
Endbericht zum Forschungsvorhaben „Optimierung des
Feststoffrückhalts im Trennsystem durch Schrägklärer“

Kurzfassung

31. Oktober 2018

Mike Kemper und Stephan Fuchs

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



Auftragnehmer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG)
Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft
Gotthard-Franz-Str. 3
76131 Karlsruhe

Projektlaufzeit:

01/08/2015 bis 31/07/2018

.....

PD Dr.-Ing. Stephan Fuchs

Karlsruhe, den 31.10.2018

Veranlassung

Die Sedimentationswirksamkeit von nach den geltenden Regeln bemessenen Regenwasserbehandlungsanlagen im Misch- und Trennsystem ist gering und liegt im Jahresmittel in der Regel bei Werten von $\leq 30\%$. Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistung bestehender Anlagen liegen in der Reduzierung der Oberflächenbeschickung und in der Optimierung der Durchströmung. Beides kann mit vertretbarem Aufwand in Schrägklärern erreicht werden (Dohmann et al. 2003, Fuchs et al. 2010 und 2014). Großtechnische Erfahrungen und Laboruntersuchungen zu den Anforderungen an die Gestaltung und den Betrieb von Schrägklärern sowie die erreichbaren Wirkungsgrade liegen insbesondere für Anlagen im Mischsystem vor. Die vorliegenden Untersuchungen ergänzen den vorhandenen Kenntnisstand für Trennsystemanlagen und führen die Befunde in gemeinsamen Empfehlungen zusammen. Zusätzlich wurde im Rahmen dieses Vorhabens geprüft inwieweit Sondenmessungen die konventionelle Form der Anlagenuntersuchungen ergänzen bzw. ersetzen können.

Schrägklärer

Schrägklärer werden zur Fest-Flüssig-Trennung schon lange in der industriellen Anwendung genutzt. Es sind hierbei Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstromabscheider zu unterscheiden. Bei Gegenstromabscheidern werden die Zwischenräume der Plattenelemente aufwärts gerichtet durchströmt, Partikel und die auf den Oberflächen gebildeten Schlämme fließen in die entgegengesetzte Richtung. Dieses ist das am häufigsten eingesetzte Verfahren. Krauth und Bondareva (1999) sowie Dohmann et al. (2003) haben Untersuchungen hierzu durchgeführt, um diese Technologie für den Bereich der Abwasseraufbereitung zu nutzen.

Bei Gleichstromabscheidern ist die Fließrichtung des Wassers und der Partikel bzw. des Sediments gleich. Für die Regenwasserbehandlung sind Gleichstromabscheider nicht geeignet. Die Suspension wird in der Regel von oben eingeleitet, so dass die Entnahme des Klarwassers nur nach einer weiteren Umleitung des Volumenstroms möglich wäre.

Bei Kreuzstromabscheidern durchströmt das Wasser horizontal die Platten; eine Technik, die für den Einsatzbereich in der Regenwasserbehandlung noch nicht hinreichend untersucht wurde.

Methoden

Im Zuge des vom Land NRW geförderten Vorhabens „NRW-RÜB“ wurde eine mobile Versuchsanlage konzipiert. Hierzu wurde ein handelsüblicher Abrollcontainer in eine Sedimentationsanlage mit Schrägklärern im Originalmaßstab umgebaut (s. Abbildung 1).

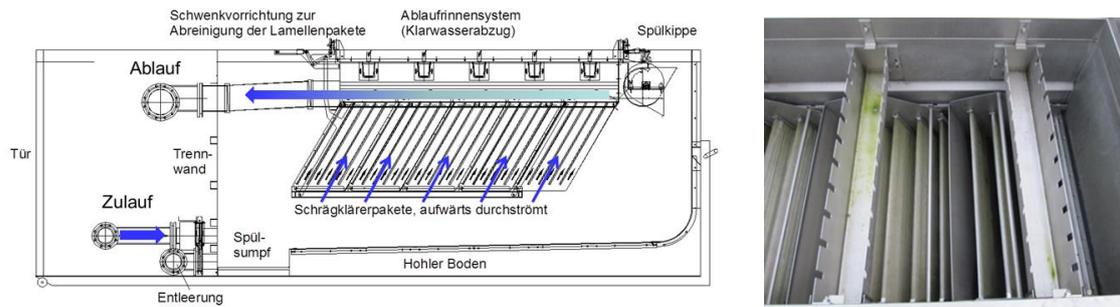


Abbildung 1: Versuchsanlage im Längsschnitt und Ansicht von oben Ausbau mit Plattenelementen

Diese Anlage wurde im zugrundeliegenden Vorhaben weiter genutzt. Für die Versuchsdurchführung wurde eine frequenzgesteuerte Pumpe im Zulaufkanal einer Kläranlage (Mischsystemuntersuchungen) und im Zulaufkanal eines Regenklärbeckens (Trennsystemuntersuchungen) eingebaut. Bei einsetzenden Niederschlagsereignissen ist die Sedimentationsanlage automatisiert in den stationären Betrieb gegangen. Die Energieumwandlung und Strömungsverteilung im Zulauf des Schrägklärers erfolgte in allen Versuchen durch ein T-Stück, das auf das Zulaufrohr aufgesetzt wurde.

Im Vorhaben wurde im Mischsystem mit Platten- und Röhrenelementen vergleichend untersucht. Im Trennsystem wurde die Anlage nur mit Röhrenelementen betrieben. Die Ermittlung der Frachtwirksamkeit der verschiedenen Konfigurationen und für unterschiedliche Oberflächenbeschickungen erfolgte über Feststoffsammler. Diese Probenahme-strategie wurde im Fachbereich Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütwirtschaft entwickelt und in vielen Studien erfolgreich angewandt. Unter anderem in den vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Vorhaben „ReFeNi Phase 1“ (Fuchs et al. (2013)) „ReFeNi Phase 2“ und dem RÜB-Vorhaben (Kemper et al. (2015a) und (2015b)). Die durchflussproportional gezogenen Proben aus dem Zu- und Ablauf der Sedimentationsanlage werden in großvolumige Behälter (ca. 1000 l) gefördert. Nach Ende des Entlastungsereignisses sedimentieren die Feststoffe in dem Behälter über einen Zeitraum von 2 bis 3 Tagen. Anschließend erfolgt die Entnahme von Wasser- und Feststoffproben aus dem Behälter. Die Feststoffprobe wird über zwei Maschenweiten 0,063 mm und 2,0 mm nass gesiebt. In den resultierenden drei Kornfraktionen (<0,063 mm, 0,063-2,0 mm und > 2,0 mm) wird die Trockensubstanz und der Glühverlust bestimmt. Über den Trockensubstanzgehalt (TS) und das Volumen der Probe im Behälter wird die Konzentration der Feststoffe ermittelt und für die Frachtbilanzierung genutzt.

Ergebnisse

Für diskrete und während der Versuchsdurchführung konstant gehaltene Oberflächenbeschickungen zwischen 1 m/h bis 6 m/h wurden bis zu 6 Wiederholungen durchgeführt. Für jeden Versuch wurde eine Massenbilanz erstellt, die als Grundlage für die Ermittlung des mittleren Sedimentationswirkungsgrades für die entsprechende Oberflächenbeschickung genutzt wurde. In Abbildung 2 wurden die Mediane des für jede Oberflächenbeschickung ermittelten Wirkungsgrades genutzt, um eine Exponentialfunktion für Misch- und Trennsystem abzuleiten.

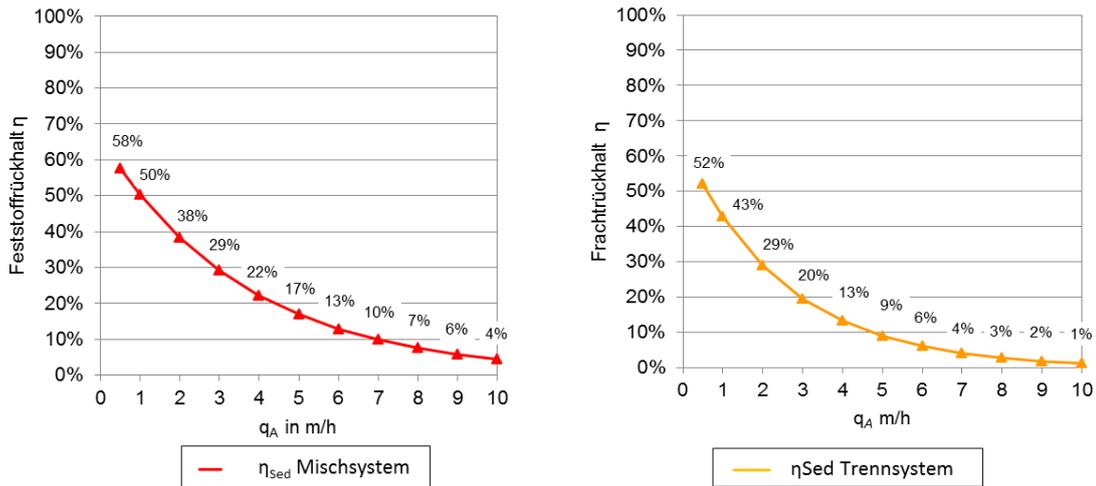


Abbildung 2: Sedimentationswirkungsgrade für die Feststofffraktion < 63 µm im Misch- und Trennsystem

Die in Abbildung 2 dargestellten Funktionen zeigen, dass der auf Sedimentation beruhende Frachtrückhalt im Mischsystem systematisch etwas höher ist als im Trennsystem. Dies kann auf andere Partikeleigenschaften, die während der Versuche nicht vergleichbaren Zulaufkonzentrationen oder die unterschiedlichen Flockungseigenschaften der Partikel im Mischsystem zurückzuführen sein. Bei den in diesem Vorhaben durchgeführten Versuchen war die Zulaufkonzentration im Mischsystem systematisch höher. Dies ist häufig mit höheren Grobanteilen und damit mit einer höheren Wirksamkeit verbunden. Die mittlere Abweichung von 6 % ist vor dem Hintergrund der hohen Streuung der Wirksamkeiten in den Wiederholungen jedoch gering und es liegen Befunde aus Großanlagenuntersuchungen vor, bei denen dieser entwässerungssystembedingte Unterschied nicht auftritt. Zur Beschreibung des von der Oberflächenbeschickung abhängigen Sedimentationswirkungsgrades wird daher für das Misch- und Trennsystem eine einheitliche Funktion empfohlen (Abbildung 3).

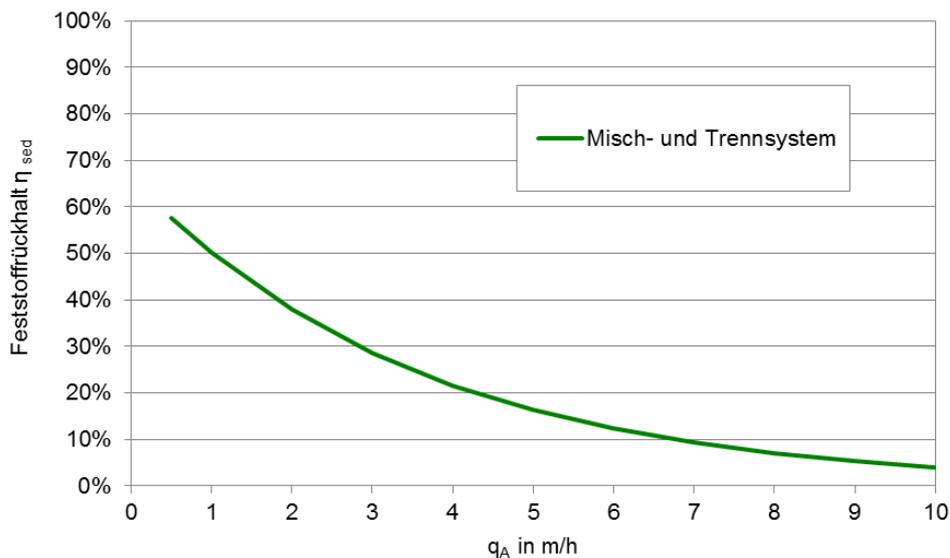


Abbildung 3: Sedimentationswirksamkeit für Partikel < 0,063 mm im Misch- und Trennsystem unter stationären Bedingungen

Zur Ermittlung der Wirksamkeitskurve für Trennsystem und Mischsystem wurden 61 Versuche in beiden Systemen (40 MS und 21 TS) zusammengeführt.

Die Ermittlung von Zu- und Ablaufkonzentrationen bildet unter anderem die Grundlage für die Beurteilung der Wirksamkeit von Anlagen zur Regenwasserbehandlung. In Monitoring-Vorhaben des Fachbereichs Siedlungswasserwirtschaft und Wassergütewirtschaft werden in der Regel Feststoffsammler eingesetzt, die valide Grundlagendaten zur Ableitung von Konzentrationen und Frachten, insbesondere auch für den Parameter AFS_{Fein} , liefern. Feststoffsammlerdaten beziehen sich immer auf die mittleren Bedingungen während eines oder mehrerer Ereignisse. Die Vorgehensweise kann per Definition keine Informationen zum zeitlichen Verlauf der Konzentrationen oder zu Spitzenkonzentrationen bereitstellen.

Aus dem abgeschlossenen Vorhaben mit dem Titel „Analyse der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch online Messtechnik“ standen UV/VIS-Spektrometersonden zur Verfügung. Diese Sonden wurden genutzt, um Informationen zum zeitlichen Verlauf der Konzentrationen im Zu- und Ablauf der Anlage zu generieren, um zu prüfen, ob die Sondendaten nach Integration der Ganglinien zur Frachtberechnung genutzt werden können und, um zu ermitteln, ob die Sonden für einen Routineeinsatz geeignet sind. Für das Messprogramm in diesem Vorhaben wurde zwei Sonden im Zu- und eine im Ablauf der Anlage verwendet. Die Sonden wurden lokal anhand der Labordaten von 4 Ereignissen kalibriert, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Anpassung der Sonden erfolgte über zwei Regressionsverfahren (Ordinary Least Square (OLS) und Partial Least Square Regression(PLS)). Durch diese sehr aufwändige lokale Kalibrierung liefern die Sonden immer genauere Ergebnisse als auf Basis der voreingestellten globalen Kalibrierung. Zur Anpassung der Sonden sind die beiden geprüften Regressionsmodelle gleich gut geeignet, auch wenn die Partial Least Square Regression für den Parameter CSB bessere statistische Gütemaße zeigt. Insgesamt ist jedoch die Reproduzierbarkeit der Laborergebnisse trotz lokaler Kalibrierung unbefriedigend. Dies liegt ggf. an der hohen Heterogenität der Abwasserzusammensetzung oder den hohen Matrixanteilen, also optisch aktiven Stoffen die nicht den Feststoffen zuzurechnen sind. Die Nutzung der Sondendaten führt in Abhängigkeit von dem genutzten Regressionsmodell und vom betrachteten Ereignis zu signifikanten Unter- oder Überschätzungen der tatsächlichen Frachten (s.Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich der Frachten und Wirksamkeiten

	Datum	FFS B _{zu} [kg]	OLS B _{zu} [kg]	PLS B _{zu} [kg]	OLS/FFS	PLS/FFS
Zulauf	11.11.2017	0,6	14	18,7	23,33	31,17
	21.10.2017	3,9	17,2	6,2	4,41	1,59
	02.09.2017	4,4	7,2	2	1,64	0,45
	05.10.2017	4,5	8,6	7	1,91	1,56
	21.07.2017	15	23,5	10	1,57	0,67
	24.07.2017	19,6	29,6	15,1	1,51	0,77
		FFS B _{ab} [kg]	OLS B _{ab} [kg]	PLS B _{ab} [kg]	OLS/FFS	PLS/FFS
Ablauf	11.11.2017	0,5	8,1	13,8	16,20	27,60
	02.09.2017	1,7	2,1	1	1,24	0,59
	05.10.2017	2,4	5,2	10,8	2,17	4,50
	21.10.2017	3,7	10,4	7,6	2,81	2,05
	24.07.2017	4,5	29,2	118	6,49	26,22
	21.07.2017	6,5	6,4	5,7	0,98	0,88

Die Daten in Tabelle 1 zeigen, dass die ermittelten Frachten teilweise erheblich voneinander abweichen. Dies ist nicht per se ein Problem. Im gegebenen Fall ist aber weder in Bezug auf das verwendete Regressionsmodell noch in Bezug auf die detektierten Konzentrationen ein systematischer Zusammenhang erkennbar. Dies wäre jedoch die Voraussetzung für eine realitätsnahe Anpassung der Kalibrierparameter und die Auswahl eines geeigneten Regressionsansatzes. Auf Basis der in diesem Vorhaben gewonnenen Daten war beides für den Parameter Feststoff nicht möglich.

Abschließend ist festzuhalten, dass die verwendeten Sonden unabhängig vom analysierten Parameter und der verwendeten Regression in der Lage sind den relativen Konzentrationsverlauf realitätsnahe abzubilden. Die Ableitung von stoffbezogenen Konzentrationen ist jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden. Eine lokale Kalibrierung führt in allen Fällen zu besseren und reproduzierbaren Ergebnissen. Sie reduziert allerdings nicht die bestehenden Unsicherheiten bei der Konzentrationsbestimmung. Die Nutzung der Daten im Rahmen einer Frachtberechnung ist daher nach den vorliegenden Ergebnissen nicht möglich, so dass ein Routineeinsatz im Rahmen einer Wirksamkeitskontrolle beim gegebenen Entwicklungsstand nicht zu empfehlen ist. Dies gilt insbesondere da der Betreuungs- und Wartungsaufwand sehr hoch ist.

Empfehlungen

Die Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen leiten sich aus der Zusammenführung der verschiedenen von den Ländern Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg geförderten Untersuchungen von Schrägklärern ab. Sie umfassen den in unterschiedlichen Maßstäben und Untersuchungsansätzen gewonnenen Kenntnisstand und werden in Baden-Württemberg gleichlautend in einer Handlungsempfehlung veröffentlicht.

Zusätzlich zu den Bemessungshinweisen und konstruktiven Empfehlungen tragen die nachfolgenden Aspekte zum sicheren Betrieb von Schrägklärern bei:

- Die Bauwerke sollten nach Möglichkeit in offener Bauweise errichtet werden.
- Schrägklärer sollen nicht im Dauerstau betrieben werden.
- Eine Grobstoffabscheidung mittels Feinrechen ist beim Einsatz im Mischsystem grundsätzlich erforderlich.
- Beim Trennsystem wird eine Grobstoffabscheidung empfohlen, wenn in erhöhtem Maße Vegetationsreste (Laub) auftreten.
- Zur Reinigung der Bauwerkssohle können die für Regenbecken üblichen Reinigungseinheiten Verwendung finden.
- Begehbare Stege können bei Anlagen mit großer Grundfläche eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

Bemessung

Die Bemessung von Schrägklärern basiert, wie die von Anlagen ohne Einbauten, auf der Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung. Für einen im Standardfall anzusetzenden Abfluss aus einer zu behandelnden kritischen Regenspende $r_{krit} = 15 \text{ l/(s}\cdot\text{ha)}$ wird nach folgender Gleichung die erforderliche Absetzfläche ermittelt.

$$q_{A,max} = \frac{Q_{zu}}{A_{eff}}$$

mit:

$q_{a,max}$ = Bemessungsoberflächenbeschickung in m/h

Q_{zu} = Bemessungszufluss zur Sedimentation in m^3/h

A_{eff} = effektive Absetzflächen in m^2

Für Platten- und Röhrenabscheider wird die effektive Absetzfläche aus der Grundfläche des Beckens nach folgenden Gleichungen berechnet.

a) Plattenabscheider

$$A_{eff} = L \cdot B \cdot \cos \alpha \cdot n_{platten}$$

b) Röhrenabscheider

$$A_{eff} = L \cdot d \cdot \cos \alpha \cdot n_{Röhren}$$

mit:

L = Länge der Platten /Röhre in m

B = Breite der Platten in m

$\cos \alpha$ = Cosinus des Neigungswinkels $\alpha = 60^\circ$

d = Durchmesser der Röhren in m

Bei Anlagen mit niederschlagsbedingter Belastung dient die Begrenzung der maximalen Oberflächenbeschickung dazu Remobilisierungseffekte und damit verbundene negative Wirkungsgrade zu vermeiden. Der Sedimentationswirkungsgrad wird in diesen Anlagen vor allem durch die Vielzahl von Kleinereignissen positiv beeinflusst und ist folgerichtig bei der gleichen Oberflächenbeschickung höher als bei stationärem Betrieb. Der aus

Großanlagenuntersuchungen abgeleitete Wert liegt für solche Anlagen bei einer Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A \leq 4$ m/h. Der im Großanlagenbetrieb unter in-stationären Bedingungen erreichbare Sedimentationswirkungsgrad liegt dann bei 45 bis 50 %.

Bei Anlagen mit konstanter Belastung, die in der Regel über Pumpen erfolgt, wird der Sedimentationswirkungsgrad der Anlage unmittelbar durch den Bemessungswert festgelegt. Ein Anwendungsbereich für diese Betriebsform besteht beispielsweise bei großvolumigen Speichern, deren Inhalt mit einem kleinen Volumenstrom über einen Schrägklärer entleert und behandelt wird. Die Anlage wird in diesem Fall mit einem konstanten (geringen) Volumenstrom beschickt und die Oberflächenbeschickung bestimmt damit unmittelbar den erreichbaren Sedimentationswirkungsgrad. Um einen mit niederschlagsabhängig beschickten Anlagen vergleichbaren Wirkungsgrad zu erreichen liegt der empfohlene Wert für diese Anlagen bei einer Bemessungsoberflächenbeschickung von $q_A \leq 1$ m/h.

Damit eine möglichst hohe klärtechnische Wirksamkeit der Schrägklärer erreicht wird, sind die nachfolgenden Konstruktionsempfehlungen zu berücksichtigen.

Konstruktion

Geometrie

Um eine vollständige Durchströmung der Anlage zu unterstützen, wird empfohlen das Verhältnis von Länge zu Breite im Neubau von Schrägklärern nicht wie bei klassischen Regenbecken zur Sedimentation mit $L/B > 3$ zu planen. Dies führt zu schmalen langen Geometrien, die bei Schrägklärern zulauffern Stagnationsbereiche hervorrufen können.

Schrägklärer müssen über eine Wassertiefe von mindestens 1,90 m verfügen. Sie ergibt sich aus den folgenden Randbedingungen:

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

Zusätzlicher Spielraum für die zuvor genannten Komponenten kann eingeplant werden. Eine deutliche Vergrößerung der Tiefe unter den Schrägklärerelementen bringt aus hydraulischer Sicht keine Verbesserung gegenüber der Mindesttiefe.

Drosselung des Anlagendurchsatzes

Im Unterschied zu klassischen Regenbecken muss Q_0 bei Schrägklärern nicht in die Anlage geleitet werden. Die Drosselung des Zuflusses erfolgt vor der Anlage. Es muss gewährleistet werden, dass der Bemessungszufluss jederzeit in die Anlage gelangt. Eine Trennschärfe des Drosselorgans von mindestens 1,2 ist einzuhalten. Die Funktion des Drosselorgans ist in jährlichem Turnus zu überprüfen.

Einlauf- und Verteilungsbauwerk

Die Gestaltung des Einlauf- und Verteilungsbauwerks einer Sedimentationsanlage nimmt wesentlich Einfluss auf das Strömungsverhalten und damit auf die Sedimentationswirksamkeit der Anlage.

Jede Sedimentationsanlage benötigt daher zulaufseitig ein funktionales Einlauf- und Verteilungsbauwerk, das eine möglichst effektive Energiedissipation und optimale Strömungsverteilung gewährleistet. Hydraulische Untersuchungen im physikalischen Modell haben gezeigt, dass günstige Strömungsbedingungen durch:

- eine hohe Einlaufschwelle,
- eine Einlaufwand mit Prallwand und Palisaden sowie
- eine Einlaufwand mit horizontalem Einlaufschlitz erreicht werden können.

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, wobei die erreichbare hydraulische Optimierung von der Einlaufschwelle zur geschlitzten Einlaufwand leicht zunimmt.

Der Abstand zwischen dem Einlauf- und Verteilungsbauwerk und den Schrägklärerelementen sollte beim vollständigen Ausbau der Sedimentationskammer mindestens 1 m zur Oberkante des ersten Schrägklärerelements betragen. Wird nur ein partieller Ausbau geplant, sind die Schrägklärerelemente grundsätzlich am Ende des Bauwerks anzuordnen. Um eine Durchströmung der Schrägklärerelemente zu bewirken, müssen sie durch eine Trennwand von der offenen Wasserfläche im Zulaufbereich abgetrennt werden.

Ausrichtung der Schrägklärerelemente

Es wird empfohlen die Schrägklärerelemente entgegen dem Zulauf auszurichten. In dieser Konfiguration kann die Ausbildung von Turbulenzen in Form von rotierenden Walzen dem Verteilungsbauwerk verringert werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, dass der Zufluss im vorderen Teil des Bauwerks, in dem tendenziell höhere Fließgeschwindigkeiten auftreten, verstärkt an den Öffnungen des Schrägklärers vorbeizieht. Dies wirkt der Ausbildung von Stagnationszonen am Ende des Bauwerks entgegen.

Klarwasserabzüge

Die Klarwasserabzüge werden über den Schrägklärerelementen so angeordnet, dass eine gleichmäßige, flächige Abnahme des Wassers gewährleistet ist. Hierzu ist notwendig, dass die Fließwege des Wassers möglichst gleich lang sind. Die freie Wasserfläche oberhalb der Schrägklärer sollte durch Trennwände unterteilt werden, um eine Großraumströmung im Becken zu unterbinden.