

**Institut für Strömungsmechanik
und Elektronisches Rechnen im Bauwesen
der Universität Hannover**

Bericht Nr. 73/2006

Sebastian Schumacher

**Leistungsbestimmende Prozesse in Nachklärbecken
- Einflussgrößen, Modellbildung und Optimierung -**

ISSN 0177-9028

Institut für Strömungsmechanik
und Elektronisches Rechnen im Bauswesen
Universität Hannover
Appelstraße 9a, D-30167 Hannover

Tel.: +49-511-762-3568

Fax.: +49-511-762-3777

URL: <http://www.hydromech.uni-hannover.de>

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Universität Hannover zur
Erlangung des Grades Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Werner Zielke

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel

Tag der Promotion: 01. September 2006

Abstract

This thesis deals with the process occurring within secondary clarifiers. The relevant process variables are discussed and the transfer into a multidimensional, numerical model is demonstrated.

The model development comprises two main topics. On the one hand, a mathematical approach was developed in order to include the rheological sludge behaviour into a numerical model. In contrast to the generally used model approaches – which are based on a bingham-plastically behaviour – a bilinear approach was generated on the basis of viscosity measurements. This model approach allows a more realistic description of the rheology in secondary clarifiers.

On the other hand, an approach was found which enables the consideration of symmetrically rotating flows in 2-dimensional models. This model extension is especially useful for the description of the flow induced by tank inlets that are equipped with angular lamellae.

The developed model is used to analyse secondary clarifiers of three different sewage treatment plants. The good quality of the model is demonstrated by comparing the simulated results with measured data. In all of these cases potential of optimisation is shown by modifying the inlet construction. The resulting performance quality is inversely proportional to the amount of energy input in the tank.

Finally, on the basis of these results recommendations concerning the construction of inlets are given. The most important factors influencing the performance quality of secondary clarifiers are the height of the inlet hole and the altitude of the entire inlet. These factors are called *key parameters*. They are different to the *smooth parameters* which are only of minor importance.

Keywords: secondary clarifier simulation, secondary clarifier optimisation, computational fluid dynamics modelling

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Einflussgrößen auf die leistungsbestimmenden Prozesse in Nachklärbecken herausgearbeitet und ihre Überführung in ein mehrdimensionales, numerisches Modell aufgezeigt. Neben den Schlammeigenschaften stehen dabei vor allem die hydrodynamischen Prozesse im Vordergrund. Aus der Anwendung des Modells heraus ergeben sich abschließende Empfehlungen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken.

Im Bereich der Modellentwicklung liegt der Fokus insbesondere auf zwei Themenbereichen. Zum einen wurden bei der Beschreibung der rheologischen Schlammeigenschaften die bisher existierenden Ansätze, die weitestgehend aus anderen Anwendungsbereichen stammen, durch einen im Rahmen dieser Arbeit explizit für Nachklärbecken entwickelten bi-linearen Viskositätsansatz ersetzt. Zum anderen wurde ein Ansatz entwickelt, um dreidimensionale Strömungsstrukturen im Nahfeld von Einläufen, die mit schräg gestellten Lamellen versehen sind, in zweidimensionalen achsensymmetrischen Simulationen zu berücksichtigen.

Das entwickelte Modell wird für die Analyse der Nachklärung von drei verschiedenen Kläranlagen angewendet und die Modellgüte über einen ausführlichen Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten nachgewiesen. In allen Anwendungen werden ausgehend von einer baulichen Umgestaltung des Einlaufbauwerkes Optimierungspotenziale aufgezeigt, wobei die resultierende Leistungsfähigkeit auf den Energieeintrag in das Nachklärbecken zurückgeführt wird.

Letztendlich werden aufbauend auf diesen Ergebnissen allgemeingültige Empfehlungen zur Konstruktion von Einlaufbauwerken zusammengefasst. Dabei werden die Höhe des Einlaufschlitzes und die Höhenlage der Einleitung, die beide einen maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken haben, als *harte Auslegungsgrößen* bezeichnet und von den *weichen Konstruktionselementen*, die nur von untergeordneter Bedeutung sind, unterschieden.

Keywords: Nachklärbeckensimulation, Nachklärbeckenoptimierung, CFD-Modellierung

Vorwort und Danksagung

Bei genauerer Betrachtung der Sachlage handelt es sich bei dem Vorwort einer solchen Arbeit zwar um die Worte, die in der letztendlichen Anordnung *vor* der eigentlichen Arbeit stehen. Chronologisch betrachtet handelt es sich jedoch um die letzten Worte einer Arbeit, die somit vielmehr den Rückblick über die Arbeit bzw. über die Zeit, in der die Arbeit entstand, darstellen.

Ich darf mich dieser Rückbetrachtung mit einem gewissen gefühlten Abstand hingeben. So habe ich mich in meiner neuen beruflichen Herausforderung vom Medium Wasser entfernt und „in die Luft“ begeben. In meiner neuen Funktion als Berater im Entwicklungsbereich der Luftfahrtindustrie ist mir sehr schnell bewusst geworden, dass noch vielmehr als die zahlenmäßigen Ergebnisse dieser Arbeit die gesamten fünf Jahre ihrer Entstehung – mit all den Höhen und Tiefen – für mich von immenser Bedeutung sind, da sie mir über das fachliche Wissen hinaus unbezahlbares berufliches Rüstzeug vermittelt haben. Letztendlich haben mich diese Jahre in einem Maße persönlich geprägt, dass ich mit Fug und Recht behaupten möchte: Der Weg ist das Ziel!



Von daher soll sich mein Dank nicht nur auf den fachlichen Beitrag zu dieser Arbeit sondern vielmehr auf das persönliche Wirken eines Jeden beziehen. An aller erster Stelle darf ich hier meine langjährige Mentorin Frau PD Dr.-Ing. habil. Michaela Hunze nennen. Auf ihrer Beantragung des DFG-Projektes „Hydromechanische Prozesse in Nachklärbecken“, mit dessen Bearbeitung ich beauftragt wurde, beruht diese Arbeit. Und nicht zuletzt ihres Einsatzes und ihrer Beharrlichkeit verdanke ich ihre erfolgreiche Beendigung. Darüber hinaus stellen die zeitgleiche Gründung unserer Firma FlowConcept GmbH und unsere gemeinsame Arbeit in ihr wichtige Meilensteine in meiner beruflichen und persönlichen Entwicklung dar.

Ein besonderer Dank gilt natürlich auch meinen beiden Mitstreitern in diesem Projekt, Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Freimann und Herrn Dipl.-Ing. Michael Janzen. Ohne ihre Messergebnisse, ihre Erfahrung und ohne den fachlichen Austausch mit ihnen hätte diese Arbeit nie in dieser Form entstehen können.

Mein Dank richtet sich in großem Maße an alle Kollegen des Institutes für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover für ihre vielfältige Unterstützung. Herrn Dipl.-Ing. Oliver Göthel danke ich in ganz besonderem Maße für seine immerwährende und selbstverständliche Bereitschaft, meine Defizite im Bereich von Hard- und Software auszugleichen. Ohne seinen Schraubenzieher und seine Fähigkeiten als Systemadministrator des achten Stockes wäre diese Arbeit schon in einem frühen Stadium zum Scheitern verurteilt gewesen. Unserer Institutssekretärin Frau Walburga Seifert danke ich für ihre Übersicht, Umsichtigkeit, Unterstützung und ihr sonniges Gemüt in unzähligen Situationen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Zielke danke ich für die Übernahme des Referates, das Vertrauen, die Möglichkeit und die Freiheit, diese Arbeit nach meinen Vorstellungen auszurichten und mit Leben zu füllen. Für die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel, der die Entstehung dieser Arbeit stets mit Wohlwollen begleitet hat.

Ohne die Möglichkeit die rheologischen Eigenschaften von belebtem Schlamm an der Fachhochschule Gelsenkirchen zu untersuchen, wären wichtige Bestandteile dieser Arbeit nicht in der vorliegenden Form umsetzbar gewesen. Ich möchte an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. Winfried Schmidt, Frau Dr. Marion Schoone sowie Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Lohmann für ihre tatkräftige Unterstützung danken. Ferner danke ich Herrn Prof. Eckard Zäschke für sein großes persönliches Interesse an meiner Arbeit und den fruchtbaren fachlichen Austausch.

Meinem gesamten persönlichen Umfeld danke ich für die facettenreiche Unterstützung, für das Verständnis, wenn Arbeit Vorrang vor Privatem hatte, für die Freude, wenn Privates die Arbeit vergessen machte, und für soviel Freundschaft und Liebe als Fundament von allem. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit danke ich meinen Nächsten in Hannover, in Bremervörde und Hesedorf, den Moks sowie Hannover 96, deren Heimstärke manches mal eine Verzweiflung auslöste, die diejenige relativierte, die sich zeitweise in der Entstehung dieser Arbeit einstellte.

Der größte Dank gilt aber natürlich meinen Eltern und meiner Familie. Ihre bedingungslose Unterstützung machte mich allzu oft sprachlos. So ist es mein größtes Glück, ihren Stolz am Tag meiner Promotion erlebt haben zu dürfen.

Alle genannten wie auch nicht genannten Menschen, die in diesen fünf Jahren an meiner Seite standen, die kamen, blieben oder gingen, sind vielmehr noch als ein Bestandteil dieser Arbeit ein Teil meines Lebens geworden. Hierfür danke ich ihnen von ganzem Herzen.

Hamburg, im Dezember 2006

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'O. Göthel', with a long horizontal flourish extending to the right.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Nomenklatur	3
1 Einleitung	7
2 Einflussgrößen in Nachklärbecken	11
2.1 Bedeutung und Funktionsweise der Nachklärung	11
2.2 Strömung und Turbulenz	12
2.3 Der belebte Schlamm	15
2.3.1 Sinkgeschwindigkeit und Flokkulation	16
2.3.2 Rheologie	18
2.4 Beckengeometrie und Einlaufgestaltung	22
3 Die mathematische Modellierung von Nachklärbecken	25
3.1 Stand der Forschung	25
3.2 Die hydrodynamischen Grundgleichungen	27
3.3 Modellbildung in Nachklärbecken	29
3.3.1 Achsensymmetrische Simulation mit Rotationsanteil	30
3.3.2 Dreidimensionale Einlaufeffekte in achsensymmetrischen Simulationen	31
3.3.3 Dichteströmung	37
3.3.4 Sinkgeschwindigkeit und Flokkulation	37
3.3.5 Rheologie	40
3.3.6 Räumung	47
3.4 Geometrie und Diskretisierung	48
3.5 Modellsteuerung	50

4	Modellkalibrierung und Optimierungspotenziale	53
4.1	Die Nachklärbecken der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück	54
4.1.1	Hoher Einlauf mit großer Schlitzhöhe und Lamellen	58
4.1.2	Tiefer Einlauf mit kleiner Schlitzhöhe und ohne Lamellen	65
4.1.3	Optimierungspotenzial des Einlaufbauwerkes	71
4.1.4	Hydraulische Belastungsschwankungen	74
4.1.5	Optimierungsstrategien bei Belastungsschwankungen	79
5	Validierung und Optimierungsbeispiele	83
5.1	Das Nachklärbecken Kierspe	83
5.1.1	Simulation und Messung	86
5.1.1.1	Parameterstudie zur Rheologie	94
5.1.2	Optimierung des Einlaufbauwerkes	100
5.2	Das Nachklärbecken Miesbach	104
5.2.1	Simulation und Messung	106
5.2.2	Optimierung des Einlaufbauwerkes	110
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literaturverzeichnis	125
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	137

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Fläche
a, r, t	[m]	zylindrische Ortskoordinaten
B	[m]	Breite
D	[m]	Durchmesser
e_k	[W]	kinetische Energie
e_p	[W]	potenzielle Energie
e_t	[W]	Gesamtenergie
F_i	[N]	äußere Kräfte
Fr_d	[-]	densimetrische Froudezahl
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante
g'	[m/s ²]	densimetrische Gravitationskonstante
h	[m]	Höhe des Einlaufschlitzes
H	[m]	Höhe der Einleitung
ISV	[ml/g]	Schlammindex
k	[m ² /s ²]	turbulente kinetische Energie
K_A	[-]	Flächenkoeffizient
K_φ	[-]	Winkelkoeffizient
L	[m]	Länge
n	[-]	Fließindex
p	[N/m ²]	Druck
Q	[m ³ /s]	Durchfluss
q_A	[m/h]	Oberflächenbeschickung
Q_{AN}	[m ³ /s]	Ablauf Nachklärung
Q_{BB}	[m ³ /s]	Zulauf Belebung
Q_m	[m ³ /s]	maximaler Regenwetterzufluss
Q_{NKB}	[m ³ /s]	Zulauf Nachklärung

Symbol	Einheit	Bedeutung
Q_{RS}	[m ³ /s]	Rücklaufschlammmenge
Re	[-]	Reynoldszahl
Ri	[-]	Richardsonzahl
RV	[-]	Rücklaufschlammverhältnis
S	[-]	Quell- und Senkenterm
\tilde{S}	[1/s]	Schergradient
t	[s]	Zeit
TS_{BB}	[kg/m ³]	Trockensubstanzkonzentration in der Belebung
u_i	[m/s]	kartesischer Geschwindigkeitsvektor
V	[m ³]	Volumen
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_0	[m/s]	maximale theoretische Sinkgeschwindigkeit
v_a, v_r, v_t	[m/s]	zylindrische Geschwindigkeitskomponenten
v_s	[m/s]	Sinkgeschwindigkeit
x, y, z	[m]	kartesische Ortskoordinaten
X_{TS}	[kg/m ³]	Konzentration der Trockensubstanz
$\Delta\rho$	[kg/m ³]	Dichtedifferenz
β	[-]	Parameter
ε	[m ² /s ³]	Energiedissipation
η	[Ns/m ²]	Viskositätsfunktion
η	[-]	Wirkungsgrad
η_k	[Ns/m ²]	Viskositätsfunktion in der Konsistenzphase
η_s	[Ns/m ²]	Viskositätsfunktion in der Strukturphase
μ	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität
μ_w	[Ns/m ²]	dynamische Viskosität von reinem Wasser
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_{TS}	[kg/m ³]	Dichte der Trockensubstanz
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte des Reinwassers

Symbol	Einheit	Bedeutung
τ_0	[N/m ²]	Fließgrenze
τ_k	[N/m ²]	Konsistenzschubspannung
τ_s	[N/m ²]	Strukturschubspannung
τ_{xy}	[N/m ²]	Schubspannung
Φ	[-]	skalare Größe
φ	[Grad]	Winkel
Γ	[m ² /s]	Diffusionskoeffizient

1 Einleitung

Das Nachklärbecken bildet auf konventionellen Abwasserreinigungsanlagen zusammen mit dem Belebungsbecken als so genannte biologische Reinigungsstufe eine sich gegenseitig beeinflussende Betriebseinheit. Dem Nachklärbecken kommt dabei im Wesentlichen die Aufgabe zu, den belebten Schlamm vom gereinigten Abwasser durch Absetzen zu trennen und in das Belebungsbecken zurückzuführen. Der Wirkungsgrad der gesamten Kläranlage ist dabei erheblich von der Trennleistung des Nachklärbeckens abhängig, da zum einen die Ablaufqualität stark mit der noch im Ablauf verbliebenen Schlammmenge korrespondiert und zum anderen die Leistungsfähigkeit des Belebungsbeckens von der Rückführung möglichst hochkonzentrierten Schlammes abhängt.

Aufgrund dieser zentralen Stellung in der biologischen Abwasserreinigung stehen Nachklärbecken seit vielen Jahren im Zentrum zahlreicher Forschungsarbeiten. Dabei hat sich in jüngerer Zeit der Kenntnisstand bezüglich der Relevanz hydrodynamischer Prozesse auf die Abtrennleistung insbesondere durch den Einsatz moderner Messtechnik und mehrdimensionaler Simulationsmodelle aber auch durch Erfahrungen aus der Praxis signifikant erhöht. Trotz der damit gestiegenen Systemtransparenz fließt das daraus gewachsene, vertiefte Systemverständnis nur langsam in die Bemessungsregeln für Nachklärbecken (ATV 2000) ein. So beschränkt sich die Beschreibung des Prozessverhaltens in der Bemessung immer noch im Wesentlichen auf die Bilanz von zu- und abfließenden Stoffströmen im Verhältnis zu Beckenvolumen und Beckenoberfläche.

Eine Ursache hierfür liegt in der Komplexität der in Nachklärbecken vielfältig miteinander gekoppelten Prozesse und der daraus resultierenden Unsicherheit, die Einflüsse dieser Prozesse auf die Leistungsfähigkeit der Verfahrensstufe zu quantifizieren und allgemeingültig zu formulieren. In der Folge hat sich mittlerweile eine Diskrepanz zwischen dem Stand der Wissenschaft, und dabei insbesondere dem Wissen um die Bedeutung des hydrodynamischen Systemverhaltens, und dem Stand der Technik, also der Bemessung und letztendlichen baulichen Umsetzung in der Praxis, ergeben.

Diese Diskrepanz zwischen Forschung und Praxis zu verringern, dazu soll letztendlich der Inhalt dieser Arbeit dienen. Das Ziel ist es dabei, die Einflussgrößen auf die leistungsbestimmenden Prozesse herauszuarbeiten und sie in ein numerisches Modell zu überführen, mit dessen Hilfe dann in seiner Anwendung die Transparenz des Systems in der Art erhöht werden kann, dass abschließend gezielte Maßnahmen zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken empfohlen werden können.

Dementsprechend gliedert sich auch der Aufbau der vorliegenden Arbeit. So befasst sich Kapitel 2 zunächst mit den Einflussgrößen auf die relevanten, leistungsbestimmenden Prozesse sowie ihrer Verknüpfung untereinander und ihrer Einordnung in das gesamte Wirkungssystem des Nachklärbeckens. Im Mittelpunkt stehen dabei aus hydrodynamischer Sicht die Prozesse im Nahbereich des Einlaufes. Im Hinblick auf die Schlammeigenschaften sind neben der Sinkgeschwindigkeit auch und vor allem die rheologischen Eigenschaften des belebten Schlammes von Interesse.

Kapitel 3 widmet sich dann, aufbauend auf den Erkenntnissen des vorherigen Kapitels, der Modellbildung. Nach einem Überblick über den Stand der Forschung wird anschließend die weitergehende Entwicklung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Modells herausgearbeitet. Trotz der mittlerweile zahlreichen Forschungsarbeiten im Bereich der mehrdimensionalen Simulation von Nachklärbecken kristallisierten sich im Verlauf dieser Arbeit zwei Themenschwerpunkte – das rheologische Verhalten des belebten Schlammes sowie die dreidimensionalen Strömungsstrukturen im Einlaufbereich – heraus, in denen die bisherigen Modellansätze die Phänomene in Nachklärbecken nur unzureichend beschreiben.

Zum einen konnten mit den bisher existierenden Ansätzen zur Beschreibung der Rheologie, die für höher konzentrierte und mit größeren Schergradienten belastete Schlämme entwickelt wurden und vereinfachend von einer Fließgrenze der Wasser-Schlamm-Suspension ausgehen, bei den in Nachklärbecken vorherrschenden, geringen Schergradienten keine realitätsnahen Ergebnisse produziert werden. Aus der Motivation heraus die für den Transport des belebten Schlammes relevanten Fließeigenschaften genauer abbilden zu können, wurde ein bi-linearer Viskositätsansatz entwickelt, der die Schubspannungen im Bereich minimaler Schergradienten feiner auflöst und von der idealen Modellvorstellung einer Fließgrenze Abstand nimmt.

Zum anderen sind in den meisten ingenieurpraktischen Anwendungen die Anforderungen an die Rechenintensität des Modells und damit an die Kosten-Nutzen-Effizienz des Modelleinsatzes in der Form limitierend, dass weitestgehend nur zweidimensionale Simulationen durchgeführt werden können. Aus dieser Einschränkung heraus wurde ein Ansatz entwickelt, um die achsensymmetrische Rotationsströmung, die durch im Einlauf von Rundbecken angeordnete, schräg gestellte Lamellen induziert wird, mit einem zweidimensionalen Berechnungsnetz abbilden zu können.

In Kapitel 4 steht zunächst der Vergleich der Modellergebnisse mit Messdaten, die in zwei sich nur in den Einlaufgestaltungen unterscheidenden Nachklärbecken der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück erhoben wurden, im Vordergrund. Der Begriff der Modellkalibrierung erscheint hier auf den ersten Blick zunächst irreführend, da im klassischen Sinne kein Kalibrierungsprozess sichtbar wird. Letztendlich hat aber der fortwährende Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten in genau diesen Nachklärbecken die Anpassung von bestehenden Modellansätzen, wie z. B. dem Ansatz zur Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit, ermöglicht. Darüber hinaus wurden durch

die Überprüfung der Modellgüte die beiden oben erwähnten Themenbereiche ersichtlich, in denen dann die weiterführende Modellentwicklung betrieben wurde. Der eigentliche Kalibrierungsprozess verbirgt sich somit im Wesentlichen hinter den Ergebnissen von Kapitel 3, wobei dann in Kapitel 4 nur der abschließende Vergleich zwischen den Messdaten und den Ergebnissen der letzten Modellrechnungen dargestellt wird. Aufbauend auf dem Nachweis der Modellgüte werden anhand der beiden Nachklärbecken, die sich, wie erwähnt, nur in der Einlaufkonstruktion unterscheiden, Optimierungspotenziale aufgezeigt und diskutiert. Sichtbar wird dabei die elementare Bedeutung des Einlaufbauwerkes auf das Systemverhalten von Nachklärbecken. Die resultierende Leistungsfähigkeit ist dabei an den Energieeintrag in das Nachklärbecken gekoppelt und kann in der Analyse der Ergebnisse auf nur zwei wesentliche Kriterien – die Höhe des Einlaufschlitzes und die Höhenlage des Einlaufes – reduziert werden.

Das Modell wird in Kapitel 5 am Beispiel eines langen, rechteckigen Nachklärbeckens der Kläranlage Kierspe und eines runden Nachklärbeckens der Kläranlage Miesbach angewendet. Einher geht damit eine weitere Überprüfung der Modellgüte anhand eines Vergleiches zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten aus diesen Becken. In der Anwendung und vor allem in den entwickelten Optimierungsvarianten verdeutlichen und manifestieren sich die Erkenntnisse, die in Kapitel 4 aufgezeigt wurden.

Abschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse der Modellstudien in allgemeingültige Empfehlungen zur Konstruktion von Einlaufbauwerken zusammengefasst. Zu unterscheiden sind dabei die Höhe des Einlaufschlitzes und die Höhenlage des Einlaufes als *harte Auslegungsgrößen*, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Ablaufqualität und Verfahrensstabilität des Nachklärbeckens haben, sowie die *weichen Konstruktionselemente*, die für die resultierende Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens nur von untergeordneter Bedeutung sind.

2 Einflussgrößen in Nachklärbecken

Die Grundlage jeder Modellbildung bildet zunächst die genaue Kenntnis der entsprechenden Einflussgrößen und das tiefere Verständnis für die relevanten Prozesse in dem zu untersuchenden System. Insbesondere das Nachklärbecken ist dabei im Zusammenspiel der unterschiedlichen, sich gegenseitig beeinflussenden Prozesse ein hochkomplexes System. Die Erläuterung der jeweiligen Einzelprozesse, ihre Verknüpfung zu anderen relevanten Vorgängen und ihre Einordnung in das gesamte Wirkungssystem des Nachklärbeckens sind somit von großer Bedeutung. So soll an dieser Stelle zunächst ein Überblick über die Einflussgrößen auf das Prozessgeschehen in Nachklärbecken gegeben werden, um im folgenden Kapitel näher auf die Modellbildung eingehen zu können.

2.1 Bedeutung und Funktionsweise der Nachklärung

Zusammen mit dem Belebungsbecken bildet das Nachklärbecken im Allgemeinen die zweite, die so genannte biologische Reinigungsstufe. Die zentrale Aufgabe der Becken dieser Reinigungsstufe ist dabei die Entfernung der partikulär wie auch gelöst vorliegenden Abwasserinhaltsstoffe auf Basis physikalischer, biologischer und chemischer Prozesse.

Belebungsbecken und Nachklärbecken bilden dabei eine Betriebseinheit und beeinflussen sich gegenseitig. Dem Nachklärbecken kommen im Rahmen dieses Belebungsverfahrens im Wesentlichen folgende Aufgaben zu (ATV 1997):

- Trennung des gereinigten Abwassers vom belebten Schlamm mittels Sedimentation,
- Eindickung und Räumung des belebten Schlammes zur Rückführung in das Belebungsbecken,
- Zwischenspeicherung von belebtem Schlamm, der bei erhöhten Zuflüssen, insbesondere bei Regen, aus dem Belebungsbecken in das Nachklärbecken verlagert wird.

Im Belebungsverfahren kann aus zweierlei Gründen nur dann ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden, wenn die Trennung des Wasser-Schlamm-Gemisches im Nachklärbecken nahezu vollständig erfolgt (Krüger 1998). Einerseits ist der belebte Schlamm in großem Maße Träger genau der Inhaltsstoffe, die für die Ablaufqualität entscheidend sind. Das heißt, dass bei einer unzureichenden Sedimentation der Schlammflocken und somit bei hohen Konzentrationen von belebtem Schlamm im Ablauf der Nachklärung auch bei einem optimal funktionierenden Belebungsbecken das

gesamte Verfahren nur unzureichende Ablaufwerte erreichen würde. Andererseits ist für einen wirtschaftlichen Betrieb des Belebungsverfahrens eine hohe Konzentration von belebtem Schlamm (ca. 2 – 6 g/l) im Belebungsbecken unabdingbar, so dass die Eindickung, Räumung und Rückführung des belebten Schlammes in das Belebungsbecken ebenfalls ein zentrales Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken ist (Günthert 1984). Innerhalb konventioneller Abwasserreinigungsanlagen kommt somit dem Nachklärbecken als letzte Verfahrensstufe eine zentrale Rolle hinsichtlich des Wirkungsgrades der gesamten Kläranlage zu.

Um den genannten Anforderungen gerecht zu werden, sind im Laufe der Zeit verschiedenste Beckentypen entwickelt worden, die vor allem hinsichtlich ihrer Betriebsweise und Beckenform unterschieden werden können (Resch 1996). Zum einen werden sie aufgrund der vorherrschenden Strömungsrichtung in vertikal und horizontal durchströmte Nachklärbecken, zum anderen aufgrund der Bauform in Rechteck- und Rundbecken eingeteilt. Eine weitere Unterscheidung ist hinsichtlich des verwendeten Räumsystems in Becken mit Schild-, Band- und Saugräumer möglich. Bei der baulichen Gestaltung von Ein- und Auslaufbauwerken ist die Vielfalt so groß, dass eine Klassifizierung nicht sinnvoll erscheint. Im Rahmen dieser Arbeit sind horizontal durchströmte Rund- und Rechteckbecken untersucht worden, die in der kommunalen Abwasserreinigung vorzugsweise eingesetzt werden.

2.2 Strömung und Turbulenz

Das grundlegende Strömungsfeld in Nachklärbecken unterliegt im Wesentlichen dem Einfluss von strahldynamischen Prozessen und dem Dichteunterschied zwischen zufließendem Wasser-Schlamm-Gemisch und Beckeninhalte im Bereich der Einlauföffnung. Mit steigendem Feststoffgehalt der Suspension erhöht sich ihre Dichte, so dass der Zulauf zum Nachklärbecken, der in der Regel einen Feststoffgehalt von 3 bis 5 g/l aufweist, eine um 1 bis 2 ‰ höhere Dichte als feststofffreies Wasser aufweist. Dieser vergleichsweise geringe Dichteunterschied genügt, um das Strömungsbild in Nachklärbecken grundlegend zu bestimmen.

Liegt der Einlauf oberhalb des Schlammspiegels, so weist der Zulauf eine höhere Dichte als der Beckeninhalte an der Einlaufstelle auf. Der Einlaufstrahl sinkt somit direkt hinter der Einlauföffnung als Dichtestrom ab, wird beschleunigt und schichtet sich im Gebiet gleicher Dichte, also etwa im Bereich des Schlammspiegels, wieder ein. Erst in diesem Gebiet gleicher Dichte richtet sich die Strömung wieder horizontal, als so genannter Jet, im Becken aus.

Tritt der Einlaufstrahl im Schlammbett und somit im Bereich höherer Dichte in das Nachklärbecken ein, wird er ebenfalls – nun jedoch in umgekehrter Richtung als Auftriebsströmung – beschleunigt und breitet sich im weiteren Verlauf als Jet im Becken aus. Die Bildung des Jets lässt sich auch durch eine Einleitung im Bereich

gleicher Dichte nicht vermeiden. In diesem Fall wird sich der Jet allerdings in deutlich reduzierter Form ausbilden, da keine potenzielle Energie durch die Höhenlage des Einlaufs, sondern nur noch der im Einlauf vorhandene Impuls als kinetische Energie in das Nachklärbecken eingetragen wird.

Auf dem Weg durch das Nachklärbecken sedimentieren Schlammflocken aus dem Jet in das Schlammbett und an der Oberseite des Jets mischt sich feststoffarmes Wasser ein. Über den Fließweg verliert der Jet somit an Feststoff und der Dichteunterschied wird geringer. Ist der Dichteunterschied im Vergleich zum feststoffarmen Wasser oberhalb des Jets hinreichend klein, löst er sich auf und es kommt zu einer lokalen Aufströmung und einer Vergleichmäßigung der Strömung über die Beckentiefe. Oftmals – vor allem bei ungünstigen Einlaufgestaltungen und hohen Beckenbelastungen – erfolgt diese notwendige Ausdünnung des Jets nicht ehe dieser die äußere Beckenwand erreicht. Die Aufströmung erfolgt dann erst an der Beckenwand und in ungünstigen Fällen können die sich noch im Jet befindlichen Partikel in Richtung des Auslaufs transportiert werden.

Oberhalb des Jets bildet sich aus Kontinuitätsgründen eine Rückströmung in Richtung Einlauf aus, was zu einer großräumigen Walzenbildung im gesamten Nachklärbecken führt. Ebenfalls in Richtung Einlauf gerichtet, ist in Bodennähe eine Sohlströmung, die sedimentierten Schlamm in den Schlammtrichter transportiert. Abbildung 2.1 verdeutlicht noch einmal das grundlegende Strömungsfeld in Nachklärbecken. Einen detaillierten Einblick in die Strömungsstrukturen von horizontal durchströmten Nachklärbecken gibt Freimann (1999).

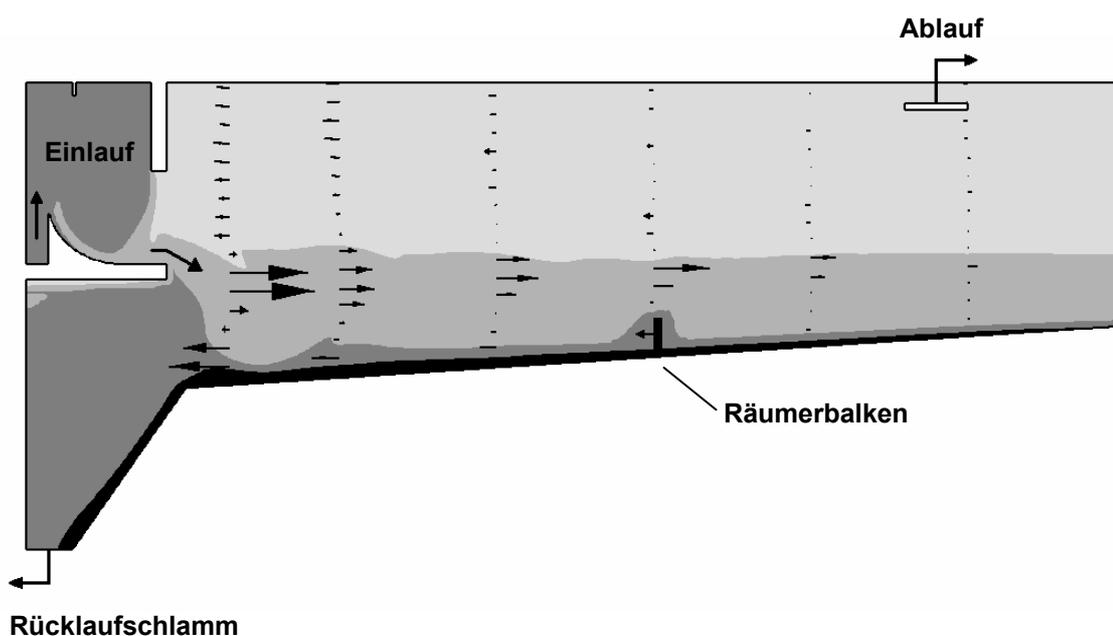


Abbildung 2.1: Grundlegendes Strömungsfeld in Nachklärbecken

In realen Nachklärbecken gemessene Zeitreihen von Geschwindigkeiten belegen, dass trotz der vergleichsweise geringen Fließgeschwindigkeiten die Strömung im und über dem Jet turbulent ist (Deininger 1997, Freimann 1999). Rechnerisch ist eine Abschätzung hinsichtlich der Turbulenz mit Hilfe der Reynoldszahl

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (2.1)$$

mit

Re	–	Reynoldszahl [-]
v	–	Geschwindigkeit [m/s]
L	–	charakteristische Länge [m]
ν	–	kinematische Viskosität [m ² /s]

möglich, die als Quotient von Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften definiert ist. Als Anhaltspunkt kann hierbei der Grenzwert für Rohrströmungen herangezogen werden. Liegt in diesem Fall $Re < 2330$, ist die Strömung laminar, oberhalb dieses Grenzwertes ist sie turbulent. Winkler (2001) gibt für die Versuchsanlage der Eidgenössisch Technischen Hochschule in Zürich Werte für den Jet zwischen 12.000 und 18.000 und in der Rückströmung oberhalb des Jets Werte zwischen 4.000 und 12.000 an. Auch in der Region direkt unterhalb des Schlammspiegels liegt die Strömung mit Werten im Bereich von 5.000 bis 12.000 im turbulenten Bereich. Lediglich die bodennahe Rückströmung in Richtung Schlammtrichter stellt mit Werten von 1.000 bis 5.000 zumindest teilweise eine theoretisch laminare Strömung dar.

Zur Beurteilung der Stabilität geschichteter Dichteströmungen kann nach Prandtl (1924) neben der Reynoldszahl die Richardsonzahl

$$Ri = \frac{g \frac{d\rho}{dz}}{\rho \left(\frac{dv}{dz} \right)^2} \quad (2.2)$$

mit

Ri	–	Richardsonzahl [-]
g	–	Gravitationskonstante [m/s ²]
ρ	–	Dichte [kg/m ³]
v	–	Geschwindigkeit [m/s]
z	–	Koordinatenrichtung [m]

herangezogen werden. Je größer die Richardsonzahl, desto stabiler ist die Strömung. Das heißt, je größer der Dichtegradient und je kleiner der Geschwindigkeitsgradient, desto größer wird die Richardsonzahl (im Fall eines ruhenden Fluids sogar unendlich) und die Strömung stabiler. Für den umgekehrten Fall – geringer Dichtegradient, großer Geschwindigkeitsgradient – wird nach Thorpe (1973) die Strömung ab einem Wert von $Ri < 0,25$ instabil. Hohe Geschwindigkeitsgradienten führen hier zu so genannten Kelvin-Helmholtz Instabilitäten, die durch eine Wellenbildung an der Grenzfläche

zwischen Fluiden unterschiedlicher Dichte sichtbar werden. In diesem Bereich kommt es in großem Maße zu einem vertikalen Impuls- und Masseaustausch.

Für Nachklärbecken bedeutet dies, dass sich im hinteren Beckenbereich zwischen hochkonzentriertem, fast ruhendem Schlammbett und dem stark ausgedünnten, schon langsamer fließendem Jet ein scharfer Schlammspiegel als sichtbares Zeichen für eine stabile Schichtung der Strömung ausbildet. In der Nähe des Einlaufs hingegen führt der geringe Dichtegradient zwischen dem Einlaufstrahl und dem noch nicht konsolidierten Schlammbett in Verbindung mit den großen Geschwindigkeitsgradienten zu einer instabilen Grenzschicht. In Folge dessen kommt es einerseits zur Einmischung von Umgebungsfluid aus dem oberen und andererseits zur Einmischung von Schlamm aus dem unteren Beckenbereich in den Jet. Insbesondere bei ungünstigen Einlaufkonstruktionen transportiert der Jet anschließend ein Vielfaches der ursprünglichen Zuflussmenge, was dementsprechend die hydraulische Belastung des Beckens in Form der sich ausbildenden Walzenströmung mitunter überproportional erhöht. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, dass der reale Massetransport im Jet weit über dem Bemessungszufluss des Beckens liegt und somit das Becken nur aufgrund der aufgezeigten Strömungsprozesse überlastet ist. Ein etwaiger Versagensfall kann somit nicht allein durch äußere Randbedingungen nachvollzogen oder gar quantifizierbar gemacht werden, sondern ist in hohem Maße von beckeneigenen und konstruktionsbedingten Einflüssen abhängig. Einen tieferen Einblick in die Strahlströmung in Nachklärbecken findet der Leser in der bereits erwähnten Arbeit von Freimann (1999). Armbruster (2002) führt als Kenngröße für die reale Belastung von Nachklärbecken in Anlehnung an die Bemessungsgröße Oberflächenbeschickung q_A [m/h] die beckeninterne Oberflächenbeschickung $q_{A,int}$ ein, die sich nicht auf den Beckenzulauf, sondern auf den realen Volumenstrom im Becken bezieht.

2.3 Der belebte Schlamm

Der belebte Schlamm besteht grundsätzlich aus lebenden Organismen (Biomasse) sowie organischen und anorganischen Anteilen, die sich in Flocken zusammenlagern. Die Zusammensetzung dieser Mischung und damit einhergehend die Flockenbildung und somit auch die physikalischen Eigenschaften der Suspension schwanken dabei stark in Abhängigkeit von den Abwasserinhaltsstoffen, dem Kläranlagenbetrieb und weiteren äußeren Faktoren, wie z. B. der Temperatur (Mudrack und Kunst 1991).

Belebter Schlamm stellt in seiner Zusammensetzung und den daraus resultierenden physikalischen Eigenschaften ein hochkomplexes System dar. Insofern können die im Folgenden vorgestellten Prozesse nur vereinfacht und im Allgemeinen als grundlegende Aufschlüsselung der Schlammeigenschaften dienen.

2.3.1 Sinkgeschwindigkeit und Flokkulation

Ein Nachklärbecken kann nur funktionieren, weil die Schlammflocken aufgrund ihrer im Vergleich zu Wasser höheren Dichte absinken. Die Sinkgeschwindigkeit v_s [m/s] ist dabei definiert durch die von der Erdbeschleunigung in vertikale Richtung induzierte Relativgeschwindigkeit des Feststoffes im Verhältnis zu dem umgebenden Fluid. Die in Kapitel 2.2 beschriebene Hauptströmung wird somit von einer Abwärtsbewegung der Feststoffpartikel überlagert.

Die Sinkgeschwindigkeit ist keine konstante, nur von einem Parameter abhängige Stoffeigenschaft. Vielmehr ist eine Vielzahl unterschiedlichster Faktoren verantwortlich für das Absinken der Partikel. Nach Fitch (1957) können vier Arten des Absinkens unterschieden werden:

- Das **freie Absinken nicht flokkenbildender Partikel** wird in erster Linie von seiner Dichte und Form und von der Dichte und Zähigkeit des umgebenden Fluids bestimmt.
- Das **freie Absinken flokkenbildender Partikel** ist darüber hinaus abhängig von der Partikelgröße, die nicht mehr als konstant angesehen werden kann.
- Das **behinderte Absinken** ist charakterisiert durch eine gegenseitige Beeinflussung der Partikel bei steigenden Feststoffkonzentrationen.
- Die **Eindickung** beschreibt den Prozess bei Feststoffkonzentrationen, die so hoch sind, dass sich die Flocken direkt berühren und ein Korngerüst ausbilden, aus dessen Zwischenräumen das Wasser aufgrund des Eigengewichtes des Schlammes herausgepresst wird.

Die Flockenbildung (Flokkulation) und der gegenläufige Prozess des Auseinanderbrechens (Deflokkulation) sind zwei Prozesse, die wegen ihrer Auswirkung auf das Absetzverhalten der Feststoffpartikel in der Schlammdynamik von besonderem Interesse sind. Unter Flokkulation ist die Bildung größerer Flocken aus mehreren kleineren Flocken oder Partikeln zu verstehen. Hierfür sind im Wesentlichen zwei Vorgänge entscheidend:

- Die Kollision, also das Zusammentreffen zweier oder mehrerer Flocken, kann von drei verschiedenen Prozessen ausgelöst werden. Zum einen kollidieren Partikel, die wegen turbulenter Geschwindigkeitsgradienten innerhalb der Strömung unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten unterliegen. Zum anderen führt differenzielles Absinken aufgrund von Größen-, Form- und Dichteunterschieden von Partikeln zu deren Kollision. Des Weiteren kollidieren Partikel infolge der Brownschen Molekularbewegung, deren Grundlage die thermische Eigenbewegung der Partikel darstellt.
- Die Koagulation kann im Anschluss an die Kollision einsetzen, wenn die anziehenden Kräfte zwischen zwei Partikeln überwiegen und beschreibt das Entstehen von Bindungen zwischen diesen Partikeln. Zum einen entstehen diese

Bindungen durch van-der-Waals'-Kräfte und zum anderen durch polymere Brückenbindungen.

Ein Auseinanderbrechen der Flocken ist vor allem bei sehr hohen turbulenten Geschwindigkeitsgradienten, wie sie in Nachklärbecken kaum zu finden sind, zu beobachten. Die Deflokkulation ist somit weniger ein im Nachklärbecken stattfindender Prozess. Vielmehr können durch verschiedene Pumpenarten, an Abstürzen oder im Verteilerbauwerk bzw. im Zulauf zum Nachklärbecken, wo teilweise die dafür nötigen hohen Geschwindigkeitsgradienten auftreten, Flocken zerstört werden.

Wilén (1999) gibt eine strukturierte Übersicht über die existierenden mathematischen Ansätze zu den Beschreibungen der genannten Vorgänge. Die Flokkulation wird dabei aber insgesamt von vielen physikalischen, chemischen und biologischen Größen beeinflusst, so dass ihre detaillierte Beschreibung zum gegenwärtigen Zeitpunkt immer noch entscheidend von empirischen Parametern abhängig ist. In den meisten Ansätzen zur Erfassung des Absetzverhaltens belebter Schlämme wird demnach auf die exakte Betrachtung der Flokkulation, wie z. B. nach Kullmann (1997), verzichtet und ihre Auswirkung auf die Sinkgeschwindigkeit nur indirekt erfasst. Takács et al. (1991) unterteilen zu diesem Zwecke das Absetzen in vier Bereiche:

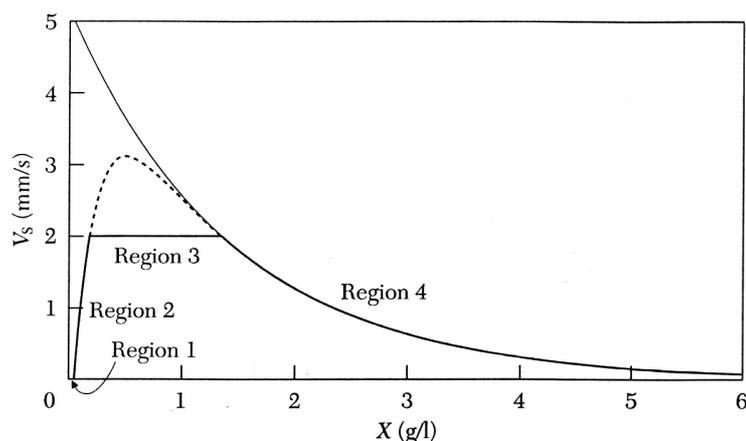


Abbildung 2.2: Sinkgeschwindigkeit nach Takács (entnommen Ekama et al. 1997)

- **Region 1** umfasst den Bereich äußerst niedriger TS-Konzentration. Hier wird davon ausgegangen, dass nur noch winzige, nicht mehr sedimentierbare Partikel vorliegen. Die Sinkgeschwindigkeit ist gleich Null.
- **Region 2** beginnt bei einer Mindestkonzentration, die genau der Konzentration nicht-absetzbarer Stoffe entspricht. Ab diesem Punkt steigt die Sinkgeschwindigkeit mit zunehmender Konzentration aufgrund der mit steigender Konzentration wachsenden Flokkulation und Partikelgröße.
- **Region 3** beinhaltet den Bereich maximaler Teilchengröße, in der eine gegenseitige Behinderung noch nicht eintritt. Von daher ist in diesem Bereich,

der im Allgemeinen zwischen 0,2 und 1 g/l liegt, die Sinkgeschwindigkeit maximal.

- **Region 4** bildet den Bereich des behinderten Absetzens und beginnt in der Regel bei einer Konzentration von 1 g/l (Krebs 1991). Die Sinkgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Konzentration ab.

In Ekama et al. (1997) findet sich eine umfangreiche Zusammenstellung über die zahlreichen Publikationen zum Thema Sedimentation von belebtem Schlamm.

2.3.2 Rheologie

In Nachklärbecken ändert sich das Fließverhalten der Wasser-Schlamm-Suspension in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration. Um diese komplexe und schwierig zu charakterisierende Belebtschlamm suspension in ihren rheologischen Eigenschaften näher beschreiben zu können, ist an dieser Stelle zunächst eine Klassifizierung des Fließverhaltens unterschiedlicher Fluide in Anlehnung an Ebert (1980) angezeigt. Zum Vergleich von Fließeigenschaften ist der Fall der einfachen Scherung dabei besonders geeignet, da er nur durch den Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ_{xy} [N/m²] und dem Schergradienten \tilde{S} [1/s] beschrieben wird. Die Schubspannung ist dabei die auf die Scherfläche bezogene, in Strömungsrichtung wirkende Kraft, die zur Aufrechterhaltung des Schergradienten erforderlich ist.

Im einfachsten Fall zeigt ein Fluid – als Beispiel sei reines Wasser genannt – ein newtonsches Fließverhalten. Hierbei ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ_{xy} und dem Schergradienten \tilde{S}

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \tilde{S} \quad (2.3)$$

mit μ [Ns/m²] als konstante newtonsche Viskosität, die als Maß dafür verstanden werden kann, wie stark sich ein newtonsches Fluid einer Scherbeanspruchung widersetzt. Wird dieser Zusammenhang im Scherdiagramm aufgetragen, ergibt sich eine Gerade, die durch den Ursprung des Koordinatenkreuzes geht (Abbildung 2.3).

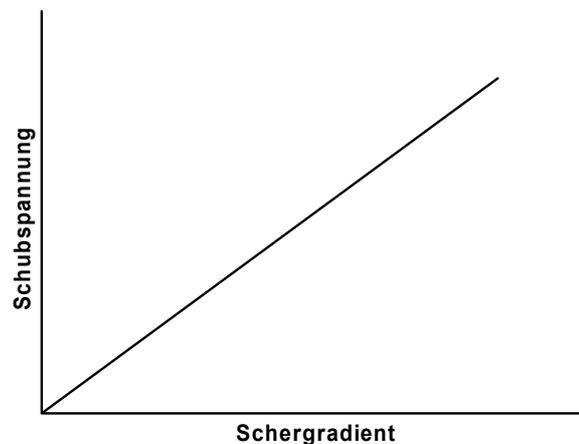


Abbildung 2.3: Scherdiagramm eines newtonschen Fluides

Im nicht-newtonschen Fall kann die Schubspannung nicht mehr über eine konstante Viskosität mit dem Schergradienten verknüpft werden. In Analogie zur newtonschen Viskosität μ beschreibt nun die so genannte Viskositätsfunktion η [Ns/m²] den Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ_{xy} und dem Schergradienten \tilde{S}

$$\tau_{xy} = \eta(\tilde{S}, t) \cdot \tilde{S}(t), \quad (2.4)$$

wobei die Viskositätsfunktion η vom Schergradienten \tilde{S} selbst und gegebenenfalls von der Zeit t [s] abhängig ist.

Bei Fluiden mit zeitunabhängigem Verhalten ist die Viskositätsfunktion nur von der gegenwärtigen Größe des Schergradienten abhängig. Fluide, deren Steigung der Viskositätsfunktion dabei mit zunehmendem Schergradienten abnimmt und deren Fließkurve den Nullpunkt durchläuft, verhalten sich strukturviskos (Abbildung 2.4).

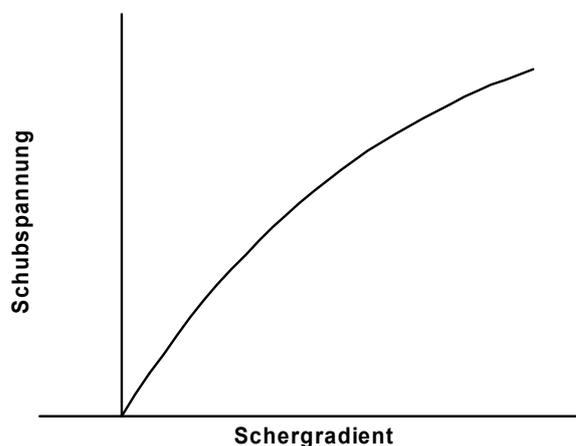


Abbildung 2.4: Fließkurve von strukturviskosen Medien

Eine Erklärung für dieses Verhalten liegt in der möglichen Zerstörung einer inneren Struktur des Mediums. Suspensionen mit größeren Partikeln sind häufig dadurch geprägt, dass die Partikel bei ruhendem Fluid mehr oder weniger intensiv vernetzt sind. Sobald eine Scherbeanspruchung aufgebracht wird, brechen diese Vernetzungen allmählich auf und die Viskositätsfunktion, also der innere Widerstand des Fluids gegen die Scherung, nimmt ab.

Ist die Vernetzung der Partikel im ruhenden Fluid so ausgeprägt, dass zunächst eine endliche Scherspannung überwunden werden muss, ehe eine Bewegung im Fluid einsetzt, handelt es sich um Medien mit einer so genannten Fließgrenze τ_0 [N/m²]. Modellhaft wird dieses Verhalten häufig mit dem idealen Bingham-Medium approximiert und durch folgende Fließbeziehung beschrieben:

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \eta \cdot \tilde{S} \quad (2.5)$$

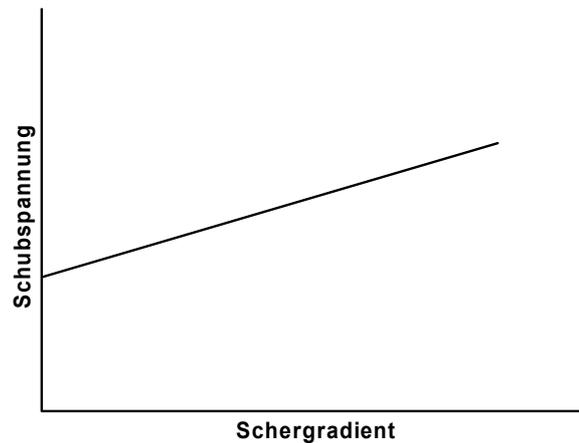


Abbildung 2.5: Scherdiagramm eines idealen Bingham-Mediums

Genau genommen, bedeutet obige Modellvorstellung, dass ein Medium eine innere Struktur hat, die zu fest ist, um eine Bewegung zuzulassen, solange die beanspruchende Schubspannung unterhalb eines bestimmten Grenzwertes liegt. Bei Überschreitung dieses Grenzwertes bricht die innere Struktur sofort in $t = 0$ s zusammen und eine Bewegung kann nicht mehr verhindert werden. Fällt die Schubspannung wieder unter den Grenzwert τ_0 , so ist die innere Struktur sofort, ebenfalls in $t = 0$ s, wieder wirksam und das Medium verhält sich wie ein fester Körper. Entgegen dieser Modellvorstellung erfolgt der geschilderte Strukturabbau und -aufbau in der Natur nicht abrupt, sondern benötigt eine gewisse endliche Zeit. Des Weiteren sind solche inneren Strukturen, die auf Vernetzungen von Partikeln basieren, in ihren Bindungen nicht alle gleich fest. Somit lösen sich zunächst die schwächeren Bindungen und lassen eine infinitesimale Bewegung zu, in dessen Folge auch die stärkeren Bindungen aufgebrochen werden.

Die Kombination aus strukturviskosem Verhalten mit einer Fließgrenze kann mit dem Fließgesetz für ein Herschel-Bulkley-Fluid beschrieben werden

$$\tau_{xy} = \tau_0 + \eta \cdot \tilde{S}^n, \quad (2.6)$$

wobei n [-] als Fließindex bezeichnet wird. Das Scherdiagramm ergibt sich wie in Abbildung 2.6 dargestellt.

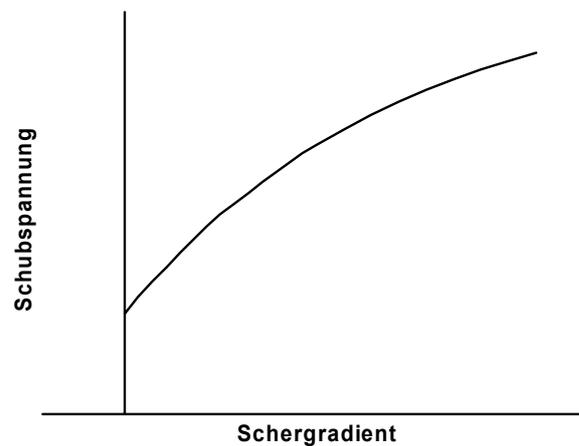


Abbildung 2.6: Fließkurve für ein Herschel-Bulkley-Fluid

Wird der Fließindex $n = 1$ gesetzt, ergibt sich wieder das Fließgesetz für ein ideales Bingham-Medium.

Neben den bisher geschilderten rheologischen Eigenschaften unterschiedlicher Medien weisen viele Fluide eine mehr oder weniger ausgeprägte Zeitabhängigkeit auf. Dabei zeichnen sich so genannte thixotrope Medien dadurch aus, dass bei einem konstanten Schergradienten die Viskosität über die Zeit abnimmt. Endet die Beanspruchung, baut sich die innere Struktur wieder auf. Das Material erholt sich und weist bei erneuter Scherung wieder die ursprüngliche Viskosität auf. In diesem Fall ist nicht die Steigerung des Schergradienten für die Veränderung der inneren Struktur verantwortlich, sondern allein die Dauer einer gleich bleibenden Belastung.

In der Wasser-Schlamm-Suspension vereinigen sich alle aufgezeigten Fließeigenschaften. Bei niedrigen Feststoffkonzentrationen verhält sich die Suspension annähernd wie reines Wasser und somit wie ein newtonsches Fluid. Bei höheren Konzentrationen zeigt sich strukturviskoses und thixotropes Verhalten. Allerdings treten diese Phänomene vor allem bei stark beanspruchten Schlämmen auf. So sind Pumpschlämme, die mit großen Schergradienten beansprucht werden, diesen Phänomenen unterworfen. In Nachklärbecken sind die Schergradienten so klein, dass eine Zerstörung der Flockenstruktur kaum auftritt und das strukturviskose und thixotrope Verhalten vernachlässigt werden kann. Von entscheidender Bedeutung ist in Nachklärbecken vielmehr die Frage nach der Existenz einer Fließgrenze, wobei es sich genau genommen um den Umgang mit der oben aufgezeigten, vereinfachten Modellvorstellung handelt. In der Literatur wird diese Frage nicht eindeutig geklärt. Einige Autoren wie z. B. Proff und Lohmann (1997) und Rosenberger et al. (2002) verneinen die Existenz einer modellhaften Fließgrenze und verstehen das anfängliche Fließverhalten als das Überwinden einer hohen Anfangsviskosität. Andere wie z. B. Lotito et al. (1997) und Günder (1999) beschreiben vereinfachend das Auftreten einer Fließgrenze ab einer gewissen Feststoffkonzentration, wobei die angegebenen Grenzwerte mit 5 g/l und 80 g/l sehr weit auseinander liegen.

In Kapitel 3.3.5 wird näher auf eigene Messungen der Viskosität von belebtem Schlamm und einen daraus entstandenen eigenen Modellansatz zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Wasser-Schlamm-Suspension in Nachklärbecken eingegangen. Die Existenz einer Fließgrenze nach der Modellvorstellung eines idealen Bingham-Mediums wird dabei negiert. Vielmehr wird der Bereich der Fließgrenze feiner aufgelöst und das rheologische Verhalten von Belebtschlamm mit einem bi-linearen Viskositätsansatz beschrieben.

2.4 Beckengeometrie und Einlaufgestaltung

Die geometrische Gestaltung des Nachklärbeckens selbst hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf seine Funktion und Leistungsfähigkeit. Die Anordnung des Klarwasserabzuges hat hierbei jedoch weniger einen Einfluss auf die Strömung im Becken als vielmehr auf die Feststoffkonzentration im Ablauf. Unabhängig von strömungsmechanischen Prozessen im Becken kann der Auslauf somit in der Zone der geringsten Feststoffkonzentration angeordnet werden. Wo sich diese befindet, kann nur schwer allgemeingültig formuliert werden, da sich ihre Lage erst aus dem gesamten Wirkungsbild des jeweiligen Nachklärbeckens ergibt.

Einen größeren Einfluss auf die Strömung im Becken hat die konstruktive Ausführung und Geschwindigkeit des Räumers. Hollenstein (2005) führt hierfür den Parameter der Räumenergiegeschwindigkeit v_R [m/s] mit

$$v_R = \frac{h_r \cdot v_r}{a_r} \quad (2.7)$$

ein, der ein Maß für die infolge des Räumvorgangs mit Bandräumern in das Becken eingetragene Energie ist. In Abhängigkeit von der Räumerrhöhe h_r [m], der Räumergeschwindigkeit v_r [m/s] und dem Balkenabstand a_r [m] ergibt sich bei einer großen Räumenergiegeschwindigkeit aufgrund stärkerer Verwirbelung des Schlammbeds eine größere Schlammbedhöhe.

Den größten Einfluss auf das Strömungsbild in Nachklärbecken hat jedoch die Konstruktion des Einlaufs. Eine optimale Einlaufgestaltung trägt nur die minimale Gesamtenergie e_t [W]

$$e_t = e_p + e_k \quad (2.8)$$

als Summe aus potenzieller e_p [W] und kinetischer e_k [W] Energie in das Nachklärbecken ein. Wie schon in Kapitel 2.2 dargestellt, minimiert sich die potenzielle Energie, wenn der Zulauf im Bereich gleicher Dichte eingeleitet wird. Im Widerspruch dazu steht die Minimierung der kinetischen Energie. Diese wird bei einem möglichst großen Einlaufquerschnitt, also bei einer Einleitung über die gesamte Beckentiefe minimal. Da sich jedoch der Bereich gleicher Dichte nur über einen geringen Anteil der gesamten Beckenhöhe ausdehnt, kann die Minimierung der kinetischen Energie nicht

losgelöst von der potenziellen Energie betrachtet werden. Die optimale Einlaufhöhe stellt somit einen Kompromiss aus beiden Energiegrößen dar und kann nach Krebs (1991) über die densimetrische Froudezahl

$$Fr_d = \frac{v}{\sqrt{g' \cdot h}} \quad (2.9)$$

mit

- Fr_d – densimetrische Froudezahl [-],
 v – Geschwindigkeit [m/s],
 g' – densimetrische Gravitationskonstante [m/s²],
 h – Einlaufhöhe [m],

bestimmt werden. Die Energie wird für den Fall $Fr = 1$ minimal, so dass sich nach Umformung die Einlaufhöhe h bestimmen lässt. Dabei bezeichnet

$$g' = \frac{\Delta\rho}{\rho_w} \cdot g \quad (2.10)$$

mit

$$\Delta\rho = X_{TS} \cdot \left(\frac{\rho_{TS} - \rho_w}{\rho_{TS}} \right) \quad (2.11)$$

die densimetrische Gravitationskonstante.

Dabei bedeuten:

- $\Delta\rho$ – Dichtedifferenz [kg/m³],
 ρ_w – Dichte des Reinwassers [kg/m³],
 ρ_{TS} – Dichte der Trockensubstanz [kg/m³],
 g – Gravitationskonstante [m/s²],
 X_{TS} – Konzentration der Trockensubstanz [kg/m³].

Als Folge eines derartig konzipierten Einlaufes wird weniger benachbartes Wasser in den Strahl eingemischt, die Jetgeschwindigkeit wird somit geringer und es werden weniger Feststoffpartikel in das Klarwasser freigesetzt. Insgesamt sinkt damit die hydraulische Belastung des Beckens, die Verfahrensstabilität steigt und die resultierende Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens wird erhöht.

3 Die mathematische Modellierung von Nachklärbecken

Nachdem im vorherigen Kapitel 2 die physikalischen Prozesse und ihre Interaktionen untereinander im Vordergrund standen, wird in diesem Kapitel ihre Überführung in ein mathematisches Modell dargestellt. Grundlage dessen soll ein Überblick über den Stand der Forschung sein, um anschließend die weitergehende Entwicklung des im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Modells herausarbeiten zu können.

3.1 Stand der Forschung

In den vielen Jahren der Nachklärbeckenforschung ist eine Vielzahl unterschiedlichster mathematischer Modelle entstanden. Sie werden in null- und einfache eindimensionale Modelle sowie mehrdimensionale Modelle unterteilt und finden aufgrund ihrer unterschiedlichen Aussagemöglichkeiten und Rechenintensität in den verschiedensten Bereichen ihren Einsatz. Einen umfangreichen Überblick über die existierenden Modelle gibt Hunze (2005).

Null- und einfache eindimensionale Modelle finden Eingang in verschiedenen Programmsystemen zur Untersuchung und Auslegung des Gesamtsystems Kläranlage und variieren stark in den von ihnen abgebildeten Prozessen. Einfachste Ansätze, wie z. B. der Modellansatz nach der A 131 (ATV 2000), basieren auf der Idealvorstellung von Hazen (1904), die von einer gleich bleibenden, uniformen Horizontalströmung im Becken und einem konstanten Absinken der Schlammpartikel ausgeht. Weiterführende Modelle basieren auf zwei Schichten, die das Nachklärbecken in eine Schlammzone und eine Klarwasser- und Rückstromzone unterteilen (Wells und LaLiberte 2001). Unter Berücksichtigung der Dichteinflüsse wird für beide Schichten eine Massenbilanz berechnet.

Eine Sonderstellung nehmen die so genannten einfachen eindimensionalen Modelle ein. Sie basieren auf den Gesetzmäßigkeiten der nulldimensionalen Modellierung und nicht auf der Lösung der Kontinuitäts- und Impulsgleichung, ermöglichen jedoch über die Betrachtung von Stoffflüssen eine Abschätzung der Prozesse in der vertikalen Raumrichtung. Auf Grundlage der Solid-Flux-Theorie wird in diesen Modellen das Nachklärbecken in eine unterschiedliche Anzahl horizontaler Schichten unterteilt und die Sinkgeschwindigkeit in Abhängigkeit des TS-Gehaltes formuliert (z. B. Vesilind 1979 und Takács et al. 1991). Zum Teil gehen die veränderliche Lage des Schlammspiegels, Dichteeffekte und auch Kurzschlussströme in die Modellierung ein. Das Modell von Janzen (2005) berücksichtigt darüber hinaus die durch die Strahleinmischung hervorgerufene interne Rezirkulation.

In Kombination mit einem Modell zur Beschreibung des Belebungsbeckens werden null- und eindimensionale Nachklärbeckenmodelle vorwiegend zur dynamischen Simulation des Schlammhaushaltes der Belebungsstufe genutzt. Eine Optimierung des Beckens ist aufgrund fehlender Geometrieinflüsse und im Hinblick auf die stark vereinfachten und parametrisierten internen Vorgänge nicht möglich (Krebs et al. 2000).

Als Basis für eine Optimierung von Nachklärbecken bieten mehrdimensionale Modelle die Möglichkeit zu einer eingehenden Analyse der Prozesse im Nachklärbecken wie auch zur Untersuchung geometrischer Einflüsse auf diese Prozesse. In diesen Modellen wird als Grundlage für die Simulationsrechnung das Untersuchungsgebiet zwei- oder dreidimensional aufgelöst.

Schon in den 70er Jahren stellte Larsen (1977) ein zweidimensionales Modell zur Beschreibung der Vorgänge in einem Nachklärbecken vor. Zur Abbildung der Strömung wird die Kontinuitäts- und Navier-Stokes-Gleichung gelöst, wobei die Turbulenz der Strömung über eine konstante turbulente Viskosität berücksichtigt wird. Die Veränderung der Dichte in Abhängigkeit der Schlammkonzentration ist in das Modell integriert. Der Feststofftransport wird unter Berücksichtigung einer konzentrationsabhängigen Sinkgeschwindigkeit mit Hilfe der Advektions-Diffusions-Gleichung berechnet. Einflüsse der Strahleinleitung, Flokkulation und Viskositätsänderung sind zwar bekannt, können jedoch aufgrund begrenzter Rechenleistung nicht in das Modell implementiert werden.

In der heutigen Zeit haben viele Autoren Modelle zur Simulation von Nachklärbecken vorgestellt. Das Modell von Armbruster et al. (2001) basiert auf dem Programm FAST-2D der Universität Karlsruhe und stellt eine Weiterentwicklung des Modells von Lakehal et al. (1999) dar. Der Einfluss der veränderlichen Dichte auf das Strömungsfeld wird ebenso wie ihr Einfluss auf die Turbulenz, die mit dem k - ϵ -Modell abgebildet wird, berücksichtigt. Die Sinkgeschwindigkeit wird nach dem Ansatz von Takács bestimmt. Im Gegensatz zu dem Modell von Lakehal, der einen Ansatz für ein ideales Bingham-Fluid integriert, findet die konzentrationsabhängige Änderung der Viskosität über einen einfachen Ansatz für newtonsche Fluide Eingang in die Berechnung. Die Auswirkungen des Räumvorgangs auf die Strömung und den Schlammtransport werden nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den mathematischen Ansätzen des Programmsystems FLUENT (FLUENT 2001) ist mit dem Modell von Hunze und Schumacher (Schumacher 2001, Krebs et al. 2001, Jardin et al. 2002) ein Werkzeug zur Beurteilung und Optimierung der Verhältnisse in einem realen Nachklärbecken der Kläranlage Kierspe entwickelt worden. In das zwei- und auch dreidimensionale Modell fließen alle relevanten Prozesse ein. Die Strömung wird mit Hilfe der Kontinuitäts- und der Navier-Stokes-Gleichung berechnet, wobei die Turbulenz über das $\text{rng-k-}\epsilon$ -Modell, als Sonderform des k - ϵ -Modells für schwachturbulente sowie Dichteströmungen, berücksichtigt wird. Der Einfluss der konzentrationsabhängigen Dichteänderung auf Strömung und Turbulenz ist in das Modell implementiert. Der Schlammtransport wird auf Basis der Advektions-

Diffusions-Gleichung gelöst, wobei die Sinkgeschwindigkeit über den anhand von Absetzversuchen kalibrierten Ansatz von Takács berechnet wird. Die Zunahme der Viskosität mit steigendem Feststoffgehalt ist über einen idealen Bingham-Ansatz integriert. Der Räumler wird als Impulsquelle modelliert, die sich mit der Geschwindigkeit des realen Räumers durch das Becken bewegt. Die Berechnungen erfolgten vollständig instationär und wurden anhand von Messungen der TU Dresden kalibriert.

Weilbeer (2004) entwickelte auf Basis des Programmsystems FLUENT ein Zwei-Phasen-Modell für Nachklärbecken. Die beiden Phasen werden dabei basierend auf dem Ansatz des Euler-Euler Modells (FLUENT 2001) einzeln betrachtet. Eigene Ansätze zur Unterteilung des belebten Schlammes in unterschiedliche Flockenklassen sowie zur Beschreibung von Flokkulationsprozessen sind in das Modell integriert.

Das dreidimensionale Modell von Winkler (2001) beruht auf den Ansätzen des Programmsystems CFX. Die Turbulenz wird über ein Low-reynolds-k- ϵ -Modell approximiert, um den Bereichen geringer Turbulenz Rechnung zu tragen. Der Einfluss des Räumers in einem runden Nachklärbecken wird über ein rotierendes Gitter berücksichtigt. Eine Veränderung der Viskosität ist nicht in das Modell implementiert.

Aufbauend auf den Ansätzen von Hunze und Schumacher implementierte De Clercq (2003) einen modifizierten Herschel-Bulkley Ansatz zur Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Wasser-Schlamm-Suspension in ein zweidimensionales Modell. Seine Erkenntnisse zur Flockendynamik sind noch nicht in das Modell integriert.

3.2 Die hydrodynamischen Grundgleichungen

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell zu Beschreibung von Strömung und Schlammverteilung in Nachklärbecken basiert auf dem Programmsystem FLUENT 6.1 (FLUENT 2001) der Firma Fluent Inc., Lebanon, USA und löst die entstehenden Gleichungssysteme mit Hilfe des Finite-Volumen-Verfahrens.

FLUENT löst für alle Strömungen die Erhaltungsgleichungen für Masse 3.1 und Impuls 3.2. Im allgemeinen Fall für das laminare Strömungsfeld eines einphasigen Fluids ergeben sich diese Gleichungen zu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.1)$$

und

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + F_i \quad (3.2)$$

mit

- ρ – Dichte [kg/m³],
- t – Zeit [s],

u_i	–	Geschwindigkeitsvektor [m/s],
p	–	Druck [N/m ²],
μ	–	molekulare, dynamische Viskosität [Ns/m ²],
g_i	–	Gravitationsbeschleunigung [m/s ²],
F_i	–	äußere Kräfte [N].

Wie schon in Kapitel 2.2 dargestellt wird, ist die Strömung in Nachklärbecken jedoch nicht laminar. Mit den Gleichungen 3.1 und 3.2 ist zwar prinzipiell auch eine turbulente Strömung zu beschreiben, allerdings müsste aufgrund der geringen Zeit- und Längenausdehnung der kleinsten Wirbel ein großer Aufwand bezüglich der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung des Modells betrieben werden. Zur Reduzierung dieses Aufwandes werden die Gleichungen modifiziert und nur die zeitlichen Mittelwerte der kleinskaligen Turbulenzen betrachtet. Dabei wird unter der Annahme, dass sich die turbulenten analog zu den viskosen Spannungen proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten verhalten, die molekulare Viskosität μ durch eine turbulente Viskosität μ_t ersetzt. Diese ist somit keine Stoffkonstante mehr, sondern muss in Abhängigkeit des Strömungsfeldes beschrieben werden.

Zur Bestimmung der turbulenten Viskosität haben sich im Laufe der Zeit zahlreiche Turbulenzmodelle unterschiedlicher Komplexität etabliert. Das in ingenieurpraktischen Strömungsberechnungen am weitesten verbreitete Turbulenzmodell ist das *k- ϵ -Modell*, das als semiempirisches Modell zwei zusätzliche Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k [m²/s²] und die turbulente Dissipationsrate ϵ [m²/s³] löst, aus denen dann die turbulente Viskosität μ_t berechnet wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das so genannte *rng-k- ϵ -Modell* (Orszag et al., 1996) als Weiterentwicklung des Standardmodells verwendet. Das *rng-k- ϵ -Modell* leitet sich aus einer strengen statistischen Methode, der so genannten *renormalization group* Theorie ab und zeichnet sich insbesondere durch eine verbesserte Genauigkeit in der Beschreibung schwach turbulenter und dichtebeeinflusster Strömungen aus.

Die Transportgleichungen ergeben sich in diesem Modell für k zu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\rho}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon + S_k \quad (3.3)$$

und für ϵ zu

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\rho}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \\ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dabei beschreiben G_k und G_b [kg/ms³] die Produktion turbulenter kinetischer Energie aufgrund von Geschwindigkeitsgradienten und Auftriebskräften. Die Größen α_k und α_ϵ

sind die dimensionslosen inversen Prandtlzahlen bezüglich k und ε . Die Modellkonstanten ergeben sich aus der *rng*-Theorie zu $C_{1\varepsilon} = 1,42$ und $C_{2\varepsilon} = 1,68$.

Die turbulente Viskosität berechnet sich anschließend aus den zuvor berechneten Werten für k und ε nach Gleichung 3.5:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

mit $C_\mu = 0,0845$.

Die Modellkonstanten $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ und C_μ sind empirisch ermittelte und allgemein anerkannte Werte, die für ein breites Spektrum von Anwendungsfällen hinreichend genaue Ergebnisse gewährleisten. Da die Turbulenzmodellierung keinen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet und alle Erfahrungen und Ergebnisse (FLUENT 2001) für die Eignung des *rng-k-ε-Modells* im Bereich der Nachklärbeckenmodellierung sprechen, wurden keine Veränderungen an diesen Konstanten oder anderen Teilen des Turbulenzmodells vorgenommen.

Neben der bis jetzt dargelegten mathematischen Formulierung des Strömungsfeldes spielt in der Modellierung von Nachklärbecken der Stofftransport eine entscheidende Rolle. Dabei wird der advective und diffusive Transport einer skalaren Größe Φ_k in einem Strömungsfeld, wie z. B. eines Feststoffes, durch die Transportgleichung 3.6 formuliert:

$$\frac{\partial \rho \phi_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(F_i \phi_k - \Gamma_k \frac{\partial \phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\phi_k} \quad (3.6)$$

wobei Γ_k der Diffusionskoeffizient und S_{ϕ_k} der Quellterm ist. Im Falle eines allein durch den Massenfluss bestimmten advectiven Transportes ist $F_i = \rho u_i$. Wie aber bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, wird die Hauptströmung des Fluids von einer Abwärtsbewegung der Feststoffpartikel überlagert. Die standardisierte Formulierung von F_i muss somit verändert und die vertikale Relativgeschwindigkeit der Schlammflocken implementiert werden (Kapitel 3.3.4).

3.3 Modellbildung in Nachklärbecken

Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel 3.2 gezeigten hydrodynamischen Grundgleichungen sind für die Modellierung von Nachklärbecken Veränderungen und Erweiterungen des mathematischen Modells erforderlich, die im Folgenden eingehend beschrieben werden. Im Vordergrund sollen dabei vor allem auch die eigenen Entwicklungen im Bereich der dreidimensionalen Einlaufeffekte in achsensymmetrischen Simulationen und die Modellierung der rheologischen

Eigenschaften des Wasser-Schlamm-Gemisches stehen, die die Grundlage dieser Arbeit darstellen.

3.3.1 Achsensymmetrische Simulation mit Rotationsanteil

Ingenieurpraktischen Anwendungen im Bereich der mehrdimensionalen Nachklärbeckenmodellierung stehen grundlegend zwei gegenläufige Notwendigkeiten bezüglich der Rechenleistung und damit der Kosten-Nutzen-Analyse entgegen. Zum einen muss das Berechnungsnetz aufgrund der hochkomplexen Prozesse ausreichend fein aufgelöst sein. Zum anderen darf dabei – trotz der nicht unerheblichen Größe der meisten Nachklärbecken – die Elementanzahl nicht zu groß werden, da in der Regel bei einem relativ kleinen Zeitschritt von 0,1 s eine Echtzeit von mindestens 8 h simuliert werden muss, um aussagefähige Ergebnisse zu erhalten.

Aufgrund dieser Vorgaben und den geometrischen wie hydraulischen Randbedingungen der meisten Nachklärbecken sind zweidimensionale Modellansätze nahe liegend. Horizontal durchströmte, lange, rechteckige Nachklärbecken werden dabei in der Regel mit dem klassischen und hinreichend bekannten zweidimensionalen, breitengemittelten Ansatz berechnet. Für horizontal durchströmte, runde Nachklärbecken bietet FLUENT die Möglichkeit der zweidimensionalen, achsensymmetrischen Simulation. Dabei verläuft die Symmetrieachse durch den Mittelpunkt des Rundbeckens und das zweidimensionale Berechnungsnetz wird im Modellansatz um diese Rotationsachse herum projiziert. Entgegen der breitengemittelten, zweidimensionalen Simulation wird dabei also die Aufweitung des durchflossenen Querschnittes mit zunehmendem Abstand vom Beckenmittelpunkt berücksichtigt. Die axiale (3.7) und radiale (3.8) Impulsgleichung sind in diesem Fall gegeben zu:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_a) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a}(r \rho v_a v_a) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_a) = & -\frac{\partial p}{\partial a} \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_a}{\partial a} \right) \right] \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_a}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial a} \right) \right] \\ & + F_a \end{aligned} \quad (3.7)$$

und

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a}(r \rho v_a v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = & -\frac{\partial p}{\partial r} \\
& + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial a} + \frac{\partial v_a}{\partial r} \right) \right] \\
& + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) \right] \quad (3.8) \\
& - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \rho \frac{v_t^2}{r} \\
& + F_r
\end{aligned}$$

wobei a die axiale, r die radiale und t die tangentielle Koordinate und v_a die axiale, v_r die radiale und v_t die tangentielle Geschwindigkeit sind.

Häufig weist die Strömung in runden Nachklärbecken, induziert durch Lamellen am Einlauf oder die Räumerbewegung, über die axialen und radialen Komponenten hinaus einen Rotationsanteil als tangentielle Komponente auf. Bei dieser häufig als dreidimensional empfundenen Strömung handelt es sich genau genommen um eine achsensymmetrische Rotationsströmung, deren tangentialer Anteil in Abhängigkeit von zwei Ortskoordinaten wie folgt geschrieben werden kann:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a}(r \rho v_a v_t) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_t) = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial a} \left[r \mu \frac{\partial v_t}{\partial a} \right] \\
& + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_t}{r} \right) \right] \quad (3.9) \\
& - \rho \frac{v_r v_t}{r} \\
& + F_t
\end{aligned}$$

3.3.2 Dreidimensionale Einlaufeffekte in achsensymmetrischen Simulationen

Aufbauend auf den Möglichkeiten, welche die achsensymmetrische Simulation mit Berücksichtigung des Rotationsanteils einer Strömung bietet, wurde nun eine Formulierungen erarbeitet, um die rotationssymmetrischen Einlaufeffekte in runden Nachklärbecken im Modell zu erfassen. Mit Hilfe eigener mess- und simulationstechnischer Untersuchungen konnten in der Literatur bekannte Ansätze, die sich auf die Umströmung von Einzelkörpern beziehen, auf Lamellenkonstruktionen, wie sie in Einlaufbauwerken runder Nachklärbecken vorkommen (Abbildung 3.1), übertragen werden. Diese Lamellen sollen durch ihren Anstellwinkel das zufließende Wasser in tangentielle Richtung ablenken und im Nachklärbecken eine langsame und gleichmäßige Rotationsströmung induzieren. Aus einer rein radialen Strömung wird also nach passieren des Lamellenfeldes eine Strömung mit einem radialen und mit einem tangentialen Anteil.

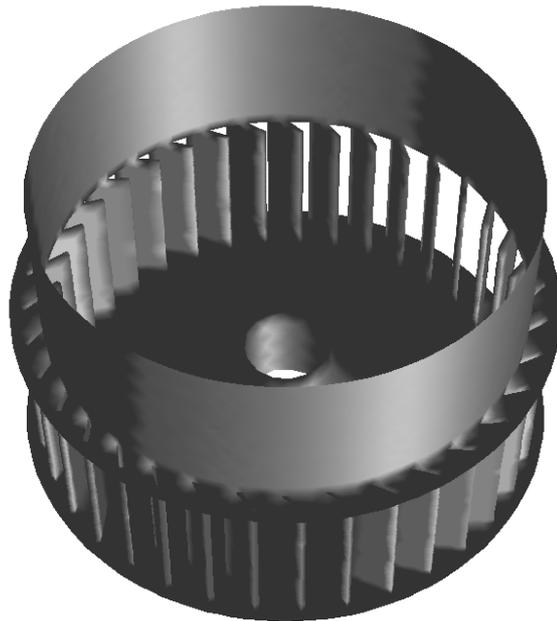


Abbildung 3.1: Einlaufbauwerk eines runden Nachklärbeckens mit Lamellen

Die dabei im Lamellenbereich wirkenden Kräfte können aus zweierlei Gründen nicht direkt berechnet werden. Zum einen ist die Strömung aufgrund von Dichteeffekten nicht über die Höhe konstant und zum anderen ist sie nicht verlustfrei. Beide Voraussetzungen müssten jedoch für eine direkte Bestimmung der Kräfte erfüllt sein. Daher kann eine Berechnung der Kräfte nur empirisch in Abhängigkeit so genannter Kraftbeiwerte nach folgender Formulierung erfolgen:

$$F_r = c_r \cdot A_p \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3.10)$$

$$F_t = c_t \cdot A_p \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3.11)$$

mit

- F_r – Kraft in radiale Richtung [N],
- F_t – Kraft in tangentialer Richtung [N],
- c_r – Kraftbeiwert in radialer Richtung (in der Literatur häufig c_w) [-],
- c_t – Kraftbeiwert in tangentialer Richtung (in der Literatur häufig c_a) [-],
- A_p – Projektionsfläche des Körpers [m²].

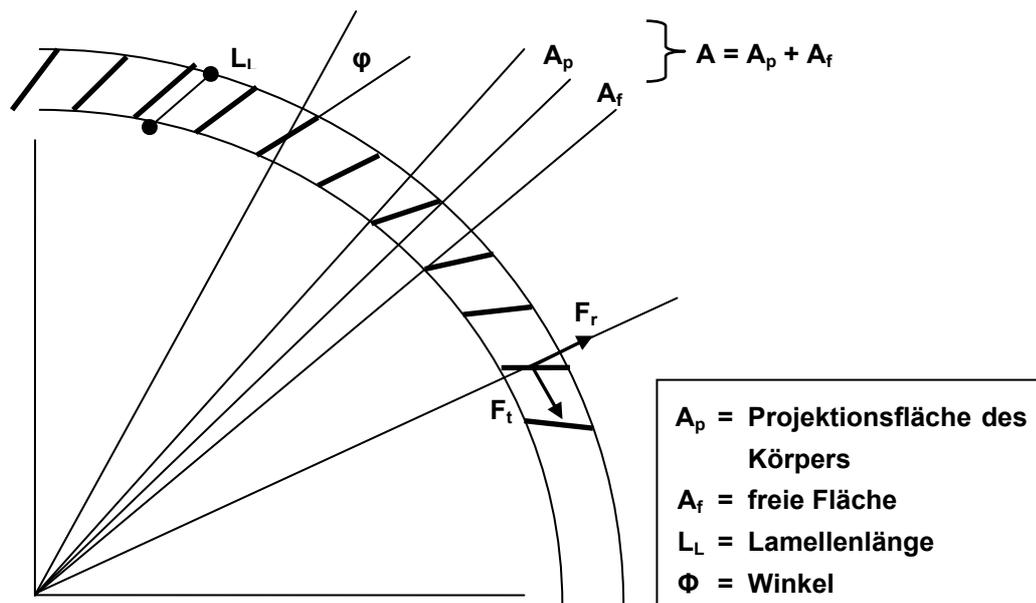


Abbildung 3.2: Lamellenkonstruktion im Einlauf eines Nachklärbeckens – Draufsicht

Entsprechende Kraftbeiwerte für eine einzelne angeströmte Platte finden sich in Abhängigkeit des Anströmwinkels unter anderem bei Prandtl (1990), Dubbel (2001) und Zielke (2005). Beschränkt sich die Auswahl auf die für Nachklärbecken typischen Konstruktionen von Lamellen, die sich in der Regel nicht überlappen und in einem Winkel von 30° oder 45° angeschrägt sind, ergeben sich aus diesen Literaturwerten die Kraftbeiwerte nach Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Kraftbeiwerte für eine einzelne angeströmte Platte

	30°	45°
c_r	0,9	1,3
c_t	0,7	1,0

Soll nun nicht eine einzelne Lamelle betrachtet werden, sondern wie in diesem Anwendungsfall ein Lamellenfeld, bietet Fluent die Möglichkeit, den Lamellenbereich als ein eigenes Volumen zu definieren, in dem die entsprechenden Kräfte als Volumenkräfte angesetzt werden können. Um diese Möglichkeit zu nutzen, müssen die Kraftbeiwerte als Eingabegröße für Fluent umformuliert werden. Zum einen muss die Projektionsfläche der Lamellen A_p als Verhältnis von der Gesamtfläche A zur noch frei durchflossenen Fläche A_f berücksichtigt werden. Zum anderen müssen die Kraftbeiwerte auf die in radiale Richtung projizierte Länge der Lamellen bezogen werden. Die für Fluent spezifischen Kraftbeiwerte für ein Lamellenfeld ergeben sich also wie folgt:

$$c'_r = \frac{c_r \cdot \left(\frac{A}{A_f} \right)}{\cos \varphi \cdot L_L} \quad (3.12)$$

$$c'_t = \frac{c_t \cdot \left(\frac{A}{A_f} \right)}{\cos \varphi \cdot L_L} \quad (3.13)$$

Bedingung für die Gültigkeit dieser Formulierung ist zum einen, dass der Anstellwinkel der Lamellen zwischen 30° und 45° liegt und zum anderen, dass sich die Lamellen nicht überlappen, d. h., dass die projizierte frei durchflossene Fläche (siehe Abbildung 3.2) nicht gegen Null geht. Unter Berücksichtigung dieses Gültigkeitsbereiches und unter der beispielhaften Annahme, dass $\cos \varphi \cdot L_L = 0,25$ m ist, ergeben sich für die in Einlaufbauwerken von Nachklärbecken typischen Lamellenkonstruktionen die Kraftbeiwerte c'_r und c'_t nach Tabelle 3.2 und 3.3.

Tabelle 3.2: Kraftbeiwerte radial in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Verbauungsgrad

	$A/A_f = 1,67$ (Verbauungsgrad 40%)	$A/A_f = 2$ (Verbauungsgrad 50%)	$A/A_f = 2,5$ (Verbauungsgrad 60%)
30° Anstellwinkel	6,0	7,2	9,0
45° Anstellwinkel	8,7	10,4	13,0

Tabelle 3.3: Kraftbeiwerte tangential in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Verbauungsgrad

	$A/A_f = 1,67$ (Verbauungsgrad 40%)	$A/A_f = 2$ (Verbauungsgrad 50%)	$A/A_f = 2,5$ (Verbauungsgrad 60%)
30° Anstellwinkel	4,7	5,6	7,0
45° Anstellwinkel	6,7	8,0	10,0

Um die Wirkungsweise von Lammellen und die Bedeutung der Berücksichtigung ihres Einflusses auf die Strömung in mehrdimensionalen Simulationen zu verdeutlichen, sollen bereits an dieser Stelle, im Vorgriff auf Kapitel 4, Ergebnisse der

Modellkalibrierung am Beispiel des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück gezeigt werden. Die Einlaufkonstruktion eines der beiden untersuchten Nachklärbecken in Rheda-Wiedenbrück ist mit Lamellen versehen (Details zur Konstruktion siehe Kapitel 4.1). Die folgenden Diagramme zeigen die gemessenen Geschwindigkeiten in alle drei Raumrichtungen aus diesem Nachklärbecken mit Lamellenkonstruktion im Vergleich zu berechneten Geschwindigkeiten aus Simulationen bei Berücksichtigung und unter Vernachlässigung der Lamellenkonstruktion.

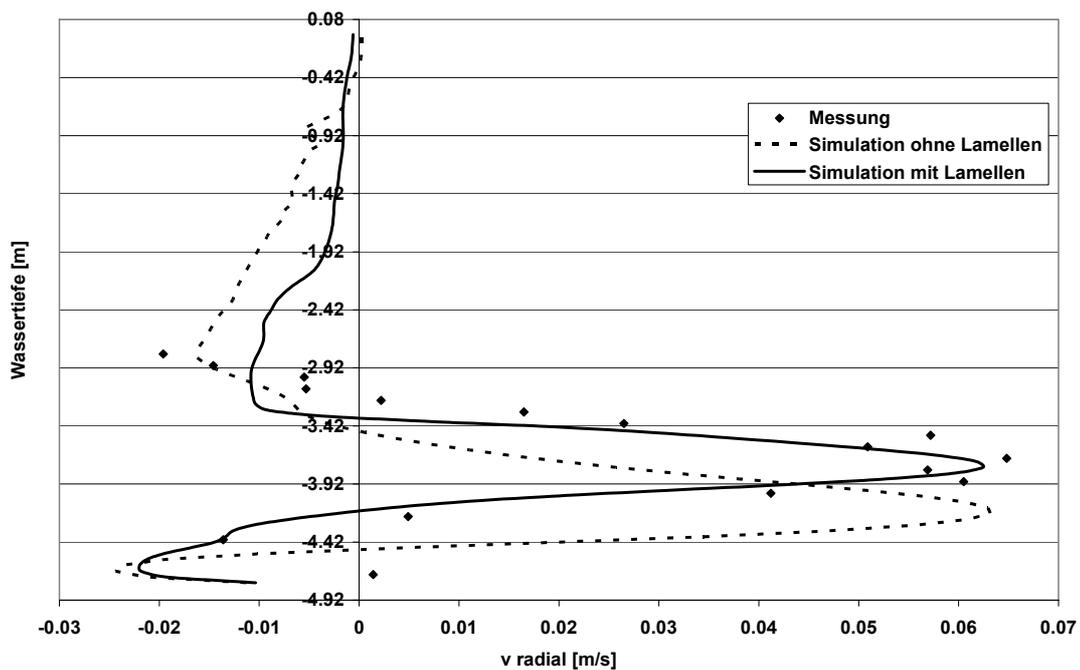


Abbildung 3.3: Radialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt

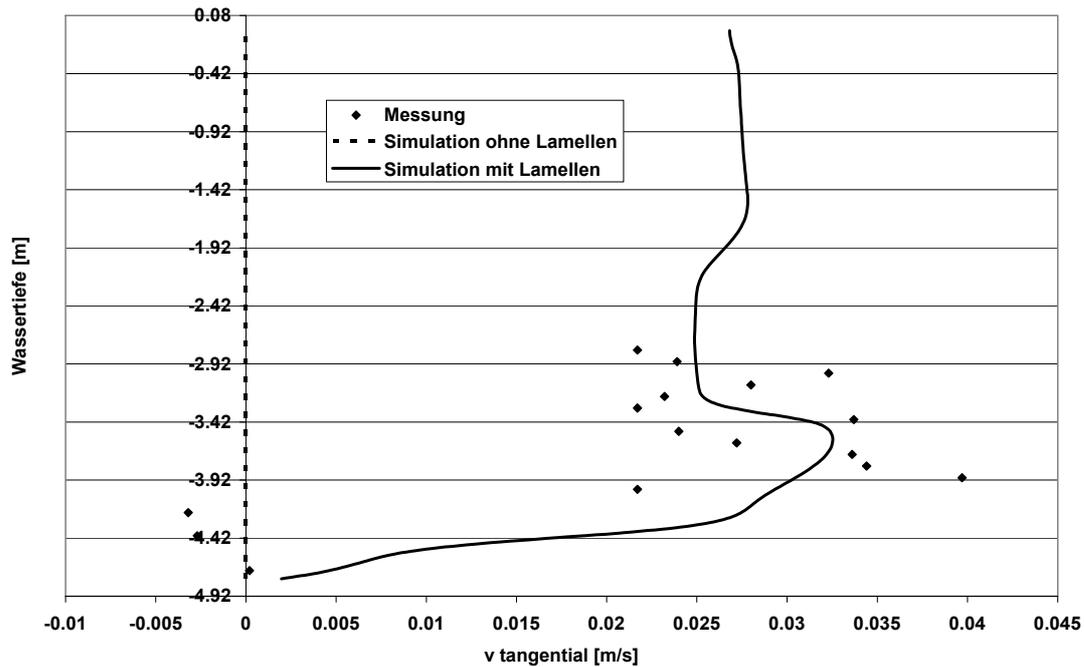


Abbildung 3.4: Tangentialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt

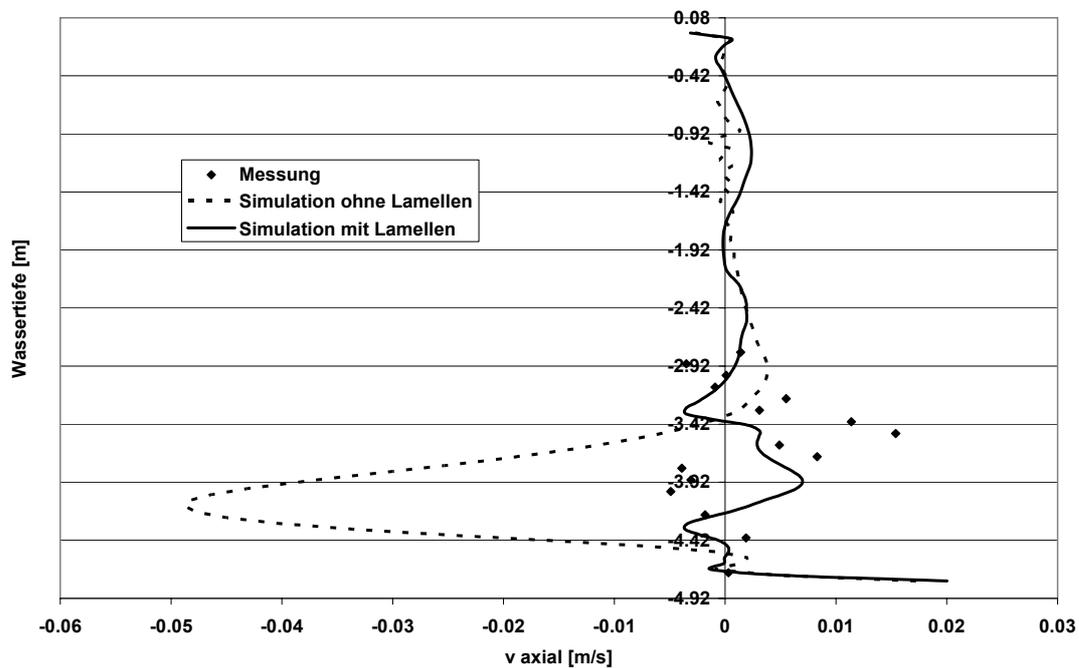


Abbildung 3.5: Axialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt

Wie die Abbildungen 3.3 – 3.5 deutlich zeigen, kann eine Simulation, die die Lammellen im Einlauf nicht berücksichtigt, die realen Strömungsverhältnisse nur eingeschränkt wiedergeben. Zwar stimmen die Stärke und annähernd auch die Höhenlage des Jets in Hauptströmungsrichtung mit den gemessenen Werten überein,

jedoch kommt es in der tangentialen und der axialen Richtung zu großen Abweichungen. Insbesondere die Abweichungen in der axialen Richtung können hierbei zu einer entscheidenden Fehlbeurteilung der Leistungsfähigkeit eines Nachklärbeckens führen. Die vertikale Strömungskomponente ist gerade im für Aufwirbelungen sensiblen und für die Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken entscheidenden Einlaufbereich (vgl. Kapitel 2.2) eine relevante Kenngröße, da durch das Auf- und Abtauchen des Strahls einerseits durch Dichteeffekte Energie in das Becken eingetragen wird und andererseits auch direkt Schlammflocken aufgewirbelt und in die Klarwasserzone eingemischt werden. Die realitätsnahe Wiedergabe aller drei Strömungskomponenten ist somit insbesondere im Einlaufbereich von entscheidender Bedeutung, und die modelltechnische Berücksichtigung vorhandener Lammellen ist nahezu unabdingbar.

3.3.3 Dichteströmung

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, ergibt sich das grundlegende Strömungsbild in Nachklärbecken aufgrund von Dichteunterschieden, die sich infolge ungleicher Feststoffkonzentrationen einstellen. Steigt die Feststoffkonzentration X_{TS} , so erhöht sich auch die Dichte ρ des Wasser-Schlamm-Gemisches. Mit der normierten Trockensubstanzdichte c und der Referenzdichte ρ_{Wasser} für feststofffreies Wasser ergibt sich die Dichte der Suspension für kleine Konzentrationen näherungsweise zu:

$$\rho = \rho_{Wasser} + c \cdot X_{TS} \quad (3.14)$$

mit

$$c = \left(1 - \frac{\rho_{Wasser}}{\rho_{TS}} \right) \quad (3.15)$$

Dabei beträgt die Dichte von feststofffreiem Wasser $\rho_{Wasser} = 998,2 \text{ kg/m}^3$ (FLUENT 2001), und die Dichte der Trockensubstanz ergibt sich nach Iske (2001) zu $\rho_{TS} = 1470 \text{ kg/m}^3$. Daraus berechnet sich für c ein Wert von 0,32, der sich mit der in der Literatur (Winkler 2001) angegebenen Bandbreite von 0,25 bis 0,5 deckt.

3.3.4 Sinkgeschwindigkeit und Flokkulation

Die korrekte Erfassung und Implementierung des Absetzverhaltens des belebten Schlammes in das numerische Modell ist für die resultierende Modellgüte von entscheidender Bedeutung. Allein bei der Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit und ihrer mathematischen Aufarbeitung für das Modell können leicht Fehler bzw. Fehlinterpretationen unterlaufen, die später den Erhalt realitätsnaher Ergebnisse unmöglich werden lassen.

Grundsätzlich gilt es an dieser Stelle festzuhalten, dass die Formulierung der Sinkgeschwindigkeit nach Takács et al. (1991) (vgl. Kapitel 2.3.1) in ihrer doppel-exponentiell geschlossenen Form nach Gleichung 3.17

$$v_s = v_0 \cdot \exp(-r_h (X_{TS} - X_{min})) - v_0 \cdot \exp(-r_p (X_{TS} - X_{min})) \quad (3.16)$$

mit

v_s	-	Sinkgeschwindigkeit [m/s]
v_0	-	maximale theoretische Sinkgeschwindigkeit [m/s]
X_{TS}	-	Schlammkonzentration [kg/m ³]
X_{min}	-	nicht-absetzbarer Teil der Schlammkonzentration [kg/m ³]
r_h, r_p	-	empirisch zu bestimmende Parameter [m ³ /kg]

und vielmehr noch der in der Literatur (u.a. Wahlberg und Keinath 1988, Härtel und Pöpel 1992, Daigger 1995 und Wilson 1996) weit verbreitete Versuch, die Sinkgeschwindigkeit über möglichst nur einen Schlammparameter, wie z. B. den Schlammindex ISV, zu bestimmen, im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend war. Der belebte Schlamm stellt in seiner Zusammensetzung und in den daraus resultierenden physikalischen Eigenschaften ein derart hochkomplexes System dar, das sein Verhalten nicht über die empirisch ermittelten Parameter auf die Schlämme in den Nachklärbecken dieser Arbeit angepasst werden konnte. Vielmehr hat sich herausgestellt, dass bei der Simulation real existierender Nachklärbecken jeweils eine umfangreiche Messkampagne zur Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit möglichst in 2m-Messzylindern unverzichtbar ist. Lediglich im Prognosefall und für grobe Überschlagsrechnungen und nur unter Berücksichtigung der veränderten Aussagequalität des Modells dürfte demnach ein Verzicht auf die explizite Messung der Sinkgeschwindigkeit in Erwägung gezogen werden.

Da die Messungen der Absetzgeschwindigkeiten nicht vom Autor selbst, sondern von projektbegleitenden Instituten und Partnern erfolgten, soll an dieser Stelle nur kurz und beispielhaft anhand des Schlammes des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück die Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit aufgezeigt werden. Details zu den Messungen und Rückschlüsse auf Durchführung und Interpretation finden sich bei Janzen und Rosenwinkel (2005).

Abbildung 3.5 zeigt die gemessenen Absetzgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen TS-Konzentrationen als Punkte und die daraus resultierende mathematische Formulierung, die in das Modell Eingang findet, als durchgezogene Linie.

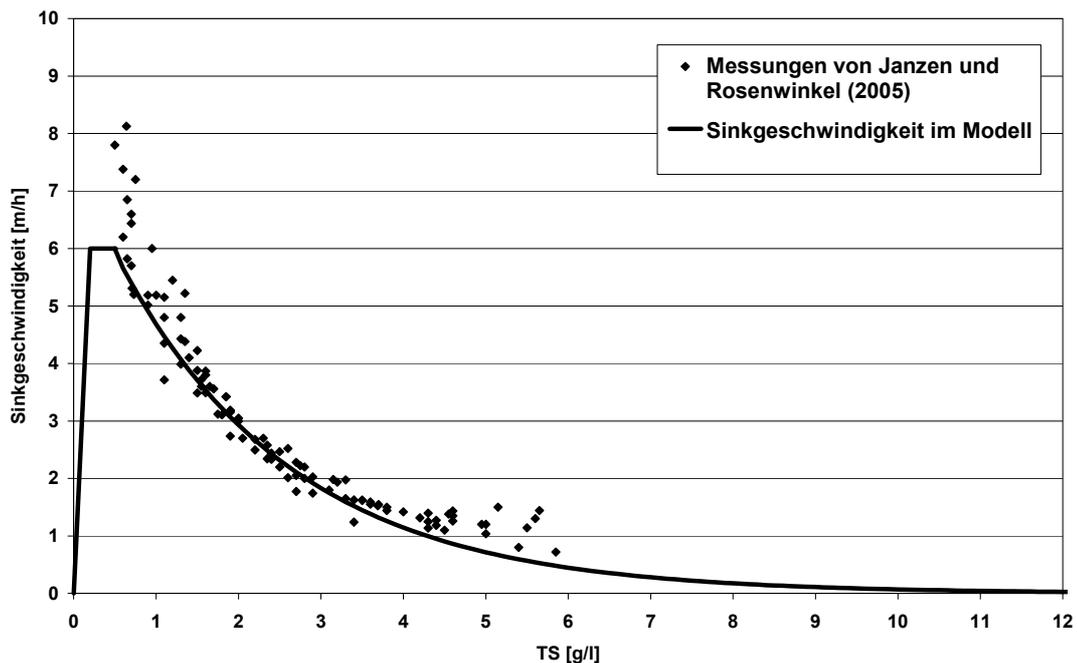


Abbildung 3.6: Absetzverhalten des Schlammes des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück

Die Einteilung der unterschiedlichen Regionen entspricht der von Takács et al. (1991), wie sie in Kapitel 2.3.1 vorgestellt wurde. In Region 2 wird dabei von einem linearen Anstieg der Sinkgeschwindigkeit bis hin zur maximalen Sinkgeschwindigkeit ausgegangen. Insbesondere dieser Teil der Absetzkurve bis zu einer ungefähren Konzentration von 1 g/l stützt sich nicht auf explizit aufgenommene Messdaten, sondern auf Literaturwerte und Erfahrungsgrößen. Es gestaltet sich in höchstem Maße schwierig, mit konventionellen Messverfahren Absetzgeschwindigkeiten von belebtem Schlamm bei geringen Konzentrationen aufzunehmen, so dass dieser Bereich noch immer mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Für viele prozentscheidende Größen – insbesondere für den Aufbau des Schlammбетtes – spielt dieser Bereich allerdings nur eine untergeordnete Rolle, so dass die Beckenhydraulik von Ungenauigkeiten hier relativ unberührt bleibt. In einem viel größeren Maß abhängig von der Absetzgeschwindigkeit im Bereich kleiner TS-Konzentrationen sind die simulierten Ablaufwerte. Diese können zwar nicht generell Auskunft über das Leistungspotenzial eines Nachklärbeckens geben, sind aber letztendlich doch die allgemein anerkannte und leistungsbestimmende Kenngröße. Demnach sollte an dieser Stelle festgehalten werden, dass bei jeglicher Simulation nur bedingt absolute Ablaufwerte prognostiziert werden können. Vielmehr handelt es sich bei den simulierten Ergebnissen um relative Ablaufwerte, die für geometrische oder verfahrenstechnische Variantenvergleiche geeignet sind.

Die exponentielle Funktion, die Region 4 repräsentiert, deckt sich im Bereich zwischen 1 g/l und 4 g/l nahezu vollständig mit den gemessenen Absetzgeschwindigkeiten. Im Konzentrationsbereich darunter und darüber unterschneidet sie die Messpunkt wolke

leicht. Ursächlich hierfür sind einerseits geometrische Einflüsse des Messzylinders und andererseits Einflüsse, die auf dem Unterschied zwischen einem ruhenden (Messzylinder) und einem strömenden (Nachklärbecken) Medium beruhen.

Wie in Kapitel 2.3.1 definiert, muss unter der Sinkgeschwindigkeit die vertikale Geschwindigkeit eines Feststoffes im Verhältnis zum umgebenden Fluid verstanden werden. Die gerichtete Gesamtgeschwindigkeit des belebten Schlammes ergibt sich danach aus der Lösung der Transportgleichung 3.6, die sowohl die vertikale Sinkgeschwindigkeit als auch die vektorielle Geschwindigkeit des umgebenden Fluids mit seinen turbulenten Einflüssen berücksichtigen muss. Standardisiert wird in der in FLUENT implementierten Transportgleichung jedoch nur die vektorielle Geschwindigkeit des Fluids als Massenfluss orthogonal zur Grenzfläche der Zelle berücksichtigt. Der zu dieser Grenzfläche orthogonale Anteil der vertikalen Sinkgeschwindigkeit muss daher zusätzlich in die Transportgleichung einfließen.

3.3.5 Rheologie

In der Literatur wurde bisher dem rheologischen Verhalten der Wasser-Schlamm-Suspension im Vergleich zu ihrem Absetzverhalten deutlich weniger Aufmerksamkeit gewidmet. Dabei zeigen zentrale Ergebnisse dieser Arbeit einerseits, dass bisherige Modellansätze das Fließverhalten von Schlämmen in Nachklärbecken nur unzulänglich beschreiben und andererseits, dass die explizite Messung und Bestimmung der Parameter eines eigenen rheologischen Modellansatzes von elementarer Relevanz für den Erhalt realitätsnaher Simulationsergebnisse (vgl. Kapitel 5.1.1.1) sind.

In den bekannten und vorliegenden numerischen Strömungsmodellen wird das Fließverhalten über unterschiedlichste Modellansätze beschrieben. Über den Verzicht auf eine Viskositätsänderung oder ihre Beschreibung als newtonsches Fluid mit erhöhter Viskosität bis hin zur Verwendung deutlich komplexerer Ansätze für nicht-newtonsche Fluide, wie zum Beispiel der Ansätze für ein Bingham-Medium oder eines Herschel-Bulkley-Fluids, findet eine große Bandbreite von Modellansätzen in den unterschiedlichen Strömungsmodellen Verwendung. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 ausführlich aufgezeigt wurde, verhält sich eine nachklärbeckentypische Wasser-Schlamm-Suspension eindeutig wie ein nicht-newtonsches Fluid. Daher soll im Folgenden lediglich auf zwei derartige Modellansätze, die beide nach Gleichung 2.6 beschrieben werden können und die in den Abbildungen 3.6 – 3.12 vergleichend dargestellt sind, eingegangen werden.

Casey (1992) verwendet für seinen Ansatz Daten von Frost (1983), die zur Berechnung des Druckverlustes in von Schlämmen durchflossenen Rohren erhoben wurden. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass bei $X_{TS} = 0$ g/l das Fließverhalten von reinem Wasser nicht abgebildet wird und somit seine Anwendbarkeit bei kleinen TS-Konzentrationen nicht gewährleistet ist.

Lakehal et al. (1999) verwenden in ihrem Modell einen Ansatz von Dahl (1993), wobei die Viskositätsfunktion η [Ns/m²] über Werte von Dick und Buck (1985) und die Fließgrenze

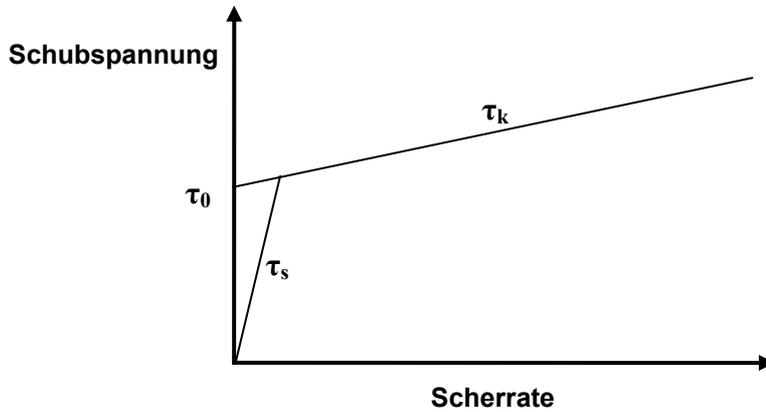
τ_0 [N/m²] nach einer Funktion von Dick und Ewing (1967) bestimmt werden. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass bei höheren TS-Konzentrationen die Viskosität deutlich überschätzt wird und eine viel zu hohe Fließgrenze zu Grunde gelegt wird. In der Folge wird im numerischen Modell der Schlamm im Schlammbett, wie eine Art festes Schneebrett vor einem Schneeschieber, vor dem Räumer hergeschoben. In der Realität ist ein solches Verhalten nicht oder nur eingeschränkt zu beobachten. Vielmehr wird der Räumer von einem Großteil des Schlammes umströmt.

Die unzureichende Beschreibung des rheologischen Verhaltens von belebtem Schlamm in Nachklärbecken mit den bisherigen Modellansätzen insbesondere bei niedrigen und bei höheren TS-Gehalten führte unweigerlich zu der Notwendigkeit, einen eigenen Modellansatz zu entwickeln und in das numerische Strömungsmodell zu implementieren. Da zum einen Messdaten aus der Literatur häufig mit unbekanntem Größen behaftet sind und zum anderen möglichst ein Schlamm aus einem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Nachklärbeckens die Grundlage für die Modellierung der Fließeigenschaften bilden sollte, wurde vom Autor eine umfangreiche Messkampagne am Labor für Abwassertechnik der FH Gelsenkirchen durchgeführt. Untersucht wurden Schlämme aus dem Nachklärbecken Rheda-Wiedenbrück und eines anderen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigten Nachklärbeckens. Dieser zweite Schlamm diente dabei lediglich zur Absicherung der Messergebnisse des ersten Schlammes.

Die Messung der Fließkurven erfolgte mittels eines Rotationsviskosimeters vom Typ RheoStress RS150 der Firma Haake mit einem feststehenden, profilierten Außen- und einem rotierenden, profilierten Innenzylinder. Für ein optimales Messergebnis sind theoretisch zwei sich widersprechende Voraussetzungen zu erfüllen. Einerseits muss der Spalt deutlich größer als die größten Feststoffpartikel sein und andererseits sollte er so klein sein, dass kein Absetzen der Schlammflocken während der Messphase und auch kein Schlupf erfolgt. Die gewählte Spaltweite von 2,69 mm sollte der ersten Anforderung entsprechen. Ein mögliches Absinken der Schlammflocken konnte allerdings mit der gewählten Messapparatur nicht ganz ausgeschlossen werden, so dass die gewonnenen Messdaten die realen Schubspannungen tendenziell eher überschätzen. Insbesondere ist dieses im unteren TS-Konzentrationsbereich bis ca. 5 g/l der Fall, da hier die Partikel noch verhältnismäßig schnell absinken.

Das Messprogramm basierte auf der Entwicklung einer speziellen Messmethode zur Klärschlammrheologie von Lohmann (1981), wobei der Schlamm über einen Zeitraum von 780 s mit Scherraten zwischen 0 1/s und 10 1/s beansprucht wurde. Zeitgleich wurden im Labor für Abwassertechnik der FH Gelsenkirchen die TS-Konzentrationen der unterschiedlichen Proben ermittelt. Insgesamt wurden für den Schlamm des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück für sieben Doppelproben in einem TS-Bereich von 0,1 g/l bis 12,6 g/l die rheologischen Eigenschaften mit dem skizzierten Messprogramm ermittelt.

Die Messergebnisse zeigen für den in Nachklärbecken typischen TS-Konzentrations- und Scherratenbereich eindeutig ein bi-lineares Fließverhalten (Abbildung 3.6 – 3.12), was durch folgenden bi-linearen Viskositätsansatz treffend beschrieben werden kann:



$$\tau_s = \eta_s \cdot \tilde{S} \quad (3.17)$$

$$\tau_k = \tau_0 + \eta_k \cdot \tilde{S} \quad (3.18)$$

mit

$$\eta_s = \beta_1 \cdot X_{TS}^2 + \mu_w \quad (3.19)$$

$$\eta_k = \beta_2 \cdot X_{TS}^2 + \mu_w \quad (3.20)$$

$$\tau_0 = \beta_3 \cdot X_{TS}^3 + \beta_4 \cdot X_{TS} \quad (3.21)$$

und es gilt für die resultierende Schubspannung τ_{xy}

$$\tau_{xy} = \text{MIN}(\tau_s, \tau_k). \quad (3.22)$$

Die Viskositätsfunktion η ergibt sich letztendlich aus:

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\tilde{S}}. \quad (3.23)$$

Dabei sind:

- τ_{xy} - resultierende Schubspannung [N/m²],
- τ_s - Strukturschubspannung [N/m²],

- τ_k - Konsistenzschubspannung [N/m^2],
 τ_0 - Fließgrenze [N/m^2], die durch die Strukturschubspannung aufgelöst wird,
 η - resultierende Viskositätsfunktion [Ns/m^2],
 η_s - Viskositätsfunktion in der Strukturphase [Ns/m^2],
 η_k - Viskositätsfunktion in der Konsistenzphase [Ns/m^2],
 \tilde{S} - Scherrate [$1/\text{s}$],
 μ_w - Viskosität von reinem Wasser [Ns/m^2],
 X_{TS} - lokale TS-Konzentration [g/l],
 β_i - aus den Messungen abgeleitete Parameter.

Die folgenden Abbildungen 3.6 – 3.12 zeigen zum einen die Ergebnisse der rheologischen Messungen und zum anderen im Vergleich dazu die verschiedenen schon erläuterten Modellansätze. Deutlich zu sehen ist dabei die gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit dem bi-linearen Viskositätsansatz sowie die erwähnten Unzulänglichkeiten der Ansätze von Casey (1992) und Lakehal et al. (1999), die einerseits im Bereich niedriger sowie hoher TS-Konzentrationen weit von den gemessenen Werten abweichen und andererseits die Fließgrenze nicht näher auflösen und vereinfachend von einem idealen Bingham-Verhalten ausgehen. Aufgrund der tendenziellen Überschätzung der Schubspannung durch das verstärkte Absinken der Feststoffpartikel im TS-Konzentrationsbereich bis ca. 5 g/l liegen die Schubspannungen des bi-linearen Viskositätsansatzes in diesem Bereich bewusst unterhalb der gemessenen Werte. Einen Eindruck von den aus diesem Ansatz resultierenden Viskositätswerten in Nachklärbecken erhält der Leser in einer Parameterstudie in Kapitel 5.1.1.1.

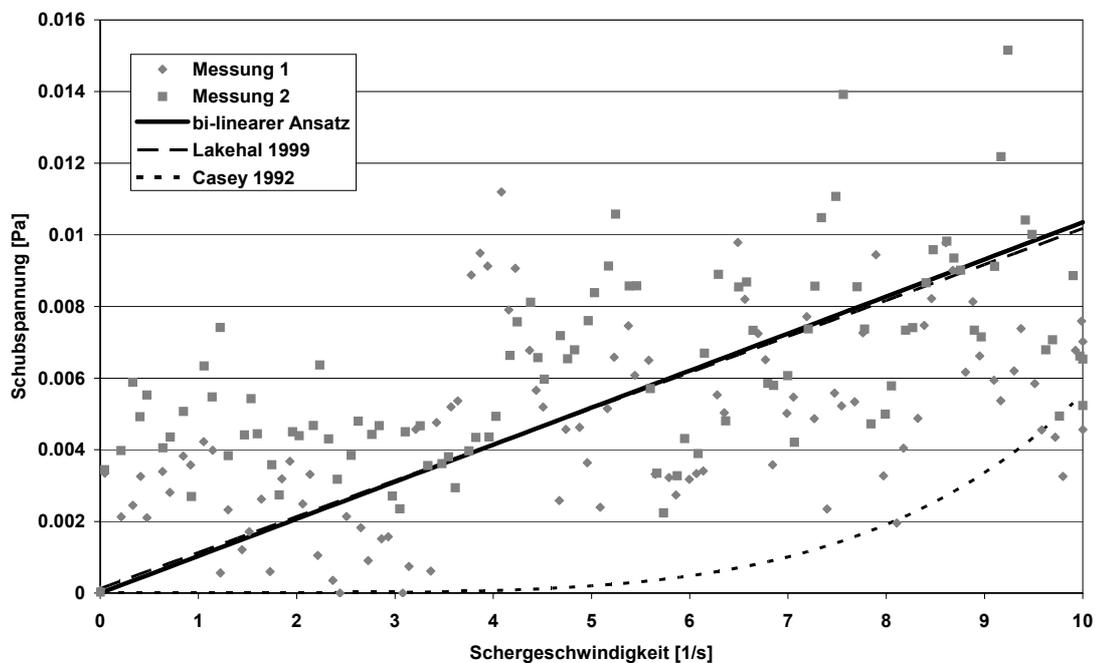


Abbildung 3.7: Schubschpannungen bei einer TS-Konzentration von 0,1 g/l

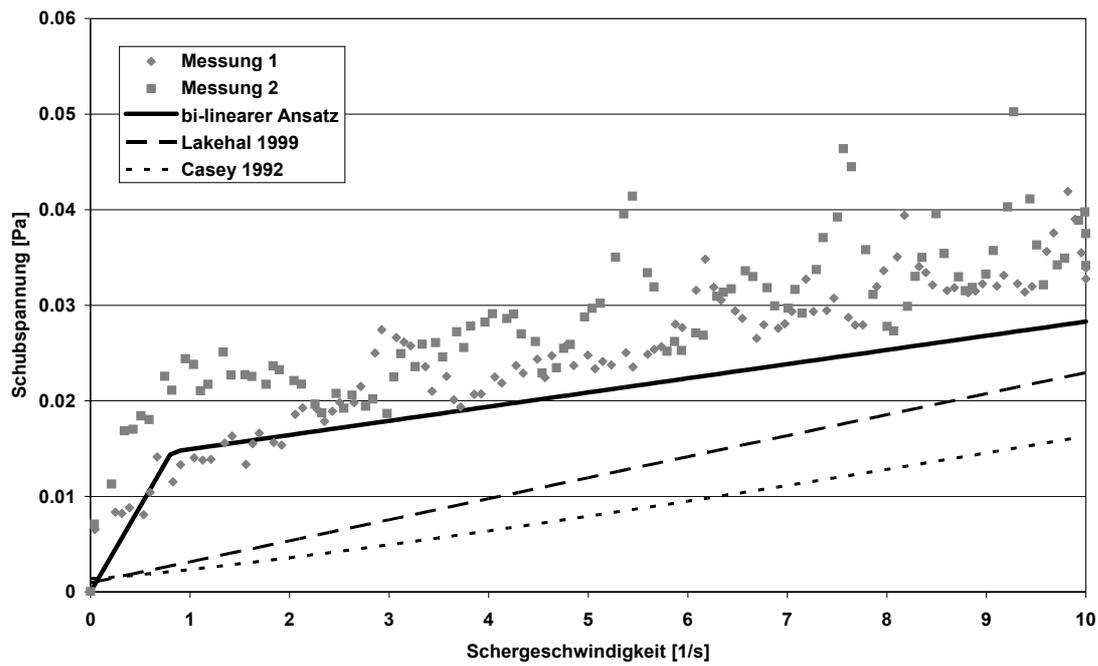


Abbildung 3.8: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 2,2 g/l

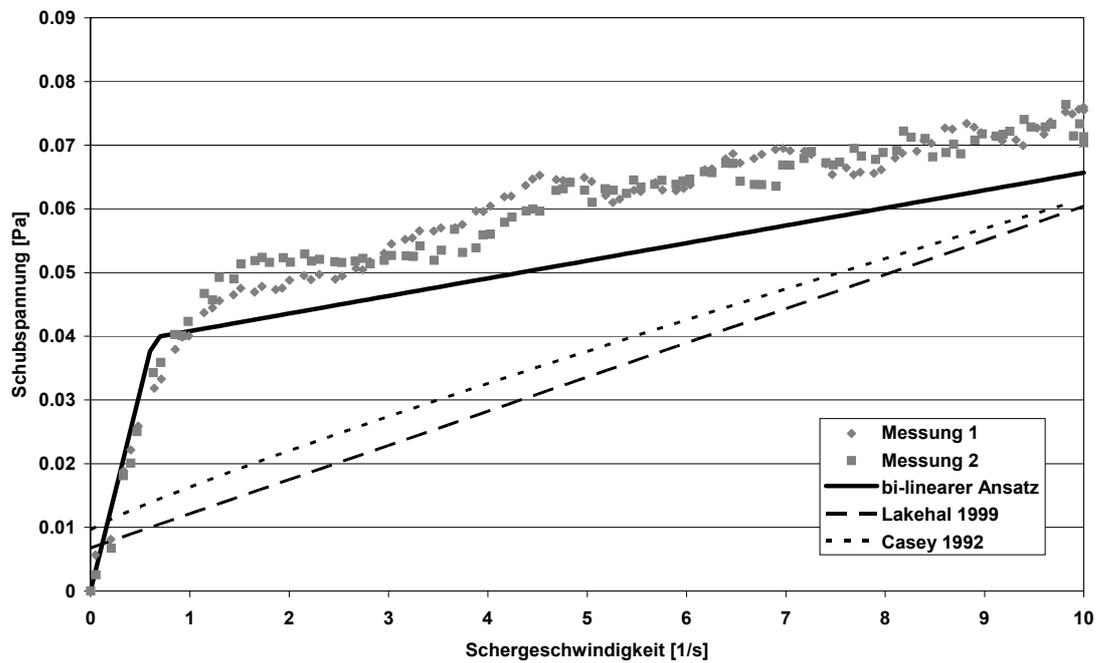


Abbildung 3.9: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 4,2 g/l

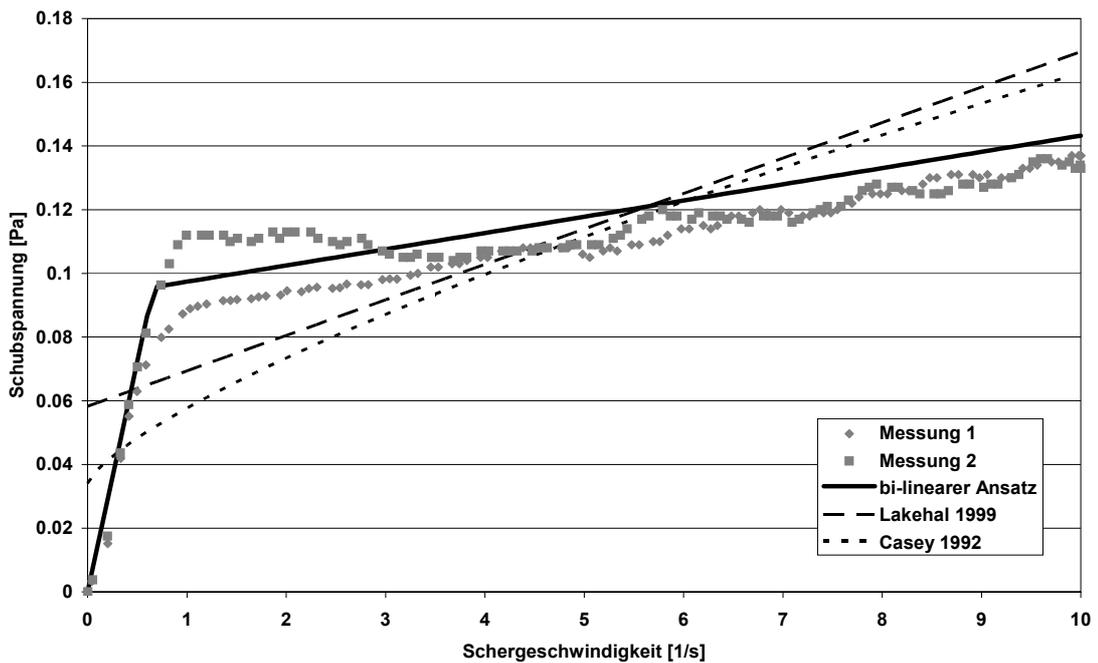


Abbildung 3.10: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 6,4 g/l

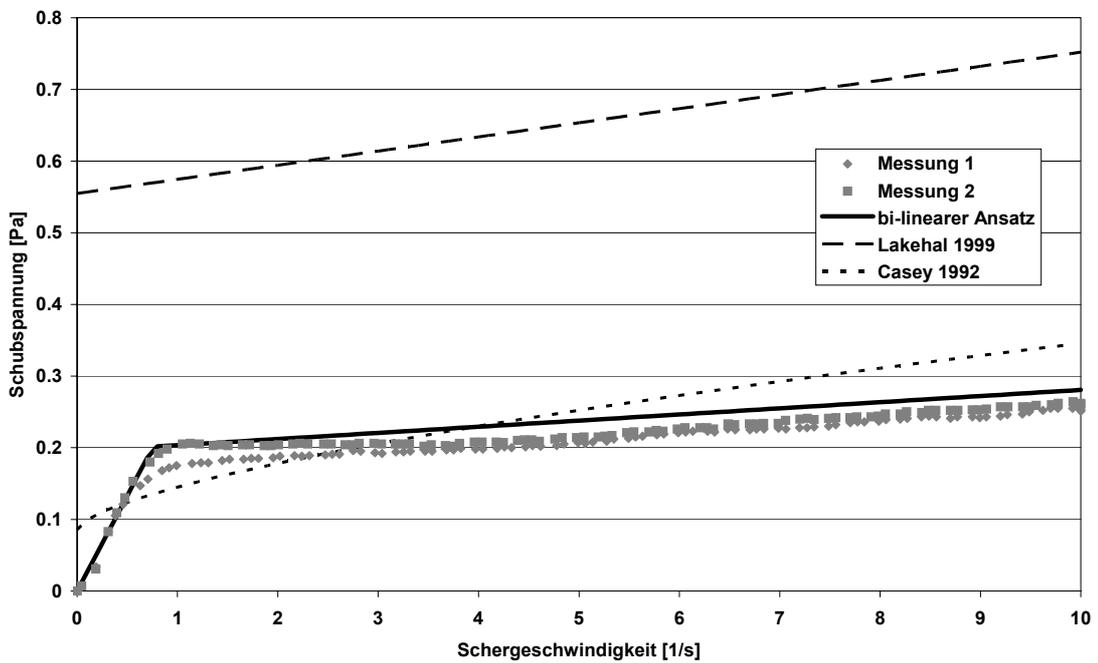


Abbildung 3.11: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 8,7 g/l

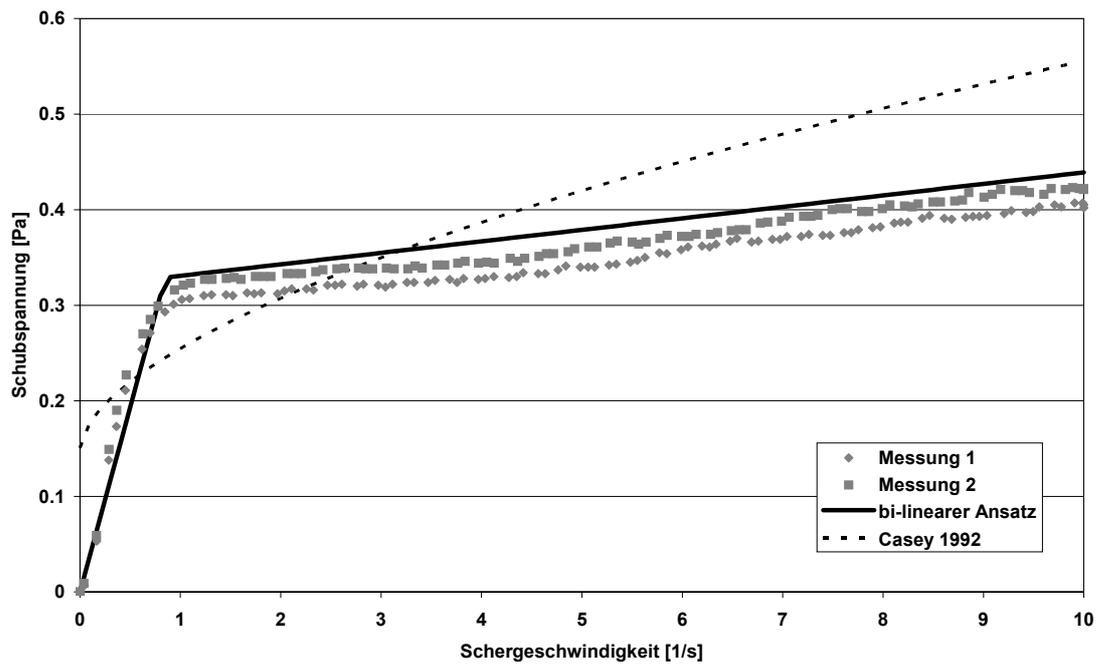


Abbildung 3.12: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 10,5 g/l

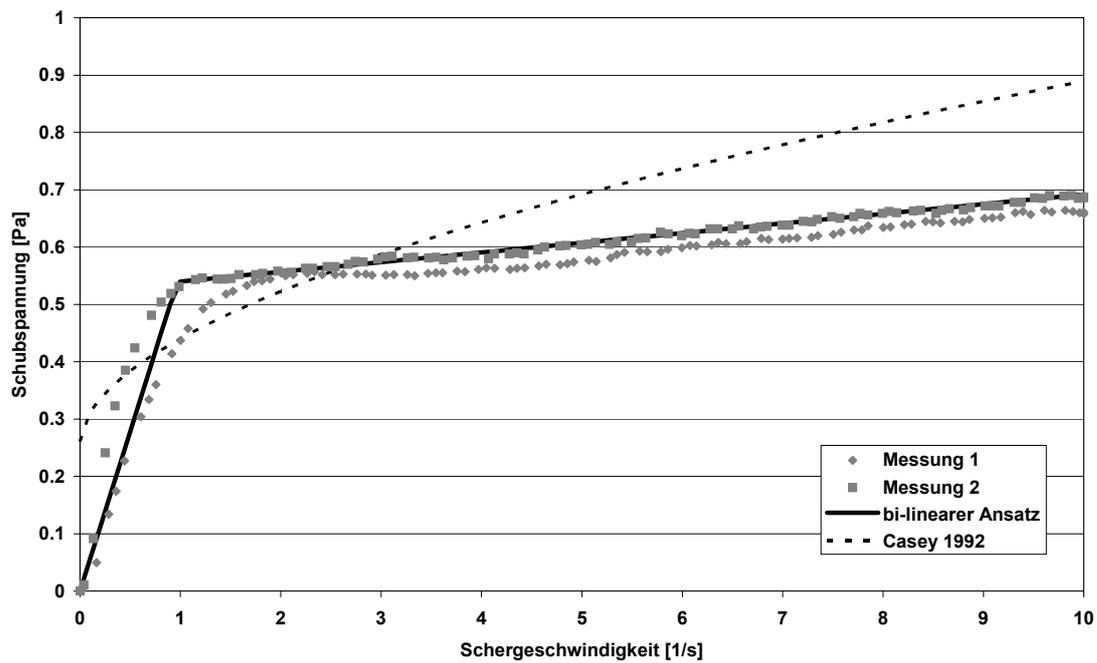


Abbildung 3.13: Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 12,6 g/l

Um die Unterschiede der verschiedenen Ansätze noch einmal zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 3.13 die resultierende Viskosität bei einer TS-Konzentration von 8,7 g/l. Die beiden aus der Literatur entnommenen Ansätze, die von einer starren Fließgrenze ausgehen, führen bei gegen Null gehenden Scherraten zu unendlichen Viskositäten. Der bi-lineare Ansatz, der die Fließgrenze mit Hilfe einer Strukturschubspannung feiner auflöst, führt im Gegensatz dazu zu einer erhöhten aber begrenzten Viskosität, wie sie auch in den Messungen ermittelt werden konnte.

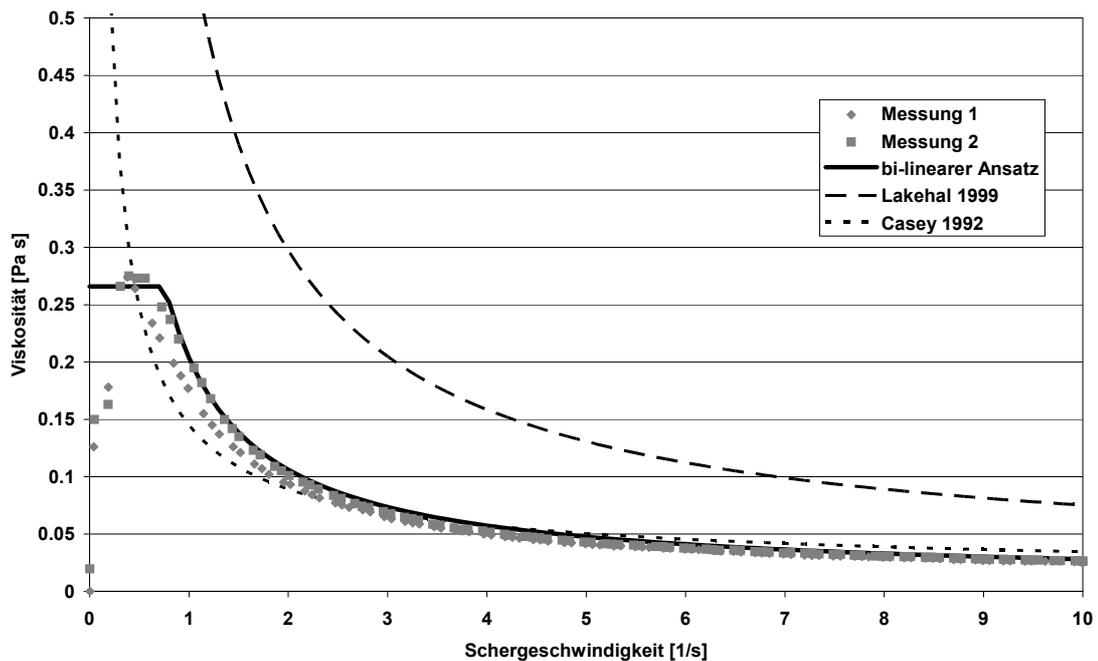


Abbildung 3.14: Viskosität bei einer TS-Konzentration von 8,7 g/l

3.3.6 Räumung

In horizontal durchflossenen Nachklärbecken kommen vornehmlich Schild-, Band- oder Saugräumer zum Einsatz, die den sedimentierten Schlamm entweder zu einem Abzugspunkt befördern oder den Abzug durch Saugdüsen selbst vornehmen. Jedes dieser drei Räumsysteme kann im numerischen Modell mit Hilfe eines weiteren Terms in den Erhaltungsgleichungen berücksichtigt werden. Schild- und Bandräumer sind dabei als bewegliche und zeitlich variable Quelle in der Impulsgleichung vorgesehen. Die Impulsquelle bewegt sich analog zur Räumergeschwindigkeit durch das Modellgebiet und induziert dabei an der aktuellen Räumersposition die gerichtete Räumergeschwindigkeit. Saugräumer wirken dagegen – sofern sie nicht mit Schildräumern gekoppelt sind – als Massensenke.

In einem zweidimensionalen, achsensymmetrischen Modell kann der Räumers nur vereinfacht dargestellt werden. Die Impulsquelle bewegt sich zyklisch, in Anlehnung an die reale Räumergeschwindigkeit, durch den modellierten Beckenschnitt. Neben der

Schlammförderung in Richtung des Trichters induziert ein Schildräumer in runden Nachklärbecken zusätzlich eine Rotationsströmung, die genauso wie die radiale Richtung in der Impulsgleichung berücksichtigt werden könnte. Angesichts des geringen Einflusses des Räumer auf eine Rotationsströmung, insbesondere bei für die Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken entscheidenden höheren Durchflüssen, wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine Einbeziehung des tangentialen Räumerimpulses verzichtet.

Alle hier modellierten Nachklärbecken sind mit Schildräumern versehen, die den Schlamm in einen Trichter befördern, von dem aus er abgezogen wird. In allen Simulationen wird der Räumer als bewegliche Impulsquelle berücksichtigt.

3.4 Geometrie und Diskretisierung

Grundlage einer jeden Simulation ist die möglichst genaue Übernahme der Beckengeometrie in das Modell bzw. die möglichst exakte Überführung der Beckengeometrie in die modelltechnische Vereinfachung. Diese Genauigkeit bezüglich der geometrischen Abbildung stellt eine entscheidende Basis für die Güte der späteren Modellergebnisse dar. Abbildung 3.14 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt aus einem horizontal durchströmten, runden Nachklärbecken. Schwarz umrandet ist der Beckenschnitt mit allen geometrischen Details, der die Grundlage für die zweidimensionale, achsensymmetrische Simulation bildet.

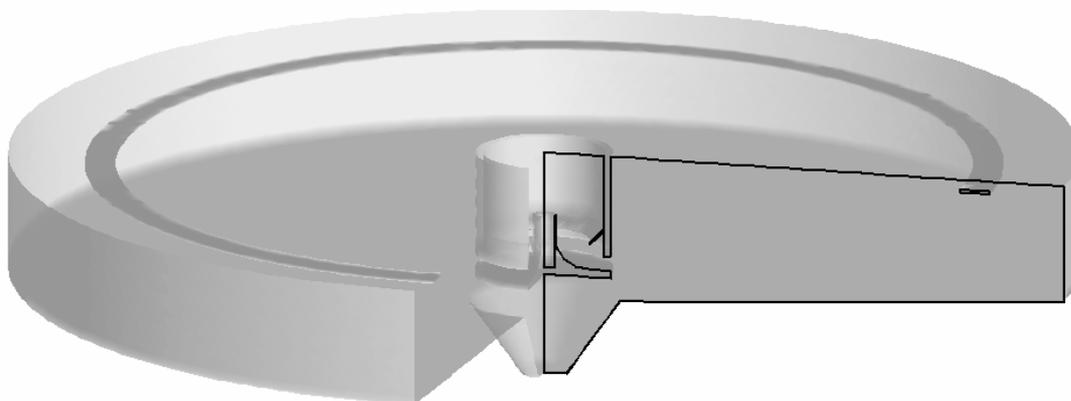
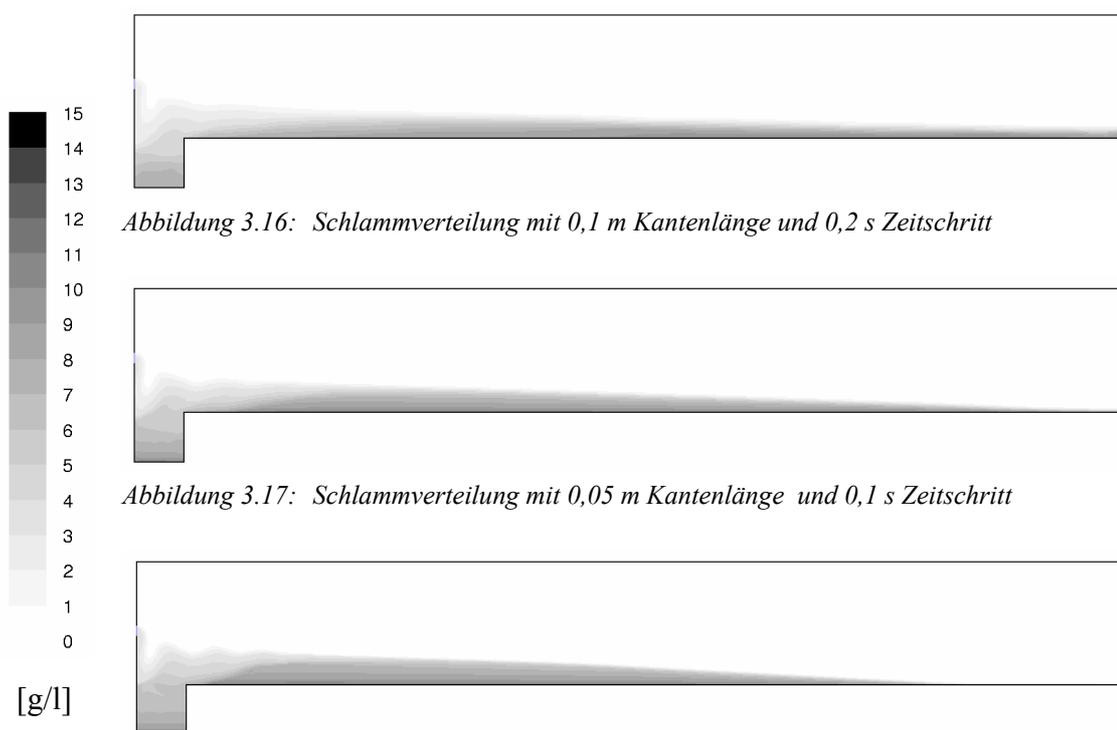


Abbildung 3.15: Nachklärbecken im Computermodell

Eine weitere entscheidende Grundlage für eine hohe Modellgüte stellt die räumliche und zeitliche Diskretisierung dar. Im Allgemeinen kann folgende Aussage getroffen werden: Je feiner Raum und Zeit aufgelöst werden, umso geringer ist der numerische Fehler und umso genauer ist das Ergebnis. Die Kehrseite dessen ist jedoch, dass mit wachsender Elementzahl und kleinerem Zeitschritt die Rechenzeit förmlich explodiert. Die Aufgabe des Modellentwicklers ist es demnach, einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand zu finden. Die räumliche Diskretisierung kann dabei nicht

losgelöst von der zeitlichen Diskretisierung betrachtet werden, da Genauigkeit in der einen, Ungenauigkeit in der anderen Diskretisierung nicht ausgleichen kann. Die Elementgröße im Berechnungsnetz ist für ein effizientes Modell daher direkt an den Zeitschritt gekoppelt. In umfangreichen Versuchsrechnungen an einem Absetzzyylinder konnte als geeignete Kopplungsgröße eine Kantenlänge von 0,05 m mit einem Zeitschritt von 0,1 s ermittelt werden. In den Abbildungen 3.15 bis 3.17 ist auf Basis dieser Kopplungsgröße eine Abschätzung der numerischen Diffusion aufgrund der Feinheit der Diskretisierung nach oben sowie nach unten dargestellt. Die Abbildungen zeigen bei völlig identischen Randbedingungen die Schlammverteilung in einem virtuellen Versuchskanal mit 2,5 m Tiefe und 20 m Länge.



Wie den Abbildungen deutlich zu entnehmen ist, bildet sich die schärfste Trennschicht zwischen Schlammbett und Klarwasser bei der feinsten Diskretisierung aus. Etwas weniger scharf fällt sie bei der mittleren und sichtbar verwaschen bei der größten Diskretisierung aus. Aufgrund der steigenden numerischen Diffusion wird bei der größten Diskretisierung der Schlamm bis an das Ende des Kanals transportiert. In einer Nachklärbeckensimulation würde eine solche Diskretisierung zwangsläufig zu einer mangelhaften Modellgüte führen.

Unter Einbeziehung der Elementanzahl von 5100, 20400 und 81600 Zellen für die unterschiedlich feinen Vernetzungen ergibt sich bei den unterschiedlichen Zeitschritten im Vergleich zu der größten Diskretisierung eine 8 mal längere Rechenzeit für die mittlere und eine 64 mal längere Rechenzeit für die feinste Diskretisierung. Als

Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand wurde den Modellen in dieser Arbeit somit eine Kantenlänge von 0,05 m bei einem Zeitschritt von 0,1 s zugrunde gelegt. Als Beispiel für eine derartige Vernetzung zeigt Abbildung 3.18 das Berechnungsnetz des Nachklärbeckens, dessen Geometrie bereits in Abbildung 3.14 zu sehen war.

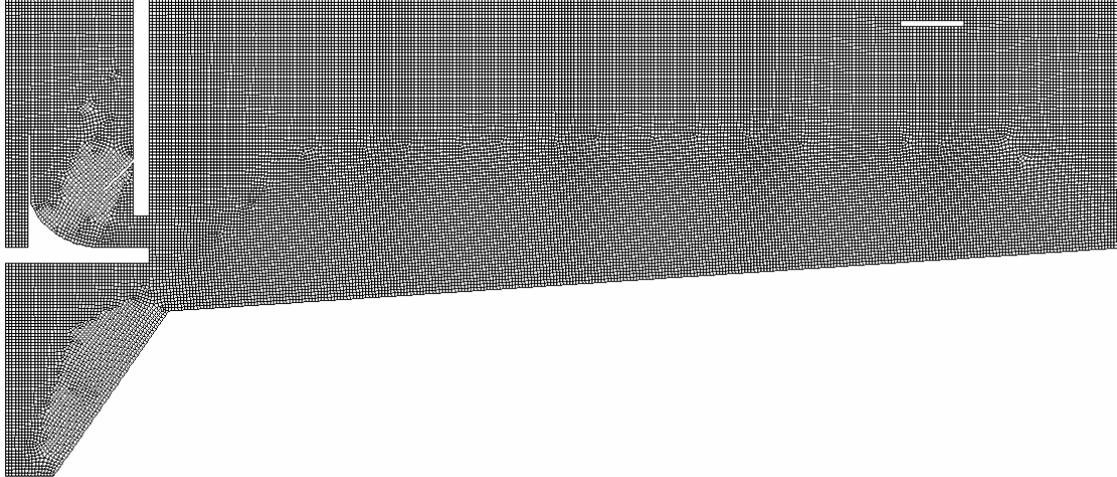


Abbildung 3.19: Berechnungsnetz eines Nachklärbeckens mit 0,05 m Kantenlänge

3.5 Modellsteuerung

Die Modellsteuerung über die Definition so genannter Anfangs- und Randbedingungen stellt neben dem mathematischen und dem geometrischen Modell den letzten zentralen Baustein des gesamten Nachklärbeckenmodells dar. In einem ersten Schritt werden dabei zunächst die räumlichen Begrenzungen des geometrischen Modells unterschieden in Wände, Oberfläche, Einlauf, Klarwasserablauf und Schlammabzug.

Die betonierten Wände des Nachklärbeckens werden als massenundurchlässige Ränder definiert, so dass die Normalengeschwindigkeit zu Null wird. Da die an diesen Rändern auftretenden Schubspannungen die tangentialen Geschwindigkeiten reduzieren, treten turbulenzinduzierende Geschwindigkeitsgradienten auf.

An der in der vereinfachten Modellvorstellung festen Oberfläche treten in natura bei Vernachlässigung von Windeinflüssen diese Phänomene nicht auf, so dass im Modell hier die Normalengeschwindigkeit und die Schubspannungen zu Null gesetzt werden und die Wasseroberfläche somit als Symmetrierand behandelt wird. Als Referenzdruck wird an der Beckenoberfläche der atmosphärische Luftdruck zu 101325 Pascal gesetzt.

Eine vergleichbare Randbedingung wird an der Rotationsachse in Beckenmitte gesetzt, die ja im eigentlichen Sinne keine Außengrenze des Modells darstellt, an der aber dennoch die Normalengeschwindigkeit gleich Null ist, jedoch ohne dass Wandschubspannungen auftreten.

Auf dem Einlauftrand wird die Normalengeschwindigkeit in m/s, die sich aus dem Beckenzufluss bezogen auf die Einlauffläche ergibt, als Dirichlet-Randbedingung

definiert. Zum anderen wird die Feststoffkonzentration des zufließenden Wasser-Schlamm-Gemisches in g/l, das der TS-Konzentration im Belebungsbecken entspricht, vorgegeben. Der Zufluss zum Nachklärbecken berechnet sich für ein einzelnes Becken nach Gleichung 3.25

$$Q_{NKB} = (1 + RV) \cdot Q_{BB} \quad (3.24)$$

mit

Q_{NKB} - Zufluss zum Nachklärbecken [m^3/s]

Q_{BB} - Zufluss zur Belebung [m^3/s]

RV - Rücklaufschlammverhältnis [-]

Am Klarwasserablauf wird die Menge Wasser, die nicht in das Belebungsbecken zurückgeführt wird, dies entspricht Q_{BB} , ebenfalls über eine Vorgabe der Normalengeschwindigkeit als Dirichlet-Randbedingung bestimmt.

Am Schlammabzug wird eine Neumann-Randbedingung definiert, so dass sich der Abfluss dort nur aufgrund der Massenbilanz einstellt und der Rücklaufschlammmenge entsprechen muss.

Generell ergeben sich zwei unterschiedliche Verfahren für die instationäre Simulation von Nachklärbecken. Zum einen kann für den zu untersuchenden Lastfall mit einem maximalen bzw. einem gemittelten Ganglinienwert als konstantem Zufluss gerechnet werden. Hier reicht in den meisten Fällen eine simulierte Echtzeit von 8 h aus, um einen stationären Endzustand zu erreichen. Zum anderen kann eine Simulation mit einer vollständig dynamischen Ganglinie als Randbedingung gerechnet werden. Dabei können sämtliche Steuerungsgrößen, wie z. B. Zufluss zur Belebungsbecken, Rücklaufschlammverhältnis oder auch TS-Gehalt in der Belebungsbecken, je nach Bedarf als Eingangsgrößen in das Modell eingelesen und die entsprechenden Randbedingungen berechnet werden. Hierbei muss zunächst über ca. 8 h Echtzeit ein Startzustand für die dynamische Simulation berechnet werden, ehe die eigentliche Ganglinie eingesteuert werden kann. Diese kann einen beliebigen Zeitraum umfassen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in der Studie Rheda-Wiedenbrück ein reales Regenereignis über 48 h simuliert. Für praktische Anwendungen sind jedoch auch deutlich kürzere Zeiträume denkbar.

Der Vorteil der dynamischen Simulation liegt darin, das stark dynamische hydraulische Prozessverhalten von Nachklärbecken zu erfassen und über die Zeit Größen wie Schlammбетhöhe und Ablaufwerte aufzuzeichnen. Für geometrische Optimierungen allerdings reicht die Simulation mit einem konstanten Bemessungszufluss häufig aus, da es sich bei diesem Bemessungszufluss bereits um den höchsten denkbaren Zufluss handelt und eine dynamische Simulation zwar weitergehende Ergebnisse, aber für die geometrische Optimierung kaum nutzbare weitere Erkenntnisse produziert.

Welche Art von Simulation gewählt wird, ist für die zugrunde liegenden Anfangsbedingungen ohne Bedeutung. In beiden Fällen muss mit einem nur mit

Klarwasser gefüllten, geschwindigkeitslosen Becken die Berechnung gestartet werden. Alle Ergebnisse müssen sich stets aus den gewählten Randbedingungen ergeben.

4 Modellkalibrierung und Optimierungspotenziale

Aufbauend auf dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten numerischen Modell, werden in diesem Kapitel Simulationsergebnisse am Beispiel der Nachklärbecken der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück dargelegt und zum Nachweis der Modellgüte detailliert mit den vorhandenen Messdaten von Janzen und Rosenwinkel (2005) verglichen. Darüber hinaus werden anhand der beiden real existierenden Einlaufsituationen und an einer modelltechnischen Optimierung der Einlaufkonstruktion Optimierungspotenziale von Nachklärbecken aufgezeigt. Neben Berechnungen mit konstantem Zufluss wurden zu diesem Zweck auch Simulationen mit einer realen, über die Zeit veränderlichen Ganglinie durchgeführt, um die Auswirkungen von hydraulischen Belastungsschwankungen zu berücksichtigen.

Wie schon in der Einleitung geschildert, erfolgte die Modellkalibrierung anhand der Nachklärbecken dieser Kläranlage, wenngleich hier nur der abschließende Vergleich zwischen den Messdaten und den Ergebnissen der letzten Modellrechnungen dargestellt wird und somit der Kalibrierungsprozess selbst kaum ersichtlich ist. Vielmehr verbirgt sich dieser hinter den Ergebnissen des vorherigen Kapitels und bestand über eine Vielzahl von Rechnungen in der Veränderung und Anpassung der Ansätze zur Beschreibung der Rotationsströmung, der Sinkgeschwindigkeit und der Rheologie.

Im Rahmen zweier Forschungsvorhaben wurde vom Projektpartner, dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover (ISAH), ein umfangreiches Untersuchungsprogramm umgesetzt (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Durchgeführte Untersuchungen auf der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück (Janzen und Rosenwinkel 2005)

Untersuchung	Beschreibung
Strömungsgeschwindigkeiten in den Nachklärbecken	Messungen mit Ultraschall-Doppler-Sonden der Fa. Nortek AS nach einem definierten Messraster im Rahmen der Messphasen
Absetzversuche mit Rücklaufschlamm	Untersuchungen entsprechend des IWA Task Reports No. 6 im Rahmen der Messphasen
Feststoffprofile in den Nachklärbecken	Feststoffmessungen mit Sonden der Fa. Dr. Lange nach einem definierten Messraster im Rahmen der Messphasen
Schlammspiegelmessungen in den Nachklärbecken	Onlinemessungen im Zeitraum Februar 2002 bis Januar 2004 mit Sonden der Fa. Dr. Lange
Feststoffmessungen im Ablauf der Nachklärbecken	Onlinemessungen im Zeitraum Oktober 2003 bis Januar 2004 mit Sonden der Fa. Dr. Lange
Durchflussmessungen im Zulauf zur Nachklärung	Onlinemessungen im Zeitraum Oktober 2002 bis Januar 2004 mit Ultraschall-Sonden der Fa. Endress & Hauser

Neben diesen Untersuchungen wurden weitere Parameter im Labor des ISAH anhand von Stichproben bestimmt. Dazu zählt neben der Bestimmung der TS-Konzentration im Zulauf zur Nachklärung und in der Rücklaufschlammleitung auch die Ermittlung der abfiltrierbaren Stoffe im Ablauf der Nachklärung. Als weitere Datenquelle standen die Aufzeichnungen des Prozessleitsystems sowie die Betriebstagebücher der Kläranlage zur Verfügung.

4.1 Die Nachklärbecken der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück

Die Kläranlage Rheda-Wiedenbrück wurde 1998 auf einen Bemessungswert von 94.000 EW erweitert. Als biologisches Abwasserreinigungsverfahren wurde in der Planung eine alternierende Kaskadendenitrifikation mit sechs Becken und vorgeschalteter Bio-P gewählt, in die das Abwasser nach der mechanisch-physikalischen Reinigungsstufe, bestehend aus Rechen, Sandfang und Vorklärbecken, gelangt. In der Praxis wird die Belebung jedoch nicht alternierend, sondern als dreistufige Kaskade mit jeweils einem Becken für Nitrifikation und Denitrifikation betrieben.

Nach Verlassen der Belebungsbecken wird das Wasser den horizontal durchströmten, runden Nachklärbecken zugeführt. Dabei wird etwa ein Drittel des Durchflusses in die beiden älteren Nachklärbecken, die nicht Bestandteil der Untersuchungen waren, geleitet. Die verbleibenden zwei Drittel des Durchflusses werden zu gleichen Teilen den beiden neuen Nachklärbecken zugeführt, wobei diese sich lediglich in der Konstruktion des Einlaufbauwerkes voneinander unterscheiden. Beide untersuchten Nachklärbecken verfügen bei einem Durchmesser von $D = 35,20$ m jeweils über ein Volumen von $V = 3.844$ m³. Der Ablauf erfolgt über radial angeordnete, getauchte Ablaufrohre und beide Becken sind mit identischen Schildräumen ausgestattet. Die Abbildung 4.1 zeigt das Nachklärbecken mit hohem Einlauf. Die Oberkante des 1,50 m hohen Einlaufschlitzes liegt 3,50 m über der Betonsohle, und im Einlaufschlitz selbst sind Lamellen angeordnet.

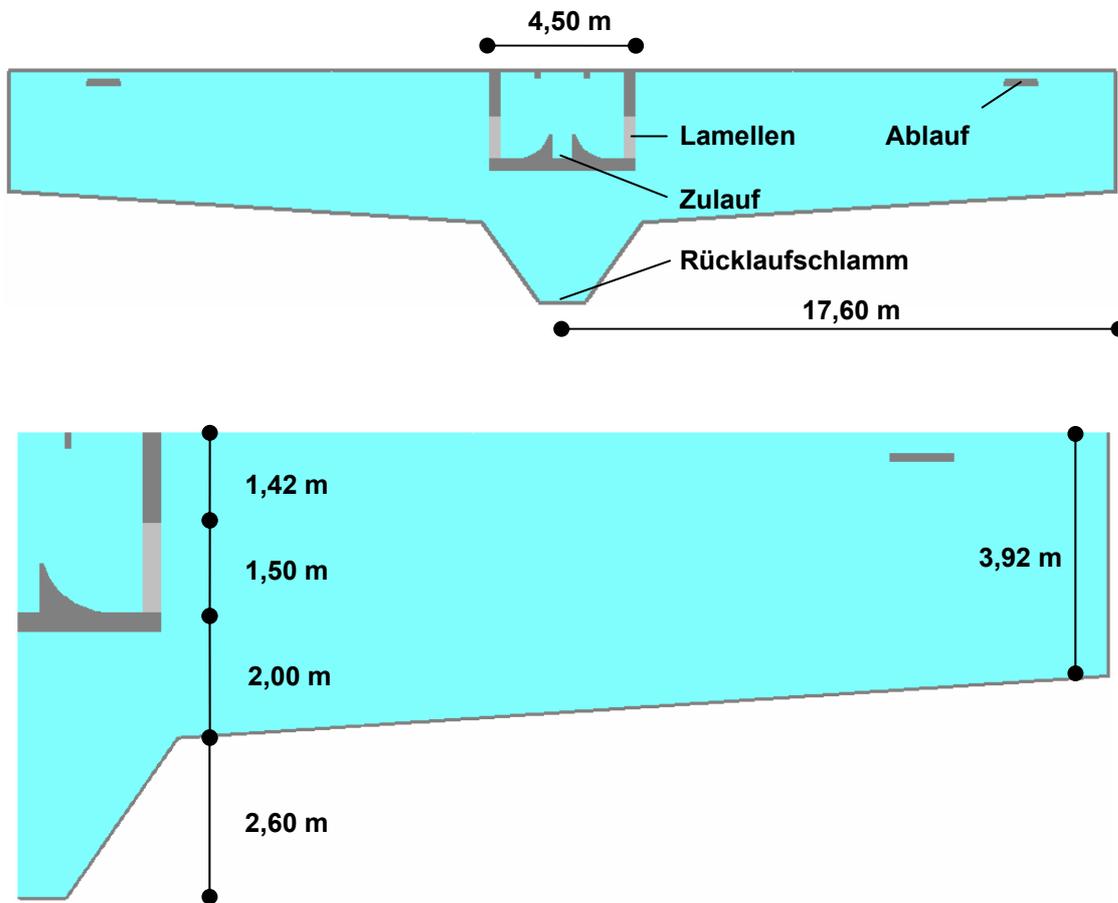


Abbildung 4.1: Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit hohem Einlauf

Abbildung 4.2 zeigt im Gegensatz dazu das Nachklärbecken mit tiefem Einlauf. Die Oberkante des hier nur 0,50 m hohen Einlaufschlitzes liegt in dieser Variante nur 1,50 m über der Betonsohle. Auf eine Anordnung von Lamellen wurde verzichtet.

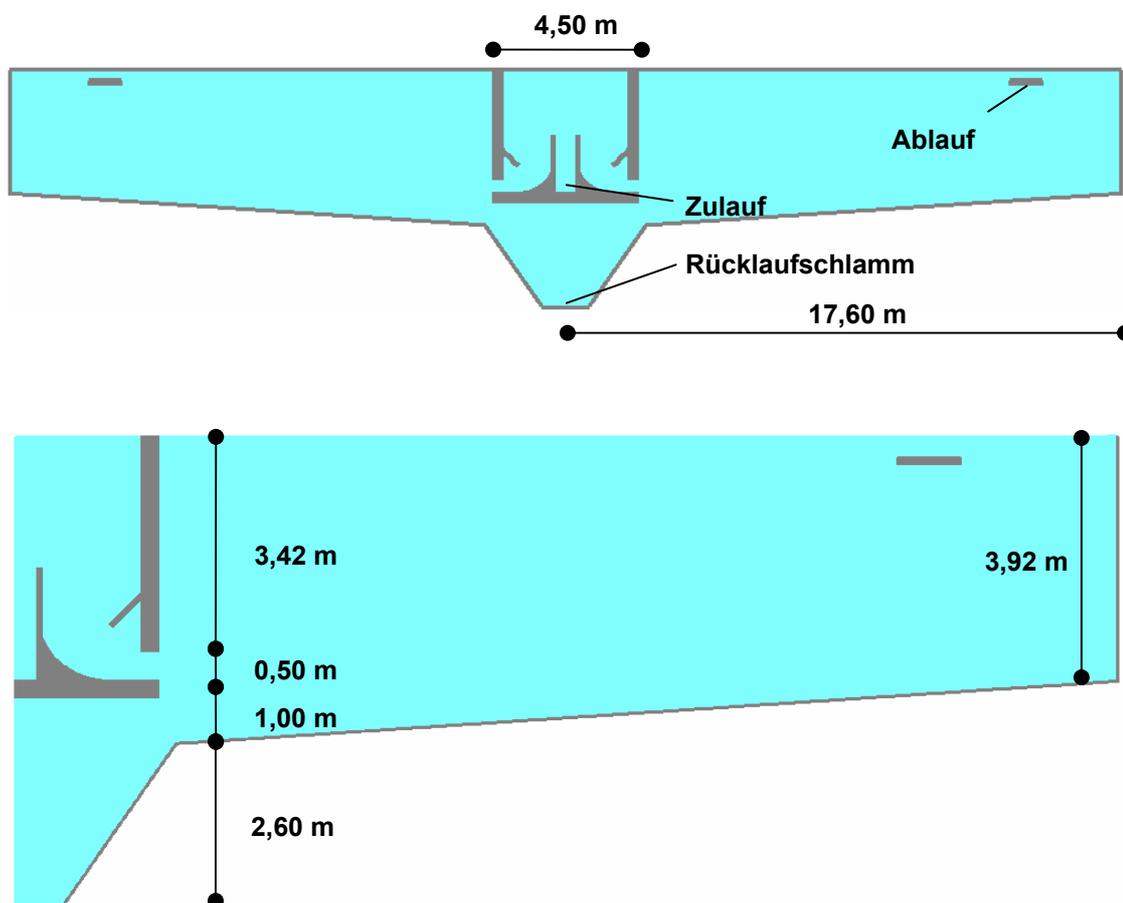


Abbildung 4.2: Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit tiefem Einlauf

Für die Bemessung der Nachklärbecken wurde ein Regenwetterzufluss von $Q_m = 2.250 \text{ m}^3/\text{h}$ angesetzt, was einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 0,8 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht. Der in den Messphasen festgestellte tatsächliche maximale Zulauf zur Kläranlage betrug $Q = 1.710 \text{ m}^3/\text{h}$, woraus sich ein maximaler Zulauf zur Belebung von $Q_{BB} = 2.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt. Der durchschnittliche Zufluss zur Belebung bei Trockenwetter beträgt am Tage ca. $Q = 600 - 750 \text{ m}^3/\text{h}$ und in der Nacht ca. $Q = 200 - 350 \text{ m}^3/\text{h}$.

Aufgrund der Vollständigkeit und Qualität der Messergebnisse wurden aus der Vielzahl von gemessenen Lastfällen folgende, in Tabelle 4.2 zusammengefassten, Betriebszustände zur Modellkalibrierung herangezogen. Lastfall 1 vom 6.6.2002 entspricht mit einem gemittelten Tageszufluss (8:00 bis 16:00 Uhr) zur Belebung von $Q_{BB} = 1.276 \text{ m}^3/\text{h}$ einem mittleren Regenereignis. Die Lastfälle 2 und 3 entsprechen mit ihrem gemittelten Tageszufluss einem leicht überdurchschnittlichen Trockenwetterzufluss.

Tabelle 4.2: Lastfälle zur Modellkalibrierung

Betriebsdaten	Lastfall 1 6.6.2002	Lastfall 2 28.10.2002	Lastfall 3 25.11.2002
Q_{BB}	1.276 m ³ /h	760 m ³ /h	810 m ³ /h
q_A	0,49 m/h	0,29 m/h	0,31 m/h
TS_{BB}	4,6 g/l	4,2 g/l	3,2 g/l
Q_{NKB}	978 m ³ /h	582 m ³ /h	594 m ³ /h
Q_{RS}	574 m ³ /h	342 m ³ /h	364 m ³ /h
Q_{AN}	404 m ³ /h	240 m ³ /h	230 m ³ /h
ISV	85 – 115 ml/g		

4.1.1 Hoher Einlauf mit großer Schlitzhöhe und Lamellen

In den folgenden Abbildungen 4.3 – 4.7 werden zunächst die Ergebnisse der Simulation des mittleren Regenereignisses vom 6.6.2002 in Isoflächen- und Vektoransicht dargestellt, um dem Leser einen Eindruck von den Strömungsverhältnissen sowie der Schlammverteilung im Becken zu geben. Darauf folgen die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten von diesem Tag sowie ein Vergleich der Ergebnisse der Trockenwetterereignisse vom 28.10.2002 und vom 25.11.2002 mit den entsprechenden Messwerten.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach 8 h instationär simulierter Echtzeit mit konstantem Zufluss zu einem Zeitpunkt, an dem keine weiteren nennenswerten Änderungen in den Ergebnissen zu verzeichnen sind und sich somit ein quasi-stationärer Zustand eingestellt hat.

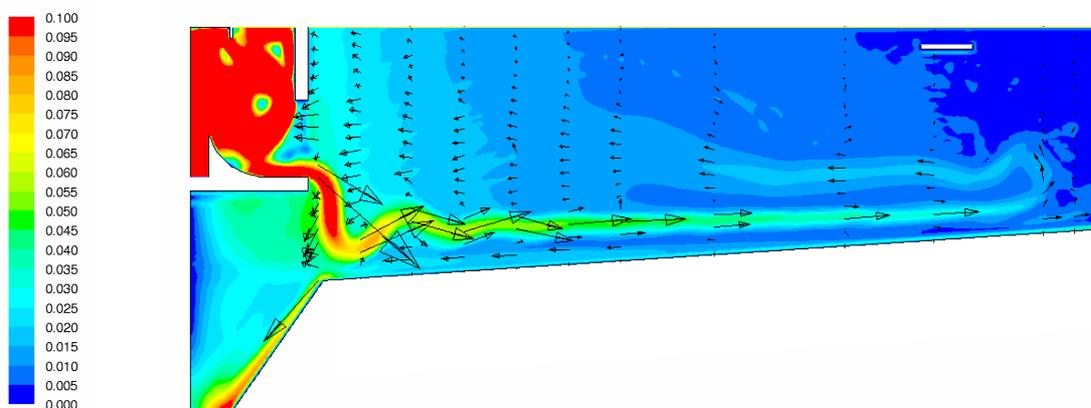


Abbildung 4.3: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - hoher Einlauf

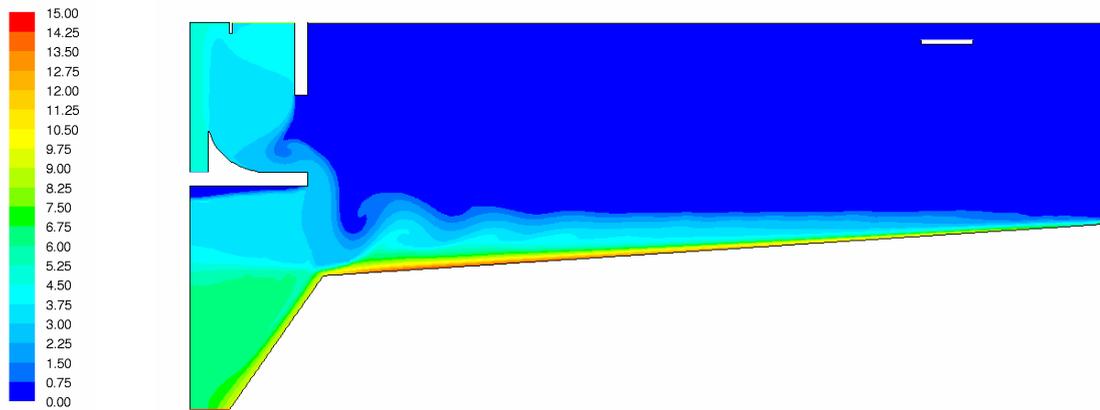


Abbildung 4.4: Schlammverteilung [g/l] - hoher Einlauf

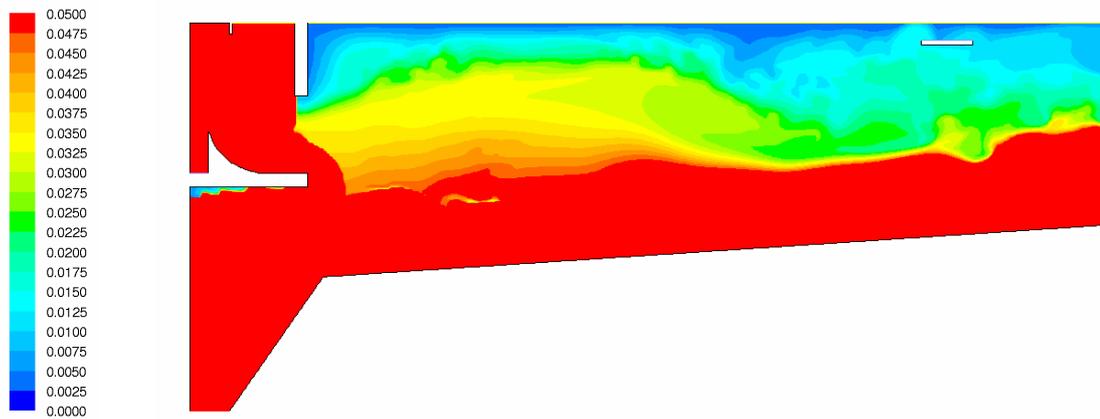


Abbildung 4.5: Schwebstoffverteilung [g/l] - hoher Einlauf

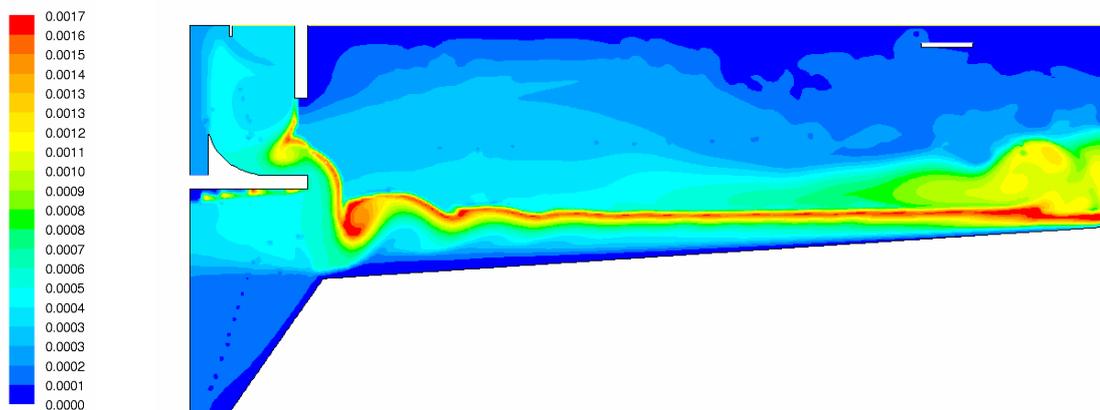


Abbildung 4.6: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] - hoher Einlauf

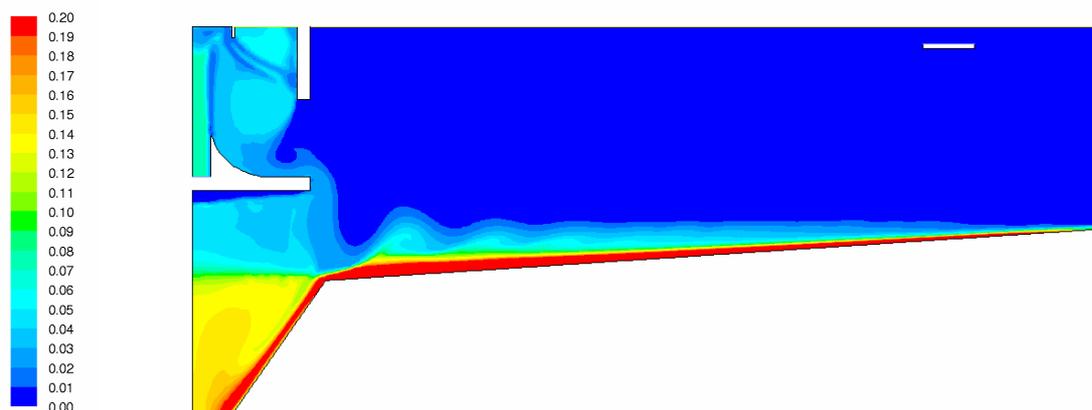


Abbildung 4.7: Verteilung der Viskosität $[Ns/m^2]$ - hoher Einlauf

Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Strömungsstrukturen in horizontal durchströmten, runden Nachklärbecken können in Abbildung 4.3 überaus anschaulich betrachtet werden. Trotz der 1,50 m hohen, mit Lamellen versehenen Einlauföffnung verlässt das Wasser-Schlamm-Gemisch das Einlaufbauwerk nur im unteren Bereich der Einlauföffnung. Im gesamten oberen Bereich des Einlaufschlitzes wird Wasser aus der Klarwasserzone angesogen und anschließend im Einlaufbauwerk mit dem Zulauf vermischt, wodurch es letztendlich den dem Becken zufließenden Volumenstrom vergrößert. Aufgrund der großen Höhenlage des Einlaufes tritt der Strahl in der Klarwasserzone, und nicht im Bereich gleicher Dichte direkt unterhalb des Schlammspiegels, in das Becken ein. In der Folge sinkt der Strahl ab, die potenzielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt und damit die Geschwindigkeit des Jets erhöht. Durch das Absinken des Strahls trifft dieser senkrecht auf das Schlammbett und wird erst dann in eine horizontale Strömung umgelenkt. In der Folge dieser Umlenkung kommt es zu einer Wellenbildung mit Auf- und Abströmungen, und erst in einer Entfernung von 4 – 5 m vom Einlaufbauwerk stellt der Jet letztendlich eine reine Horizontalströmung dar. Am äußeren Beckenrand wird der Jet nach oben abgelenkt und bildet oberhalb des Schlammspiegels eine Rückströmung, die sich schließlich über die gesamte Klarwasserzone ausdehnt und das für Nachklärbecken typische Strömungsbild vervollständigt.

Die in Abbildung 4.4 gezeigte Schlammverteilung verdeutlicht die bereits erwähnte Wellenbildung in der Nähe des Einlaufes. Diese so genannten Kelvin-Helmholtz Instabilitäten führen zu einem starken vertikalen Masse- und Impulsaustausch. Einerseits wird somit der Volumenstrom im Jet unnötig erhöht und das Becken in der Folge einer unnötig hohen hydraulischen Belastung ausgesetzt. Andererseits werden in diesem instabilen Bereich viele Schwebstoffe aufgewirbelt und in die Klarwasserzone eingetragen, wie Abbildung 4.5 verdeutlicht. Ebenfalls in Abbildung 4.5 zeigt sich, dass der Jet, wenn er die äußere Beckenwand erreicht, die noch in ihm vorhandenen Schwebstoffe mit sich führt und es auch dort zu einem Eintrag von Schlammflocken in die Klarwasserzone kommt.

Abbildung 4.6 zeigt die TS-konzentrationsabhängige Verteilung der Sinkgeschwindigkeit und Abbildung 4.7 die resultierende Viskosität, die sowohl von der TS-Konzentration als auch der lokalen Scherrate abhängig ist. Die im Bodenschlamm maximal erreichte Viskosität korrespondiert mit den aus Kapitel 3.3.5 resultierenden Werten und liegt bei ca. $0,75 \text{ Ns/m}^2$.

Zum Nachweis der Modellgüte zeigen die folgenden beiden Abbildungen 4.9 und 4.10 einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten. Auch für alle folgenden Vergleiche zwischen Mess- und Simulationsergebnissen gilt hinsichtlich der Darstellungsweise die Vereinbarung nach Abbildung 4.8. In Abbildung 4.9 werden zu diesem Zweck die Radialgeschwindigkeiten im Nahbereich des Einlaufbauwerkes in Profilen in 1,0 m, 1,5 m und 2,0 m Entfernung zum Einlauf dargestellt. Abbildung 4.10 zeigt drei TS-Konzentrationsprofile in 2,0 m, 6,0 m und 12,0 m Entfernung vom Einlaufbauwerk.

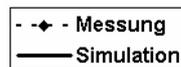


Abbildung 4.8: Legende für den Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen

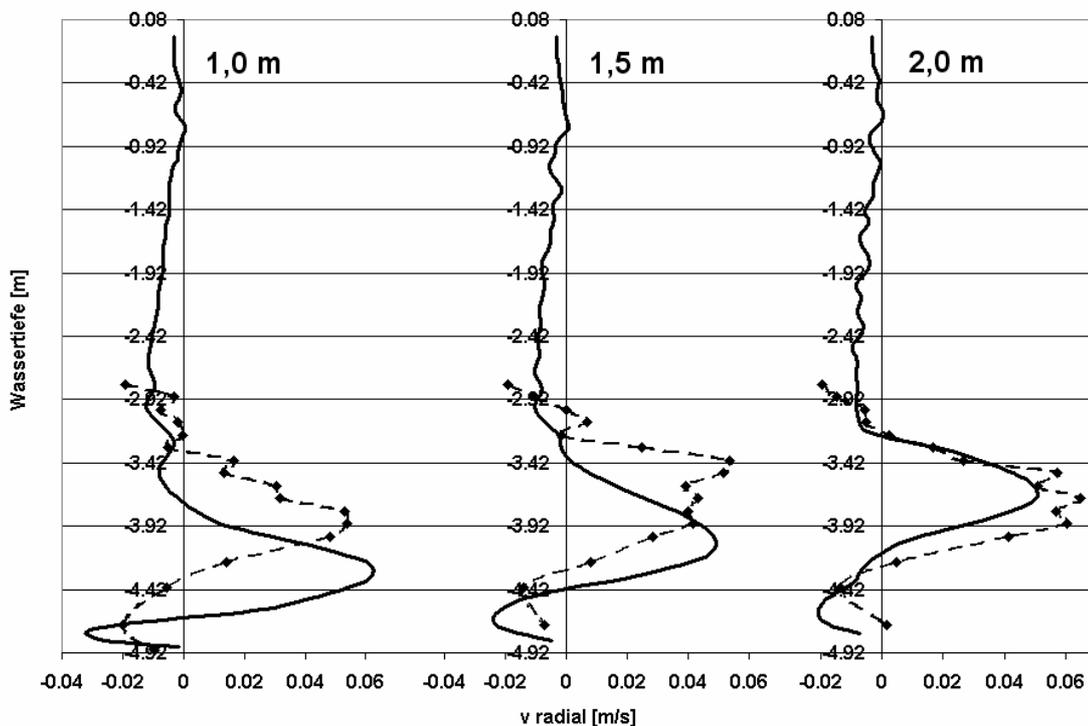


Abbildung 4.9: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 1

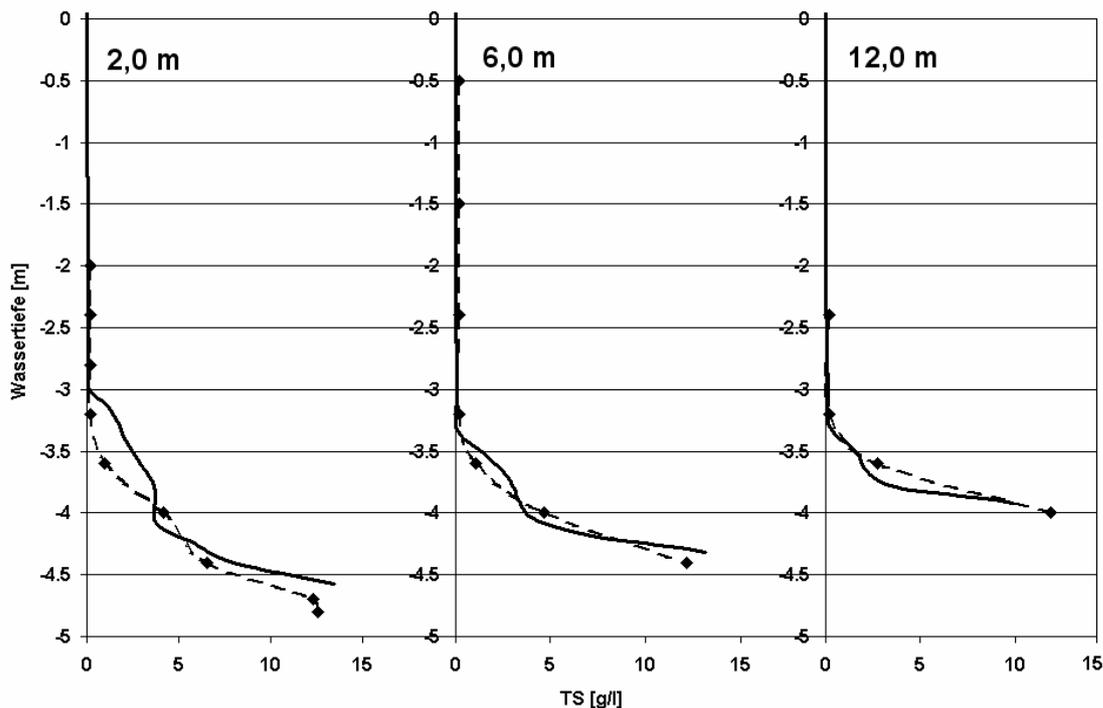


Abbildung 4.10: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 1

Besonderes Augenmerk soll beim Nachweis der Modellgüte auf die Geschwindigkeiten im Nahbereich des Einlaufes gelegt werden. Naturgemäß muss es hier nahezu zwangsläufig zu Abweichungen zwischen Mess- und Modelldaten kommen. Zum einen ist in der Simulation mit einem gemittelten, konstanten Zufluss gerechnet worden, wohingegen die Messdaten durch eine natürliche Schwankung im Einlauf beeinflusst sind. Zum anderen handelt es sich bei diesem Bereich um ein dynamisches, instationäres und instabiles Gebiet, was sich letztendlich auch in der oben beschriebenen Wellenbewegung niederschlägt. In diesem Bereich erscheint es demnach wenig sinnvoll als Grad für die Modellgüte einen exakten quantitativen Vergleich anzustreben. Vielmehr ist bis zu einer Entfernung von 2 m vom Einlauf ein qualitativer Vergleich zweckmäßig und erst ab einer Entfernung von 2 m vom Einlauf sollten die simulierten Ergebnisse bis auf vertretbare Abweichungen mit den gemessenen Daten korrespondieren.

Unter dieser Prämisse zeigen sowohl der Vergleich der Geschwindigkeiten in Abbildung 4.9 als auch der Vergleich der TS-Konzentrationen in Abbildung 4.10 eine verhältnismäßig große Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Werten. Die Abbildungen 4.11 – 4.14 verdeutlichen und bestätigen anhand der beiden Lastfälle 2 und 3 die hohe Modellgüte. Aufgrund der geringeren hydraulischen Belastung in den Nachklärbecken wird in diesen Fällen auf das dann wenig aussagekräftige Profil bei 12 m, in dem weder nennenswerte Geschwindigkeiten noch Schlammkonzentrationen auftreten, verzichtet.

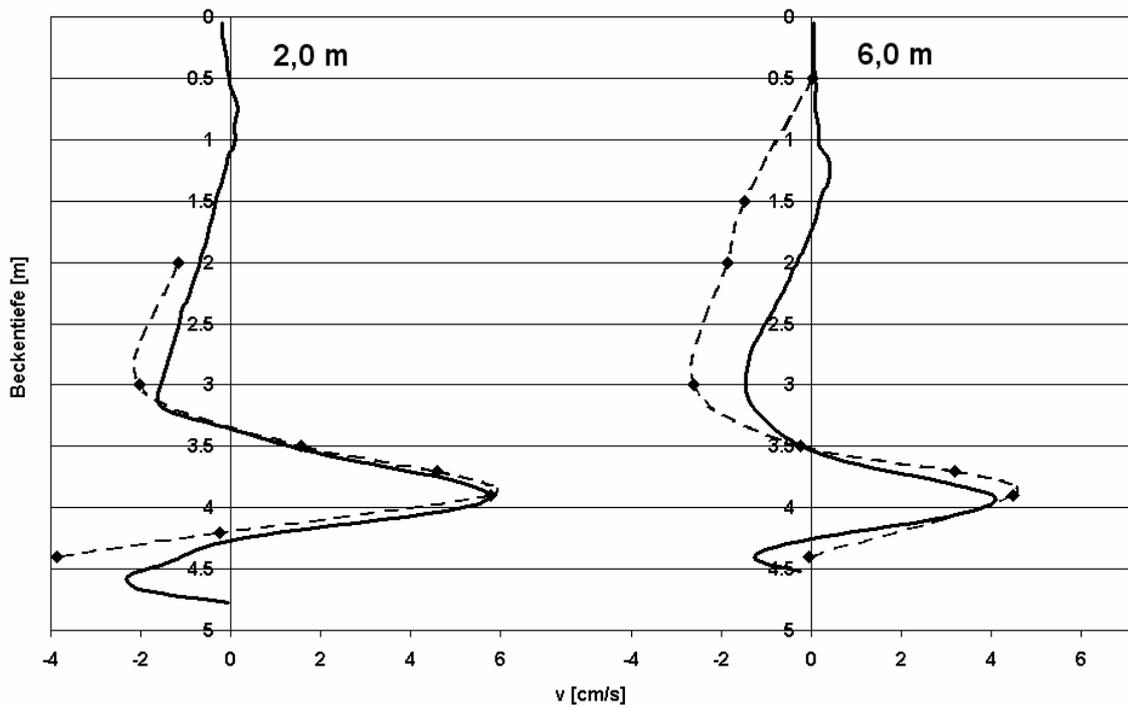


Abbildung 4.11: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 2

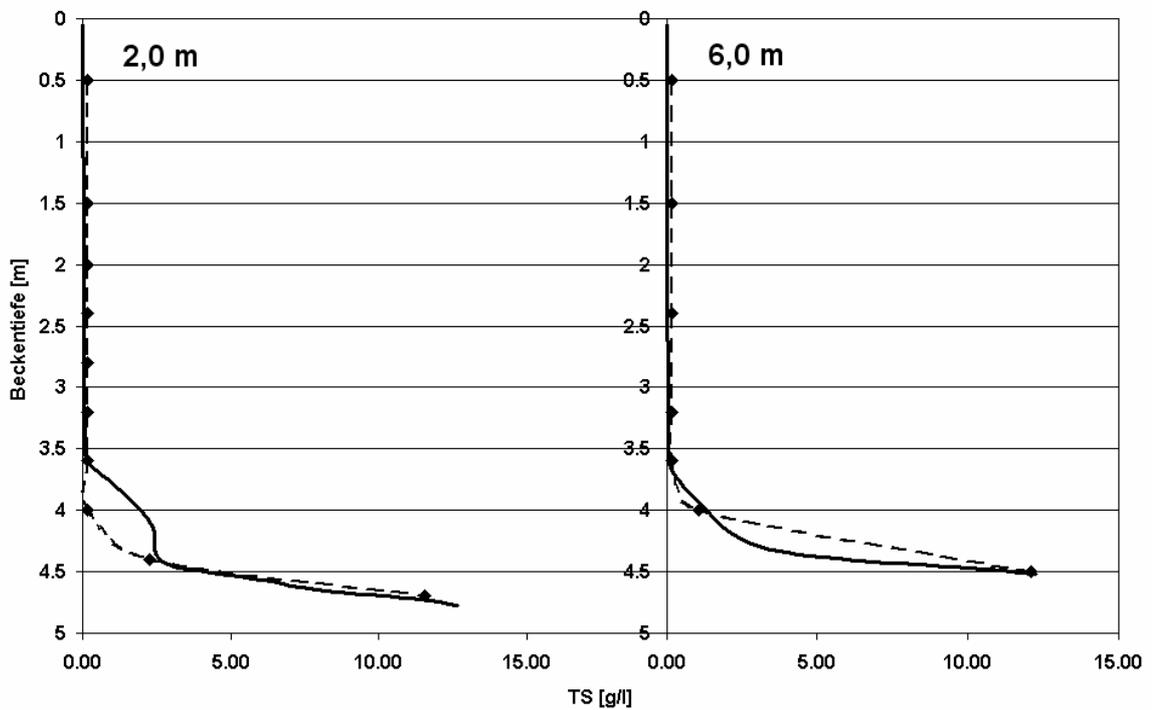


Abbildung 4.12: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 2

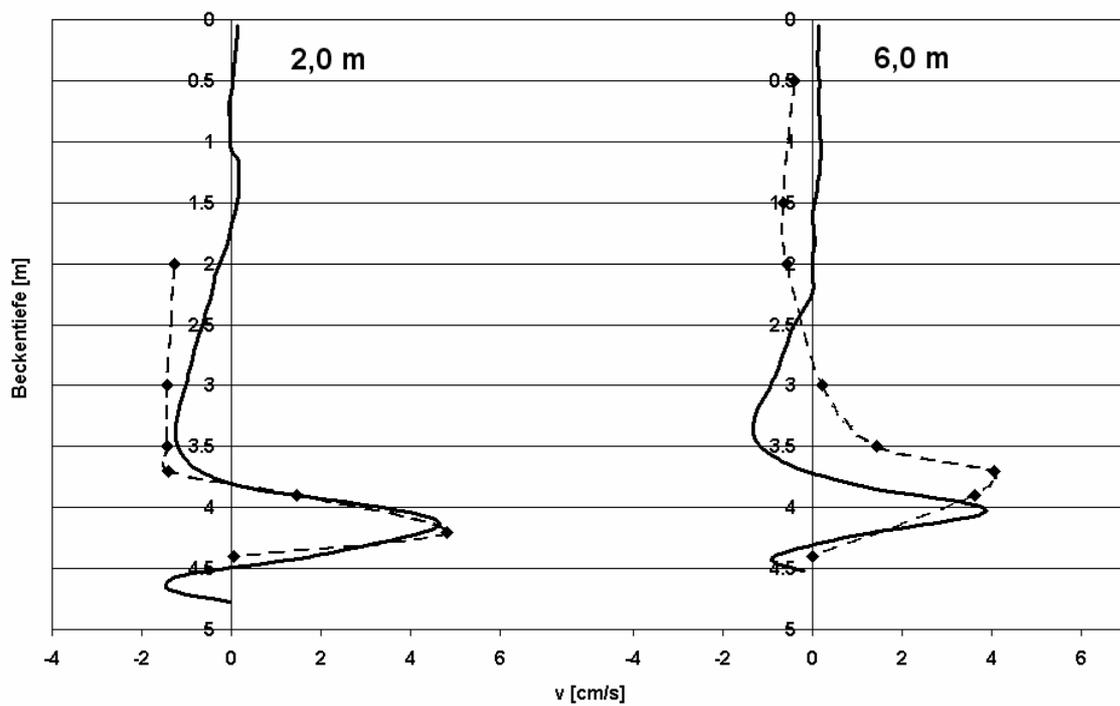


Abbildung 4.13: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 3

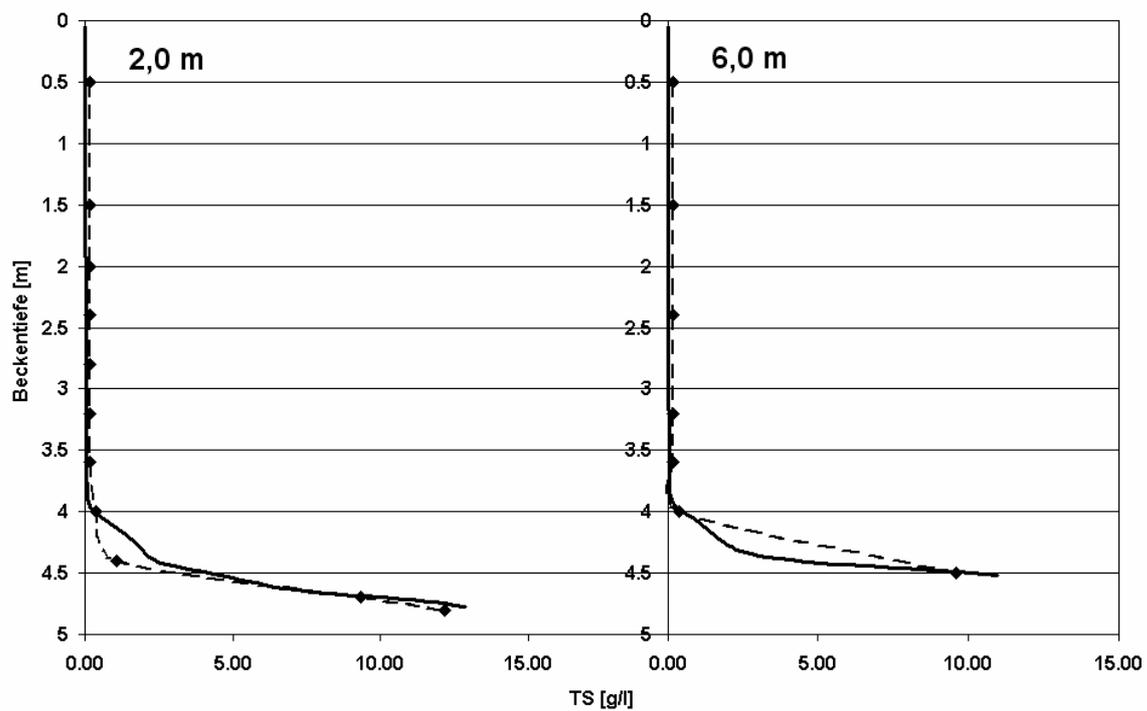


Abbildung 4.14: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 3

4.1.2 Tiefer Einlauf mit kleiner Schlitzhöhe und ohne Lamellen

Analog zu der Darstellung der Ergebnisse in dem Becken mit hohem Einlauf werden in den Abbildungen 4.15 – 4.19 auch für das Becken mit tiefem Einlauf zunächst die Ergebnisse des Regenwetterlastfalles vom 6.6.2002 in Isoflächen- und Vektoransicht abgebildet, um die Unterschiede zwischen beiden Becken aufzuzeigen. Im Anschluss folgt der Nachweis der Modellgüte anhand der Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Daten für alle drei Lastfälle. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt wie zuvor nach 8 h simulierter Echtzeit.

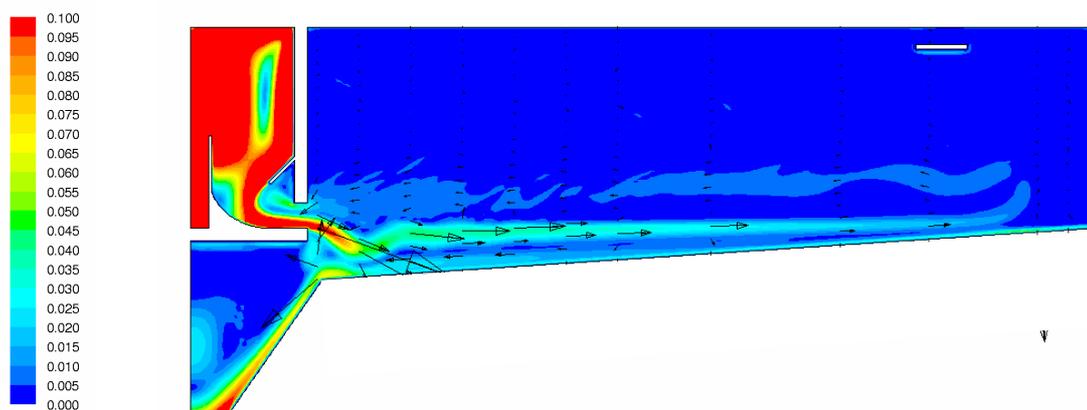


Abbildung 4.15: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - tiefer Einlauf

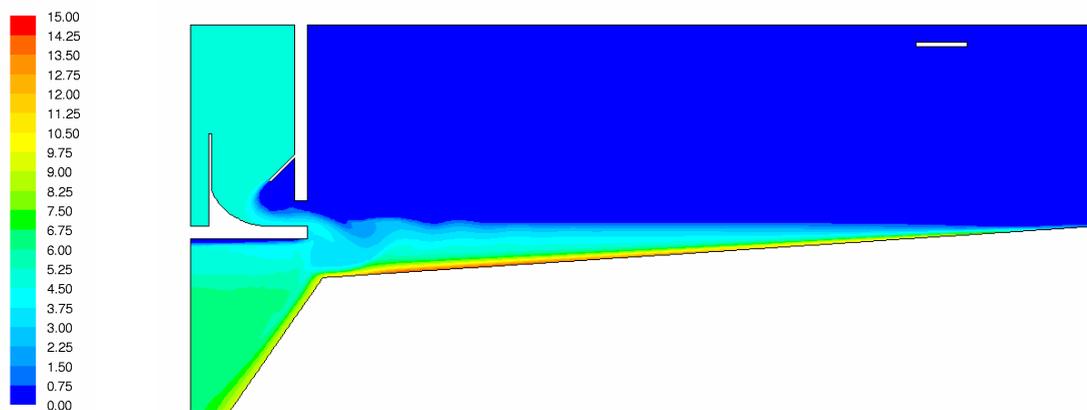


Abbildung 4.16: Schlammverteilung [g/l] - tiefer Einlauf

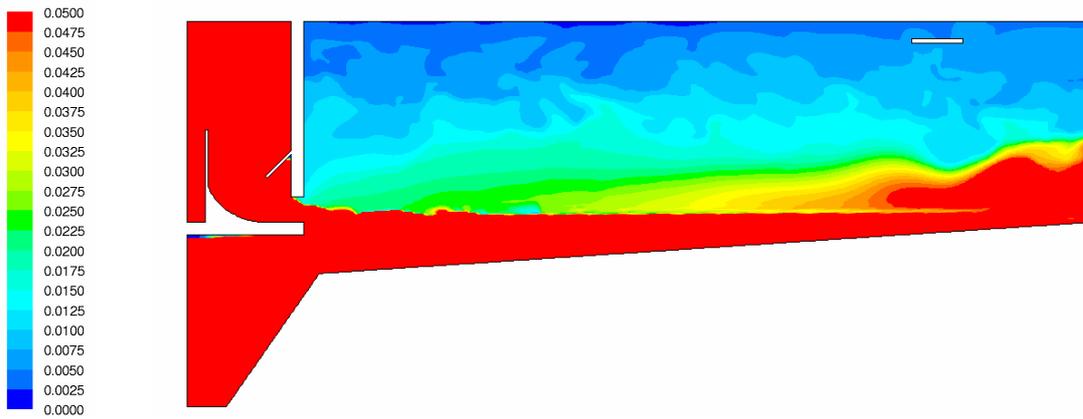


Abbildung 4.17: Schwebstoffverteilung [g/l] - tiefer Einlauf

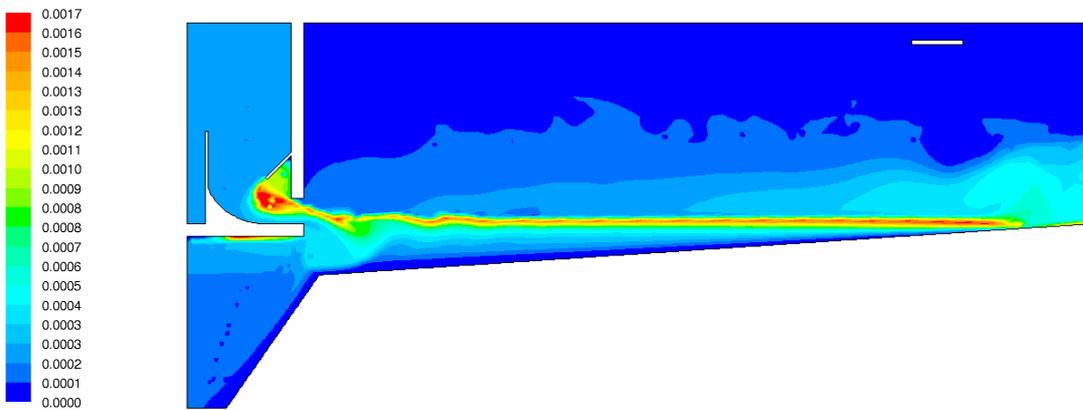


Abbildung 4.18: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] - tiefer Einlauf

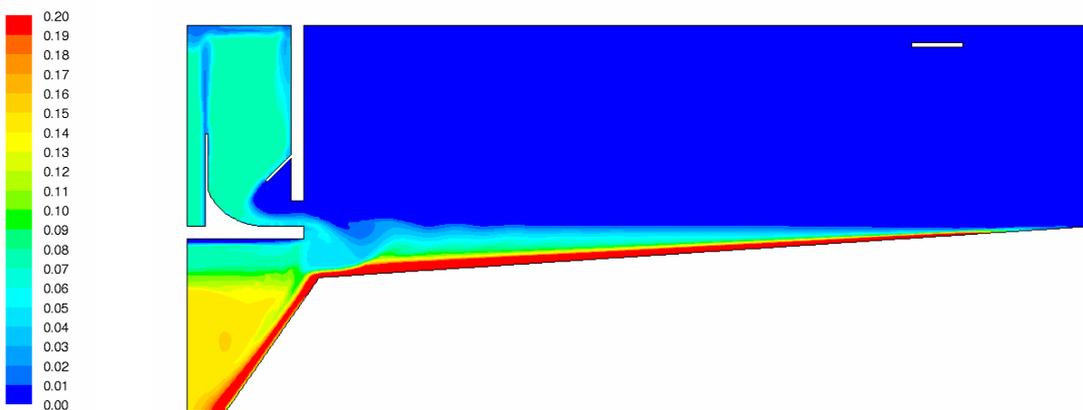


Abbildung 4.19: Verteilung der Viskosität [Ns/m²] - tiefer Einlauf

Im Vergleich zu dem Becken mit hohem Einlauf und großer Schlitzhöhe zeigt sich in diesem Becken mit tiefem Einlauf und kleiner Schlitzhöhe eine deutliche Verbesserung

der hydraulischen Situation und darauf aufbauend der resultierenden Leistungsfähigkeit. Im Unterschied zu Abbildung 4.3 zeigt Abbildung 4.15 einen deutlich reduzierten Energieeintrag in das Nachklärbecken. Durch die tiefere Einleitung fließt das Wasser-Schlamm-Gemisch nur knapp oberhalb des Schlammspiegels in das Becken, die Fallhöhe ist reduziert und es wird deutlich weniger potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. In der Folge ist die Geschwindigkeit im Jet herabgesetzt und er erreicht nur noch knapp die äußere Beckenwand. Die dort aufgrund der mitgeführten Schwebstoffe (Abbildung 4.17) kritische Aufströmung des Jets fällt deutlich geringer aus und es werden weniger Schwebstoffe in die Klarwasserzone und somit in Richtung des Ablaufes freigesetzt. Aufgrund der geringeren Schlitzhöhe und der in Folge der verminderten Dichteströmung reduzierten Geschwindigkeitsgradienten an den Strahlgrenzen wird weniger an den Einlaufstrahl angrenzendes Wasser in den Jet eingemischt, der Volumenstrom durch das Becken verringert und letztendlich die hydraulische Belastung des Nachklärbeckens reduziert.

Neben der Geschwindigkeits- und Schwebstoffverteilung zeigt sich diese Verbesserung auch in der Darstellung der Schlammverteilung in Abbildung 4.16. Das Schlammbett ist weniger mächtig ausgebildet und es kommt nur noch zu einer leichten Wellenbildung im Einlaufbereich. Die Sinkgeschwindigkeits- und Viskositätsverteilung in Abbildung 4.18 und 4.19 ergänzt die Darstellung der Ergebnisse. Die im Bodenschlamm maximal erreichte Viskosität ist nicht von den veränderten hydraulischen Bedingungen abhängig und liegt ebenfalls bei ca. $0,75 \text{ Ns/m}^2$.

Wie zuvor soll der Nachweis der Modellgüte über den Vergleich von gemessenen und simulierten Werten an den bekannten Profilen erfolgen (Abbildung 4.20 – 4.25). Auch hier sind die gemessenen Werte wieder mit einer gestrichelten und die simulierten Werte mit einer durchgezogenen Linie verbunden.

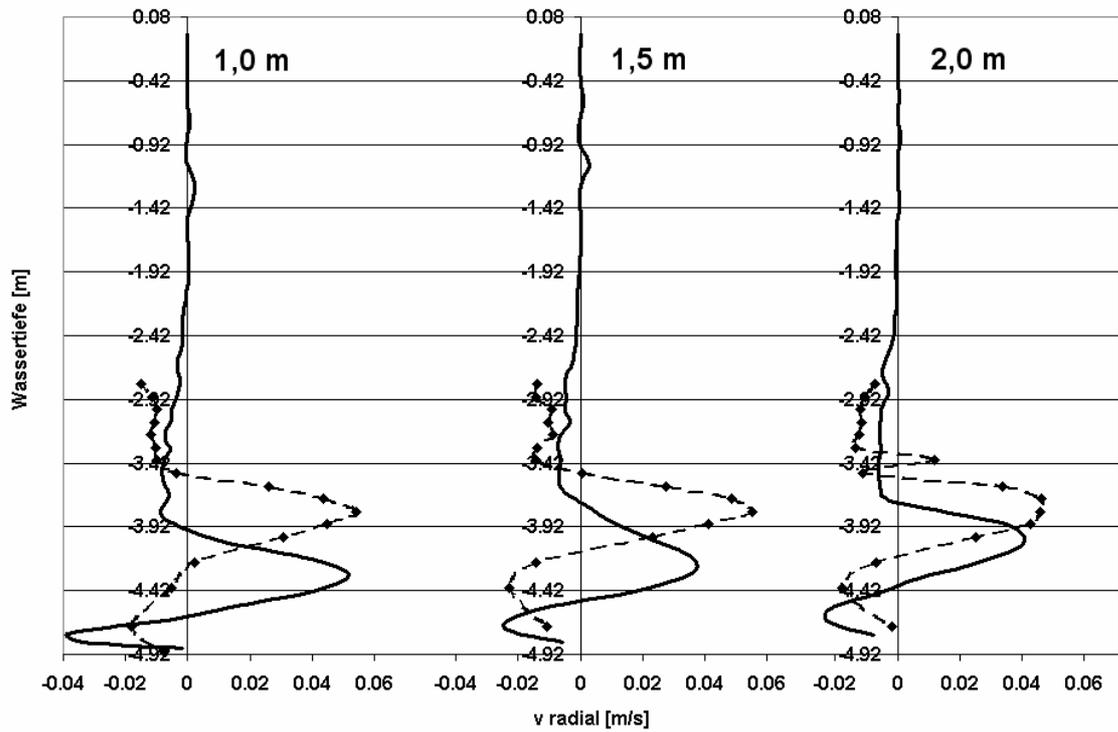


Abbildung 4.20: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 1

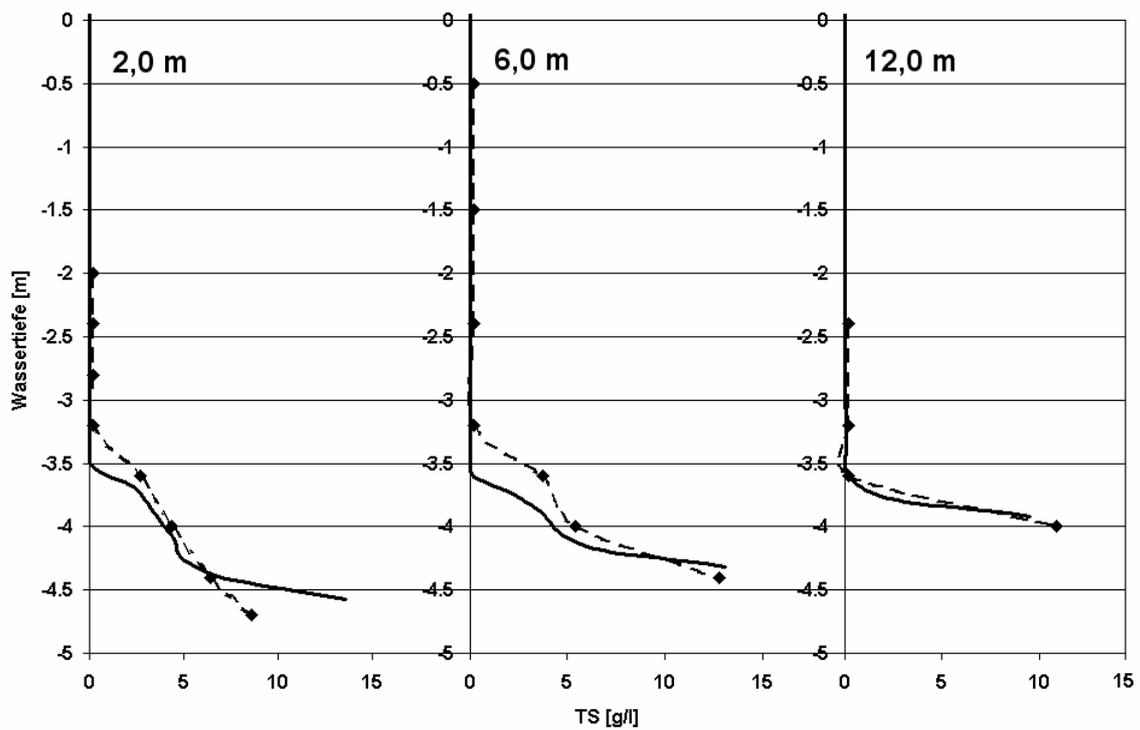


Abbildung 4.21: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 1

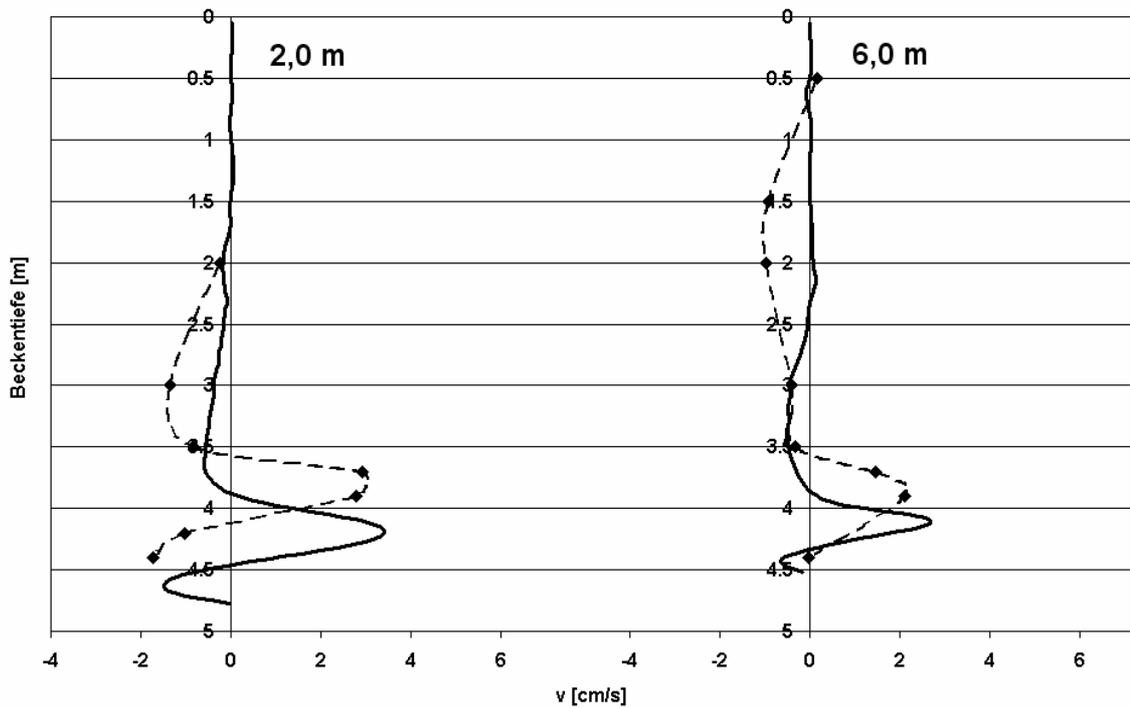


Abbildung 4.22: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 2

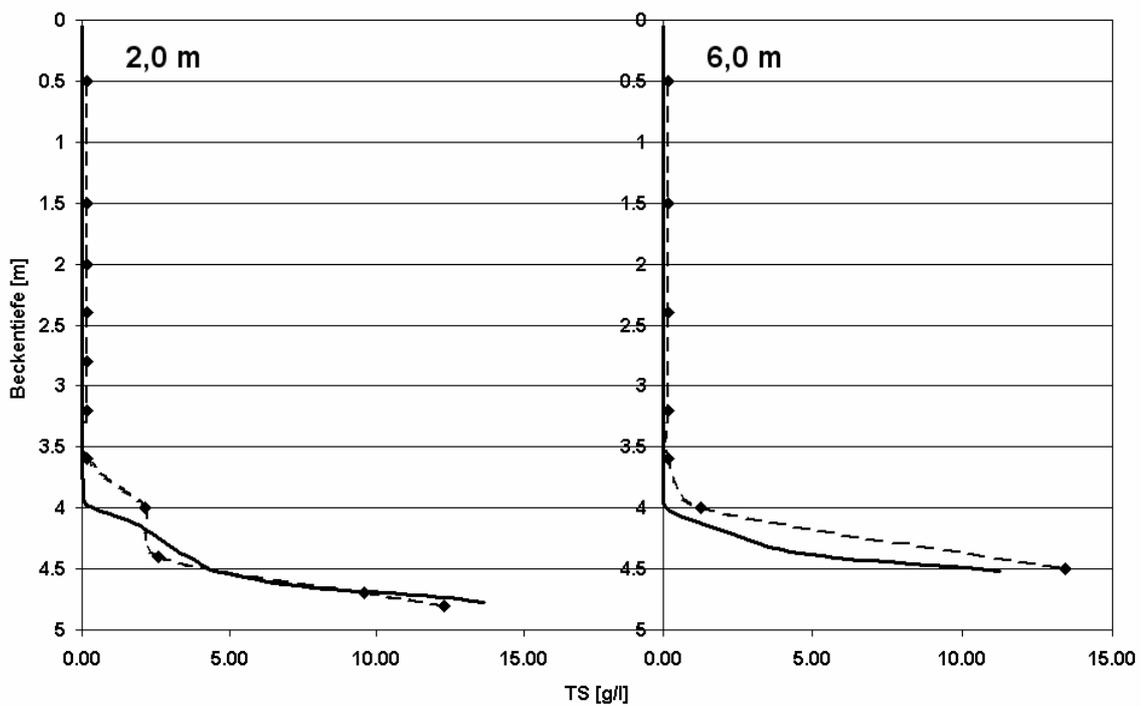


Abbildung 4.23: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 2

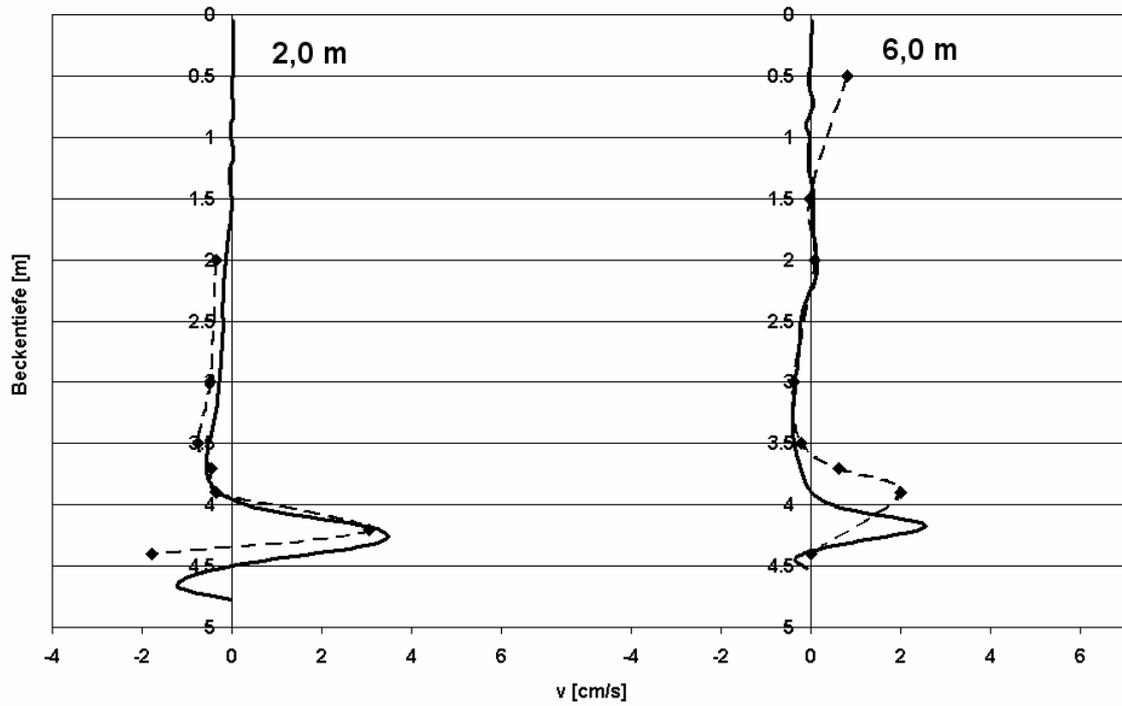


Abbildung 4.24: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 3

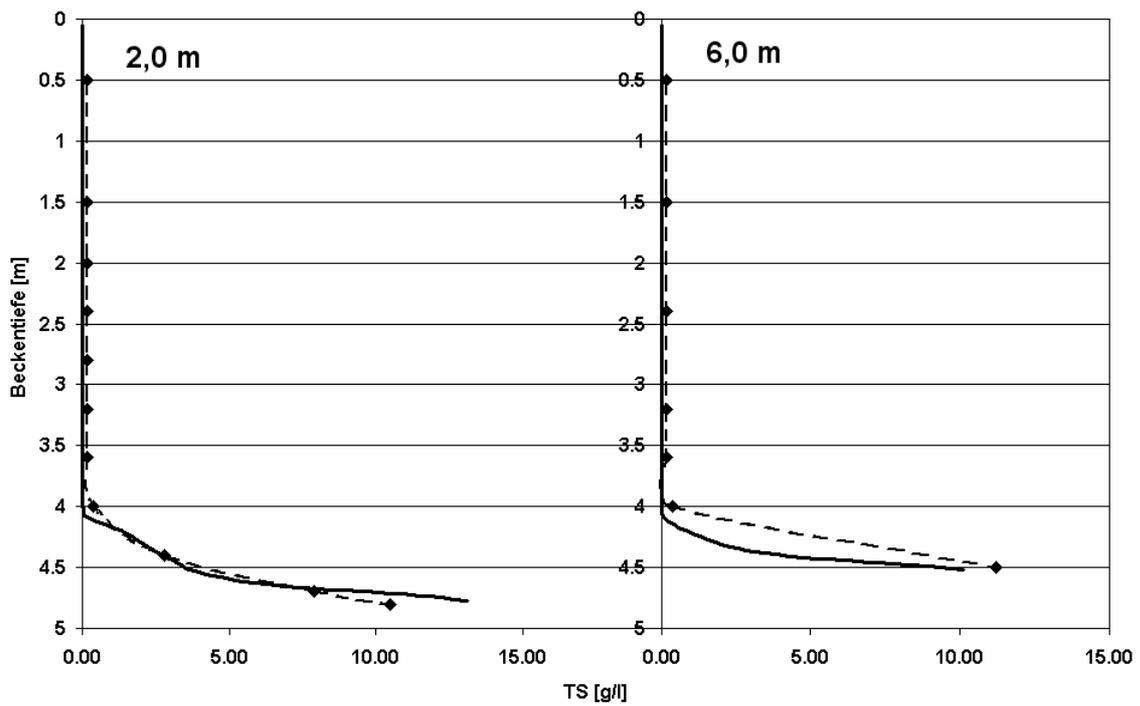


Abbildung 4.25: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 3

Unter Beachtung der normalen und vertretbaren Unterschiede zwischen Messung und Rechnung zeigen die Vergleiche der Ergebnisse in den Abbildungen 4.20 – 4.25 eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten. Lediglich im einlaufnahen Bereich in Abbildung 4.20 ist eine deutliche Höhenverschiebung des Jets zu verzeichnen, die jedoch auf die schon geschilderten Instabilitäten in genau diesem Bereich zurückzuführen ist. Sowohl in den Messungen als auch in den Rechnungen schlagen sich die veränderten hydraulischen Bedingungen aufgrund der unterschiedlichen Einlaufbauwerke nieder. In Messung wie Rechnung sind eine kleinere Jetgeschwindigkeit und ein kleinerer Massenstrom in dem Becken mit tiefem Einlauf zu verzeichnen. Auch das Schlammbett wird in diesem Becken weniger mächtig ausgebildet.

4.1.3 Optimierungspotenzial des Einlaufbauwerkes

Zwar stellt die Einlaufkonstruktion mit tiefer Einleitung über einen kleineren Einlaufschlitz im Vergleich zu der Einlaufkonstruktion mit hoher Einleitung über einen großen Einlaufschlitz schon eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der hydraulischen Bedingungen im Gesamtbecken dar, aber das Optimum, wie es nach gegenwärtigem Stand der Wissenschaft definiert und aus praktischen wie simulationstechnischen Erfahrungen abgeleitet ist, stellt zumindest für die aufgezeigten Lastfälle eine veränderte Variante des tiefen Einlaufs dar (Abbildung 4.26).

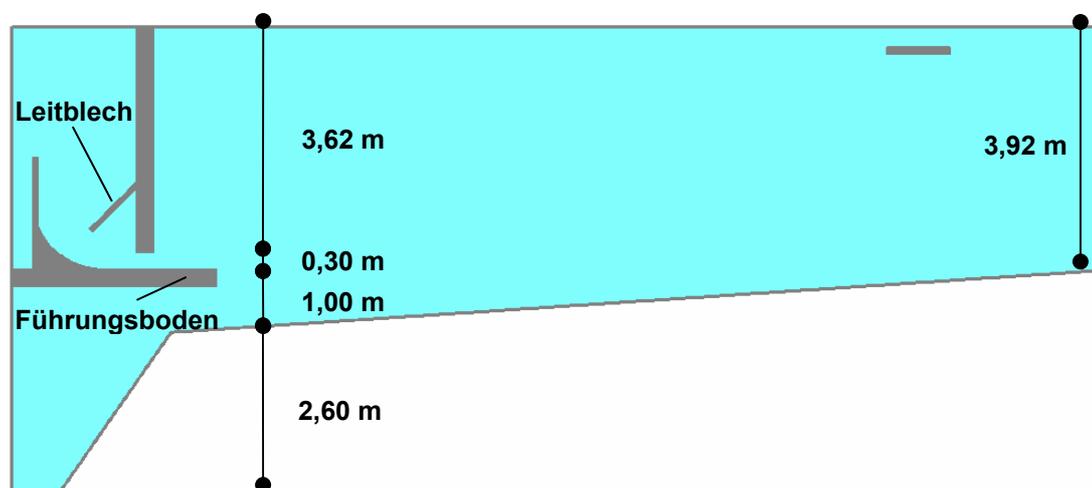


Abbildung 4.26: Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit optimiertem Einlauf

Um das Optimierungspotenzial von Nachklärbecken anhand der vorab gezeigten und durch Messdaten belegten Lastfälle aufzeigen zu können, soll an dieser Stelle abweichend von der realen Auslegung der Nachklärbecken auf der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück das Einlaufbauwerk exemplarisch für den mittleren Regenwetterlastfall vom 6.6.2002 optimiert werden. Bei den gegebenen Randbedingungen ergibt sich die über die densimetrische Froudezahl nach dem minimalen Energieeintrag bemessene Einlaufschlitzhöhe zu 0,3 m anstatt zuvor 0,5 m. Darüber hinaus werden zwei weitere

Änderungen an der Einlaufgeometrie vorgenommen, um den Einlaufstrahl noch effizienter in das Nachklärbecken zu führen. Zum einen wird das Leitblech von 0,7 m auf 1,05 m verlängert, um die Strömung im Einlaufbauwerk selbst sowie die Anströmung des Einlaufschlitzes zu verbessern. Zum anderen wird der Boden des Einlaufbauwerkes um einen Meter über die eigentliche Einleitung hinaus verlängert, um Kurzschlussströme in den Schlammtrichter und mögliche Verwirbelungen zwischen Schlammbett, Jet und Klarwasserzone im hydraulisch instabilen Einlaufbereich zu minimieren.

Für ein optimales Ergebnis müsste streng genommen der gesamte Einlauf eigentlich noch um ca. 0,2 m tiefer gelegt werden, um genau unterhalb des Schlammspiegels im Bereich gleicher Dichte einleiten zu können. Da jedoch der Schildräumer in diesem Bereich eine Höhe von 0,7 m aufweist und bei allen Nachklärbecken der Schlammtrichter für Wartungsarbeiten zumindest kriechend erreichbar sein sollte, wird die Mindesthöhe von Unterkante Bodenplatte zu Oberkante Beckensohle zu 0,75 m gewählt, so dass bei einer Stärke der Bodenplatte von 0,25 m die Einlaufhöhe von 1,0 m bestehen bleiben muss. Die resultierende Geschwindigkeits- und Schlammverteilung zeigen die Abbildungen 4.27 – 4.29.

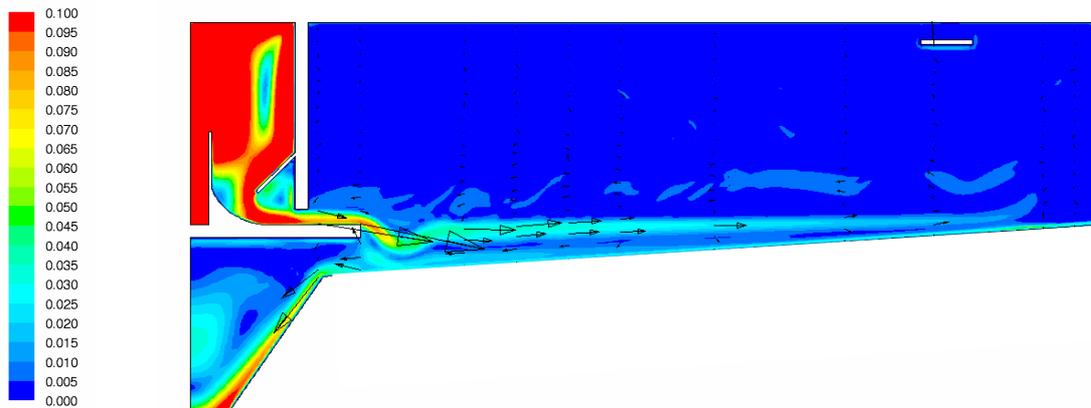


Abbildung 4.27: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - optimierter Einlauf

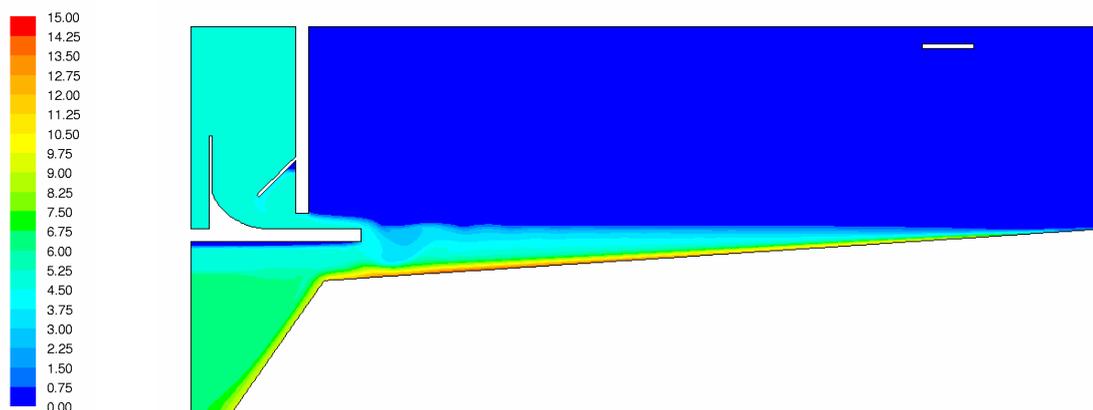


Abbildung 4.28: Schlammverteilung [g/l] - optimierter Einlauf

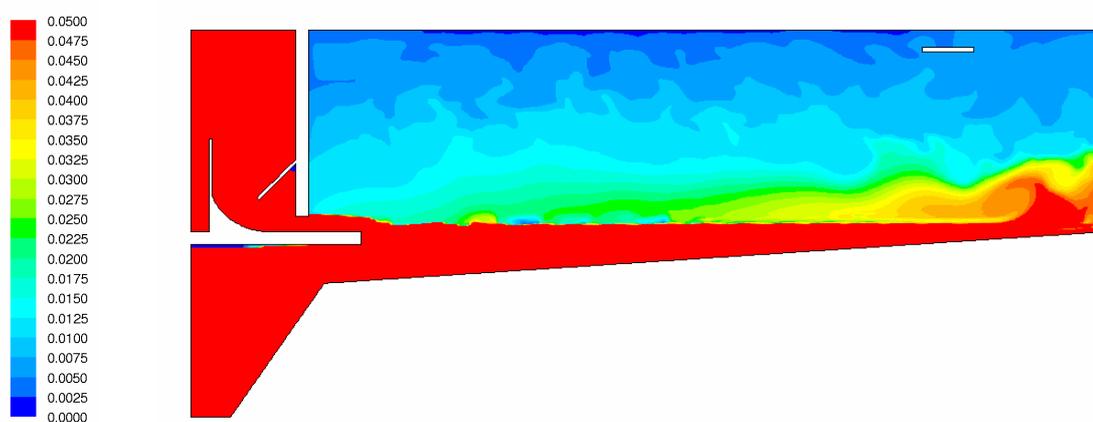


Abbildung 4.29: Schwebstoffverteilung [g/l] - optimierter Einlauf

Die Ergebnisse der Optimierungsvariante stellen eine logische Weiterentwicklung der Verbesserungen von hohem Einlauf zu tiefem Einlauf dar. Wie Abbildung 4.27 zeigt, kann die Ausbildung der Strömungswalze und somit die hydraulische Belastung des Nachklärbeckens noch einmal reduziert werden. Die Verwirbelung in Einlaufnähe (Abbildung 4.28 im Vergleich zu Abbildung 4.16) fällt geringer aus und konnte durch die verlängerte Bodenplatte in eine größere Entfernung vom Schlammtrichter verlagert werden. Insgesamt konnte noch einmal die Einmischung von Schwebstoffen in die Klarwasserzone (Abbildung 4.29) minimiert werden.

Tabelle 4.3 verdeutlicht noch einmal den Grad des Optimierungspotenzials, der sich bei völlig identischen Randbedingungen einzig und allein aus einer Veränderung der Einlaufkonstruktion ergibt. Die angegebenen Ablaufwerte sind dabei aufgrund der in Kapitel 3.3.4 erwähnten Unsicherheiten in den Absetzeigenschaften des Schlammes bei geringen TS-Konzentrationen als Relativ- und nicht als Absolutwerte zu verstehen.

Tabelle 4.3: Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion

	hoher Einlauf (Referenzwert)	tiefer Einlauf	optimierter Einlauf
Fr_d	0,09	0,45	1
Fallhöhe_{Einlaufstrahl}	1,90 m	0,30 m	0,25 m
TS_{AN}	11 mg/l	6 mg/l	5 mg/l
Potenzial	-	45 %	55 %

4.1.4 Hydraulische Belastungsschwankungen

Alle bisher vorgestellten Ergebnisse sowie der gesamte Nachweis der Modellgüte beschränkten sich bis jetzt auf instationäre Berechnungen mit einem gemittelten, konstanten Zufluss. Bei Betrachtung von relativ konstanten Randbedingungen bzw. bei einer geometrischen Optimierung, die sich auf den kritischen Zulauf – in der Regel den maximalen Zufluss bei Regenwetterereignissen – bezieht, ist dieses Vorgehen in den meisten Fällen auch völlig ausreichend.

Die Prozesse in Nachklärbecken reagieren jedoch ausgesprochen dynamisch auf Schwankungen in den Randbedingungen und dabei vor allem auf Schwankungen im Zufluss. So kommt es insbesondere bei Stoßbelastungen und somit zu Beginn eines Mischwetterereignisses zu einem überproportionalen Anstieg des Schlammбетtes und einer Erhöhung der Ablaufwerte. Für eine vollständige Modellkalibrierung ist es insofern unumgänglich, das dynamische Prozessverhalten des Modells mit der Dynamik des realen Nachklärbeckens zu vergleichen. Darüber hinaus ist für alle Optimierungen, die neben konstruktiven Änderungen auch regeltechnische Möglichkeiten beinhalten soll bzw. neben dem maximalen Bemessungszufluss auch hydraulische Belastungsschwankungen berücksichtigen soll, die Einbeziehung aller zeitabhängigen Zulauf- und Steuergrößen, und hierbei sei vor allem das Rücklaufschlammverhältnis genannt, notwendig.

Von daher wurde im Rahmen dieser Arbeit die Ganglinie eines leichten Regenereignisses vom 19.01.2004 mit 12 l/m^2 in 24 h simuliert und mit den vorhandenen Messdaten verglichen. Aufgrund des großen Einzugsgebietes ist der Zulauf zur Kläranlage noch bis zu 24 h nach Ende eines Regenereignisses erhöht, so dass insgesamt eine Zulaufganglinie von 48 h simuliert wurde. Da das gewählte Regenereignis mit Tagesbeginn einsetzte, kam es im Zuge dessen, innerhalb kurzer Zeit zu einem sprunghaften Anstieg des Zulaufes vom Nachtzufluss $Q_{BB} = 265 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $Q_{BB} = 865 \text{ m}^3/\text{h}$. Neben der längerfristigen Beobachtung des Prozessverhaltens über 48 h ermöglicht dieses Regenereignis somit auch Rückschlüsse auf das dynamische

Systemverhalten bei einer plötzlichen Erhöhung des Zulaufes um mehr als den Faktor 3 zu ziehen. Abbildung 4.30 und 4.31 zeigen den Zufluss zur Belebung bzw. die aus der Verfahrenstechnik und Rücklaufschlammregelung resultierenden Zu- und Abläufe des Nachklärbeckens als 15-Minuten-Werte.

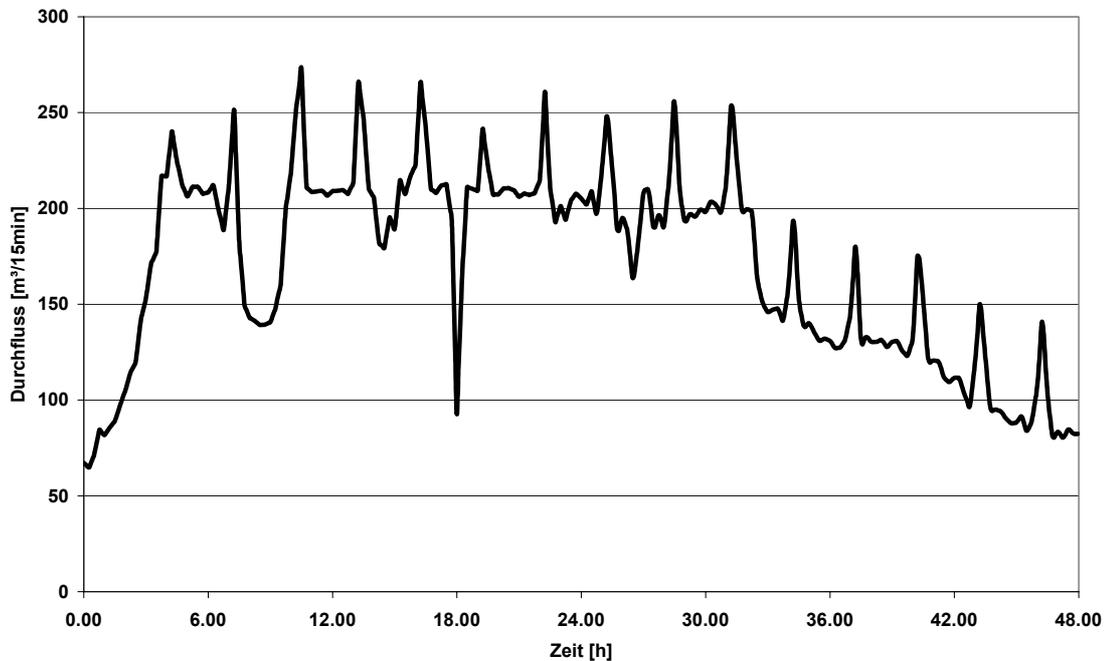


Abbildung 4.30: Zulaufganglinie zur Belebung

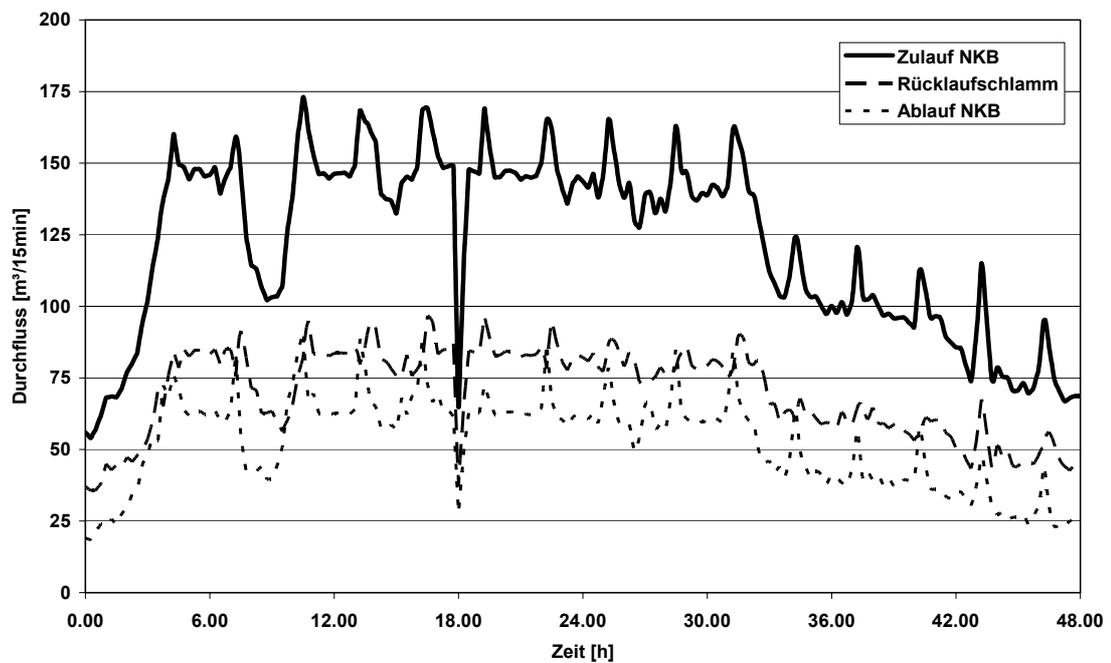


Abbildung 4.31: Resultierende Ganglinien für ein Nachklärbecken

Abbildung 4.32 zeigt die während des Regenereignisses aufgezeichnete Schlammбетhöhe in den beiden untersuchten Nachklärbecken.

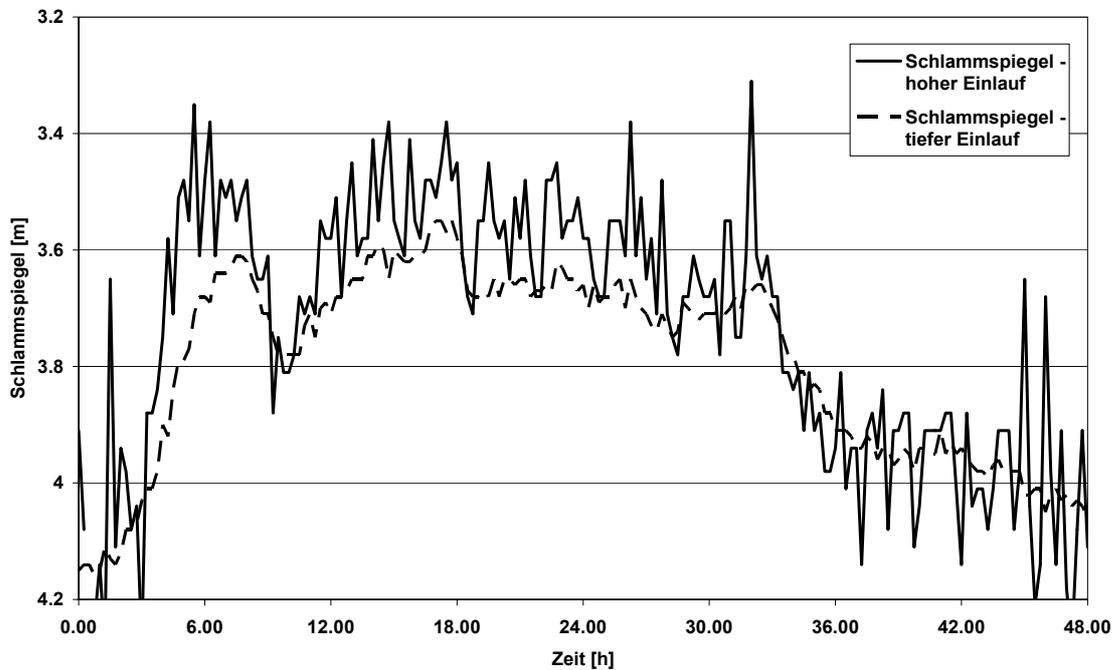


Abbildung 4.32: Gemessene Schlammбетhöhe

In den Abbildungen 4.31 und 4.32 ist deutlich der unmittelbare Zusammenhang zwischen Zulauf zur Nachklärung und Schlammбетhöhe zu erkennen. Die Lage des Schlammспiegels korrespondiert eindeutig mit der Zu- und Abnahme der hydraulischen Beckenbelastung. Darüber hinaus wird auch noch einmal die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der beiden Nachklärbecken mit ihren unterschiedlichen Einlaufkonstruktionen sichtbar. Diese verdeutlicht sich nicht nur in einer stetig höheren Schlammспiegellage in dem Becken mit hohem Einlauf, sondern auch in der größeren Dynamik des Anstiegs sowie in den deutlich größeren Schwankungen des Schlammспiegels in diesem Becken.

Ähnlich wie die Schlammбетhöhe verhält sich die TS-Konzentration im Ablauf der beiden Nachklärbecken. Da jedoch für das gewählte Regenereignis selbst keine für beide Becken getrennt aufgezeichneten Ablaufwerte vorliegen, wird an dieser Stelle auf ein vergleichbares Regenereignis, bei dem die Ablaufwerte für beide Becken separat aufgezeichnet wurden, zurückgegriffen. Abbildung 4.33 zeigt die Ablaufwerte der beiden untersuchten Nachklärbecken in Verbindung mit der Zulaufganglinie für ein Nachklärbecken bei diesem alternativen Regenereignis.

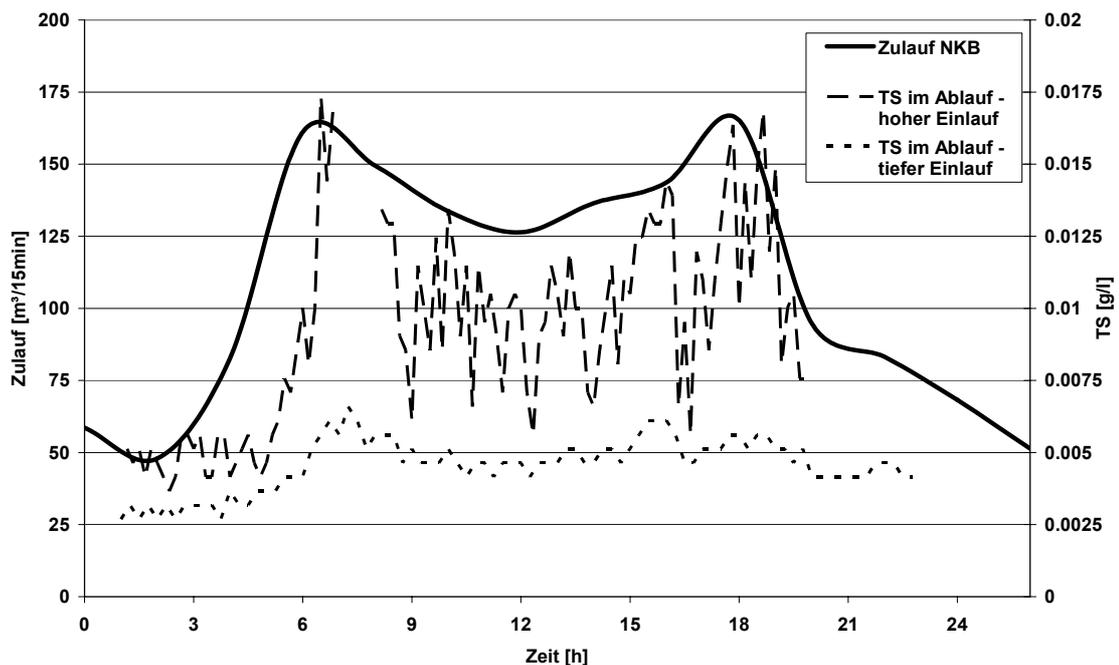


Abbildung 4.33: Gemessene TS-Konzentrationen im Ablauf der beiden Nachklärbecken bei einem vergleichbaren Regenereignis

Wie auch bei der Schlammspiegellage ist der offensichtliche Zusammenhang zwischen dem Zulauf zur Nachklärung und den resultierenden Ablaufwerten klar zu erkennen. In einem noch viel deutlicheren Ausmaß als bei der Schlammбетhöhe offenbart sich bei der Betrachtung der Ablaufwerte die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Nachklärbecken. Fällt der Anstieg der TS-Konzentration im Ablauf des Nachklärbeckens mit tiefem Einlauf relativ gering und ohne nennenswerte Stoßbelastung aus, so stellt sich dieses im Becken mit hohem Einlauf gänzlich anders dar. Zum einen liegen die gemessenen Ablaufwerte deutlich um bis zu einem Faktor 3 über den gemessenen Ablaufwerten des Beckens mit tiefem Einlauf. Zum anderen ist auch die Dynamik des Anstiegs in den Ablaufwerten in diesem Becken eklatant größer. So steigt hier die TS-Konzentration im Ablauf von 5 mg/l bei Beginn des Regenereignisses auf 17,5 mg/l, ehe sie sich im weiteren Verlauf des Regenereignisses bei ca. 10 mg/l einstellt. Aufgrund der ungünstigeren Einlaufgestaltung und der daraus letztendlich resultierenden größeren hydraulischen Belastung des Beckens kann es durch die sich daraus ergebende größere Prozessdynamik zu einem zeitweise auftretenden Schlammabtrieb kommen, der so in dem Becken mit tiefem Einlauf nicht zu verzeichnen ist.

All diese in der Analyse der Messwerte aufgezeigten Phänomene finden sich in vergleichbarer Form auch in den Ergebnissen der Simulation wieder, die auf der Zulaufganglinie in Abbildung 4.31 basiert. Abbildung 4.34 und Abbildung 4.35 zeigen die simulierte Schlammspiegellage und die resultierenden Ablaufwerte, die beide die Ergebnisse aus den Messungen bezüglich der unterschiedlichen Leistungsfähigkeit der Becken bestätigen.

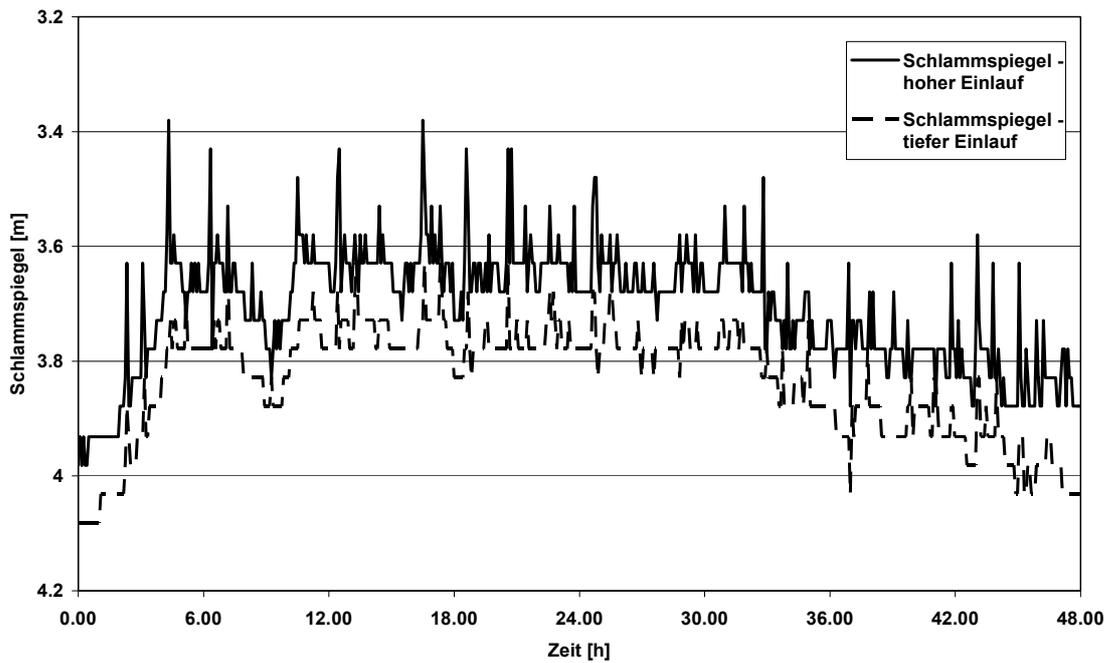


Abbildung 4.34: Simulierte Schlammhöhe

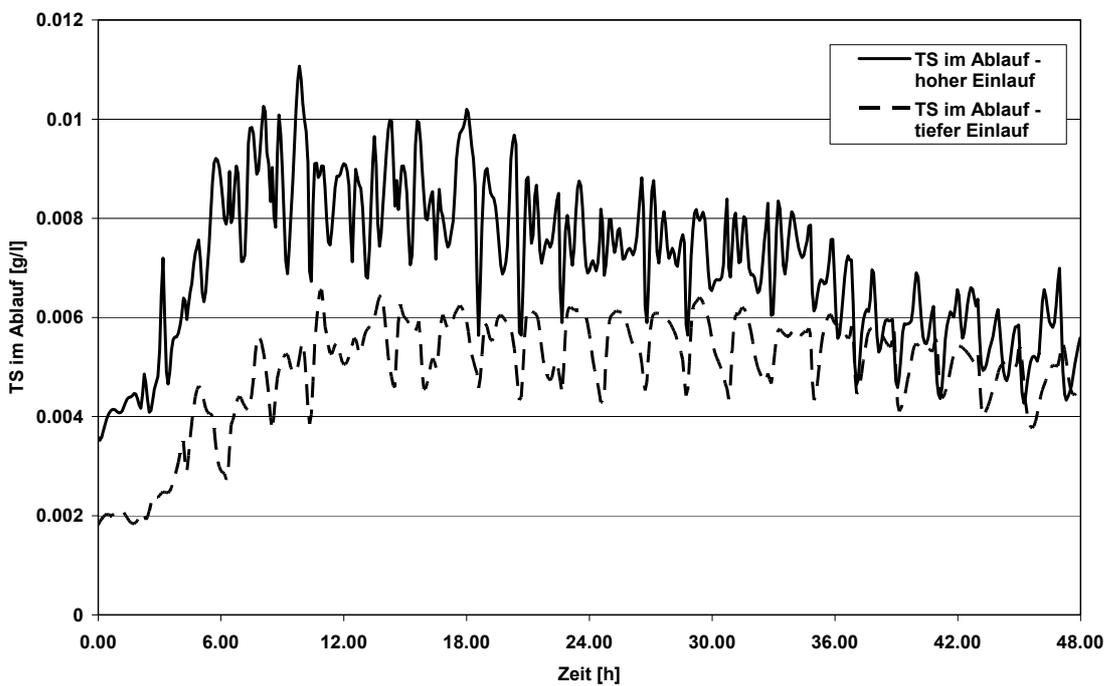


Abbildung 4.35: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der beiden Nachklärbecken

Wie auch bei der gemessenen Schlammhöhe liegt der simulierte Schlammhöhe des Beckens mit hohem Einlauf stetig oberhalb des Schlammhöhe in dem Becken

mit tiefem Einlauf. Auch in der Modellrechnung ist dabei zu Beginn des Regenereignisses eine größere Dynamik im Anstieg des Schlammspiegels des Beckens mit hohem Einlauf zu verzeichnen. Ebenfalls abgebildet wird die für dieses Becken charakteristische größere Schwankungsbreite der Schlammбетhöhe.

Diese höhere hydraulische Prozessdynamik des Beckens mit hohem Einlauf zeigt sich auch in dem Vergleich der TS-Konzentration im Ablauf der beiden Nachklärbecken in Abbildung 4.35. Wie in der Messung ist auch in der Simulation in diesem Becken ein deutlich größerer Anstieg der Ablaufwerte zu Beginn des Regenereignisses zu verzeichnen. Erst mit längerem Verlauf des Regenereignisses gleichen sich beide Kurven wieder an, wobei die des Beckens mit hohem Einlauf immer oberhalb der des Beckens mit tiefem Einlauf verbleibt.

Im Ergebnis kann also festgehalten werden, dass nicht nur die gemessenen Geschwindigkeits- und Feststoffprofile mit den Ergebnissen der Simulationsrechnungen mit konstantem Zufluss weitestgehend übereinstimmen, sondern auch das gesamte prozessdynamische Systemverhalten von dem numerischen Modell realitätsnah wiedergegeben wird.

4.1.5 Optimierungsstrategien bei Belastungsschwankungen

Wird für die Konstruktion des Einlaufbauwerkes und hierbei insbesondere für die Auslegung der Einlaufschlitzhöhe auf den minimalen Energieeintrag bei $Fr_d = 1$ kein konstanter Zufluss, nahe liegender Weise der maximale Zufluss bei Regen, sondern eine dynamische Zuflussganglinie zugrunde gelegt, ergeben sich hauptsächlich vier unterschiedliche Strategien zur Optimierung der Einlaufgeometrie:

- Auslegung auf eine feste Einlaufschlitzhöhe bei maximalem Zufluss und Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Konstruktion bei geringeren Zuflüssen mittels Simulation einer Zulaufganglinie,
- Konstruktion des Einlaufbauwerkes mit einer variablen Einlaufschlitzhöhe, die sich dem aktuellen Zufluss zum Nachklärbecken anpasst,
- Auslegung auf eine feste Einlaufschlitzhöhe bei einem definierten Zufluss, der über die Regelung des Rücklaufschlammverhältnisses konstant gehalten wird,
- eine Kombination aus den letzten beiden Strategien.

In den meisten Anwendungsfällen ist davon auszugehen, dass die konstruktiv einfachste Variante mit einer festen Einlaufschlitzhöhe eine ausreichend hohe Leistungsfähigkeit und eine hinreichende Verfahrensstabilität des Nachklärbeckens gewährleistet. In Kombination mit einer relativ unkomplizierten Regelung des Rücklaufschlammverhältnisses sollte somit in einem breiten Spektrum des Optimierungsbedarfes von Nachklärbecken eine konstruktiv unkomplizierte, günstig umzusetzende, wartungsarme und bequeme Lösung möglich sein.

Bezüglich der Regelung des Rücklaufschlammes soll an dieser Stelle auf ein Forschungsprojekt am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz, Österreich, verwiesen werden, dass thematisch eben genau diese Regelung des Rücklaufschlammverhältnisses in Bezug auf die Auswirkungen im Nachklärbecken und ihre Rückkopplung auf die Belebung beinhaltet und auf dem in dieser Arbeit entwickelten numerischen Modell aufbaut (Patziger et al. 2005). Von daher sollen im Rahmen dieser Arbeit auch nur zwei Ergebnisse, die dabei die Rückkopplung auf die Belebung ganz ausdrücklich nicht berücksichtigen, behandelt werden.

Zum einen wurde die Einlaufschlitzhöhe auf den maximalen Zulauf zur Nachklärung während der simulierten Ganglinie des Regenereignisses vom 19.01.2004 von ca. $Q_{NKB} = 180 \text{ m}^3/15\text{min}$ ausgelegt, was zu einer Einlaufschlitzhöhe von 0,25 m führte. Dann wurde die vorhandene Ganglinie (Abbildung 4.31) mit der bisherigen Rücklaufschlammregelung, die in Werten zwischen 0,6 und 1,1 schwankte, simuliert. Zum anderen wurde aufbauend auf der gegebenen Zulaufganglinie das Rücklaufschlammverhältnis in einer Bandbreite von 0,5 bis 5,3 so gewählt, dass zu jedem Zeitpunkt ein fester Zufluss zur Nachklärung von $Q_{NKB} = 140 \text{ m}^3/15\text{min}$ vorliegt. Die Einlaufschlitzhöhe wurde dem Zufluss entsprechend zu 0,2 m bestimmt. Abbildung 4.36 und 4.37 zeigen die simulierten TS-Konzentrationen im Ablauf jeweils im Vergleich zu dem real existierenden Becken mit tiefem Einlauf, das mit der realen Zulaufganglinie aus Abbildung 4.31 berechnet wurde.

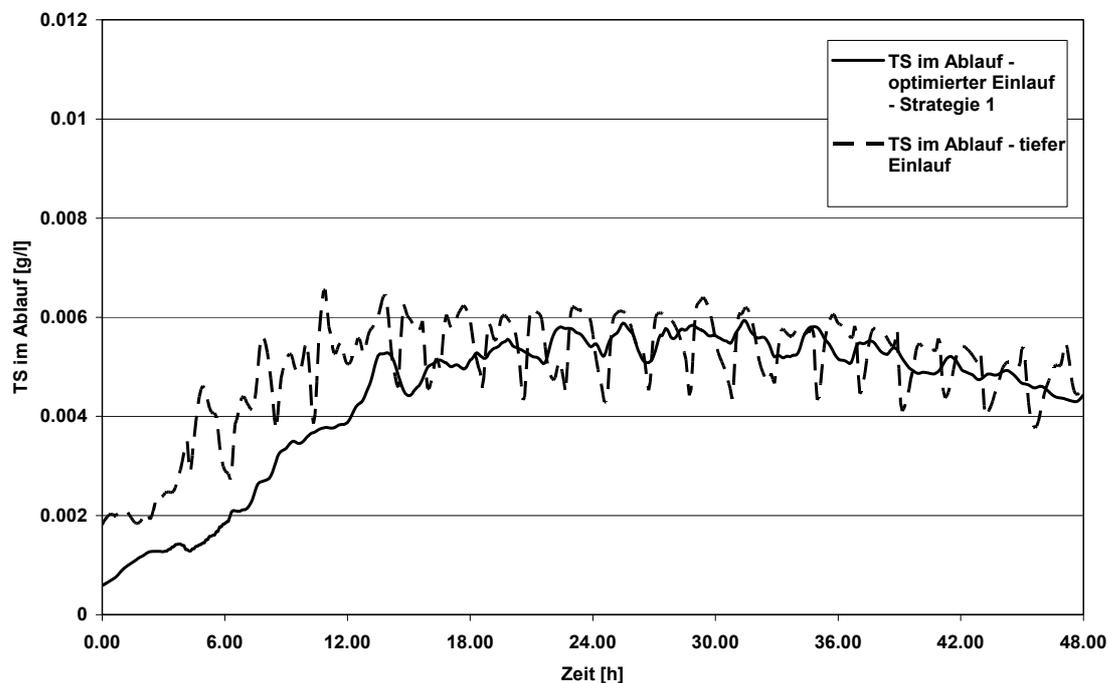


Abbildung 4.36: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken bei bisheriger Beschickung

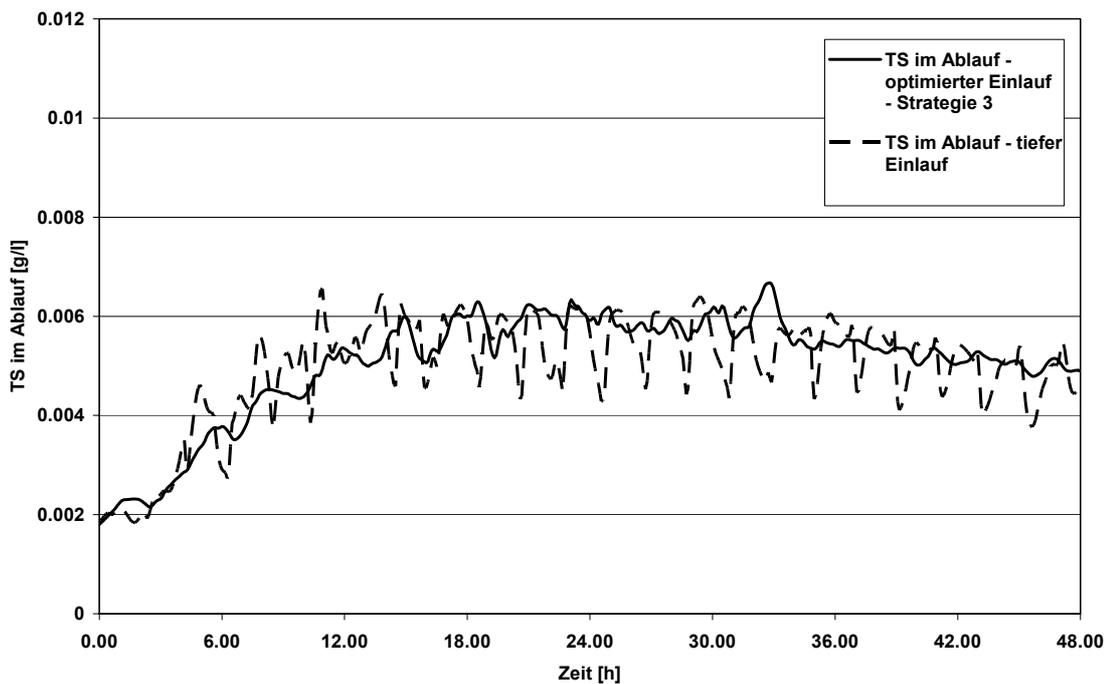


Abbildung 4.37: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken bei konstanter Beschickung von $140 \text{ m}^3/15\text{min}$.

Beide Strategien zeigen im Kern ein ähnliches Verhalten und entsprechen in ihrem Verhalten der real existierenden Beckenkonstruktion mit tiefem Einlauf in Kombination mit der bisherigen Rücklaufschlammsteuerung. Erwartungsgemäß ergibt die optimierte Einlaufgeometrie im Vergleich zur bisherigen Konstruktion bei Verwendung der realen Zulaufganglinie eine geringfügige Verbesserung, wie sie in der Größenordnung in etwa den Angaben nach Tabelle 4.3 entspricht. Des Weiteren überrascht auch nicht, dass die Ablaufwerte der Simulation mit konstant hohem Zulauf insbesondere im Vergleich zu dem Zeitraum geringer Beschickung (Nachtzufluss) oberhalb der Ablaufwerte der Simulation mit realer Zulaufganglinie liegen. Festzustellen ist aber auch, dass der Gradient im Anstieg der TS-Konzentration im Ablauf zu Beginn des Regenereignisses in der Simulation mit der realen Zulaufganglinie größer ist.

Da beide vorgestellten Strategien – annähernd keine zulaufgesteuerte Rücklaufschlammregelung im Vergleich zu vollständiger Rücklaufschlammsteuerung, um einen konstanten Beckenzufluss zu erreichen – jeweils die extreme Lösung auf der einen wie auf der anderen Seite darstellen und beide Strategien offensichtliche Stärken wie Schwächen beinhalten, ist der Schluss nahe liegend, dass eine Kombination aus beiden Strategien für ein breites Anwendungsfeld die geeignete Lösung darstellen kann. Wenn eine optimierte Einlaufkonstruktion mit einer Rücklaufschlammsteuerung kombiniert wird, die extreme Schwankungen und Stoßbelastungen aus der Zulaufganglinie abmildern kann, sollte im Vergleich zu den meisten konventionell geplanten und betriebenen Nachklärbecken eine deutliche Leistungssteigerung möglich sein. An dieser Stelle sei jedoch noch einmal auf den weiteren Forschungsbedarf, der

sich aus diesen Erkenntnissen ergibt, hingewiesen und den diese Arbeit lediglich anregen kann.

5 Validierung und Optimierungsbeispiele

Nachdem im vorherigen Kapitel 4 die Modellgüte anhand zweier Nachklärbecken mit unterschiedlicher Einlaufgeometrie bei drei unterschiedlichen Belastungszuständen detailliert nachgewiesen sowie Strategien zur Leistungssteigerung vorgestellt und das daraus resultierende Optimierungspotenzial diskutiert wurde, soll in diesem Kapitel an Hand zweier weiterer Nachklärbecken die Modellgüte dargelegt sowie die vorgestellten Optimierungsstrategien angewendet werden. Darüber hinaus erfolgt anhand des horizontal durchströmten, rechteckigen Nachklärbeckens in Kierspe eine Parameterstudie bezüglich des in Kapitel 3.3.5 vorgestellten bi-linearen Viskositätsansatzes, um die Bedeutung der Rheologie auf die resultierende Schlammverteilung im Becken zu verdeutlichen.

In beiden hier vorgestellten Nachklärbecken wurde ebenso wie auf der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück ein umfangreiches Untersuchungsprogramm umgesetzt. Neben der Bestimmung der Absetzgeschwindigkeiten wurden die Geschwindigkeits- und Feststoffverteilungen in den Becken gemessen sowie die Betriebsdaten der Kläranlage ausgewertet. Die Untersuchungen im Nachklärbecken Kierspe wurden vom Institut für Siedlungs- und Industriewasserwirtschaft der TU Dresden (Krebs und Franz 2002) durchgeführt. Das Messprogramm im Nachklärbecken Miesbach wurde im Rahmen des dieser Arbeit zu Grunde liegenden Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft vom Ingenieurbüro Freimann und dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfallwirtschaft der Universität Hannover umgesetzt.

5.1 Das Nachklärbecken Kierspe

Die Nachklärung der Kläranlage Kierspe besteht aus zwei horizontal durchströmten, rechteckigen Becken, die mit ihrer langen, flachen Bauweise signifikant von den Empfehlungen der DWA (ATV 2000) abweichen. Die baugleichen Becken weisen bei einer Länge von 50 m und einer Breite von 5 m lediglich eine Tiefe von 2,22 m auf. Der Einlauf besteht aus fünf Stengeleinläufen pro Becken mit einem Durchmesser von jeweils 0,175 m. Nach dem Austritt trifft der Einlaufstrahl in ca. 0,1 m Entfernung auf einen Prallteller mit einem Durchmesser von ca. 0,2 m. Der Mittelpunkt der Einlaufrohre liegt 1,12 m unterhalb der Wasseroberfläche. Abbildung 5.1 verdeutlicht die Beckengeometrie.

Die Schlammtrichter befinden sich unterhalb der Einlaufkonstruktion. Der von den Schildräumern in die Trichter beförderte Schlamm sammelt sich dort und wird über zwei Rohre mit einem Durchmesser von 0,2 m abgepumpt. Der Klarwasserabzug erfolgt über eine Zahnschwelle, die die letzten 20 m des Beckens umgibt und im hinteren Teil

zwei Einbuchtungen aufweist, so dass sich die Gesamtlänge der Zahnschwelle zu 61 m ergibt.

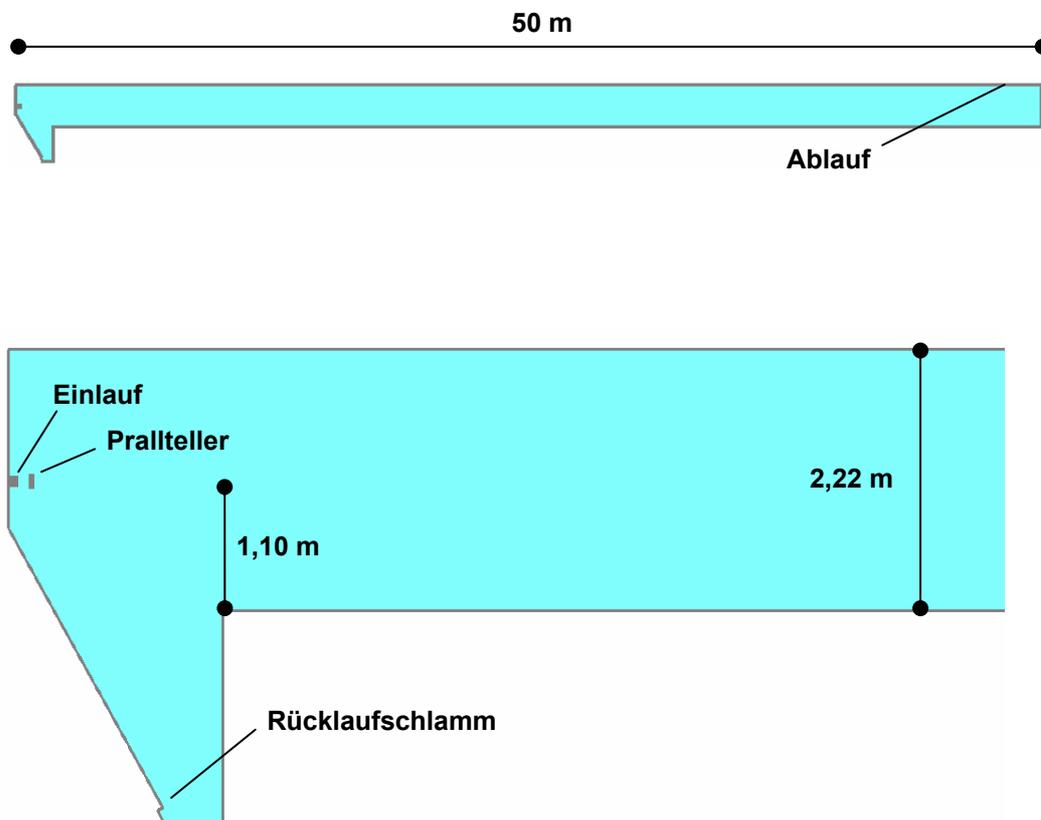


Abbildung 5.1: Schnitt durch das Nachklärbecken der Kläranlage Kierspe

Der maximale Zufluss zur Kläranlage beträgt im Regenwetterfall $Q_m = 115$ l/s und stellt somit den kritischen hydraulischen Zustand für die biologische Stufe im Allgemeinen und für die Nachklärung im Speziellen dar. Die Einhaltung des maximalen Zuflusses wird durch vorgeschaltete Regenrückhaltebecken mit entsprechender Drosselung erreicht. Im Trockenwetterfall sinkt der Zufluss auf $Q = 40$ l/s. Die Rücklaufschlammmenge liegt bei konstant $Q_{RS} = 80$ l/s. Alle Werte beziehen sich zusammengenommen auf beide Becken, so dass die Werte bei Betrachtung von nur einem Becken halbiert werden müssen. Im Belebungsbecken liegt eine relativ geringe Feststoffkonzentration von nur $TS_{BB} = 2,4$ g/l vor, die somit den beiden Nachklärbecken zufließt.

Während der Messphase vom 12.-16. März 2001 lag Regenwetter vor, so dass der Zufluss zur Kläranlage über den gesamten Zeitraum relativ nahe an der Kläranlagenkapazität lag und dabei nur geringen Schwankungen in der Tagesganglinie

unterlag. Tabelle 5.1 fasst die Randbedingungen während dieser Messphase, die somit auch gleichzeitig die Randbedingungen für das numerische Modell darstellen, zusammen.

Tabelle 5.4: Randbedingungen während der Messungen und für das numerische Modell

Betriebsdaten	Messphase 12.-16.03.2001
Q_{BB}	100 l/s
q_A	1,44 m/h
TS_{BB}	2,4 g/l
Q_{NKB} (je Becken)	90 l/s
Q_{RS} (je Becken)	40 l/s
Q_{AN} (je Becken)	50 l/s
ISV	58 ml/g

Bereits im Jahr 2001 wurden im Rahmen eines vom Ruhrverband, Essen, in Auftrag gegebenen Projektes zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Verfahrensstabilität des Nachklärbeckens Kierspe (Krebs und Hunze 2003) zwei- und dreidimensionale Modellrechnungen am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover (Schumacher 2001) durchgeführt. Das verwendete Modell von Hunze und Schumacher (siehe auch Kapitel 3.1) sowie die Erfahrungen aus dem Vergleich der gemessenen und simulierten Daten stellten die Grundlage für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell dar.

Insbesondere zu der in Kapitel 3.3.1 aufgezeigten Abwägung zwischen Elementanzahl und Netzweite konnten hinsichtlich der Notwendigkeit einer dreidimensionalen Simulation wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. So konnten zwar im Nahbereich des Einlaufes sowohl in den Messungen als auch in den dreidimensionalen Berechnungen deutlich dreidimensionale Strömungsstrukturen nachgewiesen werden, die in den zweidimensionalen Rechnungen nicht wiedergegeben werden konnten. Bereits ab einer Entfernung von nur 5 m vom Einlauf ergaben jedoch auch die zweidimensionalen Ergebnisse eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den gemessenen Werten.

Aufgrund der großen Bedeutung der Netzweite für den Schlammtransport (siehe auch Kapitel 3.4) wurde im Rahmen dieser Arbeit auf dreidimensionale Rechnungen verzichtet und mit einem im Vergleich zu den damaligen Studien noch feineren zweidimensionalen Netz gerechnet. Darüber hinaus wurden die Weiterentwicklungen und Erfahrungen insbesondere hinsichtlich der Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit und der Rheologie implementiert, so dass das hier angewendete Modell dem in Kapitel 3 vorgestellten entspricht. Eine Abweichung besteht lediglich in den

verwendeten zweidimensionalen Ansätzen. Da es sich bei dem Nachklärbecken Kierspe um eine rechteckige Bauform handelt, wurde kein achsensymmetrischer, sondern ein breitengemittelter zweidimensionaler Ansatz verwendet.

5.1.1 Simulation und Messung

In den folgenden Abbildungen 5.2 – 5.7 werden wie im vorherigen Kapitel 4 zunächst die Ergebnisse der Simulation in Isoflächen- und Vektoransicht dargestellt, um dem Leser einen Eindruck von den Systemverhältnissen im Becken zu geben. Im Anschluss erfolgt zur Demonstration der Modellgüte der Vergleich zwischen gemessenen Daten und simulierten Werten. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach 9 h instationär simulierter Echtzeit mit oben angegebenem, konstantem Zufluss. Die Ergebnisse werden aufgrund der lang gezogenen Beckengeometrie dreifach überhöht dargestellt.

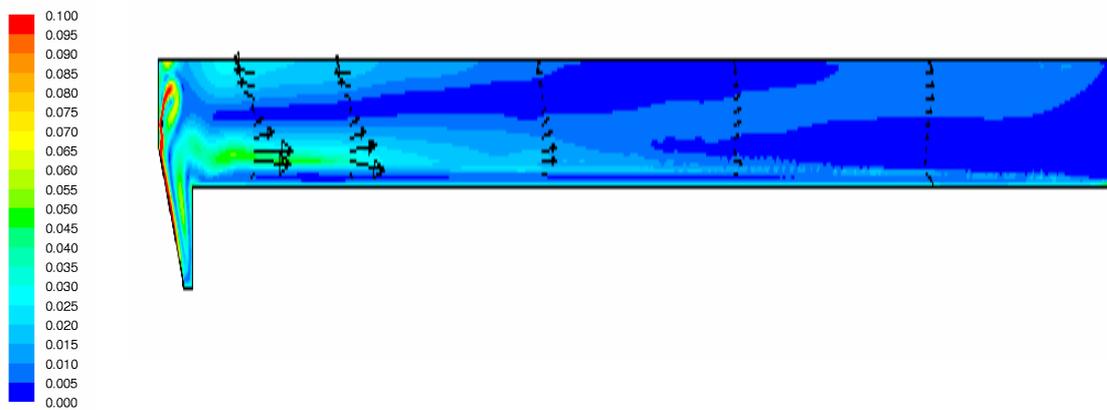


Abbildung 5.2: Geschwindigkeitsverteilung [m/s]

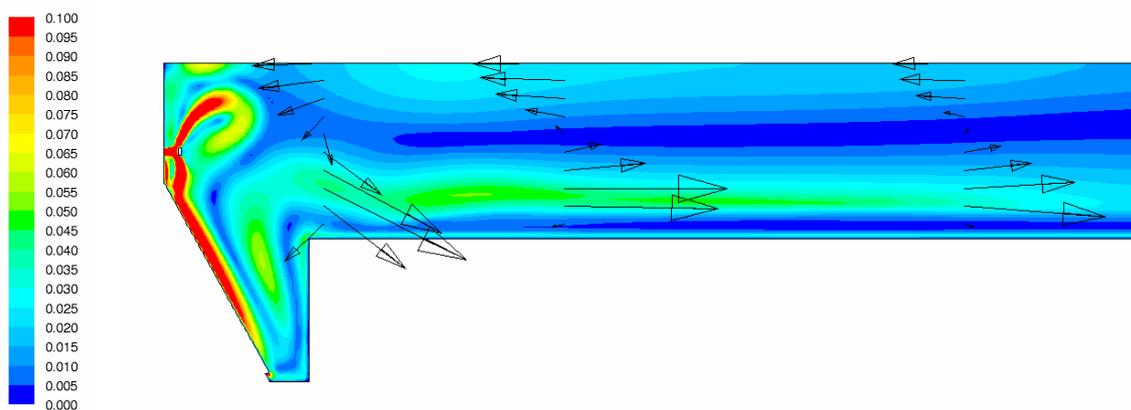


Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - Einlaufbereich



Abbildung 5.4: Schlammverteilung [g/l]

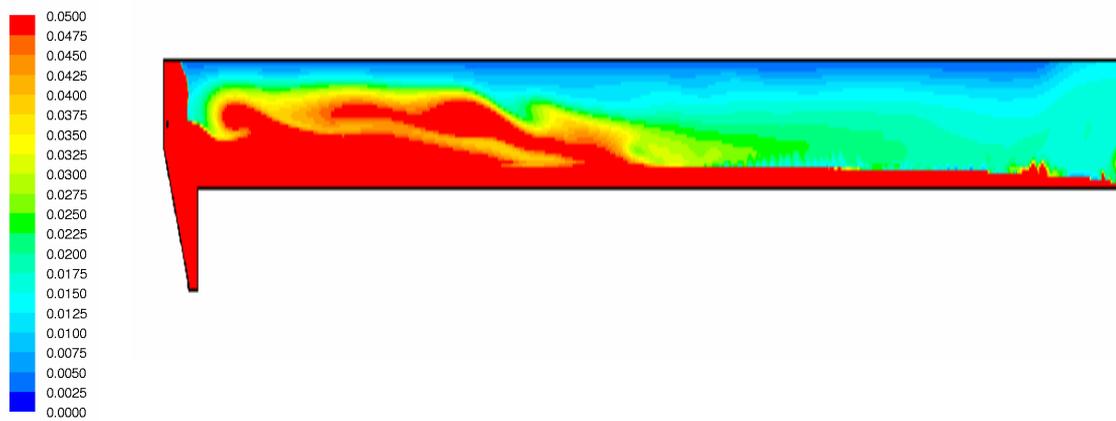


Abbildung 5.5: Schwebstoffverteilung [g/l]

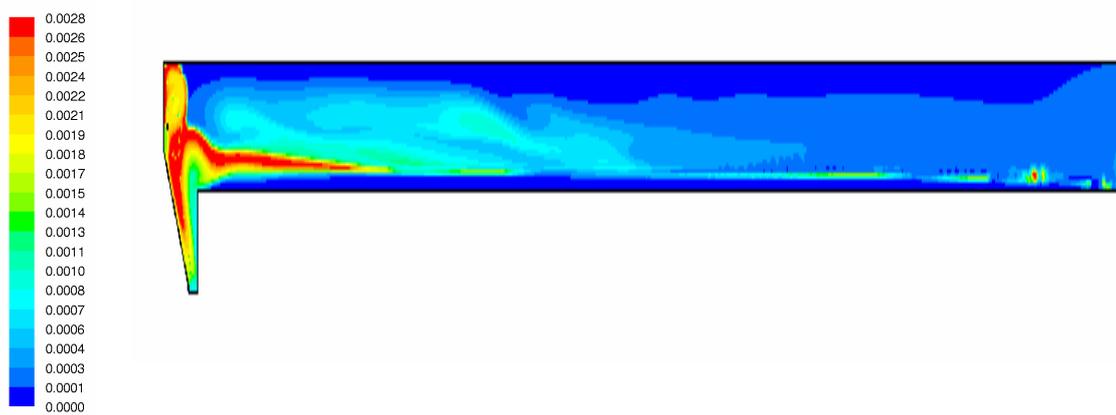


Abbildung 5.6: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s]

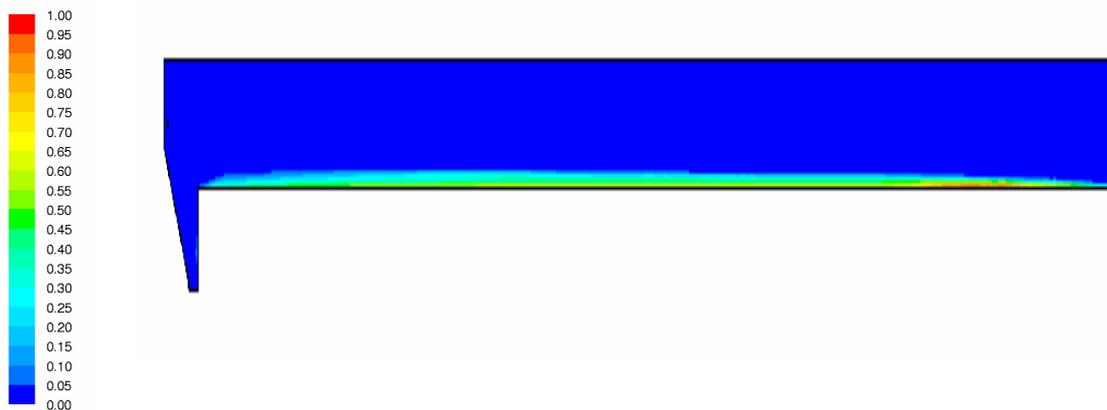


Abbildung 5.7: Verteilung der Viskosität [Ns/m²]

In der Detailansicht des Einlaufbereiches (Abbildung 5.3) ist die ungünstige Auswirkung eines Stengeleinlaufes mit Pralltellern auf die Beckenhydraulik deutlich zu erkennen. Zum einen ist das große Maß an eingetragener kinetischer Energie in Form der hohen Einlaufgeschwindigkeiten und des daraus resultierenden Strahlimpulses gut zu beobachten. Die densimetrische Froudezahl ergibt sich bei dieser Einlaufkonfiguration nach Gleichung 2.9 zu $Fr_d = 20$ und liegt somit weit oberhalb des energetischen Optimums. Zum anderen wird der Einlaufstrahl durch die Anordnung der Prallteller allseits abgelenkt, und es kommt in Folge dessen im Einlaufbereich zu einer fast vollständigen Verwirbelung der Feststoffe über die gesamte Beckenhöhe. Darüber hinaus verursacht der nach unten abgelenkte Teil des Einlaufstrahles eine Kurzschlussströmung in den Schlammtrichter. Zu erwähnen gilt es, dass es sich hierbei um hochgradig dreidimensionale Strömungsstrukturen handelt, die in einer zweidimensionalen Simulation nur eingeschränkt wiedergegeben werden können.

Im weiteren Verlauf des Beckens (Abbildung 5.2) bildet sich oberhalb des konsolidierten Schlammбетtes der Jet aus. Ungefähr bis zur Beckenmitte ist die nachklärbeckentypische Walzenströmung zu erkennen. In der hinteren Beckenhälfte löst sich der Jet auf, und es kommt zu einer Vergleichmäßigung der Strömung über die Tiefe, die nunmehr über den gesamten Beckenquerschnitt mit einer geringen Geschwindigkeit dem Auslauf zufließt.

In Abbildung 5.4 und insbesondere in Abbildung 5.5 sind die Folgen der ungünstigen Einlaufgestaltung auf die Feststoffverteilung im Becken gut zu erkennen. Bis zur Beckenmitte ist kaum eine nennenswerte Klarwasserzone auszumachen, und auch im weiteren Verlauf des Beckens sinken die Schwebstoffteilchen bis hin zum Auslauf trotz der langen Fließstrecke nicht mehr ausreichend ab. Obwohl das Nachklärbecken die gesetzlich geforderten Ablaufwerte einhält, kann in diesem Fall nicht von einer optimalen Betriebsweise und einem Erreichen der maximalen Leistungsfähigkeit des Beckens ausgegangen werden.

In den folgenden Abbildungen 5.8 bis 5.15 werden, wie schon in Kapitel 4, die berechneten mit den gemessenen Werten verglichen. Es gilt dabei wieder die Vereinbarung, dass nach Abbildung 4.8 die gemessenen Werte mit einer gestrichelten Linie und die berechneten Werte mit einer durchgezogenen Linie dargestellt werden. Der Vergleich der Horizontalgeschwindigkeiten und der Feststoffverteilung erfolgt in Profilen in 5 m, 10 m, 20 m und 30 m Entfernung vom Einlauf.

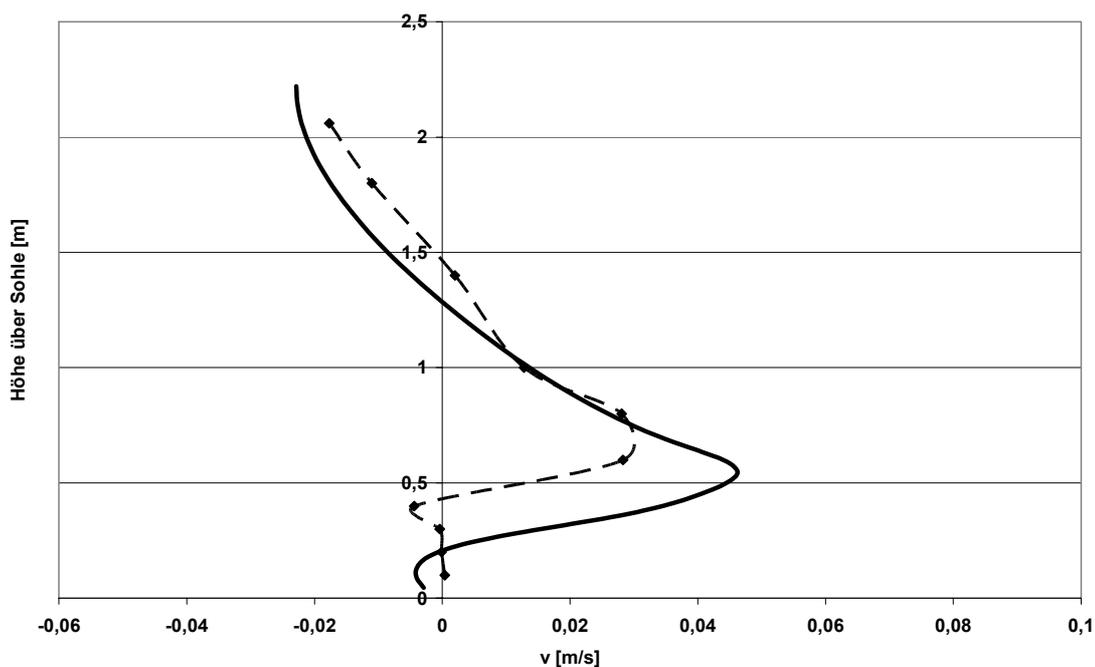


Abbildung 5.8: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 5 m vom Einlauf

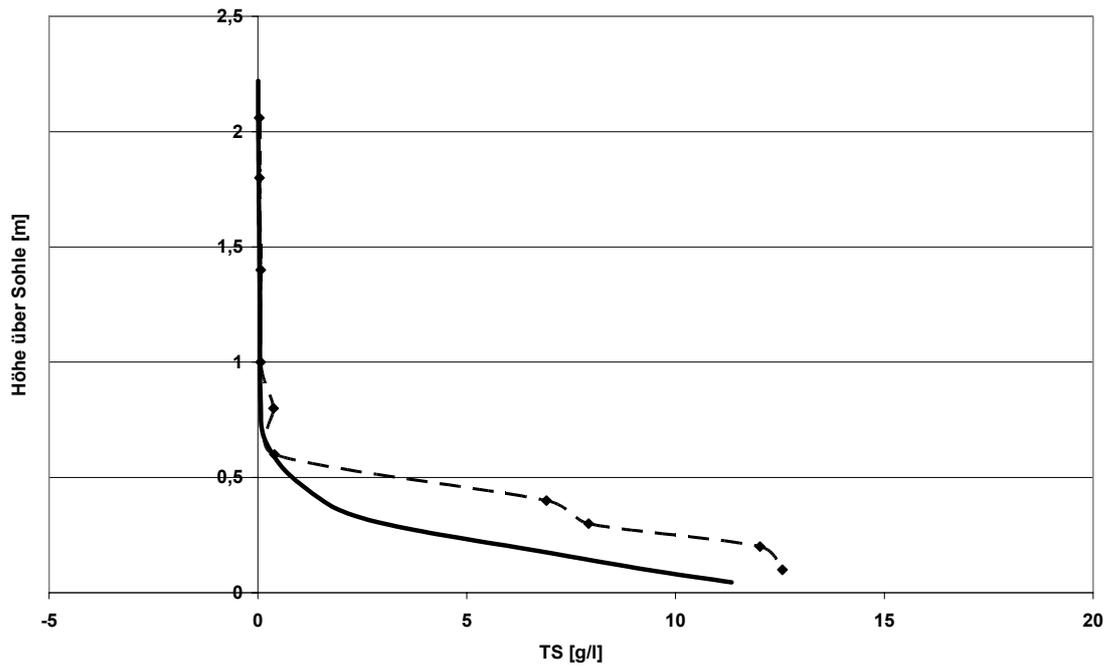


Abbildung 5.9: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 5 m vom Einlauf

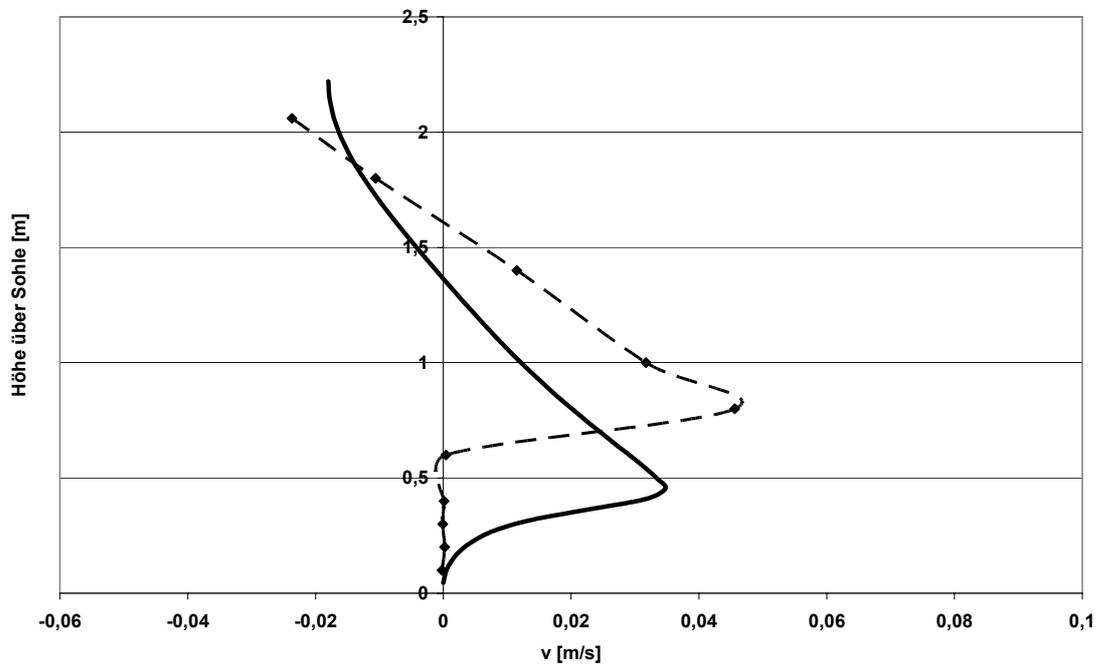


Abbildung 5.10: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 10 m vom Einlauf

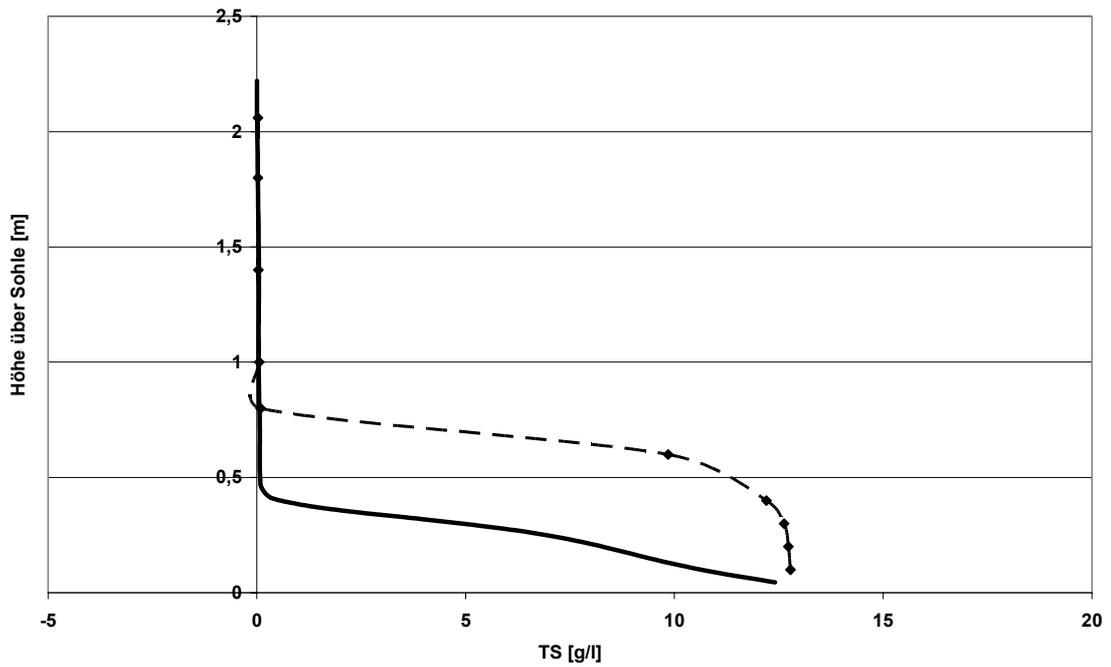


Abbildung 5.11: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 10 m vom Einlauf

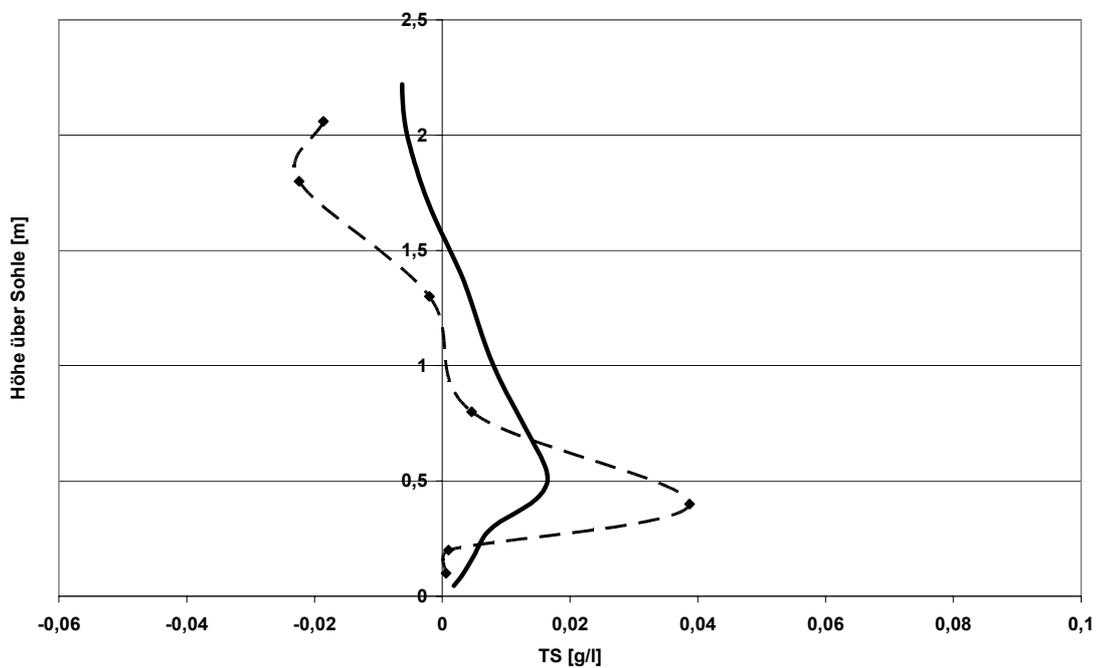


Abbildung 5.12: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 20 m vom Einlauf

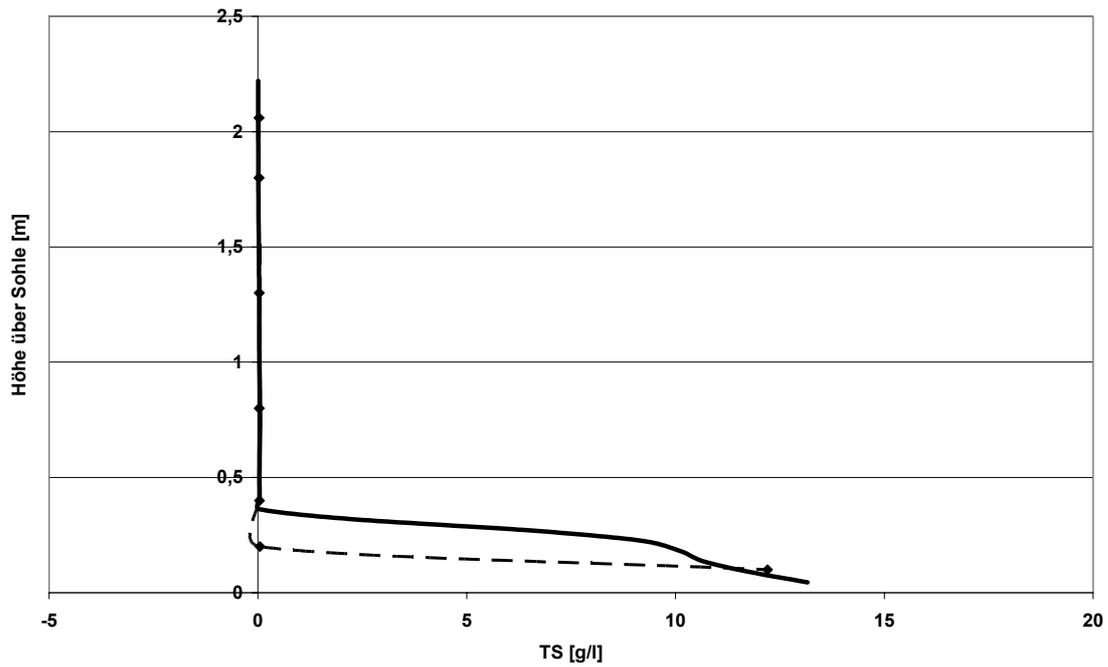


Abbildung 5.13: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 20 m vom Einlauf

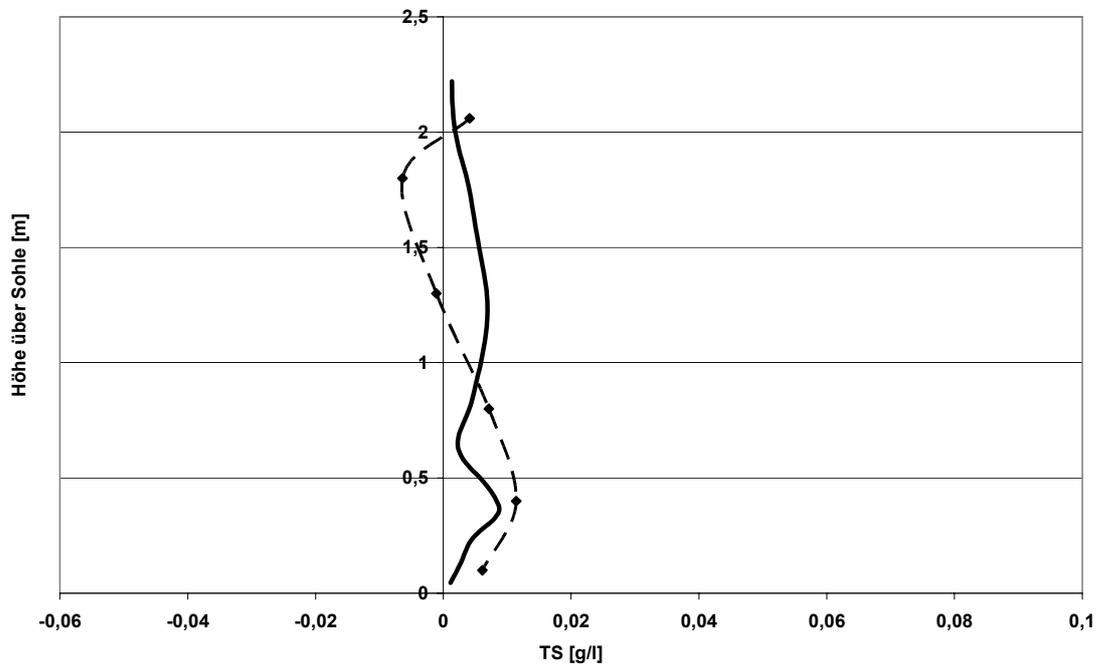


Abbildung 5.14: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 30 m vom Einlauf

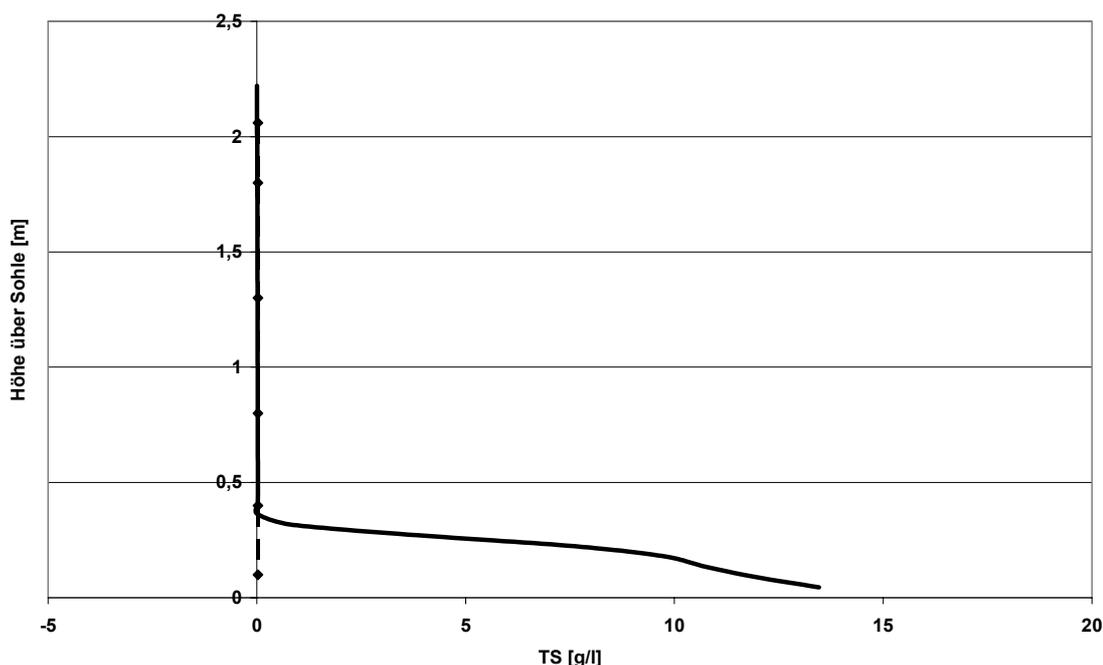


Abbildung 5.15: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 30 m vom Einlauf

In einer Entfernung von 5 m vom Einlauf entfernt, stimmen die gemessenen mit den simulierten Werten, den Erwartungen und den Unterschieden zwischen dreidimensionalen Strömungsstrukturen und zweidimensionaler Simulation Rechnung tragend, entsprechend gut überein. In einer Entfernung von 10 m bzw. 20 m vom Einlauf entfernt, zeigen sich hingegen deutliche Unterschiede. Offensichtlich lagert sich der Schlamm in der Realität schon in der ersten Beckenhälfte ab, bildet dort ein deutlich höheres Schlammbett aus als in der Simulation und wird nicht durch das ganze Becken bis in den hinteren Teil transportiert. Dieses Differenzen zeigten sich auch in den zwei- und dreidimensionalen Simulationen des Jahres 2001, so dass aufgrund dieser Erfahrungen die Abweichungen nicht auf den Vereinfachungen, die auf einem zweidimensionalen Ansatz basieren, zurückzuführen sind.

Auch wenn diese Unterschiede in der Ausbildung des Schlammbettes kaum Auswirkungen auf die Aussagekraft des Modells hinsichtlich der Fragestellung einer Einlaufoptimierung, der daraus resultierenden Schwebstoffverteilung und der letztendlichen Ablaufqualität haben, ist die Modellgüte unbefriedigend und die Frage nach der Ursache dieser Unterschiede nahe liegend. Zum einen ist hierbei eine fehlerhafte Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit als mögliche Ursache der Abweichungen in der Schlammverteilung zu benennen. Da im Zuge der Messungen jedoch auch umfangreiche Untersuchungen der Absetzgeschwindigkeiten durchgeführt wurden, ist die Möglichkeit für Abweichungen hieraus – bis auf die in Kapitel 3.3.4 aufgeführten Fehlerquellen – relativ begrenzt.

Zum anderen ist aus einer natürlichen Selbstverständlichkeit heraus die Fließfähigkeit des Schlammes selbst für seine Verteilung im Becken von hervorgehobener Bedeutung. Genau in diesem Punkt gab es im vorliegenden Fall jedoch keinerlei Untersuchungen hinsichtlich des viskosen Verhaltens des belebten Schlammes auf der Kläranlage Kierspe und da sich auch leider zu keinem späteren Zeitpunkt die Möglichkeit ergab, diese Messungen zur Parameterbestimmung nach Kapitel 3.3.5 nachzuholen, musste somit auf die vorliegenden Daten der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück zurückgegriffen werden. In Folge dessen blieb lediglich die Möglichkeit, die Sensitivität der Schlammverteilung bezüglich der Fließeigenschaften über eine Parameterstudie aufzuzeigen, den Nachweis der Modellgüte zu vervollständigen und mit den entsprechenden Einschränkungen die Rheologieparameter invers zu bestimmen.

5.1.1.1 Parameterstudie zur Rheologie

Nachfolgende Tabelle 5.2 gibt einen Überblick über die Bandbreite der untersuchten Parameterwerte. Die sensitiven Parameter des bi-linearen Ansatzes nach Kapitel 3.3.5 sind β_1 und β_3 , die zur besseren Vergleichbarkeit auf 1 normiert wurden. Eine Erhöhung des Parameters β_1 vergrößert dabei die Steigung in der Strukturschubspannung, also der ersten Gerade, und eine Erhöhung des Parameters β_3 erhöht die imaginäre Fließgrenze. Die Steigung der zweiten Gerade, also der Konsistenzschubspannung, ist in dem für Nachklärbecken relevanten Schergradientenbereich für die Schlammverteilung im Becken nur von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 5 .5: Untersuchte Rheologieparameter (normiert)

	β_1	β_3
Parameter Rheda-Wiedenbrück	1	1
Studie 1	8	1
Studie 2	80	1
Studie 3	80	13
Studie 4	160	26
Studie 5	40	6,5
Studie 6	8	6,5

Die folgenden Abbildungen 5.16 bis 5.27 zeigen im Vergleich zu den Abbildungen 5.4 und 5.7 die aus den Parameterstudien resultierende Schlammverteilung im Becken sowie die zugehörigen Viskositäten. Aufgrund der großen Bandbreite der Viskositätswerte ist in der Darstellung der Ergebnisse die Skalierung jeweils angepasst.

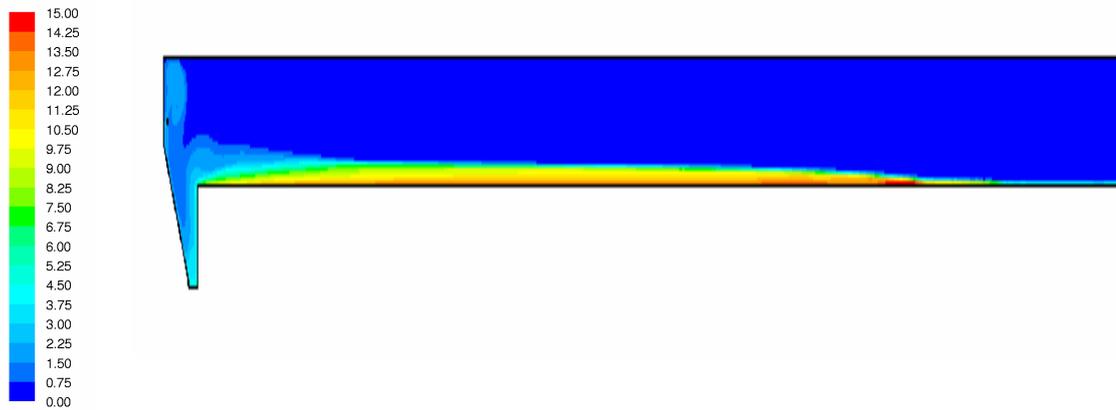


Abbildung 5.16: Schlammverteilung [g/l] – Studie 1

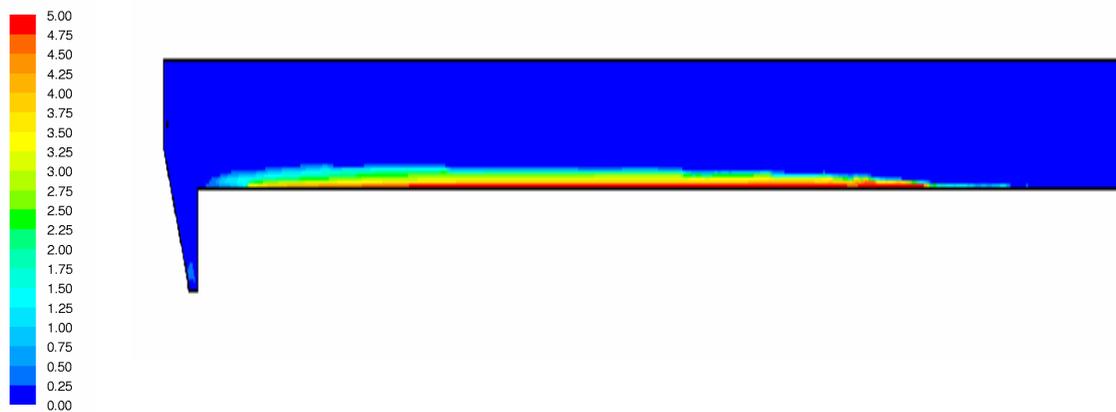


Abbildung 5.17: Verteilung der Viskosität [Ns/m²] – Studie 1

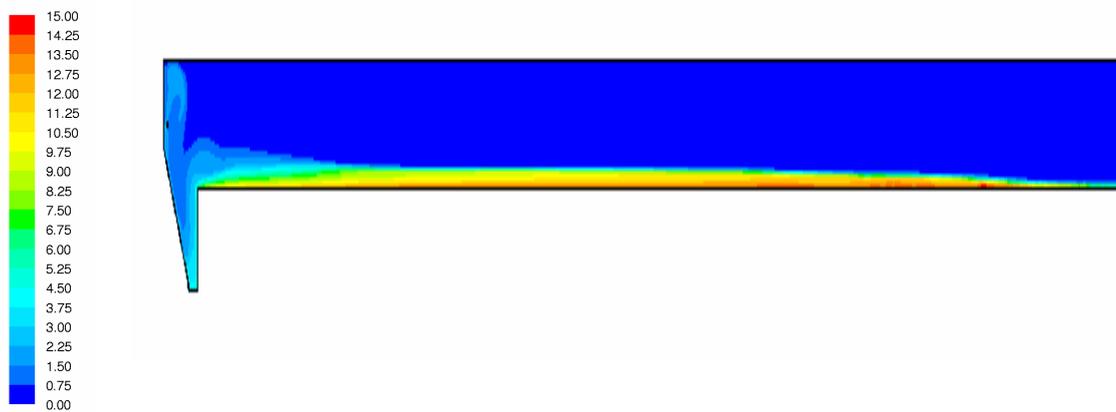


Abbildung 5.18: Schlammverteilung [g/l] – Studie 2

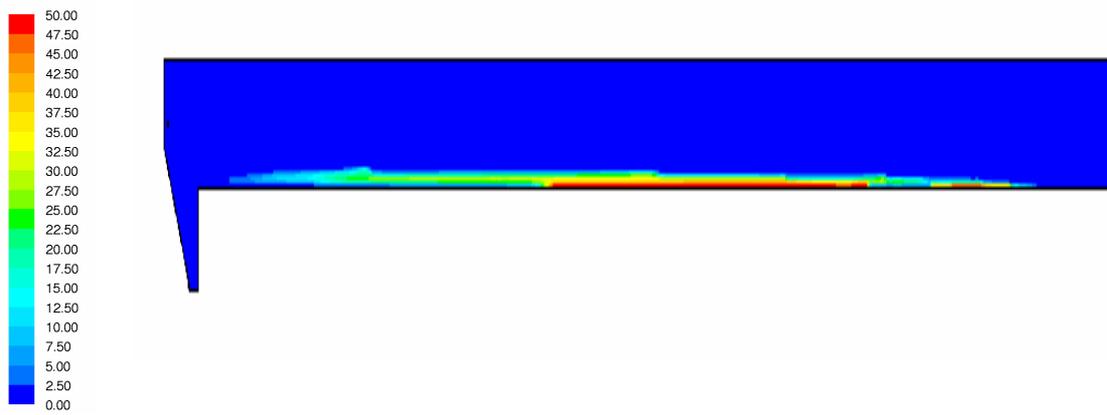


Abbildung 5.19: Verteilung der Viskosität $[\text{Ns/m}^2]$ – Studie 2

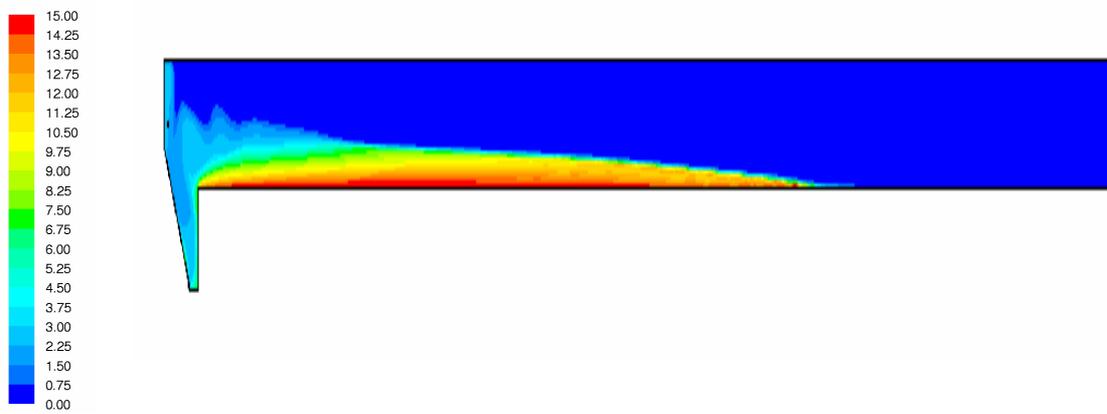


Abbildung 5.20: Schlammverteilung $[\text{g/l}]$ – Studie 3

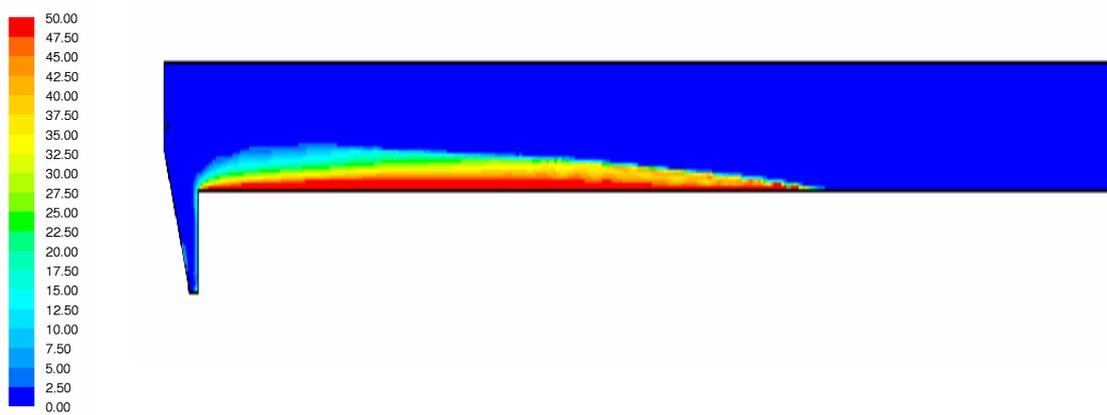


Abbildung 5.21: Verteilung der Viskosität $[\text{Ns/m}^2]$ – Studie 3

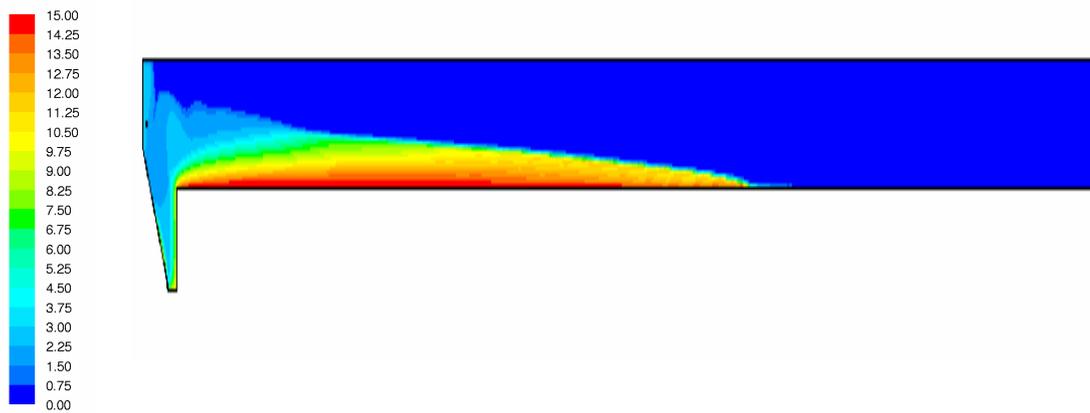


Abbildung 5.22: Schlammverteilung [g/l] – Studie 4

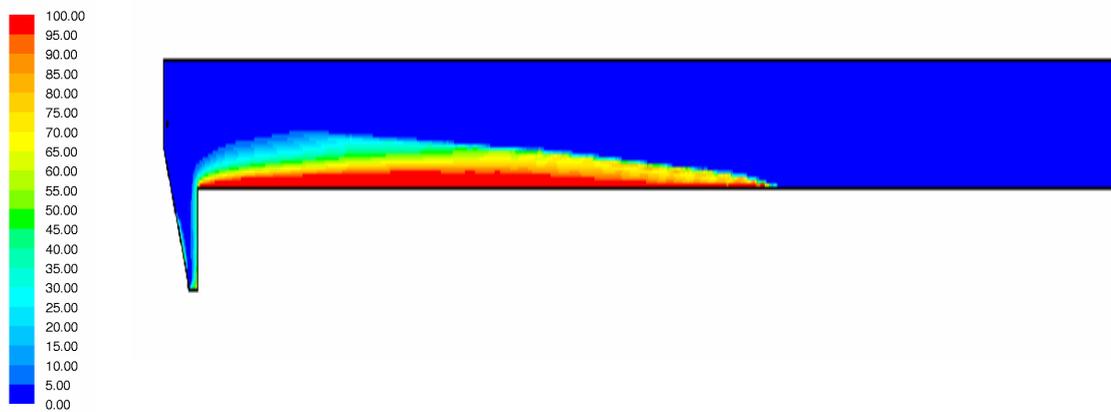


Abbildung 5.23: Verteilung der Viskosität [Ns/m²] – Studie 4

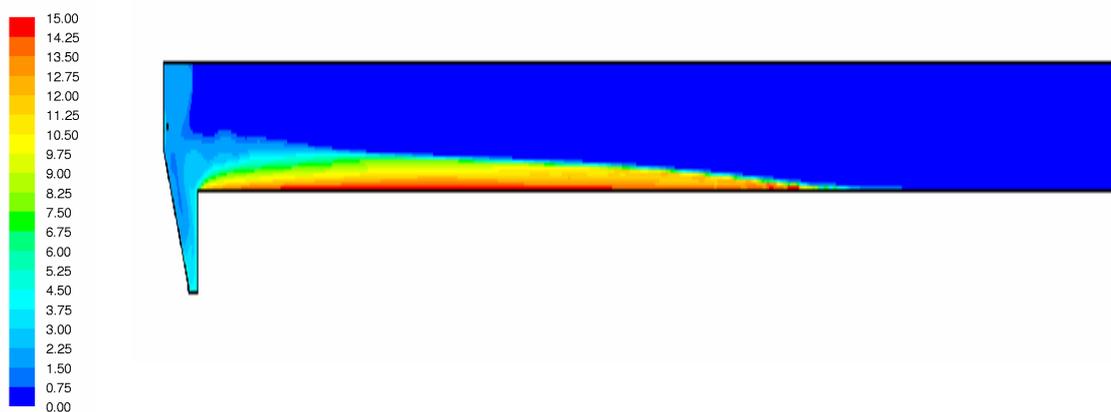


Abbildung 5.24: Schlammverteilung [g/l] – Studie 5

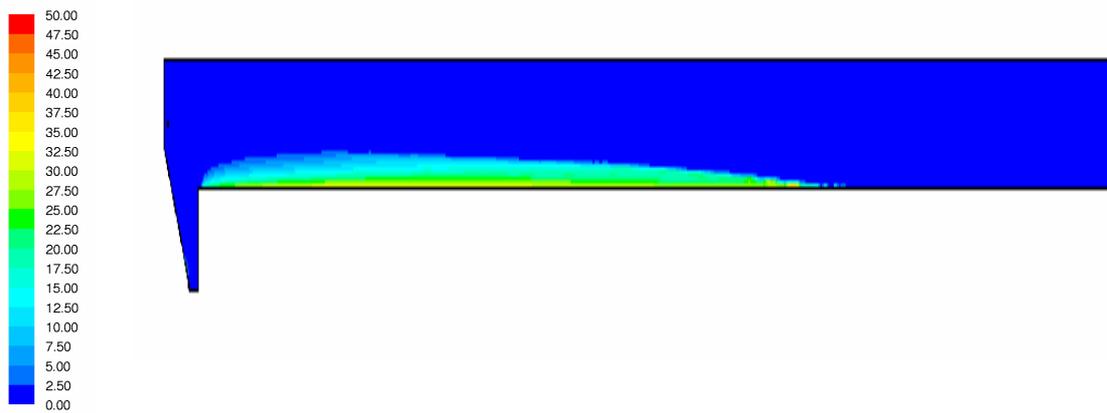


Abbildung 5.25: Verteilung der Viskosität $[\text{Ns/m}^2]$ – Studie 5

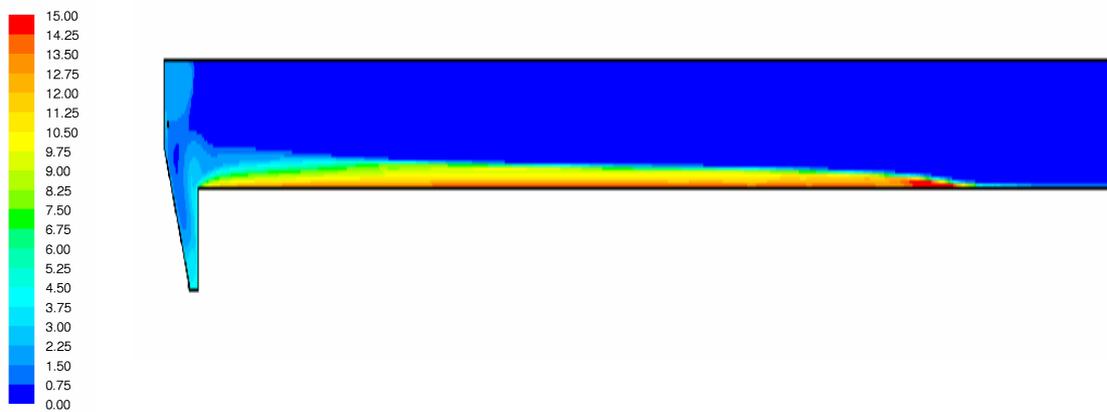


Abbildung 5.26: Schlammverteilung $[\text{g/l}]$ – Studie 6

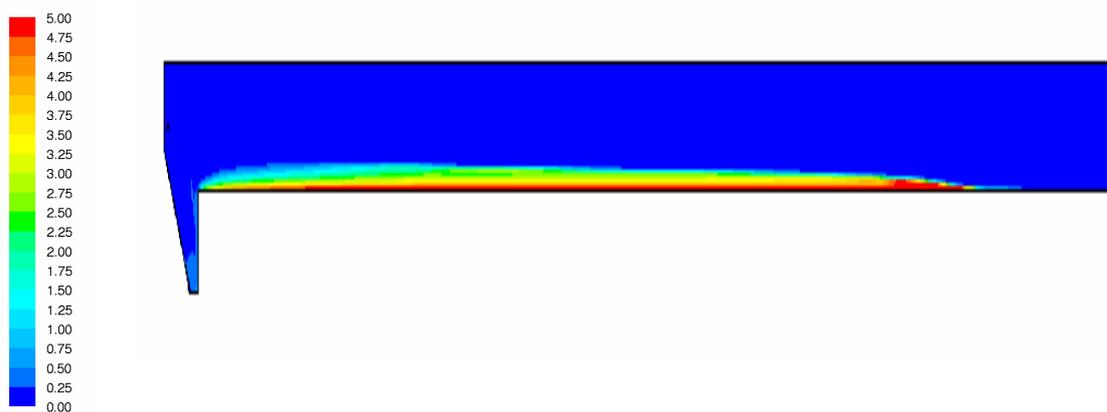


Abbildung 5.27: Verteilung der Viskosität $[\text{Ns/m}^2]$ – Studie 6

In den Ergebnissen der verschiedenen Studien sind deutliche Unterschiede in der Schlammverteilung aufgrund der veränderten Fließfähigkeit des Schlammes zu

erkennen. Offensichtlich sind dabei sowohl der Gradient in der Strukturschubspannung wie auch die Höhe der Fließgrenze, die durch eben diese Strukturschubspannung aufgelöst wird, für die Intensität des Schlammtransportes im Becken von hervorgehobener Bedeutung. Das heißt, dass die gesamte Ausbildung des Schlammбетtes im Wesentlichen im Scherbereich zwischen 0 1/s und 1 1/s abläuft und gerade hier, in dem in nahezu allen bisherigen Viskositätsansätzen für Nachklärbeckenmodelle vernachlässigten bzw. vereinfacht idealisierten Bereich, die rheologischen Eigenschaften des Wasser-Schlamm-Gemisches von immenser Bedeutung sind.

Neben der korrekten Modellierung dieses sensitiven Bereiches ist darüber hinaus auch die jeweilige Messung der Parameter als Eingangsgröße für das Modell anzustreben. Insbesondere der deutlich steifere Schlamm des Nachklärbeckens Kierspe weicht stark von dem als eher durchschnittlich zu bezeichnenden Schlamm der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück ab. Da es keine verlässliche Korrelation zwischen Schlammparametern und Rheologieparametern gibt und im Vorfeld modelltechnischer Untersuchungen keine Abschätzung bezüglich der viskosen Eigenschaften des Schlammes möglich ist, bleibt für eine hochwertige und verlässliche Nachklärbeckensimulation nur die dringende Empfehlung, die rheologischen Schlammereigenschaften zu messen und aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Schlammverteilung realitätsnah zu modellieren.

In einem Vergleich zwischen gemessener und in den Studien simulierter Schlammverteilung zeigen die Studien 3 und 5 die beste Übereinstimmung, so dass in Abbildung 5.28 die Schubspannungen dieser Studien und in Abbildung 5.29 die resultierende Feststoffkonzentration 10 m vom Einlauf entfernt gezeigt werden sollen.

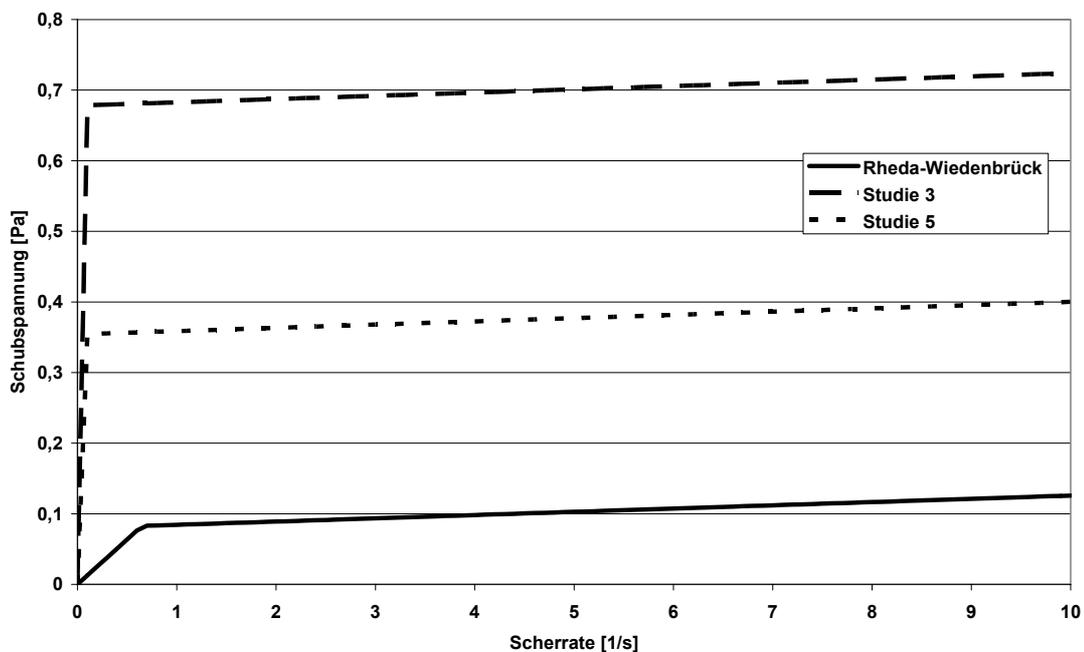


Abbildung 5.28: Vergleich der Schubspannungen in den Parameterstudien bei einer TS-Konzentration von 6 g/l

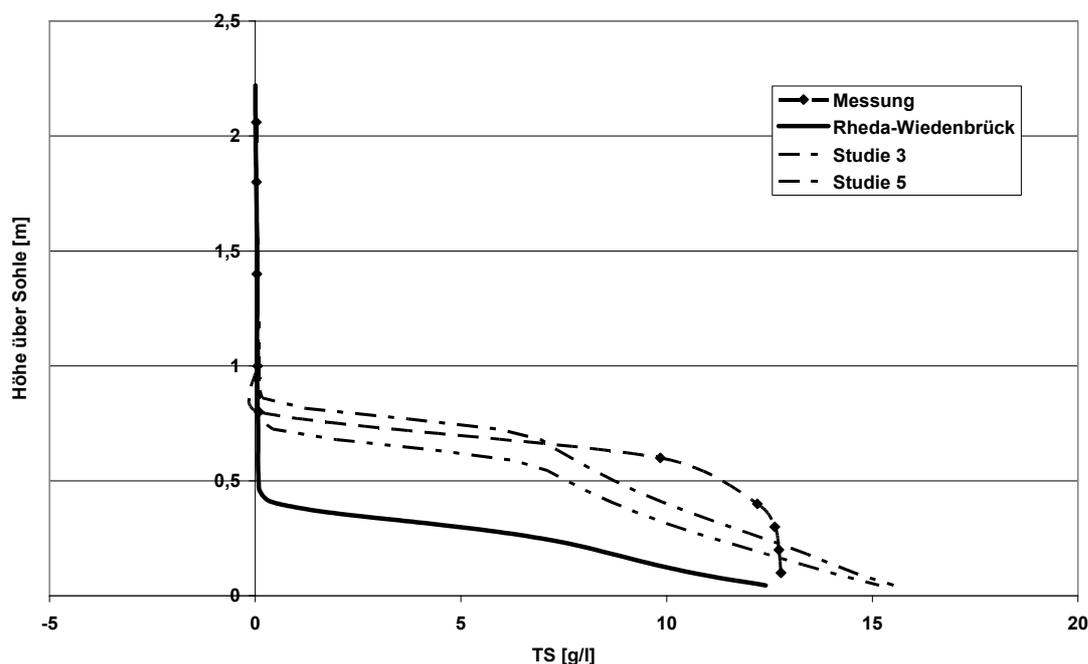


Abbildung 5.29: Vergleich der Feststoffverteilung in den einzelnen Parameterstudien – 10 m vom Einlauf entfernt

Wie Abbildung 5.29 zeigt, ist durch eine Anpassung der Rheologieparameter eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Feststoffprofilen erreichbar. Da keine verlässlichen Messungen bezüglich eben dieser Parameter vorliegen, muss die Überprüfung der Modellgüte an dieser Stelle mit dem Fazit enden, dass bei einer korrekten Bestimmung der Randbedingungen – und hier insbesondere der Sinkgeschwindigkeit und der rheologischen Eigenschaften – das Modell realitätsnahe Ergebnisse berechnet.

5.1.2 Optimierung des Einlaufbauwerkes

Wie schon zuvor in der Beschreibung der Ergebnisse des Ist-Zustandes dargelegt, liegt die densimetrische Froudezahl mit $Fr_d = 20$ weit vom energetischen Optimum für Dichteströmungen mit $Fr_d = 1$ entfernt. Eine Optimierung des Einlaufbauwerkes muss also zum einen über eine kontrollierte Energieumwandlung die in das Nachklärbecken eingetragene Energie minimieren. Zum anderen sollte im Rahmen des vom Ruhrverband, Essen, in Auftrag gegebenen Projektes das Einlaufbauwerk in der Optimierungsvariante zusätzlich als Flockungsreaktor wirken.

Aus beiden Forderungen heraus wurden von den Projektbeteiligten drei unterschiedliche Einlaufkonstruktionen entwickelt, die in Simulationsrechnungen miteinander verglichen wurden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde letztendlich die in Abbildung 5.30 dargestellte Optimierungsvariante zur baulichen Umsetzung bestimmt. Mit der Höhe

des Einlaufschlitzes von 0,35 m wird die densimetrische Froudezahl zu $Fr_d = 1$. Die Einlaufhöhe stellt mit 0,5 m die aufgrund der Schildräumerhöhe konstruktiv geringst mögliche Höhe dar und sollte somit beim relevanten Mischwasserfall nicht weit oberhalb des Schlammspiegels liegen. Krebs et al. (1995) empfehlen für eine gute Wirkung des Einlaufbauwerkes als Flockungsreaktor eine Aufenthaltszeit von mindestens 5 Minuten bei Maximalzufluss. Das sich daraus ergebende Einlaufvolumen war ebenfalls aus räumertechnischen Gründen konstruktiv nicht umsetzbar und liegt in der jetzigen Form ungefähr bei der halben Größe.

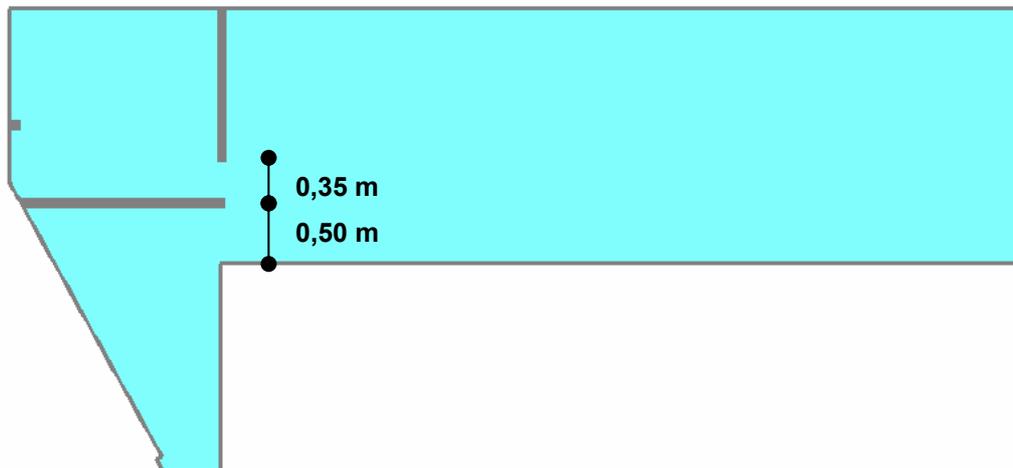


Abbildung 5.30: Geometrie der Einlaufoptimierung nach Krebs (2001)

In den folgenden Abbildungen 5.31 bis 5.36 werden wie zuvor die Ergebnisse dieser Optimierungsvariante in Isoflächen- und Vektoransicht gezeigt, um im Vergleich zu den Ergebnissen des Ist-Zustandes das Potenzial in der Leistungssteigerung aufzuzeigen und zu diskutieren. Auch hier werden die Ergebnisse aufgrund der lang gezogenen Beckengeometrie dreifach überhöht dargestellt.

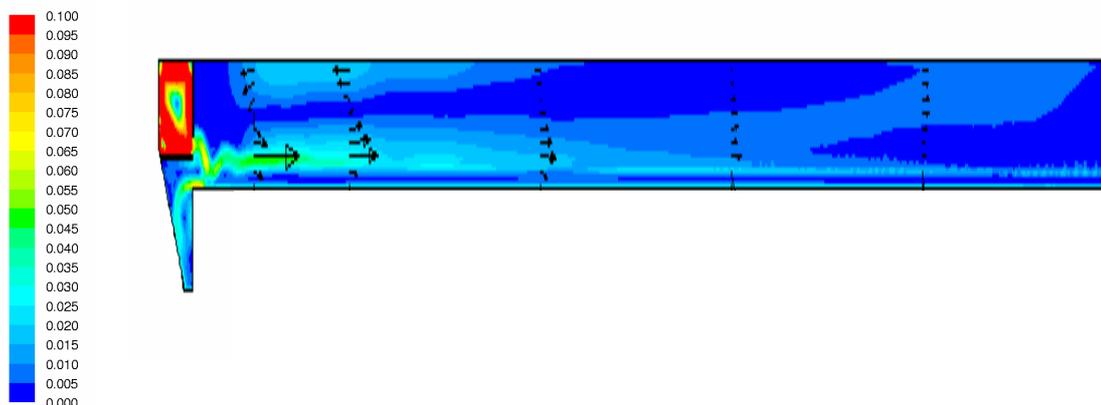


Abbildung 5.31: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Optimierung

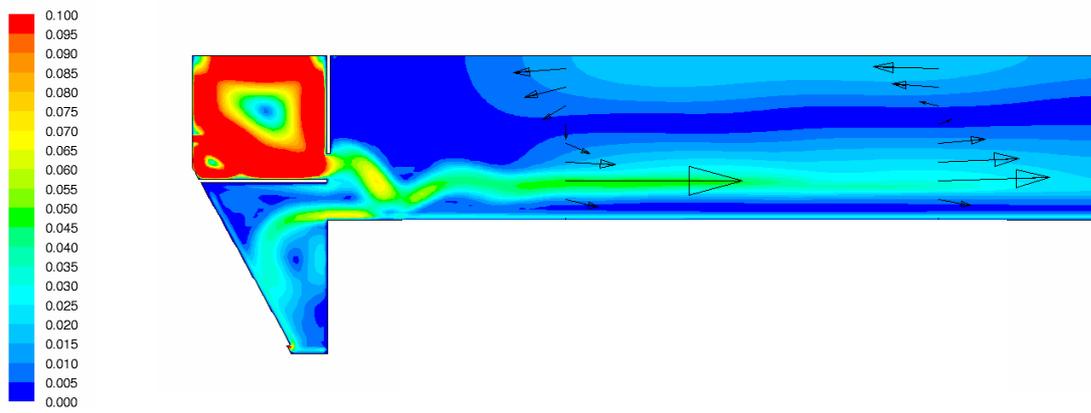


Abbildung 5.32: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Einlaufbereich – Optimierung

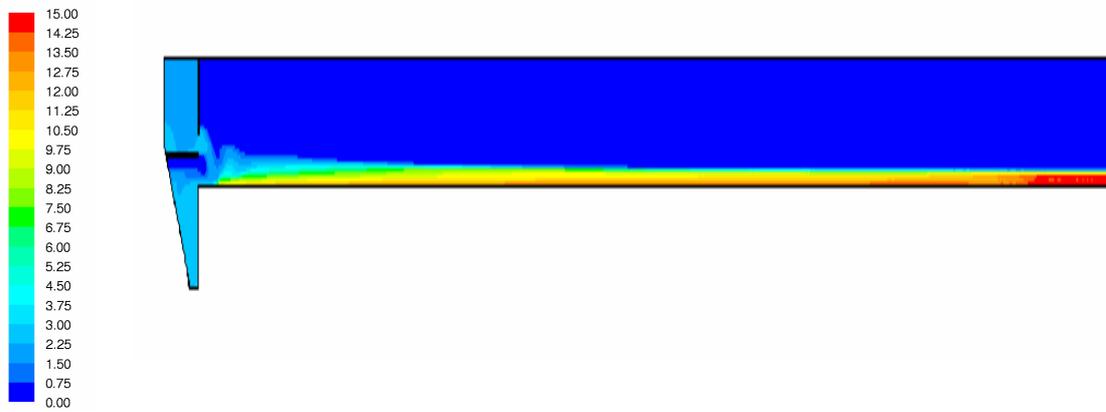


Abbildung 5.33: Schlammverteilung [g/l] – Optimierung

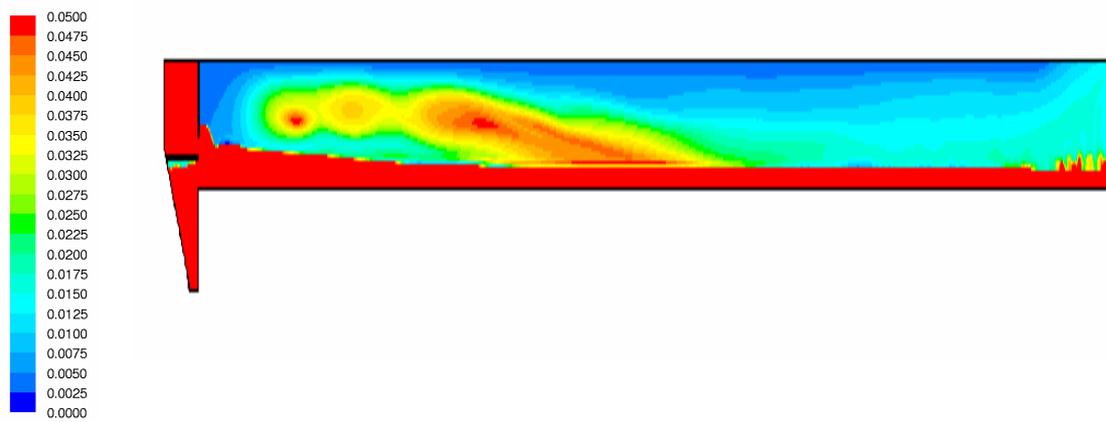


Abbildung 5.34: Schwebstoffverteilung [g/l] – Optimierung

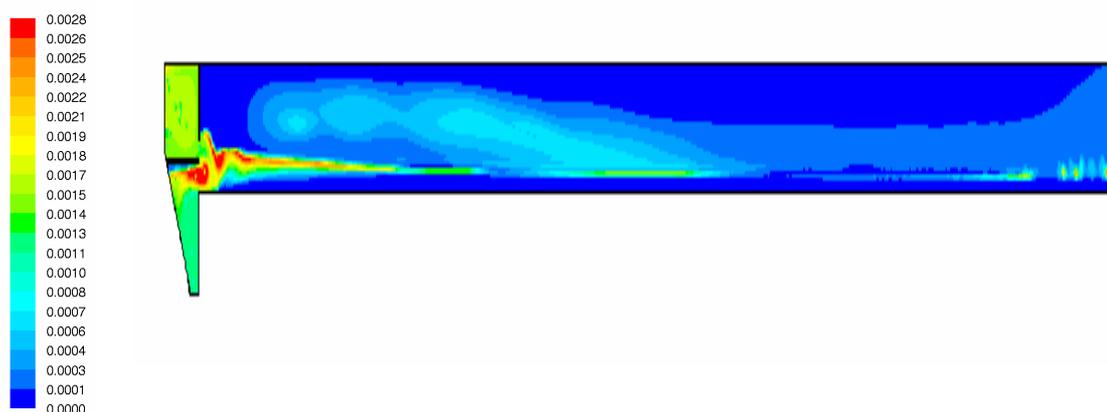


Abbildung 5.35: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] – Optimierung

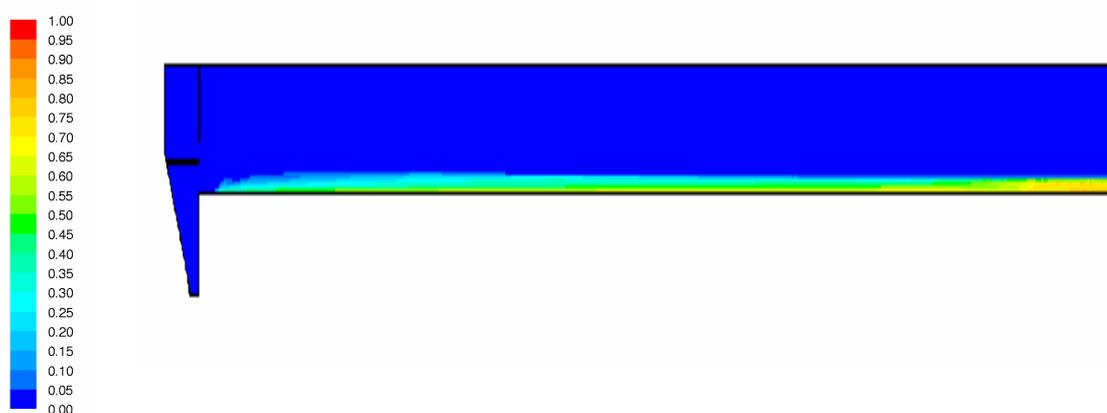


Abbildung 5.36: Verteilung der Viskosität [Ns/m²] – Optimierung

Wie insbesondere in Abbildung 5.32 im Vergleich zu Abbildung 5.3 deutlich zu erkennen ist, findet in der Optimierungsvariante die Energiereduktion kontrolliert in dem neu geschaffenen Einlaufbauwerk statt. Die leistungsbestimmenden Prozesse im Nachklärbecken, die durch einen zu hohen Energieeintrag signifikant gestört werden, können in der Folge dieser Entkopplung nun ungestörter ablaufen. Zwar zeigt sich im Aufbau des Schlammбетtes und in der Wellenbewegung im Einlaufbereich, dass aufgrund der Nähe der Einleitung zum Schlammtrichter und die immer noch zu große Höhenlage des Einlaufes die gezeigte Variante nicht das theoretische Optimum darstellt. Unter Berücksichtigung der konstruktiven Einschränkungen insbesondere durch die Geometrie und Verfahrenstechnik des Schildräumers stellt die gezeigte Variante jedoch nach einer Kosten-Nutzen-Analyse die effizienteste Optimierungsvariante dar.

Abbildung 5.34 zeigt, dass aufgrund der geschilderten Verbesserungen die Klarwasserzone deutlich größer ausfällt und das Schlammбетт insbesondere im Einlaufbereich schärfer von ihr abgetrennt ist. In der Folge kommt es zu kleineren Verwirbelungen und einer geringeren Einmischung von Feststoff in die

Klarwasserzone. Aufgrund der immensen Länge des Beckens und seiner geringen Tiefe zeigt sich das Potenzial der Optimierungsvariante in den Ablaufwerten (Tabelle 5.3) nur relativ schwach. Da die Fließstrecke bis zum Auslauf mit 50 m sehr lang ist, sind die veränderten Einlaufprozesse im Ablauf nur in abgeschwächter Form zu registrieren.

Tabelle 5.6: Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion

	Ist-Zustand	Optimierung
Fr_d	20	1
$Fallhöhe_{Einlaufstrahl}$	0,75 m	0,50 m
TS_{AN}	11 mg/l	9 mg/l
Potenzial	-	18 %

Die vorgestellte Optimierungsvariante wurde im Jahr 2002 baulich umgesetzt und die daraus resultierenden positiven hydraulischen Veränderungen in einer weiteren Messphase vom Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft der TU Dresden (Krebs und Franz 2002) bestätigt. Darüber hinaus liegen seit nunmehr vier Jahren positive Betriebserfahrungen vor, und es hat sich in dieser Zeit gezeigt, dass die Strömungsverhältnisse wie zu erwarten stabil sind und die Ablaufwerte stets weit unterhalb der Grenzwerte liegen.

Der weitaus größere Nutzen der Optimierung ist dabei weniger in den verbesserten Ablaufwerten bei den in Tabelle 5.1 zusammengestellten Randbedingungen zu sehen, sondern vielmehr in der bei höheren Belastungen und insbesondere bei Stoßbelastungen deutlichen Steigerung der Verfahrensstabilität. Im Zuge einer etwaigen Erweiterung der Kläranlage können somit die beiden Nachklärbecken der Anlage nach einem relativ kostengünstigen Umbau nicht nur weiterhin genutzt, sondern in einem in weiteren Rechnungen zu bestimmenden Rahmen auch höher belastet werden.

5.2 Das Nachklärbecken Miesbach

Die Nachklärung der Kläranlage Miesbach, die für 80.000 EW ausgelegt ist, besteht aus zwei baugleichen, runden, horizontal durchströmten Nachklärbecken. Die Nachklärbecken haben einen Durchmesser von $D = 32,00$ m und jeweils ein Volumen von $V = 3.162$ m³. Die Oberkante des 0,75 m hohen Einlaufschlitzes liegt 4,15 m oberhalb der Betonsohle und ist mit schräg angestellten Lamellen versehen. Der Klarwasserabzug erfolgt mittels einer vorgehängten Ablaufrinne, von wo aus das gereinigte Abwasser dem Vorfluter zugeführt wird. Die genauen Beckenabmessungen können der Abbildung 5.37 entnommen werden.

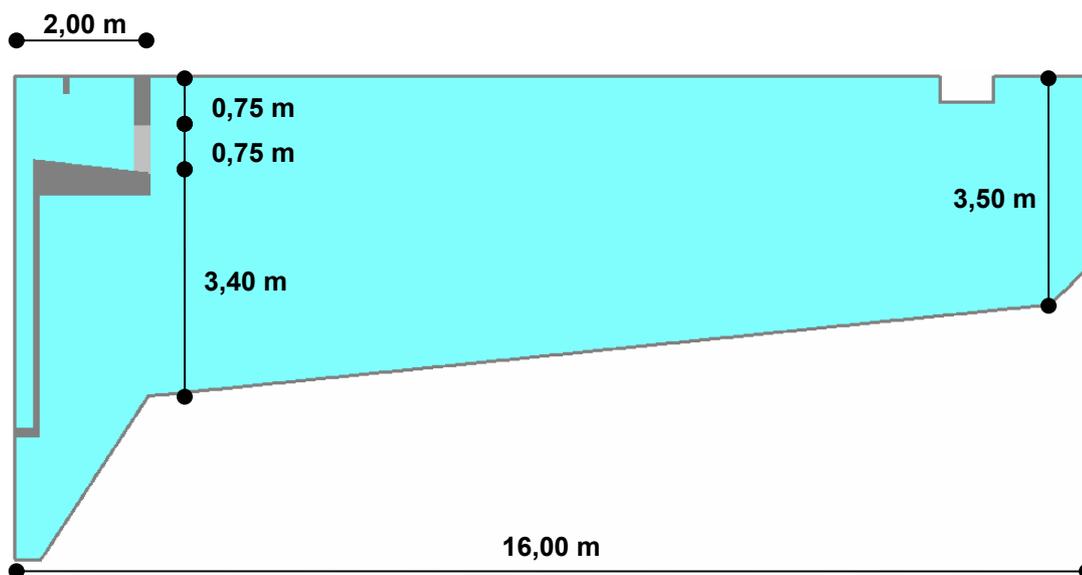


Abbildung 5.37: Querschnitt des Nachklärbeckens Miesbach

Im Rahmen des durchgeführten Untersuchungsprogramms konnten für drei verschiedene Lastfälle, die in Tabelle 5.4 zusammengefasst sind, die Geschwindigkeits- sowie die Feststoffverteilungen gemessen werden. Die Bandbreite der Lastfälle ist dabei mit $q_A = 0,22 - 0,85$ m/h als groß zu bezeichnen und deckt den gesamten Betriebsbereich der Kläranlage ab.

Tabelle 5.7: Randbedingungen während der Messungen und Eingangsgrößen für das Modell

Betriebsdaten	Trockenwetter	Mischwetter	Regenwetter
Q_{BB}	346 m ³ /h	842 m ³ /h	1.346 m ³ /h
q_A	0,22 m/h	0,53 m/h	0,85 m/h
TS_{BB}	4,00 g/l	4,25 g/l	4,15 g/l
Q_{NKB} (je Becken)	471 m ³ /h	745 m ³ /h	1.171 m ³ /h
Q_{RS} (je Becken)	298 m ³ /h	324 m ³ /h	498 m ³ /h
Q_{AN} (je Becken)	173 m ³ /h	421 m ³ /h	673 m ³ /h
ISV	101 ml/g	97 ml/g	83 ml/g

Neben den Messungen und den hier vorgestellten räumlich hochauflösenden Simulationen wurden von Janzen (2005) auch quasi-1-dimensionale Simulationen durchgeführt. Hunze et al. (2005a/b) stellen die mess- und simulationstechnischen Ergebnisse vor und diskutieren die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen

Methoden, ihre Verknüpfung untereinander und ihren Nutzen bei Auslegung und Optimierung.

Alle hier vorgestellten Berechnungen basieren auf dem in Kapitel 3 dargelegten zweidimensionalen achsensymmetrischen Modell. Der Ansatz zur Beschreibung der Sinkgeschwindigkeit wurde entsprechend der Absetzversuche und dem in Kapitel 3.3.4 aufgezeigten Vorgehen angepasst. Der bi-lineare Viskositätsansatz konnte aufgrund fehlender rheologischer Untersuchungen nicht auf den vorliegenden Schlamm angeglichen werden, so dass die Parameter des Schlammes der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück verwendet wurden.

5.2.1 Simulation und Messung

Die Simulationen wurden für alle drei gemessenen Betriebszustände durchgeführt und die Ergebnisse mit den Messungen verglichen. Exemplarisch wird zu einem späteren Zeitpunkt die Modellgüte an dem mittleren Mischwetterlastfall nachgewiesen. Zunächst soll dem Leser aber wie gewohnt ein Einblick in die Strömungs- und Feststoffverteilung des Nachklärbeckens gegeben werden. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse in den Abbildungen 5.38 bis 5.42 in der bereits bekannten Isoflächen- und Vektoransicht dargestellt. Da für die spätere Optimierung der kritische Belastungsfall, also der maximale Zufluss bei Regen, maßgeblich ist, werden abweichend vom Nachweis der Modellgüte nicht die Ergebnisse des Mischwetterlastfalles gezeigt, sondern die Ergebnisse des Regenwetterlastfalles. Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Systemverhältnisse im Nachklärbecken zum Zeitpunkt $t = 8$ h. Zu diesem Zeitpunkt hat sich ein stabiler Gleichgewichtszustand im System eingestellt und es ist keine weitere Veränderung der Ergebnisse über die Zeit mehr zu beobachten.

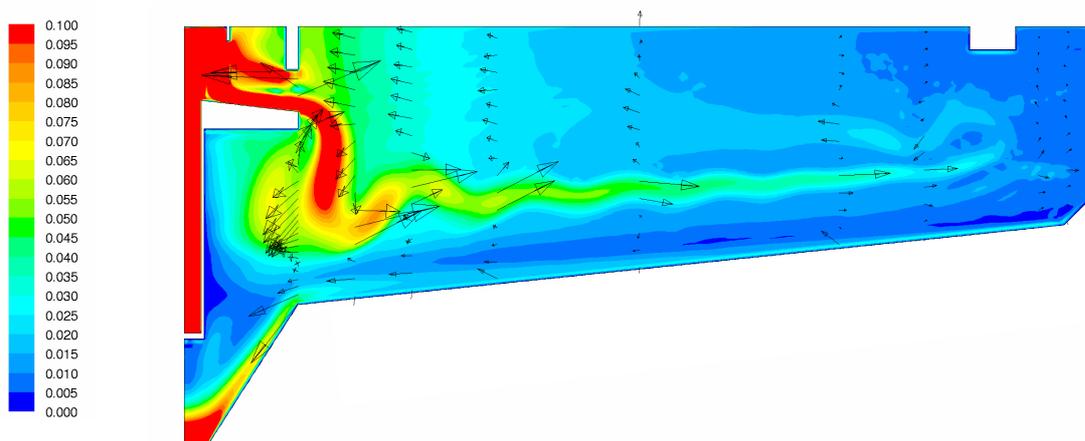


Abbildung 5.38: Geschwindigkeitsverteilung [m/s]

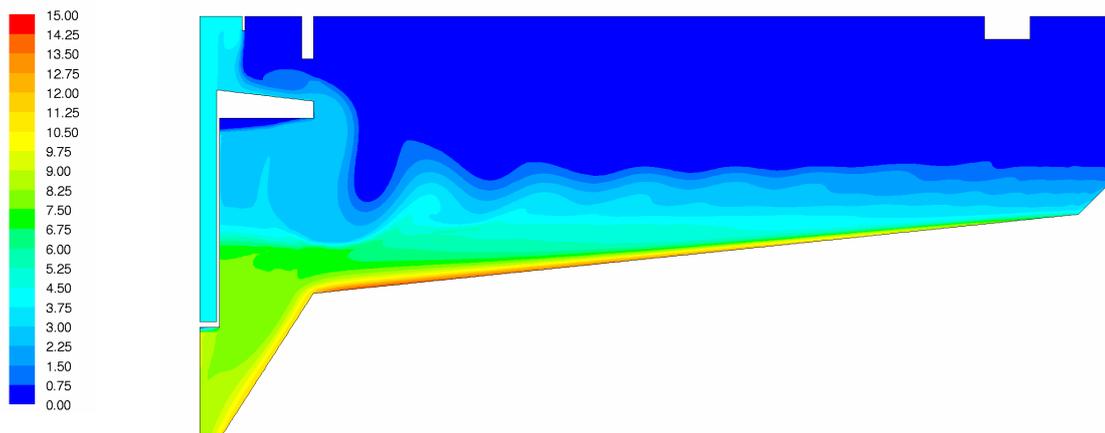


Abbildung 5.39: Schlammverteilung [g/l]

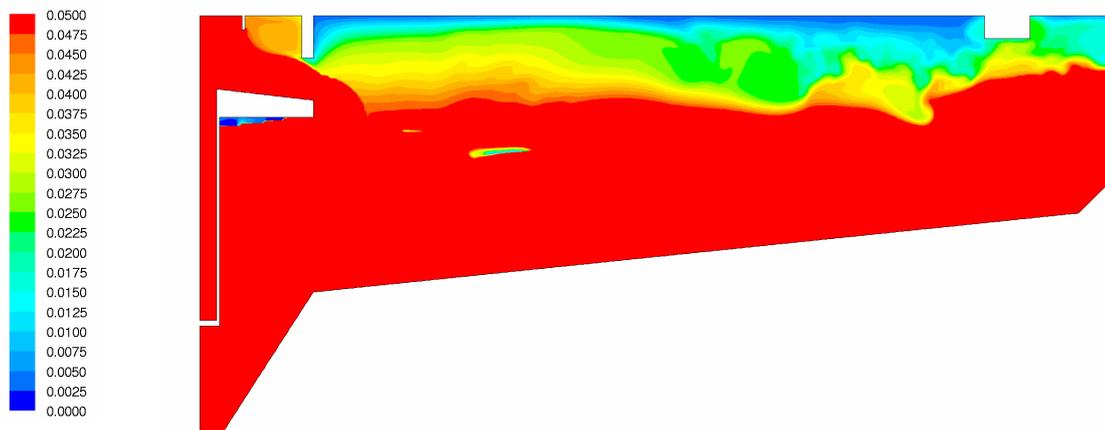


Abbildung 5.40: Schwebstoffverteilung [g/l]

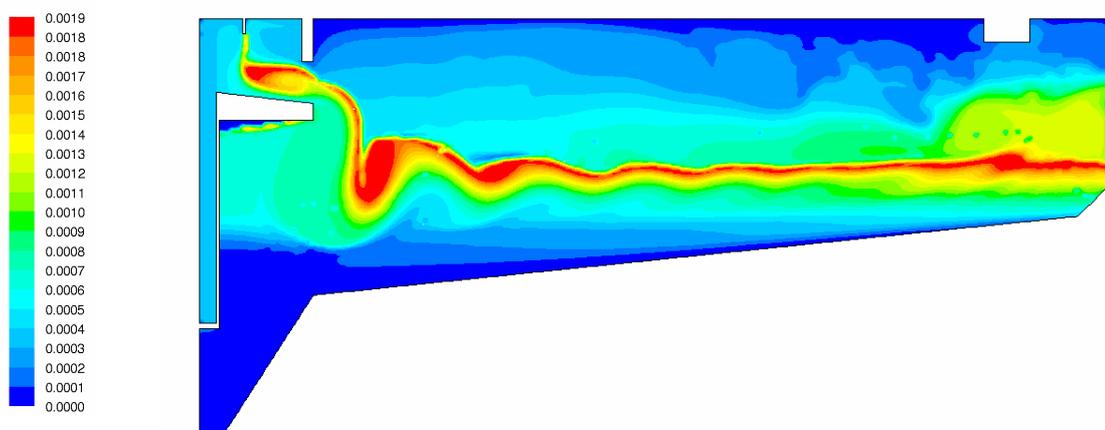


Abbildung 5.41: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s]

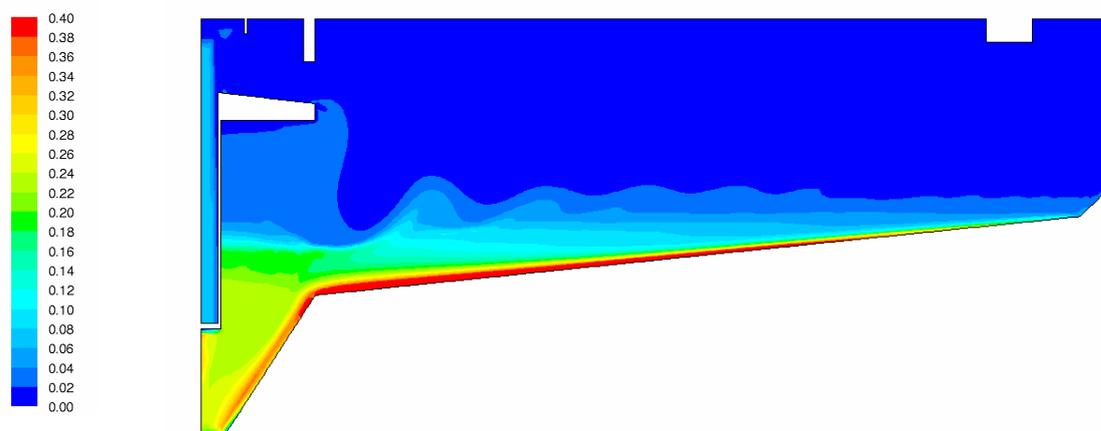


Abbildung 5.42: Verteilung der Viskosität [Ns/m^2]

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 anhand des Nachklärbeckens in Rheda-Wiedenbrück mit hohem Einlauf aufgezeigt wurde, kommen auch bei dieser sogar noch etwas höheren Einleitung sämtliche für die Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken nachteiligen hydrodynamischen Prozesse zum tragen. Wie Abbildung 5.38 deutlich zeigt, sinkt der Einlaufstrahl nach dem Verlassen des Einlaufbauwerkes senkrecht nach unten ab und wird aufgrund der Dichteunterschiede dabei signifikant beschleunigt. Des Weiteren wird ein erhebliches Maß an Umgebungsfluid in den Strahl eingemischt und somit der Volumenstrom des Jets deutlich vergrößert. Im oberen Teil des Beckens bildet sich wiederum eine ausgeprägte Rückströmung aus, die bis hinein in das Einlaufbauwerk reicht. Die gesamte Walzenströmung im Becken umfasst eine wesentlich größere Menge Wasser, als eigentlich nach der reinen Massenbilanz zwischen Zu- und Ablauf im Becken strömen müsste. Genau diese Diskrepanz ist das Maß für die unnötig zuviel eingetragene und auf die Absetz-, Trenn- und Eindickprozesse ungünstig wirkende Energie.

Nachdem der Strahl ca. 2 m senkrecht nach unten abgefallen ist, erreicht er das Schlammbett. Es kommt zu starken Verwirbelungen mit großen Wellenbildungen (Abbildung 5.39), ehe sich der Jet auf dem Schlammbett in horizontale Richtung ausbildet. In der Folge dieser instabilen Schichtung kommt es in einem hohen Maß zum Eintrag von Feststoff in die Klarwasserzone (Abbildung 5.40), so dass eine nicht unerhebliche Menge an Feststoff in den Ablauf gelangt.

In den folgenden beiden Abbildungen 5.43 und 5.44 werden, wie schon zuvor erwähnt, für den Mischwetterlastfall die Simulationsergebnisse mit den Messwerten verglichen. Auch hier sind die Ergebnisse der Simulation mit einer durchgezogenen Linie gekennzeichnet und die Messwerte mit einer gestrichelten Linie miteinander verbunden. Die Auswertung erfolgt in Profilen, die jeweils 4 m, 8 m und 15 m vom Mittelpunkt des Beckens entfernt sind.

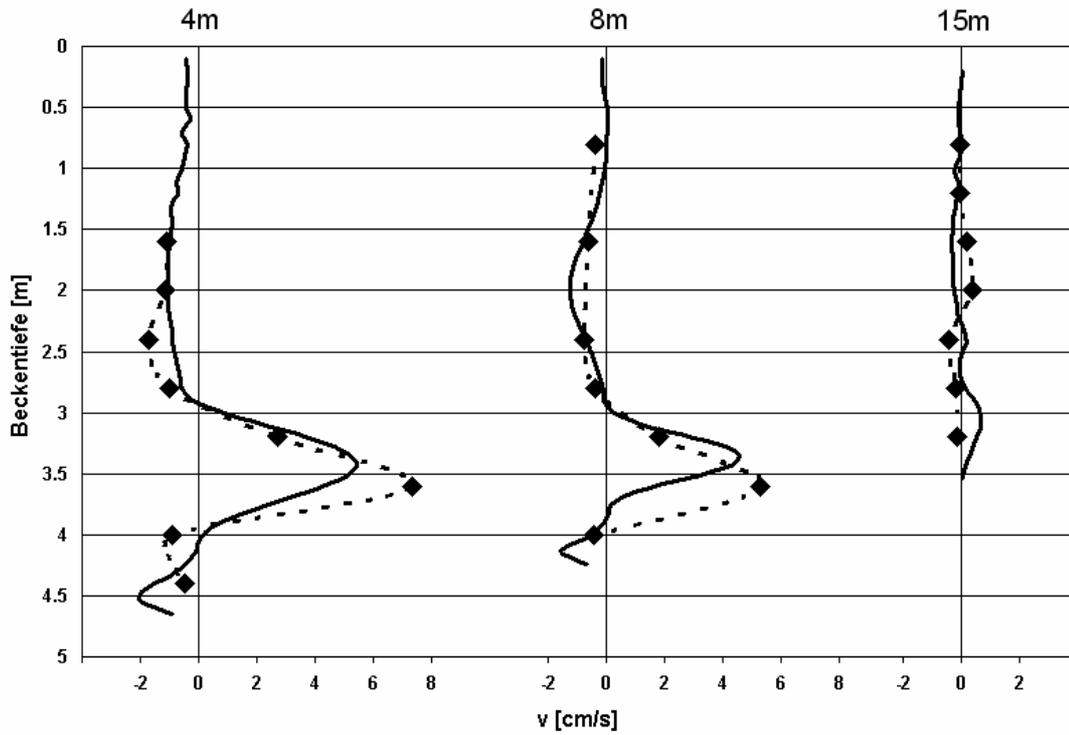


Abbildung 5.43: Vergleich von simulierten und gemessenen Horizontalgeschwindigkeiten

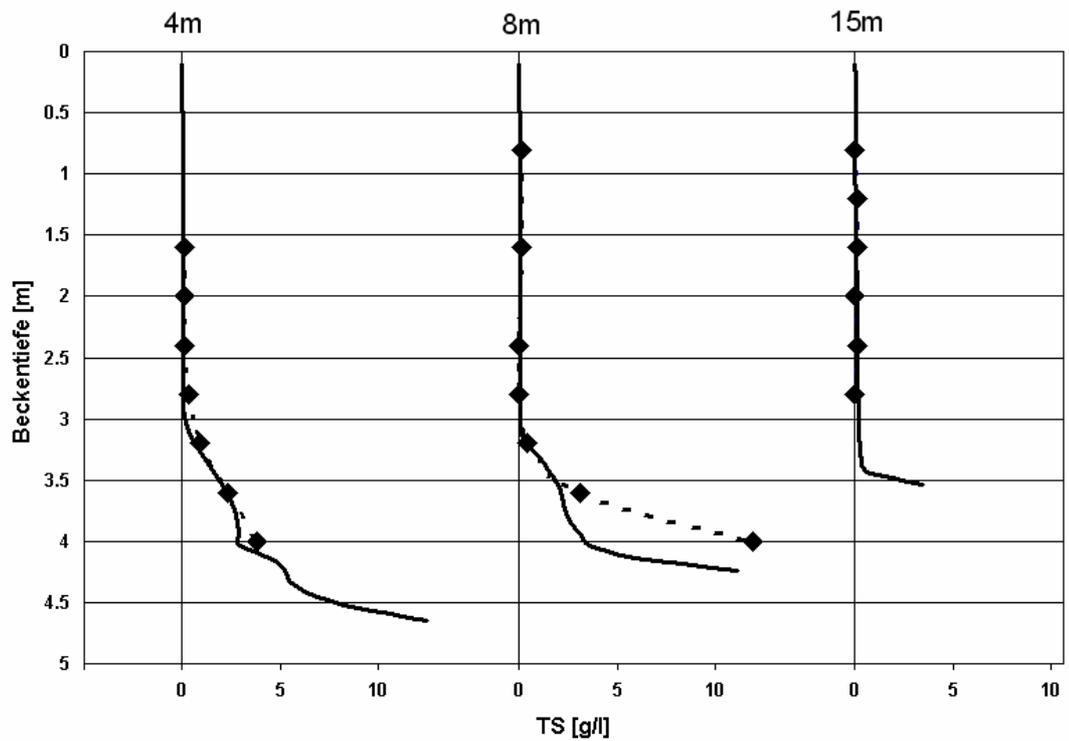


Abbildung 5.44: Vergleich von simulierter und gemessener Schlammverteilung

Die Abbildungen 5.43 und 5.44 zeigen, dass die realen Bedingungen im Nachklärbecken von dem numerischen Modell gut wiedergegeben werden. Noch einmal sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Simulation mit einem konstanten, gemittelten Zufluss gerechnet worden ist, wohingegen die Messdaten von einer natürlichen Schwankung im Zulauf beeinflusst sind. Es empfiehlt sich von daher bei der Beurteilung der Modellgüte nicht der exakte quantitative Vergleich zwischen Rechen- und Messwerten, da beide Verfahren mit Fehlern behaftet sind, sondern vielmehr der qualitative Vergleich systementscheidender Größen wie z. B. der Lage, Länge und Stärke des Jets sowie der Höhe des Schlammspiegels.

5.2.2 Optimierung des Einlaufbauwerkes

Mit Hilfe der Ergebnisse des Ist-Zustandes, dem vorgestellten theoretischen Wissen sowie den praktischen Erfahrungen aus der Studie Rheda-Wiedenbrück ist es nun möglich, Optimierungsvarianten für die Einlaufkonstruktion zu erarbeiten. An dieser Stelle soll dabei ein Vergleich von drei unterschiedlichen Konstruktionen erfolgen, um den zu betreibenden Aufwand abschätzen zu können und eine Kosten-Nutzen-Analyse zu ermöglichen.

In allen Varianten gleich ist dabei die Bemessung des Einlaufschlitzes, der für eine dimensionale Froudezahl von $Fr_d = 1$ im maßgeblichen Regenwetterlastfall ausgelegt worden ist. Des Weiteren ist in allen Varianten die Höhenlage des Einlaufes identisch, die nach Möglichkeit so zu gestalten ist, dass die Oberkante des Einlaufschlitzes mit der Lage des Schlammspiegels übereinstimmt. Diese beiden Elemente der Einlaufkonstruktion sind *harte Auslegungsgrößen*. Die einzelnen Varianten unterscheiden sich somit also nur in *weichen Konstruktionselementen*, also Ausführungsmöglichkeiten, für die es keine klar quantifizierbaren Empfehlungen wie für die Höhe des Einlaufschlitzes und die Höhenlage des Einlaufes gibt. Die Variante 1 stellt das Einlaufbauwerk dar, das weitestgehend den Empfehlungen dieser Arbeit entspricht (siehe auch Kapitel 6) und einem hydrodynamisch gut ausgelegten, klassischen Einlaufbauwerk ähnelt. Variante 2 stellt eine aufwendigere Bauform dar, die die Strömung turbulenzärmer in das Nachklärbecken einleiten soll. Variante 3 baut auf dem Ist-Zustand auf und entspricht einer Bauform, die im Ertüchtigungsfall eines bestehenden Beckens Vorteile aufweist, da sie mit relativ kostengünstig zu installierenden, vorgehängten Leitblechen arbeitet. Die Abbildungen 5.45 bis 5.47 verdeutlichen die Gemeinsamkeiten sowie die Unterschiede der einzelnen Optimierungsvarianten.

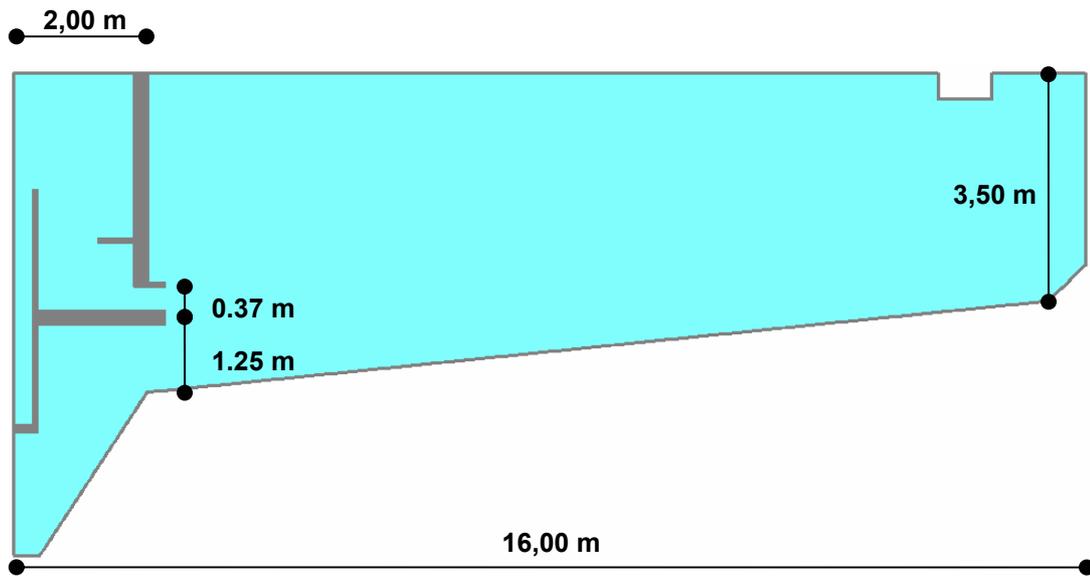


Abbildung 5.45: Querschnitt der Optimierungsvariante 1

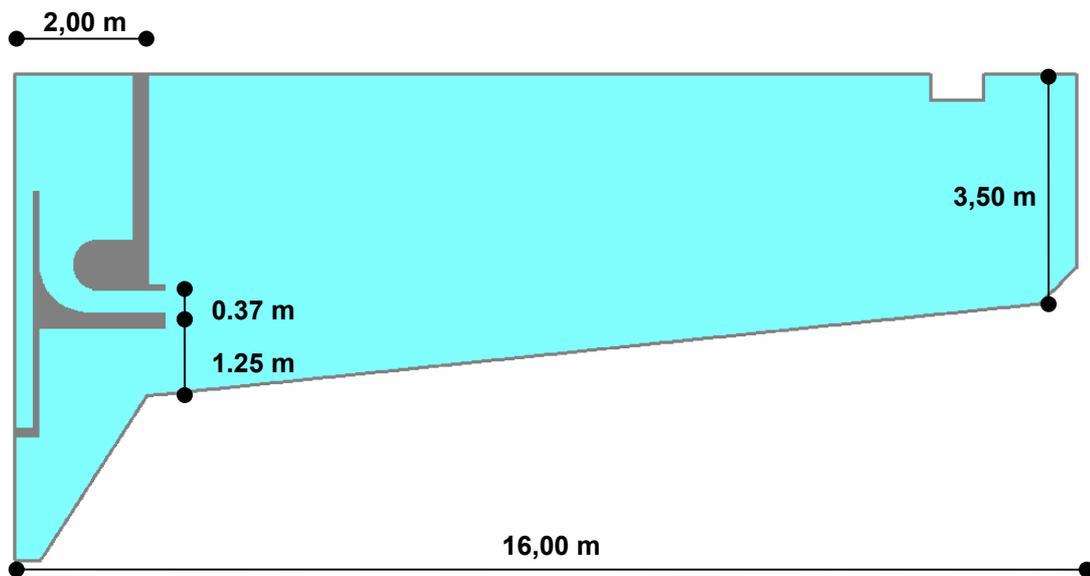


Abbildung 5.46: Querschnitt der Optimierungsvariante 2

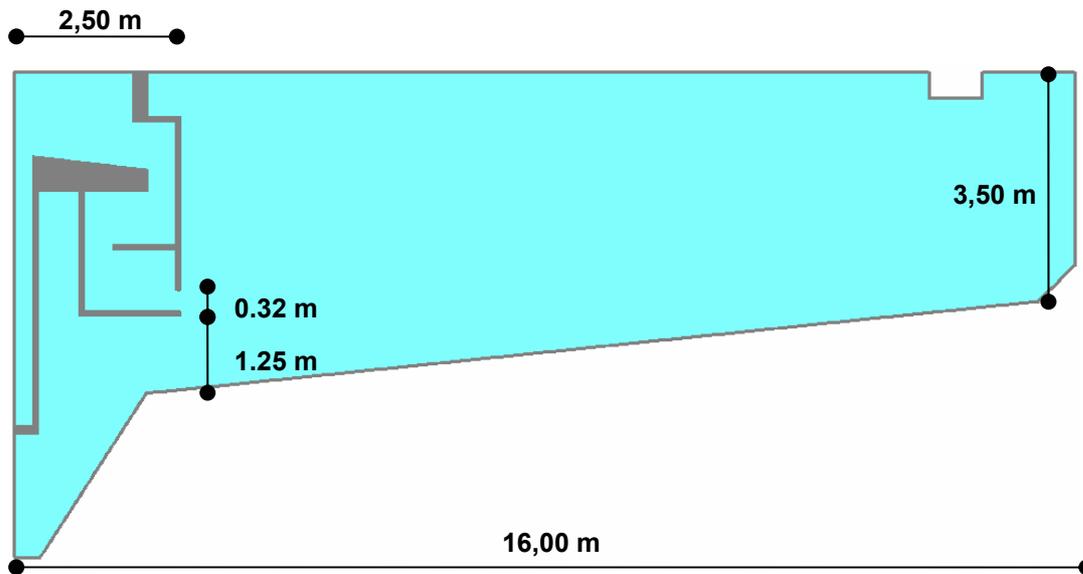


Abbildung 5.47: Querschnitt der Optimierungsvariante 3

Aufgrund des größeren Radius des vorgebauten Mittelbauwerkes in Variante 3 verringert sich in diesem Fall die Höhe des Einlaufschlitzes von 0,37 m auf 0,32 m, um auch in diesem Fall im Einlaufschlitz eine densimetrische Froudezahl von $Fr_d = 1$ zu erreichen.

In den folgenden Abbildungen 5.48 bis 5.50 werden zunächst die Ergebnisse der Variante 1 vorgestellt und mit dem Ist-Zustand verglichen. In einem nächsten Schritt werden dann die Ergebnisse der weiteren Varianten 2 und 3 dargestellt und ihre Unterschiede untereinander diskutiert.

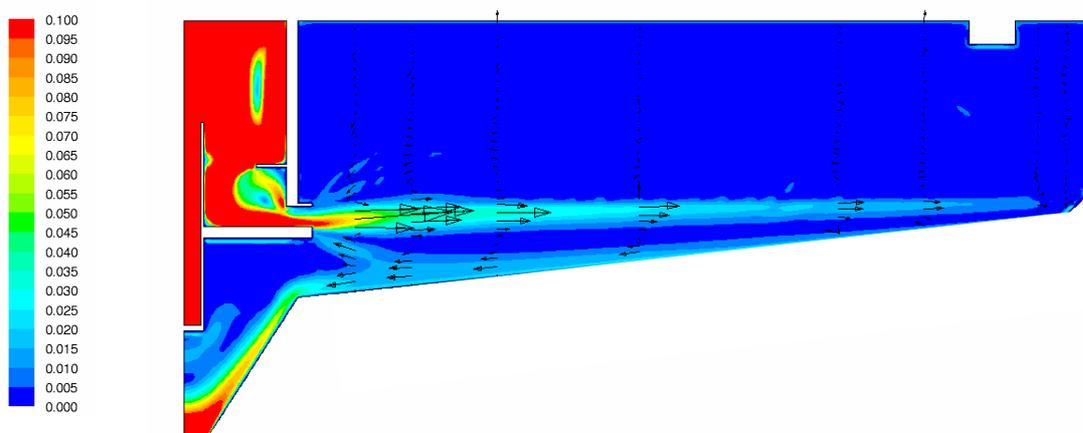


Abbildung 5.48: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 1

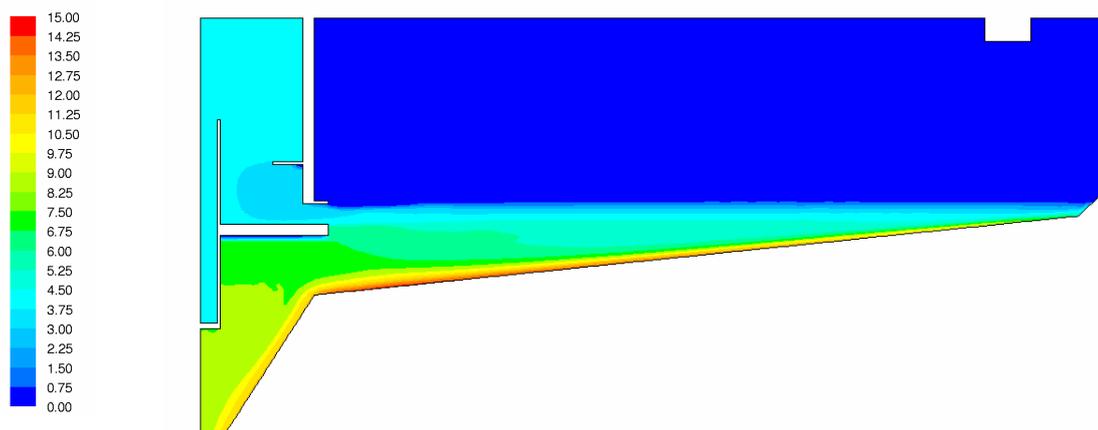


Abbildung 5.49: Schlammverteilung [g/l] – Variante 1

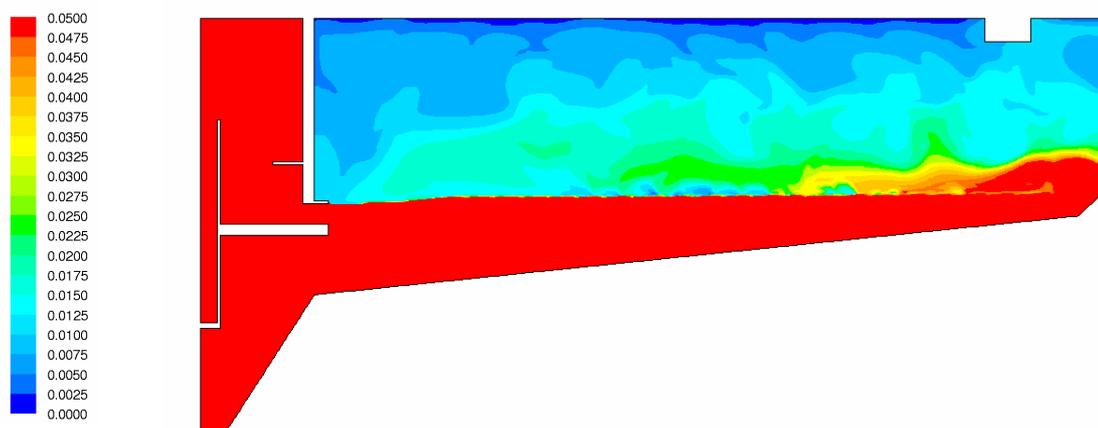


Abbildung 5.50: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 1

Im Vergleich zum Ist-Zustand kann in der Optimierungsvariante 1 eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens festgestellt werden. Abbildung 5.48 verdeutlicht, dass durch die Einleitung im Bereich gleicher Dichte der Einlaufstrahl weder nach oben noch nach unten abgelenkt wird. Demzufolge erfährt er auch keine weitere Beschleunigung durch Umwandlung von potenzieller in kinetische Energie, so dass der Jet auch in diesem maximalen Belastungsfall nicht die Außenwand des Nachklärbeckens erreicht. In der Folge eines deutlich stabileren Strömungszustandes wird nur noch in einem minimalen Maße Umgebungsfluid in den Jet eingemischt und der resultierende Volumenstrom im Becken eindeutig verringert, so dass die ausgeprägte Rückströmung im oberen Beckenbereich des Ist-Zustandes in der Optimierungsvariante kaum noch zu erkennen ist.

Als weitere Kennung für die deutlich erhöhte Leistungsfähigkeit des Beckens ist die fehlende Wellenbildung im Schlamm Spiegel (Abbildung 5.49) heranzuziehen, die für

eine stabilere Dichteschichtung und eine schärfere Trennung von Klarwasser und Schlammschicht spricht. In der Folge wird eine signifikant geringere Menge an Schwebstoffen (Abbildung 5.50) in die Klarwasserzone eingetragen und die Ablaufqualität somit gesteigert.

Die gezeigten Ergebnisse der Variante 1 kommen nach heutigem Wissensstand einem optimal konstruierten und betriebenen Nachklärbecken nah und lassen nur noch wenig Raum für weitere Verbesserungen. Lediglich die Strömungsführung im Einlaufbauwerk hin zum Einlaufschlitz deutet auf weiteres Optimierungspotenzial hin. An dieser Stelle kommt es immer noch zu einer kleinen Rückeinmischung in das Einlaufbauwerk und es wird nicht die insgesamt zur Verfügung stehende Einlaufschlitzhöhe ausgenutzt. Variante 2 soll hier mit einer verbesserten Strömungsführung zum Einlaufschlitz die Möglichkeiten einer weiteren Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens eruieren. Im Umkehrschluss stellt Variante 3 eine vereinfachte Konstruktion zur Ertüchtigung des vorhandenen Beckens dar, in der das bestehende Einlaufbauwerk weitergenutzt werden kann und nur durch vorgehängte Leitbleche erweitert wird.

Im Anschluss an die Präsentation der Ergebnisse in den Abbildungen 5.51 bis 5.56 werden die unterschiedlichen Varianten beurteilt und der Aufwand in Relation zum resultierenden Nutzen gestellt.

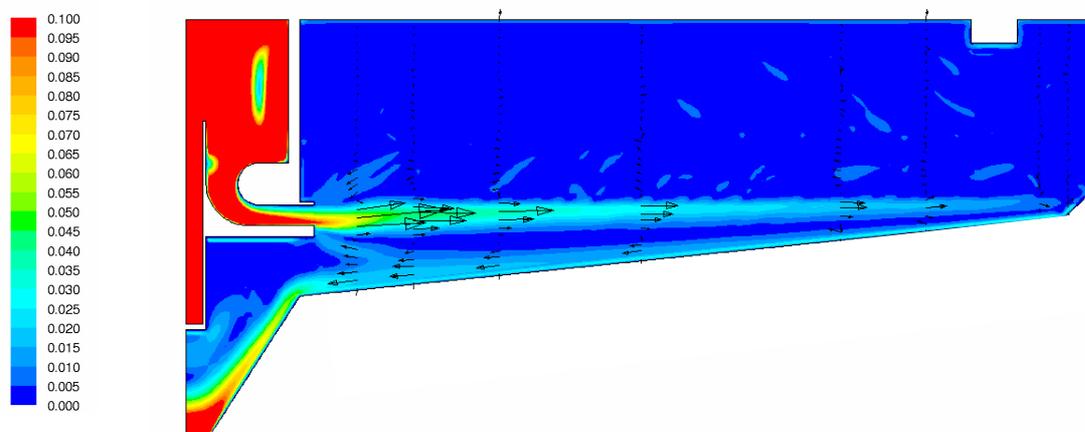


Abbildung 5.51: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 2

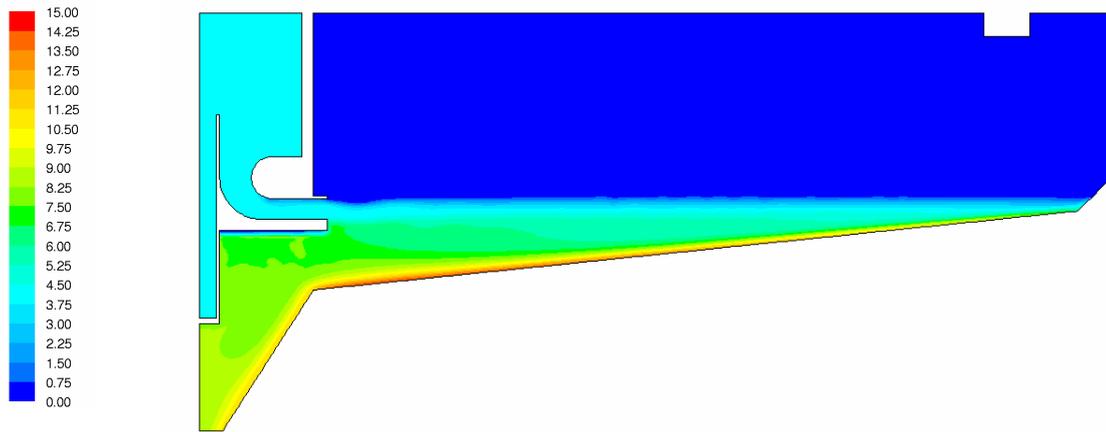


Abbildung 5.52: Schlammverteilung [g/l] – Variante 2

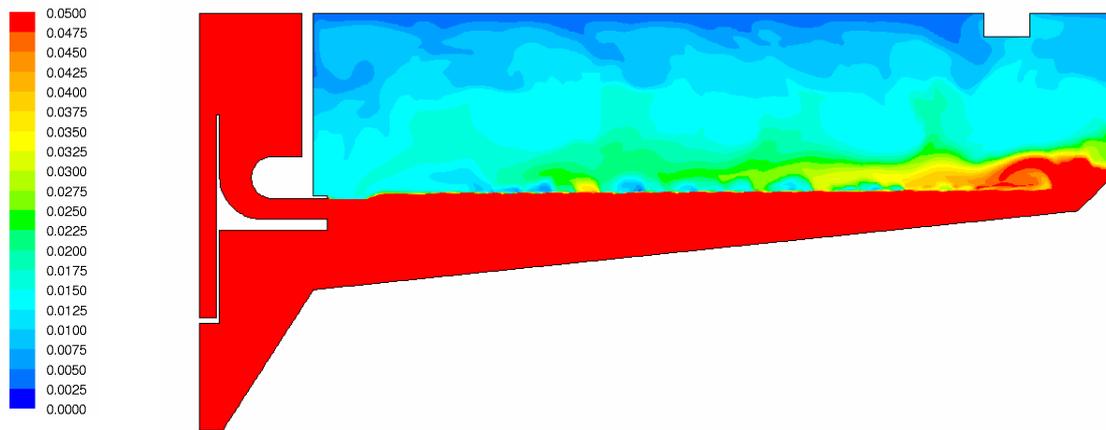


Abbildung 5.53: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 2

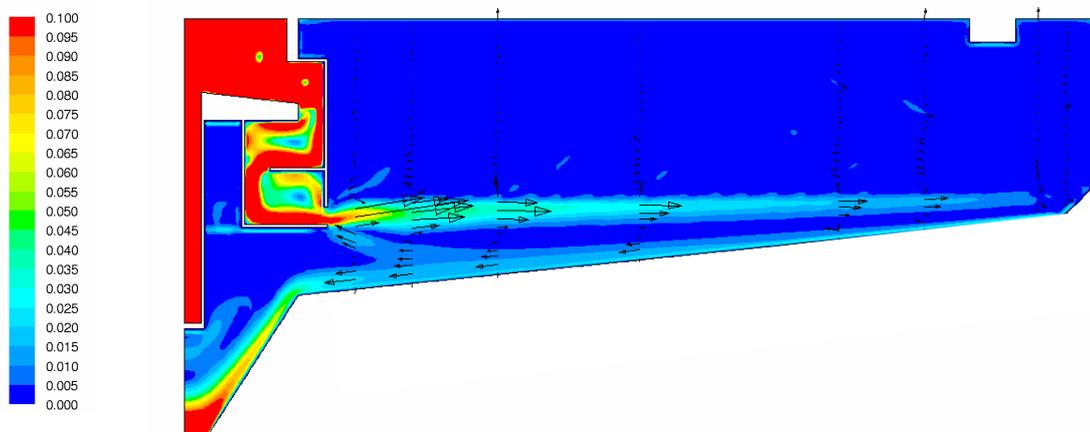


Abbildung 5.54: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 3

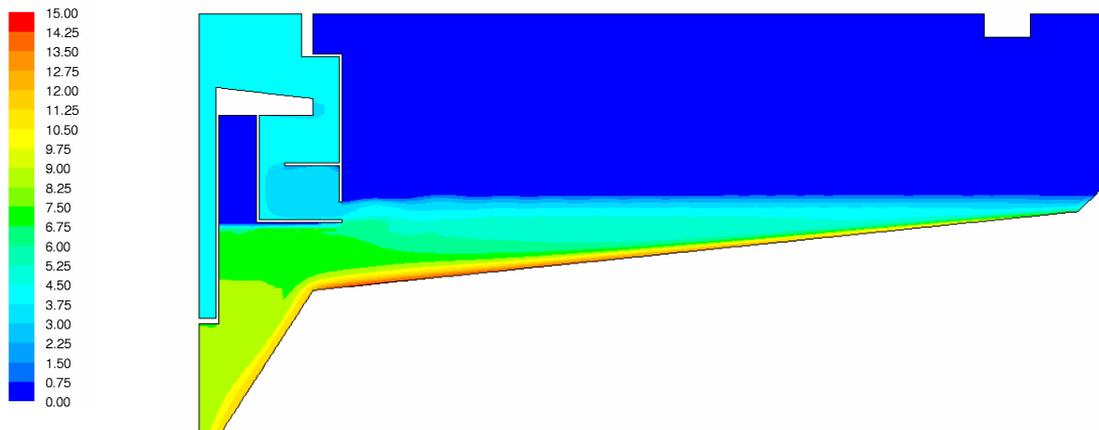


Abbildung 5.55: Schlammverteilung [g/l] – Variante 3

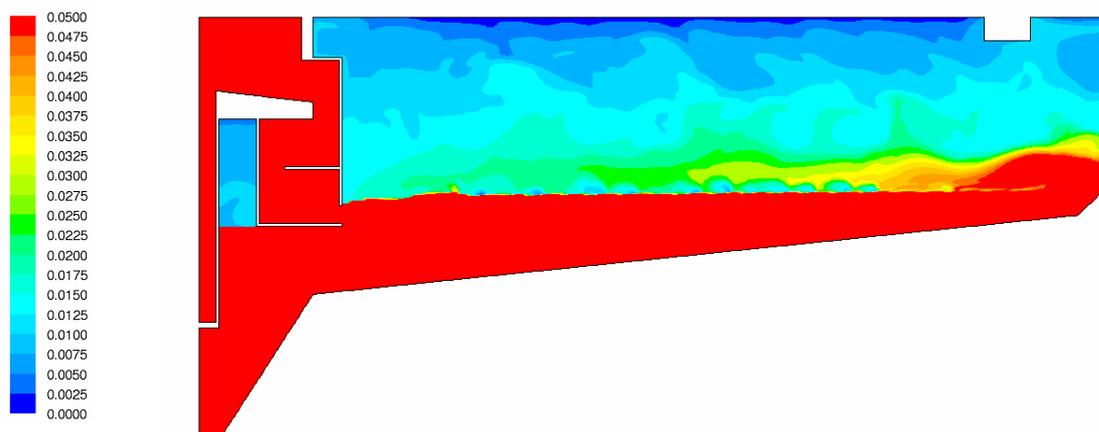


Abbildung 5.56: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 3

Bei der alleinigen Betrachtung der Ergebnisse sind kaum Unterschiede in den einzelnen Optimierungsvarianten zu erkennen. In allen drei konstruktiv unterschiedlichen Ausführungen sind in erster Linie die gleichen Verbesserungen im Vergleich zum Ist-Zustand zu verzeichnen. Durch die optimierte Strömungsführung im Einlaufbauwerk der Variante 2 kann zwar eine Rückeinmischung in das Einlaufbauwerk vermieden werden, im Becken selbst ist jedoch keine signifikante Verbesserung der resultierenden Leistungsfähigkeit festzustellen. Im umgekehrten Fall der vereinfachten Konstruktion in Variante 3 kann ebenso wenig eine Verschlechterung der Gesamtsituation verzeichnet werden.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die *weichen Konstruktionselemente*, wie die genaue Strömungsführung im Einlaufbauwerk, im Vergleich zu den *harten*

Auslegungsgrößen, wie der Höhenlage des Einlaufes und der Höhe des Einlaufschlitzes, von untergeordneter Bedeutung für die letztendliche resultierende Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken sind. Tabelle 5.5 verdeutlicht und quantifiziert noch einmal die Unterschiede in den einzelnen Modellstudien.

Tabelle 5.8: Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion

	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Fr_d	0,35	1	1	1
$Fallhöhe_{Einlauf}$	2,30 m	0,00 m	0,00 m	0,00 m
TS_{AN}	16,9 mg/l	9,2 mg/l	8,8 mg/l	9,4 mg/l
Potenzial	-	46 %	48 %	44 %

Auch die Ablaufwerte und das darauf aufbauende Optimierungspotenzial in Tabelle 5.5 zeigen, dass die letztendliche konstruktive Umsetzung einer Optimierungsvariante für die hydraulischen Verhältnisse des gesamten Beckens von geringer Bedeutung ist, sofern die im Rahmen der vorliegenden Ausführungen herausgearbeiteten, leistungsbestimmenden Einflussgrößen in der jeweiligen Optimierung berücksichtigt und entsprechend behandelt werden. So bleibt festzuhalten, dass viele bestehende Nachklärbecken mit relativ geringen Investitionskosten unter weitestgehender Nutzung der bestehenden Bausubstanz optimiert und den gestiegenen Anforderungen der modernen Abwasserreinigung angepasst werden können.

Es ist an dieser Stelle noch einmal darauf hinzuweisen, dass es sich bei den simulierten Ablaufwerten insbesondere aufgrund der Unsicherheiten bei der Absetzbarkeit feiner Schwebstoffpartikel um Relativ- und nicht um Absolutwerte handelt. So konnten in dem realen Nachklärbecken Miesbach auch bei Regenwetter keine derart erhöhten Ablaufwerte im Bereich von fast 17 mg/l festgestellt werden. Dies ist auf die gute Absetzbarkeit des Schlammes – der ISV liegt zwischen 83 ml/g und 101 ml/g – auch im Bereich kleiner Feststoffkonzentrationen zurückzuführen. Wenngleich sich aufgrund dessen im realen Becken die negativen Auswirkungen der ungünstigen hydraulischen Bedingungen nicht in dem Maße bemerkbar machen, so sind doch die prozentualen Optimierungspotenziale auf die realen Systembedingungen übertragbar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teile, die in ihren Zielsetzungen logisch aufeinander aufbauen. So ist für die erfolgreiche praktische Anwendung des numerischen Modells im zweiten Teil dieser Arbeit, in ihrem ersten theoretischen Teil, der vertiefte Umgang mit den relevanten leistungsbestimmenden Prozessen in Nachklärbecken und den daraus folgenden Konsequenzen und Notwendigkeiten für die Modellentwicklung von elementarer Bedeutung.

Dementsprechend widmet sich Kapitel 2 den unterschiedlichen Einflussgrößen, die für das Prozessgeschehen in Nachklärbecken von Bedeutung sind. Dabei werden alle relevanten Einzelprozesse erläutert und in das Wirkungssystem des Nachklärbeckens eingeordnet sowie ihre Bedeutung für die letztendliche Leistungsfähigkeit des Nachklärbeckens diskutiert. Schon an dieser Stelle wird ein besonderes Augenmerk auf die rheologischen Eigenschaften des belebten Schlammes sowie den hydrodynamisch ausgesprochen sensiblen Einlaufbereich gelegt.

Während sich Kapitel 2 mit den relevanten physikalischen Prozessen befasst, baut Kapitel 3 auf diesen Grundlagen auf und beinhaltet die mathematische Umsetzung in einem numerischen Modell. Ziel der Arbeit ist es dabei gewesen, ein umfassendes Modell zu entwickeln, das alle relevanten und somit leistungsbestimmenden Prozesse berücksichtigt. Neben den schon existierenden Modellansätzen für Sinkgeschwindigkeit, Dichteinfluss und Räumung, die im Rahmen dieser Arbeit lediglich leicht verändert und angepasst wurden, sind darüber hinaus zu zwei Themenschwerpunkten eigene Modellansätze entwickelt worden:

- Der **Rheologie** des belebten Schlammes wurde im Vergleich zu seinem Absetzverhalten in der Literatur bisher deutlich weniger Aufmerksamkeit gewidmet. Die existierenden Modellansätze zur Beschreibung des rheologischen Verhaltens eignen sich dabei nur sehr eingeschränkt für die in Nachklärbecken vorhandenen Feststoffkonzentrationen und Schergradienten. Eigene Messungen verdeutlichten die Notwendigkeit der Entwicklung eines eigenständigen, für Nachklärbecken geeigneten Modellansatzes. In der Folge entstand ein bi-linearer Viskositätsansatz (Kapitel 3.3.5), der insbesondere die für den Schlammtransport wichtige Fließgrenze negiert bzw. über einen steilen Gradienten in den Schubspannungen im Bereich kleiner Scherraten auflöst. In Kapitel 5.1.1.1 wurden die Bedeutung der rheologischen Schlammereigenschaften auf die resultierende Schlammverteilung, die Notwendigkeit der korrekten Bestimmung der entsprechenden Randbedingungen und die Folgen für das numerische Modell aufgezeigt.

- Den **dreidimensionalen Strömungsstrukturen** im Nahbereich von Einlaufkonstruktionen, die mit Lamellen versehen sind, wurde aufgrund der großen Bedeutung der Einlaufgestaltung auf die resultierende Leistungsfähigkeit von Nachklärbecken in besonderem Maße auch in der gewählten zweidimensionalen achsensymmetrischen Simulation Aufmerksamkeit gewidmet. Aufbauend auf umfangreichen Messungen konnte eine mathematische Formulierung entwickelt werden, die die radiale Hauptströmung in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Lamellen und dem Verbauungsgrad der Einlauföffnung in einen radialen und einen tangentialen Anteil aufteilt. In der Folge können nunmehr in einem zweidimensionalen Berechnungsnetz die in Nachklärbecken mit Lamelleneinläufen typischen dreidimensionalen Strömungen des Einlaufbereiches abgebildet werden.

Mit diesen Entwicklungen sowie den bereits existierenden Modellansätzen konnte das Programmsystem FLUENT 6.1 (FLUENT 2001) über vorhandene Programmierschnittstellen derart erweitert werden, dass die Zielsetzung eines umfassenden Nachklärbeckenmodells erreicht wurde. Darüber hinaus wurde die Modellsteuerung so gestaltet, dass neben gemittelten konstanten Randbedingungen auch reale Zuflussganglinien und Regelgrößen vollständig dynamisch simuliert werden können.

In dem umfangreichen zweiten Teil dieser Arbeit wurde die Modellgüte anhand einer Vielzahl von Messungen in unterschiedlichen Nachklärbecken überprüft und nachgewiesen. In der praktischen Anwendung des Modells konnten dann unterschiedliche Nachklärbecken analysiert und die elementare Bedeutung der Einlaufgestaltung auf die resultierende Leistungsfähigkeit herausgearbeitet werden. Die Empfehlungen für eine optimale Einlaufkonstruktion unterteilen sich nach den Ergebnissen der Arbeit in *harte Auslegungsgrößen*, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Ablaufqualität und Verfahrensstabilität des Nachklärbeckens haben, sowie *weiche Konstruktionselemente*, die die Strömung im Nachklärbecken nur kleinskalig beeinflussen und für das Gesamtsystem von untergeordneter Bedeutung sind. Im Resultat ist es daher möglich, eine Empfehlung zur Konstruktion des Einlaufbauwerkes zu geben, die sich auf zwei wesentliche Größen, die Höhe des Einlaufschlitzes und die Höhe der Einleitung, beschränkt. In der Folge kann für einen weiten Anwendungsbereich eine robuste und kostengünstige Konstruktion (Abbildung 6.1) vorgeschlagen werden. Nur unter bestimmten Voraussetzungen – bei speziellen geometrischen Vorgaben, bei außergewöhnlichen Randbedingungen oder bei besonders hohen Anforderungen an die Ablaufqualität – sollte auf eine bewegliche Einlaufkonstruktion, die die Möglichkeit der dynamischen Steuerung der *harten Auslegungsgrößen* beinhaltet, zurückgegriffen werden.

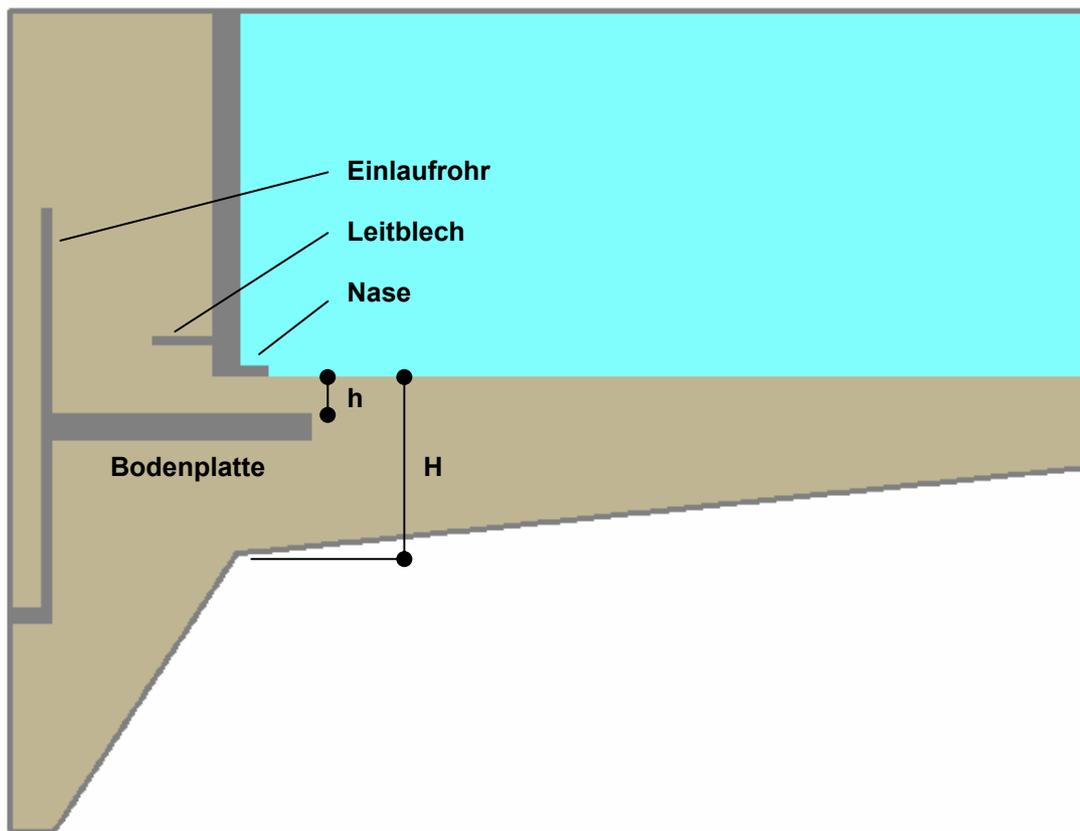


Abbildung 6.1: Empfehlungen für die Konstruktion des Einlaufbauwerkes

Die Empfehlungen für die Abmessungen der *harten Auslegungsgrößen* der Einlaufkonstruktion ergeben sich wie folgt:

- Die Höhe des Einlaufschlitzes h sollte nach Krebs (1991) über die densimetrische Froudezahl bei maximalem Regenwetterzufluss Q_m berechnet werden (Kapitel 2.4) und stellt somit eine in der Planung explizit zu bestimmende Größe dar.
- Die Höhe der Einleitung H sollte so bestimmt werden, dass die Oberkante des Einlaufschlitzes bei maximalem Regenwetterzufluss Q_m mit der Höhenlage des Schlammspiegels übereinstimmt, in der Folge die Einleitung im Bereich gleicher Dichte erfolgt und somit die Fallhöhe des Einlaufstrahls zu Null wird. Diese Größe ist in der Planung auf konventionelle Weise nicht zu bestimmen, sondern kann nur unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen mit Hilfe eines mehrdimensionalen Modells prognostiziert werden. Ist der Einsatz eines solchen Modells nicht möglich, sollte die resultierende Lage des Schlammspiegels auf der Basis von Messdaten und Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

Die Empfehlungen für die Ausführungen der *weichen Konstruktionselemente* stellen keine festen Maße dar, sondern sind im weitesten Sinne als Erfahrungswerte aus der Anwendung des Modells zu verstehen:

- Das Einlaufrohr sollte ungefähr bis zur halben Höhe des Einlaufbauwerkes, also dem Abstand von der Oberkante der Bodenplatte bis zum Wasserspiegel, reichen.
- Das Leitblech sollte von der Bodenplatte aus gesehen in doppelter Höhe des Einlaufschlitzes angeordnet werden und in seiner Länge mindestens der Höhe des Einlaufschlitzes maximal jedoch der halben Breite des Einlaufbauwerkes entsprechen. Die Aufgabe des Leitbleches besteht in einer verbesserten Führung der Strömung in Richtung des Einlaufschlitzes.
- Die Nase sollte die Oberkante des Einlaufschlitzes verlängern und in ihrer Länge ca. 25 cm betragen. In der Folge sollen Rückströmungen in das Einlaufbauwerk verringert werden.
- Die Bodenplatte sollte ungefähr 0,50 m bis 1,00 m über den Schlammtrichter hinausragen um Kurzschlussströmungen und Beeinflussungen des schon konsolidierten Schlammes zu vermeiden.

In Bezugnahme auf Kapitel 4.1.5 sollte es mit einem derartig konzipierten Einlauf und einer Rücklaufschlammsteuerung, die extreme Schwankungen und Stoßbelastungen aus der Zulaufganglinie abmindert, möglich sein, in einem breiten Anwendungsfeld die Leistungsfähigkeit bisheriger Nachklärbecken, die ohne die Möglichkeiten des vertieften Systemeinblickes durch ein mehrdimensionales Modell geplant und ausgelegt wurden, signifikant zu erhöhen.

Die Rücklaufschlammsteuerung stellt dabei die Schnittstelle zum Belebungsbecken dar, an die sich nahtlos der Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf anschließt. Das Nachklärbecken stellt in Verbindung mit dem Belebungsbecken eine Verfahrenseinheit dar, in der die Wechselwirkungen der beiden Becken untereinander die Leistungsfähigkeit der gesamten Verfahrensstufe maßgeblich beeinflusst. Eine detaillierte Untersuchung der Rücklaufschlammsteuerung muss daher das Belebungsbecken berücksichtigen. An dieser Stelle soll noch einmal auf das Forschungsprojekt am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau der TU Graz, Österreich, hingewiesen sein, dass auf dem Modell und den Ergebnissen dieser Arbeit aufbaut und sich thematisch mit der Regelung des Rücklaufschlammverhältnisses in Bezug auf die Auswirkungen im Nachklärbecken und der Rückkopplung auf die Belebung auseinandersetzt (Patziger et al. 2005).

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit aufgezeigt haben, stellen die Schlammeigenschaften wesentliche und bedeutende Einflussgrößen für numerische Modelle dar. Um die Modellgüte weiter zu erhöhen und die Aussagemöglichkeiten der Modelle zu erweitern, sollte auch in diesem Bereich weitere Forschung erfolgen. So wären deutlich mehr Messdaten bezüglich der rheologischen Eigenschaften von Schlämmen in unterschiedlichen Nachklärbecken wünschenswert, um die Allgemeingültigkeit des bi-linearen Ansatzes nachzuweisen. Darüber hinaus könnten mit zukünftiger Forschung im Bereich der Flockendynamik die Parameter des Flokkulationsansatzes von Kullmann

(1997) verlässlich bestimmt werden und nach einer Implementierung des Ansatzes in das vorgestellte Modell dessen Aussagefähigkeit um die Wirksamkeit des Einlaufbauwerkes als Flockungsreaktor erweitern.

Bezüglich der Bestimmung der Absetzgeschwindigkeit bei Feststoffkonzentrationen im Bereich von 0 g/l bis 1 g/l soll abschließend an dieser Stelle auf ein an der TU Graz entwickeltes Messverfahren, das so genannte SCHLUMOSSED (Fuchs 1999), hingewiesen werden. Durch eine konsequente Weiterentwicklung und vor allem die weitere Anwendung dieses optischen Messverfahrens könnten in diesem für die resultierenden Ablaufwerte so wichtigen Konzentrationsbereich eine verlässlichere Charakterisierung der Absetzeigenschaften erfolgen und die bestehenden Unsicherheiten überwunden werden.

Literaturverzeichnis

- Armbruster et al., 2001** Armbruster M., Krebs P. und Rodi W.: Numerical modelling of dynamic sludge blanket behaviour in secondary clarifiers. *Water Science and Technology*, 43(11), 173-180, 2001.
- Armbruster, 2002** Armbruster M.: Optimierung der Gestaltung von Nachklärbecken mit numerischer Simulation. Hrsgb.: Verb. Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute, Bericht Nr. 549, 25 – 42, 2002.
- ATV, 1997** ATV, Hrsg.. Mechanische Abwasserreinigung. Ernst und Sohn, 4. Auflage, 1997.
- ATV, 2000** Arbeitsblatt ATV-DVWK A131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V., 2000.
- Casey, 1992** Casey T. J.: *Water and wastewater engineering hydraulics*. Oxford University Press, New York, 1992.
- Dahl, 1993** Dahl C.: Numerical modeling of flow and settling in secondary settling tanks. PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Aalborg, 1993.
- Daigger, 1995** Daigger G. T.: Development of refined clarifier operating diagrams using an updated settling characteristics database. *Wat. Environ. Res.*, 67(1), 95-100, 1995.
- De Clercq, 2003** De Clercq, B.: Computational fluid dynamics of settling tanks: Development of experiments and rheological, settling and scraper submodels. PhD thesis, Universität Gent, Department of Applied Mathematics, Biometrics and Process Control, Belgien, 2003.
- Deininger, 1997** Deininger A.: Geschwindigkeits- und Feststoffverteilung in radial durchströmten Nachklärbecken. Technische Universität München, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft Nr. 131, 1997.
- Dick und Buck, 1985** Dick R. I. und Buck J. H.: Measurements of activated sludge Rheology. *Proceedings of the Environmental Engineering*, 117(1), 152-155, 1985.

- Dick und Ewing, 1967** Dick R. I. und Ewing B. B.: The Rheology of activated sludge. Journal of the Water Pollution Control Federation, 39(4), 543-560, 1967.
- Dubbel, 2001** Dubbel H.: Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Verlag, Berlin, 2001.
- Ebert, 1980** Ebert F.: Strömung nicht-newtonscher Medien. Vieweg, 1980.
- Ekama et al., 1997** Ekama G. A., Barnard J. L., Günthert F. W., Krebs P., McCorquodale J. A., Parker D. S. und Wahlberg E. J.: Secondary settling tanks: Theory, modelling, design and operation. IAWQ Scientific and Tech. Rep. No. 6, International Association on Water Quality, London, 1997.
- Fitch, 1957** Fitch B.: The Significance of Detention in Sedimentation, Sewage and Industrial Wastes, 1957 (zitiert bei Krüger, 1998).
- FLUENT, 2001** FLUENT Handbuch. Fluent Incorporated, Lebanon, NH, USA, 2001.
- Freimann und Janzen, 2003** Freimann R. und Janzen M.: Messungen im Nachklärbecken der Kläranlage Miesbach. Mündliche Überlieferung, nicht veröffentlicht, Hannover, 2003.
- Freimann, 1999** Freimann R.: Strömungsstrukturen in horizontal durchströmten Nachklärbecken. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde, 1999.
- Frost, 1983** Frost R. C.: How to design sewage sludge pumping systems. Technical Report 185, Water Research Center, Stevenage, GB, 1983.
- Günder, 1999** Günder B.: Rheologische Eigenschaften von belebten Schlämmen und deren Einfluss auf die Sauerstoffzufuhr. Korrespondenz Abwasser 46(12): 1896-1904, 1999.
- Günthert, 1984** Günthert F. W.: Ein Beitrag zur Bemessung von Schlammräumung und Eindickzone in horizontal durchströmten runden Nachklärbecken von Belebungsanlagen. Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, Heft 49, 1984.
- Härtel und Pöpel, 1992** Härtel L. und Pöpel H. L.: A dynamic secondary clarifier model including processes of sludge thickening. Wat. Sci. Technol., 25(6), 267-284, 1992.
- Hazen, 1904** Hazen A.: On Sedimentation. Transact. ASCE 53(980), 45-71, 1904.

- Hollenstein, 2005** Hollenstein R.: Optimaler Betrieb von Nachklärbecken unter besonderer Berücksichtigung der Schlammräumung – Physikalische Untersuchung des hydromechanischen Verhaltens in Nachklärbecken infolge Zufluss und Räumerbetrieb. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2005.
- Hunze et al., 2005a** Hunze, M., Freimann, R., Janzen, M. und Schumacher, S.: Strömungs- und Feststoffverhältnisse in Nachklärbecken (Teil 1). Wwt wasserwirtschaft wassertechnik, (9), 17-20, 2005.
- Hunze et al., 2005b** Hunze, M., Freimann, R., Janzen, M. und Schumacher, S.: Strömungs- und Feststoffverhältnisse in Nachklärbecken (Teil 2). Wwt wasserwirtschaft wassertechnik, (10), 24-27, 2005.
- Hunze, 2005** Hunze M.: Simulation in der kommunalen Abwasserreinigung. Oldenburg Verlag, 2005.
- Iske, 2001** Iske U.: Versuchsauswertungen zum Projekt Kierspe-Bahnhof, Ruhrverband, Essen, unveröffentlicht, 2001.
- Janzen und Rosenwinkel, 2005** Janzen M. und Rosenwinkel K.-H.: Verbesserung der Gestaltung von Zu- und Abläufen bei horizontal durchströmten, runden Nachklärbecken. Abschlussbericht, nicht veröffentlicht, Hannover, 2005.
- Janzen, 2005** Janzen M.: Messung und Modellierung der internen Rückströmung von horizontal durchströmten runden Nachklärbecken. Hannover, noch unveröffentlicht, 2005.
- Jardin et al., 2002** Jardin N., Hunze M., Krebs P.: Optimierung flacher, rechteckiger Nachklärbecken mit Hilfe von Strömungssimulationen. Tagungsband der Essener Tagung, 2002.
- Krebs et al., 1995** Krebs P., Vischer D. und Gujer W.: Inlet structure design for final clarifiers, J. Environmental Engineering, ASCE, 121(8), 558-564, 1995.
- Krebs et al., 2000** Krebs P., Armbruster M. und Rodi W.: Numerische Nachklärbeckenmodelle. Korrespondenz Abwasser 47(7), 985-999, 2000.

- Krebs et al., 2001** Krebs P., Franz T., Hunze M. und Jardin N.: Einsatz von Messungen und numerischen Simulationen zur Gestaltung von Nachklärbecken. Tagungsband der 14. Fachtagung „Norddeutsche Tagung für Abwasserwirtschaft und Gewässerschutz“, 2001.
- Krebs und Franz, 2002** Krebs P. und Franz T.: Kläranlage Kierspe-Bahnhof – Strömungssimulation Nachklärbecken – Teil 1: Messungen. Zwischenbericht, nicht veröffentlicht, Dresden, 2002.
- Krebs und Hunze, 2003** Krebs P. und Hunze M.: Kläranlage Kierspe-Bahnhof – Strömungssimulation Nachklärbecken. Abschlussbericht, nicht veröffentlicht, Dresden und Hannover, 2003.
- Krebs, 1991** Krebs P.: Modellierung und Verbesserung der Strömung in Nachklärbecken. Schriftenreihe Umwelt 157, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 1991.
- Krüger, 1998** Krüger A.: Physikalische Prozesse im Nachklärbecken – Modellbildung und Simulation. Dissertation, Universität Hannover, Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, 1998.
- Kullmann, 1997** Kullmann J.: Flokkulation von Belebtschlammflocken im Nachklärbecken. Diplomarbeit, Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, 1997.
- Lakehal et al., 1999** Lakehal D., Krebs P., Krijgsman J. und Rodi W.: Computing shear flow and sludge blanket in secondary clarifiers. *J. Hydraulic Engineering, ASCE.*, 125(3), 253-262, 1999.
- Larsen, 1977** Larsen P.: On the hydraulics of rectangular settling basins. Dissertation, Universität Lund, 1977.
- Lohmann, 1981** Lohmann J. H.: Anleitung zur Durchführung und Interpretation von rheologischen Messungen. Mündliche Überlieferung von 2004, nicht veröffentlicht, FH Gelsenkirchen, 1981.
- Lotito et al., 1997** Lotito V., Spinosa L., Mininni G., Antonacci R.: The Rheology of Sewage Sludge at Different Steps of Treatment. *Water Science and Technology* 36(11): 79-85, 1997.
- Mudrack und Kunst, 1991** Mudrack K. und Kunst S.: Biologie der Abwasserreinigung. Gustav Fischer Verlag, 1991.

- Orszag et al., 1996** Orszag S. A., Staroselsky I., Flannery W. S. und Zhang Y.: Introduction to renormalization group modelling of turbulence. Simulation and Modeling of Turbulent Flows, Oxford University Press, 1996.
- Patziger et al., 2005** Patziger M., Kainz H., Józsa J., Hunze M.: Messung und Modellierung von physikalischen Prozessen in Nachklärbecken. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 57(11-12), 177-184, 2005.
- Prandtl, 1924** Prandtl L.: The Mechanics of Viscous Fluids. Aerodynamic Theory, Vol. 3, Springer Verlag, 1924.
- Prandtl, 1990** Prandtl L.: Führer durch die Strömungslehre. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1990.
- Proff und Lohmann, 1997** Proff E. A. und Lohmann J. H.: Rheologische Charakterisierung flüssiger Klärschlämme. Korrespondenz Abwasser 44(9): 1615-1621, 1997.
- Resch, 1996** Resch H.: Einsatzbereiche, Kosten und Leistungen verschiedener Nachklärbeckenbauarten. Schriftenreihe der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Heft 16, Universität – Gesamthochschule Kassel, 1996.
- Rosenberger et al., 2002** Rosenberger S., Kubin K. und Kraume M.: Rheologie von Belebtschlamm in Membranbelebungsreaktoren. Chemie Ingenieur Technik 74(4): 487-494, 2002.
- Schumacher, 2001** Schumacher S.: Analyse des Prozessgeschehens in einem rechteckigen Nachklärbecken unter Verwendung eines 3-dimensionalen numerischen Modells. Studienarbeit, Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, 2001.
- Takács et al., 1991** Takács I., Patry G. G., Nolasco D.: A Dynamic Model of the Clarification – Thickening Process. Water Research 25(10), 1991.
- Thorpe, 1973** Thorpe S. A.: Turbulence in Stably Stratified Fluids: a Review of Laboratory Experiments. Boundary-Layer Meteorology 5: 95-119, 1973.
- Vesilind, 1979** Vesilind P. A.: Treatment and Disposal of Wastewater Sludges. Ann Arbor Science, 1979.
- Wahlberg und Keinath, 1988** Wahlberg E. J. und Keinath T. M.: Development of settling flux curves using SVI. J. Wat. Pollut. Control Fed., 60(12), 2095-2100, 1988.

- Weilbeer, 2004** Weilbeer J.: Modellierung des Partikeltransports in Nachklärbecken als Mehrphasenströmung. Dissertation, Universität Hannover, Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen, 2004.
- Wells und LaLiberte, 2001** Wells S. und LaLiberte D.: Modeling Density Currents in Circular Tanks. Water of Environmental Research, 2001.
- Wilén, 1999** Wilén B.-M.: Properties of activated sludge flocs. Dissertation, Chalmers University of Technology, 1999.
- Wilson, 1996** Wilson T. E.: A new approach to interpreting settling data. 1996 (zitiert bei Ekama et al., 1997).
- Winkler, 2001** Winkler K.: Räumung in Nachklärbecken von Abwasserreinigungsanlagen. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 2001.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Grundlegendes Strömungsfeld in Nachklärbecken _____	13
Abbildung 2.2:	Sinkgeschwindigkeit nach Takács (entnommen Ekama et al. 1997)	17
Abbildung 2.3:	Scherdiagramm eines newtonschen Fluides _____	18
Abbildung 2.4:	Fließkurve von strukturviskosen Medien _____	19
Abbildung 2.5:	Scherdiagramm eines idealen Bingham-Mediums _____	20
Abbildung 2.6:	Fließkurve für ein Herschel-Bulkley-Fluid _____	21
Abbildung 3.1:	Einlaufbauwerk eines runden Nachklärbeckens mit Lamellen _____	32
Abbildung 3.2:	Lamellenkonstruktion im Einlauf eines Nachklärbeckens – Draufsicht _____	33
Abbildung 3.3:	Radialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt _	35
Abbildung 3.4:	Tangentialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt _____	36
Abbildung 3.5:	Axialgeschwindigkeiten in einem Profil 2m vom Einlauf entfernt __	36
Abbildung 3.6:	Absetzverhalten des Schlammes des Nachklärbeckens Rheda Wiedenbrück _____	39
Abbildung 3.7:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 0,1 g/l _____	43
Abbildung 3.8:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 2,2 g/l _____	44
Abbildung 3.9:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 4,2 g/l _____	44
Abbildung 3.10:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 6,4 g/l _____	45
Abbildung 3.11:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 8,7 g/l _____	45
Abbildung 3.12:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 10,5 g/l _____	46
Abbildung 3.13:	Schubspannungen bei einer TS-Konzentration von 12,6 g/l _____	46
Abbildung 3.14:	Viskosität bei einer TS-Konzentration von 8,7 g/l _____	47
Abbildung 3.15:	Nachklärbecken im Computermodell _____	48
Abbildung 3.16:	Schlammverteilung mit 0,1 m Kantenlänge und 0,2 s Zeitschritt ____	49
Abbildung 3.17:	Schlammverteilung mit 0,05 m Kantenlänge und 0,1 s Zeitschritt _	49
Abbildung 3.18:	Schlammverteilung mit 0,025 m Kantenlänge und 0,05 s Zeitschritt	49
Abbildung 3.19:	Berechnungsnetz eines Nachklärbeckens mit 0,05 m Kantenlänge _	50

Abbildung 4.1:	Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit hohem Einlauf	56
Abbildung 4.2:	Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit tiefem Einlauf	57
Abbildung 4.3:	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - hoher Einlauf	58
Abbildung 4.4:	Schlammverteilung [g/l] - hoher Einlauf	59
Abbildung 4.5:	Schwebstoffverteilung [g/l] - hoher Einlauf	59
Abbildung 4.6:	Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] - hoher Einlauf	59
Abbildung 4.7:	Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] - hoher Einlauf	60
Abbildung 4.8:	Legende für den Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen	61
Abbildung 4.9:	Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 1	61
Abbildung 4.10:	Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 1	62
Abbildung 4.11:	Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 2	63
Abbildung 4.12:	Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 2	63
Abbildung 4.13:	Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – hoher Einlauf – Lastfall 3	64
Abbildung 4.14:	Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – hoher Einlauf – Lastfall 3	64
Abbildung 4.15:	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - tiefer Einlauf	65
Abbildung 4.16:	Schlammverteilung [g/l] - tiefer Einlauf	65
Abbildung 4.17:	Schwebstoffverteilung [g/l] - tiefer Einlauf	66
Abbildung 4.18:	Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] - tiefer Einlauf	66
Abbildung 4.19:	Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] - tiefer Einlauf	66
Abbildung 4.20:	Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 1	68
Abbildung 4.21:	Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 1	68
Abbildung 4.22:	Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 2	69

Abbildung 4.23: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 2	69
Abbildung 4.24: Vergleich von gemessenen und simulierten Radialgeschwindigkeiten – tiefer Einlauf – Lastfall 3	70
Abbildung 4.25: Vergleich von gemessenen und simulierten TS-Konzentrationen – tiefer Einlauf – Lastfall 3	70
Abbildung 4.26: Querschnitt des Nachklärbeckens Rheda-Wiedenbrück mit optimiertem Einlauf	71
Abbildung 4.27: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - optimierter Einlauf	72
Abbildung 4.28: Schlammverteilung [g/l] - optimierter Einlauf	73
Abbildung 4.29: Schwebstoffverteilung [g/l] - optimierter Einlauf	73
Abbildung 4.30: Zulaufganglinie zur Belebung	75
Abbildung 4.31: Resultierende Ganglinien für ein Nachklärbecken	75
Abbildung 4.32: Gemessene Schlammбетhöhe	76
Abbildung 4.33: Gemessene TS-Konzentrationen im Ablauf der beiden Nachklärbecken bei einem vergleichbaren Regenereignis	77
Abbildung 4.34: Simulierte Schlammбетhöhe	78
Abbildung 4.35: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der beiden Nachklärbecken	78
Abbildung 4.36: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken bei bisheriger Beschickung	80
Abbildung 4.37: Simulierte TS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärbecken bei konstanter Beschickung von 140 m ³ /15min.	81
Abbildung 5.1: Schnitt durch das Nachklärbecken der Kläranlage Kierspe	84
Abbildung 5.2: Geschwindigkeitsverteilung [m/s]	86
Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] - Einlaufbereich	86
Abbildung 5.4: Schlammverteilung [g/l]	87
Abbildung 5.5: Schwebstoffverteilung [g/l]	87
Abbildung 5.6: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s]	87
Abbildung 5.7: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²]	88
Abbildung 5.8: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 5 m vom Einlauf	89
Abbildung 5.9: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 5 m vom Einlauf	90

Abbildung 5.10: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 10 m vom Einlauf	90
Abbildung 5.11: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 10 m vom Einlauf	91
Abbildung 5.12: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 20 m vom Einlauf	91
Abbildung 5.13: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 20 m vom Einlauf	92
Abbildung 5.14: Vergleich von gemessenen und simulierten Horizontalgeschwindigkeiten – 30 m vom Einlauf	92
Abbildung 5.15: Vergleich von gemessener und simulierter Feststoffverteilung – 30 m vom Einlauf	93
Abbildung 5.16: Schlammverteilung [g/l] – Studie 1	95
Abbildung 5.17: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 1	95
Abbildung 5.18: Schlammverteilung [g/l] – Studie 2	95
Abbildung 5.19: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 2	96
Abbildung 5.20: Schlammverteilung [g/l] – Studie 3	96
Abbildung 5.21: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 3	96
Abbildung 5.22: Schlammverteilung [g/l] – Studie 4	97
Abbildung 5.23: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 4	97
Abbildung 5.24: Schlammverteilung [g/l] – Studie 5	97
Abbildung 5.25: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 5	98
Abbildung 5.26: Schlammverteilung [g/l] – Studie 6	98
Abbildung 5.27: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Studie 6	98
Abbildung 5.28: Vergleich der Schubspannungen in den Parameterstudien bei einer TS-Konzentration von 6 g/l	99
Abbildung 5.29: Vergleich der Feststoffverteilung in den einzelnen Parameterstudien – 10 m vom Einlauf entfernt	100
Abbildung 5.30: Geometrie der Einlaufoptimierung nach Krebs (2001)	101
Abbildung 5.31: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Optimierung	101
Abbildung 5.32: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Einlaufbereich – Optimierung	102
Abbildung 5.33: Schlammverteilung [g/l] – Optimierung	102
Abbildung 5.34: Schwebstoffverteilung [g/l] – Optimierung	102

Abbildung 5.35: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] – Optimierung _____	103
Abbildung 5.36: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] – Optimierung _____	103
Abbildung 5.37: Querschnitt des Nachklärbeckens Miesbach _____	105
Abbildung 5.38: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] _____	106
Abbildung 5.39: Schlammverteilung [g/l] _____	107
Abbildung 5.40: Schwebstoffverteilung [g/l] _____	107
Abbildung 5.41: Verteilung der Sinkgeschwindigkeit [m/s] _____	107
Abbildung 5.42: Verteilung der Viskosität [Ns/m ²] _____	108
Abbildung 5.43: Vergleich von simulierten und gemessenen Horizontalgeschwindigkeiten _____	109
Abbildung 5.44: Vergleich von simulierter und gemessener Schlammverteilung ____	109
Abbildung 5.45: Querschnitt der Optimierungsvariante 1 _____	111
Abbildung 5.46: Querschnitt der Optimierungsvariante 2 _____	111
Abbildung 5.47: Querschnitt der Optimierungsvariante 3 _____	112
Abbildung 5.48: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 1 _____	112
Abbildung 5.49: Schlammverteilung [g/l] – Variante 1 _____	113
Abbildung 5.50: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 1 _____	113
Abbildung 5.51: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 2 _____	114
Abbildung 5.52: Schlammverteilung [g/l] – Variante 2 _____	115
Abbildung 5.53: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 2 _____	115
Abbildung 5.54: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] – Variante 3 _____	115
Abbildung 5.55: Schlammverteilung [g/l] – Variante 3 _____	116
Abbildung 5.56: Schwebstoffverteilung [g/l] – Variante 3 _____	116
Abbildung 6.1: Empfehlungen für die Konstruktion des Einlaufbauwerkes _____	121

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Kraftbeiwerte für eine einzelne angeströmte Platte _____	33
Tabelle 3.2:	Kraftbeiwerte radial in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Verbauungsgrad _____	34
Tabelle 3.3:	Kraftbeiwerte tangential in Abhängigkeit von Anstellwinkel und Verbauungsgrad _____	34
Tabelle 4.1:	Durchgeführte Untersuchungen auf der Kläranlage Rheda-Wiedenbrück (Janzen und Rosenwinkel 2005) _____	54
Tabelle 4.2:	Lastfälle zur Modellkalibrierung _____	58
Tabelle 4.3:	Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion ___	74
Tabelle 5.4:	Randbedingungen während der Messungen und für das numerische Modell _____	85
Tabelle 5 .5:	Untersuchte Rheologieparameter (normiert) _____	94
Tabelle 5.6:	Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion __	104
Tabelle 5.7:	Randbedingungen während der Messungen und Eingangsgrößen für das Modell _____	105
Tabelle 5.8:	Leistungssteigerung durch Optimierung der Einlaufkonstruktion __	117

Liste der bereits erschienenen Institutsberichte

- 01/1970 **Holz, K.-P.** Ergänzung des Verfahrens finiter Elemente durch Ecksingularitäten zur verbesserten Berechnung schiefwinkliger Platten. Dissertation, Techn. Univ. Hannover, 1970
- 02/1971 **Ehlers, K.-D.** Berechnung instationärer Grund- und Sickerwasserströmungen mit freier Oberfläche nach der Methode finiter Elemente. Dissertation, Techn. Univ. Hannover, 1971
- 03/1971 **Meissner, U.** Berechnung von Schalen unter großen Verschiebungen und Verdrehungen bei kleinen Verzerrungen mit Hilfe finiter Dreieckselemente. Dissertation, Techn. Univ. Hannover, 1971
- 04/1972 **Grotkop, G.** Die Berechnung von Flachwasserwellen nach der Methode der finiten Elemente. Dissertation, Techn. Univ. Hannover, Sonderdruck aus dem Jahresbericht 1971 d. SFB 79, H. 2, 1972
- 05/1973 **Schulze, K.-W.** Eine problemorientierte Sprache für die Dynamik offener Gerinne. Dissertation, Techn. Univ. Hannover, Mitteil. d. SFB 79, Heft 1, 1973
- 06/1977 **Beyer, A.** Die Berechnung großräumiger Grundwasserströmungen mit Vertikalstruktur mit Hilfe der Finite-Element-Methode. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 34, 1977
- 07/1977 **Ebeling, H.** Berechnung der Vertikalstruktur wind- und gezeitenerzeugter Strömungen nach der Methode der finiten Elemente. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 32, 1977
- 08/1977 **Gärtner, S.** Zur Berechnung von Flachwasserwellen und instationären Transportprozessen mit der Methode der finiten Elemente. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 30, 1977
- 09/1977 **Herrling, B.** Eine hybride Formulierung in Wasserständen zur Berechnung von Flachwasserwellen mit der Methode finiter Elemente. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 37, 1977
- 10/1979 **Hennlich, H.-H.** Aeroelastische Stabilitätsuntersuchung von Linientragwerken. Dissertation, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 49, 1979
- 11/1979 **Kalocay, E.** Zur numerischen Behandlung der Konvektions-Diffusions-Gleichung im Hinblick auf das inverse Problem. Dissertation, Univ. Hannover, 1979
- 12/1980 **Januszewski, U.** Automatische Eichung für ein- und zweidimensionale, hydrodynamisch-numerische Flachwassermodelle. Dissertation, Univ. Hannover, Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 4, Nr. 58, 1980
- 13/1982 **Carbonel Huaman, C.A.A.** Numerisches Modell der Zirkulation in Auftriebsgebieten mit Anwendung auf die nordperuanische Küste. Dissertation, Univ. Hannover, 1982
- 14/1985 **Tuchs, M.** Messungen und Modellierung am Deep Shaft. Dissertation, Univ. Hannover, 1984
- 15/1985 **Theunert, F.** Zum lokalen Windstau in Ästuarien bei Sturmfluten - Numerische Untersuchungen am Beispiel der Unterelbe. Dissertation, Univ. Hannover, 1984
- 16/1985 **Perko, H.-D.** Gasausscheidung in instationärer Rohrströmung. Dissertation, Univ. Hannover, 1984

- 17/1985 **Crotogino, A.** Ein Beitrag zur numerischen Modellierung des Sedimenttransports in Verbindung mit vertikal integrierten Strömungsmodellen. Dissertation, Univ. Hannover, 1984
- 18/1985 **Rottmann-Söde, W.** Ein halbanalytisches FE-Modell für harmonische Wellen zur Berechnung von Wellenunruhen in Häfen und im Küstenvorfeld. Dissertation, Univ. Hannover, 1985
- 19/1985 **Nitsche, G.** Explizite Finite-Element-Modelle und ihre Naturanwendungen auf Strömungsprobleme in Tidegebieten. Dissertation, Univ. Hannover, 1985
- 20/1985 **Vera Muthre, C.** Untersuchungen zur Salzausbreitung in Ästuarien mit Taylor'schen Dispersionsmodellen. Dissertation, Univ. Hannover, 1985
- 21/1985 **Schaper, H.** Ein Beitrag zur numerischen Berechnung von nichtlinearen kurzen Flachwasserwellen mit verbesserten Differenzenverfahren. Dissertation, Univ. Hannover, 1985
- 22/1986 **Urban, C.** Ein Finite-Element-Verfahren mit linearen Ansätzen für stationäre zweidimensionale Strömungen. Dissertation, Univ. Hannover, 1986
- 23/1987 **Heyer, H.** Die Beeinflussung der Tidedynamik in Ästuarien durch Steuerung - Ein Beitrag zur Anwendung von Optimierungsverfahren in der Wasserwirtschaft. Dissertation, Univ. Hannover, 1987
- 24/1987 **Gärtner, S.** Zur diskreten Approximation kontinuumsmechanischer Bilanzgleichungen. Institutsbericht, davon 4 Abschnitte als Habilitationsschrift angenommen, Univ. Hannover, 1987
- 25/1988 **Rogalla, B.U.** Zur statischen und dynamischen Berechnung geometrisch nichtlinearer Linientragwerke unter Strömungs- und Wellenlasten. Dissertation, Univ. Hannover, 1988
- 26/1990 **Lang, G.** Zur Schwebstoffdynamik von Trübungszonen in Ästuarien. Dissertation, Univ. Hannover, 1990
- 27/1990 **Stittgen, M.** Zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung in flexiblen Offshore-Schlauchleitungen. Dissertation, Univ. Hannover, 1990
- 28/1990 **Wollrath, J.** Ein Strömungs- und Transportmodell für klüftiges Gestein und Untersuchungen zu homogenen Ersatzsystemen. Dissertation, Univ. Hannover, 1990
- 29/1991 **Kröhn, K.-P.** Simulation von Transportvorgängen im klüftigen Gestein mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, Univ. Hannover, 1991
- 30/1991 **Lehfeldt, R.** Ein algebraisches Turbulenzmodell für Ästuar. Dissertation, Univ. Hannover, 1991
- 31/1991 **Prüser, H.-H.** Zur mathematischen Modellierung der Interaktion von Seegang und Strömung im flachen Wasser. Dissertation, Univ. Hannover, 1991
- dito **Schröter, A.** Das numerische Seegangmodell BOWAM2 1990 - Grundlagen und Verifikationen - . Univ. Hannover, 1991
- 32/1992 **Leister, K.** Anwendung numerischer Flachwassermodelle zur Bestimmung von Wasserlinien. Dissertation, Univ. Hannover, 1992
- 33/1993 **Ramthun, B.** Zur Druckstoßsicherung von Fernwärmenetzen und zur Dynamik von Abnehmeranlagen. Dissertation, Univ. Hannover, 1993
- 34/1993 **Helmig, R.** Theorie und Numerik der Mehrphasenströmungen in geklüftet-porösen Medien. Dissertation, Univ. Hannover, 1993
- 35/1994 **Plüß, A.** Netzbearbeitung und Verfahrensverbesserungen für Tidemodelle nach der Finiten Element Methode. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 36/1994 **Nöthel, H.** Statistisch-numerische Beschreibung des Wellen- und Strömungsgeschehens in einem Bühnenfeld. Dissertation, Univ. Hannover, 1994

- 37/1994 **Shao, H.** Simulation von Strömungs- und Transportvorgängen in geklüfteten porösen Medien mit gekoppelten Finite-Element- und Rand-Element-Methoden. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 38/1994 **Stengel, T.** Änderungen der Tidedynamik in der Deutschen Bucht und Auswirkungen eines Meeresspiegelanstiegs. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 39/1994 **Schubert, R.** Ein Softwaresystem zur parallelen interaktiven Strömungssimulation und -visualisierung. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 40/1994 **Alm, W.** Zur Gestaltung eines Informationssystems im Küsteningenieurwesen. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 41/1994 **Benali, H.** Zur Kopplung von FEM- und CAD-Programmen im Bauwesen über neutrale Datenschnittstellen. Dissertation, Univ. Hannover, 1994
- 42/1995 **Schröter, A.** Nichtlineare zeitdiskrete Seegangssimulation im flachen und tieferen Wasser. Dissertation, Univ. Hannover, 1995
- 43/1995 **Blase, Th.** Ein systemtechnischer Ansatz zur Modellierung von Hydraulik, Stofftransport und reaktionskinetischen Prozessen in Kläranlagen. Dissertation, Univ. Hannover, 1995
- 44/1995 **Malcherek, A.** Mathematische Modellierung von Strömungen und Stofftransportprozessen in Ästuaren. Dissertation, Univ. Hannover, 1995
- 45/1995 **Lege, T.** Modellierung des Kluftgesteins als geologische Barriere für Deponien. Dissertation, Univ. Hannover, 1995
- 46/1996 **Arnold, H.** Simulation dambruchinduzierter Flutwellen. Dissertation, Univ. Hannover, 1996
- 47/1996 **Kolditz, O.** Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein. Habilitation, Univ. Hannover, 1996
- 48/1996 **Hunze, M.** Numerische Modellierung reaktiver Strömungen in oberflächenbelüfteten Belebungsbecken. Dissertation, Univ. Hannover, 1996
- 49/1996 **Wollschläger, A.** Ein Random-Walk-Modell für Schwermetallpartikel in natürlichen Gewässern. Dissertation, Univ. Hannover, 1996
- 50/1997 **Feist, M.** Entwurf eines Modellierungssystems zur Simulation von Oberflächengewässern. Dissertation, Univ. Hannover, 1997
- 51/1997 **Hinkelmann, R.** Parallelisierung eines Lagrange-Euler-Verfahrens für Strömungs- und Stofftransportprozesse in Oberflächengewässern. Dissertation, Univ. Hannover, 1997
- 52/1997 **Barlag, C.** Adaptive Methoden zur Modellierung von Stofftransport im Kluftgestein. Dissertation, Univ. Hannover, 1997
- 53/1997 **Saberi-Haghighi, K.** Zur Ermittlung der verformungsabhängigen Windbelastung bei Hängedächern. Dissertation, Univ. Hannover, 1997
- 54/1998 **Krüger, A.** Physikalische Prozesse im Nachklärbecken - Modellbildung und Simulation. Dissertation, Univ. Hannover, 1998
- 55/1998 **Wolters, A. H.** Zur Modellierung des instationären thermohydraulischen Betriebsverhaltens von Fernwärmeanlagen. Dissertation, Univ. Hannover, 1998
- 56/1999 **Jankowski, J. A.** A non-hydrostatic model for free surface flows. Dissertation, Univ. Hannover, 1999
- 57/1999 **Kopmann, R.** Mehrdimensionale Effekte in dimensionsreduzierten Gewässergütemodellen. Dissertation, Univ. Hannover, 1999
- 58/1999 **Kahlfeld, A.** Numerische Seegangmodellierung als Bestandteil einer funktionalen Hafenplanung. Dissertation, Univ. Hannover, 1999
- 59/1999 Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Werner Zielke. Univ. Hannover, 1999

- 60/2000 **Kolditz, O., Zielke, W., Wriggers, P., Dürbaum, H.-J., Wallner, M.** 3. Workshop Kluft-Aquifere - Gekoppelte Prozesse in Geosystemen. Univ. Hannover, 2000
- 61/2001 **Malcherek, A.** Hydromechanik der Fließgewässer. Habilitation, Univ. Hannover, 2001
- 62/2001 **Thorenz, C.** Model Adaptive Simulation of Multiphase and Density Driven Flow in Fractured and Porous Media. Dissertation, Univ. Hannover, 2001
- 63/2001 **Kaiser, R.** Gitteradaption für die Finite-Elemente-Modellierung gekoppelter Prozesse in geklüftet-porösen Medien. Dissertation, Univ. Hannover, 2001
- 64/2001 **Rother, T.** Geometric Modelling of Geo-Systems. Dissertation, Univ. Hannover, 2001
- 65/2001 **Habbar, A.** Direkte und inverse Modellierung reaktiver Transportprozesse in klüftig-porösen Medien. Dissertation, Univ. Hannover, 2001
- 66/2001 **Weilbeer, H.:** Strömung und Kolkung an Wasserbauwerken. Dissertation, Univ. Hannover, 2001.
- 67/2002 **Hoyme, H.:** Mesoskalige morphodynamische Modellierungen am Beispiel der Meldorfer Bucht. Dissertation, Univ. Hannover, 2002.
- 68/2004 **Moenickes, S.:** Grid Generation for Simulation of Flow and Transport Processes in Fractures-Porous Media. Dissertation, Univ. Hannover, 2004
- 69/2004 **Strybny, J.:** Ein phasenauflösendes Seegangmodell zur Ermittlung von Bemessungsparametern für Küstenstrukturen. Dissertation, Univ. Hannover 2004
- 70/2004 **Weilbeer, J.:** Modellierung des Partikeltransports in Nachklärbecken als Mehrphasenströmung. Dissertation, Univ. Hannover 2004
- 71/2006 **Mittendorf, K.:** Hydromechanical Design Parameters and Design Loads for Offshore Wind Energy Converters, Dissertation, Univ. Hannover 2006
- 72/2006 **Kohlmeier, M.:** Coupling of thermal, hydraulic and mechanical processes for geotechnical simulations of partially saturated porous media, Dissertation, Univ. Hannover 2006
- 73/2006 **Schumacher, S.:** Leistungsbestimmende Prozesse in Nachklärbecken – Einflussgrößen, Modellbildung und Optimierung , Dissertation, Univ. Hannover 2006