

Kurzfassung und Empfehlungen des Forschungsvorhabens

# **REduktion des FEststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen (REFENI) Phase 2**

Auftraggeber MULNV NRW

---

Januar 2019

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft  
und FH Münster  
Institut für Infrastruktur – Wasser – Ressourcen – Umwelt



# **REduktion des FEststoffeintrages durch Niederschlagswassereinleitungen – Phase 2**

## **Kurzfassung und Empfehlungen des Forschungsvorhabens**

### **Projektbearbeitung**

#### **KIT**

PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs  
Dr.-Ing. Dipl. Geoökol. Mike Kemper  
Dr. rer. nat. Karoline Morling

#### **FH Münster**

Simon Ebbert M.Sc  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Mohn  
Simon Precht B.Eng.  
Dr.-Ing. Nina Voßwinkel  
Maïke Wietbüscher M.Sc.

#### **TU Kaiserslautern**

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

#### **DWA**

Dipl.-Ing. Christian Berger

### **Auftraggeber**

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



Wir bedanken uns vielmals beim Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen für die Förderung des Vorhabens.

Das Vorhaben wurde in Kooperation zwischen dem

Karlsruher Institut für Technologie,  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich  
Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft (IWG-SWW) und der

Fachhochschule Münster,  
Institut für Infrastruktur – Wasser – Ressourcen – Umwelt (IWARU)

bearbeitet.

Das Forschungsvorhaben wurde durch

Christian Berger (DWA) und durch

Prof. Dr.-Ing. Theo Schmitt der (TU Kaiserslautern) begleitet.

---

## Inhalt

Veranlassung .....	1
1 Zielsetzung.....	2
2 Vorgehensweise.....	3
3 Ergebnisse .....	4
3.1 Einzugsgebietsanalyse .....	4
3.2 Spezifische Feststofffrachten in den Einzugsgebieten .....	5
3.3 Feststoffkonzentrationen und -frachten im Zulauf der Regenklärbecken .....	5
3.4 Trübungsmessung .....	6
3.5 Detailuntersuchung RKB Dorsten .....	7
3.6 Labor-Untersuchung der physikalischen Sedimenteigenschaften .....	7
3.7 Validierung der numerischen Simulation im Labormaßstab .....	9
3.8 Validierung der numerischen Simulation an In-situ-Messungen.....	10
3.9 Optimierung RKB Dorsten .....	11
4 Fazit .....	12
5 Empfehlungen .....	14
5.1 Hinweise zur Behandlungsbedürftigkeit.....	14
5.2 Hinweise zur Dimensionierung .....	16
5.3 Hinweise zur konstruktiven Gestaltung.....	18
5.3.1 Einlauf- und Verteilungsbauwerks .....	18
5.3.2 Sedimentationskammer .....	20
5.3.3 Klärüberlauf .....	20

---

## Veranlassung

Im Trennerlass des Landes Nordrhein-Westfalen haben Regenklärbecken eine zentrale Funktion zur Behandlung von belasteten Niederschlagsabflüssen. Das Land Nordrhein-Westfalen förderte daher das Vorhaben „**RE**duktion des **FE**ststoffeintrages durch **N**iederschlagswassereinleitungen“ (Kurz: **REFENI**), das in zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen bearbeitet wurde. Das Projekt hatte das übergeordnete Ziel, die Bewertung von Becken vor dem Hintergrund gestiegener Anforderungen an die Regenwasserbehandlung zu fundieren

In „Phase 1“ lag ein Schwerpunkt auf der Untersuchung der Reinigungsleistung von Regenklärbecken. Das Monitoring von zehn Regenklärbecken in Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg ergab für Feststoffe der Kornfraktion  $< 0,063$  mm einen mittleren Wirkungsgrad von  $< 30$  %. Dieses Ergebnis und die Tatsache, dass die konstruktive Gestaltung vieler Becken aus hydraulischer Sicht nicht den Anforderungen entsprachen, lieferten den Anlass, einzelne Becken detaillierter zu untersuchen, um spezifische Einflussgrößen auf die Wirksamkeit zu identifizieren und praxisorientierte Aussagen zur Gestaltung und zum Betrieb von Regenbecken abzuleiten.

Ein weiterer Befund von besonderem Interesse war, dass bei fünf von zehn Anlagen im Zulauf eine Feinpartikelkonzentration von deutlich  $< 50$  mg/l gefunden wurde. Die anderen Anlagen zeigten Konzentrationen im bekannten Wertebereich  $> 100$  mg/l.

Die teilweise sehr geringen Zulaufkonzentrationen gaben Anlass für eine Ursachenforschung, sodass in der zweiten Projektphase ein Schwerpunkt auf der detaillierten Untersuchung des Feststoffaufkommens und -transports in Einzugsgebieten lag. Ein weiterer Schwerpunkt war die Weiterentwicklung und Konsolidierung der numerischen Strömungssimulation (CFD-Modellierung), um so zu Erkenntnissen zu gelangen, die messtechnisch in situ nur extrem aufwändig zu erzielen wären.

## 1 Zielsetzung

Entsprechend der skizzierten Ergebnisse der Phase 1 des Vorhabens wurden die Vorhabenziele des IWG-SWW angepasst. Der Schwerpunkt der Phase 2 lag auf der quantitativen und qualitativen Beschreibung des Feststoffaufkommens im Einzugsgebiet und im Zulauf von Regenbecken. Die hierzu erforderlichen Arbeiten wurden in den Einzugsgebieten von zwei Regenklärbecken in Rastatt, die die Niederschlagsabflüsse eines Gewerbegebietes behandeln, durchgeführt. Die konkreten Ziele der Arbeiten waren:

- Quantifizierung von Produktion und Akkumulation von Feststoffen in Einzugsgebieten,
- Charakterisierung der Feststoffe,
- Ermittlung von Einflussgrößen, die das Feststoffdargebot im Einzugsgebiet maßgeblich bestimmen,
- Ermittlung von Einflussgrößen, die den Feststofftransport im Einzugsgebiet maßgeblich bestimmen,
- Ableitung von Planungshinweisen.

Die Arbeiten des IWARU in Phase 2 sollen dazu beitragen, die Instrumente zur Beurteilung der Wirksamkeit von Becken im Bestand ebenso, wie die Kenntnisse über die Dimensionierung von neu zu planenden Regenklärbecken zu verbessern.

Die konkreten Ziele der Arbeiten waren:

- Weiterentwicklung der CFD-Modellierung zur realitätsnahen Beschreibung der Dynamik des Stoffein- und Stoffaustrags,
- Beschreibung des erreichbaren Stoffrückhalts an Bestandsbecken mittels CFD-Modellierung,
- Empfehlungen für die Bemessung, die Gestaltung und den Betrieb von Regenbecken.

## 2 Vorgehensweise

Zur Erreichung der genannten Ziele wurde im Teilprojekt des IWG-SWW eine Beprobung des Feststoffaufkommens auf repräsentativen Fahrbahn- und Gehwegsflächen sowie die volumenproportionale Beprobung der Zu- und Abläufe der zugeordneten Regenklärbecken durchgeführt. Im Untersuchungsprogramm wurden die Regenklärbecken Federbach ( $A_{E,k,b,a} = 78 \text{ ha}$ ) und Lochfeld ( $A_{E,k,b,a} = 78 \text{ ha}$ ) berücksichtigt. Zur Abbildung der zeitlichen Dynamik der Feststoffkonzentrationen im Zulauf der Anlage und während des Sedimentationsprozesses wurden in der Sedimentationskammer des RKB Federbach Trübungsmessungen durchgeführt.

Alle Feststoffproben wurden hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung und ihrer organischen Anteile charakterisiert und auf ihre Beladung mit Phosphor und Zink untersucht. Für die Einzugsgebietsflächen und die Regenbecken wurde jeweils eine Jahresfracht abgeleitet.

Um die auftretenden Differenzen zwischen der Feststofffracht im Einzugsgebiet und im Zulauf der Regenbecken interpretieren und Hinweise für zukünftige Planungen geben zu können, wurden Messungen zur Verkehrsbelastung, der Rauheit der Oberflächenbeläge, der Verteilung der Feststoffe im Straßenquerschnitt sowie zum Niederschlag durchgeführt.

Über die Verknüpfung der Gebietseigenschaften sollte letztlich geprüft werden, ob die bisher genutzten Parameter geeignet und ausreichend sind, um die Feststoffausträge über den Niederschlagabfluss realitätsnah abschätzen zu können.

Im Teilprojekt des IWARU wurden in verschiedenen Arbeitsschritten Messdaten für die Kalibrierung bzw. Validierung des numerischen Simulationsverfahrens generiert, sowohl an einem realen RKB im Großmaßstab (RKB Dorsten) als auch an einem maßstäblich verkleinerten Modellbecken und verschiedenen Labor-Testeinrichtungen. Diese Daten dienen der Kalibrierung von Teilmodellen zur hydrodynamischen Strömungssimulation sowie der Simulation der Partikelbewegung. Durch Messungen an einem nach FROUDE betriebenen, physikalischen Labormodell im Maßstab 1:10 sollte gewährleistet werden, dass die Simulation der Partikelbewegung realitätsnah ist.

Die Simulation der Strömung wurde im Großmaßstab durch den Vergleich mit den Ergebnissen des Beckens in Dorsten validiert. Darauf aufbauend konnte dann die bereits validierte Simulationsmethode für die Partikelbewegung angewendet werden und eine auf Wirkungsgraden basierende, exemplarische Optimierung des betrachteten Regenklärbeckens erfolgen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Einzugsgebietsanalyse

In diesem Vorhaben wurden zwei Einzugsgebiete sowie die zugehörigen zentralen Regenklärbecken untersucht. Über eine differenzierte Flächenanalyse konnte die aktuelle abflusswirksame Fläche ermittelt werden. Für das EZG Lochfeld liegt eine abflusswirksame Fläche von 16 ha vor und für das EZG Federbach von 78 ha. Das ermittelte spezifische Volumen des RKB Lochfeld ist mit  $18 \text{ m}^3/\text{ha}$  bei der derzeitigen Nutzung der erschlossenen Flächen sehr hoch. Das spezifische Volumen des RKB Federbach entspricht mit  $5,9 \text{ m}^3/\text{ha}$  den Planungsdaten. Das Einzugsgebiet des RKB Federbach ist quasi vollständig bebaut.

Das Monitoring der Straßen bestätigt das bekannte Ablagerungsmuster von Feststoffen im Straßenraum, das sich durch große Feststoffdepots mit hohen Grobkornanteilen nahe den Rinnsteinen oder allgemeiner im nicht befahrenen Bereich der Straße auszeichnet. Auf den befahrenen Straßenflächen sind die deponierten Feststoffmassen deutlich geringer und bestehen vorwiegend aus feinen Partikeln. Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs konnten im Einzugsbiet Lochfeld eine mittlere Feststofffracht von  $1,26 \text{ g/m}^2$  und für das Einzugsgebiet Federbach eine mittlere Feststofffracht von  $3,98 \text{ g/m}^2$  ermittelt werden. Dieses um den Faktor drei höhere mittlere Feststoffaufkommen wird durch das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen in den beiden Einzugsgebieten quasi exakt gespiegelt (Federbach 5.400, Lochfeld 1.750 KFZ/d).

Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur bei der Betrachtung der mittleren Verhältnisse in den Gesamteinzugsgebieten. Für die untersuchten Einzelstandorte konnte kein statistischer Zusammenhang zwischen dem Verkehrsaufkommen und den ermittelten Feststoffmengen der Messstellen für die Gesamt- und die Feinfraktion ermittelt werden. Eine Vielzahl unterschiedlich ausgeprägter, lokal wirksamer Strukturen, wie abgesenkte Fugen, Dellen oder Senken im Asphalt, Neigungsänderungen, Bewuchs in den Fugen überlagern den generellen Befund. Dies gilt in gleicher Weise auch für alle weiteren Einflussgrößen, wie Oberflächenrauheit, Niederschlagsgeschehen oder Trockenzeit vor der Probennahme und bedeutet, dass eine Charakterisierung von Einzugsgebieten auf Basis einzelner Stichproben nicht möglich ist.

Die Feststoffe im Einzugsgebiet werden vor allem von den Kornfraktionen  $> 0,063 \text{ mm}$  geprägt. Die größten Massenanteile liegen mit ca. 70 % in der Sandfraktion ( $0,063 - 2,0 \text{ mm}$ ) vor. Nur 20 % der Feststoffe sind der Ton- und Schlufffraktion ( $< 0,063 \text{ mm}$ ) und nur 10 % der Kiesfraktion ( $> 2 \text{ mm}$ ) zuzurechnen. Dieses Ergebnis spiegelt die bisherigen Erfahrungen wider.

Die Glühverluste der Feststoffe auf den Einzugsgebietsflächen sind gering und lagen in allen Korngrößenfraktionen im Mittel bei 20 %. Dies belegt für beide Standorte den vergleichsweise geringen Vegetationseinfluss.

### 3.2 Spezifische Feststofffrachten in den Einzugsgebieten

Die Daten zum Feststoffdargebot der beiden Einzugsgebiete wurden zur Berechnung der spezifischen jährlichen Gesamt- und Feinpartikelfracht genutzt. Hierzu wurde ein mittlerer jährlicher Niederschlag von 710 mm angenommen.

Tabelle 1: Spezifisches jährliches Feststoffaufkommen in den Einzugsgebieten der RKB Lochfeld und Federbach

	spez. Feststofffracht gesamt in kg/(ha·a)	spez. Feststofffracht fein in kg/(ha·a)
Lochfeld	2.820	574
Federbach	4.786	595

Die für die beiden Einzugsgebiete ermittelte spezifische Gesamtfracht variiert deutlich, um den Faktor 1,7, während die spezifischen Feinpartikelfrachten nahezu identisch sind. Auch dies spiegelt die Erfahrungen aus anderen Untersuchungen wider. Insbesondere die im Gebiet anfallende Grobpartikelfracht unterliegt immer sehr großen Schwankungen.

Die für die EZG ermittelten Frachten können Flächenkategorien im Gelbdruck DWA-A 102 (2016) zugeordnet werden. Beide Flächen wären der Belastungskategorie II zuzuordnen. Dies stimmt für das Einzugsgebiet Lochfeld mit einer Kategorisierung nach DTV überein. Das Einzugsgebiet Federbach wäre nach einer Bewertung über DTV der Belastungskategorie III zuzuordnen.

### 3.3 Feststoffkonzentrationen und -frachten im Zulauf der Regenklärbecken

Die Messungen zu Feststoffkonzentrationen im Zulauf der Becken ergaben für beide Standorte sehr geringe Konzentrationen von nur 7 mg/l für das RKB Lochfeld und 23 mg/l für das RKB Federbach. Ursächlich für diese extrem geringen Konzentrationen im Fall des RKB Lochfeld sind nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen der geringe Nutzungsgrad der erschlossenen Flächen von nur 22 %, die hohe Rauheit der Straßenbeläge und das geringe Kanalgefälle. Am Standort des Beckens kommt nach wie vor sehr wenig Wasser und damit quasi kein Feststoff an. Dieser Befund deckt sich mit den Daten aus Phase 1.

Die geringe Zulaufkonzentration im Fall des RKB Federbach erklärt sich aus einem hohen Fremdwasserzufluss, der dazu führt, dass das Becken periodisch teileingestaut ist und die Zulaufproben mit Einstauwasser verdünnt werden. Vor der baulichen Sanierung des Beckens wurde das Fremdwasser am Becken vorbeigeleitet. Aus der Phase 1 liegen daher für diesen Standort für  $AFS_{\text{fein}}$  repräsentative Zulaufkonzentrationen von 91,6 mg/l vor.

Auf Grundlage der genannten Konzentrationen und der für die beiden Gebiete abgeschätzten Niederschlagsabflussmengen wurde die spezifische Fracht im Zulauf der Becken ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Spezifische Feinpartikelzulauf fracht der RKB Lochfeld und Federbach

	spez. Feststofffracht fein in kg/(ha·a)	Anteil an der spez. Gebietsfracht fein in %
Lochfeld	34	6
Federbach	495	77

Die Zahlen verdeutlichen, dass der Feststofftransport und weniger das Feststoffaufkommen eine zentrale Rolle im Planungsprozess spielen.

### 3.4 Trübungsmessung

Für die Messzeiträume im Frühling (Mai bis Juni) und Herbst (September bis November) 2017 sowie im Winter (Januar bis März) 2018 konnten insgesamt 63 Regenereignisse ausgewertet werden, von denen verwertbare Trübungsmessungen vorlagen.

Für die ausgewerteten Regenereignisse wurde der Zusammenhang mit den folgenden Parametern untersucht:

- Regenmenge [mm],
- Regendauer [h],
- mittlere Intensität [mm/h],
- maximale Intensität [mm/h] und
- Dauer der vorherigen Trockenperiode [h].

Für den gesamten Datensatz konnten zwischen der Trübungsmessung (Mittelwerte und Maxima) und den aufgenommenen Parametern der Regenereignisse (Regenmenge, Regendauer, mittlere Intensität, maximale Intensität) keine statistisch signifikanten Zusammenhänge gefunden werden. Eine saisonal differenzierte Betrachtung zeigte allerdings systematisch geringere Trübungswerte während der Winterereignisse, die sich durch eine vergleichsweise geringere mittlere Intensität auszeichneten.

Weiterhin wurde im gesamten Datensatz keine direkte Abhängigkeit der Trübung von der Dauer der vorherigen Trockenperiode gefunden. Höhere Maximalwerte der Trübung wurden schon verzeichnet, wenn die vorherige Trockenperiode länger als einen Tag andauerte. Was darauf hinweist, dass das Feinpartikeldepot sehr schnell wieder aufgebaut werden kann oder durch Regenereignisse nicht vollständig entleert wird. Die in der Literatur zu findende Modellvorstellung, dass das Feststoffdepot über längere Zeiträume quasi kontinuierlich wächst, kann zumindest für die Verkehrsflächen der untersuchten Gebiete nicht bestätigt werden.

Mit Trübungssonden im Zulauf, der Mitte und im Ablauf des RKB Federbach wurde die Dynamik der Sedimentationsvorgänge genauer betrachtet. Diese Ergebnisse zeigen für Regenereignisse mit geringer mittlerer Intensität das erwartete Muster mit abnehmenden Konzentrationen im Längsverlauf des Beckens. Die Sondenuntersuchungen bestätigen allerdings auch, dass bei Regenereignissen mit hoher mittlerer Intensität Remobilisierungseffekte auftreten. So gab es Ereignisse, bei denen die höchsten Trübungswerte von der Sonde im Ablauf des RKB-Federbach gemessen wurden.

### **3.5 Detailuntersuchung RKB Dorsten**

Zur Realisierung der Detailuntersuchungen am RKB Dorsten wurde ein eigens für diesen Zweck entwickeltes Mess-, Auswertungs- und Aufzeichnungssystem installiert. Die verwendete Tracer-Messtechnik ist nicht nur mit hohem technischem und personellem Aufwand verbunden, sondern auch als äußerst fehleranfällig zu bewerten. Von 15 aufgezeichneten Ereignissen konnten letztlich nur drei der weiteren Gewinnung von Erkenntnissen dienen.

Sowohl die visuelle, qualitative Bewertung des Beckens in Dorsten als auch die quantitative Bewertung mittels Verweilzeitverteilung und Tracer-Indikatoren weisen auf eine Kurzschlussströmung im Becken hin. Die im Becken eingesetzte Lamellenwand kann dies offenkundig nicht verhindern. Es bestätigt sich die Erkenntnis aus dem ebenfalls am IWARU bearbeiteten MEREBEN-Projekt, dass Einbauten bei geringen Oberflächenbeschickungen kaum Einfluss auf die Durchströmung im Becken haben.

### **3.6 Labor-Untersuchung der physikalischen Sedimenteigenschaften**

Für die Absetzversuche und die Messung der kritischen Schubspannungen wurden die Versuchsmaterialien *Millisil® W4*, *SiLibeads* und *High Impact Polystyrene (HIPS)* charakterisiert.

Im Gegensatz zu den sehr feinen Materialien *Millisil® W4* und *SiLibeads* sind *HIPS*-Einzelpartikel gut sichtbar und daher für die Visualisierung der Sedimentations- und Remobilisierungsprozesse in Modellversuchen sehr gut geeignet, jedoch werden sie zu nahezu 100 % im Becken abgeschieden. Für Absetzversuche eignen sich daher lediglich die beiden feineren Materialien *SiLibeads* und *Millisil® W4*.

Die Sieblinien von *Millisil® W4* sind im Vergleich zu denen von *SiLibeads* deutlich weiter gestuft. Außerdem weichen die mit unterschiedlichen Messmethoden ermittelten Sieblinien bei *SiLibeads* weniger von der Herstellerkurve ab, als dies bei *Millisil® W4* der Fall ist. Daraus ergibt sich der Schluss, dass *SiLiBeads* besser als Versuchsmaterial geeignet ist als *Millisil® W4*, da die Reproduzierbarkeit der Absetzversuche besser möglich sein wird.

Für die Ermittlung der Sinkgeschwindigkeiten wurden die folgenden Methoden auf das synthetische Modellsediment *SiLibeads* angewendet:

- Absetzapparat Firma UFT,
- Absetzsäulenkaskade (Gegenstromklassierer),
- Partikelverfolgung mittels Videodokumentation.

Die mittels UFT-Absetzapparat ermittelten Sinkgeschwindigkeiten sind deutlich höher als die Sinkgeschwindigkeiten nach *STOKES*. Zudem konnte keine Klassierung der Partikel über den zeitlichen Verlauf des Versuches – wie es bei dieser Art des Versuches zu erwarten wäre – beobachtet werden. Die Ergebnisse werden somit als nicht belastbar bewertet.

Gleiches gilt für die Untersuchungen mittels Gegenstromklassierer. Hierdurch ergaben sich Sinkgeschwindigkeiten, die bis zu 10-fach über den nach *STOKES* berechneten lagen. Daher werden auch diese Ergebnisse als unplausibel bewertet.

Das dritte verwendete Verfahren ergab Sinkgeschwindigkeiten, welche zumindest ansatzweise mit den nach *STOKES* berechneten Sinkgeschwindigkeiten übereinstimmen. Für die größeren Partikel stimmen die Theorie und die Messungen annähernd überein. Es zeigt sich jedoch, dass die Abweichungen zu *STOKES* mit kleiner werdenden Durchmessern der Partikel steigen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für alle drei Verfahren, insbesondere für die feineren Partikel der Fraktion  $AFS_{\text{fein}}$ , deutlich höhere Sinkgeschwindigkeiten ermittelten wurden, als dies der Theorie nach *STOKES* entspricht. Eine weitere Verfolgung dieses Phänomens war jedoch im Rahmen des laufenden Projekts nicht möglich. Eine nähere Untersuchung bleibt zukünftigen Forschungsvorhaben vorbehalten.

Zur Definition des Bewegungsbeginns von Partikel ist ein Versuchsaufbau neu konzipiert worden, der bei intervallartiger Erhöhung des Durchflusses stationäre Zustände in einem Schubspannungs-Test-Gerinne ermöglicht. Als Versuchsmaterialien wurden die synthetischen Modellsedimente eingesetzt. Eine Untersuchung mithilfe von In-situ-Material konnte aufgrund fehlender Sedimentproben aus dem RKB Dorsten nicht durchgeführt werden.

Die Berechnung der bei Bewegungsbeginn im Modell auf der Sohle wirkenden Schubspannungen erfolgte im numerischen Modell, da dies die genaueste Methode der Berechnung (die Navier-Stokes-Gleichungen) enthält. Die Ergebnisse sind mit der kritischen Schubspannung der Partikel gleichzusetzen. Sie sind hier in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3: Ermittelte kritische Schubspannungen der synthetischen Modellsubstrate

Material	Einzelkorn			Korngefüge		
	SiLi-beads	Millisil® W4	HIPS	SiLi beads	Millisil® W4	HIPS
Korngröße $d_m$ ( $\mu\text{m}$ )	60	56	3000	60	56	3000
Krit. Schubspannung $\tau_{\text{krit}}$ (Pa)	0,010	0,012	0,0063	0,043	0,060	0,015

Die Wirkungsgrade sowie die Absetzbilder der drei synthetischen Modellsubstrate Millisil® W4, SiLibeads und HIPS dienten der späteren Validierung der Gesamtströmung des numerischen Modells im Modellmaßstab. Die Versuche wurden für vier unterschiedliche Oberflächenbeschickungen durchgeführt. Die Skalierung erfolgte nach dem Froud'schen Modellgesetz.

### 3.7 Validierung der numerischen Simulation im Labormaßstab

Zur Validierung der Simulation ist eine Geometrie für das numerische Modell mit den Abmessungen des physikalischen Modells der Grundvariante erstellt worden. Aus den Ergebnissen wurden Verweilzeitverteilungen generiert. Diese zeigen, dass die Charakteristik der hydrodynamischen Durchströmung des physikalischen Beckens durch das Simulationsmodell sehr gut repräsentiert wird und daher für die im Folgenden vorgestellten Simulationen verwendet werden kann.

Hier fand eine Auswahl des im numerischen Modell verwendeten Modellierungsansatzes für Partikelströmungen statt. Die Berechnung in unterschiedlichen Bezugssystemen kann sich sehr unterschiedlich auf die simulierten Absinkvorgänge auswirken. Exemplarisch werden in der hier folgenden Tabelle einige Ergebnisse für die Sinkgeschwindigkeiten  $w_s$  ( $10^{-3}$  mm/s) gezeigt:

Tabelle 4: Sinkgeschwindigkeiten der Modellsedimente

	Dichte in kg/m <sup>3</sup> der Korngröße 40 µm		
	1.020	1.460	2.650
<b>Mittelwert der analytischen Formeln</b> von STOKES, DIETRICH und OSEEN	<b>17,5</b>	<b>386</b>	<b>1.374</b>
aus Flow3D ("Euler-Euler")	11,4	250	952
aus Flow3D ("Euler-Lagrange")	17,4	400	1421
<b>rel. Abweichung "Euler-Euler "</b>	<b>38 %</b>	<b>38 %</b>	<b>32 %</b>
<b>rel. Abweichung "Euler-Lagrange"</b>	<b>0,3 %</b>	<b>4 %</b>	<b>4 %</b>

Die Simulationen der Wirkungsgrade wurden daher nur noch im Euler-Lagrange'schen Bezugssystem durchgeführt, da hier lediglich Fehler im einstelligen Prozentbereich auftraten.

Die Mess- und Simulationsergebnisse zur Validierung der kritischen Schubspannungen der Partikel zeigen, dass die Schubspannungen von Einzelkörnern auf der Sohle deutlich (82 %) unter den bisher durch die Literatur bekanntgegebenen Schubspannungen liegen. Bei den betrachteten Korngefügen war eine Abmilderung der dimensionslosen Schubspannungen um lediglich 50 % nötig, um das Verhalten der Partikel valide widerspiegeln zu können. Mit

diesen Korrekturen konnten die Simulationsergebnisse im Stil einer Kalibrierung an die Labormessungen angepasst werden.

Dazu mussten die Ergebnisse der vorher modifizierten, kalibrierten und validierten Teilmodelle gemeinsam verwendet und mit Experimenten verglichen werden.

Aus den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass die Abweichungen der numerisch berechneten Wirkungsgrade der RSM-Simulationen zu den zugehörigen Experimenten insbesondere bei den Versuchen mit SiLibeads geringer sind als die Abweichungen der  $k$ - $\epsilon$ -RNG-Simulationen. Jedoch sind die Unterschiede eher marginal.

In einem abschließenden, qualitativen Validierungsschritt sind direkte Vergleiche der experimentellen und numerischen Absetzbilder durchgeführt worden. Dabei ergaben sich ähnliche Absetzmuster. Die Ergebnisse dieses letzten Validierungsschrittes zeigen, dass die Unterschiede zwischen den Turbulenzmodellen eher gering sind. Es wird jedoch empfohlen, bei ausreichender Rechnerkapazität mit dem RSM-Modell zu simulieren, da hier gegenüber dem klassischen  $k$ - $\epsilon$ -RNG-Turbulenzmodell noch geringere Abweichungen zu den Wirkungsgraden der experimentellen Untersuchungen vorliegen.

### **3.8 Validierung der numerischen Simulation an In-situ-Messungen**

Für die Simulationen des RKB Dorsten wurden zunächst drei stationäre Niederschlagsereignisse mit Oberflächenbeschickungen von 4 m/h, 10 m/h und 12 m/h definiert. Weiterhin wurden die zwei o. g. gemessenen Ereignisse des RKB Dorsten im numerischen Modell simuliert.

Für die Untersuchung wurden verschiedene Zellgrößen verwendet. Die strömungstechnische Bewertung und Untersuchung ergab ein optimales Gitternetz mit einer Zellgröße von 5 cm. Bei dieser Zellgröße sind die Netzeinflüsse tolerierbar und Rechenzeiten sowie Speicherbedarf noch handhabbar.

Der Wirkungsgrad des Ist-Zustandes des RKB Dorsten liegt für die sehr feinen Partikel oberhalb des theoretischen Wirkungsgrades nach Hazen. Ein Erklärungsansatz hierfür findet sich im Projekt MEREBEN. Es wird angenommen, dass Rezirkulationszonen in Becken zwar für gröbere Partikel nachteilig sind, für die feinen Anteile jedoch sedimentationsförderlich sein können.

Das RKB Dorsten weist hinsichtlich der errechneten Strömungsindikatoren im Vergleich zum Projekt MEREBEN gute Indikatoren auf. Dies ist auf die Lamellenwand zurückzuführen.

Die Simulation der instationären Ereignisse stellt für Flow-3D kein Problem dar, solange die OW-Randbedingungen als Volume Flow Rate definiert sind. Diese wurden für die betrachteten Überlaufereignisse am Klärüberlauf (KÜ) anhand der Speichergleichung ermittelt und werden als plausibel betrachtet, da der in situ gemessene Durchfluss am KÜ mit dem simulierten Durchfluss übereinstimmt.

Anders sieht dies für die Betrachtung der Tracer-Konzentrationen aus. Die Reproduzierbarkeit der exakten Tracer-Konzentration war nicht möglich. Die hohen Wiederfindungsraten der Konzentration vom mehr 100 % ist nicht realistisch. Eine Kalibrierung der Tracer-Simulation des numerischen Modells anhand der In-situ-Messung am RKB Dorsten ist daher nicht möglich.

### 3.9 Optimierung RKB Dorsten

Um das RKB Dorsten hinsichtlich der Durchströmungscharakteristik sowie des Partikelrückhaltes zu optimieren, wurden verschiedene Optimierungsvarianten entwickelt. Die Varianten wurden mithilfe der Strömungsindikatoren  $I_{EV}$  und  $I_A$  bewertet. Für die Optimierungsvariante erfolgte eine Bestimmung der Sedimentationswirkungsgrade.

Zielsetzung der Optimierung war es, die Kurzschlussströmung im Becken zu reduzieren und die Rezirkulationszone in der Sedimentationskammer weitestgehend zu vermeiden. Hierzu wurden zusätzliche Einbauten entwickelt sowie die Ausführung der Lamellenwand verändert.

Die Simulationen wurden mit einer Oberflächenbeschickung von 10 m/h durchgeführt. Es wurden drei mineralische Partikel mit einem Durchmesser von 16  $\mu\text{m}$ , 40  $\mu\text{m}$  und 63  $\mu\text{m}$  untersucht. Durch die vorgeschlagene Optimierung wurden im Modell für alle untersuchten Partikel höhere Wirkungsgrade als im Ist-Zustand erzielt (Tabelle 5). Insbesondere für Partikel mit einem Durchmesser von 40  $\mu\text{m}$  ist der Unterschied mit 16 Prozentpunkten hoch.

Tabelle 5: Wirkungsgrade des RKB Dorsten im Ist-Zustand und nach hydraulischer Optimierung

Partikelgröße	Wirkungsgrad Ist-Zustand	Wirkungsgrad nach Optimierung
16 $\mu\text{m}$	9 %	17 %
40 $\mu\text{m}$	36 %	52 %
63 $\mu\text{m}$	77 %	84 %

## 4 Fazit

Im Entwurf des DWA-Arbeitsblattes A 102 wird der Parameter AFS63 als ein Leitparameter für die Planung von Anlagen zur Regenwasserbehandlung eingeführt. Das Arbeitsblatt stellt zur Abbildung mittlerer Bedingungen ein Zahlengerüst zum Stoffaustrag verschiedener Flächenkategorien zur Verfügung. Gleichzeitig verweist es auf eine differenzierte Flächenermittlung, die bei einem höheren Genauigkeitsanspruch angewandt werden kann.

Die Ergebnisse dieses Vorhabens unterstreichen die Plausibilität des Zahlengerüsts zum Stoffaustrag, verdeutlichen aber auch, dass eine differenzierte Betrachtung von Teilflächen und vor allem eine Erfassung transportrelevanter Einzugsgebietseigenschaften erforderlich ist, um eine zutreffende Planungsgrundlage zu haben.

Dabei wurde deutlich, dass zwischen bekannten Kontrollgrößen wie DTV, Niederschlagshöhe und -intensität, die Länge niederschlagsfreier Perioden und dem Aufkommen von Feststoffen  $< 63 \mu\text{m}$  keine deutlichen Korrelationen bestehen. Allerdings spiegelte sich die höhere Verkehrsbelastung im Gesamtgebiet in einer höheren spezifischen Fracht für die Feinpartikel wider, sodass sie als eine Größe zur Abschätzung des Verschmutzungspotenzials sicher geeignet ist. Sie definiert sozusagen die Produktion, erlaubt aber keine Rückschlüsse auf den Transport und den Verbleib der feinen Feststoffe. Diesbezüglich wirkt eine Reihe von weiteren Faktoren wie Windexpositionen, Vernetzung mit Grünflächen, Art und Zustand der abflusswirksamen Oberflächen.

Das Vorhaben hat gezeigt, dass die realitätsnahe Beschreibung der Transportphänomene in Einzugsgebieten und Kanalisation die Schlüsselgröße für die sachgerechte Planung von zentralen Regenwasserbehandlungsanlagen ist. Das Vorhaben hat auch gezeigt, dass die Fokussierung auf die feine Feststofffraktion auch in diesem Zusammenhang sinnvoll ist.

Im Zusammenhang mit der hydraulischen Optimierung bzw. optimalen hydraulischen Gestaltung von Sedimentationsanlagen zeigen die erarbeiteten Ergebnisse, dass die numerische Strömungssimulation ein wichtiges Werkzeug ist.

Über die normierten Verweilzeitmessungen und Tracer-Messungen können integrale Systemeigenschaften an Großanlagen erfasst werden. Inwieweit die vorhandenen Unterschiede zwischen den Ereignissen mit der instationären Ereignisdynamik oder der unterschiedlichen Oberflächenbeschickung zu begründen sind, kann jedoch auf Basis der Tracer-Untersuchungen aufgrund des Black-Box-Charakters dieser Methode nicht erfolgen.

Durch Tracer-Untersuchungen mit Flüssigtracer unter definierten Randbedingungen und stationären Durchflüssen kann für das Teilmodell „Strömung“ eine gute Übereinstimmung und ebenso eine gute Reproduzierbarkeit der qualitativen und quantitativen Dokumentation der hydrodynamischen Phänomene belegt werden. Somit können diese Messungen gut als Validierungsmodell der nachfolgenden numerischen Simulationen dienen.

Gleiches gilt nicht uneingeschränkt für das Teilmodell „Stofftransport“. Die für Millisil erzielten Wirkungsgrade waren durchweg etwas höher als die von SiLibeads. Dies ist nicht plausibel,

da SiLibeads die höheren Sinkgeschwindigkeiten bei gleichem Korndurchmesser aufweist. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Großausführung des Beckens schließt sich jedoch aus, da die synthetischen Modellsubstrate Millisil® W4 und SiLibeads nicht skaliert werden konnten.

Die Mess- und Simulationsergebnisse zur Validierung der kritischen Schubspannungen der Partikel zeigen, dass die Schubspannungen von Einzelkörnern auf der Sohle deutlich (82 %) unter den bisher durch die Literatur bekanntgegebenen Schubspannungen liegen. Bei den betrachteten Korngefügen war eine Abmilderung der dimensionslosen Schubspannungen um lediglich 50 % nötig. Mit diesen Korrekturen konnten die Simulationsergebnisse im Stil einer Kalibrierung an die Labormessungen angepasst werden und das Verhalten der Partikel valide widerspiegeln.

Die Zusammenführung der zuvor modifizierten, kalibrierten und validierten Teilmodelle gemeinsam zeigen nur marginal Unterschiede zwischen den numerisch berechneten Wirkungsgraden der RSM-Simulationen und den zugehörigen Experimenten sowie vergleichbare Absetzmuster.

Das Gesamtmodell konnte daher zur Simulation der Strömungsbedingungen im RKB Dorsten und zu deren Optimierung genutzt werden. Bei der Partikelsimulation konnten jedoch infolge von Einschränkungen in der Software bzw. infolge der nicht tolerierbaren hohen Simulationsdauern lediglich drei Partikelklassen simuliert werden. Dies stellt einen deutlichen Kritikpunkt gegenüber der Software Fluent dar.

## 5 Empfehlungen

Im Vordergrund der Regenwasserbehandlung stehen eine bedarfsgerechte Planung und eine im Hinblick auf die angestrebten Reinigungsziele geeignete Dimensionierung und konstruktive Gestaltung der Anlagen.

Die Ergebnisse des Vorhabens REFENI, Phase 1 zeigten, dass 60 % der Anlagen mittlere Feststoffzulaufkonzentrationen von  $\leq 40$  mg/l ( $SMC_{TS\ zu}$ ) aufweisen (Eyckmanns-Wolters et al., 2013). Bei derart geringen Zulaufkonzentrationen ist fraglich, ob eine Sedimentationsanlage wirksam zur Behandlung derartiger Abflüsse eingesetzt werden kann, so dass dieser Befund den Anlass dazu gab, sich intensiver mit den Ursachen der geringen Zulaufkonzentrationen zu befassen. Ziel war es, zusätzliche Argumente für eine bedarfsgerechte Planung zusammenzutragen.

Die Ergebnisse Phase 1 haben weiterhin gezeigt, dass die bestehenden Anlagen in Bezug auf ihre Sedimentationswirksamkeit leistungsschwach sind und ein hohes hydraulisches Optimierungspotential gegeben ist. Eine weitere Aufgabe der zweiten Projektphase war es daher, einzelne Becken detailliert zu untersuchen und die Felduntersuchungen durch CFD-Modellierung und -Simulation zu ergänzen. Ziel war es, Dimensionierungsempfehlungen durch zusätzliche Daten zu stützen und Hinweise für konstruktive Optimierungen abzuleiten.

Die Befunde aus diesen Untersuchungen, ergänzt durch die Erfahrungen weiterer vom Land Nordrhein-Westfalen (OptiTrenn<sup>1</sup>, MEREBEN 1 und 2<sup>2</sup>) und Baden-Württemberg (Schrägklärer-BW<sup>3</sup>) geförderter Vorhaben, werden genutzt, um nachfolgend Hinweise zur Behandlungsbedürftigkeit (Standortwahl), zur Dimensionierung und zur konstruktiven Gestaltung von Regenbecken zu geben.

### 5.1 Hinweise zur Behandlungsbedürftigkeit

Die Frage nach der Behandlungsbedürftigkeit von Niederschlagsabflüssen erfolgt in der Regel aufkommensbasiert auf Grundlage von Einzugsgebietseigenschaften und Nutzungsintensitäten. Auch der Entwurf des DWA-Arbeitsblattes A 102 (DWA, 2019) sieht eine entsprechende Vorgehensweise vor und bewertet die Verschmutzung von Regenwasserabflüssen und den Umfang notwendiger Behandlungsmaßnahmen auf der Grundlage des angenommenen Stoffaufkommens unterschiedlicher Herkunftsflächen.

Es erfolgt eine Einordnung unterschiedlicher Flächentypen und Flächennutzungen in die Belastungskategorien I (gering belastet), II (mäßig belastet) und III (stark belastet). Für den

---

<sup>1</sup> Kemper, M. & Fuchs, S. (2018): Optimierung des Feststoffrückhalts im Trennsystem durch Schrägklärer (OptiTrenn). Endbericht, Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

<sup>2</sup> Mohn, R.; Uhl, M.; Grüning, H. et al. (2018): Maßnahmen zur Ertüchtigung von Regenklärbecken und Hinweise zu deren Neubau (MEREBEN). Endbericht Phase 1 und 2., Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

<sup>3</sup> Kemper, M.; Fuchs, S.; Musall, M.; Grafmüller, T. & Oberle, P. (2018): Hydraulische Untersuchungen und numerische Strömungssimulation von Schrägklärern zur Regenwasserbehandlung im Misch- und Trennsystem. Endbericht, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Referenzparameter AFS63 und die Einleitung in Oberflächengewässer werden für die genannten Kategorien Rechenwerte zur Verfügung gestellt, um ein Behandlungserfordernis feststellen und quantifizieren zu können.

Tabelle 6: Rechenwerte des flächenspezifischen jährlichen Stoffabtrags und resultierende Behandlungserfordernisse

Kategorie	Flächenspezifischer Stoffabtrag AFS63 in kg/(ha·a)	Behandlungserfordernis
Kategorie I	280	Einleitung in Oberflächengewässer ohne Behandlung möglich
Kategorie II	530	Geeignete technische Behandlung vor Einleitung in Oberflächengewässer erforderlich
Kategorie III	760	

Das Land Nordrhein-Westfalen folgt seit vielen Jahren einer vergleichbaren Strategie. Mehrere Vorhaben haben jedoch gezeigt, dass die im Einzugsgebiet anfallende Feststofffracht nicht vollständig am Ort der zentralen Niederschlagsabflussbehandlung ankommt. Ein Stoffrückhalt im Gebiet kann auf vielfältige Ursachen zurückzuführen sein, wie zum Beispiel eine effektive Straßenreinigung bei gleichzeitig hohem Speicherpotential aufgrund hoher Rauheit der abflussliefernden Flächen.

In diesem Vorhaben wurde unter anderem die Verkehrsfrequenz als wichtige Kontrollgröße des Feststoffaufkommens untersucht. Die Zahlen zur Verkehrsfrequenz und zum Feststoffaufkommen zeigen einen klaren Zusammenhang und bestätigen das Konzept der Flächenkategorisierung sowie die in der Diskussion befindlichen Rechenwerte.

Die Ersteinschätzung, ob für ein Gebiet ein Behandlungserfordernis gegeben ist oder nicht, kann daher anhand der bestehenden Flächenkategorien erfolgen. Bei bestehenden Gebieten sollte diese Ersteinschätzung durch eine Verkehrszählung präzisiert werden. Durch diese Erhebung kann das spezifische Stoffaufkommen im Einzugsgebiet, das massenbezogen im Wesentlichen aus Straßenabrieb besteht, abgeschätzt werden. Das Verkehrsaufkommen definiert die Produktion von Feststoffen, erlaubt aber keine Rückschlüsse auf den Transport und den Verbleib der groben und feinen Feststofffraktionen.

Diesbezüglich wirkt eine Reihe von weiteren Faktoren wie Windexpositionen, Vernetzung mit Grünflächen, Art und Zustand der abflusswirksamen Oberflächen. Da die verschiedenen Einflussgrößen in der Regel von lokaler Bedeutung sind, ist die detaillierte Erhebung einer begrenzten Zahl von Einzelflächen nicht zielführend. Empfehlenswert ist es vielmehr, im Rahmen einer Gebietsbegehung eine große Anzahl von Teilflächen zu begutachten, um einen Gesamteindruck über die Retentionsprozesse im Einzugsgebiet zu gewinnen.

Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass die Beschaffenheit und Nutzungsintensität der Oberflächen sowie die Strukturvielfalt (Grau-Grün-Vernetzung) eine Schlüsselrolle einnehmen. Die Erhebung von Gebietseigenschaften kann sich daher auf diese einfach zu ermittelnden Größen beschränken. Dabei gilt, je höher die Rauigkeit (Pflasterflächen, raue

Beläge) und die Strukturvielfalt (Grau-Grün-Vernetzung) der Gebiete ist, desto höher ist der Stoffrückhalt.

Quantitative Hinweise zum Zusammenhang zwischen Oberflächenrauheit und Feststofftransport bzw. -retention finden sich bei Wicke et al (2012). Sie decken sich mit den Befunden aus diesem Vorhaben und können herangezogen werden, um die Gebietsretention bei ansonsten gleichen Randbedingungen abzuschätzen.

Tabelle 7: Textureigenschaften und Abflusskonzentration vereinfacht nach Wicke et al., 2012<sup>4</sup>

	Beton (sehr glatt)	Asphalt (glatt)	Asphalt (rau)
Rauheit in mm	≤ 0,5	≥ 3	≥ 5
AFS Konzentration in mg/l	91-100	52-65	27-50

## 5.2 Hinweise zur Dimensionierung

Das Bemessungsziel von Regenklärbecken mit oder ohne Einbauten ist die Reduzierung des Remobilisierungsrisikos und beruht auf einer Begrenzung der maximal zulässigen Oberflächenbeschickung. Für einen definierten Anlagenzufluss, der sich aus einer behandelnden kritischen Regenspense ableitet, wird die erforderliche Absetzfläche ermittelt. Sie entspricht bei Becken ohne Einbauten der Grundfläche der Anlage. Werden Platten- und Röhrenabscheider eingesetzt, ergibt sich unter Berücksichtigung der Neigung und Fläche der Abscheiderelemente eine im Vergleich zur Beckengrundfläche signifikant größere Absetzfläche (Faktor 5 bis 10).

Untersuchungen im Labor und an Großanlagen zeigen, dass im Misch- und Trennsystem sowie für Anlagen mit oder ohne Einbauten (Schräglärer) die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten. Vorausgesetzt, dass die Anlagen den hydraulischen Anforderungen entsprechen (gleichmäßige Durchströmung), sind Unterschiede zwischen den Systemen/Anlagentypen im Regelfall kleiner als die Unterschiede, die zwischen den einzelnen Ereignissen am gleichen System auftreten.

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Bemessungsoberflächenbeschickung und dem erreichbaren Feststoffwirkungsgrad für feine Partikel kann daher universell verwendet werden (s. Bild 1).

Der erreichbare Wirkungsgrad wird bei Anlagen mit niederschlagsbedingter Belastung (instationäre Belastung) vor allem durch die Vielzahl von Kleinereignissen beeinflusst. Die Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung dient dann dazu Remobilisierungseffekte und damit verbundene negative Wirkungsgrade zu vermeiden. Die mittlere den Wirkungsgrad der Anlage prägende Oberflächenbeschickung während der Ereignisse wird immer deutlich unter der Bemessungsoberflächenbeschickung liegen.

<sup>4</sup> Wicke, D.; Cochrane, T. A. & O'Sullivan, A. D. (2012): Atmospheric deposition and storm induced runoff of heavy metals from different impermeable urban surfaces. In: Journal of environmental monitoring : JEM 14 (1), S. 209–216.

Der aus Großanlagenuntersuchungen abgeleitete Wert zur Vermeidung von Remobilisierung liegt bei einer Bemessungsoberflächenbeschickung von  $q_A \leq 4$  m/h. Mit dieser Begrenzung des Anlagenzuflusses kann ein Feststoffrückhalt von 40 % bis 50 % erreicht werden (s. Bild 1, rote Kurve).

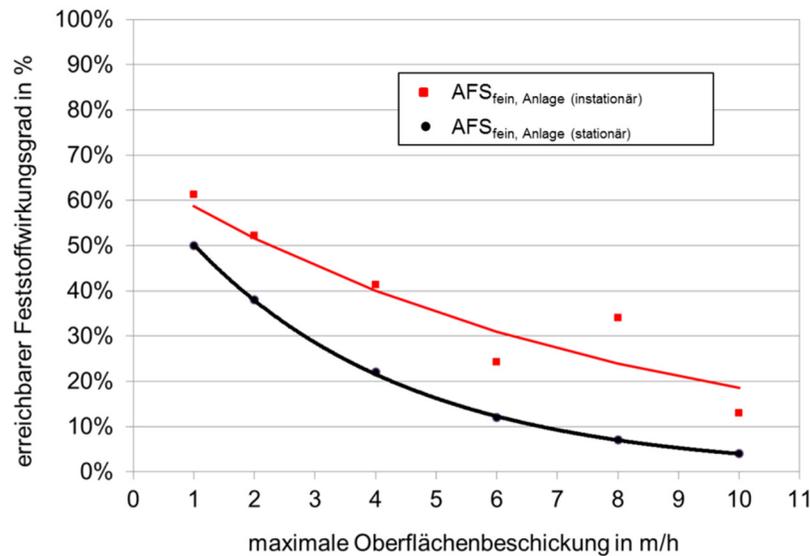


Bild 1: Zusammenhang zwischen erreichbarem Feststoffwirkungsgrad und maximaler Oberflächenbeschickung

Werden Sedimentationsanlagen mit einem konstanten Zufluss (stationäre Belastung) beschickt, wie diese beispielsweise bei der Entleerung eines großvolumigen Speichers über einen Schrägklärer der Fall sein kann, muss die Bemessungsoberflächenbeschickung reduziert werden, um einen mit niederschlagsbedingter Belastung vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen. Der Bemessungswert hat hier nicht die Funktion das Remobilisierungsrisiko zu begrenzen, sondern bestimmt, da er konstant anliegt, unmittelbar den erreichbaren Sedimentationswirkungsgrad. Der den Wirkungsgrad positiv beeinflussende Effekt von Ereignissen, die deutlich unterhalb des Bemessungswertes liegen, entfällt im stationären Betrieb definitionsgemäß.

Für solche Anlagen läge die Bemessungsoberflächenbeschickung zwischen  $q_A \leq 2$  und 1 m/h (s. Bild 1, schwarze Kurve).

Damit die in Bild 1 gezeigten Wirkungsgrade erreicht werden können, müssen die Funktionskomponenten eines Regenklärbeckens konstruktiv so gestaltet werden, dass die ihnen zugedachte Aufgabe erfüllt werden kann. Hinweise hierzu gibt das nachfolgende Kapitel.

### **5.3 Hinweise zur konstruktiven Gestaltung**

Die Bewertung der Funktionskomponenten von Rechteckbecken wurde auf der Basis von numerischen Simulationen, physikalischen Modellversuchen und Erfahrungen aus dem Monitoring vorgenommen. Aus den genannten Untersuchungen lassen sich Empfehlungen für die konstruktive Gestaltung des Einlauf- und Verteilungsbauwerks, der Sedimentationskammer und des Klärüberlaufs ableiten.

#### **5.3.1 Einlauf- und Verteilungsbauwerks**

Sedimentationsanlagen benötigen ein funktionales Einlauf- und Verteilungsbauwerk, das eine Energiedissipation und die optimale Durchströmung des Beckens gewährleistet. Die wird erreicht, wenn eine Pfropfenströmung so gut wie möglich angenähert wird. Die hydraulischen Untersuchungen im physikalischen und numerischen Modell haben gezeigt, dass die folgenden konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten zu empfehlen sind:

- Prallplatte über die gesamte Beckenhöhe,
- hohe Einlaufschwelle,
- Einlaufwand mit Prallwand und Palisaden,
- Einlaufwand mit horizontalem Einlaufschlitz.

Die empfohlenen Einlauf- und Verteilungsbauwerke weisen aufgrund ihrer konstruktiven Gestaltung unterschiedliche Strömungscharakteristiken bzw. Strömungsphänomene auf. Sie führen jedoch alle zu einem hydraulisch günstigen Strömungsverhalten und erfüllen die Grundanforderungen an die Energiedissipation und Strömungsverteilung. Sie stellen für die Praxis nahezu gleichwertige und robuste Lösungsvarianten dar, die für unterschiedliche Zuflusssituationen (longitudinal und transversal) gleichermaßen eingesetzt werden können.

Sogenannte Prallteller oder Reflektoren sind nicht zu empfehlen, da sie ausgedehnte Rezirkulationszonen erzeugen. In Bild 2 sind die vergleichsweise einfachen konstruktiven Lösungen schematisch dargestellt.

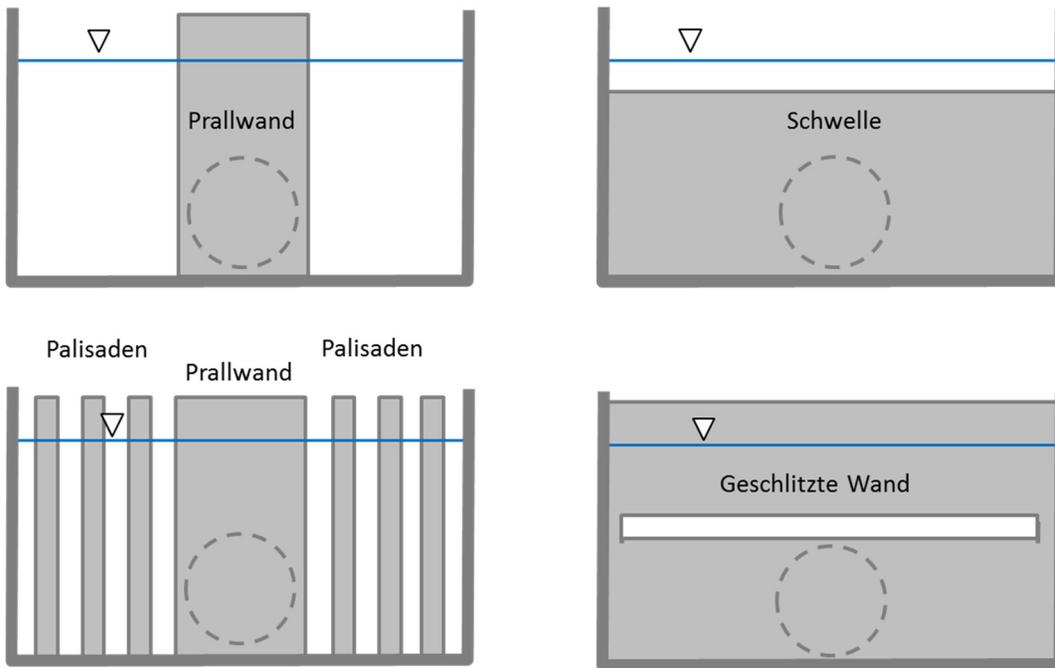


Bild 2: Schematische Darstellung der empfohlenen konstruktiven Lösungen für das Einlauf- und Verteilungsbauwerk

Strömungs-Gleichrichter stellen einen im Vergleich zu den in Bild 2 gezeigten Lösungen komplexen Einbau dar, werden aber insbesondere für Becken mit transversaler Anströmung als besonders empfehlenswert eingestuft. Die Funktionalität der zuvor genannten Lösungen ist bei dieser Anströmsituation nur eingeschränkt gegeben. Durch Strömungs-Gleichrichter können Rezirkulationszonen nahezu vollständig vermieden werden, woraus sich eine annähernd pfropfenartige Durchströmungen über die gesamte Beckenlänge ergibt.

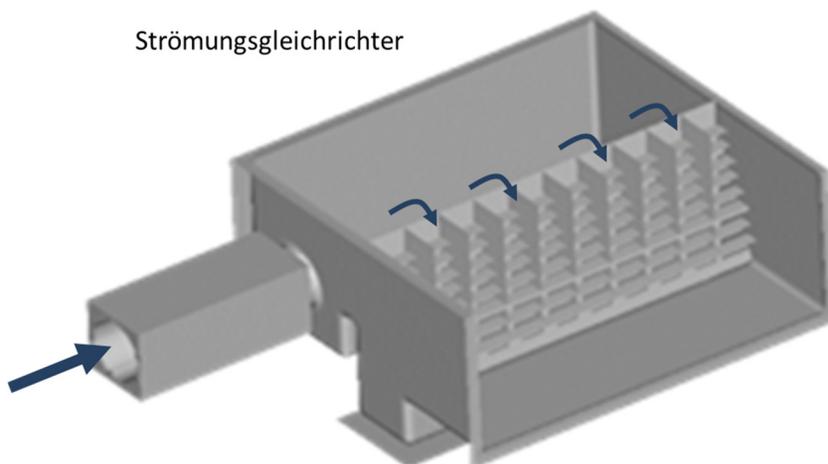


Bild 3: Schematische Darstellung eines Strömungsgleichrichters nach MEREBEN, Mohn et al. 2018

### 5.3.2 Sedimentationskammer

Die geometrischen Randbedingungen für die Sedimentationskammer sind gemäß DWA-A 166 (2013)<sup>5</sup> über das Längen/Breiten-Verhältnis ( $3,0 < L/B < 4,5$ ) definiert. Diese Vorgaben gehen zurück auf physikalische Untersuchungen von Muth (1992)<sup>6</sup>, die gezeigt haben, dass bei diesen Verhältnissen die Strahlausbreitung sehr gleichmäßig ist. Im Bestand werden diese Vorgaben häufig nicht eingehalten. Die Becken sind tendenziell zu kurz und zu breit. Die numerischen Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass die Abmessungen der Sedimentationskammer von untergeordneter Bedeutung sind. Wenn die Bemessungsvorgaben eingehalten sind und das Einlauf- und Verteilungsbauwerk seine Aufgabe erfüllt, ist es ausreichend die Becken so lang und so flach wie möglich zu konstruieren. Die Vorgabe  $L/B > 3$  ist für Becken ohne Einbauten nach wie vor zu empfehlen.

Diese Empfehlung gilt nicht, wenn die Becken mit Schrägklärern ausgestattet werden sollen. Um in derartigen Anlagen eine vollständige Durchströmung zu erreichen, wird empfohlen das Verhältnis von Länge zu Breite kleiner zu wählen. Lange und schmale Geometrien erzeugen bei Schrägklärern zulauffern Stagnationsbereiche.

Schrägklärer müssen im Gegensatz zu Rechteckbecken ohne Einbauten über eine Wassertiefe von mindestens 1,90 m verfügen. Sie ergibt sich aus:

- der Höhe Klarwasserzone über den Schrägklärerelementen von 0,20 m bis 0,40 m,
- der Bauhöhe der Schrägklärerelemente von ca. 0,90 m (Länge Lamelle/Röhre = 1,00 m),
- dem Abstand zwischen der Bauwerkssohle und der Unterkante der Schrägklärerelemente von  $\geq 0,80$  m.

Weiterführende Empfehlungen zur Dimensionierung und konstruktiven Gestaltung finden sich im Abschlussbericht OptiTrenn.

Im Neubau sind optimierte Rundbecken einem Rechteckbecken vorzuziehen. Ein optimiertes Rundbecken verfügt über einen zentralen Zulauf und einem außen umlaufenden Klärüberlauf. Es wird radial von innen nach außen durchströmt. Vergleichsrechnungen im numerischen Modell zeigen, dass der erreichbare Wirkungsgrad immer deutlich höher ist als der eines ebenfalls optimierten Rechteckbeckens.

### 5.3.3 Klärüberlauf

Der Klärüberlauf in Regenklärbecken hat zwei Funktionen. Er muss die gleichmäßige Abnahme des Wassers, das die Sedimentationskammer durchströmt hat, gewährleisten und kontrolliert, ggfs. im Zusammenspiel mit dem Beckenüberlauf, den Anlagendurchsatz.

---

<sup>5</sup> DWA-A 166 (2013): Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung - Konstruktive Gestaltung und Ausrüstung. Arbeitsblatt. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., S. 78.

<sup>6</sup> Muth, W. (1992): Regenüberlaufbecken - Strömungsuntersuchungen an Durchlaufbecken. In: KA Korrespondenz Abwasser, 6/92 S.910-915

Die erstgenannte Funktion ist immer erfüllt, wenn der Klärüberlauf an der Stirnseite des Beckens über die gesamte Beckenbreite angeordnet ist. Dabei ist es unerheblich, ob der Klärüberlauf im Betonbauwerk integriert oder als Vorsatzkonstruktion ausgeführt ist. Wichtig ist, dass die Klärüberlaufschwelle justierbar sind, um eine gleichmäßige Durchströmung der Sedimentationskammer zu ermöglichen. Bei Betonschwellen empfiehlt sich daher das Anbringen einer justierbaren Edelstahlkante.

Eine zweite entscheidende Funktion des Klärüberlaufs ist die Kontrolle des Anlagendurchsatzes. In Regenbecken ohne Einbauten erfolgt die Füllung des Beckenvolumens ohne eine Zulaufdrosselung.  $Q_0$  wird in das Becken eingeleitet und die Drosselung des Anlagenzuflusses auf den Bemessungswert erfolgt erst, wenn der Klärüberlauf aktiv ist. Häufig wird die über den Klärüberlauf abgeführte Wassermenge über die Höhen- und Längenverhältnisse zwischen Beckenüberlaufschwelle und Klärüberlaufschwelle gesteuert. Dies führt jedoch zu einer vergleichsweise unscharfen Festlegung der Drosselwassermenge am Klärüberlauf. Da die Einhaltung der maximalen Oberflächenbeschickung aber von großer Bedeutung für den erreichbaren Sedimentationswirkungsgrad ist, wird grundsätzlich der Einsatz vor selbstregulierenden Klärüberläufen empfohlen.

Bei Schrägklärern sollte die Drosselung des Zuflusses vor der Sedimentationskammer erfolgen. Aufgrund der Klarwasserabzüge, die flächig über den Schrägklärer angeordnet sind, entstehen sehr lange Schwelle, sodass eine Drosselung an dieser Stelle nicht möglich ist. Die Drosselung im Anlagenzufluss muss gewährleisten, dass der Bemessungszufluss jederzeit in die Anlage gelangt und eine Trennschärfe des Drosselorgans von mindestens 1,2 gegeben ist. Bild 4 zeigt die Konfiguration für ein mit Schrägklärern ausgestattetes Regenklärbecken.

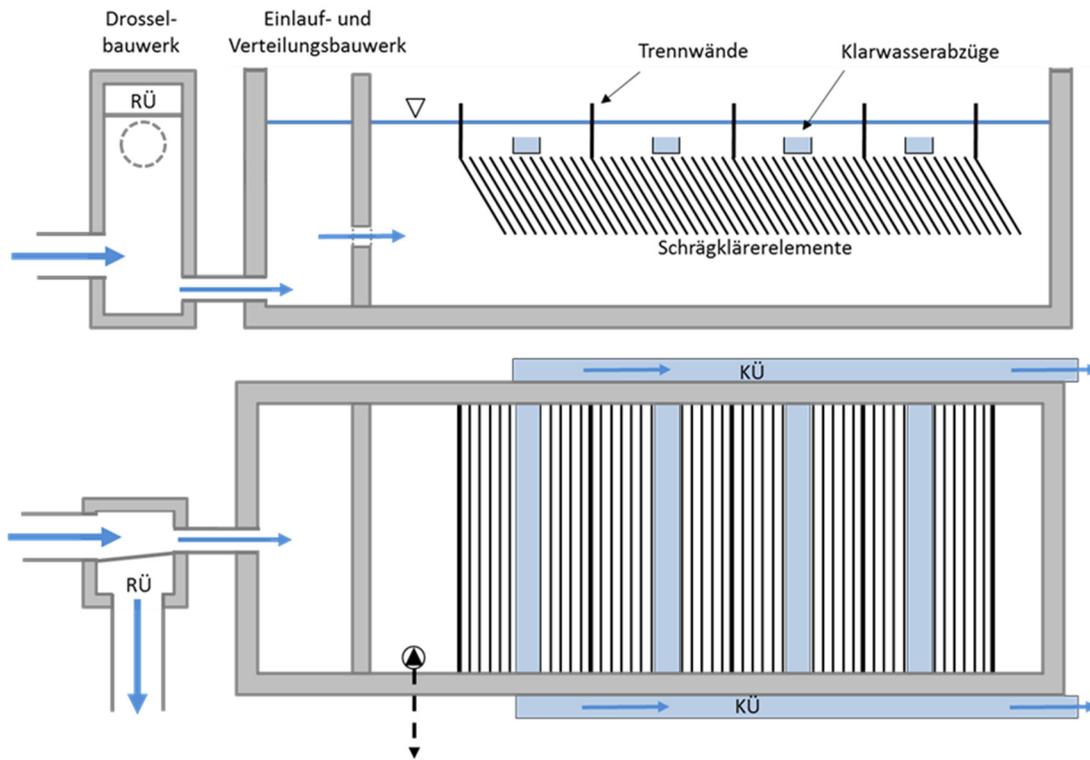


Bild 4: Schematische Darstellung eines Schräglärers mit seitlich angeordneten Sammelrinnen im Trennsystem (OptiTrenn)