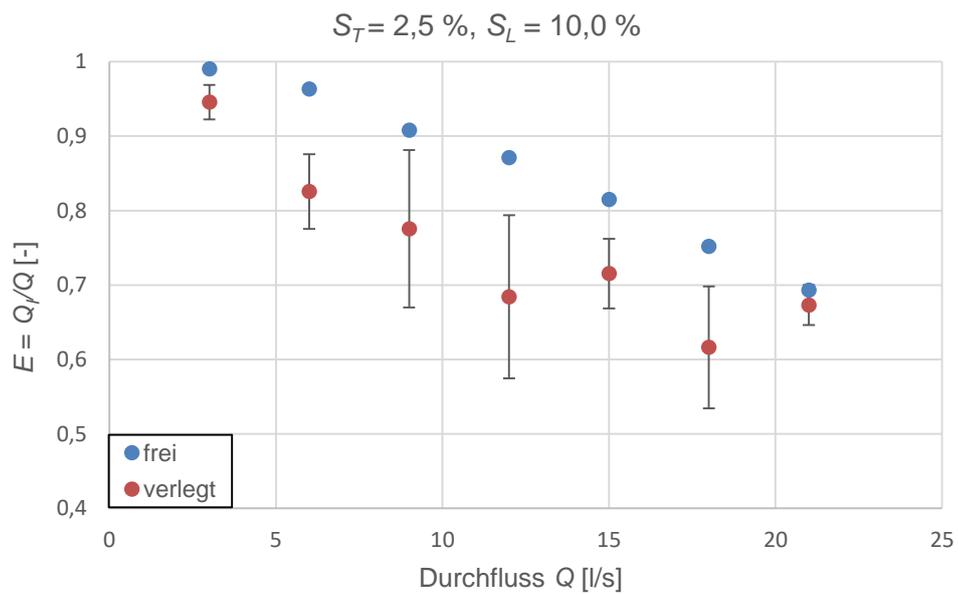
(a) Längsneigung: 2,5 %



(b) Längsneigung: 5,0 %



(c) Längsneigung: 7,5 %



(d) Längsneigung: 10,0 %

Abbildung 7: Effizienz E in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_Q)

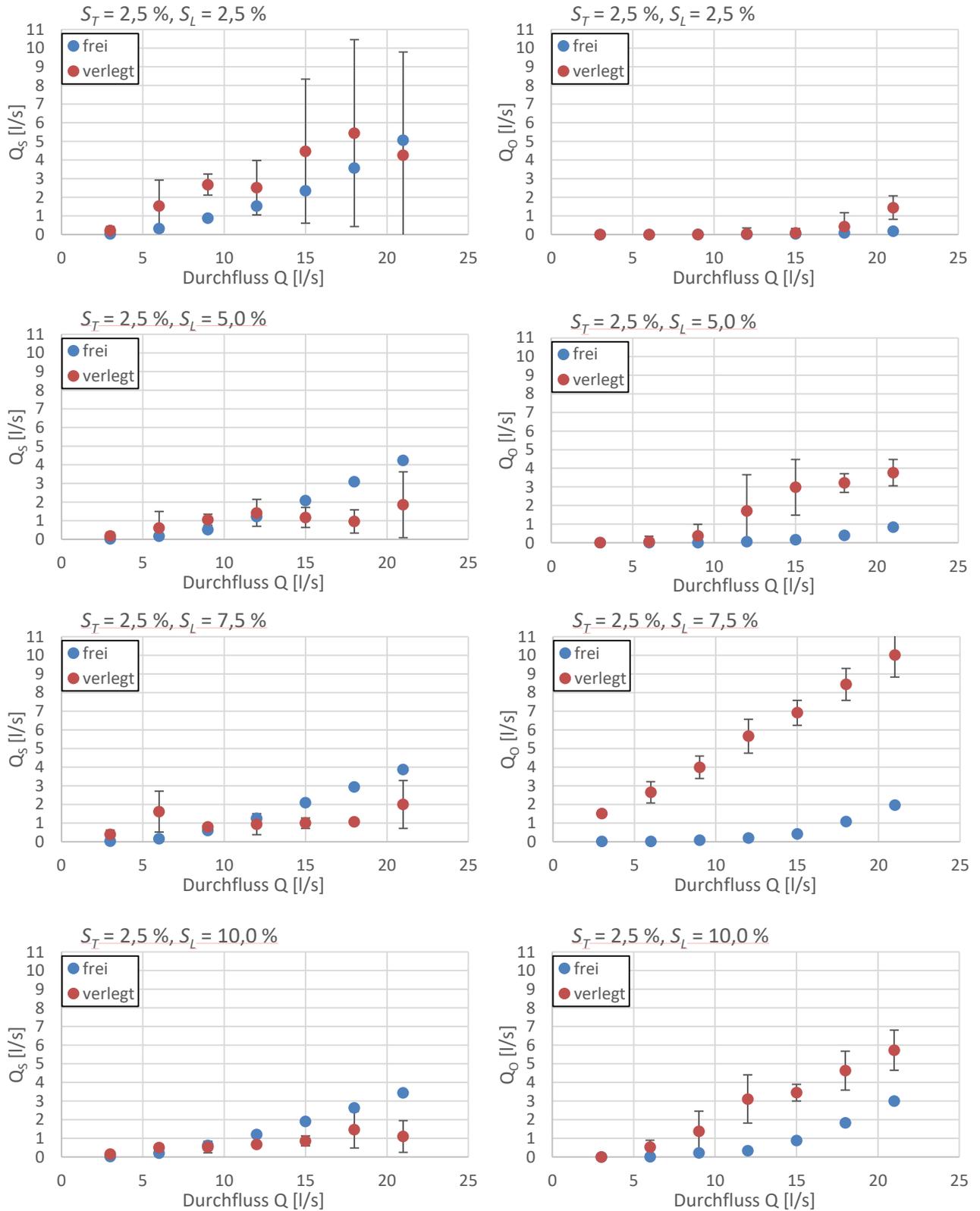


Abbildung 8: Q_s (links) und Q_o (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_Q)

Für die Aufsätze PA_D und PA_L wurden jeweils nur die Längsneigungen $S_L = 5,0\%$ und $S_L = 7,5\%$ für alle Durchflüsse untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Effizienz auch hier durch die Verlegung mit Laub abnimmt. Der mittlere Effizienzunterschied des Aufsatzes mit Diagonalstreben PA_D ergibt sich bei einer Längsneigung von $S_L = 5,0\%$ zu $\Delta E = 0,065$, bei einer Längsneigung von $S_L = 7,5\%$ zu $\Delta E = 0,129$ ((Abbildung 9, oben, Tabelle 3).

Die Messungen mit dem Aufsatz PA_L (Abbildung 9, unten) ergeben einen mittleren Unterschied der Effizienz bei einer Längsneigung von $S_L = 5,0\%$ von $\Delta E = 0,101$, bei einer Längsneigung von $S_L = 7,5\%$ von $\Delta E = 0,057$ (Tabelle 3).

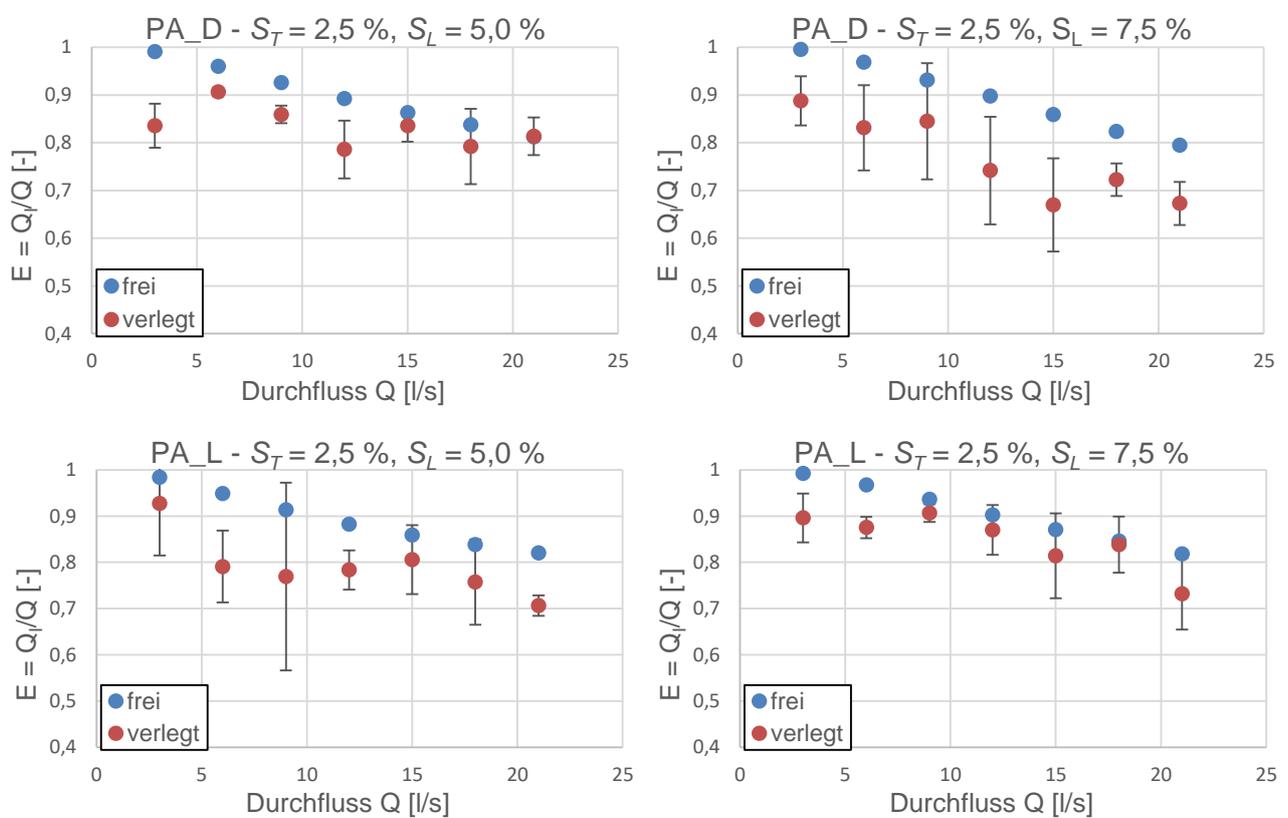


Abbildung 9: Effizienz E in Abhängigkeit von Q (PA_D (oben) und PA_L (unten))

Bei den in Abbildung 9 dargestellten Ergebnissen fällt auf, dass z.B. für den Aufsatz PA_L bei einer Längsneigung von $S_L = 5,0\%$ und einem Durchfluss von $Q = 9 l/s$ eine hohe Standardabweichung auftritt ($\sigma = 0,2$). Die gemessenen Effizienzen schwanken hier von $E_{min} = 0,29$ bis $E_{max} = 0,90$. Die durchschnittliche Effizienz aller Messungen liegt bei $E = 0,76$. In Abbildung 10 sind beispielhaft die zugehörigen Verlegungsmuster gezeigt: (A) $E = 0,29$, (B) $E = 0,90$ und (C) $E = 0,76$. In diesem Beispiel zeigt sich, dass das „Auftürmen“ von Laub vor dem Aufsatz die Leistungsfähigkeit beeinflusst. Umso weniger Laub vor dem Aufsatz liegt, desto höher die Leistungsfähigkeit.

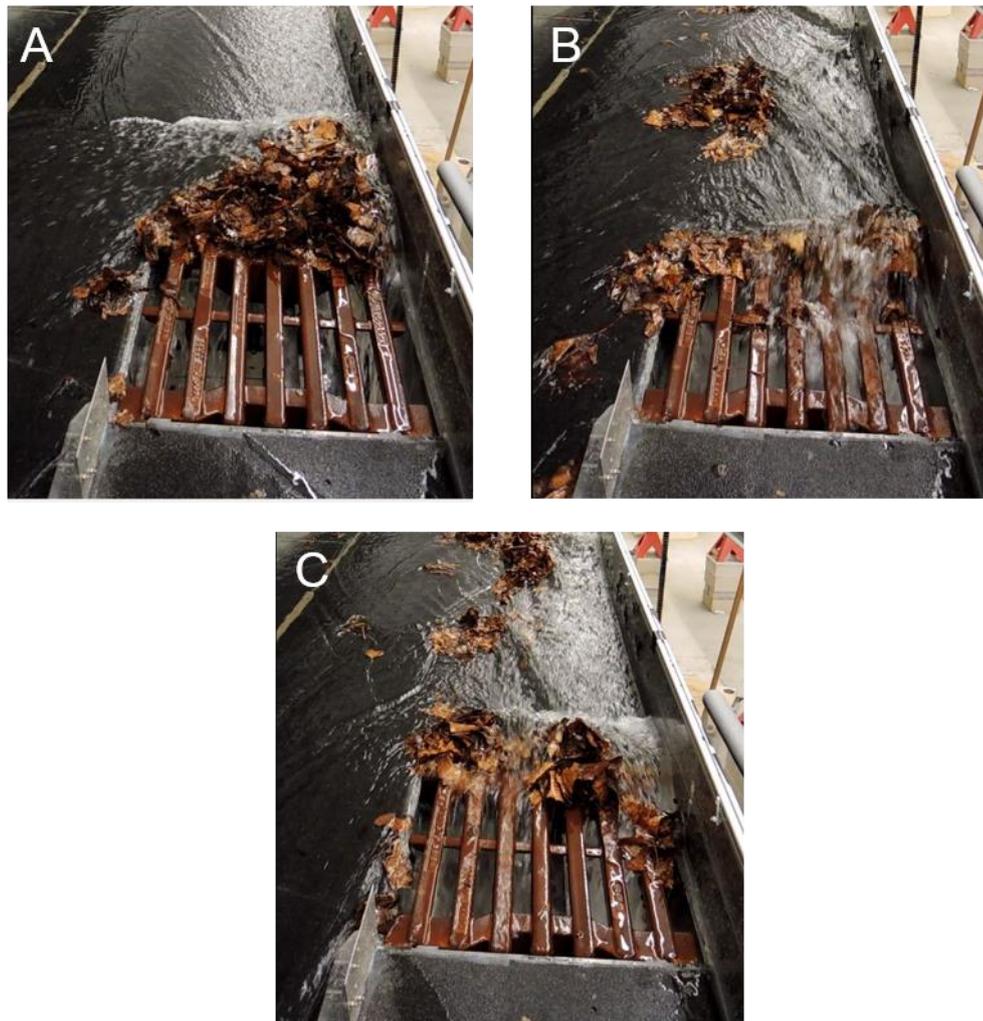


Abbildung 10: Exemplarischer Vergleich der Verlegungsmuster bei hoher Standardabweichung ($\sigma = 0,2$)

Die Effizienz der Straßenablauf-Aufsätze ist im Mittel um 10 % kleiner als im idealen Zustand, so dass überschlägig gilt:

$$E_{\text{verlegt}} = 0,9 \cdot E_{\text{frei}} \quad (5)$$

Die Verteilung der Volumenströme Q_S und Q_O für die Aufsätze PA_D und PA_L sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt. Für den Anteil des über den Aufsatz hinwegfließenden Wassers zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie beim Standardaufsatz PA_Q . Bei verlegtem Aufsatz fließt im Durchschnitt mehr über den Aufsatz hinweg als bei freiem Aufsatz. Das am Aufsatz vorbeifließende Wasser wird stark durch das vor dem Aufsatz abgelagerte Laub beeinflusst. Hier zeigen sich deutlich Schwankungen.

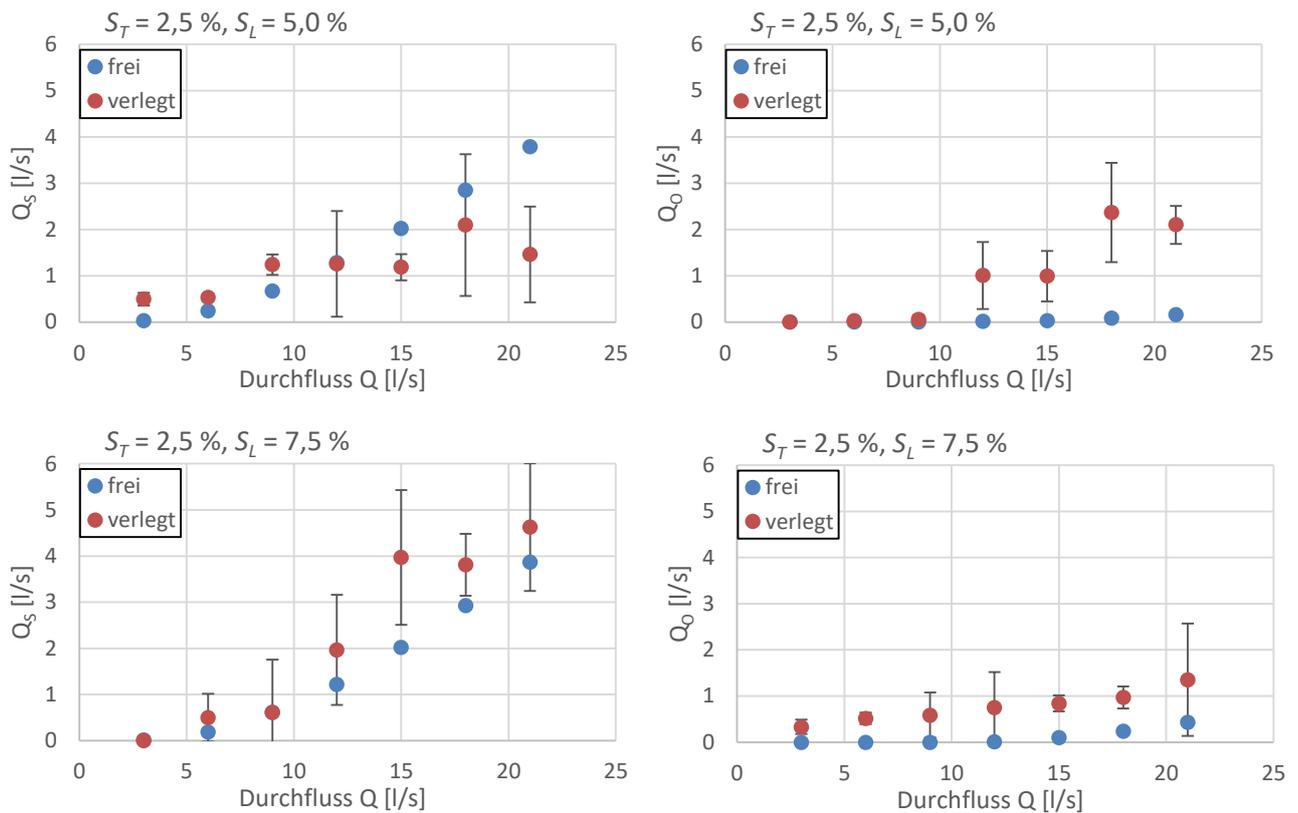


Abbildung 11: Q_s (links) und Q_o (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_D)

Die Effizienz E ist bei verlegtem Straßenablauf-Aufsatz im Mittel um 10 % kleiner als bei freiem Straßenablauf, liegt aber immer noch bei über 70 %.

Q_s ist bei verlegtem Straßenablauf größtenteils kleiner als bei freiem Straßenablauf.

Q_o ist bei verlegtem Straßenablauf größer als bei freiem Straßenablauf.

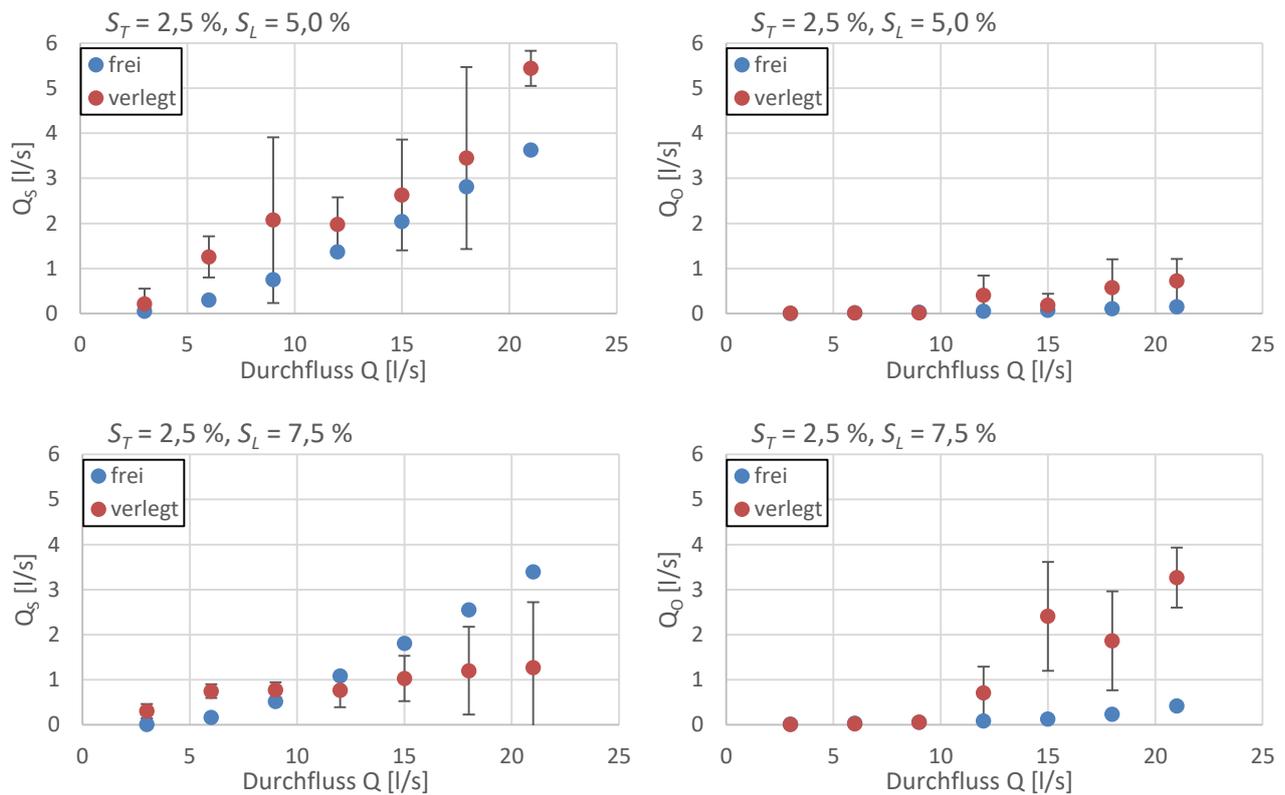


Abbildung 12: Q_S (links) und Q_O (rechts) in Abhängigkeit von Q (Aufsatz Typ PA_L)

3.5 Ergebnisse: Einfluss der Pultaufsatz-Geometrie

Der Vergleich der Effizienz von verschiedenen Pultaufsatz-Geometrien bei Verlegung mit Laub zeigt, dass kein signifikanter Einfluss des Ablagerungsverhaltens durch die Pultaufsatz-Geometrie besteht.

Bei einer Längsneigung von $S_L = 5,0\%$ zeigt sich, dass der Aufsatz PA_D überwiegend die höchste Effizienz aufweist (Abbildung 14). Die relativen Unterschiede der Effizienz der jeweiligen Pultaufsätze betragen je nach Durchfluss und Aufsatz maximal ca. 10 %. Bei Betrachtung der durchschnittlichen Effizienz, gemittelt über alle Durchflüsse, liegt der Wert des Aufsatzes PA_D ebenfalls am höchsten bei $E = 0,83$. Die mittlere Effizienz des Aufsatzes PA_Q und des Aufsatzes PA_L ist gleich groß mit $E = 0,77$ (siehe Tabelle 4).

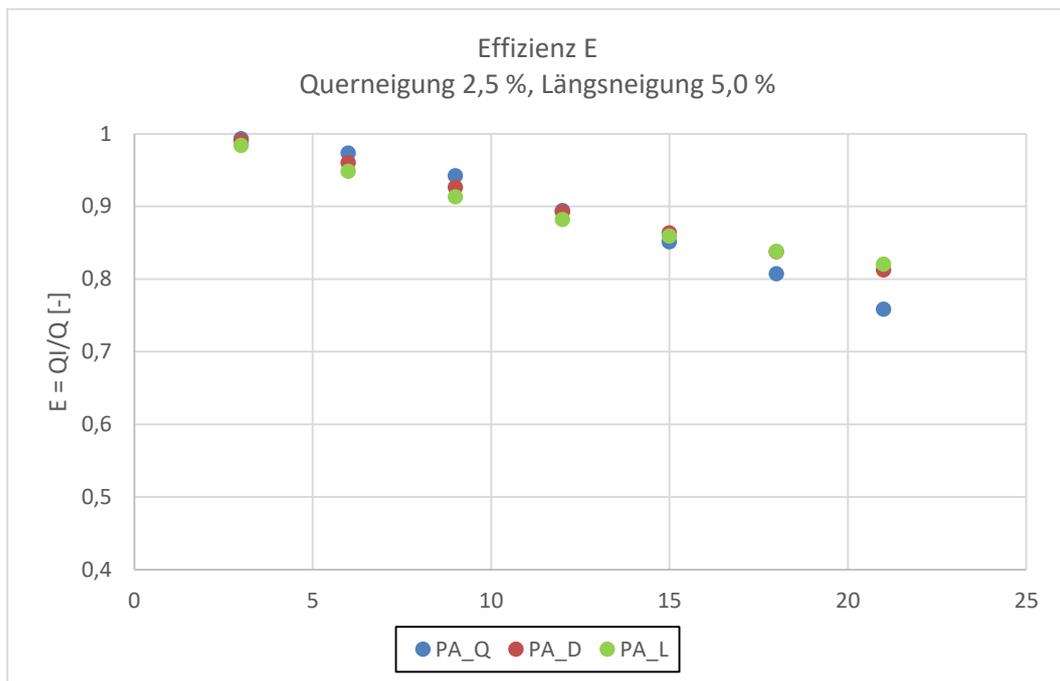


Abbildung 13: Effizienz E in Abhängigkeit von Q ohne Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5 \%$, $S_L = 5,0 \%$)

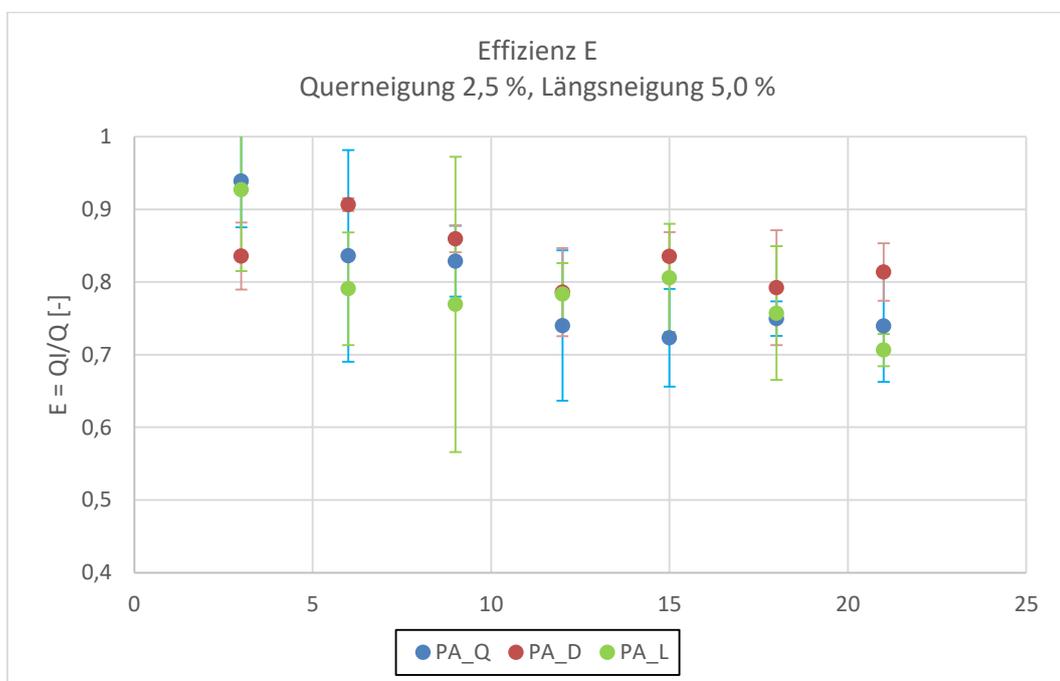


Abbildung 14: Effizienz E in Abhängigkeit von Q mit Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5 \%$, $S_L = 5,0 \%$)

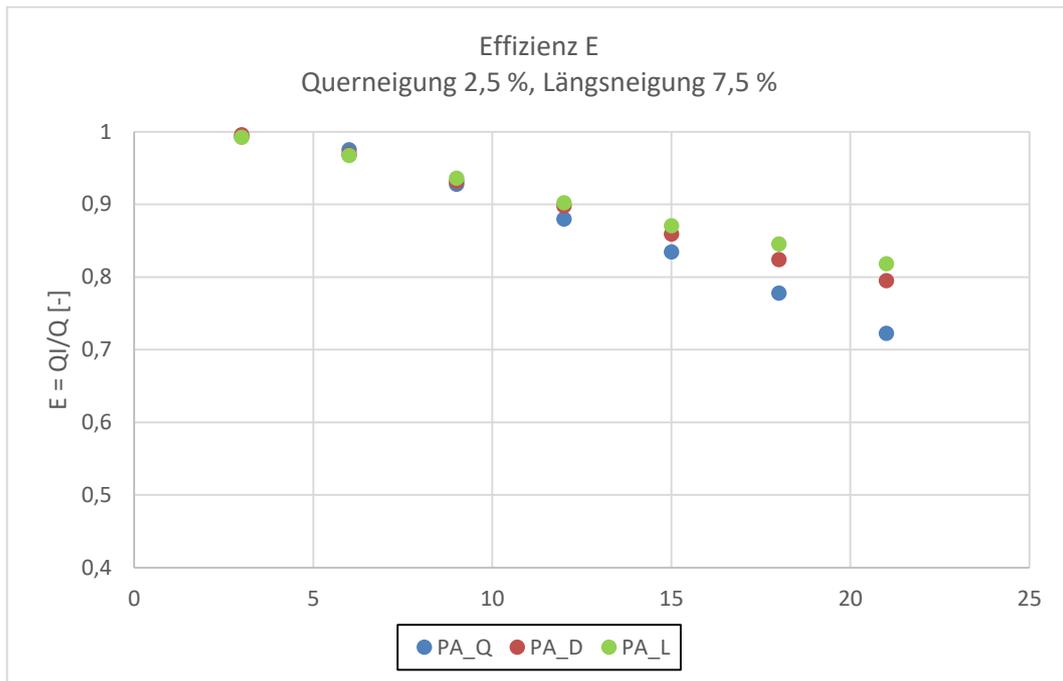


Abbildung 15: Effizienz E in Abhängigkeit von Q ohne Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5 \%$, $S_L = 7,5 \%$)

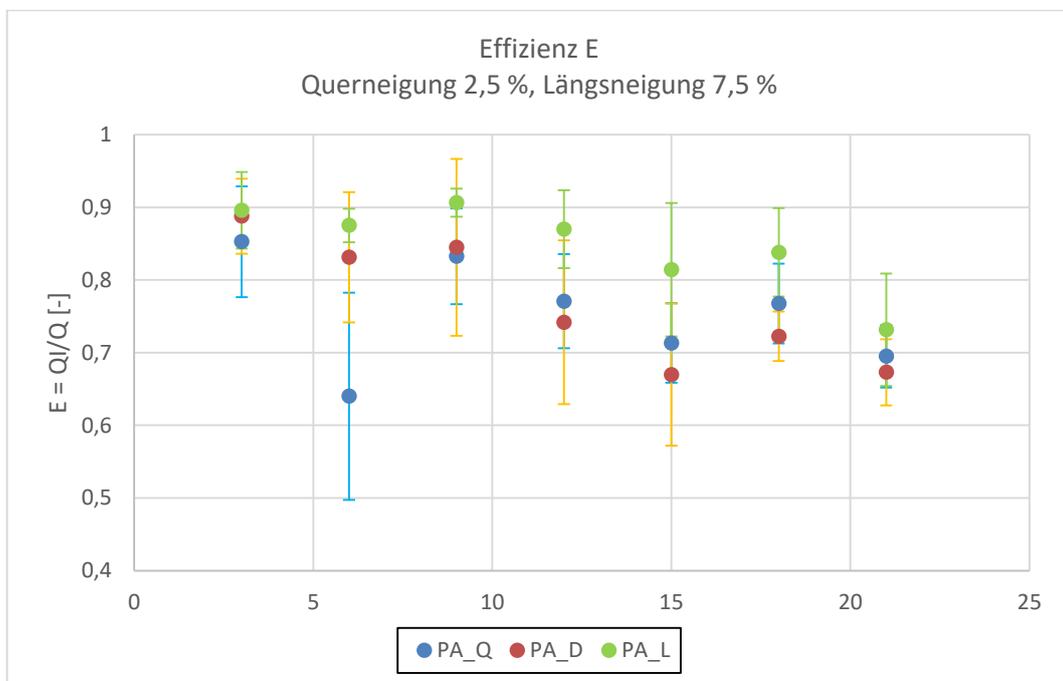


Abbildung 16: Effizienz E in Abhängigkeit von Q mit Verlegung durch Laub ($S_T = 2,5 \%$, $S_L = 7,5 \%$)

Bei einer Längsneigung von $S_L = 7,5 \%$ verschiebt sich die Effizienz (im Vergleich zu $S_L = 5 \%$) zu Gunsten des Aufsatzes Typ PA_L (Abbildung 16). Bei allen Durchflüssen zeigt dieser die höchste mittlere Effizienz im Vergleich zu den Aufsätzen PA_Q und PA_D . Die relative Abweichung der Effizienz der anderen Aufsätze zum Aufsatz PA_L erreicht hier maximal ca. 20 %; je nach Durchfluss und Aufsatz. Auch die durchschnittliche Effizienz der einzelnen Aufsätze gemittelt über alle Durchflüsse zeigt, dass der Aufsatz PA_L mit $E = 0,85$ den höchsten Wert hat, gefolgt vom Aufsatz PA_D mit einer mittleren Effizienz von $E = 0,77$ und dem Aufsatz PA_Q mit $E = 0,75$ (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Mittlere Effizienz E mit Verlegung durch Laub

Längsneigung [%]	Mittlere Effizienz E [-]		
	PA_Q	PA_D	PA_L
5,0	0,77	0,83	0,77
7,5	0,75	0,77	0,85

3.6 Fazit

Insgesamt haben die Modellversuche gezeigt, dass der physikalische Modellversuch mit echtem Laub nur als orientierender Modellversuch aufgefasst werden kann, da die Streuung der Ergebnisse deutlich höher ist als bei einem idealen freien Aufsatz. Das Ablagerungsverhalten des Laubs zeigt ausschließlich Tendenzen des Ablagerungsmusters und auch der Abnahme der Leistungsfähigkeit auf.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei einer reinen Verlegung durch Laub ohne ein Zusetzen der Öffnungen durch Schlamm über einen längeren Zeitraum die Effizienz im Mittel um 10 % geringer ist als im freien Zustand und immer noch über $E = 70 \%$ liegt.

Bis zu 30 % werden von den Straßenabläufen nicht aufgenommen, sondern fließen entweder am Aufsatz vorbei oder über diesen hinweg. Dieser Anteil fließt dann dem nächsten Straßenablauf zusätzlich zu. Schon nach wenigen Straßenabläufen kann sich somit die aufzunehmende Wassermenge deutlich erhöhen, was eine Berücksichtigung von Ereignissen auch deutlich oberhalb der Bemessungsereignisse notwendig macht.

4 Leistungsfähigkeit der Straßenablauf-Aufsätze bei teilweise verstopftem Aufsatz

4.1 Allgemeines

Neben einer Verlegung der Pultaufsätze durch Laub, welches sich auf dem Aufsatz ablegt, tritt häufig ein Zusetzen der Öffnungen durch Schlamm oder Geschwemmsel auf. Im Gegensatz zu aufliegendem Laub wird der festgewordene Schlamm nicht weitergetragen, wenn Niederschlagswasser über die Straßenabläufe mit hohen Geschwindigkeiten abfließt.

Der Einlaufquerschnitt wird durch das Zusetzen der Öffnungen verringert. Dabei spielt es aber eine Rolle, ob der Aufsatz z.B. auf der Bordsteinseite oder auf der der Fahrbahn zugewandten Seite verstopft ist. In einem umfangreichen Versuchsprogramm wird untersucht, inwieweit sich die Leistungsfähigkeit verringert, wenn bestimmte Bereiche des Aufsatzes zugesetzt sind.

4.2 Versuchsprogramm

Verschiedene Muster eines zugesetzten Pultaufsatzes werden untersucht. Dafür wird ein idealisierter Pultaufsatz mit Querstreben im physikalischen Modell untersucht. Die Schlitz- und Stegbreite wird zu $dx = ds = 36$ mm gewählt mit insgesamt sieben Schlitz (S1 bis S7, siehe Abbildung 17). Die Modellrinne wird auf die Breite des Pultaufsatzes beschränkt mit $B_R = B_A = 410$ mm, so dass kein Vorbeifließen des Abflusses auftreten kann. Der Grad der Verlegung wird durch den Faktor C beschrieben, mit:

$$C = \frac{A_{\text{verlegt}}}{A_0} \quad (6)$$

wobei A_{verlegt} die zugesetzte Fläche und A_0 die gesamte Öffnungsfläche des Aufsatzes darstellt.

Die Querneigung wird mit $S_T = 0$ % und $S_T = 2,5$ % angesetzt, der Zufluss mit $Q_1 = 7,2$ l/s und $Q_2 = 14,5$ l/s.

In Tabelle 5 sind die verschiedenen Verlegungsmuster mit einem Grad der Verlegung zwischen $C = 21$ % und $C = 79$ % dargestellt. Zusätzlich wurde als Referenz jeweils der ideale, nicht zugesetzte Zustand mit $C = 0$ % untersucht.

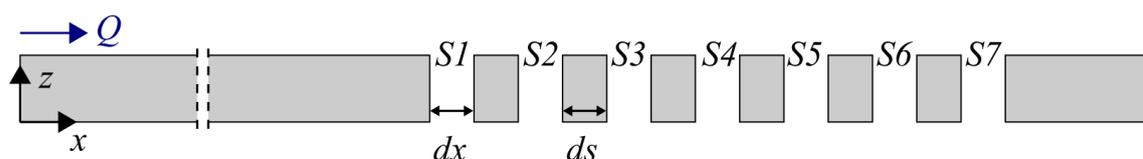


Abbildung 17: Längsschnitt Modell verstopfter Aufsatz

Tabelle 5: Verlegungsmuster und Effizienz E (verstopfter Aufsatz)

	$S_L = 5,0 \%$, $S_T = 0,0 \%$	C [%]	Gesamte Effizienz E [-]
1		$C = 0 \%$	$E_{Q1} = 1,00$ $E_{Q2} = 0,90$
2		$C = 21 \%$	$E_{Q1} = 1,00$ $E_{Q2} = 0,79$
3		$C = 43 \%$	$E_{Q1} = 0,97$ $E_{Q2} = 0,68$
4		$C = 43 \%$	$E_{Q1} = 0,97$ $E_{Q2} = 0,67$
	$S_L = 5,0 \%$, $S_T = 2,5 \%$		
5		$C = 0 \%$	$E_{Q1} = 1,00$ $E_{Q2} = 0,90$
6		$C = 21 \%$	$E_{Q1} = 0,92$ $E_{Q2} = 0,73$
7		$C = 29 \%$	$E_{Q1} = 0,98$ $E_{Q2} = 0,76$
8		$C = 50 \%$	$E_{Q1} = 0,45$ $E_{Q2} = 0,43$
9		$C = 71 \%$	$E_{Q1} = 0,36$ $E_{Q2} = 0,31$
10		$C = 79 \%$	$E_{Q1} = 0,53$ $E_{Q2} = 0,29$

4.3 Ergebnisse

In Abbildung 18 ist beispielhaft ein Modelllauf im physikalischen Modell dargestellt. In Tabelle 5 und Abbildung 19 ist die gesamte Effizienz E mit $E = Q_{i,ges} / Q$ in Abhängigkeit des Verlegungsgrades C dargestellt. Zusätzlich ist in Tabelle 6 die spezifische Effizienz $R_{Qi} = Q_{i,i} / Q$ für jeden Schlitz i dargestellt ($Q_{i,i}$ = Volumenstrom, der durch den Schlitz i abfließt). Die spezifische Effizienz nimmt mit jedem Schlitz in Fließrichtung ab.

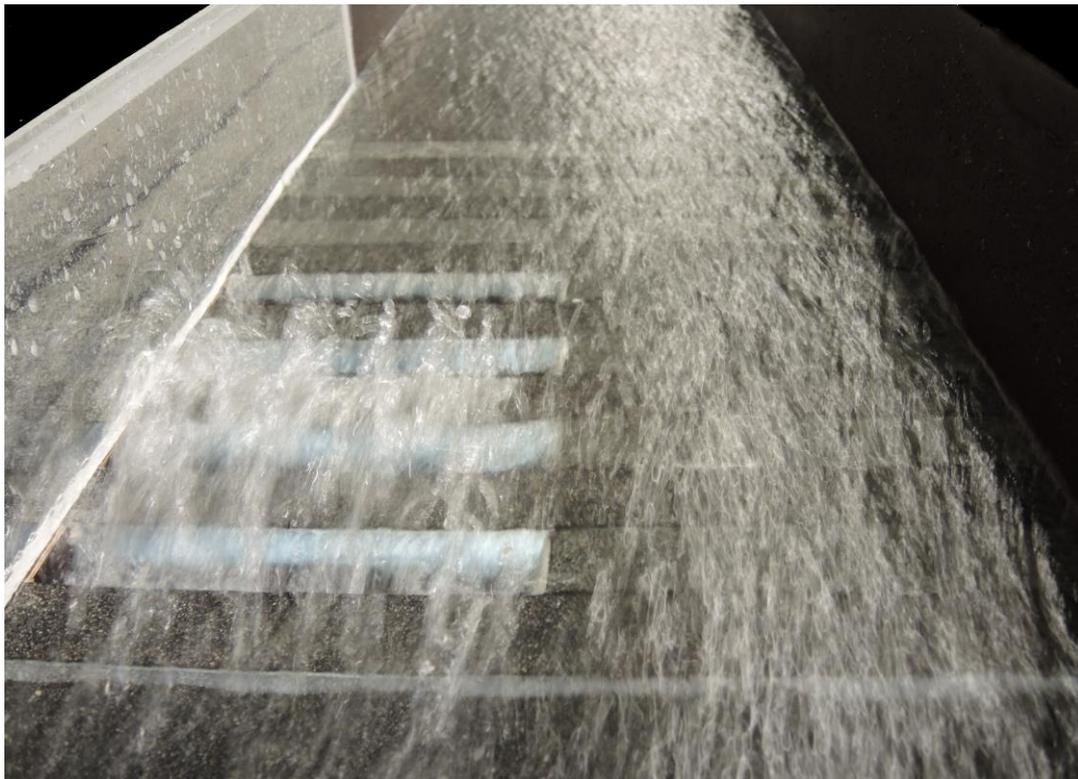


Abbildung 18: Beispielhafter Modelllauf

Bei einer Strömung **ohne Querneigung** (ebene Strömung in der x - z -Ebene) nimmt die Effizienz mit zunehmendem Verlegungsgrad C ab. Bei geringen Abflüssen ergibt sich eine Effizienz von $E = 1$, solange die verbleibende Öffnungsfläche noch ausreichend ist, um den gesamten Zufluss aufzunehmen. Erst danach tritt eine Abnahme der Effizienz ein. Bei den im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Modellversuchen bei $Q_1 = 7,2$ l/s und $C > 40$ % mit $S_T = 0$ %. In diesem Fall ist es nicht relevant, welcher Teil des Aufsatzes zugesetzt ist. Bei hohen Abflüssen, bei denen schon im Idealzustand mit $C = 0$ % die vorhandene Öffnungsfläche nicht ausreicht, um den gesamten Zufluss abzuführen, nimmt die Effizienz nahezu linear in Abhängigkeit des Verlegungsgrades ab, unabhängig davon, welcher Teil des Aufsatzes zugesetzt ist. **Die Reduzierung des Einlaufquerschnitts ist proportional zur Abnahme der Effizienz.**

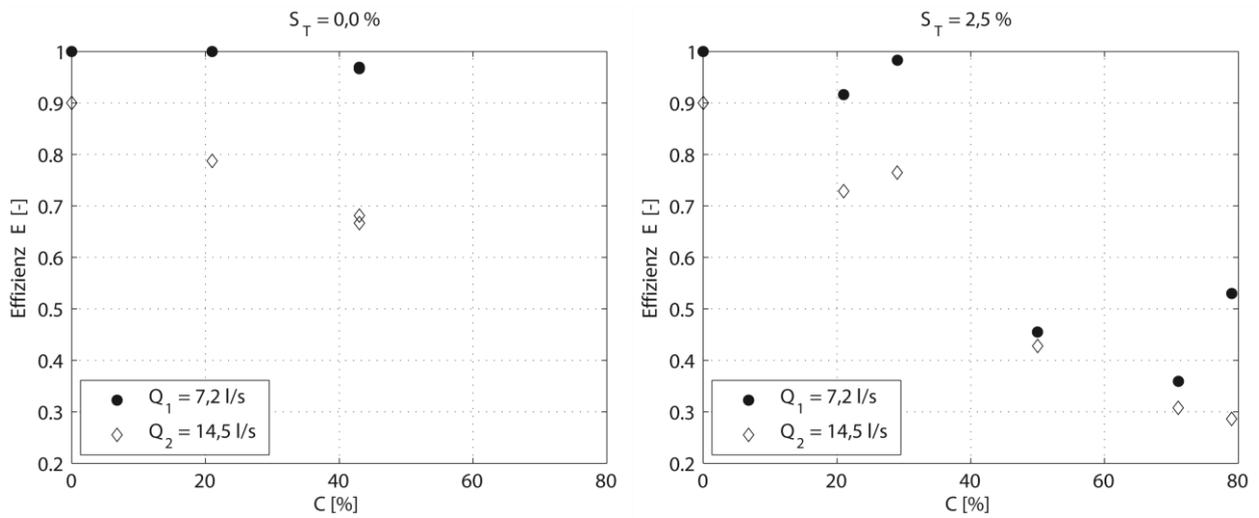


Abbildung 19: Effizienz E in Abhängigkeit des Verlegungsgrades C

Ist **eine Querneigung** der Straße vorhanden, ergibt sich in den vorliegenden Modellversuchen durch die Begrenzung der Abflussbreite ein trapezförmiger Fließquerschnitt. In diesem Fall kann kein linearer Zusammenhang zwischen Verlegungsgrad und Effizienz beobachtet werden. **Die Lage der zugesetzten Schlitzte ist maßgebend für den Grad der Abnahme der Effizienz** (siehe Abbildung 20).

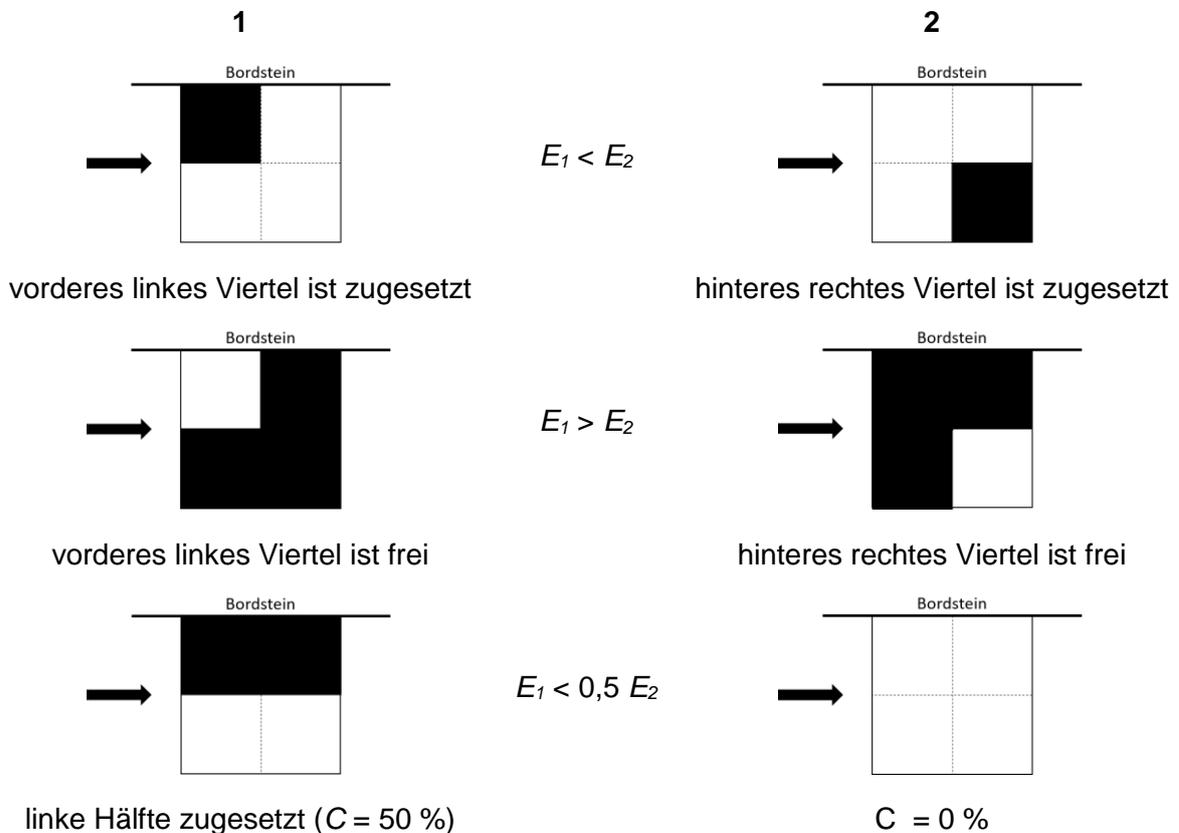


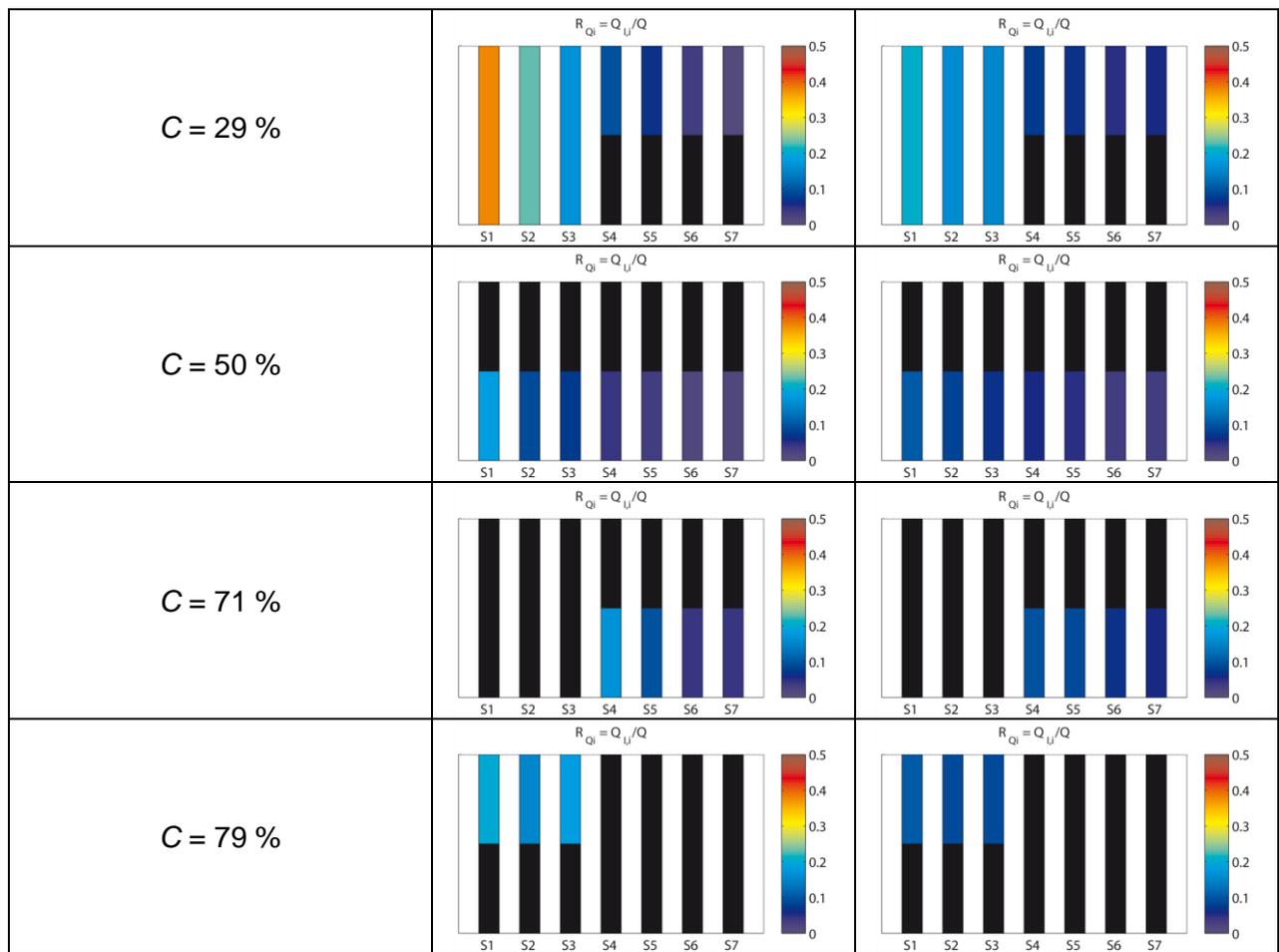
Abbildung 20: Lage der zugesetzten Schlitzte

Der leistungsfähige Bereich ist die dem Bordstein zugewandte Seite des Pultaufsatzes. Hier ist es dann eher zweitrangig, ob der in Fließrichtung vordere oder hintere Bereich frei bzw. zugesetzt ist, da sich das Einströmen ggf. nur „nach hinten“ verlagert.

Ist die gesamte, dem Bordstein zugewandte Hälfte zugesetzt ($C = 50\%$), verringert sich die Effizienz um mehr als 50 % im Vergleich zum freien Aufsatz. Ist die der Straßenfahrbahn zugewandte Hälfte oder Teile davon zugesetzt, ist die Abnahme der Effizienz geringer.

Tabelle 6: Ergebnisgrafiken Verstopfter Aufsatz

$S_L = 5,0 \%$, $S_T = 0,0 \%$	$Q_1 = 7,2 \text{ l/s}$	$Q_2 = 14,5 \text{ l/s}$
$C = 0 \%$		
$C = 21 \%$		
$C = 43 \%$		
$C = 43 \%$		
$S_L = 5,0 \%$, $S_T = 2,5 \%$	$Q_1 = 7,2 \text{ l/s}$	$Q_2 = 14,5 \text{ l/s}$
$C = 0 \%$		
$C = 21 \%$		



5 Leistungsfähigkeit des Straßenablauf-Unterteils

5.1 Allgemeines

Straßenabläufe bestehen aus Aufsatz und Unterteil, dargestellt in Abbildung 21. Die Leistungsfähigkeit der Aufsätze wurde, wie bereits beschrieben, in vorangegangenen Versuchsreihen untersucht. Im Folgenden steht daher die Leistungsfähigkeit des Straßenablauf-Unterteils im Vordergrund, um dann eine Aussage über das Gesamtsystem Straßenablauf und mögliche limitierende Faktoren treffen zu können. Die Unterteile existieren in Ausführungsvarianten für Trocken- (mit Schlammeimer) oder Nassschlamm (mit Schlammfang) aus Beton oder Kunststoff. Betonteile und Eimer für Straßenabläufe sind in DIN 4052 (2006) definiert. Die vorliegenden Untersuchungen werden mit den Vorgaben der DIN 4052-2 (2006) bzw. DIN 4052-4 (2006) durchgeführt. Es werden Betonteile in der Ausführungsvariante für Trockenschlamm mit einem Schlammeimer der Form A mit 4 Schlitzreihen (A4) angesetzt.

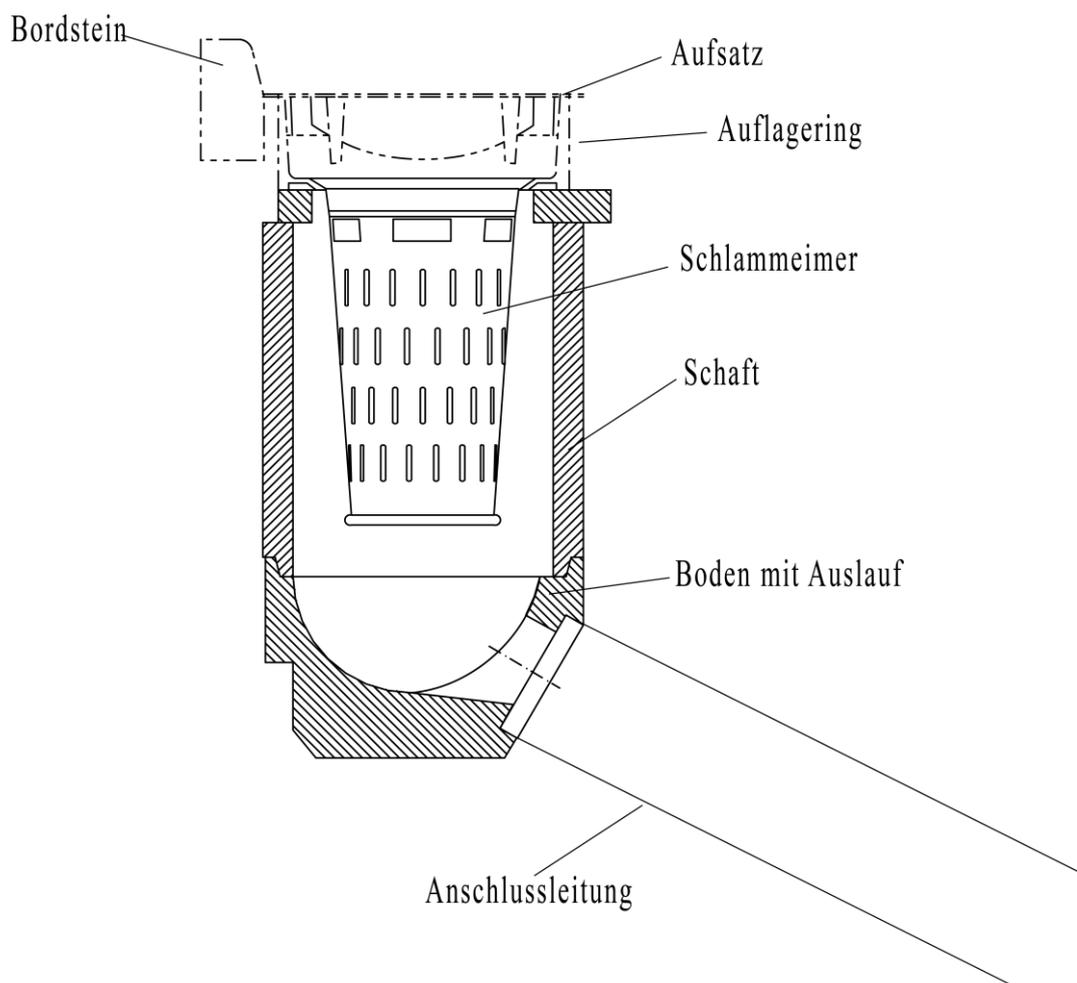


Abbildung 21: Straßenablauf für Trockenschlamm nach DIN 4052-2 (2006) mit Schlammeimer Form A4 nach DIN 4052-4 (2006)

Die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Straßenablauf wurde im numerischen Modell untersucht. 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. Sie beschreibt die freie Oberfläche mit der VOF (Volume of Fluid) Methode. Für die Darstellung der Berechnungsgeometrie wird die FAVOR™ (Fractional Area / Volume Obstacle Representation) Methode genutzt. Die FAVOR™ Methode passt die Geometrie einem zugrundeliegenden Berechnungsnetz an. Für eine genaue Darstellung der Geometrie in FLOW-3D ist daher die Wahl der Zellgröße entscheidend. Die Geometrie des Straßenablaufs wird in Form einer stl-Datei (stl = Stereolithography) eingeladen. Für die Simulation wird das RNG- k - ϵ Turbulenz-Modell genutzt, welches auf dem k - ϵ Turbulenz-Modell basiert (FLOW SCIENCE INC., 2015).

Für die Erstellung der Geometrie des Straßenablaufes sowie die der Anschlussleitung werden für diese Untersuchung die Vorgaben der DIN 4052-2 (2006) bzw. DIN 4052-4 (2006) angesetzt. Die Anschlussleitung, die den Straßenablauf mit dem Kanal verbindet, wird mit einem Innendurchmesser von $d = 150$ mm gewählt. Der Schacht des Straßenablaufes, welcher in diesem Fall als Betonteil abgebildet wird, hat einen Innendurchmesser von $d = 450$ mm. Der Schlammeimer hat einen Durchmesser von $d = 300$ mm. Die Wand des Schlammeimers ist mit Schlitzfenstern, welche in vier Reihen angeordnet sind, ausgeführt. Außerdem befinden sich im Boden des Eimers neun Öffnungen mit einem jeweiligen Durchmesser von $d = 8$ mm. Zusätzlich sind am oberen Rand des Eimers weitere fünf Öffnungen vorgesehen. Die Geometrie des Schlammeimers ist der DIN 4052-4 zu entnehmen. Die Blechdicke des Schlammeimers wird von $t = 1,25$ mm im Original auf $t = 6$ mm erhöht, sodass die Geometrie präzise mit Hilfe der FAVOR™ Methode mit einem rechteckigen Gitter modelliert werden kann (FLOW SCIENCE INC., 2015). Der Schlammeimer hat im Original eine konische Form. Diese wird in Form eines Zylinders idealisiert.

Die Berechnungszeit für eine Simulation hängt von verschiedenen Faktoren ab. Entscheidend ist dabei vor allem die Anzahl der Zellen im numerischen Modell. Um sowohl die Zellenanzahl als auch die Rechenzeit so gering wie möglich zu halten, wird die Geometrie des Straßenablaufs nicht vollständig dargestellt. Der Aufsatz des Straßenablaufs ist bei Simulationsläufen mit einem geringen Zufluss (Zufluss kleiner gleich $Q = 50$ l/s bei freiem Auslauf in Kanal) irrelevant, da das Wasser nicht bis zum Aufsatz aufstaut. Somit kann in diesen Fällen die Geometrie des Aufsatzes weggelassen werden. Bei der Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs und bei höheren Zuflüssen sowie bei der Angabe einer hohen Druckhöhe im Kanal ist der Aufsatz entscheidend und in das numerische Modell einzubeziehen.

Für die Simulation des Straßenablaufs werden geometrische und physikalische Randbedingungen vergeben. Das Berechnungsnetz wird dafür in vier Blöcke unterteilt, sogenannte *Mesh Blöcke*. *Mesh Block 1* beinhaltet den Schacht einschließlich des Schlammeimers. *Mesh Block 2* beinhaltet die Anschlussleitung und *Mesh Block 3* stellt den Auslass der Anschlussleitung dar.

Bei großen Durchflüssen wird zusätzlich ein *Mesh Block 4* erstellt, welcher den Aufsatz des Straßenablaufs umfasst. Mit der Erstellung der einzelnen Blöcke wird das Gitter generiert. Die Zellgrößen werden auf $dx = dy = dz = 4$ mm festgelegt, um die feingliedrigen Strukturen des Schlammeimers möglichst genau darstellen zu können und um eine vertretbare Rechenzeit zu gewährleisten.

An den sechs Seiten der jeweiligen Blöcke werden Randbedingungen vergeben. In Bereichen der Außenwände wurde die Randbedingung „Symmetrie“ gesetzt. Einzig als Unterwasserrandbedingung am Auslass der Anschlussleitung wird eine Druckhöhe („Pressure“) angegeben. Der Zufluss erfolgt im numerischen Modell über eine Quelle, die innerhalb des Schlammeimers angeordnet ist.

Mit der gewählten Anordnung der Quellen (zwei Quellen, Fließrichtungen gegeneinander +/-z, möglichst nah am Boden des Schlammeimers und möglichst weit auseinander (20 cm)) erfolgt ein gleichmäßiger Aufstau des Wassers innerhalb des Schlammeimers. Die Anordnung der Quellen mit einem relativ weiten Abstand zueinander bewirkt außerdem, dass die Beeinflussungen an der Eimerwand durch hohe Fließgeschwindigkeiten und daraus resultierendem Druck an der Wand geringer ausfallen. Die Fließgeschwindigkeiten zwischen den Quellen sind gering bzw. das zufließende Wasser kann sich weit ausbreiten, sodass das Wasser nicht bzw. nur sehr gering bei höheren Zuflüssen im Wandbereich des Schlammeimers nach oben gedrückt wird.

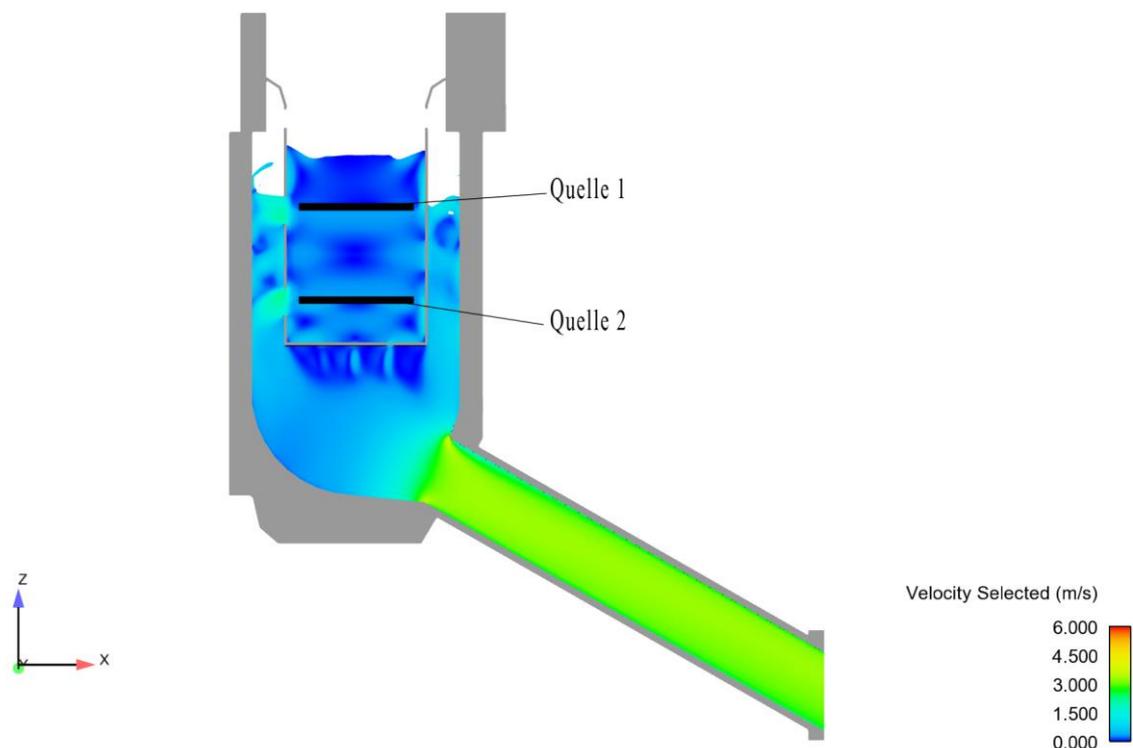


Abbildung 22: Anordnung der Quellen im numerischen Modell

5.2 Versuchsprogramm

Die Untersuchung des Straßenablaufes erfolgt anhand von Angaben verschiedener hydraulischer Randbedingungen. Ziel der Untersuchungen ist die jeweils von den angegebenen Randbedingungen entstehende maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs bzw. der einzelnen Bauteile zu ermitteln. Die Leistungsfähigkeit wird definiert als die vom Straßenablauf bzw. der einzelnen Bauteile abgeführten Wassermenge Q_{Rohr} [l/s]. Mit dem vollständigen Aufstau des Wassers im Straßenablauf ist die maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs erreicht.

Im ersten Untersuchungsabschnitt wird als Randbedingung ein freier Auslauf gesetzt. Der Straßenablauf samt der Anschlussleitung wird bei dieser Untersuchung weder durch eine Druckhöhe im Kanal noch durch eine Füllung des Schlammeimers beeinflusst. Mehrere Modellläufe mit verschiedenen Durchflüssen ($Q = 20, 30, 40, \dots$ l/s) werden simuliert. Ziel der Untersuchung ist die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung und des gesamten Straßenablaufs zu ermitteln. Ziel ist es, den maximalen Zufluss zu ermitteln, bei dem es zu einem Aufstau des Wassers bis zur Oberkante des Straßenablaufs kommt.

Im zweiten Untersuchungsabschnitt werden neben den unterschiedlichen Durchflüssen (siehe oben) als zusätzliche Randbedingungen Druckhöhen am Auslauf ($P1$, $P2$ und $P3$) angegeben. Die angegebene Randbedingung am Auslauf spiegelt die Druckhöhe im Kanal wieder. Bei der Untersuchung ist die Anschlussleitung vollständig gefüllt (Druckleitung), da sich die niedrigste Druckhöhe $P1$ etwa auf Höhe der Sohle des Straßenablaufs befindet. Ziel der Untersuchung ist die Leitungsfähigkeit des Straßenablaufes in Abhängigkeit der angegebenen Druckhöhe zu ermitteln. Folgende Druckhöhen werden angesetzt (siehe Abbildung 23):

$P1$:	0,025 m	Wasserstand liegt 25 mm über der Sohle im Auslaufschacht
$P2$:	0,535 m	Wasserstand befindet sich ca. auf mittlerer Höhe des Schlammeimers
$P3$:	0,815 m	Wasserstand liegt 10 mm über den sechs oberen Öffnungen des Schlammeimers
	0,0 m	Sohle des Straßenablaufs

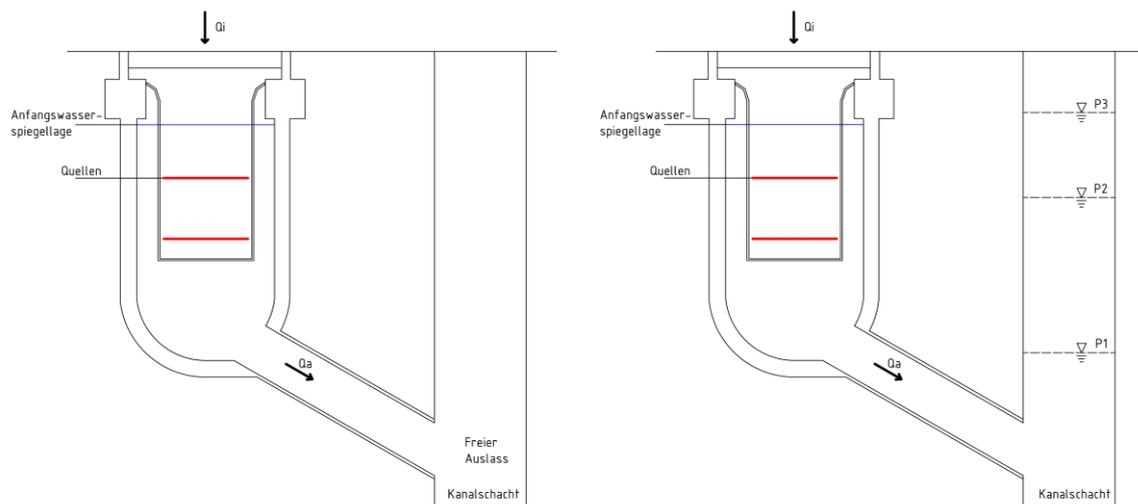


Abbildung 23: Randbedingungen im numerischen Modell

Im dritten Untersuchungsabschnitt wird der Schlammeimer mit verschiedenen Füllungsgraden untersucht. Dabei wird das System hinsichtlich keiner, einer geringen und einer starken Füllung des Schlammeimers betrachtet. Zusätzlich sind als weitere Randbedingungen unterschiedliche Durchflüsse und verschiedene Druckhöhen im Kanal festgelegt. Ziel der Untersuchung ist eine Aussage über die Leitungsfähigkeit des Schlammeimers im leeren und gefüllten Zustand zu treffen.

Füllungsgrad des Schlammeimers

Bez.	Beschreibung	Füllungsgrad [%]
C0	offen	0,00 %
C1	Bodenöffnungen geschlossen	0,79 %
C2	Bodenöffnungen, 1. Reihe der Schlitz geschlossen	14,71 %
C3	Bodenöffnungen, 1. & 2. Reihe der Schlitz geschlossen	29,45 %
C4	Bodenöffnungen, 1., 2. & 3. Reihe der Schlitz geschlossen	43,36 %
C5	Bodenöffnungen, 1., 2., 3. & 4. Reihe der Schlitz geschlossen	58,10 %

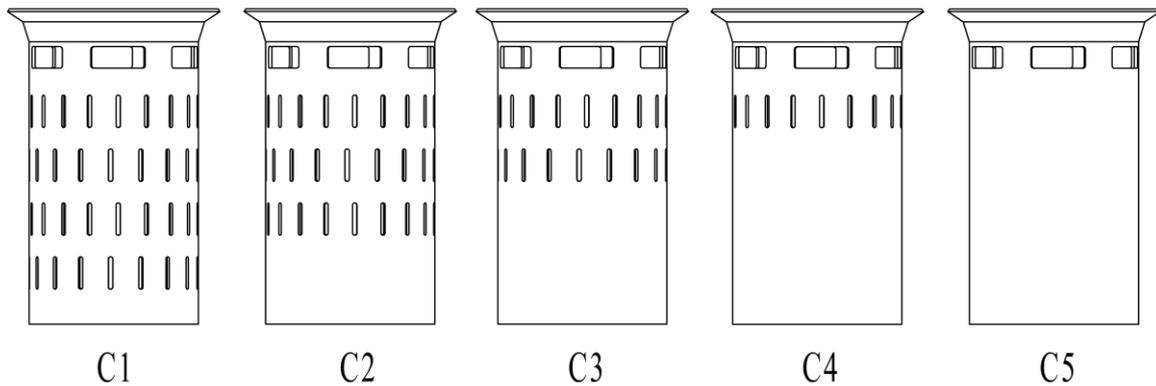


Abbildung 24: Untersuchte Füllmengen des Schlammeimers

5.3 Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung

Die hydraulische Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung ist von verschiedenen Randbedingungen abhängig. Dazu zählt unter anderem die Dimensionierung der Anschlussleitung hinsichtlich des Durchmessers. In dem vorliegenden Fall wird der Innendurchmesser mit $d = 150$ mm (DN150) nach DIN 4052-3 (2006) vorgegeben. Außerdem orientiert sich die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung an der unteren Randbedingung (freier Auslauf, Druckrandbedingung). Die Anschlussleitung wird mit einer glatten Oberfläche abgebildet. Einen weiteren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung hat die Neigung der Leitung. In diesem Fall ist die Anschlussleitung in einem 30° Winkel zum Schacht des Straßenablaufs angebracht und hat eine Länge von $L = 1$ m. Verläuft die Anschlussleitung gegebenenfalls flacher oder steiler und hat eine andere, meist größere Länge, kann die maximale Leistungsfähigkeit abweichen. Es ist anzunehmen, dass bei einer flacheren Neigung der Anschlussleitung die Leistungsfähigkeit der Leitung abnimmt und sich die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung mit zunehmender Neigung erhöht.

Um die Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung beurteilen zu können, bleibt zunächst der Schlammeimer unberücksichtigt, um mögliche Wechselwirkungen ausschließen zu können. Weiterhin wird die untere Randbedingung als „freier Auslass“ angesetzt. Die Querschnitte durch den Straßenablauf in Abbildung 25 (oben) zeigen einen Vergleich der auftretenden Drücke bei Durchflüssen mit $Q = 40$ l/s und $Q = 50$ l/s. Zunächst wird der hydrostatische Druck am Anfang sowie in der Mitte der Anschlussleitung in Abhängigkeit des Durchflusses in der Leitung betrachtet (Abbildung 26, links).

Bei einem Durchfluss von $Q = 40$ l/s erfolgt der Abfluss in der Anschlussleitung als Freispiegelabfluss. Bei einem Durchfluss von $Q = 50$ l/s sinkt der hydrostatische Druck deutlich ab (Druckabfluss in der Anschlussleitung). Im Einlaufbereich entsteht eine Zugkraft, wodurch ein negativer Druck entsteht. Die Druckänderung gibt den Moment des Zuschlagens der Anschlussleitung wieder.

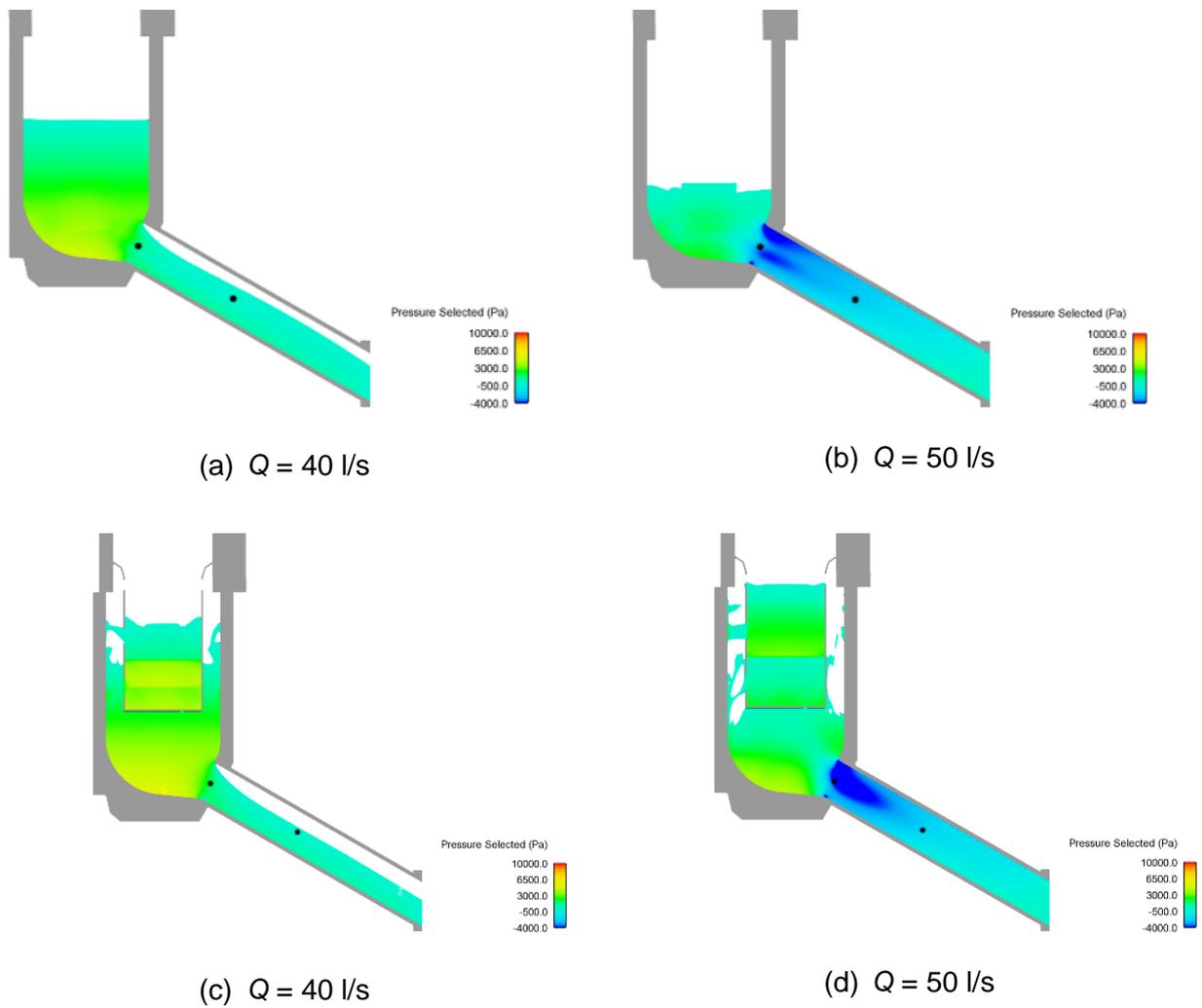


Abbildung 25: Leistungsfähigkeit Anschlussleitung (oben: ohne Schlammweimer, unten: mit Schlammweimer)

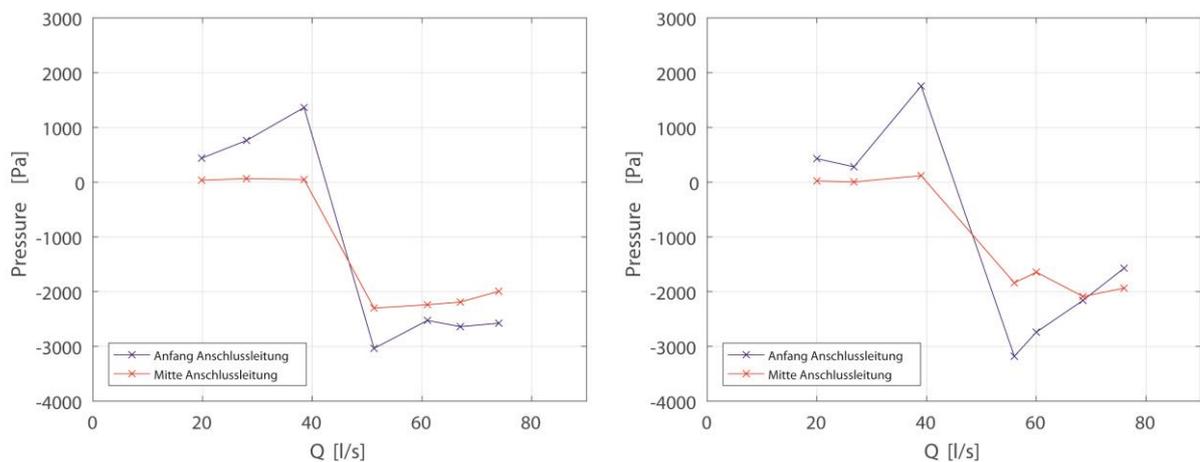


Abbildung 26: Hydrostatischer Druck in Abhängigkeit des Durchfluss in der Anschlussleitung (links: ohne Schlammweimer, rechts: mit Schlammweimer)

Zusätzlich wird die Auswirkung des leeren Schlammweimers untersucht. Durch den Schlammweimer staut sich das Wasser im Straßenablauf bzw. im Schlammweimer auf, wodurch ein höherer hydrostatischer Druck im Einlaufbereich der Anschlussleitung entsteht (Abbildung 26, rechts). In der Mitte der Leitung ist in beiden Fällen (mit und ohne Schlammweimer) der Druck ähnlich hoch. Das Zuschlagen des Rohrs erfolgt mit und ohne Schlammweimer bei einem vergleichbaren Durchfluss Q . Auch nach Zuschlagen des Rohrs und damit einem Druckabfluss im Rohr gilt für alle untersuchten Fälle: $Q_{Zu} = Q_{Rohr}$ (Abbildung 27).

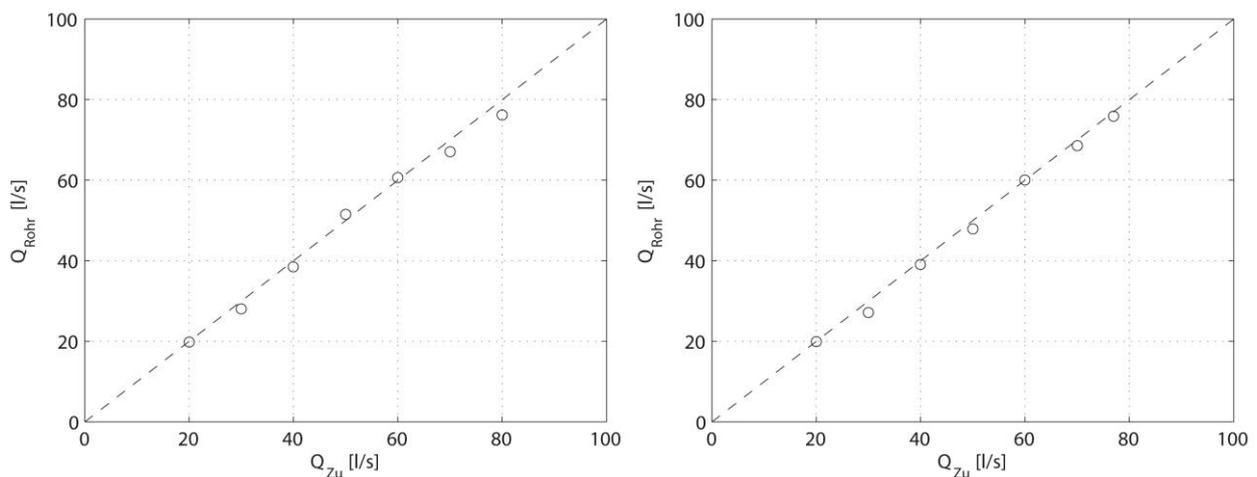


Abbildung 27: Durchfluss im Rohr in Abhängigkeit des Zuflusses (links: ohne Schlammweimer, rechts: mit Schlammweimer)

Die Anschlussleitung ist leistungsfähig genug, Durchflüsse bis mind. $Q \approx 80$ l/s abzuführen.

5.4 Leistungsfähigkeit Straßenablauf ohne Rückstau aus Kanalisation

Der Straßenablauf erreicht die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit mit dem Zeitpunkt der vollständigen Füllung. Der damit einhergehende maximale Durchfluss hängt vor allem von der am Auslauf der Anschlussleitung angegebenen Randbedingung ab. In diesem Untersuchungsabschnitt ist als Auslaufrandbedingung ein freier Auslauf gesetzt. Die Leistungsfähigkeit wird weder durch Rückstau aus der Kanalisation noch durch eine Füllung des Schlammeimers beeinträchtigt.

Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des gesamten Straßenablaufs erfolgt wie bei der Anschlussleitung anhand der vollständigen Füllung. Die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit erreicht der Straßenablauf bei freiem Auslauf bei $Q_{frei,max} = 77 \text{ l/s}$ (Abbildung 28).

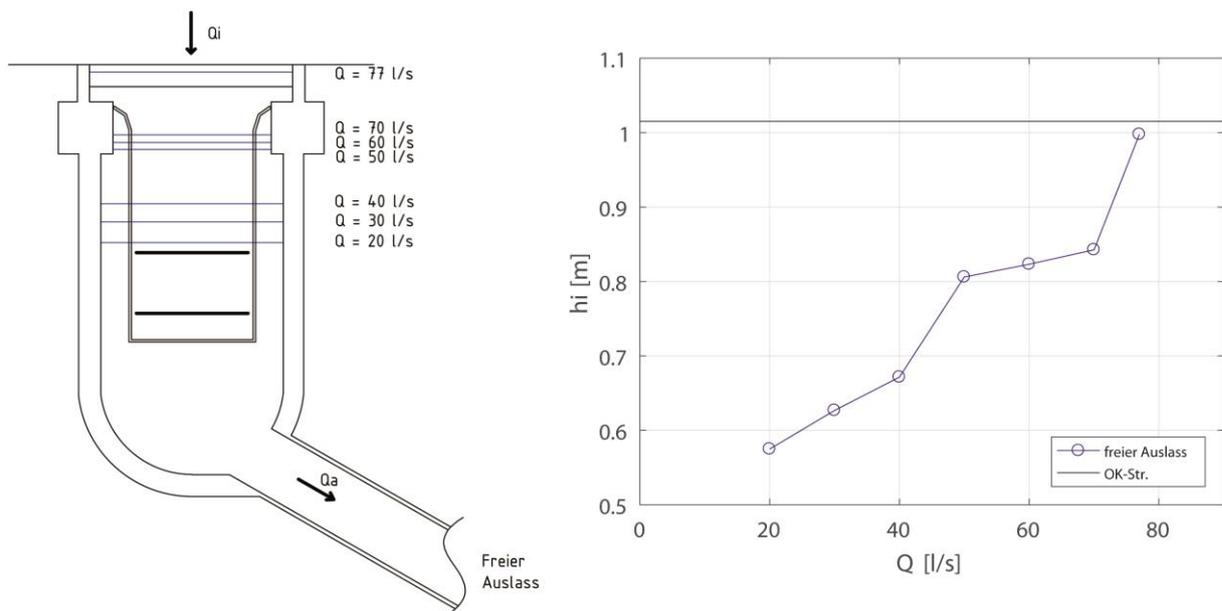


Abbildung 28: Wasserspiegellage im Straßenablauf

Die Anschlussleitung und das Bauwerk inkl. Eimer sind leistungsfähig genug, Durchflüsse bis $Q \approx 80 \text{ l/s}$ abzuführen.

5.5 Leistungsfähigkeit Straßenablauf mit Rückstau aus Kanalisation

Kann das Wasser nicht frei von der Anschlussleitung in den angeschlossenen Kanal abfließen (Rückstau aus der Kanalisation), nimmt die Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs ab. Der angegebene Druck am Auslauf der Anschlussleitung (Randbedingung) berücksichtigt die Höhe der Wasserspiegellage im unterhalb liegenden Schacht und damit die Druckhöhe im Kanal. Je

höher die Druckhöhe im Kanal ist, desto schneller staut sich das Wasser im Straßenablauf auf bzw. desto kleiner ist der Durchfluss bis die maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs erreicht ist. Untersucht wird die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hinsichtlich drei verschiedener Druckhöhen ($P1$, $P2$, $P3$) im angeschlossenen Kanal, die am Auslass der Anschlussleitung angegeben sind.

In Abbildung 29 ist das Verhältnis zwischen dem Zufluss Q_{Zu} und dem Abfluss im Rohr Q_{Rohr} dargestellt. Die diagonal verlaufende gestrichelte Linie beschreibt dabei den Zustand im System, bei dem der Abfluss im Rohr gleich dem Zufluss ist. Es ist zu erkennen, dass der Durchfluss innerhalb der Anschlussleitung nahezu gleich dem Zufluss ist (stationärer Zustand). Es gilt für alle durchgeführten Simulationen bis zum Erreichen der maximalen Leistungsfähigkeit:

$$Q_{Zu} = Q_{Rohr} = Q \quad (7)$$

Außerdem kann nachgewiesen werden, dass die Anschlussleitung innerhalb der Anwendungsgrenzen der Modellversuche kein begrenzender Faktor für die maximale Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ist. Die maximale Leistungsfähigkeit der Anschlussleitung ist somit nicht ausgeschöpft.

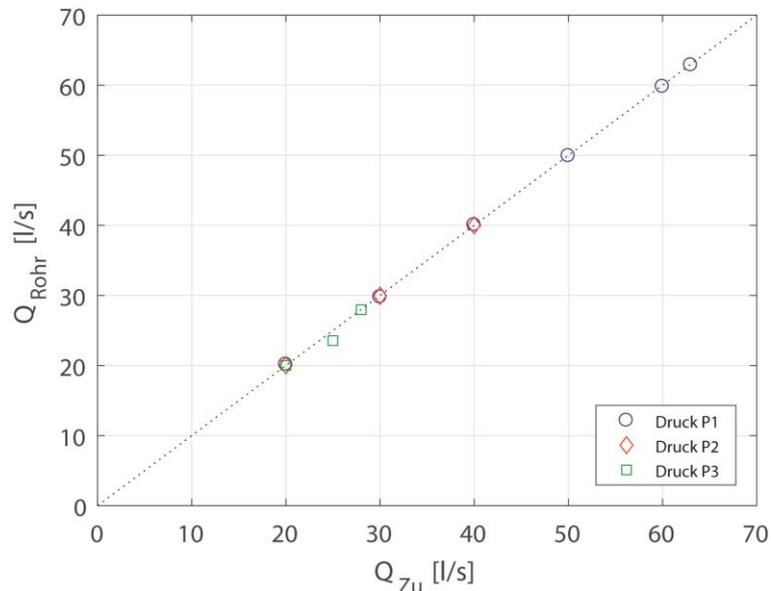


Abbildung 29: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation

In Abbildung 30 ist die Wasserspiegellage im Straßenablauf in Abhängigkeit eines vorgegebenen Durchflusses sowie einer definierten Druckhöhe am Auslass dargestellt. Die maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen ist mit dem Aufstau des Wassers bis zur Oberkante des Straßenablaufs bzw. der Straßenoberfläche erreicht. Die Oberkante des Straßenablaufs wird durch die schwarze durchgezogene Linie ge-

kennzeichnet. Der Höhenunterschied zwischen der Sohle des Straßenablaufs und der Straßenoberfläche beträgt $\Delta h = 1,015 \text{ m}$.

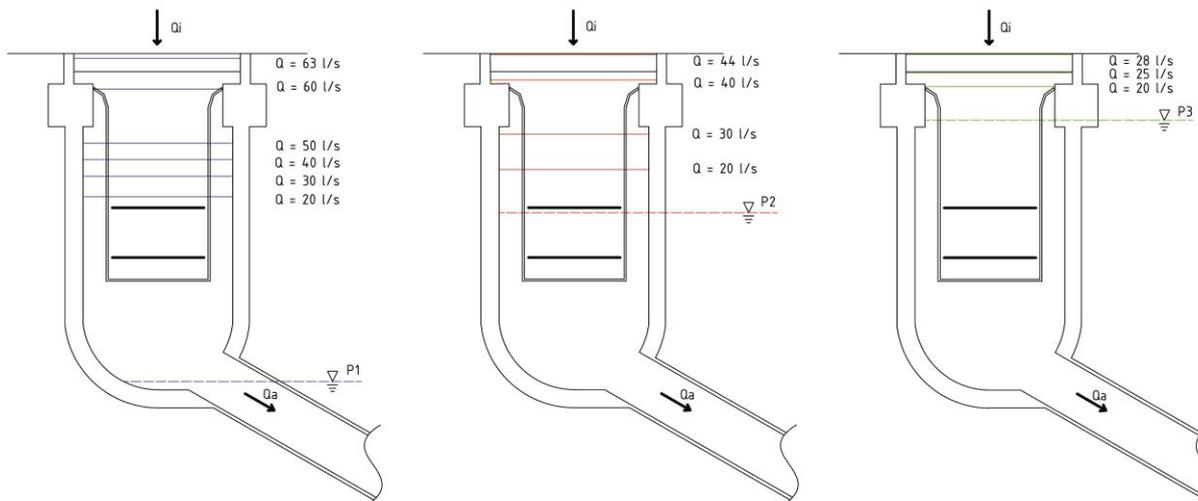


Abbildung 30: Wasserspiegellage im Straßenablauf in Abhängigkeit verschiedener Druckhöhen im Kanal

In Abbildung 31 (rechts) ist beispielhaft die Fließgeschwindigkeit eines vollständig mit Wasser gefüllten Straßenablaufs mit der Druckhöhe P_2 am Auslass und einem Durchfluss von $Q = 44 \text{ l/s}$ dargestellt. Die maximale hydraulische Leistungsfähigkeit ist in diesem Beispiel erreicht. Bei höheren Abflüssen kommt es zu einem Überstau, sodass das auf der Straße abfließende Wasser nicht vollständig vom Straßenablauf bzw. vom Kanal abgeführt werden kann.

Die blaue Linie in Abbildung 31 (links) gibt die Simulationsläufe mit einer feststehenden Druckhöhe $P_1 = 0,025 \text{ m}$ und steigenden Zuflüssen wieder. Aufgrund der geringen Druckhöhe staut sich das zufließende Wasser langsam im Schlammeimer auf. Der Straßenablauf erreicht bei einem Durchfluss von $Q_{P_1, \max} = 63 \text{ l/s}$ die maximale Leistungsfähigkeit. Es ist außerdem auffällig, dass die Wasserspiegellage bei zunehmenden Durchflüssen im Straßenablauf bis zu einem Durchfluss von $Q = 50 \text{ l/s}$ mit gleicher Steigung zunimmt. Mit größerer werdendem Durchfluss steigt die Wasserspiegellage deutlich schneller an. Eine mögliche Erklärung für die Veränderung im Anstieg der Wasserspiegellage ist die Vollfüllung des Schlammeimers. Ab einem Durchfluss von mehr als $Q = 50 \text{ l/s}$ ist der Schlammeimer vollständig mit Wasser gefüllt. Die Leistungsfähigkeit des Schlammeimers ist somit erreicht, wodurch bei höheren Zuflüssen die Wasserspiegellage schneller ansteigt. Des Weiteren verengt sich der Querschnitt des Straßenablaufs, wodurch es ebenfalls zu einem schnelleren Anstieg der Wasserspiegellage kommt. Die rote Linie in Abbildung 31 (links) beschreibt die Simulationsläufe in Abhängigkeit der Druckhöhe $P_2 = 0,535 \text{ m}$ am Auslass. Der Straßenablauf erreicht mit der Angabe der Druckhöhe P_2 seine maximale Leistungsfähigkeit bei einem Durchfluss von $Q_{P_2, \max} = 44 \text{ l/s}$. Auch bei dieser Kurve ist eine leichte Veränderung der Steigung der Kurve zu erkennen. Ab einem Durchfluss von $Q = 30 \text{ l/s}$ steigt die Wasserspiegellage geringfügig schneller an. Dies lässt wiederum auf die Vollfüllung

lung des Schlammeimers und die Verengung des Querschnitts schließen. Die grüne Linie in Abbildung 31 (links) gibt die Simulationläufe in Abhängigkeit einer am Auslass angegebenen Druckhöhe $P_3 = 0,815 \text{ m}$ wieder. Dabei erreicht der Straßenablauf bei einem Durchfluss von $Q_{P_3, \max} = 28 \text{ l/s}$ seine maximale Leistungsfähigkeit. Bei höheren Durchflüssen staut sich das Wasser jeweils weiter auf, sodass es zu einem Überstau bzw. zur Ausbreitung des Wassers auf der Straßenoberfläche kommt.

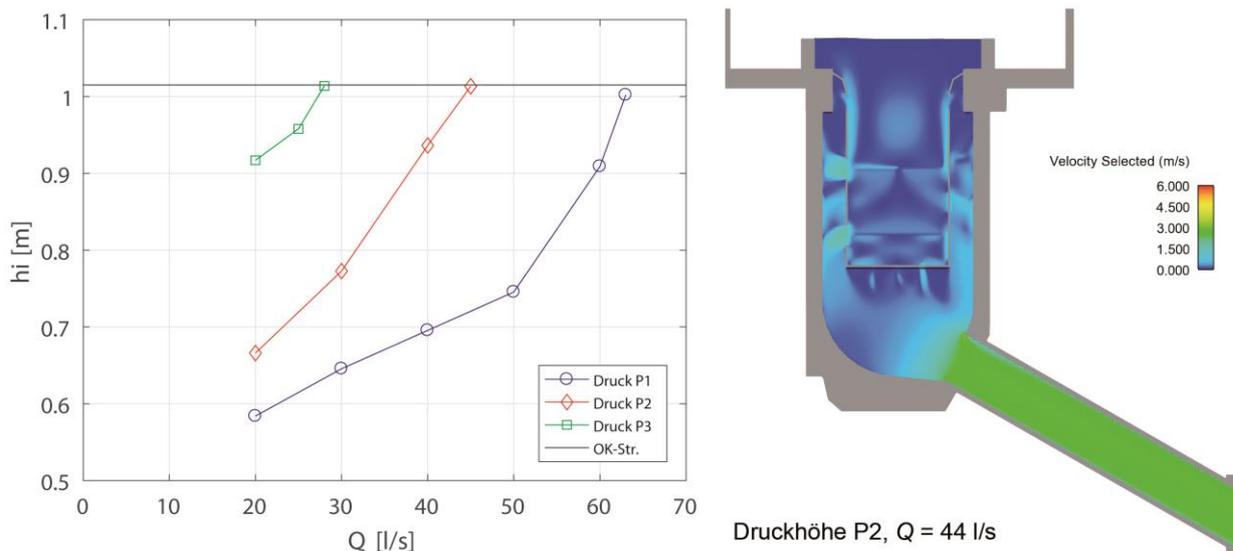


Abbildung 31: Wasserspiegellage im Straßenablauf in Abhängigkeit des Durchflusses im Kanal

In Abbildung 32 ist die Wasserspiegellagedifferenzen dh dargestellt, mit

$$dh = h_i - P \quad (8)$$

mit P = Druckhöhe am Auslauf (Wasserspiegellage im Schacht) und h_i = in Abhängigkeit des Zuflusses und der angegebenen Druckhöhe auftretenden Wasserspiegellage im Straßenablauf/Schlammeimer.

Bei einer geringen Druckhöhe im Kanal (P1) zeigt die Differenz zwischen dem Wasserstand im Straßenablauf und der Druckhöhe im Kanal eine konstante Steigung bis zu einem Durchfluss von $Q = 50 \text{ l/s}$. Der Wasserstand im Straßenablauf liegt unterhalb der Oberkante des Schlammeimers. Somit ist die hydraulische Leistungsfähigkeit des Eimers noch nicht erreicht. Der deutliche Anstieg des Graphen ab $Q = 50 \text{ l/s}$ gibt das Erreichen der maximalen hydraulischen Leistungsfähigkeit des Schlammeimers an. Der Wasserstand im Straßenablauf befindet sich oberhalb der Oberkante des Schlammeimers.

Rückstau aus der Kanalisation: Die Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs nimmt in Abhängigkeit der Druckhöhe im Kanal ab.

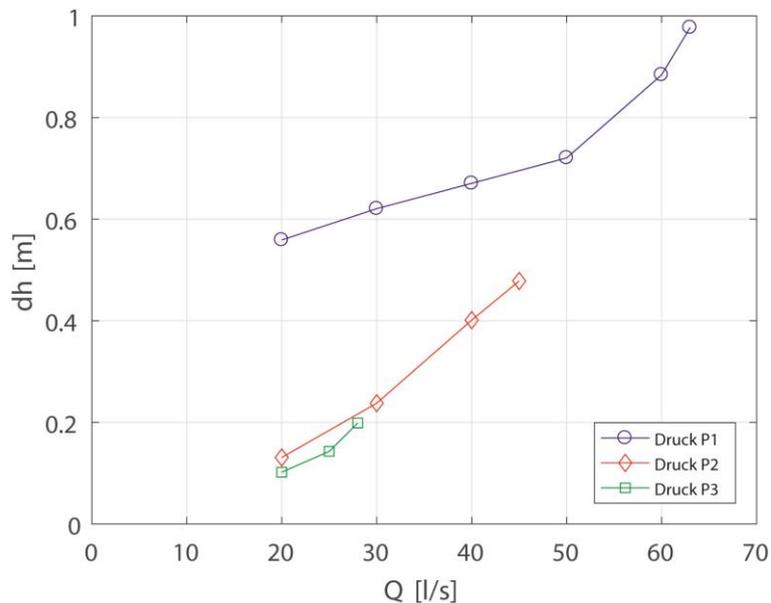


Abbildung 32: Differenz zwischen WSL und Druckhöhe im Kanal in Abhängigkeit des Zuflusses Q

5.6 Leistungsfähigkeit des Schlammeimers

Der Vergleich der Wasserspiegellage im Straßenablauf mit und ohne Füllung des Schlammeimers erfolgt am Beispiel einer geringen Druckhöhe im Kanal ($P1$) sowie einem Zufluss von $Q_{Zu} = 20$ l/s und $Q_{Zu} = 30$ l/s.

Abbildung 33 zeigt, dass bei einer geringen Füllung des Eimers ($C1$), bei der ausschließlich die Löcher im Boden des Schlammeimers geschlossen sind, nahezu keine Auswirkung auf die Wasserspiegellage im Straßenablauf auftritt. Die Leistungsfähigkeit der Löcher ist sehr gering bzw. kaum vorhanden. Bei einem Zufluss von $Q = 20$ l/s steigt das Wasser mit einem Füllungsgrad von $C2$ und $C3$ stark an. Mit darüber hinaus zunehmendem Füllungsgrad wird die Zunahme des Wasserspiegellagenanstiegs geringer, die maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs wird nicht erreicht. **Bei einem Zufluss von $Q = 20$ l/s ist der sogenannte Notüberlauf des Schlammeimers (obere Öffnungsreihe) ausreichend leistungsfähig.**

Im Vergleich dazu steigt der Wasserstand bei einem Durchfluss von $Q = 30$ l/s relativ gleichbleibend an. Mit einem Füllungsgrad von $C5$ ist die maximale Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs erreicht, der Wasserstand erreicht die Oberkante des Straßenablaufs.

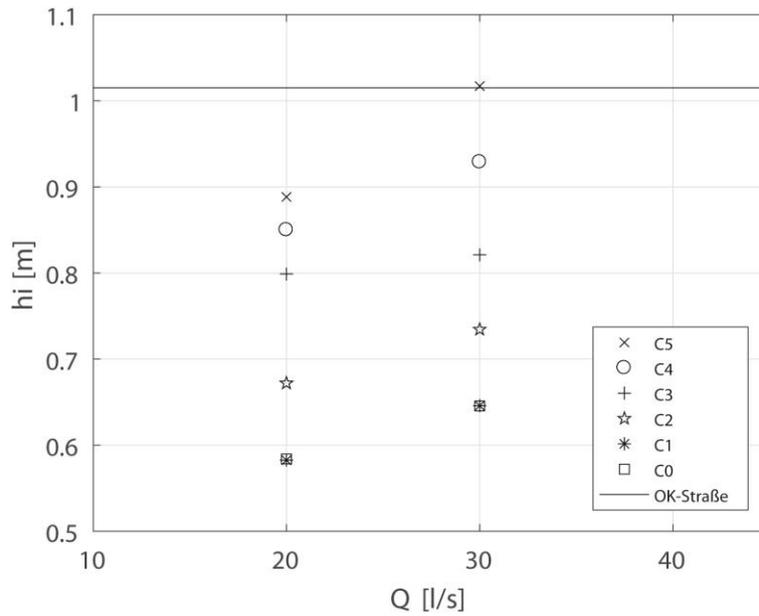


Abbildung 33: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation

In Abbildung 34 ist die Höhe der Wasserspiegellage im Straßenablauf bei einem Zufluss von $Q = 20$ l/s für verschiedene Druckhöhen im Kanal dargestellt. Bei einer Druckhöhe im Kanal von $P1$ und $P2$ ist die Zunahme der Wasserstandshöhe im Straßenablauf mit zunehmender Füllung des Schlammeimers deutlich zu erkennen. Die Leistungsfähigkeit des Schlammeimers nimmt mit zunehmender Verlegung ab, welches mit dem Wasserspiegellagenanstieg im Straßenablauf einhergeht.

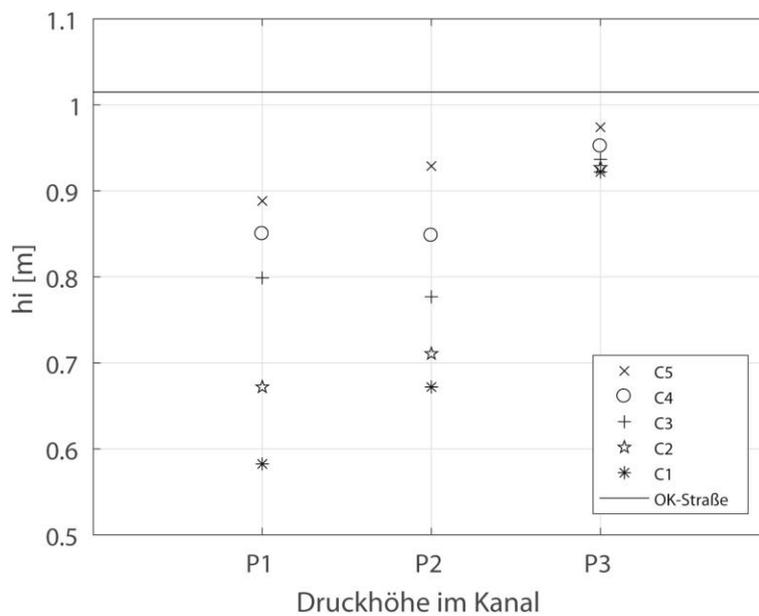


Abbildung 34: Abfluss im Rohr im Verhältnis zum Zufluss bei Rückstau aus der Kanalisation ($Q = 20$ l/s)

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Leistungsfähigkeit der großen Öffnungen am oberen Rand des Eimers im Verhältnis zu den Schlitzen höher ist. Zu sehen ist dies anhand des geringen Anstiegs des Wassers vom Füllungsgrad C4 zu C5.

Bei einer großen Druckhöhe $P3$ im Kanal steigt das Wasser mit größer werdendem Füllungsgrad nur geringfügig an. Die Wasserspiegellage bei nicht gefülltem Schlammeimer (C0) liegt bei einer Druckhöhe $P3$ und einem Zufluss $Q = 20$ l/s an der Oberkante des Schlammeimers, der Schlammeimer ist also vollständig mit Wasser gefüllt. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass das zufließende Wasser vor allem durch die oberen großen Öffnungen im Schlammeimer abgeführt wird und der Durchfluss durch die Schlitze bei einem nahezu vollständig gefüllten Straßenablauf ohnehin gering ist.

Dadurch ist die Zunahme der Wasserspiegellage innerhalb des Straßenablaufes bei fast vollständig gefülltem Schlammeimer und den oben beschriebenen Randbedingungen ($P3$, $Q = 20$ l/s) gering.

Beim Vergleich der drei Modelle mit unterschiedlicher Angabe einer Druckhöhe im Kanal ist auffällig, dass die Höhe des Wasserstandes im Schlammeimer bzw. im Straßenablauf bei geringen Druckhöhen vor allem durch die Füllung des Schlammeimers beeinflusst wird. Je höher die Druckhöhe im Kanal ist, desto geringer fällt die Zunahme des Wasseraufstaus im Straßenablauf aus.

Auch mit zugesetztem Schlammeimer können, solange die oberen Schlitze noch frei sind (C5), 20 l/s bis 30 l/s schadlos abgeführt werden.

6 Bewertung der Ergebnisse: Gesamtsystem Straßenablauf

Starkregenereignisse haben in der Vergangenheit zu zahlreichen Überflutungen im urbanen Raum geführt. Starke Niederschlagsereignisse und daraus resultierende Überflutungen können überall auftreten und nahezu jeder kann davon betroffen sein, anders als es z.B. bei einem Flusshochwasser der Fall ist. Es besteht akuter Handlungsbedarf um neue Konzepte zur Anpassung der Siedlungsentwässerung an die veränderten Randbedingungen zu entwickeln und umzusetzen.

Im Rahmen des abgeschlossenen Projektes „Ableitung von extremen Niederschlagsereignissen im urbanen Raum: Leistungsfähigkeit von Straßeneinläufen“, gefördert vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, wurde die Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen unter idealen Bedingungen untersucht. Es konnte die Effizienz handelsüblicher Aufsätze quantifiziert werden. Die physikalischen Modellversuche haben gezeigt, dass die Effizienz neuartiger Aufsätze im Vergleich zum häufig verbauten Standardaufsatz nach DIN 19583 um teilweise bis zu 10 % höher ist. Die gesamte Effizienz der Aufsätze unter idealen Bedingungen (keine Verlegung durch Laub) lag in allen Versuchsläufen bei über $E = 70 \%$. Bei untersuchten Durchflüssen von maximal $Q = 21 \text{ l/s}$ und Längsneigungen zwischen $S_L = 2,5 \%$ und $S_L = 10,0 \%$ lag der höchste gemessene Abfluss von der Straße in den Straßenablauf bei etwa $Q_{l,max} = 18 \text{ l/s}$.

Häufig sind die oberirdischen Teile des Straßenablaufs, die Straßenablauf-Aufsätze mit Laub oder Schmutz/Schlamm zugesetzt, sodass der Einlaufquerschnitt verringert ist und/oder das abgelagerte Laub eine Veränderung der Strömungseigenschaften hervorruft und damit die Effizienz der Aufsätze beeinflusst. Die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Versuche mit echtem Laub haben gezeigt, dass auch bei einer **Verlegung durch Laub** die **Effizienz der Pultaufsätze bei über $E = 70 \%$ liegt. Im Mittel ist die Effizienz bei einer Verlegung durch Laub um 10 % geringer als im ideal freien Zustand.** Die Reduzierung der Leistungsfähigkeit ist stark von dem Ablagerungsverhalten des Laubs auf bzw. vor dem Aufsatz abhängig.

Neben der Leistungsfähigkeit des Straßenablauf-Aufsatzes können auch die unterirdischen Bauteile des Straßenablaufs begrenzend auf die gesamte Leistungsfähigkeit des Straßenablaufs wirken. Die beschriebenen numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die **unterirdischen Bauteile des Straßenablaufs** mit Schlammeimer und Anschlussleitung (DN150) **keine Begrenzung der Leistungsfähigkeit** darstellen. Das unterirdische System ist leistungsfähig genug, die Abflüsse von der Straße, die durch den Aufsatz in den Straßenablauf gelangen, schadlos abzuführen ($Q_{l,max} = 18 \text{ l/s}$).

Der Aufsatztyp (Geometrie des Pultaufsatzes) ist der begrenzende Faktor für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Straßenablauf.

7 Ausblick

Mit den orientierenden Modellversuchen zum Ablagerungsverhalten bzw. der Beeinflussung der Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen durch Laub konnte gezeigt werden, dass die Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen im Mittel um 10 % kleiner ist als bei freiem Straßenablauf, aber immer noch über 70 % liegt. Dies gilt jedoch nur, wenn keine zusätzliche Verstopfung der Öffnungen durch Schlamm vorliegt, welcher sich über einen längeren Zeitraum angelagert hat. Bei einer Verstopfung durch Schlamm ist die Lage am Straßenablauf-Aufsatz für die Abnahme der Effizienz von Bedeutung. Die beschriebenen Modellversuche zur Beschreibung der Effizienz von Straßenablauf-Aufsätzen sind alle für einen rückstaufreien Zustand durchgeführten worden (siehe Abbildung 35 a). In orientierenden numerischen Modellversuchen wurde weiterhin der rückgestaute Abfluss von der Straße in die Kanalisation (Abbildung 35 b) untersucht, wobei die unterirdischen Bauteile berücksichtigt wurden. Bei diesen Modellversuchen konnte gezeigt werden, dass die unterirdischen Bauteile in der Regel nicht limitierend wirken, sondern der Straßenablauf-Aufsatz als maßgeblicher limitierender Faktor wirkt.

Weiterer Forschungsbedarf bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Abflusszustände im urbanen Raum besteht im Zustand c, dem Austritt von Wasser aus der Kanalisation an die Oberfläche.

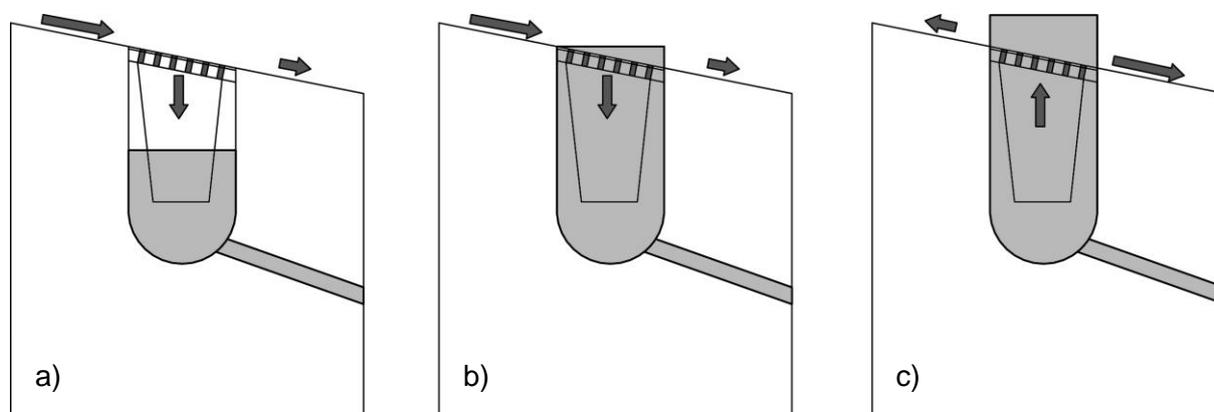


Abbildung 35: Interaktion Oberfläche Kanal (Quelle: KEMPER (2018))

Die Ergebnisse des FuE-Projektes sind ein wichtiger Bestandteil in der Gesamtbetrachtung „Umgang mit Starkregen im urbanen Raum“. Für die Berechnung der Abflussvorgänge an der Oberfläche und im Kanal mithilfe gekoppelter Simulationsmodelle stellen die Ergebnisse dieses Projektes einen weiteren wichtigen Schritt in der realitätsnahen Abbildung der Schnittstelle Straßenablauf dar.

8 Literaturverzeichnis

Brown, S.A.; Schall, J.D.; Morris, J.L.; Doherty, C.L.; Stein, S.M.; Warner, J.C. (2009): Urban Drainage Design Manual – Hydraulic Engineering Circular 22 (HEC-22), Third Edition, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C., National Highway Institute, Virginia, USA.

DIN 4052 (2006): Betonteile und Eimer für Straßenabläufe. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.

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.

FGSV (2005): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Entwässerung (RAS-Ew), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, e.V., Köln.

FGSV (2006): Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, e.V., Köln.

Flow Science Inc. (Editor) (2015): FLOW-3D User's manual. Version 11.1.

Guo, J.C.Y.; MacKenzie, K.A. (2012): Hydraulic Efficiency of Grate and Curb-Opening inlets under Clogging Effect, Final Report, Colorado Department of Transportation.

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.

Kemper (2018): Hydraulische Leistungsfähigkeit von Straßenablauf-Aufsätzen. Dissertation, Bericht Nr. 22, LuFG Wasserwirtschaft und Wasserbau, Bergische Universität Wuppertal.

KOSTRA-DWD-2010R (2017): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2010). Deutscher Wetterdienst, Offenbach.

Spaliviero, F.; May, R.W.P.; Excaramaia, M. (2000): Spacing of Road Gullies – Hydraulic performance of BS EN 124 gully gratings and kerb inlets, Report SR 533, HR Wallingford.