

Einsatz von physikalischen Modellen zur Optimierung von Nachklärbecken

Silke Wieprecht*, Sven Hartmann* und Gerhard Schmid*

* Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Pfaffenwaldring 61, 70550 Stuttgart

Inhalt

- 1 Einführung
- 2 Problemstellung und Ziele der Untersuchungen im physikalischen Modell
- 3 Modellkonzept und -aufbau
- 4 Variantenuntersuchungen und Ergebnisse
- 5 Schlussfolgerungen und Ausblick
- 6 Literatur

1 Einführung

An einem existierenden Klärwerk, bestehend aus einem Belebungsbecken, anschließendem Verteilerbauwerk und drei baugleichen Nachklärbecken, kommt es zweitweise, insbesondere bei Extremsituationen mit großer hydraulischer Belastung, zu Schlammabtrieb aus den Nachklärbecken. Es besteht die Gefahr, dass bei Extremereignissen die Überwachungswerte, insbesondere die der abfiltrierbaren Stoffe, überschritten werden können. Es wurden im Vorfeld bereits mehrere Studien durchgeführt, die teilweise sehr unterschiedliche Verbesserungsmöglichkeiten vorschlagen. Zur umfassenden Klärung der teils widersprüchlichen Aussagen in den vorliegenden Gutachten und Berechnungen wurde schließlich beschlossen die aufgrund der komplizierten Geometrie hoch dreidimensionalen Strömungsvorgänge im Nachklärbecken durch einen physikalischen Modellversuch näher zu untersuchen.

2 Problemstellung und Ziele der Untersuchungen im physikalischen Modell

Bei großer hydraulischer Belastung aufgrund von z. B. extremen Niederschlägen ist die ordnungsgemäße Funktionsfähigkeit der Nachklärbecken eingeschränkt bzw. ggf. nicht mehr gegeben. Es kann zu Schlammabtrieb über die Klarwasserrinne kommen, was zur Überschreitung der Überwachungswerte führen kann. Es liegen verschiedene Untersuchungen mit Empfehlungen für Änderungsvorschläge vor. Diese reichen von betrieblichen Optimierungsempfehlungen und den Einsatz von Flockungsmitteln, über bauliche Eingriffe an der Überfallkante des Klarwasserabzugs mit einer baulichen Umgestaltung des Zulaufs durch Tauchwände und Leitbleche, bis hin zu einem höhenverstellbaren Zulauf. Um diese Vorschläge näher beurteilen zu können, wurden außerdem zweidimensionale Strömungsberechnungen durchgeführt, um sowohl die Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens im Istzustand sowie im vorgeschlagenen

Umbauzustand zu untersuchen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Strömungsvorgänge – insbesondere im Falle der vorgeschlagenen Umbauten mit Tauchwand, Leitblech und zusätzlicher Bodenplatte – hoch dreidimensional sind und somit die Ergebnisse einer 2d-Simulation zwar einen ersten Anhaltspunkt geben können, jedoch kaum ausreichend realitätsnah sind. Das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart wurde deshalb beauftragt einen Umgestaltungsvorschlag mit Hilfe eines physikalischen Modellversuchs zu erarbeiten.

Ziel ist es, mit Hilfe des physikalischen Modells einen optimierten Lösungsvorschlag zu erarbeiten, durch den sichergestellt werden kann, dass die Sedimentfracht am Überlauf in die Klarwasserrinne minimiert wird und so ein Schlammabtrieb vermieden werden kann. Daher wurden folgende Untersuchungsschritte festgelegt:

1. Aufbau des physikalischen Modells eines Nachklärbeckens mit dem Mittelbauwerk, incl. Öffnungen und Gitterstäbe sowie der umlaufenden Abflaufrinne im Ist-Zustand und Ausstattung mit allen erforderlichen Messeinrichtungen.
2. Durchführung von Messungen am Modell im Ist-Zustand (Strömungsgeschwindigkeit, Wasserspiegelmessungen, Strömungsvisualisierung, Feststoff-Traceruntersuchungen) bei verschiedenen Abflusssituationen
3. Durchführung von Geschwindigkeitsmessungen in der Natur als Grundlage der Kalibrierung
4. Durchführung von Messungen am Modell für verschiedene Umbauzustände (Strömungsgeschwindigkeit, Wasserspiegelmessungen, Strömungsvisualisierung, Feststoff-Traceruntersuchungen) bei verschiedenen Abflusssituationen
5. Gegenüberstellung von Ist- und Sollzustand sowie Beurteilung, ob und wie die Zielsetzung des reduzierten Schlammabtriebs mit den geplanten Modifikationen erreicht werden kann.

3 Modellkonzept und -aufbau

3.1 Modellumgriff und Maßstab

In dem Modell ist exemplarisch eines der drei Nachklärbecken abgebildet, da aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit davon auszugehen ist, dass die Strömungsverhältnisse in allen drei Nachklärbecken gleich sind. Das Modell umfasst das Nachklärbecken selbst, sowie die Zulaufleitung vom Verteilerbauwerk und die Rücklaufleitung (vgl. Bild 1).

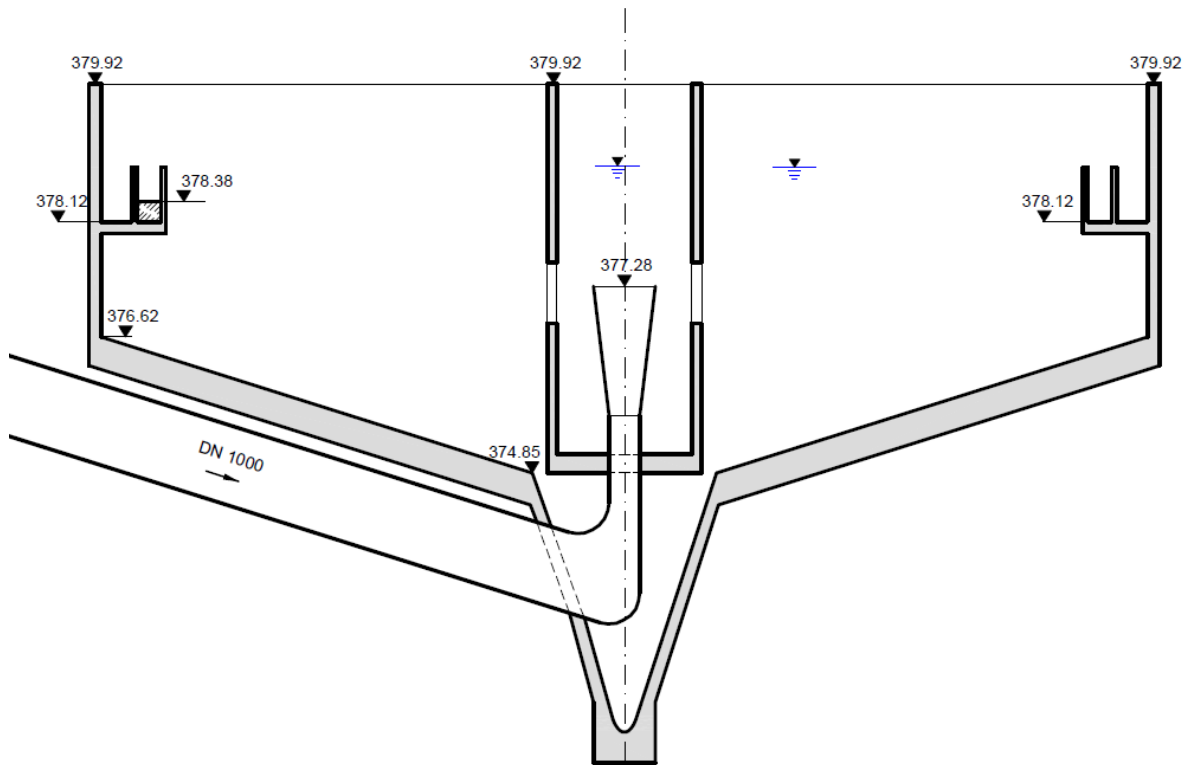


Bild 1: Modellumgriff Nachklärbecken mit Zulauf DN 1000

Der Modellmaßstab wurde mit 1 : 7 festgelegt, um eine möglichst detailgetreue Wiedergabe aller relevanten Geometrien sicherstellen zu können. Andererseits orientiert sich der Modellmaßstab an den technischen Randbedingungen der Versuchsanstalt, insbesondere den Platzverhältnissen, Möglichkeiten der Wasserzuführung und -ableitung sowie den Pumpenleistungen. Mit dem gewählten Modellmaßstab von 1 : 7, ergeben sich die in Tabelle 1 umgerechneten Gesamtabmessungen.

Tabelle 1: Modellgröße bei einem Maßstab von 1 : 7

Bauwerksgröße	Natur	Modell
Durchmesser	34 m	4,86 m
Höhe	ca. 8 m	1,14 m

Es wurde ein nicht überhöhtes Modell gebaut, d.h. der Maßstab für Höhen, Längen und Breiten ist gleich. Damit erhält man ein geometrisch vollständiges Abbild der Natur, wodurch auch die Strömung, und alle damit zusammenhängenden Phänomene, naturähnlich werden.

3.2 Modellähnlichkeit

Das Modell wird als sogenanntes Froude-Modell betrieben, d.h. dass die durch Schwerkraft und Trägheitskraft bedingten Phänomene vollkommen naturähnlich nachgebildet werden. Die Umrechnung von Modell- in Naturgrößen, und umgekehrt, kann nach Tabelle 2 erfolgen.

Tabelle 2: Umrechnungsfaktoren für wesentliche physikalische Größen

Umrechnungsgröße	Maßstab $M_l = \text{Längenmaßstab}$	Modell \rightarrow Natur ($M_l = 7$)	Natur \rightarrow Modell ($M_l = 7$)
Länge	$M_l = L_N : L_M$	1 m \rightarrow 7 m	1 m \rightarrow 14,3 cm
Fläche	$M_A = M_l^2$	1 m ² \rightarrow 49 m ²	1 m ² \rightarrow 204,1 cm ²
Geschwindigkeit	$M_v = (M_l)^{1/2}$	1 m/s \rightarrow 2,65 m/s	1 m/s \rightarrow 37,8 cm/s
Zeit	$M_t = (M_l)^{1/2}$	1 s \rightarrow 2,65 s	1 s \rightarrow 0,38 s
Abfluss	$M_Q = (M_l)^{5/2}$	1 m ³ /s \rightarrow 130 m ³ /s	1 m ³ /s \rightarrow 7,71 l/s

3.3 Modellbau

Das Modell wurde aus Stahl gefertigt. Die Strömungsprozesse können von oben aus untersucht und beobachtet werden. Die umlaufende, von zwei Seiten beschickte Ablaufrinne mit den beiden gezahnten Überlaufkanten ist ebenfalls aus Stahl nachgebaut. In den Bildern 2 bis 5 ist der Fertigungsfortschritt beim Modellbau dargestellt.



Bild 2: Einzelformteile für den Aufbau des Nachklärbeckens im Modell



Bild 3: Zusammenfügen der Einzelteile



Bild 4: Zulaufbauwerk (links) und Überfallkante des Klarwasserabzugs (rechts) im Modell

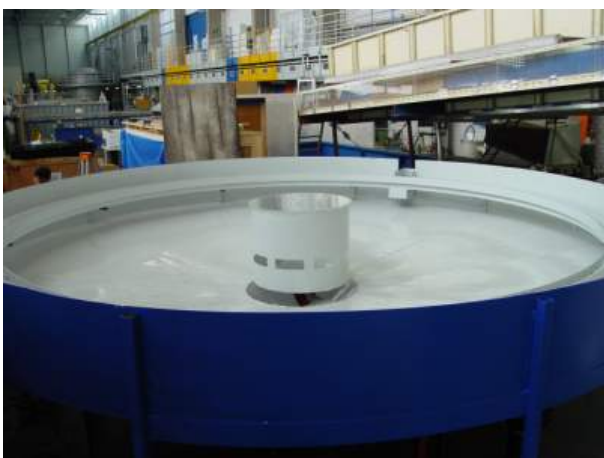


Bild 5: Betriebsbereites Modell des Nachklärbeckens

Das Modell ist so konzipiert, dass es an beinahe beliebige Planungsänderungen und Varianten angepasst werden kann. Dadurch können für die zu ermittelnde Lösungsvariante mit einer optimierten Ablaufsituation alle nötigen Umbauten an der Einlaufkonstruktion nachträglich eingebaut und untersucht werden.

3.4 Messtechnik

3.4.1 Modellzu- und -abflüsse

Die Wassermengen an Modellzufluss und -abfluss werden über in den Rohrleitungen installierte induktive Durchflussmesser (IDM) bestimmt. Deren Genauigkeit beträgt 0,5 % des Messwertes.

Aufgrund des gewählten Maßstabs von 1 : 7 für das Modell des Nachklärbeckens sind sowohl das Zulaufrohr, als auch das Rücklaufrohr nicht exakt maßstäblich abgebildet. Das Modell wird mit einer Leitung DN 150 beschickt, der Ablauf erfolgt über ein Rohr DN 65. Diese kleinen geometrischen Abweichungen haben auf die Ergebnisse der hydraulischen Situation im Becken jedoch keinen Einfluss. Die Verteilung des Wassers sowie die Ausbildung der Turbulenzstrukturen im Nachklärbecken hängen im Zulaufbereich nur von der Geometrie und Anordnung der Einlaufmulde ab, die im Modell maßstäblich exakt abgebildet wird. Der Einfluss des Rücklaufs ergibt sich aus der entnommenen Wassermenge, die im Modell durch eine entsprechende Regulierung im Ablaufrohr bestimmt wird. Damit ist gewährleistet, dass die Zu- und Abflüsse im Modell physikalisch korrekt dargestellt sind.

3.4.2 Wasserspiegellagen

Zur Bestimmung der Wasserspiegellagen während der Versuchsdurchführung werden über diskreten Messpunkten Ultraschallsensoren angebracht, die beispielhaft in Bild 6 dargestellt sind. Die Messgenauigkeit derartiger Geräte beträgt ca. 0,5 mm, das entspricht für $M = 1 : 7$ in der Natur 3,5 mm.

Im Modell wird neben der großflächigen Wasserspiegellage im Becken, insbesondere die Überlaufhöhe an der Zahnschwelle der Ablaufrinne untersucht, um so weitere Rückschlüsse über die Strömungssituation ziehen zu können.



Bild 6: Ultraschallsensoren zur berührungslosen Bestimmung von Wasserspiegellagen

3.4.3 Strömungsgeschwindigkeiten/ Turbulenzgrad

Zur Ermittlung der dreidimensionalen Verteilung der Strömung im Nachklärbecken werden 3d-Geschwindigkeitssonden (vgl. Bild 7) zum Einsatz kommen. Damit lassen sich sowohl die Größen der drei Geschwindigkeitskomponenten als auch aus den Varianzen Aussagen über die Turbulenz ableiten.



Bild 7: 3d-Geschwindigkeitssonde (hier: Acoustic Doppler Velocimeter, ADCP)

Zur Kalibrierung des Modells wurden vom Institut für Wasserbau parallele Vergleichsmessungen im Nachklärbecken des Klärwerks durchgeführt. Dabei wurden bei entsprechenden Zuflussbedingungen die Strömungsfelder im Becken vermessen (Bild 8).



Bild 8: 3d-Geschwindigkeitsmessungen vor Ort mit Acoustic Doppler Current Profiler

Damit können die Modellergebnisse verifiziert und die Modellrauheit entsprechend angepasst werden, um so sicherzustellen, dass die Übertragbarkeit der Modellergebnisse sowohl für den Ist-Zustand als auch für alle untersuchten Planungsvarianten gewährleistet ist.

3.4.4 Sichtbarmachung von Strömungsfeldern/ Konzentrationsverläufe

Die o.g. Geschwindigkeitssonden ermöglichen die exakte Vermessung eines Geschwindigkeitsfeldes in diskreten Punkten. Der Aufwand für Positionierung und Messung ist jedoch relativ groß. Für eine qualitative Beurteilung großflächiger Strömungssituationen, insbesondere um zunächst den grundsätzlichen Strömungsverlauf erkennen zu können, bieten sich Farbtracer an. Hiermit lassen sich z.B. Bereiche stark unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten ebenso erkennen wie Wirbelbildungen und Rückströmgebiete (vgl. Bild 9).

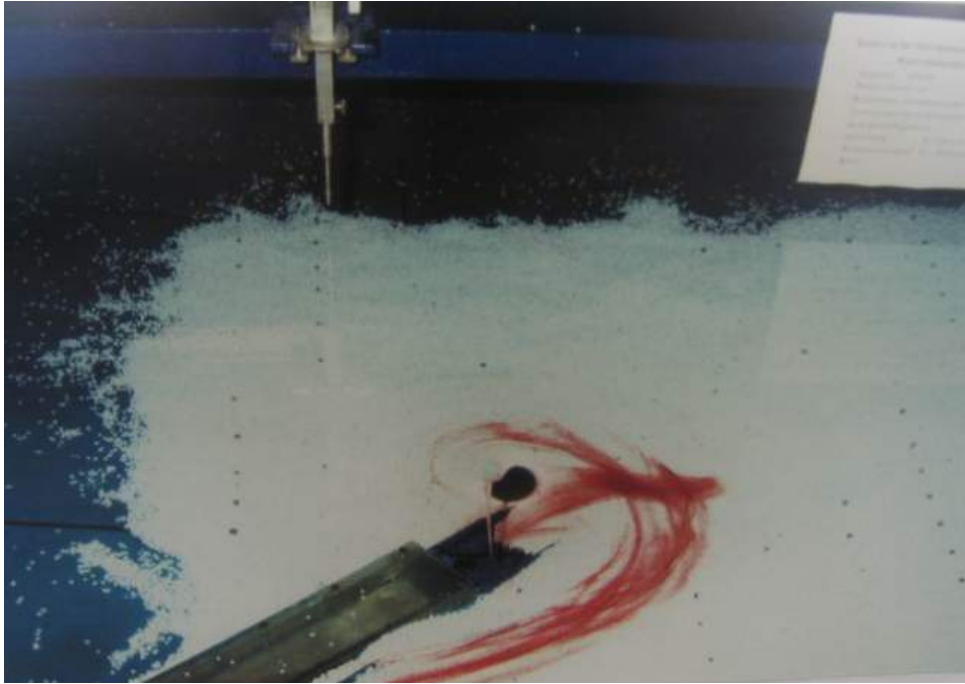


Bild 9: Sichtbarmachung eines Strömungsverlaufes im Modellversuch mittels Farbtracern

Die Farbtracerzugabe ist grundsätzlich auf stationäre Strömungszustände und qualitative Aussagen beschränkt. Die Zugabe von Feststofftracern erlaubt eine qualitative Beurteilung großflächiger Feststofftransportvorgänge im Nachklärbecken. Eine den Modellgesetzen entsprechende Nachbildung der einzelnen Feststofftransportvorgänge ist nicht möglich. In einem Froude-Modell ergäben sich so kleine Partikelgrößen, dass andere Prozesse, wie Adhäsion, Kohäsion oder Luftanlagerungen an Einzelpartikeln die Ergebnisse von tatsächlichen Frachtraten oder Aufenthaltszeiten verfälschen würden. Durch die Zugabe von Tracermaterial bei Versuchen sowohl des Ist-Zustands als auch für die Planungsvarianten können aber Unterschiede im Feststofftransport ermittelt werden.

4 Variantenuntersuchungen und Ergebnisse

Ziel der Variantenuntersuchungen ist es, eine optimale Lösung für die Umgestaltung des Nachklärbeckens zu finden, die sicherstellt, dass die Sedimentfracht am Überlauf in die Klarwasserrinne minimiert wird und so ein Schlammabtrieb vermieden werden kann. Dafür wird zunächst der Ist-Zustand untersucht und anschließend Umbauvarianten entwickelt, ins Modell eingebaut und die veränderten Strömungsbedingungen mit dem Ausgangszustand verglichen. Durch die Gegenüberstellung von Ist- und Sollzustand kann beurteilt werden, wie und in welchem Umfang die Zielsetzung des reduzierten Schlammabtriebs mit den vorgeschlagenen Modifikationen erreicht werden kann.

Folgende Varianten wurden bisher im Modell näher untersucht:

- V0 Ist-Zustand
- V1 Rohraufsatz am Einlaufrohr
- V2 Prallwand aus Lochblech
- V3 Lochblech teilweise abgedeckt
- V4 Abdeckung vergrößert

Der Zulauf in das Nachklärbecken erfolgt vom Verteilerbauwerk über eine schräg verlaufende Leitung. Daran schließt sich ein starker Krümmer ($> 90^\circ$) und ein relativ kurzes vertikales Rohrstück an. Eine Vergleichmäßigung der Strömung kann auf der kurzen Anströmstrecke kaum erfolgen. Dadurch strömt das Wasser mit einem relativ hohen Turbulenzgehalt in das Nachklärbecken ein. Es wird am Einlauf umgeleitet auf den Beckenboden und bringt den dort abgelagerten Schlamm zumindest teilweise wieder in Schwebelage, der bei extremen hydraulischen Belastungen zu Schlammabtrieb in den Vorfluter führen kann. Zur Verbesserung der Zuströmung wurden bereits Gitter an den Zulauföffnungen angebracht. Bild 10 zeigt den im Modell nachgebildeten Ist-Zustand.



Bild 10: Ist-Zustand des Zulaufbauwerks mit Gittern an den Zulauföffnungen (V0)

Bei Variante V1 wurde zur Vergleichmäßigung der Zulaufströmung ein Rohraufsatz mit verschiedenen Längen im inneren des Zulaufturms angebracht (Bild 11, V1). Es zeigte sich eine deutliche Beruhigung der Strömung und eine gleichmäßigere Verteilung des Zulaufwassers.

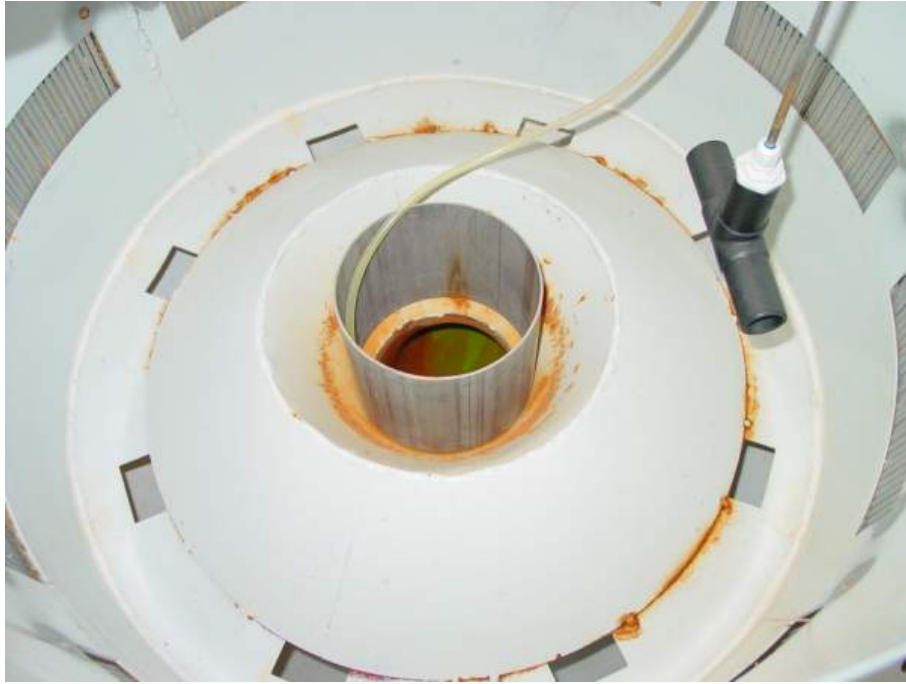


Bild 11: Rohraufsatz am Einlaufrohr

Durch das Anbringen einer Prallwand aus Lochblech (V2) soll beim Durchströmen eine gewisse Energiedissipation erreicht werden. Mit der teilweisen oder vollständigen Abdeckung des Lochblechs (V3 und V4) soll die Umlenkung der Strömung und so eine Energieumwandlung im Zulaufstrom erreicht werden.

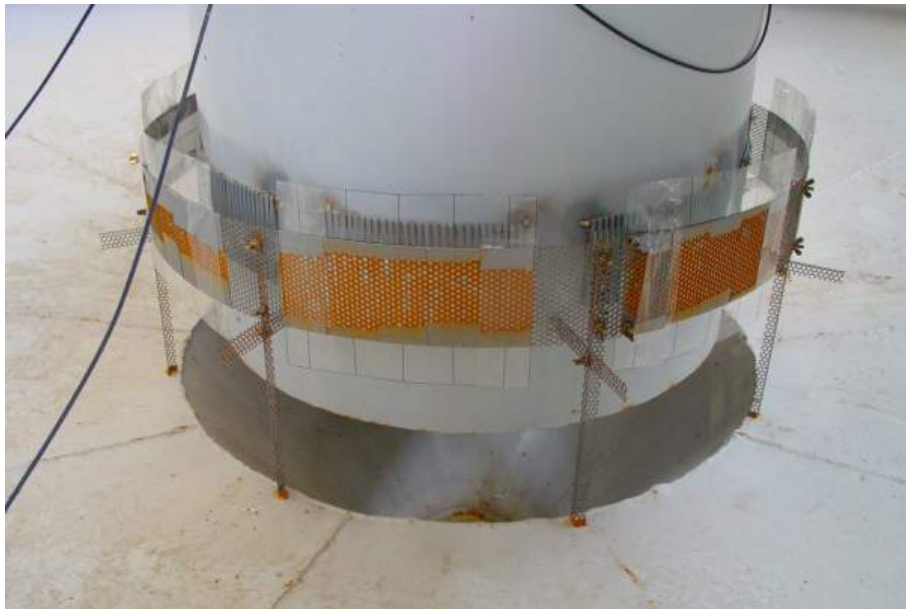


Bild 12: Prallwand aus Lochblech (V2), teilweise (V3) bzw. ganz (V4) abgedeckt (hier mit Plexiglas)

Zur Untersuchung des Einflusses der verschiedenen Einbauten wurden nun Tracerfarbstoffe direkt am Einlauf zugegeben. In Bild 11 ist der Schlauch für die Bei-

mischung von Fluoreszein als Tracerstoff im Zulauf zu sehen. Hierbei wird eine gewisse Menge in sehr kurzer Zeit zugegeben und messtechnisch genau erfasst. Über den Untersuchungszeitraum wird parallel dazu die Tracerkonzentration am Auslauf des Modells (entspricht dem Ablauf Richtung Vorfluter) gemessen. Die Veränderung in der Strömungsintensität innerhalb des Bauwerks bei den verschiedenen untersuchten Varianten kann an der veränderten Aufenthaltszeit des Tracers abgelesen werden. Eine erhöhte Aufenthaltszeit zeigt an, dass sich die Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Beckens reduziert haben und somit auch der Schlammaustrag reduziert wird.

In Bild 13 ist die Konzentrationsverteilung des Tracers an der Zugabestelle (grün) sowie am Auslauf (blau) für den Ist-Zustand dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit der Ergebnisse, ist der Maßstab für die Konzentration am Auslauf 10-fach vergrößert.

TT100707a: V0

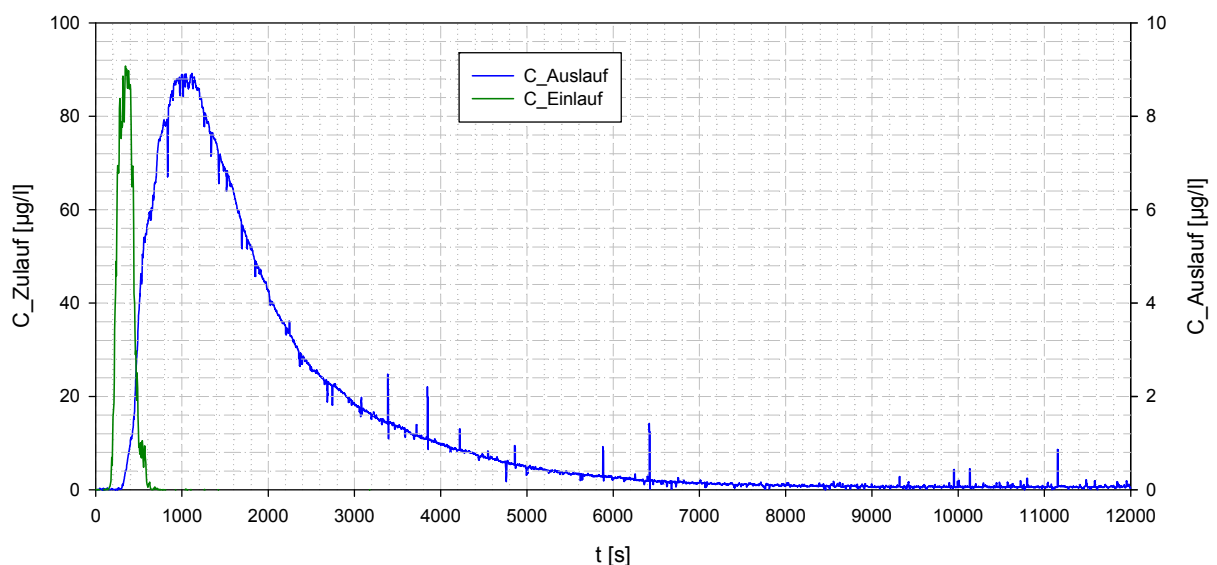


Bild 13: Konzentrationsverteilung des Tracermaterials am Ein- und Auslauf für V0

Diese Messungen wurden für alle untersuchten Varianten durchgeführt. In Bild 14 ist die veränderte Konzentrationsverteilung des Tracers exemplarisch für Variante 4 mit dem komplett abgedeckten Lochblech, das dann als undurchlässige Prallwand wirkt, dargestellt. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu überprüfen, wurden direkt nacheinander zwei Messreihen durchgeführt, jeweils mit einer Dauer von ca. 14000 Sekunden.

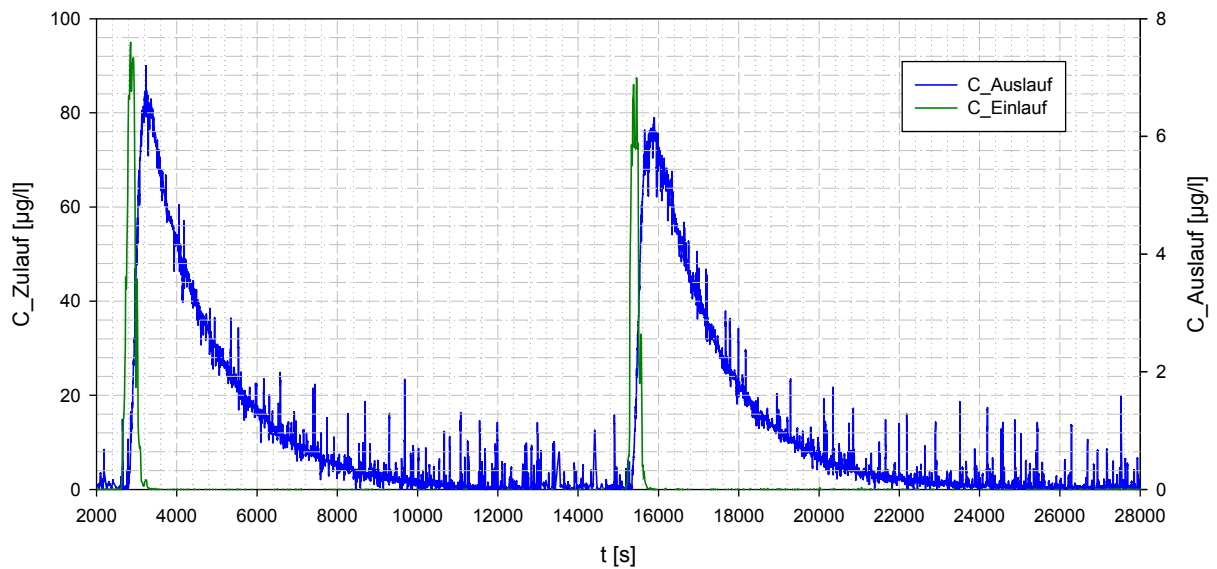


Bild 14: Konzentrationsverteilung des Tracermaterials am Ein- und Auslauf für V4

Zur Abschätzung der Aufenthaltszeiten wird für alle Versuchsreihen die Aufenthaltsdauer des Farbtacers bestimmt. Dazu wird der Schwerpunkt der Fläche unter der Verteilungsfunktion jeweils für die Zugabe und den Auslauf bestimmt und deren Abstand ermittelt. Daraus ergibt sich die mittlere Aufenthaltszeit, die in Bild 15 für alle Versuchsreihen dargestellt ist.

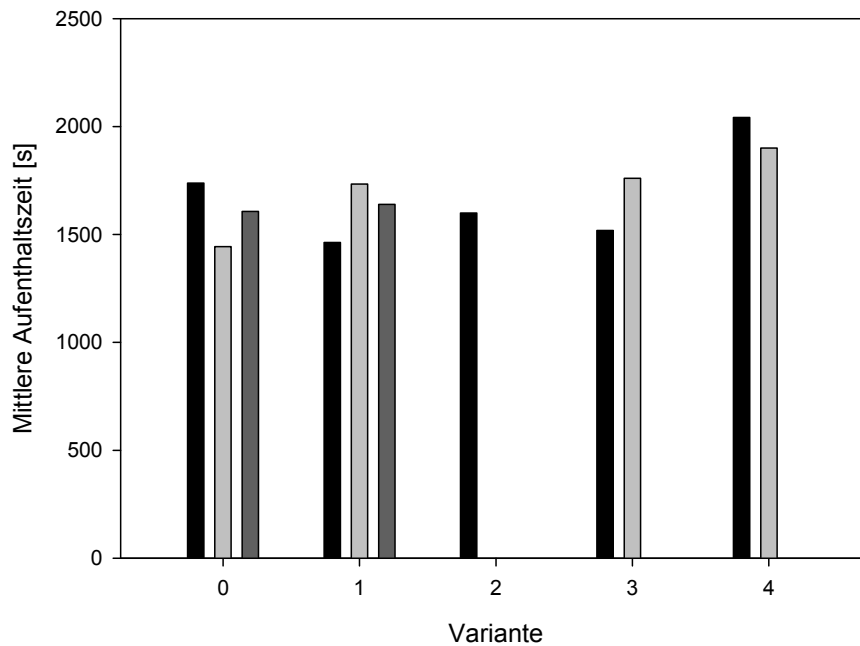


Bild 15: Vergleich der mittleren Aufenthaltszeiten des Tracer für die untersuchten Varianten (incl. Reproduktionsversuchen)

Es zeigt sich, dass für die Varianten V1, V2 und V3 die Aufenthaltsdauer im Vergleich zu V0 nicht wesentlich beeinflusst wird. Die Schwankungen ergeben sich aufgrund der turbulenten Strömungssituation und liegen im Bereich der sich daraus ergebenden Versuchsgenauigkeit.

Nur Variante V4 bringt eine geringe Verlängerung der Aufenthaltsdauer. Die Versuchsbeobachtungen zeigen, dass die Einflüsse aus den Einbauten durch den Effekt der sehr starken Ausrichtung der Strömung aus dem Zulauf auf den Boden in Form einer Tauchströmung überlagert sind. Um dies zu vermindern, sind weitere Untersuchungen insbesondere durch den Einbau einer horizontalen Platte in Form eines Kreisrings innerhalb des Zulauftopfs vorgesehen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die bisher durchgeführten Modifikationen des zu untersuchenden Nachklärbeckens und deren Untersuchung am physikalischen Modell zeigen, dass eine Verbesserung des Zulaufs durch Aufsetzen eines Rohres zwar eine visuell zu beobachtende Strömungsberuhigung und vor allem Vergleichmäßigung innerhalb des Beckens bringt. Eine Energiedissipation, die nötig ist um den Eintrag des Schlammes in den Vorfluter zu verringern kann effektiv aber nur durch entsprechende Maßnahmen an der Zulauföffnung erreicht werden. Hierzu wurden verschiedene Einbauten wie Gitter, Lochbleche und Prallwände eingebracht. Einen gewissen Erfolg zeigte jedoch bisher nur das Anbringen einer Prallwand. In weiteren Untersuchungen wird nun noch der Einbau einer horizontalen Leitwand innerhalb des Zulaufschachts untersucht.

In den aus vorangegangenen Untersuchungen vorliegenden Berichten und Gutachten wird zusätzlich das Einbringen eines sogenannten Labyrinths vor dem Einlaufbereich in das Nachklärbecken empfohlen. Hier soll der Zulaufstrom nach Verlassen der bestehenden Einlauföffnung zunächst nach oben und anschließend wieder nach unten zu einer neuen Einlauföffnung gelenkt werden. So soll noch mehr Energie dissipiert und somit potenzielle Einmischungsprozesse im Nahbereich des Einlaufs reduziert werden. In den weiteren Untersuchungen wird auch diese Labyrinthlösung noch im physikalischen Modell untersucht.

Außerdem konnte festgestellt werden, dass ein nicht unerheblicher Teil des Schlammes in dem Spalt zwischen der Überlaufrinne und der Außenwandung ausgelesen wird. Um diesen Effekt zu reduzieren wird auch noch eine Untersuchungsreihe mit baulichen Variationen an der Überlaufrinne entwickelt und deren Effekte im Versuch näher analysiert.