

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

**Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von
belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen**

Christina Hirschbeck

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

Angaben in den Pflichtexemplaren der Dissertation nach Anlage 7 der Promotionsordnung der Universität der Bundeswehr München (PromO) vom 08.11.2000

Universität der Bundeswehr München

Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation: Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen

Verfasser: Christina Hirschbeck

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Keuser

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. F.W. Günthert

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K.-H. Rosenwinkel

Tag der Abgabe: 03.07.09

Tag der Prüfung: 16.12.09

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

Neubiberg den, 28.03.2010

Vorwort

Die Abwasserreinigung besteht aus mehreren Verfahrensstufen, die zusammenwirkend sicherstellen müssen, dass die Anforderungen erfüllt werden und die Gewässer vor nachteiligen Auswirkungen aus Abwassereinleitungen geschützt werden. Der Sandfang, als erste Behandlungsstufe nach dem Rechen und vor der mechanischen und biologischen Abwasserreinigung, hat dabei die Aufgabe, die nachfolgenden Reinigungsstufen, sowie die Pumpen und Leitungen vor Schäden durch Abrasion, Verstopfungen und Ablagerungen zu schützen. Damit hat die Leistung des Sandfangs entscheidende Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit der gesamten Kläranlage. Eine hohe Abscheideleistung von Sand und anderen mineralischen Stoffen kann durch lange Durchflusszeiten erreicht werden. Diese Durchflusszeiten haben allerdings zum Nachteil, dass auch organische Stoffe mit abgeschieden werden. Dieser Effekt, der sich einerseits auf die Qualität des Sandfanggutes in Hinblick auf deren Verwertung negativ auswirkt und andererseits organische Stoffe entfernt, die in den nachfolgenden Stufen zur Denitrifikation oder zur Biogaserzeugung erwünscht sind, sollte vermieden werden. Um dies zu reduzieren, werden Sandfänge mit Belüftung gebaut und betrieben.

Durch den Lufteintrag werden die Durchflussschwankungen im Tages- und Wochengang durch eine Sekundärströmung ausgeglichen, so dass eine gute Abscheideleistung des Sandes bei gleichzeitigem in Schwebelagern Halten der organischen Abwasserinhaltsstoffe erreicht werden kann. Obwohl es inzwischen eine Vielzahl an Bemessungsempfehlungen für belüftete Sandfänge gibt, unterliegen die empfohlenen Werte für den Lufteintrag erheblichen Schwankungen. Für die Durchflusszeiten sind in den letzten Jahren auch Empfehlungen von bisher 20 Minuten auf bis zu 5 Minuten zu finden. Dies ist gekoppelt mit nicht standardisierten Verfahren für die Abscheideleistung, so dass bei Anlagenbauern, Planern und Betreibern Diskussionen und Unsicherheiten über die richtige Auslegung von Sandfängen bestehen. Frau Christina Hirschbeck (geb. Schwarz) hat sich daher für ihre Promotion die Aufgabe gestellt, an Hand grundlegender Untersuchungen hierfür Lösungsvorschläge zu erarbeiten.

Zielsetzung der Dissertation war die Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen und deren Abscheidegrad. Aus diesen Ergebnissen sollten Vorschläge für das Prüfverfahren und die dazu gehörigen Prüfsande sowie konstruktive und betriebliche Empfehlungen abgeleitet werden. Als Vorgehensweise wurden zunächst großtechnische Untersuchungen an bestehenden Sandfängen mit Massenbilanzen durchgeführt. Um die einzelnen Einflussfaktoren detailliert erfassen zu können wurde ein physikalisches Modell im Maßstab 1:4 entwickelt und aufgebaut. Daran konnte der Einfluss der Sandkonzentration, Korngrößenverteilung, Lufteintrag, Einblastiefe, Anordnung der Belüfter, Durchfluss und Querschnittsgestaltung auf die Geschwindigkeitsverteilung, die turbulente Energie und den Abscheidegrad systematisch untersucht werden.

Zunächst wurden 55 Anlagen bezüglich der Bauformen ausgewertet, wobei 80 % der Sandfänge einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen. Die Beckenlänge mit i. M.

10,7 · bSF entspricht den DWA-Bemessungsvorschlägen. Dabei fällt auf, dass bei 78 % der Anlagen der Zulaufstrom oben in den Sandfang eingeleitet wird und bei den restlichen mittig. Umfangreiche Messungen an den Sandfängen der Kläranlage München I und der Kläranlage Karlsfeld ergaben einen ersten Einblick in die Geschwindigkeitsverteilungen bei verschiedenen Durchflussgeschwindigkeiten und Lufteinträgen. Untersuchungen zum Abscheidegrad an 6 Kläranlagen anhand von Sieblinien im Zu- und Ablauf des Sandfangs, der Korngrößenverteilung und der Sandkonzentration im Zulauf ergaben als wesentliches Ergebnis, dass die Sandkonzentration der Korngrößen $\geq 0,2$ mm im Zulauf des Sandfangs den Abscheidegrad maßgeblich beeinflusst. Bei Konzentrationen unter 50 mg/l nimmt der Abscheidegrad erheblich ab.

Die Versuchsergebnisse des Sandfangmodells sind nach Fließgeschwindigkeit und turbulenter kinetischer Energie unter den Einflüssen des Luftvolumenstromes, der Einblastiefe, des Durchflusses und der Querschnittsgestaltung gegliedert. Mit zunehmender Einblastiefe und Durchfluss steigen die Wasserströmung und die turbulente kinetische Energie. Die Querschnittsform hat insbesondere im Sohlbereich Einfluss auf die Walzengeschwindigkeit. Der Abscheidegrad wurde wie die Geschwindigkeitsverteilung nach den oben genannten Einflussfaktoren untersucht. Der Abscheidegrad nimmt dabei insbesondere mit zunehmender Sandfanglänge, abnehmendem Lufteintrag, Einblastiefe und Durchfluss zu. Bei feinerem Sand und geringerer Sandkonzentration nimmt der Abscheidegrad ab.

Zusätzlich sind in der Arbeit Vorschläge zum Prüfverfahren von Sandfängen und zu betrieblichen und konstruktiven Aspekten enthalten. Daraus werden Schlussfolgerungen und Bemessungshinweise abgeleitet, u. a. dass zwei Lastfälle, Trockenwetter mit Sandkonzentrationen von 200 mg/l und Regenwetter mit Sandkonzentrationen von 500 mg/l untersucht werden sollten. Aus energetischer Sicht wird ein möglichst niedriger Lufteintrag von unter $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ empfohlen, sowie eine möglichst große Einblastiefe.

Diese grundlegenden, umfangreichen Untersuchungsergebnisse sind eine wertvolle Hilfe für künftige Auslegungen von belüfteten Sandfängen.

München, im März 2010

F. W. Günthert

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserwesen an der Universität der Bundeswehr München.

Herrn Professor Dr.-Ing. F.W. Günthert danke ich für seine Unterstützung und die wertvollen Anregungen.

Herrn Professor Dr.-Ing K.-H. Rosenwinkel danke ich für die Übernahme des Koreferats, die konstruktiven Gespräche und das Interesse an meiner Arbeit.

Den Mitgliedern des DWA-Fachausschusses KA-5 „Absetzverfahren“ danke ich für die gute Zusammenarbeit und die konstruktiven Anregungen.

Bei Professor Dr.-Ing. Andreas Malcherek bedanke ich mich für die angeregten Diskussionen.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch Dr.-Ing. Helmut Kulisch und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern vom Labor der Professur für Hydromechanik und Wasserbau, sowie Dr.-Ing. Steffen Krause und seinen Mitarbeiterinnen vom Labor der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Wasserwesen bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die freundschaftliche Atmosphäre.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Kläranlagenbetreibern, die mir die Untersuchungen ihrer Sandfänge ermöglichten.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und meinem Mann Siegfried für die Unterstützung während der ganzen Zeit.

München, im März 2010

Christina Hirschbeck, geb. Schwarz

INHALTSVERZEICHNIS

1	Nomenklatur	5
2	Einführung	8
3	Stand der Forschung	9
3.1	Sandfangtypen.....	9
3.2	Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge.....	9
3.2.1	Lufteintrag	9
3.2.2	Konstruktive Empfehlungen.....	11
3.3	Modellsandfänge.....	16
3.3.1	Bisher verwendete Versuchsanlagen	16
3.3.2	Ähnlichkeitsgesetze	18
3.4	Geschwindigkeitsverteilung.....	20
3.4.1	Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung.....	22
3.4.2	Luftblaseninduzierte Sekundärströmung	25
3.4.2.1	Luftblasen in Flüssigkeiten.....	25
3.4.2.2	Bewegter Wasserstrom Q_c	32
3.4.2.3	Maximalgeschwindigkeiten.....	33
3.4.2.4	Lage des Walzenmittelpunktes.....	38
3.4.2.5	Mathematische Ansätze für die Geschwindigkeitsverteilung	39
3.4.3	Wasserinduzierte Sekundärströmung	41
3.4.4	Turbulenz	42
3.5	Abscheidegrad.....	44
3.5.1	Anforderungen an die Sandabscheidung	44
3.5.2	Parameter der Korngrößenverteilung	45
3.5.3	Sinkgeschwindigkeiten nach verschiedenen Ansätzen.....	46
3.5.4	Absetzvorgang in laminarer und turbulenter Strömung	51
3.5.5	Kritische Geschwindigkeit zum Transport von Schwebstoffen und Sedimenten.....	52
3.5.6	Sandanfall und Sandbeschaffenheit.....	54
3.5.7	Prüfverfahren und Prüfsande zur Messung des Abscheidegrades	59
3.5.8	Ergebnisse von Messungen zum Abscheidegrad.....	63
4	Zielsetzung und Vorgehensweise	69
4.1	Ziele	69
4.2	Offene Fragen	69
4.3	Aufgaben.....	71

4.4	Vorgehensweise	72
5	Versuchsbeschreibung	73
5.1	Beschreibung der ausgewählten belüfteten Sandfänge.....	73
5.2	Beschreibung des physikalischen Sandfangmodells.....	81
5.3	Messverfahren.....	83
5.3.1	Messung der Fließgeschwindigkeiten.....	83
5.3.2	Regressionsanalysen der Messwerte.....	85
5.3.3	Messung der Korngrößenverteilung	86
5.3.4	Messung des Abscheidegrades	89
5.4	Versuche im physikalischen Sandfangmodell	91
5.4.1	Kalibrierung	91
5.4.2	Versuche am kalibrierten physikalischen Modell.....	94
6	Ergebnisse.....	99
6.1	Messungen an großtechnischen, belüfteten Sandfängen	99
6.1.1	Ausgeführte Bauformen von belüfteten Sandfängen.....	99
6.1.2	Ergebnisse der Messungen der Fließgeschwindigkeiten	101
6.1.2.1	Sandfang mit Rechteckquerschnitt (Kläranlage München I).....	101
6.1.2.2	Sandfang mit Trapezquerschnitt (Kläranlage Karlsfeld)	107
6.1.3	Ergebnisse der Messungen des Abscheidegrades.....	110
6.1.3.1	Abscheidegrad durch Probenahme im Zu- und Ablauf des Sandfanges	110
6.1.3.2	Abscheidegrad durch Untersuchung von Sandfanggut und Primärschlamm des Vorklärbeckens	118
6.2	Untersuchungen an einem physikalischen Sandfangmodell im Maßstab 1:4.....	119
6.2.1	Auswahl des Versuchssandes	119
6.2.2	Ergebnisse der Kalibrierung des physikalischen Modells	122
6.2.2.1	Ähnlichkeit des Lufteintrages.....	122
6.2.2.2	Einfluss des Düsendurchmessers auf die Walzenströmung und die turbulente kinetische Energie	124
6.2.3	Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie im kalibrierten physikalischen Modell	129
6.2.3.1	Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Blasengröße	129
6.2.3.2	Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Walzenströmung und die Turbulenz.....	131

6.2.3.3	Einfluss der Einblastiefe auf die Walzenströmung und die Turbulenz	136
6.2.3.4	Einfluss des Durchflusses und des Lufteintrages auf die Strömung in Sandfanglängsrichtung und die Turbulenz	141
6.2.3.5	Einfluss der Querschnittsgestaltung auf die Strömung und auf die Turbulenz	148
6.2.3.6	Lage des Walzenmittelpunktes	152
6.2.4	Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell	154
6.2.4.1	Einfluss des Luftvolumenstroms auf den Abscheidegrad	154
6.2.4.2	Einfluss der Einblastiefe auf den Abscheidegrad.....	160
6.2.4.3	Einfluss des Durchflusses auf den Abscheidegrad...	163
6.2.4.4	Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad	166
6.2.4.5	Einfluss der Sandkonzentration auf den Abscheidegrad	169
6.2.4.6	Einfluss der Querschnittsgestaltung auf den Abscheidegrad	171
6.2.5	Modellierung der Strömung und des Partikeltransports	172
6.2.5.1	Wirkungsgraph	172
6.2.5.2	Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes	174
6.2.5.3	Verifikation des mathematischen Modells anhand von eigenen Messungen.....	185
6.2.5.4	Verifikation des mathematischen Modells anhand von Literaturangaben	188
6.2.5.5	Partikelbahnen	190
7	Diskussion der Ergebnisse.....	201
7.1	Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie	201
7.1.1	Kritische Geschwindigkeiten für eine Wiederaufwirbelung von Sand	201
7.1.2	Geschwindigkeitsverteilung in Querrichtung	202
7.1.3	Geschwindigkeitsverteilung in Längsrichtung	204
7.1.4	Turbulente kinetische Energie	205
7.2	Simulation der Partikelbahnen	210
7.3	Maßgebliche Einflußfaktoren auf den Abscheidegrad	213
7.4	Prüfverfahren zum Abscheidegrad	219
7.5	Betriebliche und konstruktive Aspekte.....	221
8	Schlussfolgerungen und Bemessungshinweise	227
8.1	Prüfverfahren zum Abscheidegrad	227
8.2	Betriebliche und konstruktive Aspekte.....	230

9	Berechnungsbeispiel	236
9.1	Bemessung nach den vorliegenden Ergebnissen	236
9.2	Bemessung nach DWA (2008)	241
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	244
11	Literaturverzeichnis	252
12	Abbildungsverzeichnis	257
13	Tabellenverzeichnis	265
14	Anhang.....	266

1 Nomenklatur

Abkürzung	Definition	Dimension
α	Sohlquerneigung Fettfangkammer	°
A	Fläche	m ²
A _D	Querschnittsfläche Düse	m ²
A _{FF}	Querschnittsfläche Fettfangkammer	m ²
A _{SF}	Querschnittsfläche Sandfang	m ²
b	Breite	m
B	Gerinnebreite	m
b _{FF}	Breite der Fettfangkammer	m
b _R	Breite der Sandfanggutrinne	m
b _{SF}	Breite des Sandfanges	m
b(z)	Breite des Auftriebsstrahls über einer Düsenreihe	m
C _D	Widerstandsbeiwert	-
c	Konzentration	mg/l
c _{Sand}	Sandkonzentration	mg/l
CSF	Corey Shape Faktor	-
d	Durchmesser	m
d _B	Blasendurchmesser	m
d _D	Düsendurchmesser	m
d _m	Mittlerer Korndurchmesser	m
d ₅₀	Mediandurchmesser	m
d _T	für den Abscheidegrad des Sandfanges maßgebende Trennkorngröße, z.B. 0,2 mm	m
D _•	bezogener Korndurchmesser	m
ΔH_e	Energiehöhendifferenz	m
Δp	Druckdifferenz	mbar
η_A	Wirkungsgrad des Energietransfers	%
η_T	Abscheidegrad bezogen auf die Trennkorngröße d _T in %	%
η	dynamische Viskosität	kg·m/s
ε	Turbulenz	m ² /s
Fr	Froudezahl	-
Fr _B	Froudezahl für die Luftblasenbewegung	-
Fr _P	Froudezahl des Kornes	-
h	Höhe	m
H	Höhe des Sandfanges mit Sandfanggutrinne (h _{SF} +h _R)	m
h _{bel}	Einblastiefe	m
h _e	Eintrittsverlust	m
H _e	Energiehöhe	m
h _{MW}	Eintauchtiefe Mittelwand	m
h _R	Höhe der Sandfanggutrinne	m
h _r	Reibungsverlust	m
h _R (y)	Höhe der Sohleinbauten in Abhängigkeit von y	m

h_{SF}	Höhe des Sandfanges	m
I	Sohlgefälle	‰
K	Kármán Konstante = 0,41 für klares Wasser	-
k	Turbulente kinetische Energie	m^2/s^2
k_s	Sohlrauhheit	mm
k_{ST}	Stricklerbeiwert	$m^{1/3}/s$
L_{SF}	Länge des Sandfanges	m
M	Maßstabsfaktor	-
m_{Sand}	Sandmasse	g
n	Anzahl der Sandfänge	-
n	Anzahl der Walzenumdrehungen	-
ν	Kinematische Viskosität	m^2/s
O_{SF}	Sandfangoberfläche	m^2
P	Powers Rundheitsbeiwert	-
Q	Durchfluss	m^3/h
Q_c	Zirkulierter Wasservolumenstrom	m^3/h
Q_L	Lufteintrag	Nm^3/h
Q_m	Bemessungszufluss bei Regenwetter	m^3/h
Q_t	Bemessungszufluss bei Trockenwetter	m^3/h
q_A	Oberflächenbeschickung	m/h
$q_{A,FF}$	Oberflächenbeschickung Fettfangkammer	m/h
q_{LV}	Lufteintrag pro m^3 Beckenvolumen	$Nm^3/(m^3 \cdot h)$
q_{LL}	Lufteintrag pro Meter Beckenlänge	$Nm^3/(m \cdot h)$ $Nm^3/(m \cdot s)$
r	Rückhaltefaktor	-
R	Hydraulischer Radius	m
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
Re	Reynoldszahl	-
Re_p	Reynoldszahl des Korns	-
RW	Regenwetter	-
ρ	Dichte	kg/m^3
ρ_A	Dichte der Luft	kg/m^3
ρ_W	Dichte des Wassers	kg/m^3
ρ_S	Dichte des Sandes	kg/m^3
σ_W	Oberflächenspannung	N/m
SS_{tot}	Totale Variabilität der Stichprobe	-
SS_{req}	Variabilität der geschätzten Residuen	-
T	Wassertiefe	m
TKE	Turbulente Kinetische Energie	m^2/s^2
t_R	Durchflusszeit	s
T_u	Turbulenzgrad	-
T_B	Sohlschubspannung	N/m^2
TW	Trockenwetter	-
u	Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung x	m/s

u	Ungleichförmigkeitszahl	-
u_c	Kritische Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s
U	Vom Fluid benetzter Umfang	m
u_{max}	Maximale Fließgeschwindigkeit in Längsrichtung x	m/s
u_p	Fließgeschwindigkeit eines Partikels	m/s
u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit	m/s
u_{Rinne}	Fließgeschwindigkeit in der Sandsammelrinne	m/s
v	Geschwindigkeit in Querrichtung y	m/s
v_{max}	Randgeschwindigkeit der Wasserwalze an der Wasseroberfläche	m/s
v_{Sohl}	Untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze	m/s
V	Volumen	m ³
w	Geschwindigkeit in vertikaler Richtung z	m/s
w_A	Aufstiegsgeschwindigkeit von Luftblasen	m/s
w_f	Geschwindigkeit des Fluids	m/s
w_{max}	Randgeschwindigkeit der Wasserwalze in z -Richtung	m/s
w_p	Geschwindigkeit des Partikels	m/s
w_s	Sinkgeschwindigkeit	m/s
w^*	Dimensionslose Sinkgeschwindigkeit	m/s
We	Weberzahl	-
We_B	Weberzahl für die Luftblasenbewegung	-
$X_{0,SF}$	Konzentration bzw. Fracht an mineralischen Bestandteilen $\geq d_T$ im Zulauf zum Sandfang	g/m ³
$X_{e,SF}$	Konzentration bzw. Fracht an mineralischen Bestandteilen $\geq d_T$ im Ablauf des Sandfanges	g/m ³
y_{MP}	Abstand Walzenmittelpunkt von der Seite	m
z	Bodenabstand	m
z_{MP}	Abstand Walzenmittelpunkt von der Wasseroberfläche	m

2 Einführung

Belüftete Sandfänge haben die Aufgabe mineralische Partikel mit einem Korndurchmesser größer oder gleich einer definierten Trennkorngröße (meist 0,2 mm) zu einem definierten Prozentsatz abzuscheiden, während kleinere Partikel und organische Stoffe den nachfolgenden Stufen weitergeleitet werden. Ein zu hoher Abscheidegrad im Sandfang führt zur Abscheidung von organischer Substanz, die dann der Denitrifikation nicht mehr zur Verfügung steht. Weiterer Nachteil ist das mögliche Verstopfen von Rohrleitungen. Ein zu geringer Abscheidegrad führt zu Sandablagerungen in den nachfolgenden Stufen und kann das Verstopfen von Sandabzugseinrichtungen, erhöhte Einströmverluste, Volumenreduktion und damit Reduzierung der Reinigungsleistung von Belebungsbecken, Volumenreduktion und damit eine kleinere Gasausbeute in Faulbehältern, sowie Schäden an Pumpen, Rohrleitungen und Zentrifugen durch Abrasion mit sich bringen (Kalbskopf, 1981; Seyfried 1994). Nachteilig ist des Weiteren ein erhöhter Betriebsaufwand durch die erforderliche Entfernung des Sandes, besonders aus den Trichterspitzen von Faulbehältern. Besonders bei Membranbelebungsanlagen ist ein guter Abscheidegrad zum Schutz der Membranen sehr wichtig.

Es gibt eine Vielzahl von Bemessungsempfehlungen für belüftete Sandfänge. Besonders die empfohlenen Werte für den Lufteintrag unterliegen einer deutlichen Schwankungsbreite von $0,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (Seyfried, 1994) und mehr als $3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (Hartmann, 1966). Auch für die Anordnung der Belüfter gibt es zahlreiche Vorschläge. Als Alternative zur meist ausgeführten kontinuierlichen Belüftung empfiehlt Seyfried (1988) einen unbelüfteten Bereich im hinteren Teil des Sandfanges, Boes (1990) hingegen eine Reduzierung der Belüftung im hinteren Teil. Die Empfehlung für die Durchflusszeit wurde im Jahr 2008 von 10 Minuten auf ≥ 5 Minuten reduziert (DWA, 2008). Dies ist immer noch die Obergrenze von internationalen Empfehlungen von 2 bis 5 Minuten (Metcalf & Eddy, 2003).

Bisher gibt es noch kein standardisiertes Messverfahren für den Abscheidegrad von Sand in Sandfanganlagen. Dies erschwert den Nachweis, ob der geforderte Abscheidegrad eingehalten wird.

3 Stand der Forschung

3.1 Sandfangtypen

Für die Trennung des Sandes vom Abwasser stehen verschiedene Sandfangtypen zur Verfügung. Welcher Sandfangtyp gewählt wird hängt von verschiedenen betrieblichen und bautechnischen Faktoren ab (ATV, 1997). Als betriebliche Faktoren sind unter anderem Abwasseranfall, geforderter Abscheidegrad, Sandanfall und Notwendigkeit der Fettabscheidung zu nennen, als bautechnische Faktoren der zur Verfügung stehende Platz, die Höhenlage der Kläranlage, sowie die maschinelle Ausrüstung (ATV, 1997). Sandfänge gehören zur mechanischen Reinigungsstufe und werden meist zwischen Rechen bzw. Sieb und der Vorklärung angeordnet. Man unterscheidet zwischen Tiefensandfang (Blunk, 1933), Rundsandfang (Geiger, 1942), Flach- bzw. Langsandfang und belüfteten Sandfängen (ATV, 1997). Vorteil der belüfteten Sandfänge ist, dass durch den Lufteintrag eine von Durchflussschwankungen unabhängige Sekundärströmung induziert wird, die organische Partikel in Schwebelage hält und zusätzlich eine Fettabscheidung in der Fettfangkammer ermöglicht (ATV, 1997). Zusätzlich wird der Querschnitt so groß gewählt, dass die horizontale Fließgeschwindigkeit unter 0,2 m/s bleibt (ATV, 1997). Wegen dieser Vorteile wurden in dieser Arbeit nur belüftete Sandfänge untersucht. Bezüglich der anderen Sandfangtypen sei auf die Literatur (ATV, 1997; ATV 1998; Rosenwinkel et al., 2006) verwiesen, in der die Funktionsprinzipien umfassend dargestellt sind.

3.2 Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge

3.2.1 Lufteintrag

Der Lufteintrag ist eine wesentliche Bemessungsgröße für belüftete Sandfänge, da dadurch eine Walzenströmung als Sekundärströmung induziert wird und damit eine Unabhängigkeit von Durchflussschwankungen erreicht wird (ATV, 1997). Durch die Turbulenz dieser Sekundärströmung werden organische Partikel in Schwebelage gehalten, während größere Teilchen auf einer Absetzbahn direkt in die Sandfanggutrinne getragen werden. Nach Kalbskopf (1966) beträgt der optimale Luftbedarf für belüftete Sandfänge das 1,5 fache der Querschnittsfläche. Der auf diese Weise ermittelte Luftbedarf hat die Einheit $\text{Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$.

Boes (1990) hat 30 belüftete Sandfänge hinsichtlich des Lufteintrags ausgewertet und festgestellt, dass aufgrund von Sicherheitszuschlägen die tatsächlichen Lufteinträge deutlich höher als die Empfehlungen sind. Dies könne dann zu schlechten Abscheidegraden führen. Die besten Betriebserfahrungen ergäben sich durch einen Lufteintrag von 8 Watt pro m^3 Sandfangvolumen nach Gleichung (1).

$$q_{LL} = 3,4 \cdot A_{SF}^{0,5} [\text{Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{h})] \quad (1)$$

Das ATV Handbuch (1997) unterscheidet beim Lufteintrag nach der Querschnittsfläche des Sandfanges. Für Querschnitte bis 3 m² wird ein Lufteintrag von 0,8 Nm³/(m³·h) empfohlen, für größere Querschnitte sollte der Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) nicht überschritten werden. In Abbildung 1 sind Empfehlungen verschiedener Autoren für den Lufteintrag gegenübergestellt.

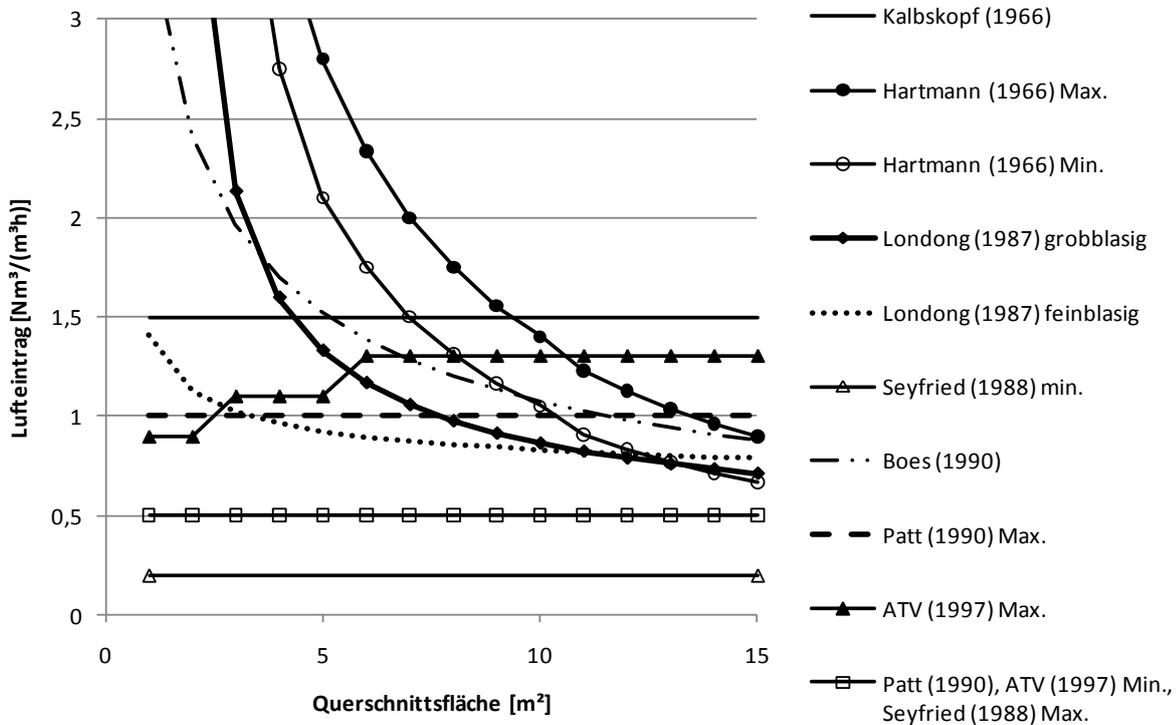


Abbildung 1: Empfehlungen verschiedener Autoren für den Lufteintrag [Nm³/(m³·h)] in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche des Sandfanges (nach Boes, 1990).

Auffällig sind die große Bandbreite der Empfehlungen und die hohen Werte insbesondere für kleinere Querschnitte. Seyfried (1988) hat festgestellt, dass die in der Literatur angegebenen Luftmengen zu hoch seien und empfiehlt einen Lufteintrag von 0,2 bis 0,5 Nm³/(m³·h). In einer späteren Veröffentlichung (Seyfried, 1994) schlägt er sogar eine Begrenzung der Luftzufuhr auf 0,1 bis 0,2 Nm³/(m³·h) vor, um den frühzeitigen Abbau leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen zu minimieren. Grundsätzlich sei eine regelbare Belüftung zu empfehlen (Seyfried, 1988).

Obenaus et al. (1998) haben Untersuchungen zum Einfluss des Lufteintrages im Sandfang auf die biologische Reinigungsstufe durchgeführt. Sie haben festgestellt, dass übermäßige Sandfangbelüftung zu einem teilweisen Abbau leicht abbaubarer Kohlenstoffverbindungen führen kann und deshalb die Auswirkungen des fehlenden Kohlenstoffs auf die biologische Reinigungsstufe untersucht. Dies wurde mit Hilfe des Activated Sludge Model No. 2 (Henze et al., 1994) modelliert, in dem bei der Fraktionierung des Zulaufs der Anteil des löslichen chemischen Sauerstoffbedarfs

(CSB) zur biologischen Reinigung verringert wurde. Im Ablauf der Kläranlage ergab sich bei diesen Berechnungen eine deutliche Zunahme des Orthophosphats bei hohen Lufteinträgen. Daraus leiteten Obenaus et al., (1998) die Empfehlung ab, für kleine und mittlere Sandfänge, mit einer Querschnittsfläche bis 8 m^2 , einen Lufteintrag von $0,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und für größere Sandfänge, ab einer Querschnittsfläche von 8 m^2 , einen Lufteintrag von $0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $0,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ anzusetzen. Die von der DWA (2008) empfohlenen Werte sind deutlich höher.

Seyfried (1988) empfiehlt zusätzlich, dass die letzten 2 bis 3 m im Sandfang unbelüftet bleiben sollen. Weitere Vorschläge zur Anordnung der Belüfter finden sich bei Boes (1990). Bei über die Sandfanglänge gleichmäßigem Lufteintrag werde der meiste Sand schon im ersten Drittel abgeschieden, der weitere Fließweg bringe keine Verbesserung der Abscheideleistung. Daraus schloss Boes (1990), dass eine über die Länge abnehmende Belüftung zu einer Verbesserung der Abscheideleistung führen müsse. Die besten Ergebnisse erhielt er bei einem Verhältnis der Luftzufuhr vorne zu hinten von 2:1. Bei einer neuen Entwicklung im Kompaktanlagenbereich wird diese Empfehlung ansatzweise umgesetzt (Branner, 2005), indem der vordere Teil belüftet wird und der hintere Teil nicht. Untersuchungen an großtechnischen Sandfängen (Stein, 1992) konnten die positiven Effekte einer abnehmenden Belüftung längs des Sandfanges nur teilweise bestätigen. Dort trat eine Verbesserung der Abscheideleistung nur bei Sandfängen, die bei gleichmäßiger Belüftung z. B. wegen zu hohem Lufteintrag unzureichende Sandabscheidung aufwiesen, auf.

3.2.2 Konstruktive Empfehlungen

In der internationalen Literatur (Albrecht, 1967; Metcalf & Eddy, 2003) sind die empfohlenen Sandfangquerschnitte meist rechteckig mit einer Rinne in der Mitte und beidseitigen Schrägen mit gleichem Winkel.

In Abbildung 2 ist ein empfohlener Querschnitt der DWA (2008) für belüftete Sandfänge dargestellt. Beispiele für die Wahl der Sandfangabmessungen finden sich in DIN 19551-2 (2002). Die Sandfanggutrinne ist ausmittig auf der Seite des Lufteintrages angeordnet und auf der Seite der Tauchwand zum Fetttfang schließt die Sohle mit Neigungswinkel von 35° bis 45° an die Sandfanggutrinne an. Die Eintauchtiefe der Mittelwand ohne Einbauten soll nach DWA (2008) ca. $0,2 \cdot h_{\text{SF}}$ betragen.

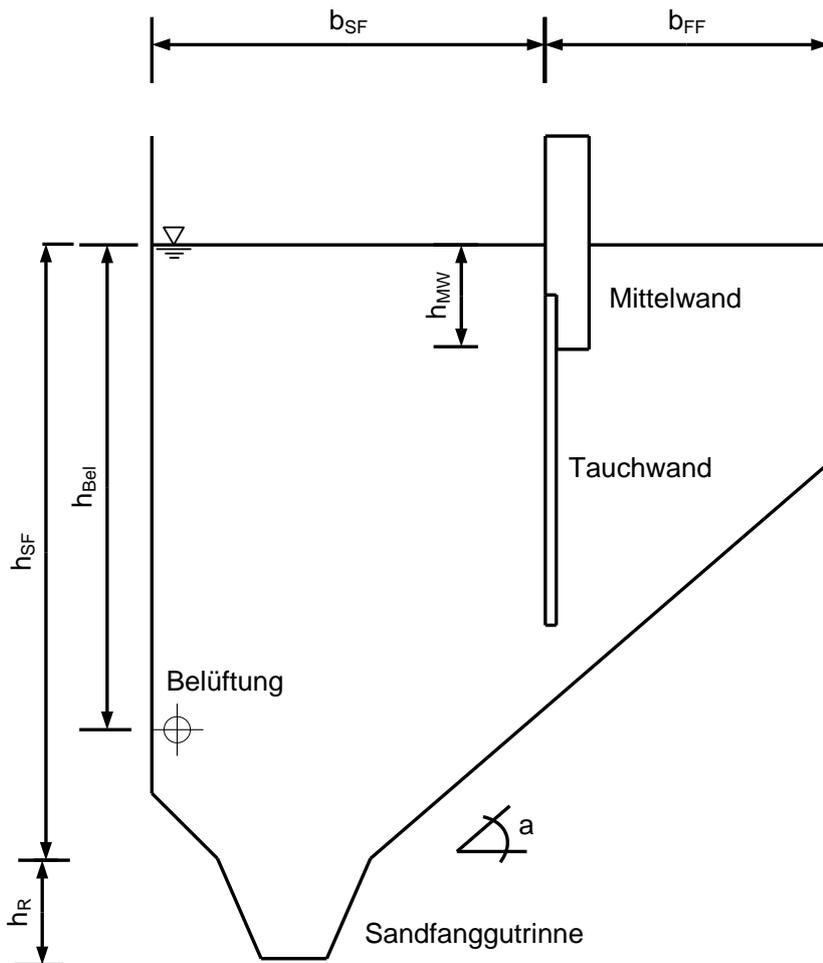


Abbildung 2: Empfohlene Querschnittsform für belüftete Sandfänge (DWA, 2008).

In Tabelle 1 sind Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge aus verschiedenen Quellen gegenübergestellt.

Tabelle 1: Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge.

Parameter	DWA, (2008)	ATV (1998)	ATV (1997)	Londong (1987)	Hart- mann (1966)	Metcalf and Eddy (2003)
Horizontale Fließ- geschwindigkeit u , m/s	$\leq 0,20$	< 20	$\leq 0,20$	0,2	$\leq 0,2$ bis 0,25	-
Randgeschwindigkeit der Wasserwalze, m/s	-	-	$\leq 0,20$	0,20 bis 0,22	0,3 bis 0,4	-
Breite/Tiefe-Verhältnis b_{SF}/h_{SF}	0,8 bis 1,0	0,8 bis 1,0	$> 0,8$	0,8 bis 0,9	0,5 bis 0,7	1:1 bis 5:1
Abgeschiedene Korngröße, mm	$< 0,2$	$< 0,2$	$< 0,2$	$> 0,25$	-	$> 0,21$
Querschnittsfläche A_{SF} (ohne Fettfang), m ²	1 bis 15	1 bis 15	1 bis 15	1 bis 7	-	-
Durchflusszeit t_R RW, min	> 5	5 bis 20	10	> 10	3 bis 4	2 bis 5
Durchflusszeit t_R TW, min	-	-	-	> 20	10 bis 15	-
Beckenlänge L_{SF} , m	$> 10b_{SF}$ < 50	$> 10b_{SF}$ < 50		15 bis 60	-	7,5 bis 20
Einblastiefe h_{bel} , m	$h_{SF}-0,3$	$h_{SF}-0,3$	$h_{SF}-0,3$	$0,7 \cdot h_{SF}$	-	$h_{SF}+h_{Rinne}-$ $0,45 \dots 0,6$
spez. Lufteintrag bezogen auf das Beckenvolumen (ohne Fettfangkammer) q_{LV} , Nm ³ /(m ³ ·h)	0,5 bis 1,3	0,5 bis 1,3	0,5 bis 1,3	Grobblasig: $(0,63+0,52 \cdot \ln h_{bel})^{-0,62}$ Feinblasig: $(0,07+0,56 \cdot \ln h_{bel})^{-1,33}$ 1 bis 1,5	-	-
spez. Lufteintrag pro Meter Länge, Nm ³ /(m·h)	-	-	-	-	10 bis 15	0,2 bis 0,5
Sohlquerneigung Fettfangkammer α , °	35 bis 45	35 bis 45	35 bis 45	40 bis 45	45	-
Breite der Fettfangkammer b_{FF} , m	0,5 bis 1,0 b_{SF}	0,2 bis 0,5 b_{SF}	-	-	-	-
Flächenbeschickung Fettfangkammer $q_{A,FF} = Q_i/A_{FF}$ bei TW, m/h	≤ 25	≤ 25	-	-	≤ 25	-

Die empfohlenen Werte für die Fließgeschwindigkeiten in Sandfanglängsrichtung variieren stark. So findet sich bei Albrecht (1967) die Empfehlung, dass die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung von 0,15 m/s nicht überschritten werden soll. Seyfried (1988) nennt diesbezüglich den Wert 0,2 m/s, der sich auch in

ATV (1997), ATV (1998) und DWA (2008) wiederfindet. In DIN EN 12255-3 (2001) und bei Imhoff & Imhoff (2007) wird eine horizontale Fließgeschwindigkeit von maximal 0,3 m/s empfohlen. Die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze sollte nach ATV (1997) und Kalbskopf (1966) $\leq 0,2$ m/s betragen. Patt (1990) schlägt 0,25 m/s vor. Hartmann & Pöpel (1958) und Seyfried (1988) empfehlen eine Randgeschwindigkeit der Wasserwalze von 0,25 bis 0,30 m/s.

Schrimpf und Steinle (1984) haben die Gleichung (2) für die Sandfanglänge in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen der Wasserwalze n entwickelt.

$$L_{SF} = \frac{2nu\sqrt{\pi}\sqrt{A_{SF}}}{v} \text{ [m]} \quad (2)$$

Ihre Untersuchungen haben ergeben, dass bei Regenwetter 3 bis 6 Umdrehungen der Wasserwalze zu empfehlen sind. Für überschlägige Berechnungen wurden eine horizontale Fließgeschwindigkeit von 0,15 m/s und eine Randgeschwindigkeit der Wasserwalze von 0,3 m/s zugrundegelegt (Schrimpf & Steinle, 1984).

Der einzige Richtwert für den Turbulenzgrad im belüfteten Sandfang findet sich bei Londong (1987). Er empfiehlt einen Turbulenzgrad der Randgeschwindigkeit der Wasserwalze von 0,1 bis 0,2. Bezugspunkt ist der Geschwindigkeitsvektor parallel zur Sohle in der Mitte des Sandfanges in einer Höhe von 0,1 m über der Sohle.

Um eine gleichmäßige Durchströmung eines Beckens zu erreichen, sollte das Breite/Tiefe-Verhältnis ungefähr 0,8 betragen und die Länge mindestens der achtfachen Breite entsprechen (Gieseke & Mosonyi, 1997). Diese Empfehlungen finden sich auch in DWA (2008) wieder, wobei dort eine Länge von mindestens der zehnfachen Breite empfohlen wird. Bezüglich der Zulauf- und Ablaufgestaltung geht aus der Arbeit von Patt (1990) hervor, dass der Zulaufkanal am besten nahe der Wasseroberfläche, im oberen Drittel der Sandfanghöhe angeordnet sein sollte, während im Ablaufbereich das Abwasser am besten aus der Mitte der Wasserwalze abgeleitet werden sollte (Schrimpf, 1987). Eine seitliche Einleitung des Abwassers zur Unterstützung der Walzenbildung wird von Boes (1990) auch als günstig bewertet. Gieseke & Mosonyi (1997) raten von einer seitlichen Einleitung ab, da dadurch die Turbulenz im Zulaufbereich stark erhöht wird.

Londong (1987) hat einen Ablaufplan für die Bemessung belüfteter Sandfänge vorgeschlagen. Dieser Ablaufplan wurde in Abbildung 3 mit Hilfe der Bemessungsempfehlungen der DWA (2008) überarbeitet.

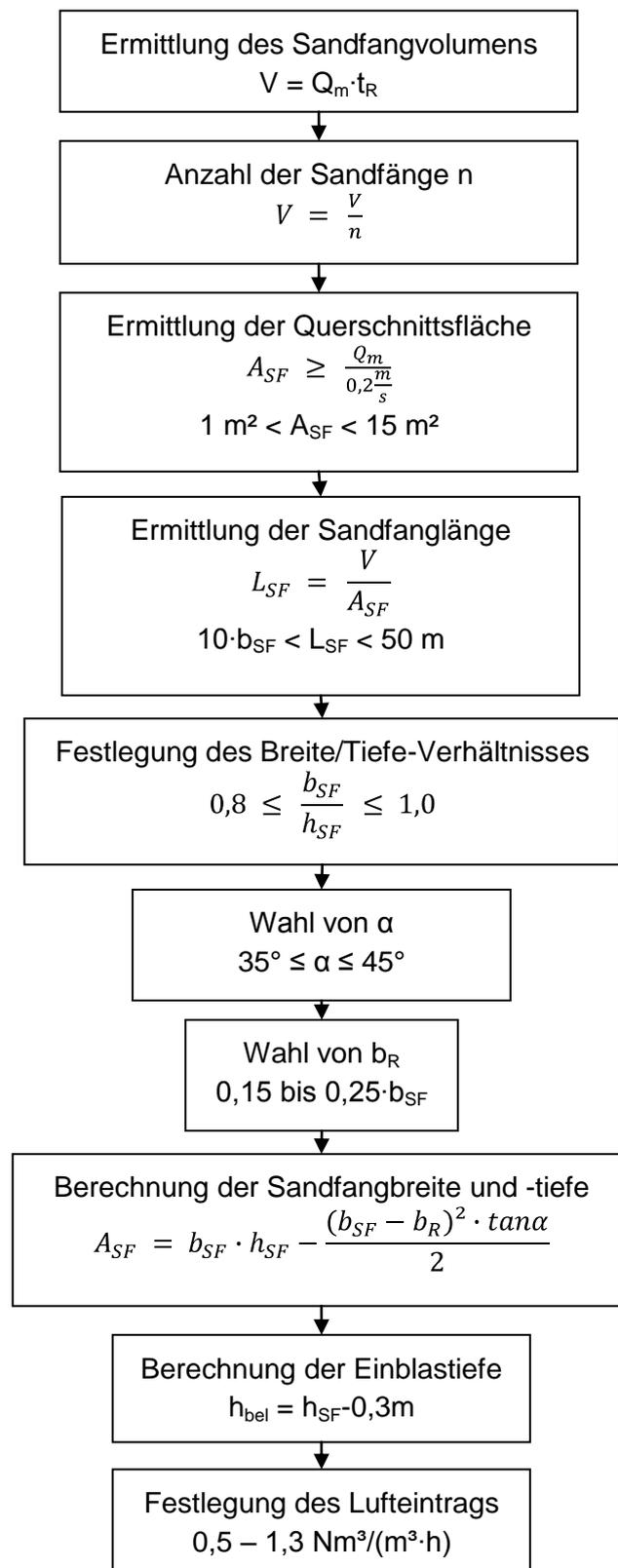


Abbildung 3: Ablaufplan für die Bemessung eines belüfteten Sandfanges nach Londong (1987) und DWA (2008).

3.3 Modellsandfänge

3.3.1 Bisher verwendete Versuchsanlagen

In der Literatur gibt es einige Modellsandfänge, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Das Versuchsbecken von Kalbskopf (1966), das in Abbildung 4 dargestellt ist, bestand aus Plexiglas und war 0,2 m/s lang, so dass die Richtung der Wasserströmung, die Luftblasenverteilung und der Absetzweg der zugegebenen Sandkörner gut beobachtet werden konnte. Das Becken war 1,36 m breit, 1,42 m hoch und 0,20 m lang.

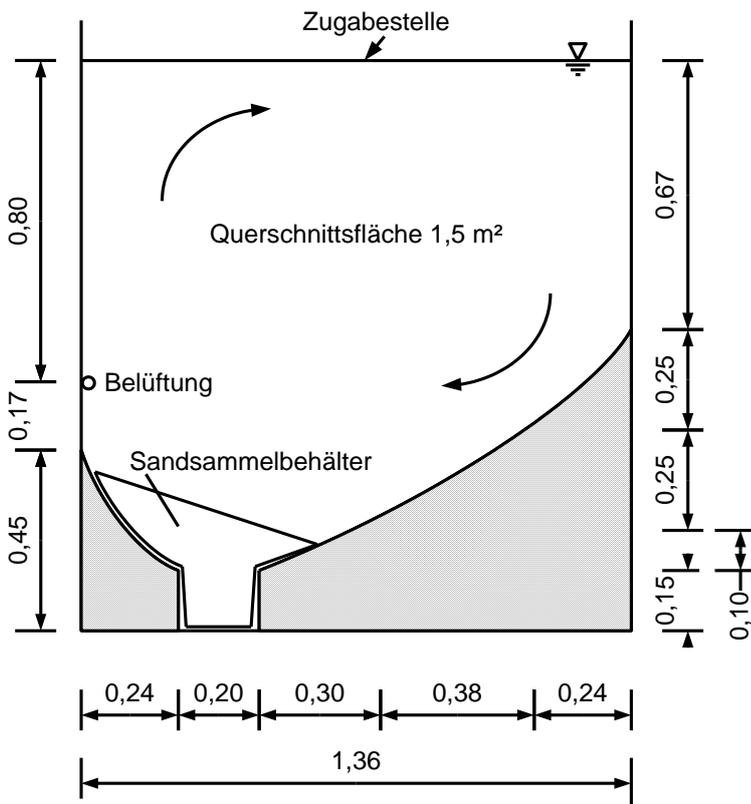


Abbildung 4: Beckenquerschnitt des physikalischen Modells eines belüfteten Sandfanges von Kalbskopf (1966).

In Abbildung 5 ist der Querschnitt des physikalischen Modells eines belüfteten Sandfanges von Schrimpf (1987) dargestellt. Das Becken war 0,835 m breit, 0,9 m hoch und 1,20 m lang. Dies entspricht einem Verkleinerungsmaßstab von 1:4. Die Belüftung erfolgte über ein Kunststoffrohr mit 20 mm Innendurchmesser und Lochdüsen ($d_D = 2$ mm) im Abstand von 100 mm auf der Rohroberseite.

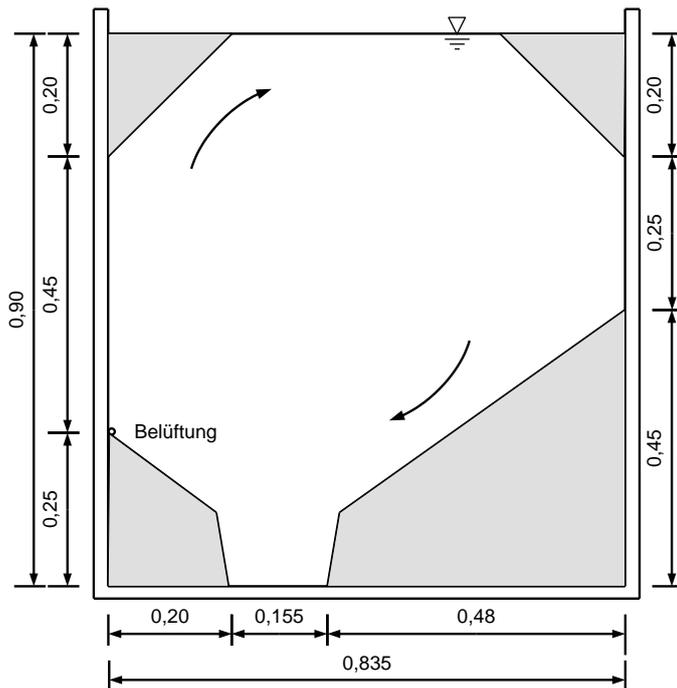


Abbildung 5: Beckenquerschnitt des physikalischen Modells eines belüfteten Sandfanges von Schrimpf (1987).

Zusätzlich hat Schrimpf (1987) auch noch Untersuchungen an einem kreisförmigen Sandfangquerschnitt durchgeführt. Das Sandfangmodell hatte den Durchmesser 1,6 m und eine Länge von 4,5 m. Am Boden war eine 0,2 m tiefe Sandfanggrinne angeordnet.

Patt (1990) hat Untersuchungen an zwei kreisförmigen belüfteten Sandfangmodellen durchgeführt, von denen das eine einen Durchmesser von 1,6 m und eine Länge von 22 m hatte, das andere einen Durchmesser von 0,635 m und eine Länge von 8,80 m. Die Belüftung erfolgte in beiden Modellen durch Düsen mit Durchmesser 1 mm im Abstand von 0,1 m. Beide Sandfangquerschnitte waren Kreisquerschnitte ohne Sandfanggrinne.

Londong (1987) hat für seine Versuchsanordnung physikalische Modellsandfänge im großtechnischen Maßstab angefertigt (Abbildung 6), da eine Verkleinerung für ein Luft-Wasser-Sediment-Gemisch schwierig ist. Das eine Modell war 1,45 m breit und 1,45 m lang, mit einer maximalen Wassertiefe von 1,45 m, das andere war 3 m breit und 1,50 m lang mit einer maximalen Wassertiefe von 3,38 m. Beim ersten Sandfangmodell konnte der Neigungswinkel der Sohle verändert werden, beim zweiten die Tauchwand herausgenommen werden. Die Einblastiefen konnten bei beiden Modellen variiert werden.

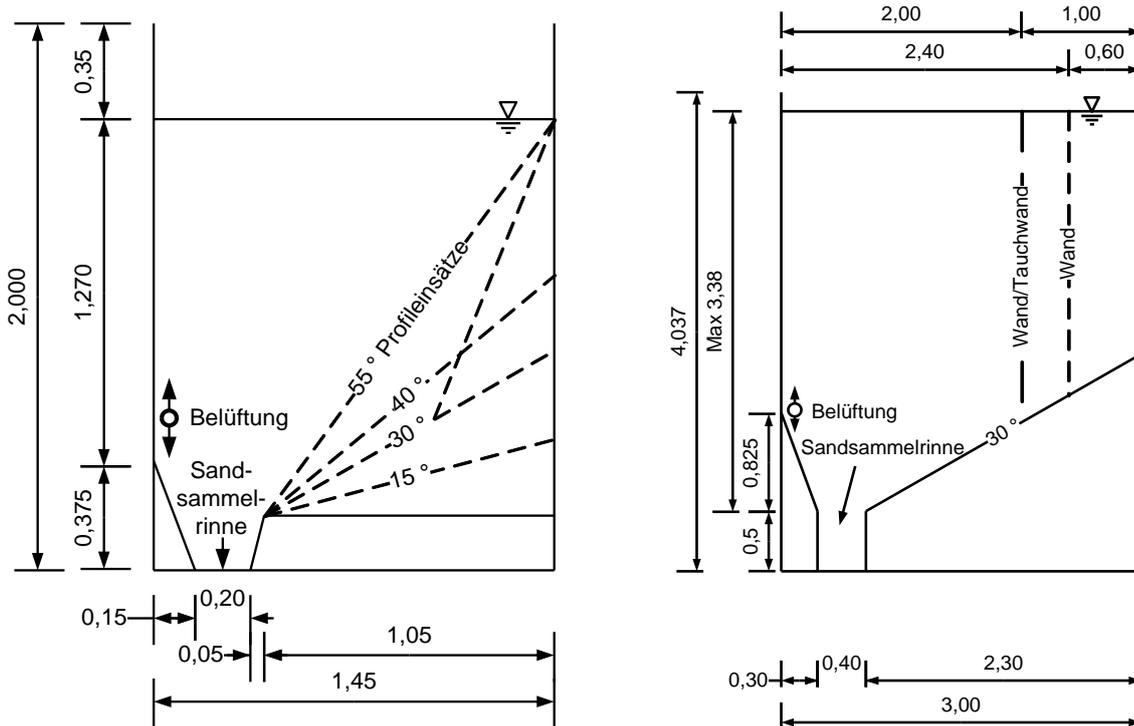


Abbildung 6: Versuchssandfänge nach Londong (1987).

3.3.2 Ähnlichkeitsgesetze

Die Abbildung eines großtechnischen Objekts im Modell muss unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsgesetzen erfolgen. Nach dem Système International d'Unités (SI) gibt es sieben Grunddimensionen (Zlokarnik, 2005). Zu ihnen gehören unter anderem die Länge (L), die Masse (M), die Zeit (T) und die Temperatur (K). Alle anderen Maßeinheiten können aus diesen Dimensionen abgeleitet werden.

Mit diesen Dimensionen lassen sich die Maßstabsfaktoren errechnen. Der Maßstabsfaktor M_L sei definiert als das Verhältnis der Länge des abzubildenden Objekts in der Natur und der Länge des physikalischen Modells.

$$M_L = \frac{L_{Natur}}{L_{Modell}} \quad (3)$$

Bei den Ähnlichkeitsgesetzen unterscheidet man zwischen den Ansätzen nach Froude und nach Reynolds. Die Ähnlichkeit nach Reynolds ist geeignet zur Nachbildung von langsamen Strömungsprozessen im laminaren Bereich (Martin & Pohl, 2000) und wenn die Rolle der Gravitation untergeordnet ist (Malcherek, 2008a). Da die Gravitationskraft auf Sedimentationsvorgänge einen erheblichen Einfluss hat, wird hier nur die Ähnlichkeit nach Froude näher betrachtet. Die Froudsche Ähnlichkeit wird bei kleinen Froudezahlen und großen Reynoldszahlen angewendet (Malcherek, 2008a).

In Tabelle 2 sind die Maßstabsfaktoren der Froudschen Ähnlichkeit für verschiedene Größen gegenübergestellt. Die Maßstabsfaktoren ergeben sich aus der Gleichheit der Froudezahlen. Aus den Maßstabsfaktoren der Grunddimensionen lassen sich die Maßstabsfaktoren der daraus abgeleiteten Größen berechnen. So lässt sich der Durchfluss als Quotient aus Volumen und Zeit berechnen, es ergibt sich für den Maßstab $M_L^3 \cdot M_L^{-0,5}$, also $M_L^{2,5}$.

Tabelle 2: Maßstabsfaktoren nach Froude (Patt, 1990 und Zlokarnik, 2005).

Größenart	Dimension	Bezeichnung	Maßstab
Länge	L	M_L	M_L
Fläche	L^2	M_A	M_L^2
Volumen	L^3	M_V	M_L^3
Geschwindigkeit	LT^{-1}	M_v	$M_L^{0,5}$
Zeit	T	M_T	$M_L^{0,5}$
Durchfluss	L^3T^{-1}	M_Q	$M_L^{2,5}$
Lufteintrag	$L^3L^{-1}T^{-1}$	M_{QL}	$M^{1,5}$

Eine besondere Schwierigkeit beim belüfteten Sandfang stellt die Ähnlichkeit des Lufteintrages dar. Patt (1990) hat eine deutliche Abweichung des theoretisch, mittels der Ähnlichkeitsgesetze nach Froude, ermittelten Lufteintrages und empirisch ermittelten Werten festgestellt. Er hat hierfür Messungen an zwei kreisförmigen Sandfangquerschnitten mit den Querschnittsflächen $A_1 = 2 \text{ m}^2$ und $A_2 = 0,3 \text{ m}^2$ verglichen.

Nach Froude kann der Maßstabsfaktor für den Lufteintrag pro Meter Länge nach Tabelle 2 mit $M^{1,5}$ berechnet werden. Horvath (1972) hat diesen Maßstabsfaktor mit dem Faktor 0,77 multipliziert. Patt (1990) hat in seinen Versuchen einen Abminderungsfaktor von 0,33 für den Maßstabsfaktor $M^{1,5}$ festgestellt. Die Abhängigkeiten sind in Abbildung 7 dargestellt. Es wird deutlich, dass die bei Patt (1990) im physikalischen Modell benötigte Luftmenge deutlich über den nach Froude und Horvath (1972) ermittelten Werten liegt.

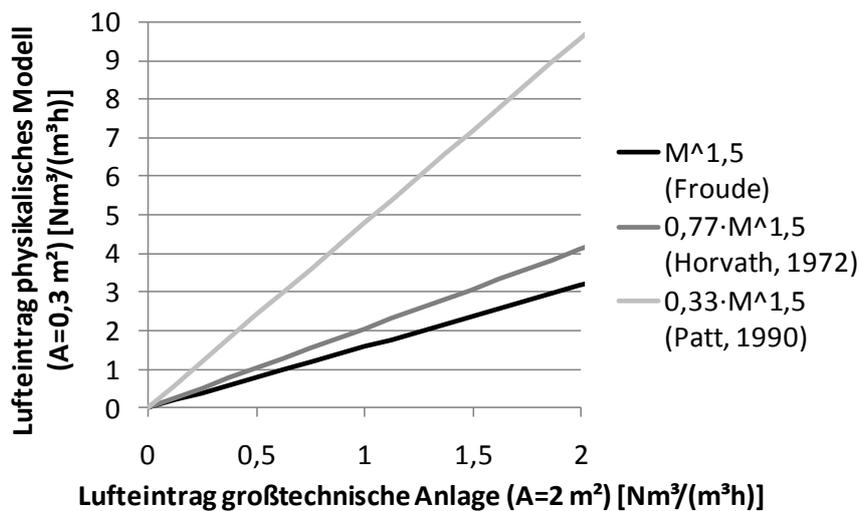


Abbildung 7: Übertragungsfaktor für den Luftintrag nach Patt (1990) am Beispiel zweier Modellsandfänge mit $A_1 = 2\text{ m}^2$ und $A_2 = 0,3\text{ m}^2$ im Vergleich mit theoretischen Betrachtungen von Froude und Horvath (1972).

Eine weitere Schwierigkeit bei der modelltechnischen Abbildung eines belüfteten Sandfanges stellt die Übertragung des Korndurchmessers von der Natur auf einen Korndurchmesser im Modell dar. Patt (1990) wählte hier eine Verkleinerung des Korndurchmessers über die Ähnlichkeit der Sinkgeschwindigkeiten. Das heißt, er berechnete die Sinkgeschwindigkeiten in der großtechnischen Anlage, verkleinerte diese dann mit dem entsprechenden Maßstab nach den Ähnlichkeitsgesetzen nach Froude und errechnete so äquivalente Korndurchmesser für das physikalische Modell. Den Widerstandsbeiwert wählte er nach Kazanskij (1981).

3.4 Geschwindigkeitsverteilung

Die Geschwindigkeitsverteilung hat einen wesentlichen Einfluss auf den Abscheidegrad von Sandfängen, da sie das Absetzverhalten von Sand beeinflusst. Bei zu hohen Fließgeschwindigkeiten reicht die Absetzlänge im Sandfang nicht mehr für eine Sedimentation der Sandkörner aus. Deshalb finden sich in den konstruktiven Empfehlungen (Kapitel 3.2.2) zahlreiche Werte für die Begrenzung der Fließgeschwindigkeit. Beim belüfteten Sandfang muss zusätzlich die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze begrenzt werden, um eine Sedimentation zu ermöglichen und eine Aufwirbelung von Sand zu vermeiden.

Bei der Definition der Fließgeschwindigkeit unterscheidet man die Begriffe stationäre und instationäre Strömung, ungleichförmige und gleichförmige Strömung, sowie laminare und turbulente Strömung. Stationärer und instationärer Abfluss können durch den zeitlichen Verlauf der Strömung beschrieben werden. Beim stationären Abfluss ändern sich die Strömungsverhältnisse über die Zeit nicht, wogegen beim instationären Abfluss eine Änderung der Strömungsverhältnisse

beispielsweise durch eine Hochwasserwelle verursacht wird (Bollrich, 2000). Der Unterschied zwischen gleichförmigem und ungleichförmigem Abfluss ist über die Änderung des Ortes definiert. Bei der gleichförmigen Strömung liegt keine Querschnittsänderung vor, die ungleichförmige Strömung entsteht durch Einengung oder andere Veränderungen des Fließquerschnitts (Bollrich, 2000).

Bei der laminaren Strömung handelt es sich um eine Strömung ohne Turbulenzen. Das Wasser strömt in Schichten (lat. lamina = die Platte), die sich nicht vermischen. Bei turbulenten, also unruhigen, Strömungen treten dagegen starke Verwirbelungen auf. Als Beurteilungskriterium, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist, dient die Reynolds Zahl des Physikers Osborne Reynolds von 1883. Bei Überschreitung der kritischen Reynoldszahl von 2320 spricht man von turbulenter Strömung (Martin & Pohl, 2000). Im belüfteten Sandfang herrscht gleichförmige, instationäre, turbulente Strömung. In Abbildung 8 sind die zwei Hauptströmungsrichtungen und die sich daraus ergebende Teilchenbahn im belüfteten Sandfang dargestellt.

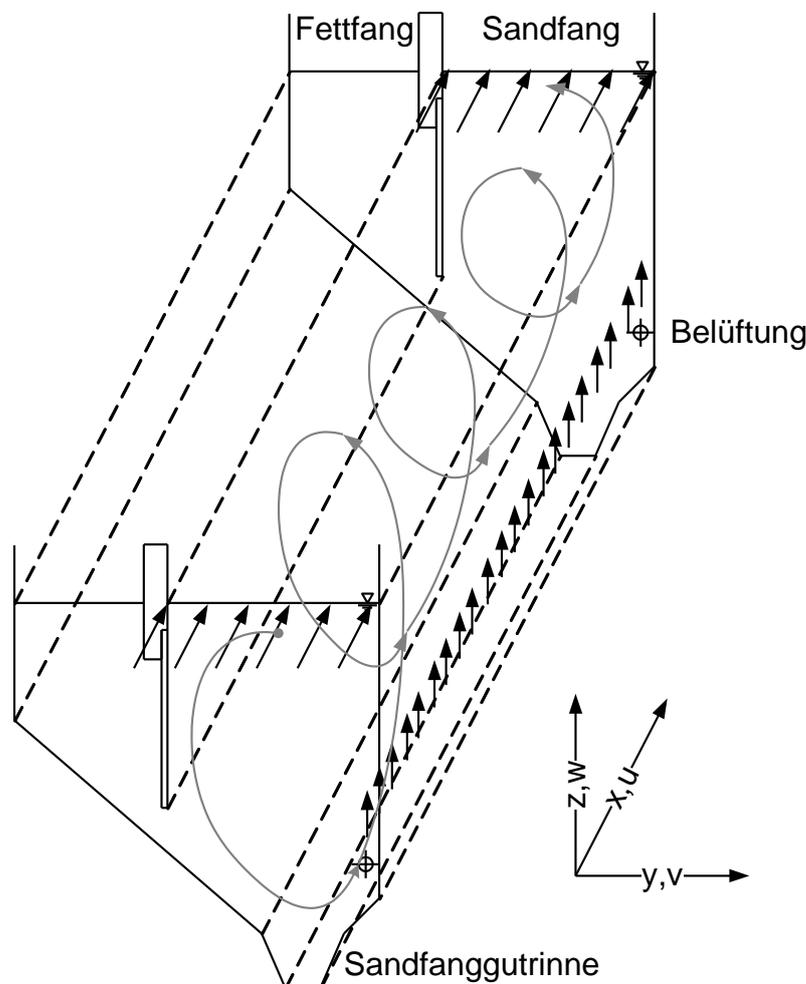


Abbildung 8: Geschwindigkeitsrichtungen und Teilchenbahn im belüfteten Sandfang.

3.4.1 Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung

In laminarer Strömung ist das vertikale Geschwindigkeitsprofil parabolisch (Malcherek, 2009). Das vertikale Geschwindigkeitsprofil in turbulenter Strömung kann mit der Kármán-Prandtl-Gleichung (4) bestimmt werden, wobei hier für die Sohlrauheit $k_S = 30 \cdot z_0$ gilt und z_0 die Höhe angibt, bei der die Geschwindigkeit zu Null wird (Malcherek, 2009). Die Sohlrauheit k_S kann bei einer Sohle aus glattem Beton mit 0,0008 m, bei einer Sohle aus Sand mit 0,005 m bis 0,02 m und überschläbig mit $k_S \sim 3 \cdot d_m$ angesetzt werden (Malcherek, 2009).

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

Die daraus resultierende tiefengemittelte Geschwindigkeit ergibt sich nach Gleichung (5) aus Malcherek (2009).

$$\bar{u} = \frac{u_*}{\kappa} \cdot \left(\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) + \frac{z_0}{h} - 1 \right) \quad (5)$$

Diese tritt an der Stelle $z = 0,37 \cdot h$ über der Sohle auf. Die Schubspannungsgeschwindigkeit $u_* = \sqrt{\frac{\tau_B}{\rho}}$ kann aus der Sohlschubspannung $\tau_B = \rho \cdot g \cdot h \cdot I$ berechnet werden (Zanke, 1982). Die Sohlschubspannung ist im Sandfang deshalb interessant, weil mit ihrer Hilfe beurteilt werden kann, wann die Gefahr von Aufwirbelungen von Sandfanggut besteht. Wenn die Sohlschubspannung größer ist als eine kritische Sohlschubspannung, beginnt der Sedimenttransport. Wenn die Fließgeschwindigkeit u in einer Höhe z' bekannt ist, kann die Sohlschubspannung auch in Abhängigkeit der Höhe mit Gleichung (6) berechnet werden (Malcherek, 2009).

$$\vec{\tau}_B = \rho \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{z'}{z_0} \right)^{-2} \cdot \|\vec{u}(z')\| \vec{u}(z') \quad (6)$$

Wenn die tiefengemittelte Geschwindigkeit bekannt ist, kann die Sohlschubspannung nach Nikuradse nach Gleichung (7) bestimmt werden (Malcherek, 2009).

$$\vec{\tau}_B = \frac{\rho \cdot \kappa^2}{\left(\ln \frac{12h}{k_S} \right)^2} \cdot \|\vec{u}\| \vec{u} \quad (7)$$

In Abbildung 9 ist die kritische Sohlschubspannung nach Shields in Abhängigkeit vom Korndurchmesser dargestellt. Für die Korngrößen $< 0,1$ mm beträgt der Wert konstant 0,154 N/m². Körner mit einem Durchmesser von 0,2 mm werden bei einer Sohlschubspannung $> 0,161$ N/m² transportiert.

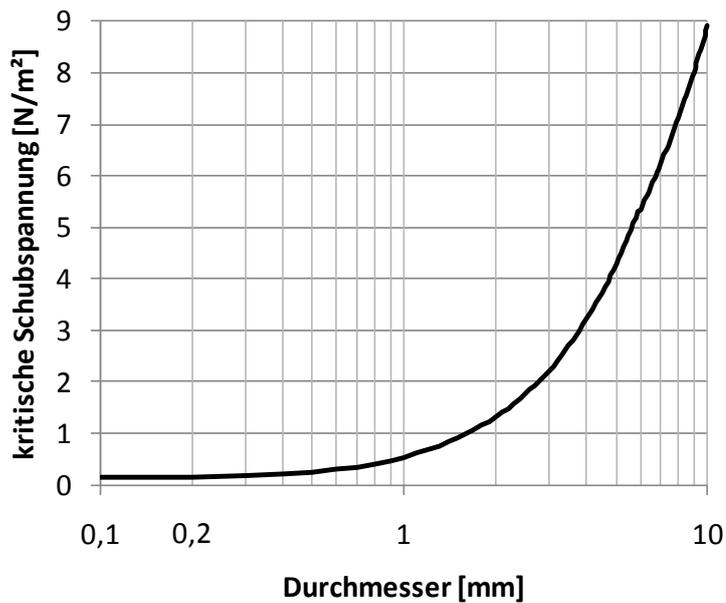


Abbildung 9: Für den Bewegungsbeginn erforderliche Schubspannung nach Shields.

Für eine Beurteilung, ob das Sandfanggut aufgewirbelt wird, oder nicht, muss ein Zusammenhang zwischen kritischer Schubspannung und Geschwindigkeitsverteilung hergestellt werden. Dies wird im Kapitel 3.5.5 betrachtet.

Das Geschwindigkeitsprofil nach Gleichung (4) ist in Abbildung 10 beispielhaft dargestellt. Als zugrundeliegende Daten wurden eine Fließtiefe von 4 m, ein Sohlgefälle von 0,01 ‰ sowie eine Rauheit der Sohle k_s von 0,0008 m gewählt.

Im Beispiel aus Abbildung 10 kann die tiefengemittelte Geschwindigkeit bei einer Höhe von 1,5 m über dem Boden angesetzt werden. Sie beträgt in diesem Fall 0,53 m/s.

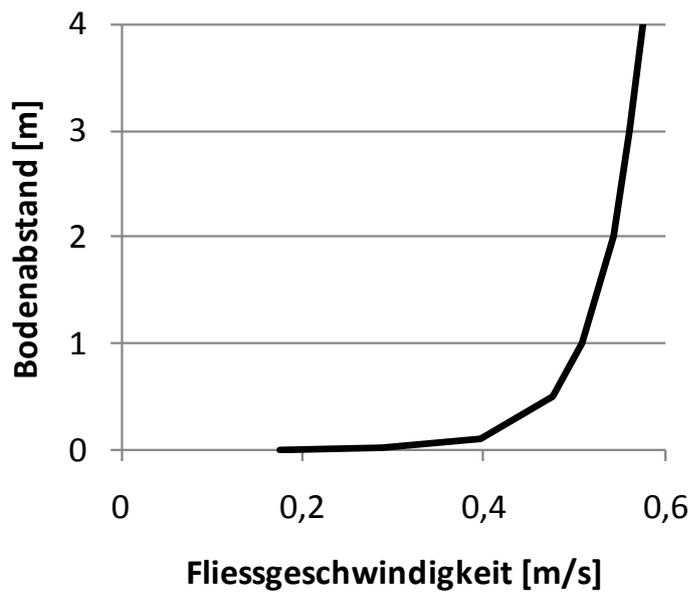


Abbildung 10: Logarithmisches Geschwindigkeitsprofil nach Kármán-Prandtl.

Für die Unterscheidung der Geschwindigkeitsverteilung bei turbulenter Strömung mit hydraulisch glatter Sohle, turbulenter Strömung mit hydraulisch rauer Sohle und einem Übergangsbereich gibt Zanke (1982) die folgenden drei Gleichungen an. Gleichung (8) für hydraulisch glatte Strömung gilt nur für Reynoldszahlen $Re_* = \frac{u_* \cdot k_s}{\nu} \leq 3,32$.

$$\frac{u(z)}{u_*} = 5,5 + \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{u_* \cdot z}{\nu} \right) \quad (8)$$

Für Reynoldszahlen $Re_* > 70$ spricht man von „hydraulisch rauer Strömung“. Das Geschwindigkeitsprofil kann mit Gleichung (9) berechnet werden.

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(e^{8,5 \cdot \kappa} \cdot \frac{z}{k_s} \right) \quad (9)$$

Für den Übergangsbereich gilt Gleichung (10)

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + \frac{3,32}{\kappa \cdot Re_*} \ln Re_* - \frac{9,96}{Re_*} + 8,5 \quad (10)$$

Patt (1990) hat in seinen zwei kreisförmigen belüfteten Sandfangmodellen die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung u ausgewertet. Seine Messungen stimmen mit dem logarithmischen Ansatz von Prandtl für den Übergangsbereich gut überein.

3.4.2 Luftblaseninduzierte Sekundärströmung

Um eine Unabhängigkeit des Abscheidegrades von den Durchflussschwankungen in einem Sandfang zu erreichen, wird im belüfteten Sandfang eine Sekundärströmung induziert (ATV, 1997). Diese Sekundärströmung wird im belüfteten Sandfang durch Luft erzeugt, könnte aber auch durch Wasser erzeugt werden, wie im Kapitel 3.4.3 beschrieben wird. Bei Rodi (1993) finden sich Beispiele für windinduzierte Geschwindigkeitsfelder, die einen ähnlichen parabolischen Verlauf haben wie durch Luft oder Wasser induzierte Geschwindigkeitsfelder.

3.4.2.1 Luftblasen in Flüssigkeiten

Die Ausbildung der Sekundärströmung im belüfteten Sandfang ist von der Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen abhängig und diese wiederum von der Blasengröße. Im Folgenden soll dargestellt werden, inwieweit die Faktoren Blasengröße und Blasenform die Aufstiegs geschwindigkeit beeinflussen. Im Anschluss dazu wird gezeigt, wie die Aufstiegs geschwindigkeit in Bewegungsenergie des Wasserstroms umgesetzt wird und das Geschwindigkeitsfeld erzeugt.

Kobus (1973) unterscheidet verschiedene Bereiche der Blasenbildung, die in Tabelle 3 gegenübergestellt sind. Bei geringem Luftdurchsatz kommt es zur quasistatischen Blasenbildung, bei der einzelne Blasen aufsteigen. Den Bereich der schnellen Blasenbildung teilt er auf in einen Bereich I, bei kleineren Luftdurchsätzen, und in einen Bereich II, bei größeren Luftdurchsätzen. Im Bereich I nimmt die Blasengröße mit steigendem Durchsatz nur leicht zu, bei steigender Blasenbildungsfrequenz. Im Bereich II bleibt die Blasenbildungsfrequenz bei steigendem Durchsatz konstant, es erhöht sich dafür die Blasengröße. Steigert man den Durchsatz weiter, erreicht man den Übergangsbereich zum Strahlgasen, in dem die Blasen miteinander verschmelzen. Der Bereich Strahlgasen ist dann erreicht, wenn ein kontinuierlicher Gasstrahl aus der Düse austritt, der eine Kuppe ausbildet, die in große und kleine Blasen zerfällt, die als Blasenschwarm aufsteigen.

Tabelle 3: Bereiche der Blasenbildung an Düsen (Kobus, 1973).

Luftdurchsatz	Steigend →					
	Blasenbildung			Strahlbildung		
Bereich	Quasistatische Blasenbildung	Schnelle Blasenbildung Bereich I	Bereich II	Übergangs - gebiet	Blasenballenbildung	Voll turbulenter Blasenstrom
Abhängigkeit der Blasengröße vom Düsendurchmesser	Ja	Ja	Ja	Unbekannt	Nein	Nein
Abhängigkeit der Blasengröße vom Luftdurchsatz	Nein	Nur unwesentlich	Ja	Ja	Ja	Nein
Blasengröße	Rechnerisch erfassbar	Empirisch ermittelt	Empirisch ermittelt		Maximale Blasengröße rechnerisch erfassbar	
Merkmale	Langsame Ausbildung und Ablösung einzelner Blasen.	Starke Zunahme der Blasenbildungsfrequenz bei nur leichter Zunahme der Blasengröße.	Starke Zunahme der Blasengröße bei etwa gleichbleibender Bildungsfrequenz.	Zwischenblasen, Doppelblasen, Verschmelzungs Vorgänge.	Einzelne Blasenballen und sehr viele kleine Blasen.	Nur vereinzelte Blasenballen. Die eigen-erzeugte Turbulenz des Luftblasenstroms scheint die Blasen-größenverteilung zu bestimmen.

Als Kennzahl für den Übergang zwischen Blasengasen und Strahlgasen gibt Patt (1990) in Gleichung (11) den Quotienten aus Weberzahl und Froudezahl an. Die Oberflächenspannung berechnet sich mit $\sigma_W = 0,07275 \cdot (1 - 0,002 \cdot (T - 20^\circ C))$ [N/m].

$$\frac{We_B^2}{Fr_B} = \frac{16}{\pi^2} \cdot \frac{Q_L^2 \cdot \rho_W^2 \cdot g}{\sigma_W^2 \cdot d_d} \quad (11)$$

Ab einem Wert von 675 spricht man von Strahlgasen. In Abbildung 11 ist die Grenze zwischen Blasengasen und Strahlgasen in Abhängigkeit vom

Düsensdurchmesser für eine unterschiedliche Anzahl von Düsen dargestellt. Je weniger Düsen für den Luftaustritt zur Verfügung stehen, desto weniger Luft reicht aus, um den Zustand „Strahlgasen“ herbeizuführen. Der Lufteintrag wurde schon in $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ auf ein Volumen von $1,5 \text{ m}^3$ des in dieser Arbeit später vorgestellten Sandfangmodells bezogen, um die Ergebnisse vergleichen zu können.

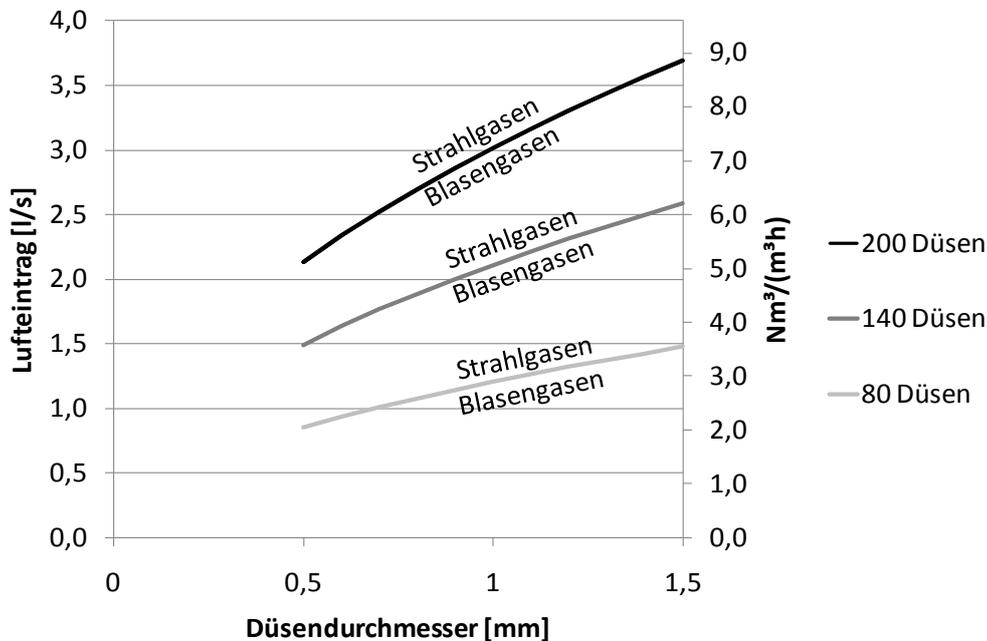


Abbildung 11: Übergangsbereich zwischen Blasengasen und Strahlgasen in Abhängigkeit vom Düsensdurchmesser, der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag nach Gleichung (11) von Patt (1990).

Soo (1990) hat herausgefunden, dass Temperatur und Druck keinen Einfluss auf die Blasengröße haben, die Blasengröße indirekt proportional zur Dichte der Flüssigkeit und direkt proportional zur Oberflächenspannung ist. Den Einfluss der Viskosität bewertete er als gering. Zur Berechnung der Blasengröße gibt es viele Ansätze. Nach Kobus (1973) ergibt sich der maximale Blasendurchmesser nach Gleichung (12).

$$d_{B,max} = \left(\frac{Q_L^2}{g} \right)^{0,2} [cm] \quad (12)$$

Der Luftvolumenstrom Q_L muss in diese Gleichung mit der Einheit $[\text{cm}^3/\text{s}]$ eingesetzt werden.

Nach Meersmann (1962; aus Patt, 1990) ergibt sich der Blasendurchmesser d_B aus Gleichung (13), in der die Dichte des Wassers, der Düsensdurchmesser und die Oberflächenspannung berücksichtigt werden:

$$d_B = \left[\frac{3\sigma_W d_D}{g\rho_W} + \left(\frac{3\sigma_W d_D}{g\rho_W} \right)^2 + \left(\frac{15Q_L^2 d_D}{g} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{3}} [m] \quad (13)$$

Der Luftvolumenstrom muss hier bezogen auf eine Düse eingesetzt werden. In Abbildung 12 ist die Blasengröße in Abhängigkeit vom Lufteintrag, dem Durchmesser der Düsen und der Anzahl der Düsen nach Gleichung (13) dargestellt. Mit steigendem Lufteintrag nimmt die Luftblasengröße bei gleichem Düsendurchmesser zu. Es wird deutlich, dass beim gleichen Lufteintrag bei 200 Düsen mit einem Durchmesser von 1,0 mm ungefähr die gleiche Blasengröße erreicht wird wie bei 140 Düsen mit einem Durchmesser von 0,6 mm. Die größte Luftblasengröße wird bei 80 Düsen erreicht.

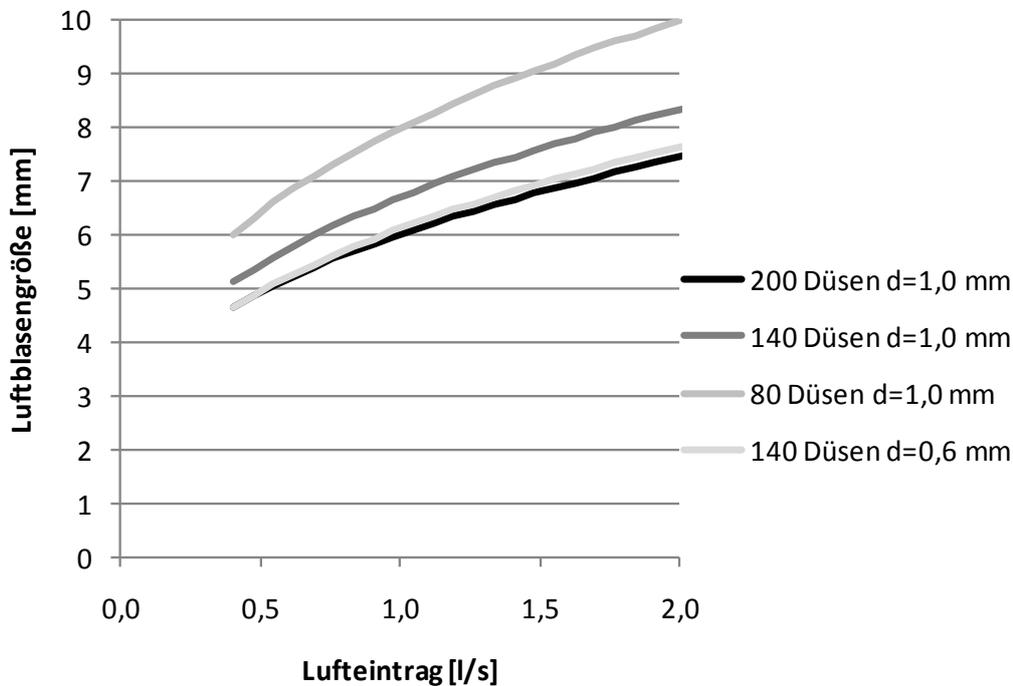


Abbildung 12: Luftblasengröße in Abhängigkeit vom Lufteintrag nach Gleichung (13) von Meersmann (1962) .

Nach Soo (1967) kann der Blasendurchmesser mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$d_B = 1,49 \cdot [\rho \cdot Q_L^2 / g \cdot (\rho - \rho_A)]^{0,2} \quad (14)$$

Stein (1992; aus Möller, 1968) unterscheidet in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser d_D zwischen feinblasiger ($d_D < 0,3$ mm), mittelblasiger ($0,3 \text{ mm} < d_D < 3$ mm) und grobblasiger ($d_D > 3,0$ mm) Belüftung. Soo (1990) unterscheidet die folgenden Blasenformen nach dem Düsendurchmesser runder Düsen. Bei kleinen Düsendurchmessern ($d_D < 0,4$ mm) bilden sich kreisförmige Blasen mit konstanter vertikaler Aufstiegs geschwindigkeit. Bei mittleren

Düsendurchmessern ($0,4 \text{ mm} < d_D < 4 \text{ mm}$) bilden sich kreisförmige Blasen direkt an der Düse, die aber nach Austritt eine elliptische Form mit längerer horizontaler Achse annehmen, mit zickzackförmigem Aufstiegsweg. Große Düsendurchmesser ($d_D > 4 \text{ mm}$) führen zu instabilen Blasen mit unsymmetrischer Form.

Neben der Blasengröße ist bei belüfteten Sandfängen die Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen interessant, da durch sie die Sekundärströmung induziert wird. In Abbildung 13 ist die Aufstiegs geschwindigkeit von Luftblasen in Abhängigkeit vom Blasendurchmesser dargestellt (Patt, 1990). Da sich die Blasenform mit zunehmendem Blasendurchmesser verändert, wird die Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen in vier Bereiche (a-d) unterteilt. Im Bereich a verhält sich die Luftblase wie ein kugelförmiges festes Teilchen, mit zugehöriger Aufstiegs geschwindigkeit. Mit zunehmendem Blasendurchmesser (b-d) wird die Luftblase immer mehr zu einem abgeflachten Rotationsellipsoid verformt, dessen Aufstiegs geschwindigkeit von der einer Kugel abweicht.

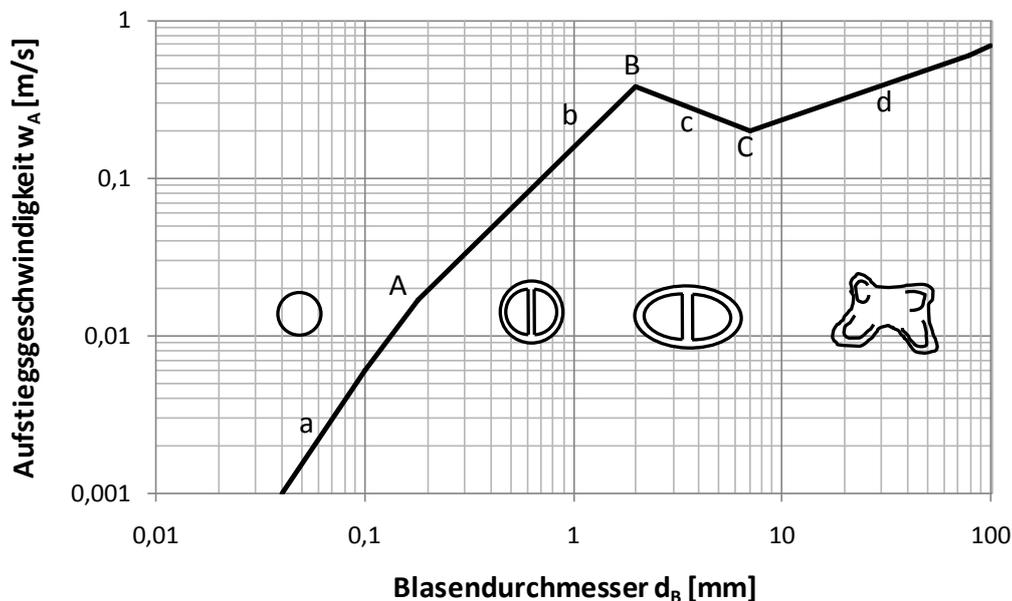


Abbildung 13: Aufstiegs geschwindigkeit und Blasenform in Abhängigkeit vom Blasendurchmesser (nach Patt, 1990).

Für die Aufstiegs geschwindigkeit von Luftblasen aus Einzeldüsen gibt Kobus (1973) Gleichung (15) für die Blasen aufstiegs geschwindigkeit an.

$$w_A = 0,28 \cdot \sqrt{g \cdot 10} \cdot \left(\frac{Q_L}{\sqrt{g \cdot 10^5}} \right)^{\frac{1}{9}} \quad (15)$$

Für die Aufstiegs geschwindigkeit von Luftblasen aus Düsenreihen gibt er Gleichung (16) an (Kobus, 1973). Der Lufteintrag muss hier in $\text{Nm}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$ eingesetzt werden.

$$w_A = 0,48 \cdot \sqrt{g \cdot 10} \cdot \left(\frac{q_{LL}}{\sqrt{g \cdot 10^3}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (16)$$

Bei dieser Gleichung wird der Düsendurchmesser nicht berücksichtigt. Nach Soo (1967) kann die Blasenauftiegs geschwindigkeit mit Gleichung (17) berechnet werden. Die Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen ist abhängig von der Blasengröße. Wenn die Blasengröße d_B nach Gleichung (13) berechnet wird, geht auch der Düsendurchmesser mit in die Rechnung ein.

$$w_A = 0,687 \cdot \sqrt{g \cdot d_B} \quad (17)$$

In Abbildung 14 ist die Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen proportional zur Luftblasengröße nach Gleichung (17) dargestellt. Die Blasengröße wurde mit Gleichung (13) berechnet. Auch hier ist die Aufstiegs geschwindigkeit bei 200 Düsen mit einem Durchmesser von 1,0 mm ungefähr gleich der Aufstiegs geschwindigkeit bei 140 Düsen mit einem Durchmesser von 0,6 mm. Die größte Aufstiegs geschwindigkeit wird bei der Zahl von 80 Düsen erreicht.

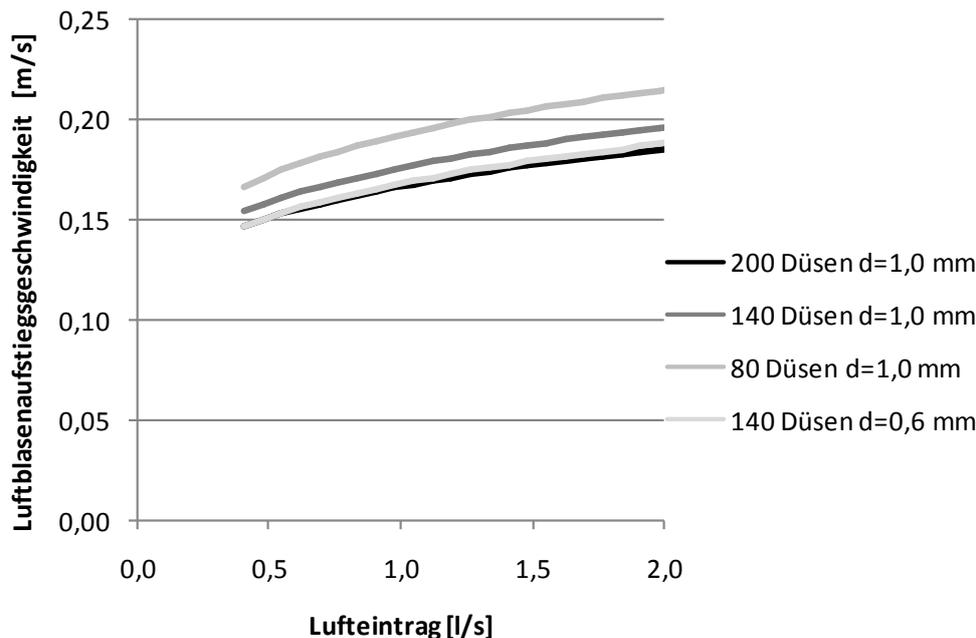


Abbildung 14: Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen in Abhängigkeit vom Luft eintrag nach den Gleichungen (13) von Meersmann (1962) und (17) von Soo (1967).

In Abbildung 15 ist das durch einen Luftschleier erzeugte Strömungsbild dargestellt (Kobus, 1973). Die eingeblasene Luft entweicht an der Wasseroberfläche, wogegen der durch die Luft in Bewegung gesetzte Wasserstrahl eine seitliche Umlenkung erfährt. An der Wasseroberfläche bildet sich die Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} aus, die mit der Geschwindigkeit $w_a(h_{bel})$ gleichzusetzen ist. Untersuchungen von

Kobus (1973) haben ergeben, dass sich das Maximum der horizontalen Geschwindigkeit v_{\max} bei freier Oberfläche im Abstand der 1-1,5 fachen Breite des Auftriebsstrahls $b(z)$ von der Düsenreihe einstellt. Wegen des Erhalts der Kontinuitätsbedingung ergibt sich im Bereich unterhalb des Drehpunktes (Walzenmittelpunktes) eine Rückströmung. Das Geschwindigkeitsprofil ähnelt einer parabolischen Form.

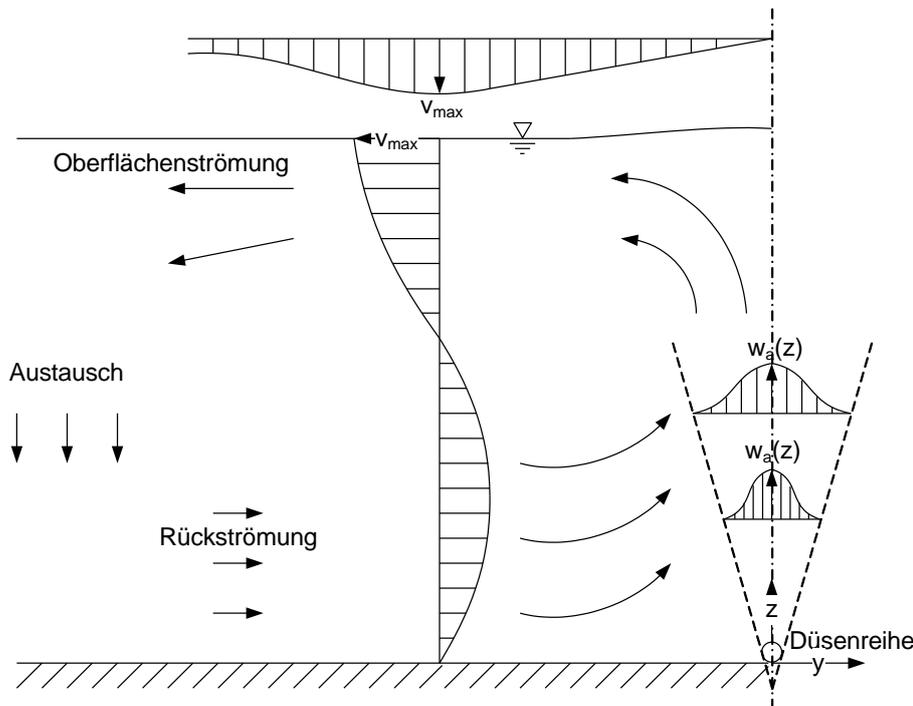


Abbildung 15: Definitionsskizze für das Luftschleier-Strömungsfeld (nach Kobus, 1973).

Die Geschwindigkeitsverteilung des Auftriebsstrahls über die Breite (Abbildung 15) kann nach Kobus (1973) mathematisch mit einer Gauß'schen Glockenkurve beschrieben werden (18).

$$w(y, z) = w_a(z) \cdot e^{-\left(\frac{y}{b(z)}\right)^2} \quad (18)$$

Die Breite des Auftriebsstrahls über einer Düsenreihe beschreibt Kobus (1973) mit Gleichung (19).

$$b(z) = (10 + h_{bel}) \cdot \left(\frac{z}{10 + h_{bel}} + 0,03 \right) \cdot 0,6 \cdot \left(\frac{q_{LL}}{\sqrt{g \cdot 10^3}} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (19)$$

Die maximale Geschwindigkeit des Auftriebsstrahls an einer beliebigen Höhe z im Sandfang kann nach Gleichung (20) berechnet werden (Kobus, 1973). Kobus (1973) hat durch seine Messungen bestätigt, dass die senkrechte Aufstiegs geschwindigkeit des Auftriebsstrahls an der Wasseroberfläche $w_a(z = h_{bel})$

umgelenkt wird und gleich der an der Oberfläche auftretenden maximalen horizontalen Geschwindigkeit v_{\max} ist (q_{LL} in $\text{Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$).

$$w_a(z) = \sqrt[3]{gq_{LL}} \cdot 1,7 \left(\left(\frac{10}{h_{bel} + 10} \right) \cdot \frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{z}{10 + h_{bel}}} \right)}{\frac{z}{10 + h_{bel}} + 0,03} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

3.4.2.2 Bewegter Wasserstrom Q_c

Ein Parameter zur Charakterisierung der Walzenströmung ist der bewegte Wasserstrom Q_c . Nach Kobus (1973) gibt Patt (1990) auch die vom Luftblasenschleier in Bewegung gesetzte Wassermenge Q_c an. Diese Gleichung ergibt sich aus der Integration der Geschwindigkeitsverteilung der aufsteigenden Luftblasen, also Gleichung (18) unter der Vorgabe, dass Gleichung (21) gilt.

$$Q_c(z) = \int_{-\infty}^{\infty} w(y, z) dx = w_a(z) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{y^2}{b(z)^2}} dx = w_a(z) \cdot b(z) \quad (21)$$

Dies beruht darauf, dass das Gauß'sche Integral gleich eins ist und führt zu Gleichung (22) von Kobus (1973) (q_{LL} in $\text{Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$).

$$Q_c(z) = 2 \cdot q_{LL} \cdot \left(\frac{\sqrt{g \cdot 10^3}}{q_{LL}} \cdot \frac{10 + h_{bel}}{10} \cdot \left(\frac{z}{10 + h_{bel}} + 0,03 \right) \cdot \left(\ln \frac{1}{1 - \frac{z}{10 + h_{bel}}} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

Sawicki (2004) hat in Gleichung (23) einen Zusammenhang zwischen Lufteintrag und Zirkulation hergestellt, in den auch die Einblastiefe, die Luftblasengröße und die Aufstiegsgeschwindigkeit mit eingehen. Der Ansatz beruht auf der Annahme, dass die Energie, die dem Wasser durch die Luftblasen zugeführt wird, gleich der Arbeit der einzelnen Luftblasen gegen die Auftriebskraft ist. Diese Arbeit setzt er gleich der Dissipationsenergie. In die Gleichung (23) geht auch ein Wirkungsgrad des Energietransfers η_A ein, der vom Autor vorher durch Vergleich von Messwerten mit theoretischen Ansätzen bestimmt wurde. Er erhielt so für η_A einen Wert von 0,65. Die Unterscheidung zwischen grobblasiger und feinblasiger Belüftung, kann

in Gleichung (23) durch Einsetzen des Blasendurchmessers und der Blasensteiggeschwindigkeit erreicht werden. Das Breite/Tiefe-Verhältnis wird durch den Hilfwert R in Gleichung (24) berücksichtigt.

$$Q_C = 0,74 \cdot \sqrt[3]{\frac{\eta_A \cdot L_{SF}^2 \cdot h_{SF}^2 \cdot \left(\frac{b_{SF}}{h_{SF}}\right)^5 \cdot h_{bel} \cdot w_A^2 \cdot Q_L}{R \cdot d_B}} \quad (23)$$

$$R = \left(1 + \frac{b_{SF}}{h_{SF}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{b_{SF}^2}{h_{SF}^2}\right) \cdot \left(\left(\frac{b_{SF}}{h_{SF}}\right)^4 + 3 \cdot \left(\frac{b_{SF}}{h_{SF}}\right)^2 + 1\right) \quad (24)$$

Der Ansatz beruht auf einem Rechteckquerschnitt mit Drehpunkt im Mittelpunkt. Bei zunehmendem Breite/Tiefe-Verhältnis nimmt nach Gleichung (23) der zirkulierte Wasservolumenstrom zu. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Schrimpf (1987), der in Versuchen an einem kreisförmigen Sandfangquerschnitt festgestellt hat, dass sowohl die Ausrundung des Querschnitts als auch der Füllgrad h/d einen positiven Einfluss auf den bewegten Wasserstrom haben. Bei einem Füllgrad von 0,85 erreicht Q_C deutlich höhere Werte als bei einem Füllgrad von 0,75. Daraus folgt, dass auch das Breite/Tiefe-Verhältnis einen Einfluss auf Q_C haben muss.

3.4.2.3 Maximalgeschwindigkeiten

Wie der bewegte Wasserstrom Q_C ist auch die Maximalgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche v_{max} ein Parameter zur Charakterisierung der Walzenströmung. Kobus (1973) hat in Gleichung (25) einen Zusammenhang zwischen Lufteintrag und maximaler Oberflächengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Einblastiefe gefunden. Der Lufteintrag muss hier in $Nm^3/(m \cdot s)$ eingesetzt werden.

$$v_{max} = w_a(h_{bel}) = \sqrt[3]{g \cdot q_{LL}} \cdot 1,7 \cdot \sqrt{\left(\frac{10}{h_{bel} + 0,03 \cdot (h_{bel} + 10)}\right) \left(\ln \frac{10 + h_{bel}}{10}\right)} \quad (25)$$

Die Zahl 10 steht in dieser Gleichung für eine dem Atmosphärendruck entsprechenden Wassersäule. Diese Gleichung gilt nur für seitlich unbegrenzte Medien. Patt (1990) hat in Gleichung (26) die Annahme getroffen, dass bei belüfteten Sandfängen wegen der seitlichen Begrenzung der Lufteintrag doppelt eingesetzt werden muss.

$$v_{max} = \sqrt[3]{g \cdot 2 \cdot q_{LL}} \cdot 1,7 \cdot \sqrt{\left(\frac{10}{h_{bel} + 0,03 \cdot (h_{bel} + 10)}\right) \left(\ln \frac{10 + h_{bel}}{10}\right)} \quad (26)$$

Die Gleichung ist in Abbildung 16 visualisiert. Der Lufteintrag wurde in $\text{Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{s})$ bezogen auf eine Sandfanglänge von 5 m eingesetzt. Dies entspricht der Länge des später vorgestellten physikalischen Sandfangmodells. Es wird deutlich, dass die maximale Oberflächengeschwindigkeit mit zunehmendem Lufteintrag ansteigt. Auch die Einblastiefe hat einen wesentlichen Einfluss auf die maximale Oberflächengeschwindigkeit. Bei zunehmender Einblastiefe steigt v_{\max} an.

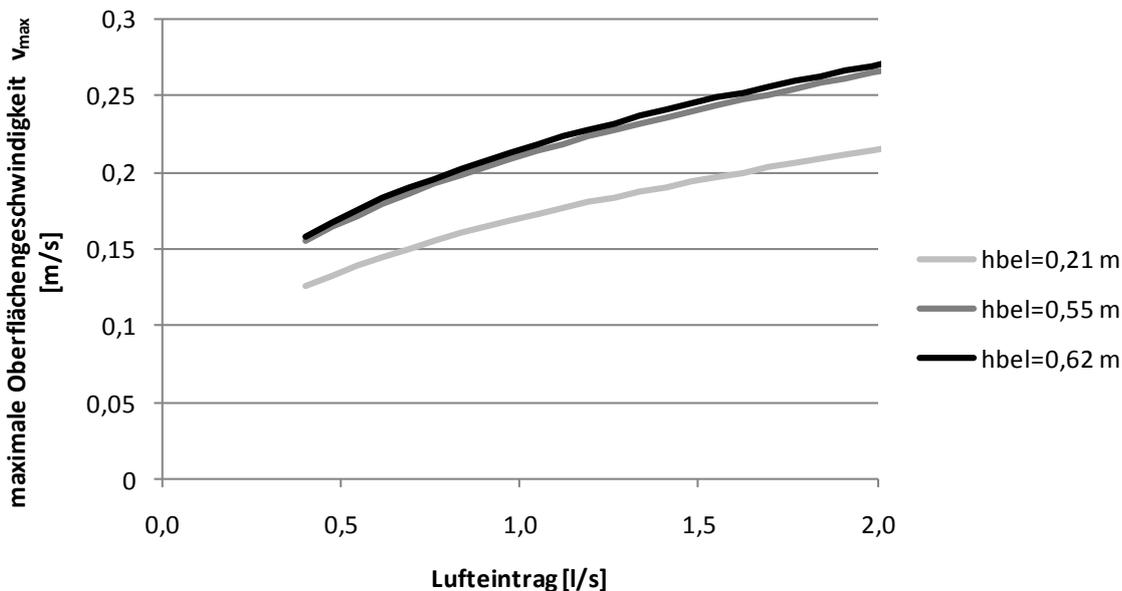


Abbildung 16: Maximale Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} in Abhängigkeit vom Lufteintrag und von der Einblastiefe h_{bel} nach Gleichung (26) von Kobus (1973) und Patt (1990).

In Abbildung 17 ist der Verlauf der maximalen Oberflächengeschwindigkeit über die Querschnittsbreite dargestellt (Kobus, 1973). Es wird deutlich, dass das Maximum bei einem seitlichen Abstand von $y/H = 0,2$ von der Düsenreihe erreicht wird. Dieser Abstand entspricht nach Kobus (1973) der nominellen Strahlbreite. Daraus ergibt sich Gleichung (27).

$$y_{\max} = 1 \dots 1,2 \cdot b(h_{bel}) \quad (27)$$

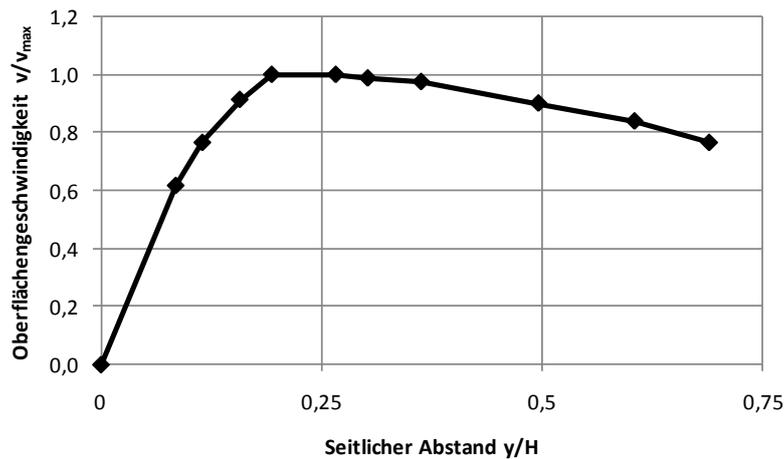


Abbildung 17: Relative Oberflächengeschwindigkeit über Düsenreihen (Kobus, 1973).

Um den Betrag der Oberflächengeschwindigkeit v_{max} in der Mitte des Sandfangquerschnitts (y_{MP}) zu erhalten wendet Stein (1992) eine lineare Regression auf den abfallenden Ast der Kurve im Bereich zwischen $y/H = 0,25$ und $y/H = 0,7$ an und erhält daraus den in der Gleichung (28) dargestellten Zusammenhang, der auch wieder nur für seitlich unbegrenzte Medien gilt.

$$v_{max}(y_{MP}) = \left(1,1 - 0,4 \cdot \frac{y_{MP} - b(h_{bel})}{h_{bel}} \right) \cdot v_{max} \quad (28)$$

Aus dem Ansatz für Q_c von Sawicki in Gleichung (23) können annäherungsweise auch die Geschwindigkeitskomponenten des Vektorfelds $v = \frac{4 \cdot Q_c}{h_{SF} \cdot L_{SF}}$ und $w = \frac{4 \cdot Q_c}{b_{SF} \cdot L_{SF}}$ berechnet werden. Es liegt hier wieder die Annahme zugrunde, dass sich aus der Integration über das Geschwindigkeitsfeld der zirkulierende Wasservolumenstrom ergibt. Durch Einsetzen der einen Gleichung in die andere wird die Beziehung $w = \frac{v \cdot h_{SF}}{b_{SF}}$ erhalten. Die Beziehung wurde am Rechteckquerschnitt unter der Annahme, dass der Walzenmittelpunkt in der Mitte des Sandfanges liegt, hergeleitet (Sawicki, 2004).

Londong (1987) hat die maximale Sohlgeschwindigkeit 0,1 m über der Sohle in Sandfangmitte gemessen. Er stellte fest, dass die Potenzfunktion in Gleichung (29) den Zusammenhang zwischen Lufteintrag und Geschwindigkeit am besten beschreibt.

$$v = x_1 \cdot q_{LV}^{x_2} \quad (29)$$

Der Luftvolumenstrom muss hier in $\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ eingesetzt werden. Eine Regressionsanalyse der Parameter x_1 und x_2 ergab, dass x_1 nur von der Einblastiefe

abhängt und x_2 vom Breite/Tiefe-Verhältnis. Für den Parameter x_1 fand er einen logarithmischen Zusammenhang, für den Parameter x_2 eine quadratische Gleichung.

Die Einblastiefe hatte bei den Messungen von Schrimpf (1987) einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche und einen untergeordneten auf die Geschwindigkeit an der Sohle. Bei den Messungen von Patt (1990) nahmen die Geschwindigkeiten im Abstand von 0,05 m über der Sohle bei größeren Einblastiefen wesentlich schneller zu. Die Sohlgeschwindigkeit v_{Sohl} betrug bei einem Lufteintrag von $1,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,74 m 0,24 m/s. Bei einer Einblastiefe von 0,94 m erhöhte sie sich auf 0,26 m/s. Bei einem Lufteintrag von $2,4 \text{ Nm}^3/(\text{m}\cdot\text{h})$ betrug die Sohlgeschwindigkeit bei einer Einblastiefe von 0,74 m 0,34 m/s und bei einer Einblastiefe von 0,94 m 0,39 m/s.

Die Abhängigkeit der Sohlgeschwindigkeit v_{Sohl} vom Breite/Tiefe-Verhältnis wurde in den Arbeiten von Schrimpf (1987), Londong (1987) und Patt (1990) ausführlich untersucht. Schrimpf (1987) hat Untersuchungen an einem Sandfang mit kreisförmigem Querschnitt durchgeführt. Er stellte bei zunehmendem Lufteintrag eine ansteigende Sohlgeschwindigkeit an der Stelle 0,05 m über der Sohle fest, sowie ein Optimum der Sohlgeschwindigkeit bei einem Breite/Tiefe-Verhältnis von 0,85 bis 0,9, nach dessen Überschreitung die Geschwindigkeiten wieder abnehmen.

Londong (1987) hat die Sohlgeschwindigkeit v_{Sohl} bei den drei verschiedenen Breite/Tiefe-Verhältnissen 0,67, 0,8 und 1,0 untersucht und ein Optimum bei 0,8 gefunden. Bei einem Breite/Tiefe-Verhältnis von 0,8 war die erreichte Sohlgeschwindigkeit bei gleichem Lufteintrag um 30 % größer, das heißt die Ausnutzung des Lufteintrags war am besten, allerdings war der erreichte Turbulenzgrad am geringsten. Dieser Wert ist bei Londong (1987) unabhängig vom Lufteintrag.

Patt (1990) hat detaillierte Messungen der Sohlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Es ergibt sich ein Optimum bei einem Wert von 0,85.

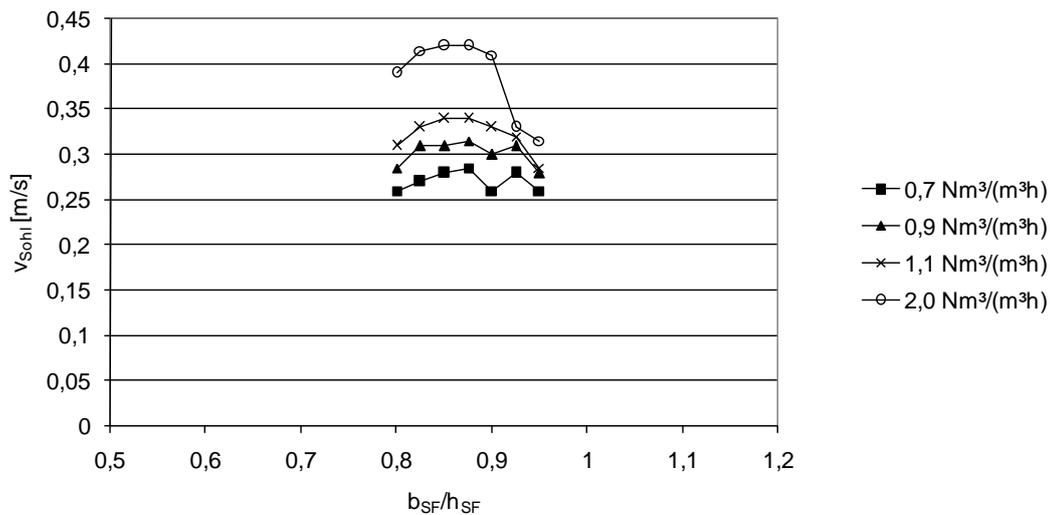


Abbildung 18: Sohlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis und vom Lufteintrag nach den Messwerten von Patt (1990).

Stein (1992) hat Messungen der Geschwindigkeit v an großtechnischen Anlagen mit einem Messflügel durchgeführt (Tabelle 4). Die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche v_{\max} sind durchwegs sehr hoch mit Werten bis zu 0,71 m/s. Die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze an der Sohle beträgt teilweise nur 10 % davon. Daraus leitete Stein (1992) die Theorie ab, dass der bewegte Wasservolumenstrom im Bereich oberhalb des Walzenmittelpunktes größer ist als der bewegte Wasservolumenstrom unterhalb des Walzenmittelpunktes. Da das der Kontinuitätsbedingung widerspricht, soll dies in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht werden.

Tabelle 4: Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen an großtechnischen Sandfängen (Stein, 1992).

Sandfang	b_{SF}/h_{SF}	h_{bel} [m]	q_{LV} [Nm³/(m³·s)]	v_{\max} [m/s]	v_{Sohl} [m/s]
1	0,5	3,3	1,3	0,71	0,06
2	0,7	k. A.	1,5	0,54	0,34
3	1,2	2,2	1,4	0,62	0,32
4	0,8	2,3	1,0	0,42	0,13
5	0,5	3,1	1,3	0,52	0,09
6	0,7	2,3	1,5	0,50	0,12
7	0,7	1,4	1,4	0,40	0,15
8	0,6	3,5	1,5	0,60	0,11
9	0,7	k. A.	1,7	0,41	0,11
10	0,5	k. A.	1,5	0,56	0,03
11	2,0	k. A.	1,5	0,47	0,15
12	0,5	k. A.	1,5	0,25	0,06

Schrimpf (1987) hat die Geschwindigkeit v an einem trapezförmigen Sandfangmodell bei einem Breite/Tiefe-Verhältnis von 1 und einer Einblastiefe von 0,65 m gemessen. An der Wasseroberfläche ergaben sich Geschwindigkeiten von 0,24 m/s und an der Sohle 0,1 m/s. Diese Werte konnten nach der Anbringung von strömungsgünstigen Einbauten (Abbildung 5) bei gleicher Versuchseinstellung auf 0,29 m/s und 0,21 m/s gesteigert werden. Dies zeigt, dass durch strömungsgünstige Querschnittsgestaltung bei gleichem Energieeintrag eine größere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze entsteht.

Patt (1990) hat an zwei Kreisquerschnitten die Quergeschwindigkeiten v gemessen. Im kleineren Querschnitt ergab sich bei einem Lufteintrag von $2,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ eine Geschwindigkeit v_{max} an der Wasseroberfläche von 0,22 m/s und an der Sohle von 0,14 m/s. Im Unterschied zu den Messungen von Stein (1992) war die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche hier nur ungefähr doppelt so hoch wie die an der Sohle. Bei einer Halbierung des Lufteintrages auf $1,45 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ reduzierte sich die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche auf 0,19 m/s und an der Sohle auf 0,11 m/s. Der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils über die Höhe konnte noch als quadratisch beschrieben werden, ist aber schon fast linear.

Zudem wurde die Geschwindigkeitsverteilung $w(y)$ über die Querschnittsbreite dargestellt. Hier ergab sich bei einem Lufteintrag von $2,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ein annähernd linearer Verlauf mit 0,1 m/s auf der Seite der Belüftung und 0,18 m/s auf der anderen Seite. Bei einem Lufteintrag von $1,45 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ergaben sich 0,08 m/s auf der Seite der Belüftung und 0,1 m/s auf der anderen Seite.

3.4.2.4 Lage des Walzenmittelpunktes

Der Walzenmittelpunkt ist als Drehpunkt des Geschwindigkeitsfeldes ein wichtiger Punkt zur Charakterisierung der Sekundärströmung im belüfteten Sandfang. Für den Abscheidegrad ist der Walzenmittelpunkt insofern interessant, weil dort die Sekundärströmung am geringsten ist, und sich deshalb die feinen Körner und die organische Substanz ansammeln, während die schwereren Teilchen durch die Zentrifugalkräfte an den Rand der Wasserwalze bewegt werden.

Stein (1992) hat für seine Messungen die Lage des Walzenmittelpunktes ausgewertet und mit den Ergebnissen anderer Autoren verglichen. Nach seinen Angaben liegt der horizontale Walzenmittelpunkt nahe der Beckenmitte bei $y_{\text{MP}} = 0,5 \cdot b_{\text{SF}}$ und der vertikale Walzenmittelpunkt bei Sandfangtiefen bis 2 m bei $z_{\text{MP}} = 0,4 \cdot h_{\text{SF}}$ und bei tieferen Sandfängen bei $z_{\text{MP}} = 0,35 \cdot h_{\text{SF}}$ (gemessen von der Wasseroberfläche). Stein (1992) stellte zudem fest, dass die eingeblasene Luftmenge keinen Einfluss auf die Lage des Walzenmittelpunktes hat.

3.4.2.5 Mathematische Ansätze für die Geschwindigkeitsverteilung

Um die Absatzwege der Partikel zu berechnen, haben einige Autoren versucht, die Strömung im belüfteten Sandfang mathematisch zu beschreiben. Der Lufteintrag an der Seite des belüfteten Sandfanges erzeugt idealisiert ein kreisförmiges Vektorfeld. Nach Malcherek (2008a) kann ein kreisförmiges Vektorfeld durch die Gleichungen (30) und (31) beschrieben werden.

$$v = -z \quad (30)$$

$$w = y \quad (31)$$

Das dadurch erzeugte Vektorfeld ist in Abbildung 19 dargestellt.

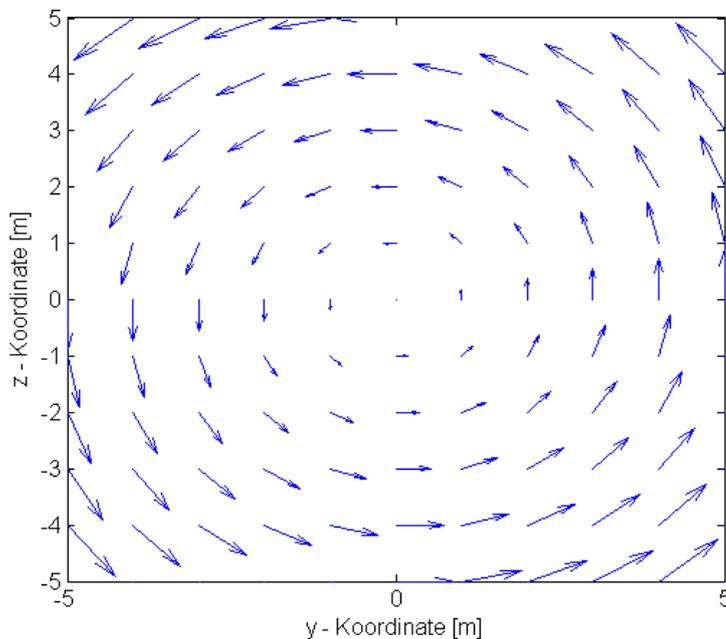


Abbildung 19: Kreisförmiges Vektorfeld nach Malcherek (2008a).

Patt (1990) hat ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes im kreisförmigen Querschnitt eines belüfteten Sandfanges entwickelt. Gleichung (32) beschreibt diesen Zusammenhang, der in Abbildung 20 grafisch dargestellt ist.

$$v(r) = c \cdot \tanh(a \cdot r) \cdot e^{-b \cdot r} \quad (32)$$

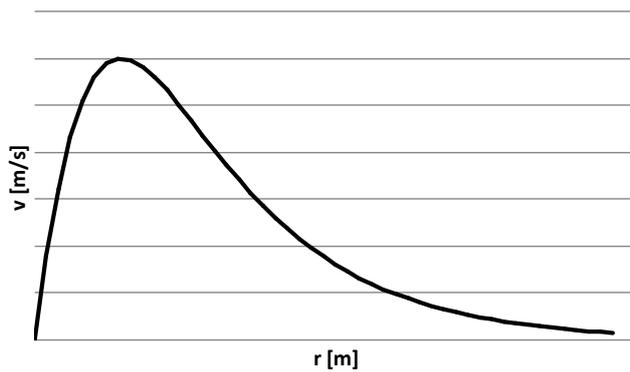


Abbildung 20: Mathematisches Geschwindigkeitsprofil (Patt, 1990).

Stein (1992) hat dieses Modell verwendet und auf andere Sandfangquerschnitte angepasst. Hierfür hat er den Sandfang in die zwei Bereiche 1 und 2 eingeteilt (Abbildung 21), für die unterschiedliche Randbedingungen vorgegeben werden.

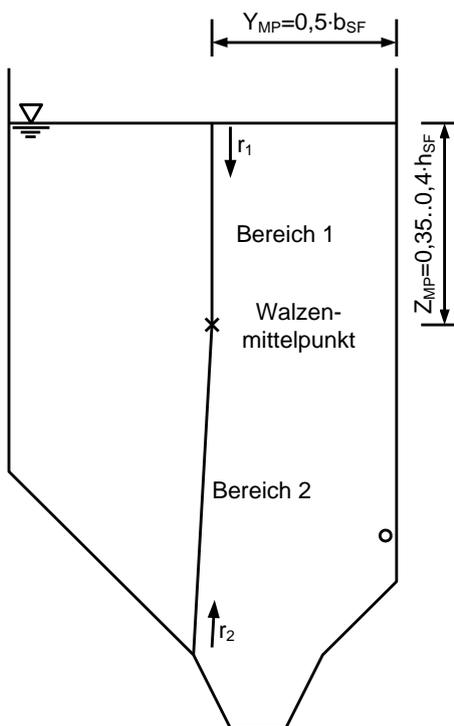


Abbildung 21: Lage ausgewählter Geschwindigkeitsprofile (Stein, 1992).

Für Bereich 1 setzte Stein (1992) als erste Randbedingung, dass die Geschwindigkeit v_{\max} an der freien Wasseroberfläche ein Maximum nach Gleichung (26) aufweist. Da es sich dabei um das absolute Maximum der Oberflächengeschwindigkeit handelt, berechnete er $v_{\max}(y_{MP})$ nach Gleichung (28) über dem Mittelpunkt des Sandfangquerschnitts y_{MP} . Als dritte Randbedingung setzte er das Integral der Geschwindigkeit $v(r)$ im Bereich 1 gleich einem bewegten Wasserstrom $q_{w,1}$ in der oberen Querschnittshälfte. Für die detaillierte Berechnung der Parameter sei auf Stein (1992) verwiesen.

Für Bereich 2 definierte er die folgenden drei Randbedingungen: Die Sohlgeschwindigkeit erreicht ein Maximum auf Höhe der Belüfter bei $r = h_{SF} - 0,95 \cdot h_{bel}$. Ferner setzte er das Integral unter der Funktion in Bereich 2 gleich einem Wasserstrom $q_{w,2}$, der kleiner ist als $q_{w,1}$. Dieser Zusammenhang wurde empirisch hergeleitet. Als dritte Randbedingung wählte er, dass die Funktion auf Höhe des Walzenmittelpunktes einen Nulldurchgang hat. Stein (1992) stellte bei zunehmendem Lufteintrag eine Verschlechterung der Walzenbildung fest. Eine Abrundung der Sohle begünstige die Walzenbildung. Er führte als Parameter den Wert k_{SF} ein, der für Kreisquerschnitte den Wert 0 hat und für ein Rechteck ohne Sohlneigung den Wert 1. Ein klassischer Sandfangquerschnitt mit Trapezquerschnitt erhält hierbei den Wert 0,8 bis 0,9. Das heißt, dass bei einem Kreisquerschnitt die Walzenströmung am idealsten ausgebildet wird. Das Modell von Stein gilt für Einblastiefen $h_{bel} < h_{SF} - 0,3 \cdot (h_{SF} - z_{MP})$.

3.4.3 Wasserinduzierte Sekundärströmung

Statt durch Lufteintrag kann die Sekundärströmung im Sandfang auch durch Wasser erzeugt werden. Dies hat den Vorteil, dass weniger organisches Material abgebaut wird, was sich positiv auf die Denitrifikation auswirkt. Ein zusätzlicher Vorteil ist die Verringerung der Geruchsbelästigung. Nachteilig ist, dass um die Walzenströmung zu erzeugen, große Rezirkulationsraten nötig sind (ATV, 1998). Es gibt wenige Untersuchungen und Betriebserfahrungen zur wasserinduzierten Sekundärströmung. Gruber et al. (1988) haben Untersuchungen an einem physikalischen Modell am Israel Institute of Technology in Haifa durchgeführt. Der Querschnitt der Versuchsanlage ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Länge des physikalischen Modells betrug 5 m. Der Durchfluss in Längsrichtung betrug 20,8 l/s bei einer Durchflussgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung von 0,03 m/s. Zur Erzeugung der Sekundärströmung wurden zusätzlich 0,45 l/s bis 12,5 l/s aus dem Ablauf des Sandfanges durch 13 Wasserstrahldüsen im Abstand von je 0,375 m rezirkuliert. Der Düsendurchmesser betrug 9,6 mm. Aus der Düsenzahl und der Düsenquerschnittsfläche ergibt sich eine Austrittsgeschwindigkeit von 0,48 m/s bei einem rezirkulierten Volumenstrom von 0,45 l/s und 1,3 m/s bei 12,5 l/s. Das Geschwindigkeitsprofil $v(z)$ hat den gleichen quadratischen Kurvenverlauf wie bei der luftblaseninduzierten Sekundärströmung. Die gemessenen Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze betragen zwischen 0,15 m/s und 0,2 m/s.

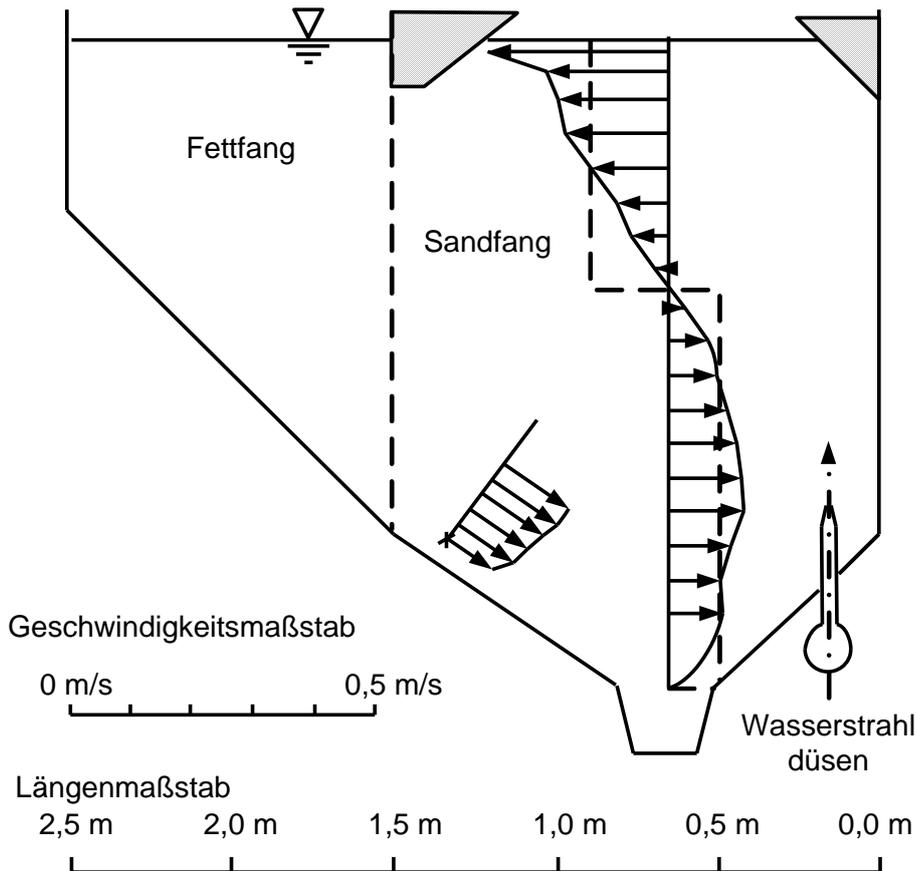


Abbildung 22: Physikalisches Modell eines belüfteten Sandfanges mit wasserinduzierter Sekundärströmung, Düsendurchmesser 9,6 mm, Abstand der Düsen 37,5 cm, Durchfluss 0,4 l/s (nach Gruber et al., 1988).

Die Anlage wurde dann im großtechnischen Maßstab gebaut und mit Abwasser getestet. Die erwartete Verringerung der Geruchsbelästigung konnte im großtechnischen Einsatz bestätigt werden. Über den Abscheidegrad wurden keine Angaben gemacht.

3.4.4 Turbulenz

Turbulenz spielt in belüfteten Sandfängen eine entscheidende Rolle, da sie die organischen Partikel in Schwebelage hält. Bei der Messung von Geschwindigkeiten in Strömungen fällt auf, dass die Werte nicht konstant sind, sondern mit der Zeit schwanken (Malcherek, 2008a). In Abbildung 23 sind mit einer ADV Sonde gemessene Geschwindigkeitsverteilungen dargestellt.

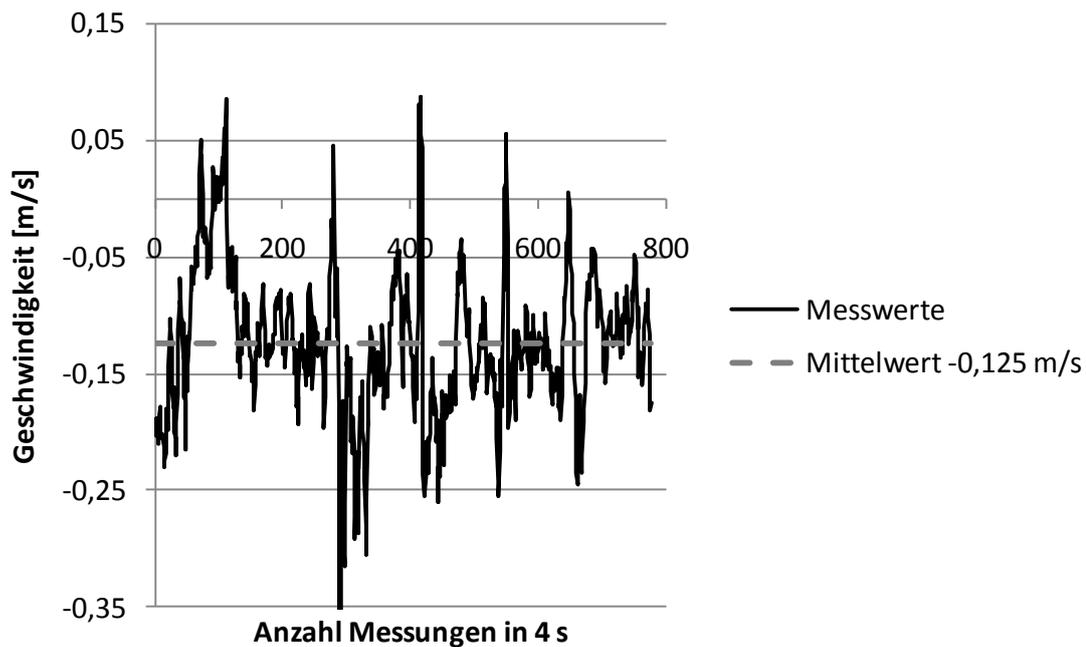


Abbildung 23: Geschwindigkeitsverteilungen der Geschwindigkeitskomponente v bei Messung mit einer ADV Sonde an der Wasseroberfläche.

Es handelt sich hierbei um 778 Einzelmessungen an einem Messpunkt. Um die Fließgeschwindigkeit an diesem Meßpunkt zu berechnen, bildet man den Mittelwert dieser Messungen. Jeder einzelne Messwert setzt sich nach Gleichung (33) zusammen aus dem Mittelwert und einer Schwankung.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} \quad (33)$$

Der Mittelwert der Messungen beträgt in Abbildung 23 -0,125 m/s. Als Turbulenz bezeichnet man die Schwankungen der Messungen um ihren Mittelwert. Weil der Mittelwert der Schwankungen an einem Messpunkt immer Null ist, wählt man statt dessen den Mittelwert der quadrierten Schwankungen $\overline{v'^2}$, der immer > 0 ist. In der Auswertung bildet man die Standardabweichung der Messwerte um den Mittelwert, die dem Wert $\sqrt{\overline{v'^2}}$ entspricht. In unserem Beispiel beträgt diese 0,067 m/s.

Um die Übertragbarkeit von Ergebnissen zu gewährleisten kann der Turbulenzgrad nach Gleichung (34) berechnet werden (Martin & Pohl, 2000).

$$T_u = \sqrt{\frac{1}{3 \cdot \bar{v}^2} \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (34)$$

Bezogen auf einzelne Geschwindigkeitskomponenten ergibt sich der Turbulenzgrad in Gleichung (35) nach Londong (1987).

$$T_u = \frac{\sqrt{v'^2}}{\bar{v}} \quad (35)$$

Londong (1987) hat den Turbulenzgrad der Strömung an der Sohle eines Sandfangmodells in Abhängigkeit von mehreren Parametern bestimmt. Er hat herausgefunden, dass die Strömung an der Sohle bei einem Breite/Tiefe-Verhältnis des Sandfanges von 0,8 den geringsten Turbulenzgrad aufweist. Dieses Ergebnis findet sich in den Bemessungsempfehlungen der DWA (2008) wieder (Tabelle 1). Ferner untersuchte er auch den Einfluss der Einblastiefe auf die Strömung an der Sandfangsohle und deren Turbulenzgrad. Mit zunehmender Einblastiefe stieg die Strömungsgeschwindigkeit an der Sandfangsohle an, der Turbulenzgrad blieb nahezu konstant. Für die feinblasige Belüftung gelang es ihm, ein Optimum des Turbulenzgrades bei $h_{\text{bel}} = 0,58 \cdot h_{\text{SF}}$ zu ermitteln. Aus Energieeffizienzgründen empfiehlt er bei der Bemessung eine Einblastiefe von $0,7 \cdot h_{\text{SF}}$.

Um die turbulenten Schwankungen in allen drei Richtungen zu erfassen, bietet sich der Parameter turbulente kinetische Energie an, der in Gleichung (36) definiert ist.

$$k = \frac{1}{2} \cdot (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (36)$$

Mit Hilfe dieses Parameters kann die kinetische Energie an jedem Messpunkt des Geschwindigkeitsfeldes berechnet werden. Die Einheit der turbulenten kinetischen Energie ist m^2/s^2 , dies entspricht der Einheit J/kg . Der Parameter turbulente kinetische Energie wurde für die weiteren Auswertungen gewählt, da sein entscheidender Vorteil darin besteht, dass in ihm die Parameter Lufteintrag, Einblastiefe, Durchfluss und Querschnittsgestaltung zusammengefasst sind.

3.5 Abscheidegrad

3.5.1 Anforderungen an die Sandabscheidung

Nach DWA (2008) ist der Abscheidegrad durch das Verhältnis der in ein System eintretenden und der aus dem System austretenden Menge des abzutrennenden Stoffes definiert. Nach Kalbskopf (1966) sollen Sande bis zu einem Korndurchmesser von 0,2 bis 0,1 mm im Sandfang abgeschieden werden. Die Forderung nach der Abscheidung des Korndurchmessers 0,1 mm bringt einen erhöhten Volumenbedarf mit sich. Die zulässige Oberflächenbeschickung verringert sich dadurch im Vergleich zur für die Abscheidung des Korndurchmessers 0,2 mm zulässigen Oberflächenbeschickung auf ein Drittel. Daher sei im Einzelfall eine wirtschaftliche Abschätzung notwendig. Insbesondere, wenn im Einzugsgebiet der Kläranlage vorwiegend Feinsande zu finden sind, empfiehlt Kalbskopf (1966) die Herabsetzung der Trennkorngröße auf 0,1 mm.

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten den Abscheidegrad zu berechnen (Neighbor & Cooper, 1965):

1. Gesamtabscheidegrad aller Partikel.
2. Abscheidegrad einer bestimmten Partikelgröße, auch als Trenngrad (Stieß, 1995) bekannt.
3. Abscheidegrad aller Partikel größer und gleich einer bestimmten Partikelgröße.

Bei der Bemessung von Sandfängen ist die Berechnung des Abscheidegrades nach Punkt 3 gemäß Gleichung (37) üblich (DWA, 2008). Bei dieser Gleichung werden alle Korngrößen $\geq d_T$ im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges bilanziert.

$$\eta_T = \left(1 - \frac{X_{e,SF}(\geq d_T)}{X_{0,SF}(\geq d_T)} \right) \cdot 100 \quad (37)$$

Die DIN 19569, Teil 2 (2002) empfiehlt einen Abscheidegrad von wahlweise 95 % oder 99 % für eine der Trennkorngrößen 0,16 mm, 0,2 mm, 0,25 mm oder 0,3 mm, bei maximalem Zufluss. Das Wertepaar der Trennkorngröße 0,2 mm mit einem Abscheidegrad von 95 % hat sich in der Praxis durchgesetzt, weil nach Brunner (1971) auftretende Schäden auf Korngrößen $\geq 0,2$ mm zurückzuführen sind. Nach DIN EN 12255-3 (2001) sollen Partikel mit den Korngrößen $\geq 0,3$ mm und einer Sinkgeschwindigkeit von 0,03 m/s zu 100 % abgeschieden werden. Der maßgebende Lastfall ist stoßartiger Sandanfall und Starkregen. Diese Empfehlungen treffen in der Praxis jedoch häufig nicht zu. Sandfänge werden zwar nach dem Stand der Technik bemessen, ihr Abscheidegrad aber meist nicht nachgewiesen.

3.5.2 Parameter der Korngrößenverteilung

Bei der Beschreibung der Korngrößenverteilung unterscheidet man zwischen Mediandurchmesser d_{50} , das heißt dass 50 % des Materials einen kleineren Durchmesser hat (Malcherek, 2008b) und dem mittleren Korndurchmesser d_m , der nach Gleichung (38) definiert ist.

$$d_m = \frac{\sum_i p(i) \cdot d(i)}{\sum_i p(i)} \quad (38)$$

$p(i)$ ist der prozentuale Anteil von $d(i)$ an der Gesamtmenge.

Zusätzlich kann die Ungleichförmigkeitszahl als Maß für die Breite der Verteilung berechnet werden.

$$u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (39)$$

Eine Ungleichförmigkeitszahl kleiner als 5 steht nach DIN EN ISO 14688-2 (2004) für einen gleichförmigen Boden, zwischen 5-15 für einen ungleichförmigen Boden und > 15 für einen sehr ungleichförmigen Boden.

3.5.3 Sinkgeschwindigkeiten nach verschiedenen Ansätzen

Die Sinkgeschwindigkeit eines Partikels hat wesentlichen Einfluss auf den Abscheidegrad. Die Bewegung eines sphärischen Sedimentpartikels mit dem Durchmesser d und der Dichte ρ_s kann mit der Basset-Boussinesq-Oseen-Gleichung (40) (BBO Gleichung) formuliert werden (Malcherek, 2008b).

$$\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_s \frac{d\vec{u}_p}{dt} = -\frac{1}{6}\pi d^3 (\rho_s - \rho_w) \vec{g} - \frac{1}{8} C_D \pi d^2 |\vec{u}_p - \vec{u}_f| (\vec{u}_p - \vec{u}_f) \quad (40)$$

Die Gleichung beschreibt ein Gleichgewicht zwischen Gewichtskraft F_G , sowie Auftriebskraft F_A und Widerstandskraft F_D (Abbildung 24). Mit dieser Gleichung

kann die Bewegung eines Partikels $\vec{u}_p = \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ w_p \end{pmatrix}$ in allen drei

Geschwindigkeitskomponenten $\vec{u} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$ berechnet werden. Für die

Erdbeschleunigung wird der Vektor $\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix}$ eingesetzt.

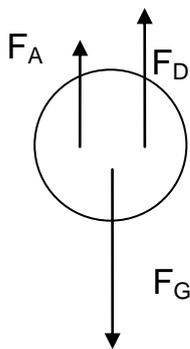


Abbildung 24: Kräftegleichgewicht an einem sphärischen Sedimentpartikel.

Der Betrag der Widerstandskraft ist maßgeblich abhängig vom Widerstandsbeiwert C_D . Für die Ermittlung der Sinkgeschwindigkeit gibt es verschiedene Ansätze, die sich im Wesentlichen in der Definition des Widerstandsbeiwertes C_D unterscheiden. In Tabelle 5 sind verschiedene Ansätze für den Widerstandsbeiwert C_D für kugelförmige Partikel und deren Gültigkeitsbereich gegenübergestellt (Kazanskij, 1981). Im Folgenden werden einzelne ausgewählte Ansätze genauer erläutert.

Tabelle 5: Gegenüberstellung verschiedener Ansätze für C_D für Kugeln (Kazanskij, 1981).

Ansatz	C_D	Gültigkeit für Re_p
Stokes	$\frac{24}{Re_p}$	$< 0,1$
Oseen (1927)	$\frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{3}{16} Re_p\right)$	> 1 und < 5
Kaskas	$\frac{24}{Re_p} + \frac{4}{\sqrt{Re_p}} + 0,4$	$< 2,2 \cdot 10^2$
Kazanskij (1981)	$\frac{24}{Re_p} + \frac{5,6}{\sqrt{Re_p}} + 0,25$	$< 4,3 \cdot 10^3$
Newton	0,44	$> 6,7 \cdot 10^2 < 2 \cdot 10^3$ $> 10^4 < 2 \cdot 10^5$

Im stationären Geschwindigkeitsfeld reduziert sich die BBO Gleichung auf ein vertikales Kräftegleichgewicht (Malcherek, 2008b). Die daraus berechnete Sinkgeschwindigkeit nennt man die Stokes'sche Sinkgeschwindigkeit (42).

$$-\frac{1}{6}\pi d^3(\rho_S - \rho_W)\vec{g} = -\frac{1}{8}C_D\pi d^2|\vec{u}_p - \vec{u}_f|(\vec{u}_p - \vec{u}_f) \quad (41)$$

$$w_S = -(w_p - w_f) = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d}{C_d} \frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} g} \quad (42)$$

Mit dem Widerstandsbeiwert nach Stokes von $C_D = \frac{24}{Re_p}$ und der Reynoldszahl des Korns $Re_p = \frac{w_S d}{\nu}$ ergibt sich die Sinkgeschwindigkeit nach Stokes für Kugeln in laminarer Strömung nach Gleichung (43), die für $Re_p < 0,5$ gültig ist.

$$w_S = \frac{g}{18\nu} \frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_W} d^2 \quad (43)$$

Die Froudezahl berechnet sich nach Gleichung (44).

$$Fr_p = \frac{w_S^2}{g \cdot d_p} \quad (44)$$

Auch für größere Reynoldszahlen des Korns $1 < Re_p < 5$ und somit allgemeiner gültig ist die Sinkgeschwindigkeit nach Oseen (1927). Der einzusetzende Widerstandsbeiwert wird in Gleichung (45) dargestellt.

$$c_D = \frac{24}{Re_p} \cdot \left(1 + \frac{3}{16} \cdot Re_p\right) \quad (45)$$

Die Sinkgeschwindigkeit nach Oseen (1927) ergibt sich damit gemäß Gleichung (46).

$$w_s = \sqrt{\frac{1}{18} \frac{w_s \cdot d^2}{\left(v + \frac{3}{16} w_s d\right)} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g} \quad (46)$$

Die zuvor diskutierten Ansätze beschreiben die Sinkgeschwindigkeit von kugelförmigen Partikeln. In den wenigsten Fällen sind die Partikel aber ideal geformt. Nach dem Ansatz von Wiedenroth (1967), sowie Zanke (1982), geht der Corey Shape Faktor in Gleichung (47) für den Widerstandsbeiwert mit ein.

$$c_D = \frac{24}{Re_p} + 2,7 - 2,3 \cdot CSF \quad (47)$$

Der Corey Shape Faktor nach Gleichung (48) ist definiert durch das Verhältnis der drei Halbachsen eines Ellipsoids (Baier, 1996) nach Abbildung 25. Nadelförmige Partikel zeichnen sich dadurch aus, dass die Halbachse a deutlich größer als die Halbachsen b und c sind. Bei plattenförmigen Partikeln dagegen sind die Halbachsen a und b deutlich größer als die Halbachse c (Baier, 1996). Für Sand kann der Wert für den Corey Shape Faktor zu $CSF = 0,7$ angenommen werden (ASCE, 1962). Für Kugeln beträgt der Corey Shape Faktor 1,0.

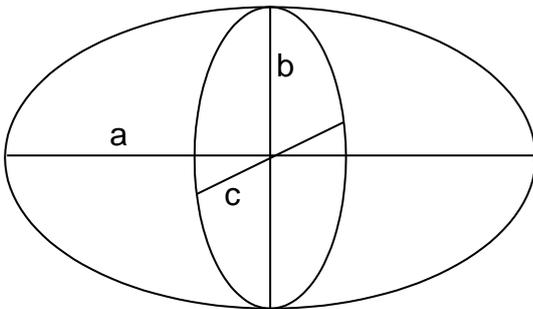


Abbildung 25: Raumachsen eines Ellipsoids zur Berechnung des Corey Shape Faktors nach Baier (1996).

$$CSF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (48)$$

Dietrich (1982) hat aus 14 experimentellen Studien die Sinkgeschwindigkeit von natürlichem Sediment bestimmt. Sein empirischer Ansatz berücksichtigt die Korngröße und die Dichte, aber auch Form und Rundheit. Zur Berücksichtigung der Rundheit wird der Powers Rundheitsbeiwert P eingesetzt, der für sphärische Partikel 6 und für kantiges Material zwischen 2 und 3 beträgt.

Zunächst wird eine dimensionslose Sinkgeschwindigkeit (50) und ein bezogener Korndurchmesser (51) bestimmt, und daraus mit Gleichung (49) dann die Sinkgeschwindigkeit berechnet

$$w_s = \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g \cdot \nu \cdot w_* \right)^{\frac{1}{3}} \quad (49)$$

$$w_* = R_2 R_3 10^{R_1} \quad (50)$$

$$D_* = \sqrt[3]{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot \frac{g}{\nu^2} \cdot d} \quad (51)$$

Die Werte für R1 bis R 3 stellen Hilfswerte dar und können nach den Gleichungen (52) bis (54) berechnet werden.

$$R_1 = -3,76715 + 5,78832 \log D_* - 0,88335 (\log D_*)^2 - 0,15525 (\log D_*)^3 + 0,04536 (\log D_*)^4 \quad (52)$$

$$R_2 = 1 - \frac{1 - CSF}{0,85} \quad (53)$$

$$R_3 = \left[0,65 - \left(\frac{CSF}{2,83} \tanh(3 \log D_* - 4,6) \right) \right]^{1 + \frac{(3,5 - P)}{2,5}} \quad (54)$$

Cheng (1997) hat eine Formel für Sinkgeschwindigkeit von natürlichen Sandpartikeln entwickelt. Er verwendet wie Dietrich (1982) auch den bezogenen Korndurchmesser aus Gleichung (51). Um die Kornform zu berücksichtigen verwendet er die Parameter A, B und n in Gleichung (55) für den Widerstandsbeiwert

$$C_D = \left(\left(\frac{A}{Re_p} \right)^{\frac{1}{n}} + B^{\frac{1}{n}} \right)^n \quad (55)$$

Für A wurde 32 eingesetzt und für B 1. Der Wert n wurde aus Messungen ermittelt und ergab speziell für Quarzsand 1,5. Daraus folgt Gleichung (56) für die Sinkgeschwindigkeit:

$$w_s = \frac{\nu}{d} \cdot (\sqrt{25 + 1,2 \cdot D_*^2} - 5)^{1,5} \quad (56)$$

In Abbildung 26 sind Sinkgeschwindigkeiten nach den oben erläuterten Ansätzen gegenübergestellt. Für den Korndurchmesser 0,2 mm ergeben sich Sinkgeschwindigkeiten von 0,02 m/s bis 0,036 m/s. Der Ansatz von Stokes ergibt die größten Werte für die Sinkgeschwindigkeiten, der Ansatz von Oseen (1927) die kleinsten. Auffällig ist, dass die Ergebnisse der vier Ansätze, die die Form des Partikels berücksichtigen relativ dicht beieinanderliegen.

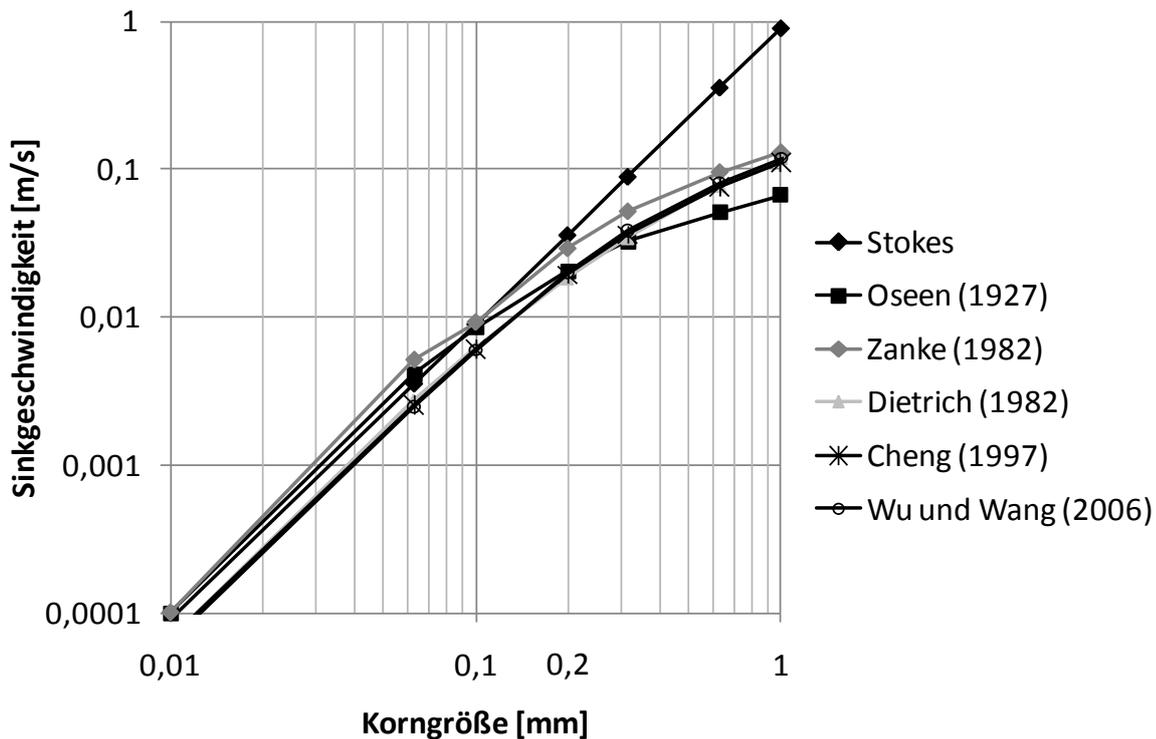


Abbildung 26: Sinkgeschwindigkeit nach Stokes, Oseen (1927), Zanke (1982), Dietrich (1982), Cheng (1997) und Wu und Wang (2006) (Corey Shape Faktor 0,7; Powers Rundheitsbeiwert 3,0).

In Tabelle 6 sind die zugrundegelegten Widerstandsbeiwerte verschiedener Korngrößen unterschiedlicher Autoren gegenübergestellt. Die Widerstandsbeiwerte steigen mit steigender Korngröße exponentiell an. Je größer der Widerstandsbeiwert, desto kleiner die Sinkgeschwindigkeit.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Widerstandsbeiwerte für verschiedene Korngrößen nach unterschiedlichen Quellen.

Korngröße [mm]	Stokes	Oseen (1927)	Zanke (1982)	Dietrich (1982)	Cheng (1997)	Wu und Wang (2006)
0,063	0	5	1	2	2	2
0,0315	1	7	3	5	5	5
0,02	3	10	5	11	12	11
0,01	27	32	26	50	59	60
0,0063	107	92	89	155	208	223

3.5.4 Absetzvorgang in laminarer und turbulenter Strömung

Der Absetzvorgang in laminarer Strömung ist in Abbildung 27 dargestellt. Ein Teilchen trifft dann auf dem Boden auf, wenn die Sinkzeit t_s kleiner gleich der Durchflusszeit t_R ist. Daraus folgt Gleichung (57) für den Absetzweg (Hazen, 1904).

$$L \geq \frac{Q}{b \cdot w_s} \quad (57)$$

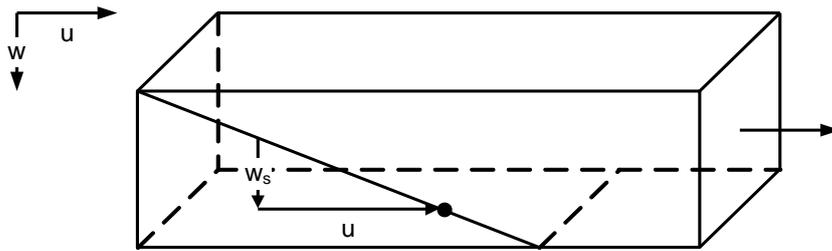


Abbildung 27: Absetzvorgang in laminarer Strömung (ATV, 1997).

Eine Zusammenfassung der Ansätze zur Beschreibung der Sedimentbewegung in turbulenter Strömung findet sich bei Bechteler (1981). Als Grundlage kann die Transportgleichung genannt werden, die Advektions- und Diffusionsterme beinhaltet (Malcherek, 2008a). Dobbins (1944) hat diese Gleichung für den zweidimensionalen Fall analytisch gelöst. Auf dieser Grundlage hat Camp (1944; 1953) grafische Darstellungen vom Rückhaltefaktor in Abhängigkeit vom Verhältnis der Sinkgeschwindigkeit zur Oberflächenbeschickung unter Einfluss des turbulenten Diffusionskoeffizienten erstellt. Eine detaillierte Abhandlung über das Lösungsverfahren findet sich bei Schrimpf (1987). Camp (1944) führte einen Rückhaltefaktor ein, der in Gleichung (58) definiert ist.

$$r = 1 - \frac{c}{c_0} \quad (58)$$

Um die Turbulenz beim Absetzvorgang zu berücksichtigen, fand Camp (1944) Gleichung (59) zur Berechnung der Sandfangoberfläche.

$$O_{SF} = \frac{w_s}{q_A} \cdot \frac{Q}{w_s} = \frac{Q}{q_A} \quad (59)$$

Camp (1944) hat Verhältniswerte von Sinkgeschwindigkeit zu Oberflächenbeschickung zwischen 0 und 2 aufgetragen (Abbildung 28) und davon abhängige Abscheidegrade angegeben. Die Abscheidegrade hängen in dieser Darstellung auch von der Turbulenz ε ab. Ohne Turbulenz ist der Abscheidegrad gleich 100 %, wenn die Sinkgeschwindigkeit größer oder gleich der Oberflächenbeschickung ist. Es wird deutlich, dass Turbulenz den Absetzvorgang behindert. Ein großer Wert für ε führt zu einem kleinen Wert von $\frac{w_s \cdot h}{2 \cdot \varepsilon}$ und folglich

zu einem geringen Abscheidegrad. Bei kleinen Werten von $\frac{w_s}{q_A}$ mit zu erwartenden niedrigen Abscheidegraden ist die Auswirkung der Turbulenz geringer als bei großen Werten von $\frac{w_s}{q_A}$.

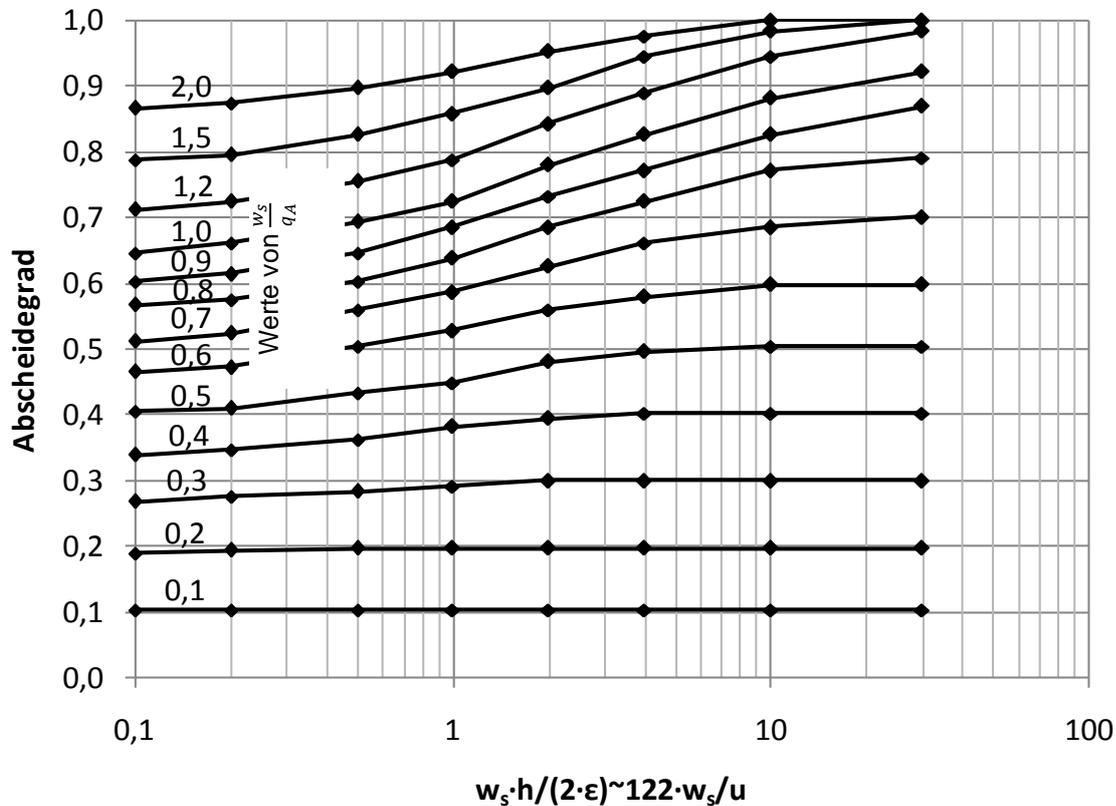


Abbildung 28: Einfluss der Strömungsturbulenz auf den Absatzvorgang (nach Camp, 1944).

3.5.5 Kritische Geschwindigkeit zum Transport von Schwebstoffen und Sedimenten

Nach Zanke (1976; aus Londong, 1987) werden Sedimente in Suspension transportiert, wenn die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit nach Gleichung (60) überschritten wird.

$$u_* = 0,4 \cdot w_s \quad (60)$$

In diese Gleichung können Sinkgeschwindigkeiten nach den Ansätzen aus Kapitel 3.5.3 eingesetzt werden. In Anlehnung an Londong (1987) sind in Abbildung 29 unterschiedliche Transportarten in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und der mittleren Fließgeschwindigkeit 1 cm und 20 cm über der Sohle dargestellt. Das Geschwindigkeitsprofil $u(z)$ wurde in Abhängigkeit von der Reynoldszahl mit den Gleichungen (8), (9) und (10) bestimmt, in die die Schubspannungsgeschwindigkeit nach Gleichung (60) eingesetzt wurde. Für die Sinkgeschwindigkeit w_s wurde der

Ansatz nach Dietrich mit einem Corey Shape Faktor von 0,7 für Sand und einem Powers Rundheitsbeiwert von 3 eingesetzt. Für k_s wurde der Korndurchmesser d eingesetzt (Zanke, 1982).

Die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit u_c für den Bewegungsbeginn an der Sohle wurde nach Zanke (1982) mit Gleichung (61) berechnet. Für natürliche Sande ist der Faktor $c = 1$.

$$u_c = 2,8 \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \cdot g \cdot d \right)^{\frac{1}{2}} + 14,7 \cdot \frac{v}{d} \cdot c \quad (61)$$

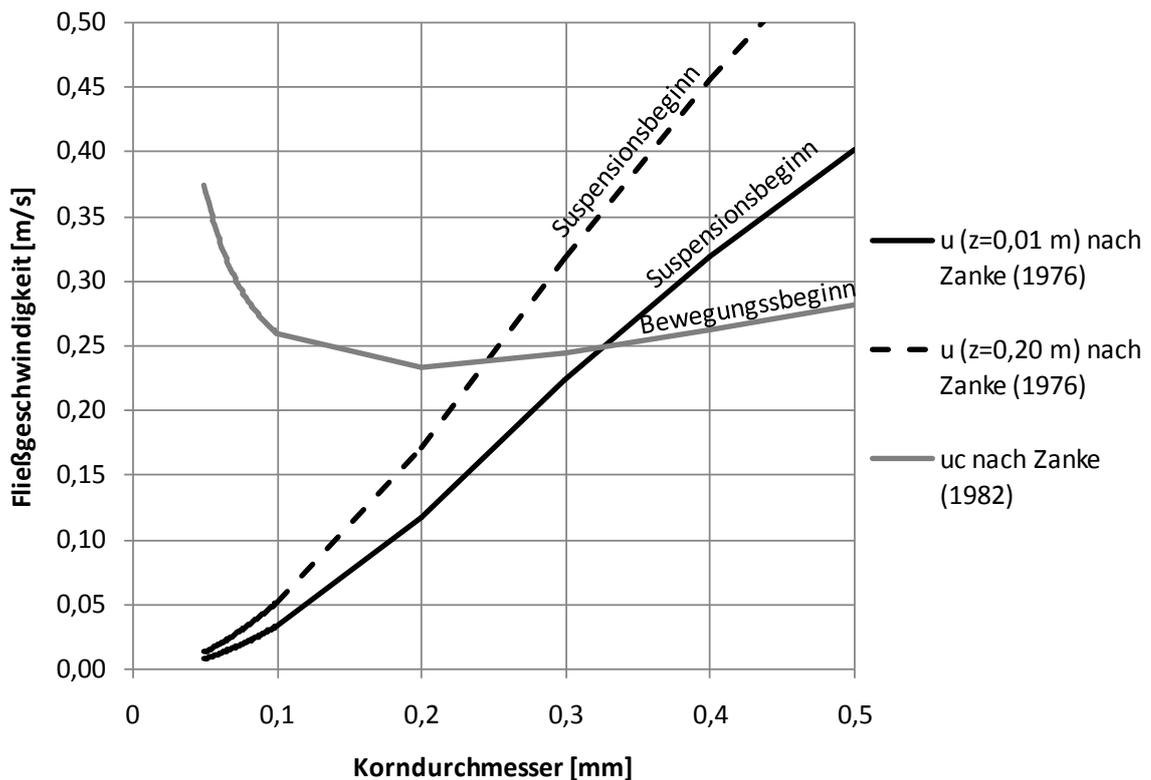


Abbildung 29: Unterschiedliche Transportarten für Sand in Wasser mit $T=20^\circ\text{C}$ in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und der mittleren Geschwindigkeit im Abstand von 1 cm und 20 cm von der Sohle nach Londong (1987).

Die Korngröße 0,1 mm kann in der Schwebel transportiert werden, wenn die Fließgeschwindigkeit 0,01 m von der Sohle von 0,033 m/s beträgt. Für die Korngröße 0,2 mm sind 0,12 m/s nötig, die Korngröße 0,5 mm wird ab einer Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s in der Schwebel transportiert. Im Abstand von 0,2 m von der Sohle beträgt die nötige Geschwindigkeit für den Transport in der Schwebel bei einer Korngröße von 0,1 mm 0,05 m/s, bei einer Korngröße von 0,2 mm 0,17 m/s und einer Korngröße von 0,5 mm 0,58 m/s.

Die kritische Schubspannungsgeschwindigkeit für Sohltransport beträgt bei dem Korndurchmesser 0,1 mm 0,26 m/s bei dem Korndurchmesser 0,2 mm 0,23 m/s und bei dem Korndurchmesser 0,5 mm 0,28 m/s. Bei größeren Geschwindigkeiten kann sowohl Sohltransport, als auch Schwebetransport stattfinden.

3.5.6 Sandanfall und Sandbeschaffenheit

Nach Kalbskopf (1981) können die Schmutzstoffe, die in der mechanischen Abwasserreinigung aus dem Abwasser entfernt werden, in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- grobe Schwebstoffe
- grobe Sinkstoffe wie Sand, Asche, Kohle
- Fette und Öle
- Feine Schlammstoffe mineralischer und organischer Art.

Um den Abscheidegrad zu berechnen, müssen zunächst die Sandkonzentration und die Korngrößenverteilung im Zulauf des Sandfanges bestimmt werden. Nach DIN EN ISO 14688-1 (2002) vormals DIN 4022 (1987) spricht man bei Körnungen zwischen 0,06 mm und 2 mm von Sand. Die Dichte von Quarzsand beträgt 2,65 g/m³. Die Körnungen von 0,002 mm bis 0,06 mm bezeichnet man als Schluff, noch feinere Körner als Ton. Im Bereich über 2 mm bis 63 mm handelt es sich um Kies, ab 63 mm um Steine und ab 200 mm um Blöcke.

Die Kornzusammensetzung des Sandes im Abwasser ist mitunter abhängig vom Kanalgefälle (Brunner, 1971), wegen der Klassierung im Kanalsystem. Bei schlechtem Gefälle lagern sich gröbere Körner im Netz ab, feine Körner gelangen zur Kläranlage. Bei gutem Gefälle gelangen grobe und feine Sande zur Kläranlage. Circa 50 % der mineralischen Feststoffe bleiben im Kanalnetz liegen (Godehardt, 1996). Nach Schrimpf (1987) und Patt & Stein (1996) beeinflussen folgende Faktoren den Sandanfall und die Kornzusammensetzung im betrachteten Einzugsgebiet:

- Größe und Geologie
- Vegetation
- Anteil bebauter Fläche und Straßen
- Siedlungsstruktur
- Einwohnerdichte
- Sandstreuung im Winter
- Niederschlagshäufigkeit
- Klimatische Bedingungen
- Abfluss und Abflussschwankungen
- Entwässerungssystem
- Zustand und Wartung

Der Abrieb von Straßenoberflächen, Schmutzstoffe des Straßenverkehrs, sowie Sand und Kies aus Baustellen gelangen über die Straßeneinläufe ins Kanalsystem (Godehardt, 1996). Beim Mischverfahren wird der eingetragene Sand durch Spülstöße zur Kläranlage transportiert, beim Trennverfahren in den Vorfluter. Die Vielseitigkeit der Einflussfaktoren kann als Grund für die weite Streubreite der Sandkonzentration und der Korngrößenzusammensetzung im Zulauf von Kläranlagen angeführt werden. In der Kläranlage werden die wesentlichen Schäden und Störungen oftmals durch die größeren Korngrößen $\geq 0,2$ mm verursacht (Brunner, 1971).

Für die Sandanfallmengen im Abwasser gibt es eine große Schwankungsbreite. Kalbskopf (1977) gibt einen Bereich zwischen 0,02 und 0,2 l/m³ Abwasser an. Nach Patt & Stein (1996) sind die größten Sandmengen bei Regenwetter, besonders wenn es nach einer langen Trockenwetterperiode wieder regnet, zu erwarten. Bei Trockenwetter gelangen feinere Sande im Korngrößenbereich 0,9 mm bis 3 mm zur Kläranlage (Stein, 1992). Der Korndurchmesser des Größtkorns ist allerdings maßgeblich von der Spaltweite der vorgeschalteten Rechen und Siebe abhängig. In Tabelle 7 sind typische Sandkonzentrationen im Rohabwasser im Zulauf zu verschiedenen Kläranlagen aufgelistet. Bei Trockenwetter schwanken diese zwischen 10 mg/l und 130 mg/l. Bei Regenwetter sind die Sandkonzentrationen mit 400 mg/l bis 500 mg/l deutlich höher.

Tabelle 7: Typische Sandkonzentrationen im Abwasser bei Trockenwetter und bei Regenwetter.

Quelle	Sandkonzentration im Zulauf bei Trockenwetter [mg/l]	Sandkonzentration im Zulauf bei Regenwetter [mg/l]
Patt (1990)	130	-
Stein (1992)	10-60	400
Patt & Stein (1996)	10-60	400
ATV (1997)	130	-
ATV (2004)	10-60	-
Imhoff & Imhoff (2007)	100	-
Ostermann (1966)	15-80	500

In Abbildung 30 sind drei Beispiele für Kornverteilungen im Kanal dargestellt. Die Anteile der Korngrößen $< 0,2$ mm liegen zwischen 35 % und 68 %.

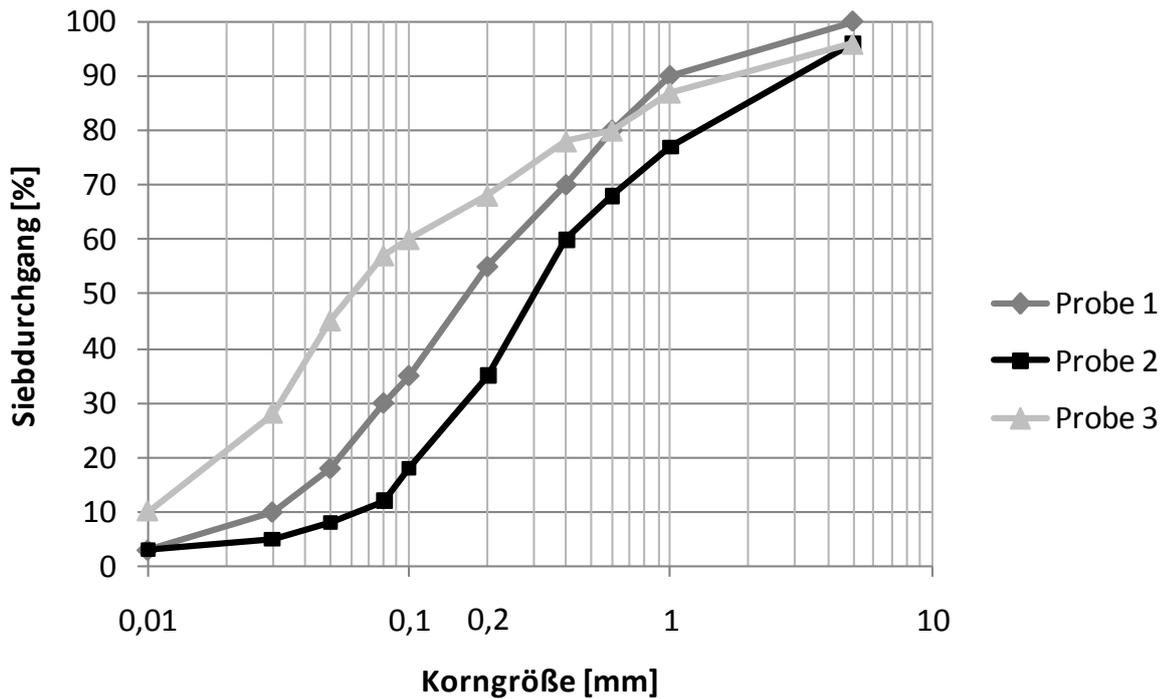


Abbildung 30: Kornverteilung im Kanal nach Artières (1988).

In Abbildung 31 sind Kornverteilungen von Sand in Rohabwasser gegenübergestellt. Die Schwankungsbreite ist hier ähnlich hoch wie bei den Kornverteilungen im Kanal. Auffällig ist der höhere Feinkornanteil gegenüber früherer Untersuchungen. Kalbskopf (1966) berichtet noch von Feinkornanteilen bis 30 %. In den Untersuchungen von Stein (1992) sind die Feinkornanteile erheblich höher.

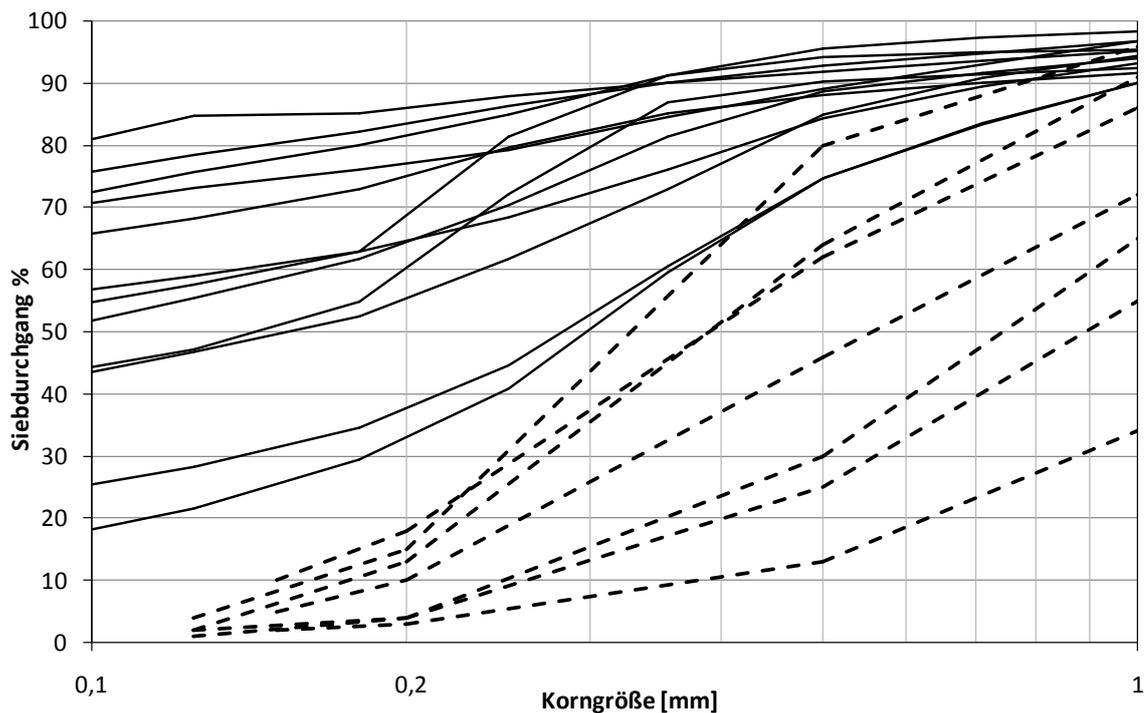


Abbildung 31: Kornverteilungen von Sand im Rohabwasser (gestrichelte Linien: Ostermann, 1966; Brunner, 1971; durchgezogene Linien: Stein, 1992).

Als Sandfanggut bezeichnet man nach ATV-DVWK-M 369 (2003) „feste Stoffe, die im Sandfang aus dem Abwasser abgeschieden werden“. Nach ATV (1996) ist Sandfanggut ein heterogenes Stoffgemisch mit einem Trockenrückstand von ca. 40 %, bzw. zwischen 30 % und 70 % (Roos, 1995), und einem organischen Anteil am Trockenrückstand zwischen 10 % und 50 %, bzw. 15 % bis 55 % (Kalbskopf, 1981), bzw. 5 % bis 55 % (Roos, 1995). Die Feuchtdichte beträgt 1.200 kg/m³ bis 1.600 kg/m³ (Roos, 1995). Sandfanggut setzt sich schnell ab, dickt gut ein, ist schlecht fließfähig und hat stark abrasive Wirkung (Kalbskopf, 1981).

Die anfallende Menge an Sandfanggut kann überschlägig mit 5 l/(E·a) angenommen werden. In ATV (1998) findet sich eine Schwankungsbreite von 2 bis 12 l/(E·a) mit einer spezifischen Trockenmasse von 9 g/(E·d), in Imhoff & Imhoff (2007) werden 2 bis 5 l/(E·a) angegeben. Hierbei gelten 2 l/(E·a) bei enger und 5 l/(E·a) bei weitläufiger Bebauung. Bei Koppe & Stozek (1990) beträgt der Bereich 5 bis 12 l/(E·a). Bezogen auf den Abwasservolumenstrom liegt die Schwankungsbreite beim spezifischen Sandfanggutanteil zwischen 20 l/m³ Abwasser bis 200 l/m³ Abwasser, wobei im Mittel 60 l/m³ Abwasser angenommen werden können (Kalbskopf, 1981).

In Abbildung 32 sind Korngrößenverteilungen von Sandfanggut von vier verschiedenen Autoren gegenübergestellt. Vergleicht man die Sieblinien des Sandfangguts in Abbildung 32 mit denen im Kanal in Abbildung 30 sieht man, dass der Anteil der Korngrößen < 0,2 beim Sandfanggut mit 10 % bis 35 % deutlich

geringer ist als im Kanal mit 35 % bis 70 %. Grundsätzlich deutet ein hoher Feinkornanteil im Sandfanggut auf eine hohe Abscheideleistung des Sandfanges hin. Eine quantitative Aussage über den Abscheidegrad kann aber durch Analysen des Sandfangguts nicht getroffen werden.

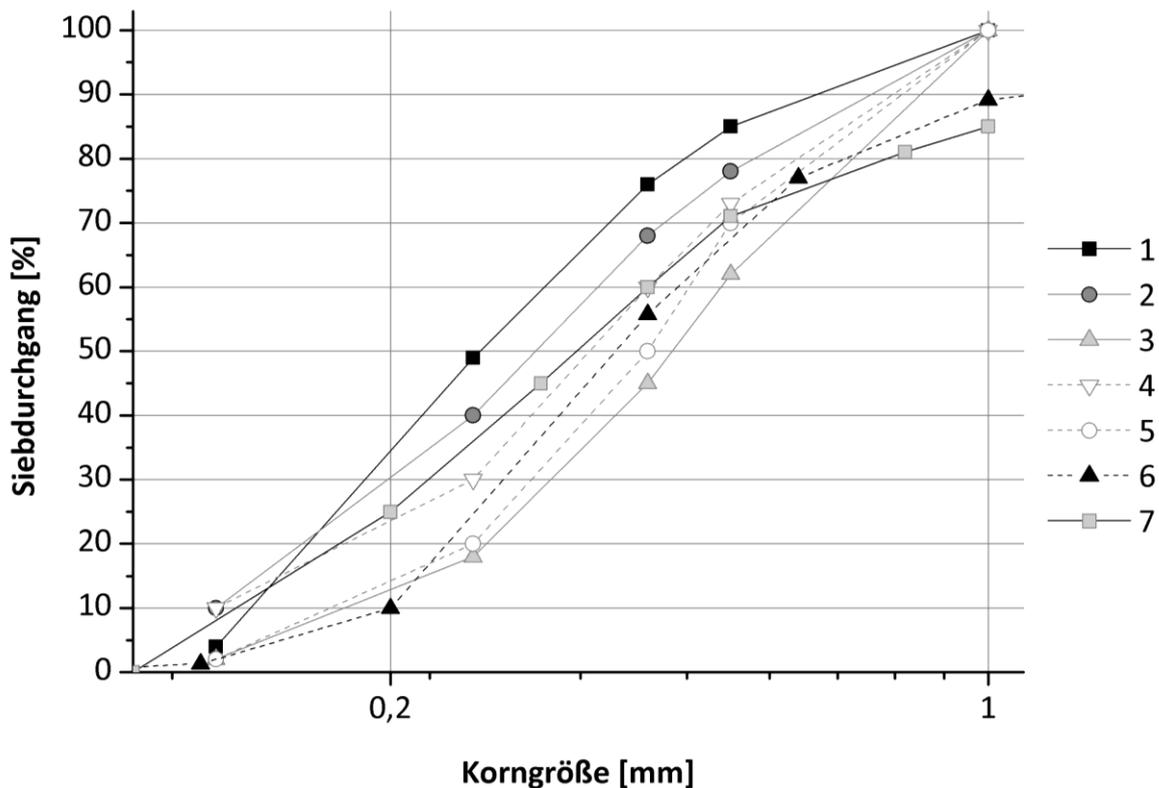


Abbildung 32: Sieblinien von Sandfanggut nach Londong (1987) 1-5, Hartmann & Pöpel (1958) 6 und Hitzler (2002) 7.

Bei Roos (1995) finden sich als Beseitigungs- und Recyclingmöglichkeiten von Sandfanggut die Sandfanggutwäsche, die thermische Aufbereitung und Verbrennung oder die Kompostierung. Der gewaschene Sand kann als Baustoff verwertet werden. Nach der thermischen Aufbereitung kann das Sandfanggut deponiert, oder als Baustoff eingesetzt werden. Das kompostierte Sandfanggut kann im Landschaftsbau eingesetzt werden. Als Sandgut bezeichnet man Sand nach der Aufbereitung. In Abbildung 33 sind Sieblinien gewaschenen Sandes dargestellt. Der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm beträgt bei diesen Untersuchungen nur 5 % bis 15 %, also deutlich geringer als im Sandfanggut.

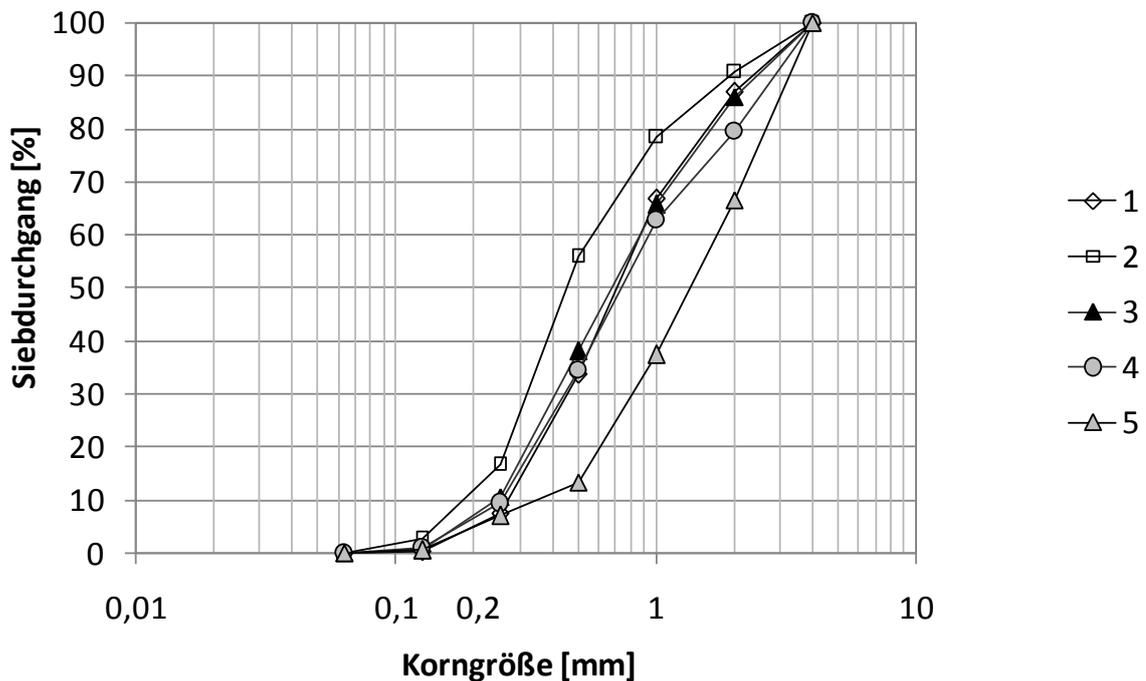


Abbildung 33: Beschaffenheit von gewaschenem Sand (Hitzler, 2002).

3.5.7 Prüfverfahren und Prüfsande zur Messung des Abscheidegrades

Den Abscheidegrad an großtechnischen Anlagen zu messen ist verfahrenstechnisch sehr aufwändig. Im Folgenden sollen einige Prüfverfahren vorgestellt werden. In Batel (1971) finden sich grundlegende Hinweise zur Probenahme aus Suspensionen mit körnigem Material. Wenn möglich, sollte der ganze Mengenstrom für eine bestimmte Zeit entnommen werden. Falls dies nicht möglich ist, wird eine Teilstromentnahme empfohlen. Das Abtrennen des körnigen Materials könne dann durch eindampfen, filtrieren, sedimentieren oder sieben erfolgen. Zusätzlich erfolgt der Hinweis, dass durch Trocknen des Materials die Struktur verändert werden könne, so dass eine Untersuchung ohne Trocknung zu empfehlen wäre.

Chasik & Burger (1964) suchten nach einer Methode, um die Sandkonzentration im Zulauf und im Ablauf von Sandfängen messen zu können. Als erste Methode wählten sie Hydrozyklone, als zweite Methode Sedimentationsbecken, die mit Teilströmen des Zulaufs und des Ablauf eines Sandfanges beschickt wurden, um den Abscheidegrad zu messen. Um beide Methoden zu testen untersuchten sie die Abscheidegrade des Hydrozyklons und des Sedimentationsbeckens unter Zugabe von Klarwasser mit Sand verschiedener Korngrößen. Der Hydrozyklon wurde über einen Vorlagebehälter mit 18 l/s Klarwasser beschickt, dem später mit einem Trichter 45 kg Sand einer der Korngruppen 0,21 mm bis 0,4 mm, 0,15 mm bis 0,21 mm und 0,088 mm bis 0,15 mm zugeführt wurden.

Als Sedimentationsbecken benutzten sie einen zylindrischen Behälter mit konischem Boden und einem Volumen von je rund 200 l. Am Boden des Behälters war ein Hahn zum Ablassen des Sandes angebracht, weiter oben ein Hahn zum Dekantieren des Überstandswassers nach Versuchsende. Der Behälter hatte einen Überlauf oben, so dass er kontinuierlich über mehrere Stunden beschickt werden konnte. Das Überlaufwasser musste in einem weiteren Behälter aufgefangen und analysiert werden. Das Sedimentationsbecken wurde mit $673 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ Klarwasser und einer Sandzugabe von $4,5 \text{ kg/min}$ beschickt. Beide Methoden wiesen sehr gute Abscheidegrade des zugegebenen Sandes von über 90 % auf. Bei der Verwendung der Sedimentationsbecken bestand die Schwierigkeit darin, deren Oberflächenbeschickung nicht zu groß zu wählen. Die Einstellung der richtigen Oberflächenbeschickung wurde empirisch gewählt. Neighbor und Cooper (1965) wendeten die Methode der Messung des Abscheidegrades mit Sedimentationsbecken im Zu- und Ablauf eines großtechnischen belüfteten Sandfanges an, wiesen aber darauf hin, dass sie sehr zeitaufwändig und daher ungeeignet für Routineuntersuchungen sei.

Ostermann (1966) hat den Abscheidegrad von Tangentialsandfängen untersucht. Zunächst entnahm er die Proben mit einem, wie bei Schwebstoffmessungen üblichen, zylinderförmigen Durchflussgerät, mit beidseitigem Klappverschluss. Er bildete Mischproben aus 12 bis 15 Stichproben, mit einem Volumen von insgesamt 18 l. Nach 1 bis 2 stündiger Sedimentationszeit wurde das Überstandswasser dekantiert und die Proben getrocknet und geglüht. Wegen des geringen und schwankenden Sandgehaltes im Abwasser empfahl er, größere Abwasserproben von 50 bis 200 l möglichst kontinuierlich zu entnehmen. Bei weiteren Probenahmen setzte er eine Heberanlage ein, mit der es möglich war Abwasserprobenahmen auf verschiedenen Höhen im Gerinne zu nehmen, und somit auch eine Aussage über die Sandkonzentration in Abhängigkeit von der Gerinnehöhe zu bekommen. Aufgrund der sehr geringen Sandkonzentration von nur $0,3 \text{ mg/l}$ bis 3 mg/l bei Trockenwetter und maximal 50 mg/l bei Regenwetter bei der beprobten Kläranlage, ging er zu einer künstlichen Sandzugabe über. Als Ursache für diese sehr geringe Sandkonzentration nannte er das sehr flache Gefälle im Einzugsgebiet, bei dem sich der ganze Sand schon im Kanal absetzt und dann bei Kanalreinigungen entnommen wird. Als Prüfsand verwendete er die Korngrößenverteilung, die von Hartmann & Pöpel (1958) im Sandfanggut gemessen wurde (Sand Nr. 6 in Abbildung 32). Er wählte die zugegebene Sandkonzentration so, dass sich insgesamt ca. 100 mg/l ergaben.

Stein (1992) hat an mehreren belüfteten Sandfängen Untersuchungen zur Abscheidung von Sand und organischem Material durchgeführt. In Abbildung 34 ist die Versuchsanordnung dargestellt. Die Aufkonzentrierung der im Zulaufstrom enthaltenen Grobstoffe erfolgte durch einen Zyklon (Grenzkorn $< 20 \text{ }\mu\text{m}$). Das geglühte Material wurde mittels Nass-Siebung in Kornfraktionen unterteilt.

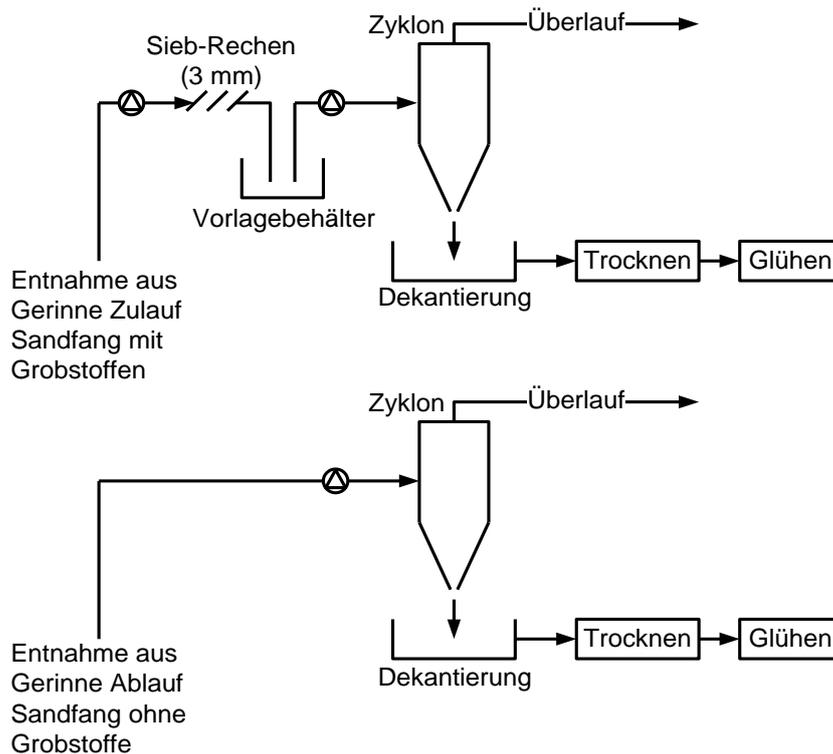


Abbildung 34: Schema der Versuchsanordnung (nach Stein, 1992).

Gardner & Deamer (1996) haben verschiedene Methoden untersucht um den Abscheidegrad eines Sandfanges zu überprüfen. Als erste Methode wählten sie die Untersuchung der „festen“ Stoffströme Sandfanggut und Primärschlamm. Als Vorteil dieser Methode nannten sie, dass keine Sandzugabe erforderlich sei und dass die Sandkonzentration im Abwasser nicht gemessen werden muss. Nachteilig bewerteten sie die lange erforderliche Dauer des Messzeitraumes (Wochen), um eine zuverlässige Aussage treffen zu können und dass bei der Messung Zulaufschwankungen nicht erfasst werden können.

Als weitere Möglichkeit nannten Gardner und Deamer (1996) die Beprobung von aufbereitetem Sand mit Sandzugabe im Zulauf des Sandfanges. Diese Methode bewerteten sie aber als zeitaufwändig und ungenau, weil sich Sand auf dem Weg zur Aufbereitung in Rohrleitungen absetzen könne und somit die Massenbilanz verfälsche.

Als dritte Methode wählten sie eine Beprobung der „flüssigen“ Stoffströme. Die Proben wurden aus dem Zu- und Ablauf des Sandfanges genommen, wobei im Zulauf des Sandfanges zusätzlicher Prüfsand zugegeben wurde. Vorteil dieser Methode sei der kurze Untersuchungszeitraum im Bereich von Minuten. Ferner könne auch die Abhängigkeit des Abscheidegrades vom Durchfluss erfasst werden. Nachteilig sei die Schwierigkeit, die im Abwasser bereits vorhandene Sandkonzentration zu messen. Für die Probenahme im Ablauf wurde auch hier die Probenahme des gesamten Volumenstroms empfohlen. Wenn dies nicht möglich

sei, wird eine Teilstromentnahme mit Pumpe empfohlen. Die dritte Methode schnitt im Vergleich als die beste ab, weil sie die größte Genauigkeit aufwies.

In Neitzel & Tschech (2007) wird eine regelmäßige Überprüfung des Abscheidegrades des Sandfanges zur Vorbeugung von Betriebsstörungen empfohlen. Als Prüfverfahren wird dort die Bestimmung des mineralischen Anteils im Rohschlamm aus der Vorklärung als Glührückstand und des organischen Anteil im Sandfanggut als Glühverlust vorgeschlagen. Als Beurteilungskriterium des Abscheidegrades wird dann der mineralische Anteil im Rohschlamm herangezogen. Ein niedriger mineralischer Anteil im Rohschlamm lässt auf einen guten Abscheidegrad des Sandfanges schließen.

Bei Kompaktanlagen ist es einfacher den Abscheidegrad zu untersuchen. Bei Zugabe einer definierten Menge an Prüfsand kann, nach Auffangen des abgeschiedenen Sandes, der Abscheidegrad nach Gleichung (37) berechnet werden. In Abbildung 35 sind Prüfsande verschiedener Autoren gegenübergestellt. Die Bandbreite der Korngrößenverteilungen ist ähnlich weit gestreut wie bei Messungen im Zulauf von Kläranlagen. Der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm beträgt zwischen 3 % und 32 %.

Während die Prüfsande von Kalbskopf I (1966), Londong (1987), Patt (1990) und Schrimpf (1987) eher eng gestuft und fein sind, sind die Sande von Brunner (1971), Kalbskopf II (1966) und Theilen & Luthardt-Behle (2004) grob und weit gestuft.

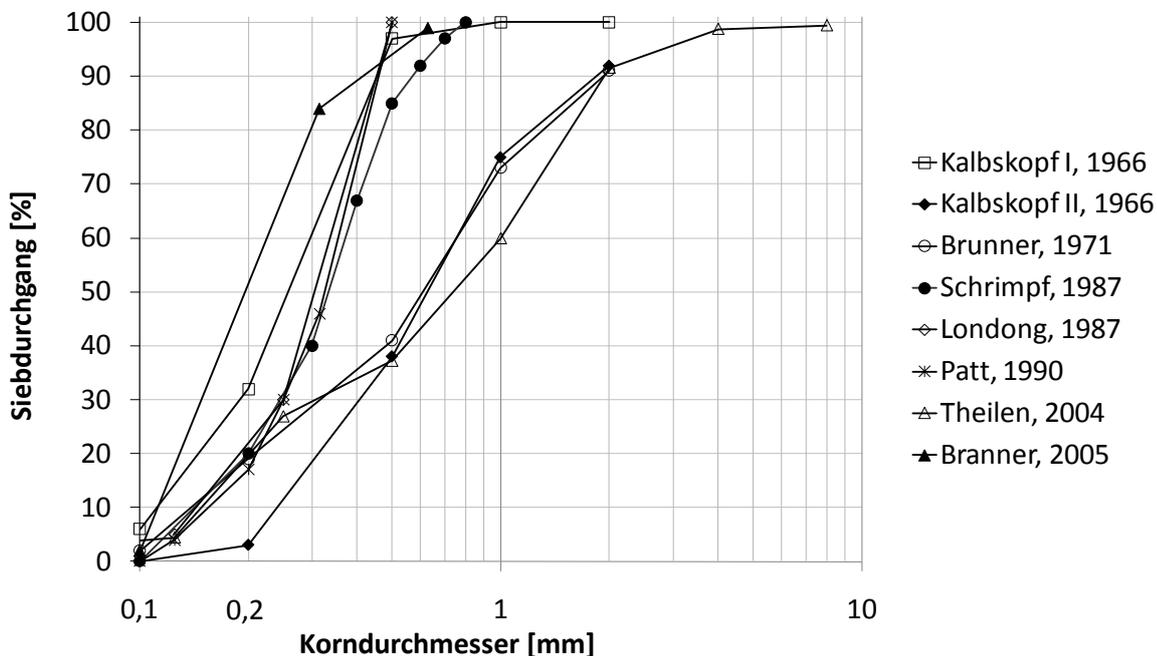


Abbildung 35: Sieblinien verwendeter Prüfsande nach verschiedenen Quellen.

In Tabelle 8 sind die statistische Kenngrößen d_{50} , d_m und die Ungleichförmigkeitszahl u der Kornverteilungen verschiedener Prüfsande gegenübergestellt. Es fällt auf, dass alle Kenngrößen einem breiten Schwankungsbereich unterliegen. So ist der Sand Kalbskopf I (1966) der feinste, der Sand von Londong (1987) hat die kleinste Ungleichförmigkeitszahl, d.h. die schmalste Verteilung, und der Sand von Theilen & Luthardt-Behle ist der mit Abstand gröbste und auch der ungleichförmigste. Die Wahl des Prüfsandes ist entscheidend für das Ergebnis der Untersuchungen zum Abscheidegrad. Es muss also auf eine repräsentative Wahl des Prüfsandes geachtet werden. Es soll im Folgenden noch gezeigt werden, inwieweit die Wahl des Prüfsandes die Ergebnisse beeinflussen kann.

Tabelle 8: Statistische Kenngrößen der von verschiedenen Autoren verwendeten Prüfsande.

Parameter	Kalbskopf I, (1966)	Kalbskopf II, (1966)	Brunner, (1971)	Londong, (1987)	Schrimpf, (1987)	Patt, (1990)	Theilen & Luthardt-Behle (2004)	Branner (2005)
d_{50} [mm]	0,28	0,66	0,64	0,32	0,34	0,33	0,78	0,23
d_m [mm]	0,17	0,47	0,44	0,21	0,30	0,26	0,68	0,13
u [-]	2,9	3,1	5,4	2,4	2,5	2,3	6,4	2,1

3.5.8 Ergebnisse von Messungen zum Abscheidegrad

Die meisten der hier vorgestellten Ergebnisse des Abscheidegrades beziehen sich auf Messungen an physikalischen Sandfangmodellen oder Kompaktanlagen, da die Messung an großtechnischen Anlagen, wie oben beschrieben, sehr aufwändig ist.

Kalbskopf (1966) hat Untersuchungen an einem physikalischen Sandfangmodell eines belüfteten Sandfanges mit einer Breite von 1,36 m, einer Höhe von 1,42 m, und einer Länge von 0,2 m durchgeführt (Abbildung 4) und jeweils 100 g Sand „Kalbskopf I“ (Abbildung 35) getrennt nach Körnungen zugegeben. Zu festen Zeitabschnitten wurde festgestellt, wie viel Prozent der Sandmenge einer bestimmten Körnung sich bereits abgesetzt hat und Kurven aufgetragen. In Abbildung 36 ist die abgesetzte Sandmenge in Abhängigkeit von Zeit und Korngruppe gegenübergestellt.

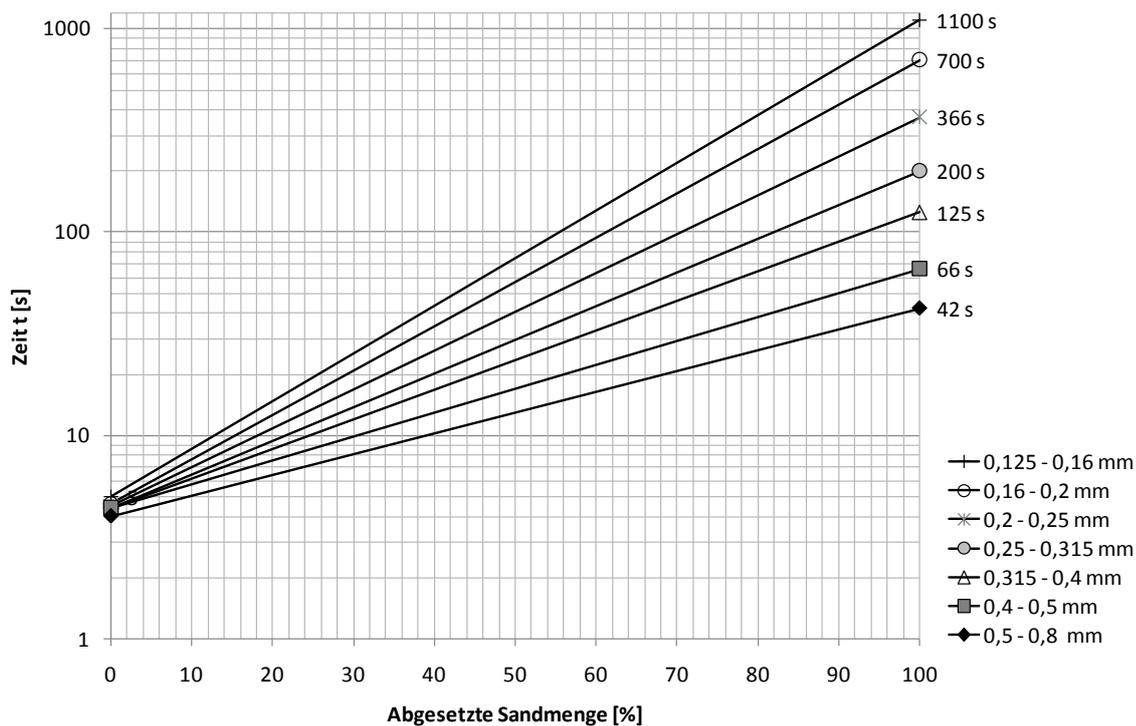


Abbildung 36: Im belüfteten Sandfang nach der Zeit t [s] abgesetzte Sandmenge (Kalbskopf, 1966).

Aus den Ergebnissen in Abbildung 36 geht hervor, dass um 100 % der Körnung von 0,2 bis 0,25 mm abzuscheiden, 366 s nötig sind und um 100 % der Körnung 0,25 bis 0,315 mm abzuscheiden 200 s nötig sind. Dies stimmt sehr gut mit internationaler Literatur (Metcalf and Eddy, 2003) überein, die für einen belüfteten Sandfang Durchflusszeiten von 3 Min empfiehlt. Die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze betrug bei diesen Versuchen 30 cm/s bei einem Abstand von der Beckensohle von 5 cm. Allerdings war der verwendete Versuchssandfang mit einer Länge von nur 20 cm zu kurz, als dass der Einfluss der Wandreibungskräfte vernachlässigt werden könnte (Schrimpf, 1987). Auch Londong (1987) weist darauf hin, dass die kleine Modellgröße bei Kalbskopf zu besseren Abscheidegraden führt.

Schrimpf (1987) hat im Labor für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München an einem belüfteten Sandfang mit kreisförmigem Profil ($D = 1,6$ m, $L = 20$ m) Untersuchungen zum Abscheidegrad durchgeführt. Es wurden jeweils 30 kg Sand über 2 Stunden zugeführt. Die Sandzugabe erfolgte bei Versuch Nr. 5 in der Mitte des Kreisprofils, bei allen anderen Versuchen an der Wasseroberfläche. Die Belüftung war unterteilt in 4 Segmente und konnte in jedem Segment variiert werden, wobei das 4. Segment immer unbelüftet blieb. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Abscheidegrad in Abhängigkeit verschiedener Versuchsparameter (nach Schrimpf, 1987).

Nr.	Durchfluss	Durchflusszeit	Sandkonz.	q _{LV} 1. Segment	q _{LV} 2. Segment	q _{LV} 3. Segment	q _{LL}	η _T
	m ³ /h	min	mg/l	Nm ³ /(m ³ ·h)	Nm ³ /(m ³ ·h)	Nm ³ /(m ³ ·h)	Nm ³ /(m·h)	%
1	637,2	3,8	23,5	0	0	0	0	98
2	601,2	4,0	25,0	3,09	0,76	0,19	2,03	77
3	608,4	4,0	24,7	1,02	1,02	1,02	1,54	75
4	594	4,1	25,3	3,09	0,56	0,19	1,93	79
5	608,4	4,0	24,7	3,09	0,76	0,19	2,03	77
6	442,8	5,4	33,9	3,09	0,78	0,19	2,04	96

Das beste Ergebnis wurde bei Versuch 1 ohne Belüftung erzielt. Der Abscheidegrad betrug hierbei 98,1 %. Bei den Versuchen 2 bis 6 mit Belüftung konnte, mit der größten Durchflusszeit von 5,4 Minuten, bei Versuch 6 ein maximaler Abscheidegrad von 96 % erreicht werden. Ein Vergleich der Versuche 2 und 5 zeigt, dass die Zugabehöhe der Sandzugabe bei der verwendeten Korngröße für den Abscheidegrad bei diesen Versuchen keine Rolle spielt. Ein größerer Lufteintrag im ersten Segment (Versuche 2 und 4) führt bei stark verringerten Lufteinträgen in den Segmenten 2 und 3 zu einer Erhöhung des Abscheidegrades um 2 bis 4 % gegenüber dem Abscheidegrad bei gleichmäßigem Lufteintrag (Versuch 3). Auffällig bei den Versuchen sind die geringen Durchflusszeiten.

Patt (1990) hat Untersuchungen zum Abscheidegrad an zwei Sandfängen mit kreisförmigem Querschnitt (Sandfang 1: $D_1 = 1,6$ m, $L_1 = 22$ m; Sandfang 2: $D_2 = 0,635$ m, $L_2 = 8,8$ m) im Labor für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Er verwendete Versuchssand mit verschiedenen Körnungen. Als Ergebnis wertete er den Gesamtabscheidegrad an Sand aus. Er stellte eine starke Abhängigkeit des Abscheidegrades vom Partikeldurchmesser fest. Bei einer Versuchsreihe ohne Lufteintrag am Sandfang 1 betrug der erreichte Abscheidegrad von Versuchssand mit einer Kornverteilung von 0,06 bis 0,2 mm 84,4 %, mit einer Kornverteilung 0,1 bis 0,315 mm 88 % und mit einer Kornverteilung 0,1 bis 0,4 mm 99,8 %. Das bedeutet, dass bei Verwendung von feinem Sand der Abscheidegrad von 100 % auch ohne Lufteintrag nicht erreicht wird. Die Durchflusszeit bei dieser Versuchsreihe war 4,4 Minuten, die zugegebene Sandkonzentration 12 mg/l. Ferner stellte er eine Abhängigkeit zwischen Lufteintrag und Abscheidegrad fest. Bei steigendem Lufteintrag sank der erreichte Abscheidegrad ab. Er führte eine Versuchsreihe am Sandfang 1 mit den oben genannten Eingangsparametern und Lufteinträgen von 0,3 Nm³/(m³·h), 0,46 Nm³/(m³·h), 0,6 Nm³/(m³·h) und 0,8 Nm³/m³·h durch. Als Versuchssand verwendete er Sand mit einer Kornverteilung von 0,1 bis 0,5 mm. Der Verlauf des

Abscheidegrades fiel mit dem Lufteintrag linear von 82,5 % bei einem Lufteintrag von $0,3 \text{ Nm}^3/\text{m}^3\cdot\text{h}$ auf 67 % bei einem Lufteintrag von $0,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ab.

Patt (1990) hat den Einfluss der Einlaufgestaltung des belüfteten Sandfanges auf den Abscheidegrad untersucht. Er hat an einem physikalischen Sandfangmodell mit Kreisquerschnitt drei verschiedene Einlaufvarianten untersucht: einen Zulaufkanal mit Einleitung an der Wasseroberfläche, ein Rohr mit Einleitung in der Mitte des Kreisquerschnitts und ein Rohr mit Prallplatte das auch in Querschnittsmittte angeordnet war. Es wurde Versuchssand mit einer Körnung von 0,06 mm bis 0,2 mm, mit einer Dichte von 2.650 kg/m^3 , in einer Konzentration von 78,8 mg/l zugegeben. Der Lufteintrag wurde mit $0,92 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und der Durchfluss mit 16,5 l/s und einer Durchflusszeit von rund 5 min gewählt. Ohne Lufteintrag waren die Abscheidegrade für alle drei Varianten gleich hoch mit ca. 95 %. Bei einem Lufteintrag von $0,92 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ schnitt der Zulaufkanal an der Wasseroberfläche mit einem Abscheidegrad von 88 % am besten ab. Der zweitbeste Abscheidegrad von 84 % wurde mit dem mittig angeordneten Zulaufrohr mit Prallplatte erreicht, der geringste von 83 % mit dem mittigen Zulaufrohr ohne Prallplatte.

Theilen & Luthardt-Behle (2004) haben Untersuchungen an einem neu entwickelten belüfteten Walzensandfang mit Rundprofil durchgeführt. Die Untersuchungen wurden mit Brauch- bzw. Leitungswasser durchgeführt, dem Sand zugegeben wurde. Die Dauer der Sandzugabe entsprach einem mehrfachen der hydraulischen Durchflusszeit des Wassers im Sandfang. Die zugegebene Sandkonzentration betrug 300 bis 370 mg/l. Zusätzlich wurde ein „Spülstoß“ mit einer Sandkonzentration von 680 mg/l simuliert. Die hydraulische Durchflusszeit im Sandfang betrug zwischen 0,8 min und 1,03 min. Die Belüftungsintensität lag zwischen $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, also deutlich über dem empfohlenen Wert von der DWA (2008). Die Sieblinie des verwendeten Sandes ist in Abbildung 35 dargestellt. Der verwendete Prüfsand ist deutlich gröber, als der von anderen Autoren (Tabelle 8). Die Dichte wurde mit 1.167 kg/m^3 niedriger als der Wert von Quarzsand von 2.650 kg/m^3 gewählt. Es ergaben sich für die Untersuchungen Abscheidegrade für die Trennkorngröße 0,2 mm zwischen 92 % und 97 %.

Londong (1987) hat festgestellt, dass der beste Abscheidegrad für die Körnung kleiner 0,125 mm bei einer mittleren Sohlgeschwindigkeit von ca. 20 cm/s bis 22 cm/s erreicht wird. Für die Abscheidung größerer Körner (0,125 bis 0,25 mm) sei eine Sohlgeschwindigkeit um die 30 cm/s besser, allerdings bei geringem Turbulenzgrad. Für einen optimalen Abscheidegrad im belüfteten Sandfang empfiehlt er eine mittlere Geschwindigkeit von 20 bis 22 cm/s bei einem geringen Turbulenzgrad von 0,1 bis 0,2. Londong (1987) untersuchte den Einfluss der Belüftungsart auf die Sandabscheidung. Er stellte dafür im Sandfangmodell bei grobblasiger und feinblasiger Belüftung die gleiche Sohlströmung von 0,3 m/s ein und brauchte dafür bei der grobblasigen Belüftung einen deutlich höheren Lufteintrag. Der erreichbare Abscheidegrad der Korngrößen 0,125 bis 0,25 mm betrug bei beiden Untersuchungen 50 %. Der geringe Abscheidegrad ist auf die hohe Sohlströmung zurückzuführen. Daraus lässt sich folgern, dass bei einer

feinblasigen Belüftung der Lufteintrag deutlich effektiver umgesetzt wird und weniger Luft zur Erreichung des gleichen Abscheidegrades nötig ist.

Patt (1990) hat mittels eines Simulationsmodells theoretische Absetzwege berechnet. Er kam zu dem Ergebnis, dass bei Durchmessern ab 0,4 mm die Teilchen mit dem kleinsten Abstand zur Sohle die kürzesten Absetzwege haben. Für Partikel $\leq 0,3$ mm empfiehlt er eine Zugabe nahe der Wasseroberfläche. Dann verlängerten sich zwar die Absetzwege für größere Teilchen, diese würden sich aber wegen ihres Gewichts sowieso absetzen.

Kauffmann & Holthausen (2000) haben Simulationsstudien zum Abscheidegrad des belüfteten Sandfanges der Kläranlage Stuttgart-Hofen durchgeführt. Der Sandfang ist 55 m lang, 4,3 m breit und 5,5 m tief und hat ein Volumen von 1.313 m³. Die Querschnittsfläche von 16,27 m² ist größer als die Empfehlung der DWA (2008). Die Querschnittsform ist rechteckig mit mittiger Sandfanggutrinne. Der Durchfluss bei Trockenwetter beträgt 6.500 m³/h und bei Regenwetter 13.725 m³/h. Daraus ergeben sich Durchflusszeiten von 12 min bei Trockenwetter und 6 min bei Regenwetter. Für die Simulationsstudie wurden vier Lastfälle gewählt. Beim ersten Lastfall betrug der Lufteintrag 1,3 Nm³/(m³·h), beim zweiten nur 0,13 Nm³/(m³·h). Beim dritten Lastfall wurde der Sandfang in vier Teilabschnitte mit unterschiedlichem Lufteintrag eingeteilt, wobei der erste Abschnitt unbelüftet blieb und die anderen drei mit 54 %, 18 % und 28 % des Gesamtlufteintrages beaufschlagt wurden. Beim letzten Lastfall wurde die Belüftung in Richtung Mitte des Sandfanges an den Rand der Sandfanggutrinne verschoben.

Der erste Lastfall ergab eine theoretische Anzahl von 30 Walzenumdrehungen auf der Sandfanglänge und einen Abscheidegrad der Korngröße 0,3 mm von 61 %. Eine Verringerung des Lufteintrages auf 10 % des vorhergehenden Werts ergab nur noch 13 Walzenumdrehungen und der Abscheidegrad der Korngröße 0,3 mm konnte auf 80 % gesteigert werden. Der dritte Lastfall mit bereichsweiser Belüftung brachte für die Korngröße 0,3 mm ein ähnliches Ergebnis wie der zweite, der Rückhalt der Korngröße 0,2 mm konnte um ca. 5 % verbessert werden. Der beste Abscheidegrad von 90 % bei der Korngröße 0,3 mm wurde mit der in der Mitte liegenden Belüftung erreicht.

Großtechnische Messungen von Stein (1992) an 12 bayerischen Kläranlagen ergaben einen mittleren erreichbaren Abscheidegrad von 85 % für Korngrößen $\geq 0,2$ mm.

Londong (1987) hat Abscheidegrade von 15 großtechnischen, belüfteten Sandfängen über Untersuchungen des Sandfangguts und Schlamm im Vorklärbecken und zusätzliche Messungen der Fließgeschwindigkeiten an der Sohle beurteilt. Hierfür wurden die Parameter Glühverlust und Korngrößenverteilung von Proben aus dem Sandfanggut an verschiedenen Stellen des Fließwegs und von Schlamm im Vorklärbecken analysiert. Allerdings ließen sich mit diesem Prüfverfahren nur qualitative Aussagen treffen. Zwei der untersuchten Anlagen

wiesen sehr gute Sandabscheidung auf, mit hohem organischen Anteil und hohem Feinkornanteil im Sandfanggut. Die Durchflusszeit bei beiden Anlagen betrug über 60 Minuten. Bei drei Anlagen wurde „gute“ Sandabscheidung diagnostiziert, vier Anlagen wiesen „nicht ganz ausreichende“ Abscheideleistungen auf, zwei „schlechte“ Abscheideleistungen. Bei den verbleibenden konnte keine zuverlässige Aussage getroffen werden.

4 Zielsetzung und Vorgehensweise

4.1 Ziele

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen hatten das Ziel, die Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von belüfteten Sandfängen auf Kläranlagen zu untersuchen. Hierfür wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Abscheidegrad identifiziert. Aus den Ergebnissen sollten zum einen Vorschläge für einen Prüfsand und für Prüfverfahren von Kompaktanlagen, sowie großtechnischen Anlagen gewonnen werden. Zum anderen ergaben sich daraus betriebliche und konstruktive Empfehlungen zur Optimierung des Abscheidegrades von Sandfängen.

4.2 Offene Fragen

Prüfverfahren zum Abscheidegrad

Nach DIN 19569-2 (2002) und DIN EN 12255-3 (2001) wird ein Abscheidegrad von Sandfängen vorgeschrieben, es gibt aber kein standardisiertes Verfahren zur Messung des Abscheidegrades. Besonders im Hinblick auf die immer wieder diskutierte Verkürzung der Durchflusszeit ist es wichtig, die Leistungsfähigkeit von Sandfängen bewerten zu können. Durch eine Verkürzung der Durchflusszeit ließen sich das Beckenvolumen und somit auch die Investitionskosten reduzieren. Es fehlt hier noch eine Methodik zur Bestimmung des Abscheidegrades von bestehenden Sandfanganlagen, um zu prüfen, ob der Abscheidegrad in der Praxis eingehalten wird. Dabei muss auch geklärt werden, ob der Abscheidegrad eine sinnvolle Bemessungsgröße darstellt, da er nur angibt, wie viel Prozent vom Sand im Sandfang entfernt wird, aber nicht welche tatsächliche Konzentration noch im Ablauf des Sandfanges bleibt. In DWA (2008) wurde bereits die Frage gestellt, ob es nicht sinnvoller wäre, eine Ablaufkonzentration an Sand einer bestimmten Kornfraktion, z. B. der Korngrößen $\geq 0,2$ mm, vorzugeben.

Maßgebliche Einflussfaktoren auf den Abscheidegrad

In der Literatur gibt es einige Messungen zum Abscheidegrad von Versuchsanlagen (Londong, 1987; Schrimpf, 1987; Patt, 1990; Theilen & Luthardt-Behle, 2004) und zum Abscheidegrad von großtechnischen Anlagen (Stein, 1992; Londong, 1987). Diese sind nicht miteinander vergleichbar, weil sie unter den verschiedensten Versuchsbedingungen und mit unterschiedlichen Prüfsanden durchgeführt wurden. Hier muss geklärt werden, wie die einzelnen Versuchsparameter Lufteintrag, Einblastiefe und Durchfluss und die unterschiedliche Korngrößenverteilung des verwendeten Sandes und dessen Konzentration den Abscheidegrad beeinflussen. Dabei ist es wichtig, herauszufinden, welche Parameter den Abscheidegrad maßgeblich beeinflussen und ob sich daraus Kenngrößen ableiten lassen. Vorliegende Literaturergebnisse müssen im Hinblick darauf bewertet werden.

Bisher gibt es nur wenige Angaben über die Sandkonzentration und die Korngrößenverteilung im Zulauf von belüfteten Sandfängen. Um einen Sandfang zu prüfen ist es aber wichtig, die Belastungszustände zu kennen, um den kritischen Belastungszustand, den „worst case“, zu identifizieren. Deshalb müsste mit der Methode zur Bestimmung des Abscheidegrades auch der Sandgehalt und die Korngrößenverteilung im Zulauf und im Ablauf von belüfteten Sandfängen bestimmt werden. In der Literatur fehlen auch Angaben über eine repräsentative Sandkonzentration und Kornverteilung eines Prüfsandes und standardisierte Versuchsbedingungen, um den Abscheidegrad von bestehenden Sandfängen vergleichbar nachweisen zu können.

Die Turbulenz beeinflusst den Abscheidegrad maßgeblich. In Dobbins (1944), Camp (1944) und Schrimpf (1987) finden sich Abhandlungen über den Einfluss der Turbulenz auf die Sedimentation, allerdings ohne Lufteintrag. Bisher wurden an großtechnischen, belüfteten Sandfängen oder an Modellsandfängen Fließgeschwindigkeiten gemessen und Abhängigkeiten zum Abscheidegrad hergestellt, jedoch fehlen Angaben zur Turbulenz. Nur von Londong (1988) gibt es Untersuchungen zur Abhängigkeit des Abscheidegrades vom Turbulenzgrad. Der Turbulenzgrad der Sohlgeschwindigkeit wurde dabei aber an nur einem Messpunkt, an der Sandfangsohle, ausgewertet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messungen mit Messflügeln durchgeführt wurden. Heute stehen für Messungen ADV Sonden zur Verfügung, bei denen die turbulenten Schwankungen aller drei Geschwindigkeiten aus den Messwerten berechnet werden können. Ortmanns (2006) hat die turbulente kinetische Energie an Entsandern von Wasserkraftanlagen untersucht und damit den Einfluss des Zulaufbereichs bewertet. In belüfteten Sandfängen trägt der Lufteintrag maßgeblich zur Turbulenz bei. Vorteil des Parameters der turbulenten kinetischen Energie ist, dass darin die turbulenten Schwankungen der Geschwindigkeiten aller drei Richtungen enthalten sind. Somit werden sowohl Einflüsse des Durchflusses, als auch des Lufteintrages und der Einblastiefe erfasst. Derzeit fehlt noch eine Untersuchung der Abhängigkeit des Abscheidegrades von der turbulenten kinetischen Energie. Hierfür ist eine möglichst detaillierte Aufnahme des Geschwindigkeitsfeldes notwendig. Bei den Geschwindigkeitsmessungen in der Literatur wurde meist nur ein Querprofil in Sandfangmitte untersucht und die Geschwindigkeitsverteilung über die Sandfangbreite vernachlässigt. Eine detaillierte Messung hat den Vorteil, dass untersucht werden kann, wie sich die Walzenströmung möglichst energieoptimiert ausbilden kann. Als Vergleichsparameter kann hierfür die maximale Randgeschwindigkeit der Wasserwalze herangezogen werden.

Um die Absetzlängen theoretisch abschätzen zu können, haben einige Autoren die Geschwindigkeitsverteilung im physikalischen Sandfang berechnet. Patt (1990) hat schon ein vereinfachtes mathematisches Modell für die Beschreibung der Walzenströmung an einem kreisförmigen Fließquerschnitt ermittelt. Bei Stein (1992) findet sich zwar ein detaillierteres mathematisches Modell, das aber viele Hilfsparameter beinhaltet und bei dem die Kontinuitätsbedingung nicht eingehalten wurde. Im Ansatz von Kobus (1973) für die maximale Oberflächengeschwindigkeit

v_{\max} , der auch von Patt (1990) und Stein (1992) angewendet wurde, wurde die Einblastiefe, nicht aber das Breite/Tiefe-Verhältnis berücksichtigt. Die Überlegungen von Sawicki (2004) deuten darauf hin, dass das Breite/Tiefe-Verhältnis einen großen Einfluss auf die Ausbildung der Walzenströmung hat. Auch Schrimpf (1987) und Londong (1987) haben eine Abhängigkeit der Sohlgeschwindigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis festgestellt. Diese Einflüsse müssen noch in einem mathematischen Modell zusammengefasst werden, um die Partikelbahnen zu berechnen.

Betriebliche und konstruktive Aspekte

In der Literatur gibt es einige Angaben zur Empfehlung einer bereichsweisen Belüftung, z. B. von Schrimpf (1987) und Boes (1990), die einen unbelüfteten hinteren Teil des Sandfanges empfehlen. Jedoch fehlt es noch an einer Bewertung, ob dies sinnvoll ist, oder ob eine gesteuerte Sandfangbelüftung, im Hinblick auf ein energieoptimiertes Konzept, aber auch verbesserte Abscheidegrade, besser ist.

Die meisten Untersuchungen in der Literatur wurden nur an Segmenten von Sandfängen durchgeführt. So war der Modellsandfang von Kalbskopf (1966) nur 0,2 m lang. Die Länge beeinflusst den Absetzvorgang aber maßgeblich. Vorteil eines Modellsandfanges im verkleinerten Maßstab ist die Möglichkeit, auch den Einfluss der Sandfanglänge auf den Abscheidegrad zu berücksichtigen.

In der Literatur finden sich Messergebnisse an einem kreisförmigen Querschnitt ohne Rinne (Patt, 1990), der strömungstechnisch als sehr günstig bewertet wird und Messergebnisse an Querschnitten mit Sandfanggutrinne. Daraus ergibt sich die Frage, welchen Einfluss die Sandfanggutrinne auf das Geschwindigkeitsfeld und auf den Abscheidegrad hat.

4.3 Aufgaben

Zur Konkretisierung und Klärung der oben genannten offenen Fragen umfasste diese Arbeit die folgenden Aufgabenstellungen:

- Identifizierung geeigneter großtechnischer Sandfänge für die Untersuchungen.
- Überprüfung der Einhaltung der Bemessungsvorgaben.
- Abbildung eines Sandfanges als physikalisches Sandfangmodell.
- Kalibrierung des physikalischen Sandfangmodells hinsichtlich der Ähnlichkeit des Lufteintrags.
- Übertragung eines Versuchssandes in den verkleinerten Maßstab.
- Detaillierte Aufnahme des Geschwindigkeitsfeldes im physikalischen Sandfangmodell.
- Auswertung der turbulenten kinetischen Energie im gesamten Querschnitt.
- Übertragung der Ergebnisse in ein numerisches Modell.

- Theoretische Berechnung der Partikelbahnen und Vergleich mit den Messergebnissen.
- Isolierte Untersuchung der Wirkungsweisen der Parameter Lufteintrag, Durchfluss, Einblastiefe, Anordnung der Belüfter, Querschnittsgestaltung, Korngrößenverteilung und Sandkonzentration am physikalischen Sandfangmodell.
- Identifizierung und Bewertung der maßgeblichen Parameter für den Abscheidegrad.
- Identifizierung eines „worst case“-Bemessungslastfalls.
- Vorschlag eines geeigneten Prüfverfahrens zur Messung des Abscheidegrades.
- Vorschlag einer Korngrößenverteilung für Prüfsand.
- Vorgaben von Empfehlungen für Bemessung und Betrieb von belüfteten Sandfängen.

4.4 Vorgehensweise

Zur Klärung der offenen Fragen wurde zunächst der Abscheidegrad von großtechnischen, belüfteten Sandfängen mittels Massenbilanzen ermittelt. Zur isolierten Untersuchung der maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Abscheidegrad wurde im Anschluss an die großtechnischen Messungen ein physikalisches Sandfangmodell mit Trapezquerschnitt im Maßstab 1:4 aufgebaut. Dadurch konnte der Einfluss der Parameter Sandkonzentration, Korngrößenverteilung, Lufteintrag, Einblastiefe, Anordnung der Belüfter, Durchfluss und Querschnittsgestaltung auf das Geschwindigkeitsfeld, die turbulente kinetische Energie und den Abscheidegrad detailliert untersucht werden. Daraufhin wurden die Ergebnisse der Messungen am physikalischen Sandfangmodell in ein mathematisches Modell übertragen und damit die Partikelbahnen simuliert. Schließlich wurden die Ergebnisse der Messungen und Simulationen genutzt, um betriebliche und konstruktive Empfehlungen für die Optimierung des Abscheidegrades von Sandfängen zu geben, sowie einen Prüfsand und Prüfverfahren von großtechnischen Sandfängen und Kompaktanlagen vorzuschlagen.

5 Versuchsbeschreibung

5.1 Beschreibung der ausgewählten belüfteten Sandfänge

Für die Durchführung von Geschwindigkeitsmessungen und Messungen zum Abscheidegrad wurden einige belüftete Sandfänge im Raum München ausgewählt. Geschwindigkeitsmessungen wurden an den Kläranlagen München I und Karlsfeld durchgeführt. Der Abscheidegrad wurde an den Kläranlagen Karlsfeld, Dachau, Geiselbullach und Holzkirchen über Probenahme im Zu- und Ablauf des Sandfanges und an der Kläranlage München I wegen des großen Abwasservolumenstroms über Beurteilung des Sandfangguts und des Schlammes im Vorklärbecken ermittelt. Im Folgenden werden die für die Untersuchungen ausgewählten belüfteten Sandfänge näher beschrieben.

Die Kläranlage München I wurde wegen Betriebsproblemen im Bereich des Sandfanges für die Untersuchungen ausgewählt. Ein sehr hoher Gehalt an organischer Substanz im Sandfanggut führte zum Verstopfen von Rohrleitungen. Die Kläranlage hat eine Ausbaugröße von 2.000.000 Einwohnern. Die Entwässerung des Einzugsgebiets erfolgt größtenteils im Mischverfahren. Die Anlage verfügt über vier Doppelsandfänge bestehend aus je zwei Sandabscheideräumen und zwei Leichtstoffabscheideräumen. Der Bemessungsdurchfluss beträgt $4,94 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Trockenwetter, sowie $7,17 \text{ m}^3/\text{s}$ bei Regenwetter. Die Gebläse für den Lufteintrag sind in zwei Stufen regelbar. Im Regelfall beträgt der spezifische Lufteintrag je Sandfang ca. $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Im Störfall, z. B. bei Ausfall eines Gebläses, kann der Lufteintrag auch auf $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erhöht werden. In Abbildung 37 ist einer der acht Sandabscheideräumen des Klärwerks München I dargestellt. Auffällig ist das Fehlen einer Sandfanggutrinne am Boden des Sandfanges. Der Anfall an Sandfanggut im Jahr 2007 betrug 1.135 t.



Abbildung 37: Einer von acht Sandabscheideräumen der Kläranlage München I.

In Abbildung 38 ist eine Draufsicht auf einen Sandabscheideraum und einen Fettabscheideraum eines Sandfanges der Kläranlage München I dargestellt. Zusätzlich sind die vier ausgewählten Messprofile, sowie das Koordinatensystem, das zur Beschreibung der Geschwindigkeitskomponenten benutzt wurde, eingezeichnet. Die Messprofile 0 und 1 befanden sich im unbelüfteten Zulaufbereich des Sandfanges, die Messprofile 2 und 3 waren im belüfteten Bereich. Das Messprofil 0 war im Zulaufbereich des Sandfanges 2,3 m vom Zulauf entfernt angeordnet, das Messprofil 1 kurz vor dem ersten Belüfterrohr im Abstand von 3,6 m vom Zulauf, Messprofil 2 im vorderen Bereich der Belüftung im Abstand von 7,5 m vom Zulauf und das Messprofil 3 etwa der Mitte des Sandfanges. Die ersten Messungen wurden nur an den Messprofilen 1, 2 und 3 durchgeführt. Um eine bessere Aussage über die Strömung im Zulaufbereich machen zu können, wurde später noch das Messprofil 0 ergänzt.

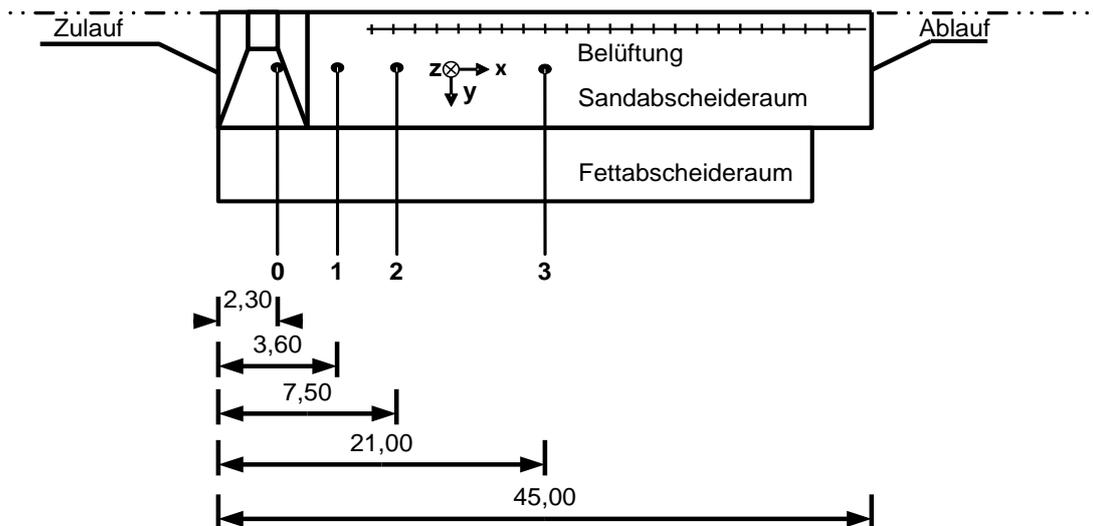


Abbildung 38: Draufsicht auf einen Sandabscheideraum mit Fettabscheideraum der Kläranlage München I mit Messprofilen und Koordinatensystem (nach Günthert et al., 2004).

In Abbildung 39 ist der Querschnitt des Sandabscheideraumes und des Fettabscheideraumes mit der Messachse in der Mitte des Sandabscheideraumes dargestellt.

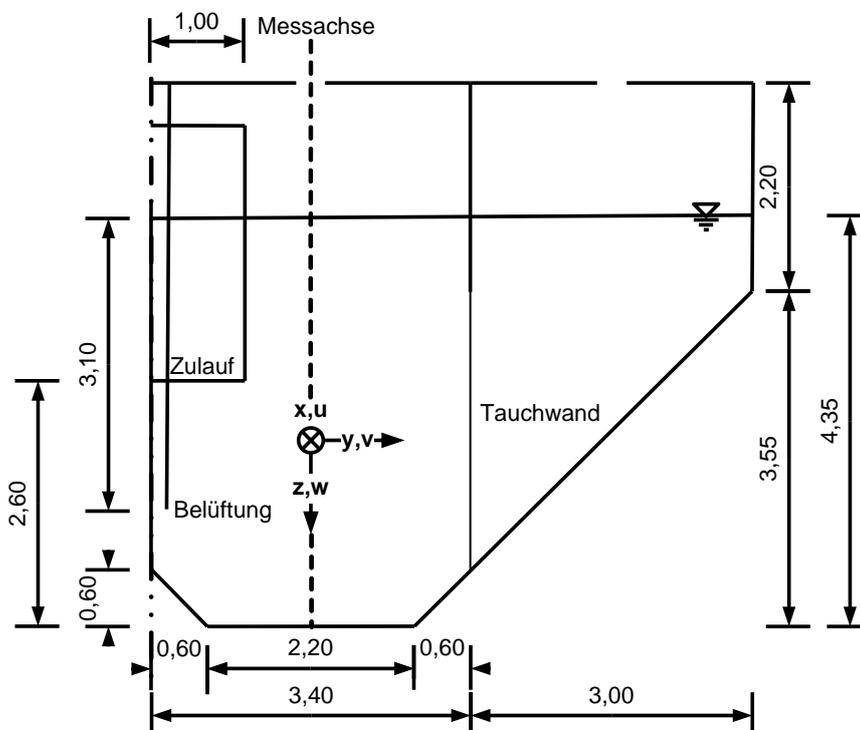


Abbildung 39: Querschnitt eines Sandfanges der Kläranlage München I mit Messachse und Koordinatensystem.

In Abbildung 40 ist der belüftete Sandfang der Kläranlage Dachau dargestellt. Die Kläranlage der Stadt Dachau ist für 95.000 Einwohner ausgelegt. Die Entwässerung des Einzugsgebietes erfolgt im Trennverfahren. Im Zulauf der Anlage befinden sich 2 Rechen mit Spaltweiten von 40 mm. Der belüftete Sandfang ist auf ein Q_m von $3.564 \text{ m}^3/\text{h}$ bemessen. Der Maximalzufluss bei Trockenwetter beträgt $Q_{tx} = 2.800 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Bemessungswert für Q_d ist $43.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Die tatsächlichen Belastungswerte sind deutlich niedriger ($Q_d = 23.000 \text{ m}^3/\text{d}$, $Q_m = 2.200 \text{ m}^3/\text{h}$), wodurch sich hohe Durchflusszeiten im Sandfang ergeben.



Abbildung 40: Belüfteter Sandfang der Kläranlage Dachau.

Die Kläranlage Holzkirchen liegt im Süden von München und ist für 50.000 Einwohner ausgelegt. Das Einzugsgebiet wird zu 90 % im Trennverfahren entwässert. Der Höhenunterschied im Einzugsgebiet beträgt maximal 100 Höhenmeter. Der maximale Trockenwetterzulauf beträgt $3.000 \text{ m}^3/\text{d}$ bis maximal $3.200 \text{ m}^3/\text{d}$, der maximale Mischwasserzulauf $6.000 \text{ m}^3/\text{d}$. Das Abwasser wird mit maximal 4 Schneckenpumpen gehoben. Im Zulauf ist eine Feinrechenanlage mit 6 mm Stababstand und Rechengutwäsche angeordnet. Der belüftete Sand- und Fettfang hat ein Volumen von 220 m^3 bei einer Länge von 20 m. Die Tiefe der Sandfanggutrinne beträgt 0,6 m. Im Jahr 2008 betrug der Sandanfall 15 t.

Die Ausbaugröße der Kläranlage Karlsfeld beträgt 45.000 Einwohnerwerte. Das Einzugsgebiet ist eben und liegt am Rand der Münchner Schotterebene. Der maximale Höhenunterschied beträgt 5 bis 6 m. Die Entwässerung erfolgt im Trennverfahren, das Kanalnetz hat eine Länge von 70 km. Der Trockenwetterzufluss beträgt $6.000 \text{ m}^3/\text{d}$, der maximale Zufluss bei Regenwetter

8.200 m³/d. Die Kläranlage hat einen belüfteten Sandfang mit einer Querschnittsfläche von 4,8 m² und einem Volumen von 95 m³ (Abbildung 41). Vor dem Sandfang sind ein Feinrechen mit 6 mm Stababstand und ein Siebrechen mit 6 mm Stababstand angeordnet. Der Sandfanfall an gewaschenem Sand beträgt 3,5 t/a.



Abbildung 41: Belüfteter Sandfang der Kläranlage Karlsfeld.

Aufgrund seiner kleinen Abmessungen erschien der Sandfang der Kläranlage Karlsfeld sehr geeignet für eine Abbildung im physikalischen Modell. Daher wurden dort auch Geschwindigkeitsprofile gemessen, um das physikalische Modell später kalibrieren zu können. Die Messungen wurden an je einem Vertikalprofil an sieben Messprofilen über die Sandfanglänge durchgeführt. Die Messprofile sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt.

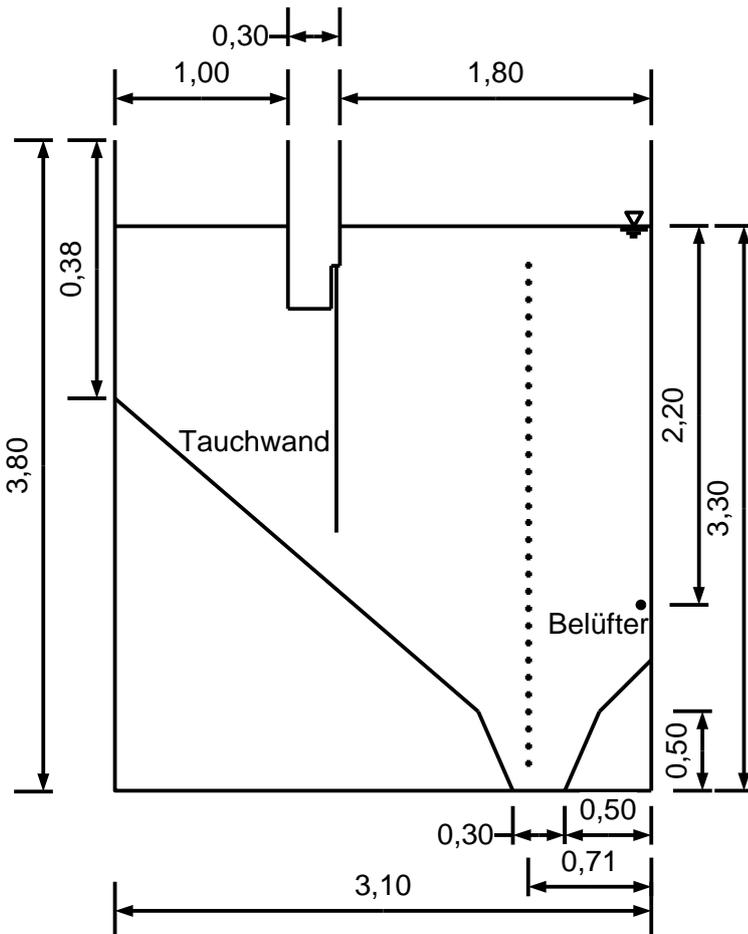


Abbildung 42: Querschnitt des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit Messprofil.

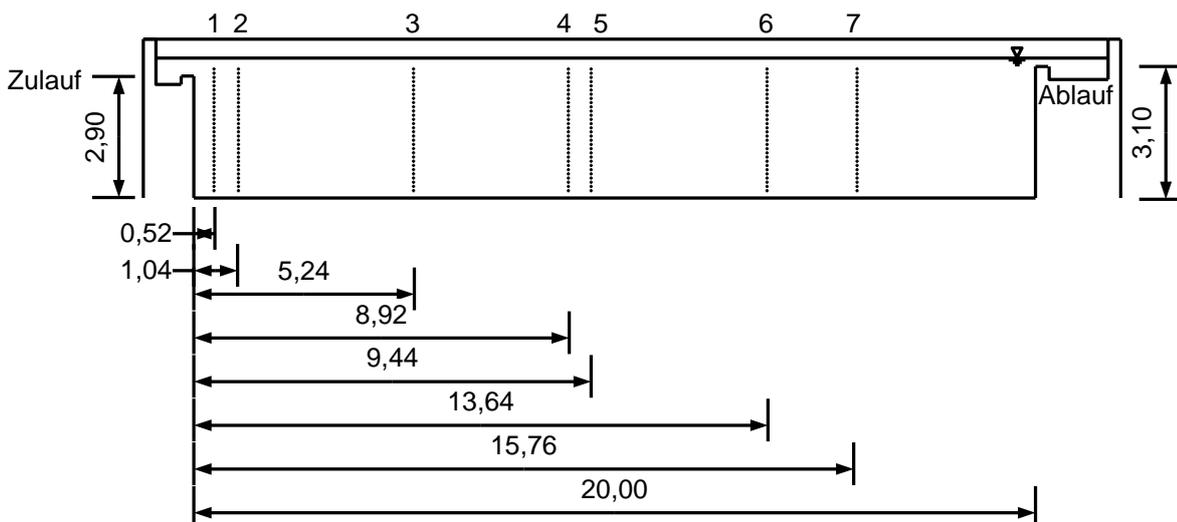


Abbildung 43: Längsschnitt des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit 7 Messprofilen.

Die Kläranlage Neufinsing des gemeinsamen Kommunalunternehmens (gKu) VE München-Ost ist für 135.000 Einwohner ausgelegt. Der tägliche Abwasservolumenstrom beträgt bei Trockenwetter 16.000 m³/d, bei Regenwetter bis zu 24.000 m³/d. Die Entwässerung des Einzugsgebiets erfolgt im Trennverfahren. Im Zulauf sind 2 Feinstrechen mit einem Stababstand von 6 mm angeordnet. Danach ist ein belüfteter Sandfang mit einem Volumen von 295 m³ und einer Fettfangkammer angeordnet (Abbildung 44). Das Sandfanggut wird in einem Container gesammelt und nicht weiter aufbereitet. Im Jahr 2008 betrug der Sandanfall 175 t.

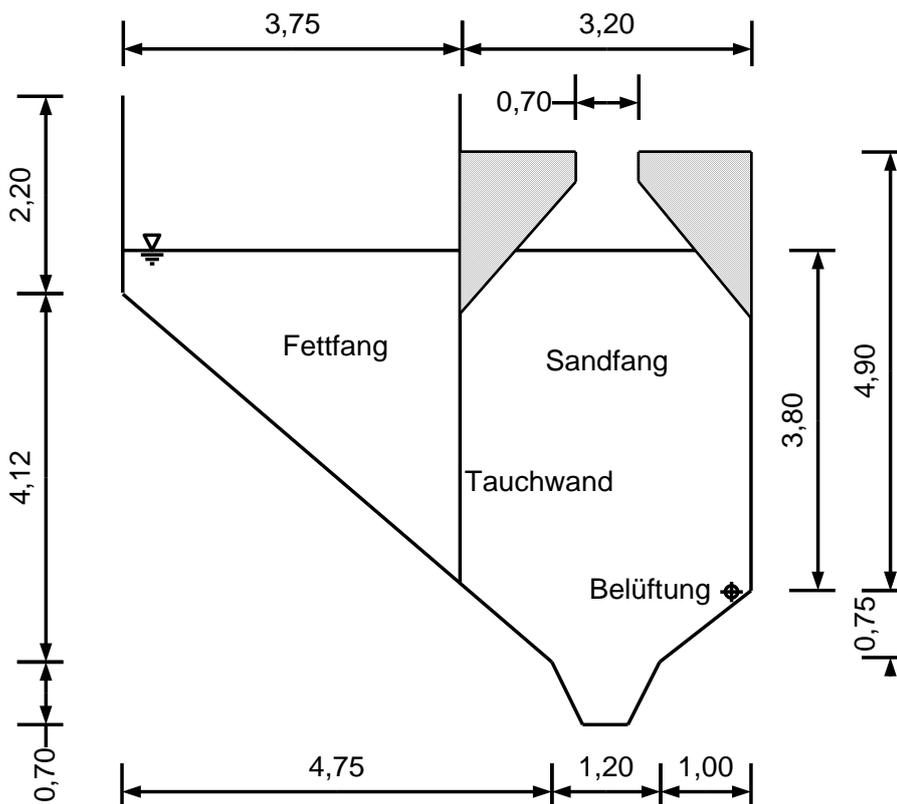


Abbildung 44: Querschnitt des Sandfanges Kläranlage Neufinsing.

Die Kläranlage Geiselbullach des Amperverbands ist für das Schmutzwasser von 250.000 Einwohnern bemessen. Das Entwässerungssystem ist Trennverfahren. Das Regenwasser wird örtlich versickert. Der maximale Trockenwetterzulauf Q_{Td} beträgt 35.000 m³/d (Bemessungswert 57.000 m³/d), der maximale Zulauf bei Regenwetter max. Q_{TW} 5.400 m³/h. In Zulaufbereich sind ein Grobrechen mit einer Spaltweite von 40 mm und vier Feinrechen mit Spaltweiten von 6 mm angeordnet. Der Sandfang besteht aus zwei Straßen mit je einem belüfteten Sandfang und einer Fettfangkammer. Der Querschnitt ist in Abbildung 45 dargestellt. Der Lufteintrag in den belüfteten Sandfang beträgt 1,1 Nm³/(m³·h) bei einer Einblastiefe von ca. 2,8 m.

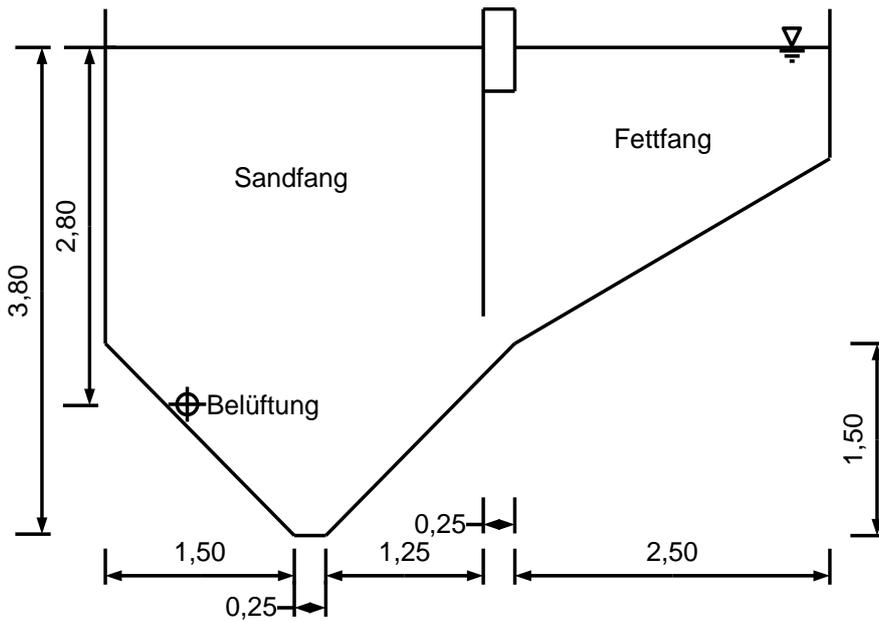


Abbildung 45: Querschnitt eines Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach.

In Tabelle 10 sind die belüfteten Sandfänge gegenübergestellt. Es fällt auf, dass die Sandfänge der Kläranlagen Karlsfeld und Neufinsing ein kleineres Breite/Tiefe-Verhältnis haben, als von der DWA (2008) empfohlen. Bei zwei der sechs Sandfänge konnten keine Angaben zum Lufteintrag erhoben werden. Die Lufteinträge der Kläranlagen Dachau und Karlsfeld liegen über dem empfohlenen Maximalwert der DWA (2008) von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Tabelle 10: Tabellarische Gegenüberstellung der belüfteten Sandfänge.

Parameter	Einheit	München I	Dachau	Holzkirchen	Karlsfeld	Neufinsing	Geiselbullach
E		2.000.000	95.000	50.000	45.000	135.000	250.000
Q_d	m^3/d	-	23.000	3.000	6000	16.000	35.000
Q_m	m^3/h	-	2.200	1.080	850	-	5.400
b_{SF}	m	3,4	3,20	2,8	1,8	3,2	3,0
h_{SF}	m	4,2	3,8	3,5	2,8	4,5	3,1
$b_{\text{SF}}/h_{\text{SF}}$	-	0,81	0,84	0,8	0,64	0,71	0,97
L	m	45	55	20	20	24	30,35
h_{bel}	m	3,1	3,1	2,5	2,2	3,8	2,8
A	m^2	14	11,5	9,4	4,8	12,3	8,7
n	-	8	1	1	1	1	2
V	M^3	630	632	188	95	295	265
Lufteintrag	$\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$	0,5	1,4	-	1,9	-	1,1

5.2 Beschreibung des physikalischen Sandfangmodells

Als Vorlage für das physikalische Sandfangmodell diente der belüftete Sandfang der Kläranlage Karlsfeld bei München (45.000 E), da dieser den von der DWA (2008) empfohlenen Querschnitt besitzt, der auch bei den meisten ausgeführten Sandfängen in Deutschland Anwendung findet. Als zusätzliches Entscheidungskriterium dienten die kleinen Abmessungen dieses Sandfangs, die eine Abbildung im Maßstab 1:4 ermöglichten. Das physikalische Modell wurde in eine Versuchsrinne im Labor für Hydromechanik und Wasserbau eingebaut und hat die in Abbildung 46 gezeigten Querschnittsabmessungen und eine Länge von 5 m. Der Längsschnitt ist in Abbildung 47 dargestellt.

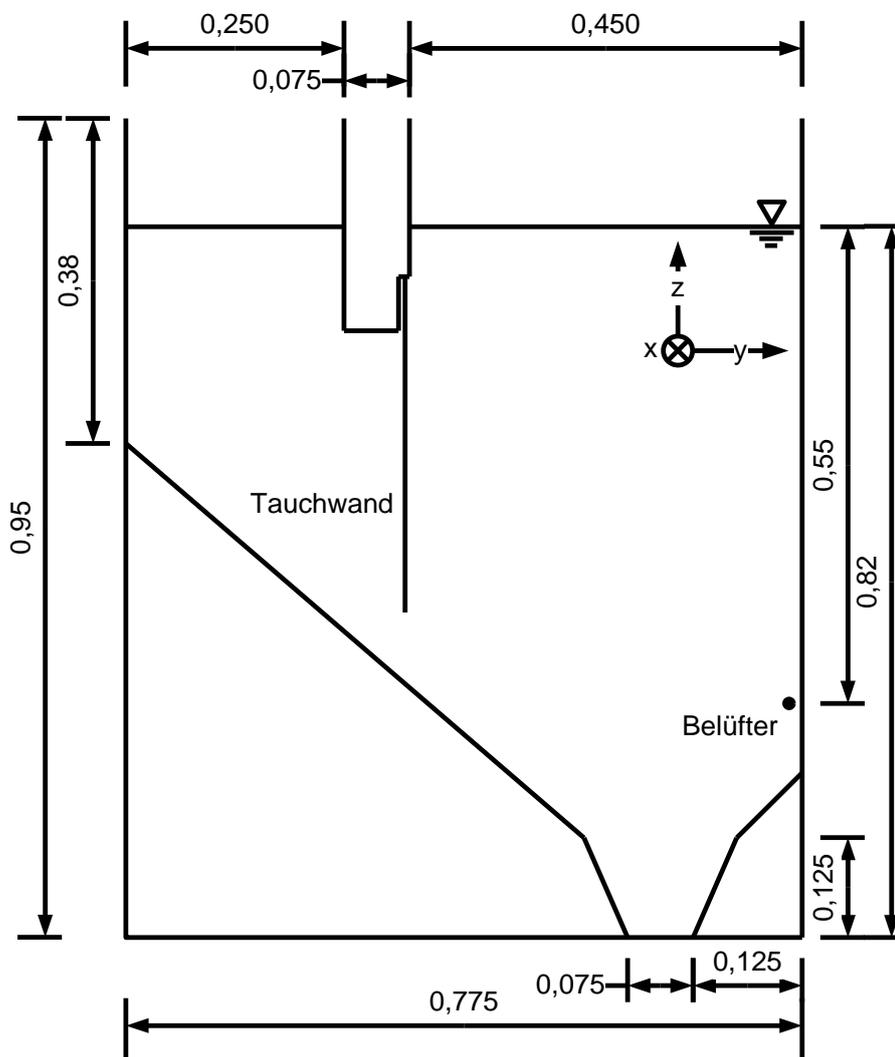


Abbildung 46: Querschnitt des physikalischen Sandfangmodells (Maßstab 1:4).

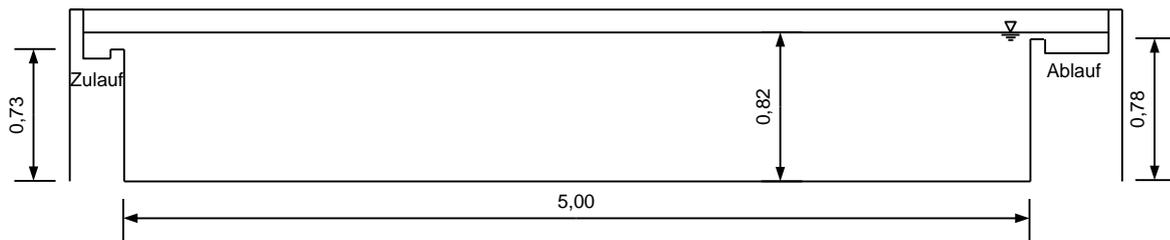


Abbildung 47: Längsschnitt des physikalischen Sandfangmodells (Maßstab 1:4).

Längs wurden 10 Belüfterrohre mit je 20 Düsen für den Luftaustritt angebracht. Abbildung 48 zeigt drei der t-förmigen Belüfterrohre und im Hintergrund die Tauchwand zum Fettfang.

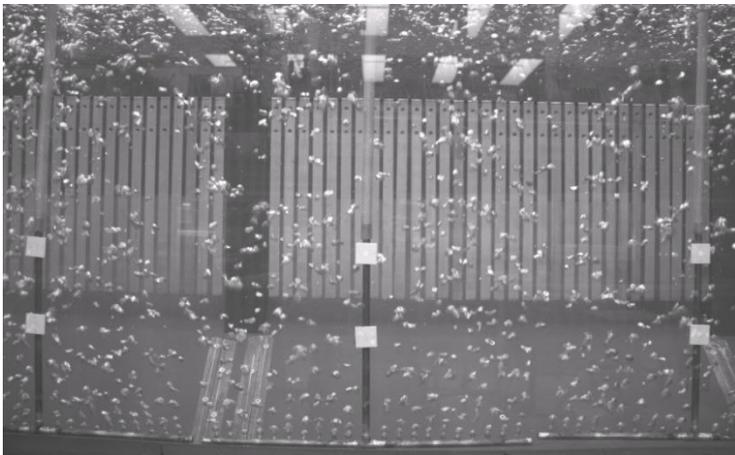


Abbildung 48: Belüfterrohr im physikalischen Sandfangmodell (Schwarz, 2008).

Die Belüfterrohre konnten in der Höhe variiert werden. In der Grundeinstellung, die der Position im Originalsandfang entspricht, betrug die Einblastiefe h_{bel} 0,55 m. Aus dieser Einstellung konnte die Einblastiefe bis 0,62 m erhöht und beliebig verringert werden. Der Lufteintrag wurde durch eine zentrale Druckluftversorgung gewährleistet. Der benötigte Luftüberdruck (ca. 1 bar) und Lufteintrag wurde mit zwei Druckregelventilen eingestellt. Durch das erste der beiden Druckregelventile wurde Druck größer als 2 bar abgebaut, mit dem zweiten konnte eine Feineinstellung vorgenommen werden, so dass der Luftvolumenstrom sehr genau einstellbar war. Die Größe der austretenden Luftblasen konnte durch die Austrittsgeschwindigkeit verändert werden, die bei konstantem Durchsatz durch Abkleben einiger Düsen erhöht wurde. Auf dem physikalischen Sandfangmodell war ein Messwagen angebracht, der über die ganze Länge auf und abgefahren werden konnte.

Die Steuerung des Messwagens erfolgte über die Angabe von Koordinaten. Vor den Messungen musste eine Koordinatendatei angefertigt werden, die ausgehend vom Nullpunkt des Wagens, alle Messpunkte der Reihe nach mit ihren jeweiligen x , y

und z Koordinaten und der Reihenfolge, in der diese angefahren werden sollen, enthielt. Zusätzlich enthielt die Koordinatendatei noch die Information, ob an diesen Punkten nur die Fließgeschwindigkeiten, oder auch die Wassertemperatur, der Durchfluss und der Wasserstand aufgezeichnet werden sollen. Da die letzteren Parameter bei einem Versuchslauf meistens konstant eingestellt wurden, reichte es aus, sie nur einmal pro Messprofil als Kontrolle mit aufzuzeichnen. Für die Sandzugabe war über dem Zulauf eine Dosierschnecke angebracht, mit der der Sand über eine Blechrinne dem physikalischen Modell zugeführt wurde (Abbildung 49).



Abbildung 49: Sandzugabe ins physikalische Sandfangmodell mit Dosierschnecke (Schwarz, 2008).

Die benötigte Sandkonzentration im Modell war zu klein für eine kontinuierliche Sandzufuhr mit der vorhandenen Schnecke, deshalb wurde der Sand diskontinuierlich zugegeben. Dies wurde über eine Zeitschaltuhr erreicht, mit der die Dauer der Sandzugabe und die Dauer der nachfolgenden Stillstandszeit vorgegeben werden musste. Um die gewählte Sandkonzentration zu erreichen wurde zweimal pro Minute für je 1 Sekunde Sand zugegeben.

5.3 Messverfahren

5.3.1 Messung der Fließgeschwindigkeiten

Für die Messung der Fließgeschwindigkeiten wurden in der vorliegenden Arbeit ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) Sonden eingesetzt. Das Messverfahren ist ein akustisches Verfahren nach dem Doppler Effekt. Ein akustisches Signal wird von einem Sender ausgestrahlt, an einem Partikel in der Flüssigkeit reflektiert und von bis zu vier Empfängern wieder aufgenommen. Über die Frequenzänderung des Schallimpulses wird die Geschwindigkeit bestimmt (Martin & Pohl, 2000).

In Abbildung 50 ist der Messkopf einer ADV Sonde und das Messprinzip dargestellt. Das Messvolumen befindet sich 0,05 m vor der Sonde. Der Sender sendet ein Signal, das von vier Empfängern aufgenommen wird. Der vierte

Empfänger ist zur redundanten Bestimmung einer der drei Geschwindigkeiten bestimmt. Vorteile der ADV Messung sind, dass auch in trübem Wasser, wie z. B. Abwasser, Messungen möglich sind, die Sonde sehr schmale Abmessungen hat und zusätzlich zu den Fließgeschwindigkeiten auch die Turbulenzen in drei Richtungen ausgewertet werden können. Wegen dieser Vorteile wurde die ADV Sonde für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Nachteilig ist, dass die Sonde an einzelnen Punkten misst, sie also zu jedem Punkt gezielt hinbewegt werden muss.

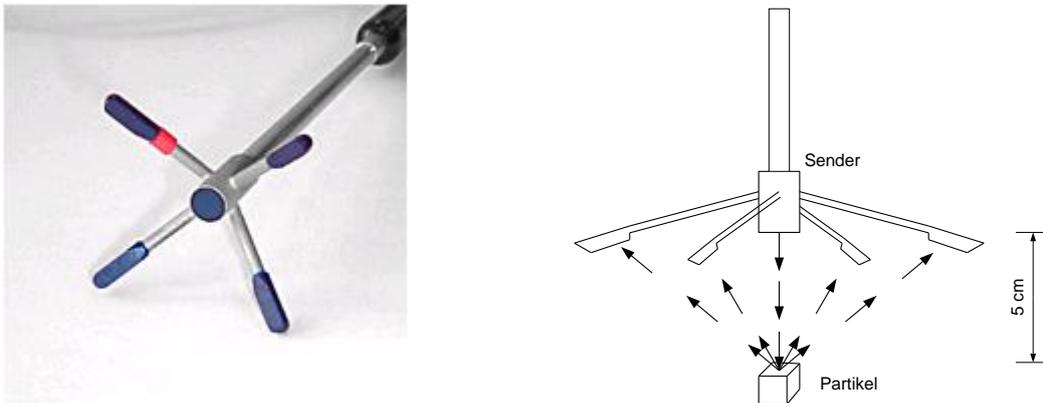


Abbildung 50: Messkopf und Messprinzip einer ADV-Sonde (<http://nortekusa.com/hardware/Vectrino.html>, Stand Mai 2009).

Die Fließgeschwindigkeiten wurden bei den großtechnischen Sandfängen mit dem Nortek 10 Mhz Velocimeter gemessen. Diese ADV Sonde wurde an einer langen Aluminiumstange befestigt, da die Sandfänge oft sehr große Tiefen aufweisen. An der Aluminiumstange war ein Motor mit Gewindestange angebracht, mit dessen Hilfe die Sonde vertikal über 1,5 m auf und ab gefahren werden konnte. Der Motor wurde so eingestellt, dass die Sonde alle 10 cm kurz stehenblieb und Messungen durchführte. An jedem Messpunkt wurden von der Sonde 600 Einzelmessungen mit einer Frequenz von 25 Hz durchgeführt. Die Messung an jedem Messpunkt dauerte somit 24 s. Die Sonde wurde entweder auf dem Räumler befestigt und zu verschiedenen Positionen gefahren oder direkt am Sandfang befestigt. Um die ganze Höhe des Sandfanges zu erfassen, waren ein oder zwei Umsetzvorgänge erforderlich.

Die Fließgeschwindigkeiten im physikalischen Sandfangmodell wurden mit der ADV Sonde Vectrino der Firma Nortek gemessen, die auf einem Messwagen befestigt war. Die Sonde führte pro Messpunkt 778 Einzelmessungen mit einer Frequenz von 200 Hz durch. Die Messung an jedem Messpunkt dauerte somit nur 4 s.

Aus den Messwerten wurden für jeden Messpunkt der Mittelwert und die Standardabweichungen (turbulente Schwankungen) berechnet. Aus den turbulenten Schwankungen konnte die turbulente kinetische Energie mit Gleichung (36)

berechnet werden. Werte mit einer zu geringen Signalstärke wurden bei der Auswertung eliminiert.

5.3.2 Regressionsanalysen der Messwerte

Eine Regressionsanalyse der Messwerte für die Geschwindigkeitskomponente v ergab, dass zwischen den Messwerten eine quadratische Abhängigkeit besteht. Die Messwerte lassen sich durch folgende quadratische Gleichung (62) beschreiben.

$$v = az^2 + bz + c \quad (62)$$

Durch Kurvendiskussion ergeben sich mit Gleichung (63) zwei Nullstellen für diese Gleichung.

$$z_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (63)$$

Durch Nullsetzen der 1. Ableitung von Gleichung (62) ergibt sich die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} auf der Höhe

$$z = \frac{-b}{2a} \quad (64)$$

Der Extremwert hat dann den Betrag

$$v_{\text{Sohl}} = \frac{b^2}{4} \left(1 - \frac{2}{a}\right) + c \quad (65)$$

In Abbildung 51 sind beispielhaft die Messwerte für ein Geschwindigkeitsprofil mit zugehöriger quadratischer Ausgleichskurve dargestellt. Oben rechts ist die Lage des Messprofils im Querschnitt dargestellt. Vorteil der Regressionsanalyse war, dass dadurch die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche extrapoliert werden konnten.

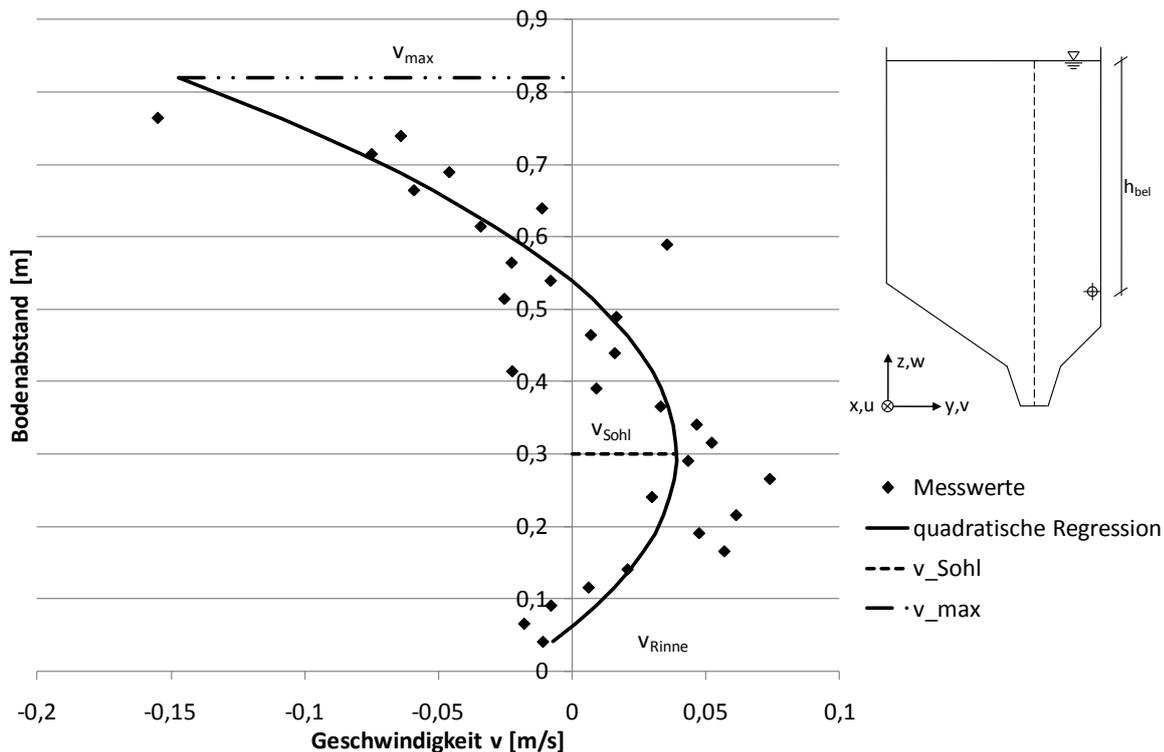


Abbildung 51: Beispiel für eine quadratische Regression der Messwerte der Geschwindigkeit v über die Sandfanghöhe im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$.

Für alle Versuche wurden die Ergebnisse für die Fließgeschwindigkeit v mit Gleichung (62) angepasst. Zusätzlich wurden die Nullstellen, die Lage und der Betrag von v_{Sohl} , sowie die maximale Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche v_{\max} bestimmt.

5.3.3 Messung der Korngrößenverteilung

Für die Messung der Korngrößenverteilung gibt es verschiedene Verfahren, die in Baier (1996) gegenübergestellt sind. Im Folgenden werden nur die in dieser Arbeit verwendeten Methoden vorgestellt. Als klassisches Verfahren gilt die Siebung nach DIN EN ISO 14688-1 (2002) vormals DIN 4022 (1987). Die Partikelform hat auf die Siebung einen erheblichen Einfluss (Baier, 1996). So ist der Messfehler bei kugelförmigen Partikeln klein, bei stäbchenförmigen groß. Bei stäbchenförmigen Partikeln spielt es eine Rolle, mit welcher Achse das Partikel durch die Siebmasche fällt. Für die Erstellung der Sieblinien im Rahmen dieser Arbeit wurden Siebe mit folgenden Maschenweiten nach DIN 18123 (1996) verwendet: 0,063 mm, 0,315 mm, 0,1 mm, 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm. Um Aussagen über den Abscheidegrad der Korngrößen 0,1 mm und 0,2 mm treffen zu können wurden die Siebe 0,125 mm und 0,25 mm durch die Siebe 0,1 mm, 0,2 mm ersetzt.

Die Korngrößenverteilung kann auch mit optischen Verfahren ermittelt werden. In Abbildung 52 sind mögliche Wechselwirkungen von Licht mit einem Teilchen dargestellt.

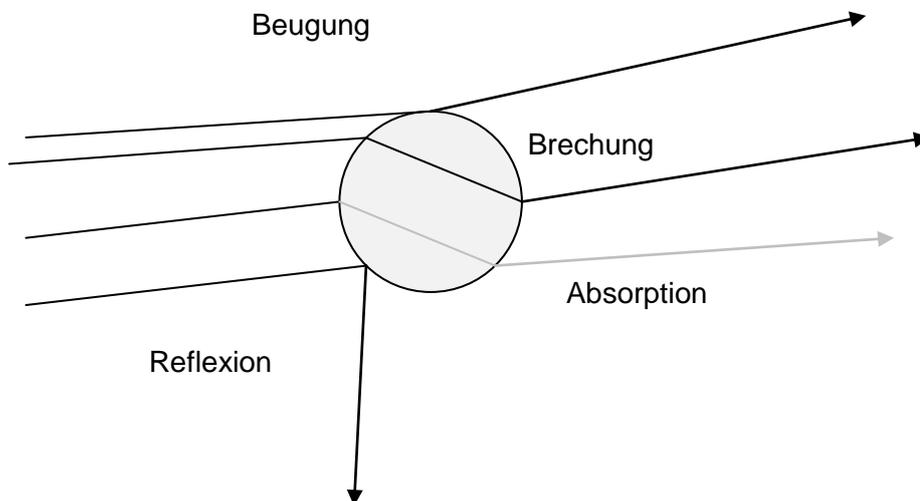


Abbildung 52: Mögliche Wechselwirkungen von Licht mit einem Teilchen (nach retsch-technology.de, 2009).

In dieser Arbeit wurde das Verfahren der Laserbeugung angewendet. Bei der Laserbeugung werden die Sandpartikel mit Lichtquellen bestrahlt und über die Beugungswinkel die Korngrößenverteilung bestimmt. Im Gegensatz zur Siebung handelt es sich bei der ermittelten Verteilung um eine volumenproportionale Verteilung. Daher kann diese Methode nur bei Material mit homogener Dichte, z. B. Quarzsand zuverlässige Verteilungen erzielen. Bei zusammengesetzten Stoffen wie z. B. Abwasser würden organische Partikel genauso wie „große Sandkörner“ in der Verteilung gewertet werden. Bei der Analyse von Quarzsand fällt die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auf. Vorteil der Methode ist, dass kleine Probemengen von ca. 1 g ausreichen und die Analyse sehr schnell geht. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt es sich, sowohl eine Probe mehrmals zu analysieren, als auch mehrere Entnahmen aus der gleichen Probe zu untersuchen.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das Laser-Streulichtspektrometer LA-950 verwendet. Dieses Gerät wurde aufgrund seines großen Messbereichs von 0,01 μm bis 3000 μm gewählt. Die Dispergierung erfolgt nass, bei Quarzsand genügt Wasser als Dispergiermittel (Abbildung 53).

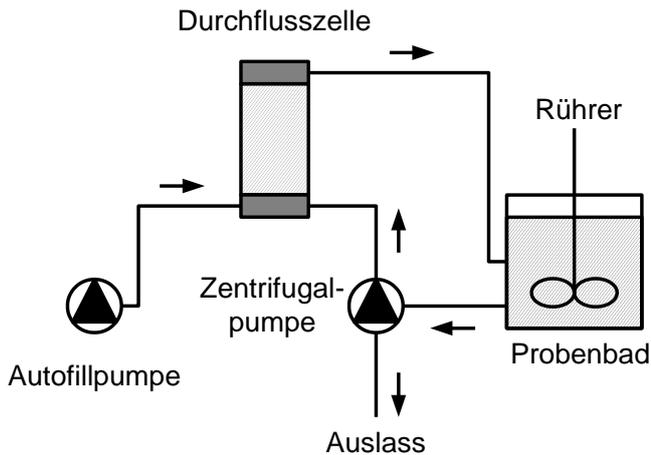


Abbildung 53: Dispergiereinheit des Laser-Streulichtspektrometers Horiba LA-950 (nach www.retsch-technology.de, 2009).

In das Probenbad können bis zu 290 ml Wasser gefüllt werden, die benötigte Probemenge beträgt 10 mg bis 5 g. Je grobkörniger die Probe ist, desto mehr Material wird benötigt. Ein Rührer verhindert, dass sich die Probe absetzt. Proben, die zum Verklumpen neigen, können mit Ultraschall behandelt werden. Dies ist bei Quarzsand nicht erforderlich.

Das LA-950 benutzt zwei verschiedene optische Lichtquellen mit Wellenlängen von 650 nm bzw. 405 nm. Die Verwendung verschiedener Wellenlängen gewährleistet die optimale Erkennung von Körnern im gesamten Messbereich.

Die Probe wird in das Probenbad gegeben und mit Hilfe einer Zirkulationspumpe im Kreislauf geführt. Die Durchflusszelle wird von Laserlicht bestrahlt, wodurch am Detektor ein Beugungsmuster entsteht (Abbildung 54).

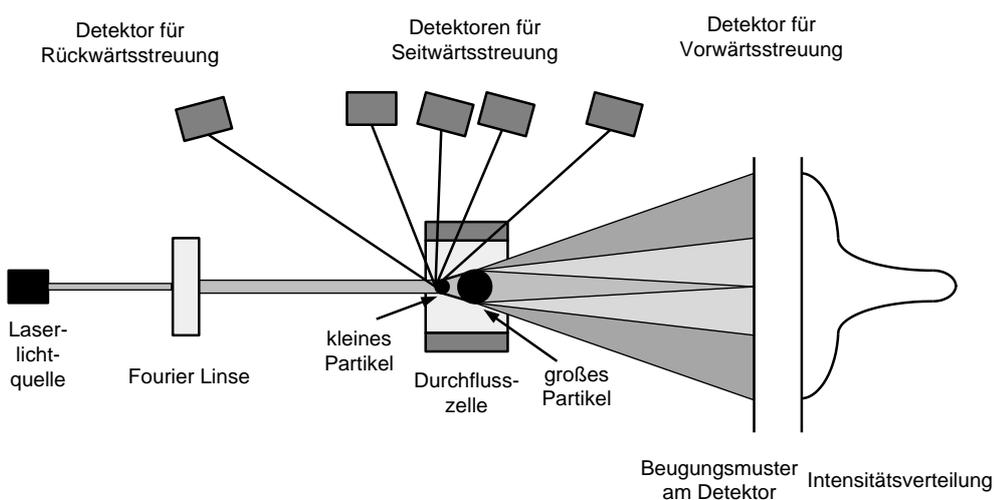


Abbildung 54: Funktionsprinzip des Laser-Streulichtspektrometers Horiba LA-950 (nach retsch-technology.de, 2009).

Bei größeren Körnern, bei denen die Wellenlänge des Lichts kleiner als der Korndurchmesser ist, wird das Licht meist nach vorne gestreut. Bei kleinen Partikeln wird das Licht zunehmend seit- oder sogar rückgestreut und von den dort angebrachten Detektoren erfasst. Bei Partikeln $< 50 \mu\text{m}$ erfolgt die Auswertung der Streulichtspektren nach der Mie Theorie, nach der zusätzlich noch ein Brechungsindex für das Material angegeben werden muss. Die Streulichtspektren größerer Partikel werden nach der Fraunhofer Theorie ausgewertet, die einen Spezialfall der Mie Theorie darstellt.

5.3.4 Messung des Abscheidegrades

Bei den großtechnischen Messungen war die gewählte Methode zur Bestimmung des Abscheidegrades eine Teilstromentnahme aus der flüssigen Phase des Zu- und Ablaufs, ohne zusätzliche Sandzugabe, mit Massenbilanzen nach Gleichung (37). Die Methode ohne Sandzugabe wurde gewählt, um neben dem Abscheidegrad noch die Korngrößenverteilung des Sandes im Zulauf und im Ablauf bestimmen zu können. Die Versuchsanordnung zur Messung des Abscheidegrades ist in Abbildung 55 schematisch dargestellt.

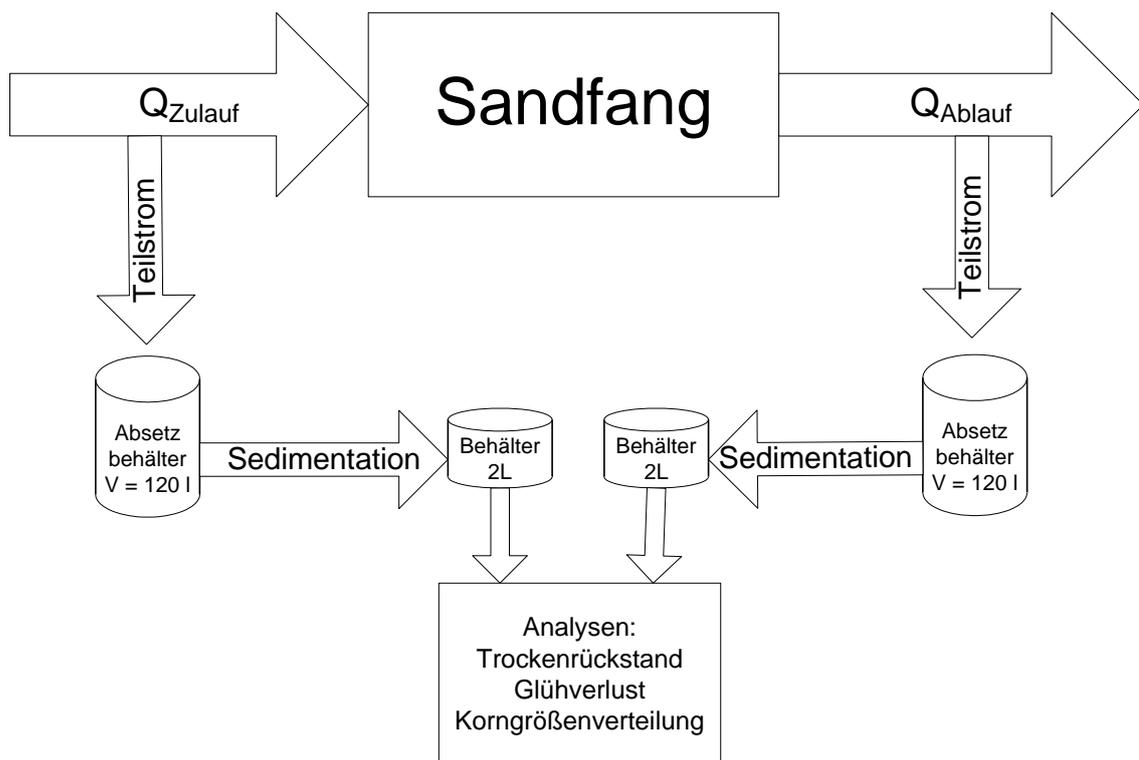


Abbildung 55: Schematische Versuchsanordnung zur Bestimmung des Abscheidegrades von großtechnischen Sandfängen (Schwarz, 2007).

Vom Zulauf des Sandfangs und vom Ablauf des Sandfanges wurde mit einer Tauchpumpe Teilstrome in Absetzbehälter mit einem Volumen von je 120 l gepumpt. Nach einer Absetzzeit von 30 Minuten wurde das Überstandswasser

entfernt und die sedimentierte Masse in Behälter mit einem Volumen von 2 l gefüllt.

Im Labor des Instituts für Wasserwesen wurde von diesen Proben der Trockenrückstand, Glühverlust und die Sieblinie ermittelt. Aus den Ergebnissen der Analyse wurden die Parameter Sandkonzentration, Konzentration der Korngrößen $\geq 0,2$ mm und daraus der Abscheidegrad bezogen auf die Korngrößen $\geq 0,2$ mm nach Gleichung (37) berechnet. Für die Ermittlung des Abscheidegrades wurde jede Zulaufprobe mit einer um die Durchflusszeit versetzte Ablaufprobe kombiniert.

Bei der Wahl der Probenahmestellen wurde auf gute Durchmischung geachtet. Hierfür wurden die Probenahmestellen bevorzugt im Einzugsbereich vorhandener Einbauten, wie beispielsweise Venturikanäle (Abbildung 56), Überfallwehre oder Querschnittsveränderungen, angeordnet.



Abbildung 56: Versuchsanordnung zur Probenahme auf der Kläranlage Holzkirchen (Schwarz, 2007).

Im physikalischen Sandfangmodell wurde der Abscheidegrad mittels Massenbilanzierung der zugegebenen und abgeschiedenen Sandmassen berechnet. Für die Bestimmung der zugegebenen Sandmasse wurde vor jedem Versuch der in einer Stunde mit der Dosierschnecke zugegebene Sand aufgefangen, gewogen und die Korngrößenverteilung durch Siebung und Laserbeugung bestimmt. Die Sandmasse wurde auf die Versuchsdauer von vier Stunden hochgerechnet. Der aus dem Sandfangmodell entnommene abgeschiedene Sand wurde getrocknet, gewogen und die Korngrößenverteilung durch Siebung und Laserbeugung bestimmt.

5.4 Versuche im physikalischen Sandfangmodell

5.4.1 Kalibrierung

Ziel der Kalibrierung des physikalischen Modells war die Einstellung des Lufteintrages durch Vergleich der Messergebnisse der Geschwindigkeitskomponente v im physikalischen Modell mit den großtechnischen Messungen. Die Geschwindigkeitskomponente v wurde deshalb gewählt, da sie vom Lufteintrag maßgeblich beeinflusst wird. Der Lufteintrag musste kalibriert werden, da Patt (1990) in seinen Messungen festgestellt hat, dass eine theoretische Verkleinerung des Lufteintrags, mittels der Ähnlichkeitsgesetze nach Froude, zu deutlichen Abweichungen führt.

In Abbildung 57 ist der Versuchsablauf der Kalibrierung des physikalischen Modells dargestellt. Als Grundlage für die Kalibrierung wurden die Messungen der Fließgeschwindigkeiten an der großtechnischen Anlage in Karlsfeld benutzt. Diese Messergebnisse wurden unter Ansatz der Froud'schen Ähnlichkeit im Maßstab 1:4 verkleinert und als Vergleichswerte für die Messergebnisse am physikalischen Sandfangmodell genutzt.

Die Geschwindigkeitsmessungen für die Kalibrierung im physikalischen Modell wurden an 7 Querprofilen in Sandfanglängsrichtung durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die gleichen Profile wie bei der Naturmessung in Karlsfeld gewählt, mit im Maßstab 1:4 verkleinerten Koordinaten. Die Profile sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt.

Der Durchfluss im physikalischen Modell wurde entsprechend dem Durchfluss bei den großtechnischen Messungen im Maßstab 1:4 verkleinert.

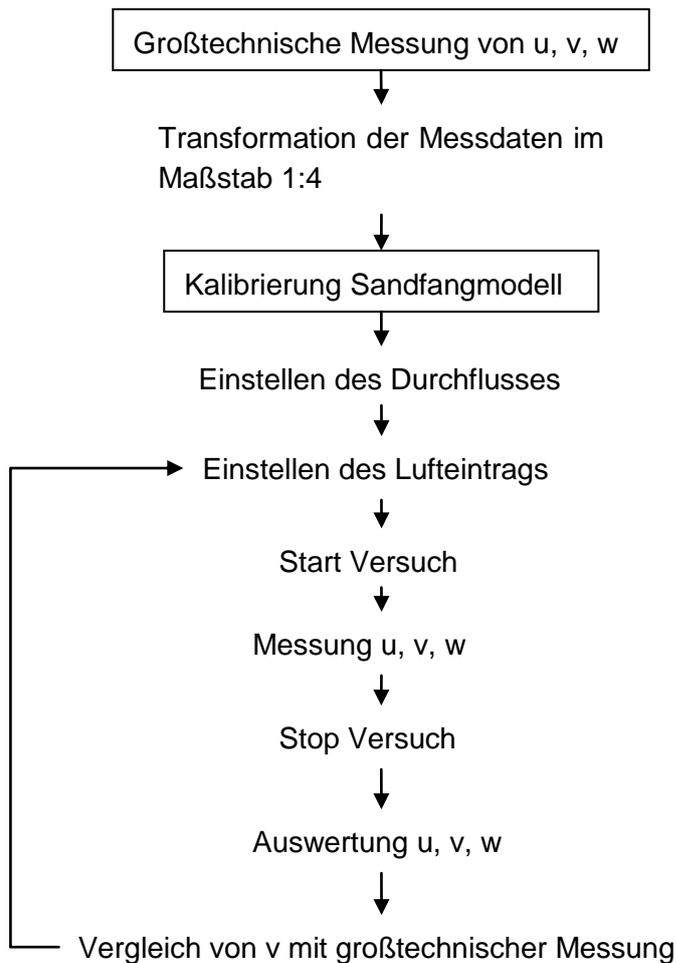


Abbildung 57: Versuchsablauf für die Kalibrierungsmessungen am physikalischen Sandfangmodell.

Für die Kalibrierung wurden die Parameter Lufteintrag, Düsenanzahl und Düsendurchmesser variiert. Der Lufteintrag konnte mit einem Druckregelventil eingestellt werden, die Düsenanzahl durch Abkleben einzelner Düsen und der Düsendurchmesser durch Austausch der Belüfterrohre. Der Lufteintrag wurde im Bereich von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ variiert, wobei der geringste einstellbare Wert von der Anzahl der offenen Düsen abhängig war. Durch Abkleben der Düsen wurden Einstellungen mit 200, 140 und 80 Düsen gewählt. Um noch geringere Luftvolumenströme realisieren zu können, wurden zum Schluss die Belüfterrohre mit dem Düsendurchmesser 1 mm durch Belüfter mit Düsendurchmesser 0,6 mm ersetzt.

In Tabelle 11 sind die Kalibrierversuche gegenübergestellt. Die ersten Versuche wurden mit Belüfterrohren mit Düsendurchmessern von 1 mm durchgeführt. Zunächst wurden alle 20 Düsen je Belüfterrohr offen gelassen ($n = 200$) und fünf Messungen bei verschiedenen Lufteinträgen durchgeführt. Der minimal mögliche Lufteintrag betrug bei diesen Messungen $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Verglichen mit den Empfehlungen der DWA (2008) von 0,5 bis $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ist dieser Wert sehr

hoch. Eine Verringerung des Luftvolumenstroms führte zu ungleichmäßigem Luftaustritt aus den Düsen. Deshalb wurden in der folgenden Versuchsreihe jeweils 12 von den 20 Düsen abgeklebt, um eine Düsenzahl von 80 zu erhalten. So ließen sich kleinere Luftvolumenströme bis $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ realisieren. Die Messungen wurden bei Lufteinträgen zwischen $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $4,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ durchgeführt. Da diese Versuchseinstellung zu sehr großen Luftblasen und zu einem unruhigen Strömungsbild führte, wurden weitere Versuche mit 6 abgeklebten Düsen und einer damit erreichten Düsenzahl von 140 durchgeführt. So konnten Versuche mit Lufteinträgen zwischen $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ durchgeführte werden. Weitere Versuche wurden mit kleineren Düsen mit einem Durchmesser von $0,6 \text{ mm}$ durchgeführt, um kleinere Lufteinträge zwischen $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erreichen zu können. Auch hier wurden 6 Düsen pro Belüfterrohr abgeklebt ($n = 140$).

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Kalibrierversuche mit unterschiedlichen Düsenzahlen, Düsendurchmessern und Lufteinträgen.

Datum	13.11.2007	21.11.2007	06.11.2007	17.01.2008
Düsenzahl	200	140	80	140
Düsendurchmesser [mm]	1,0	1,0	1,0	0,6
Lufteintrag [$\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$]	2,5	1,7	1,7	1,0
	2,8	1,8	1,8	1,1
	3,0	2,0	2,0	1,3
	3,4	2,2	2,2	1,5
	4,2	2,3	2,3	1,7
		2,5	2,5	1,8
		2,8	3,0	2,0
		3,0	3,4	2,2
		3,4	4,2	2,3
		4,2		2,5
		5,1		
		5,8		

In Tabelle 12 ist die Austrittsfläche der Luft in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und dem Düsendurchmesser dargestellt. Die absolute Austrittsfläche für die Luft ist bei 200 Düsen mit einem Durchmesser von $1,0 \text{ mm}$ am größten und bei 140 Düsen mit Durchmesser $0,6 \text{ mm}$ am kleinsten.

Tabelle 12: Austrittsflächen der Luft im physikalischen Sandfangmodell bei unterschiedlichen Düsendurchmessern und Düsenzahlen.

n Düsen	-	200	140	80	140
d_D	m	0,001	0,001	0,001	0,0006
A_D	m ²	0,0002	0,0001	0,00006	0,00004

5.4.2 Versuche am kalibrierten physikalischen Modell

Der Ablauf eines Versuchs zur Messung der Fließgeschwindigkeiten, der turbulenten kinetischen Energie und des Abscheidegrades ist in Abbildung 58 dargestellt.

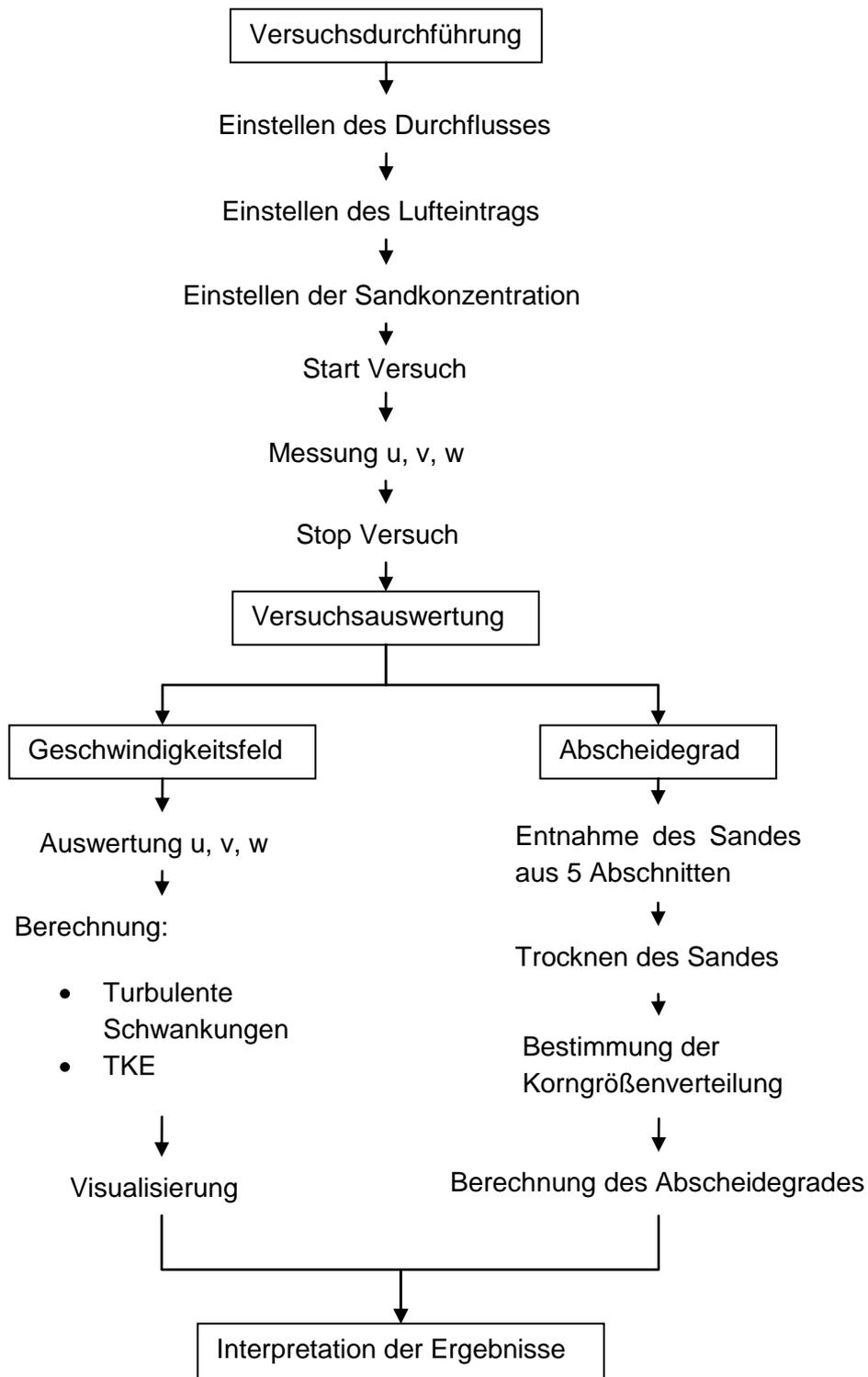


Abbildung 58: Versuchsablauf für Messungen der Fließgeschwindigkeit und des Abscheidegrades am physikalischen Sandfangmodell.

Als Versuchsdauer wurden vier Stunden gewählt. Zunächst wurden die Parameter Lufteintrag, Durchfluss und Sandeintrag eingestellt und daraufhin der Versuch

gestartet. Der Messwagen fuhr die Koordinaten gemäß der vorgegebenen Koordinatendatei ab und zeichnete an jedem Messpunkt die Fließgeschwindigkeiten auf. Nach Ablauf der Versuchsdauer wurde die Sandzugabe abgeschaltet und das physikalische Sandfangmodell noch weitere 10 Minuten mit Wasser beschickt, damit die noch nicht sedimentierten Feinkornanteile aus dem Sandfang ausgetragen wurden. Danach wurde der Zufluss abgeschaltet und das physikalische Sandfangmodell über einen Heber entleert. Dies geschah sehr langsam, im Zeitraum von ca. 24 Stunden, damit kein Sand aufgewirbelt wurde. Zusätzlich wurde der auf den Schrägen abgelagerte Sand in die Sandfanggutrinne gespült und ging somit auch als abgeschiedener Sand in die Auswertung mit ein. Für die Sandentnahme wurde der Sandfang in 5 Abschnitte von je ca 1 m Breite ($x_1 = 0,91$ m, $x_2 = 1,86$ m, $x_3 = 2,81$ m, $x_4 = 3,76$ m, $x_5 = 5,0$ m) eingeteilt, aus denen nun der Sand mit einer Schaufel entnommen, in 5 Schalen gefüllt und bei 105 °C getrocknet wurde. Nach dem Trocknen wurden die Schalen zuerst gewogen und dann die Korngrößenverteilung sowohl durch Siebung DIN 18123 (1996) als auch mit Laserbeugung bestimmt. Aus den Auswertungen wurden dann durch Massenbilanzen der Gesamtabscheidegrad, und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm in Abhängigkeit vom Fließweg berechnet.

Im Unterschied zu den Kalibrierungsmessungen wurden bei den Messungen am kalibrierten physikalischen Modell deutlich mehr Messpunkte untersucht. Diese sind in Abbildung 59 dargestellt. Es wurden 7 Profile in Querrichtung gewählt. Profil 3 liegt in der Mitte des Sandfangs bei $b_{SF}/2$, Profil 5 in der Mitte der Rinne. Die Ausgangsposition der Belüfterrohre war bei einer Einblastiefe von 0,55 m, diese konnte aber beliebig nach oben und nach unten variiert werden. Gewählt wurden die Einblastiefen 0,62 m, 0,55 m, 0,47 m, 0,31 m und 0,21 m.

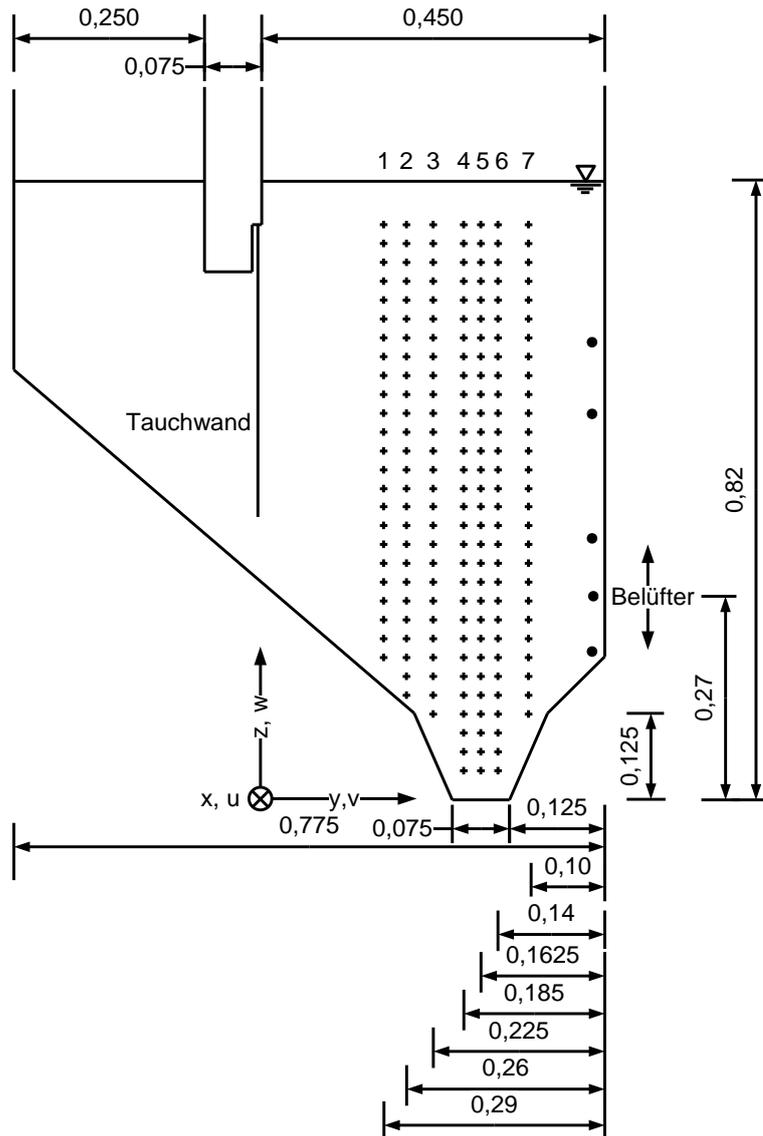


Abbildung 59: Querprofile 1 bis 7 und Koordinatensystem für die Strömungsmessungen im physikalischen Sandfangmodell.

In Abbildung 60 sind die Längsprofile für die Strömungsmessungen dargestellt. Es wurden sieben Messquerschnitte gewählt, wobei die Messquerschnitte 1 und 2 im Zulaufbereich angeordnet sind, um die Einströmung zu erfassen. Die Messquerschnitte 3 und 7 sind im vorderen bzw. hinteren Achtelpunkt angeordnet, die Messquerschnitte 4 und 6 liegen im vorderen bzw. im hinteren Viertelpunkt, Profil 5 in der Mitte des Sandfanges.

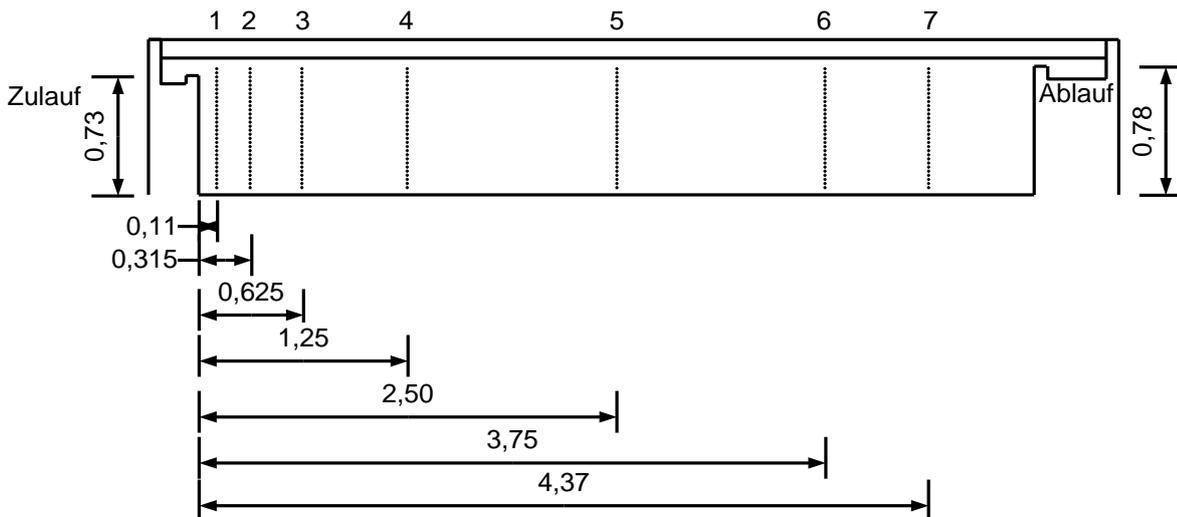


Abbildung 60: Ausgewählte Querschnitte (Längsprofile 1 bis 7) für die Geschwindigkeitsmessungen im physikalischen Sandfangmodell.

Am kalibrierten, physikalischen Modell wurden Versuche mit unterschiedlichen Lufteinträgen, Durchflüssen, Einblastiefen, Sandkonzentrationen und Korngrößenverteilungen durchgeführt, um den Einfluss dieser Parameter auf das Geschwindigkeitsfeld, die turbulente kinetische Energie und den Abscheidegrad zu erfassen. Eine tabellarische Gegenüberstellung aller durchgeführten Versuche zum Abscheidegrad, mit detaillierten Ergebnissen ist im Anhang abgebildet. Bei den Versuchen wurde zunächst darauf geachtet immer nur einen Parameter zu variieren und die anderen konstant zu lassen. Die Versuche mit unterschiedlichen Lufteinträgen wurden mit vier verschiedenen Versuchssanden durchgeführt. Damit konnte auch der Einfluss der Korngrößenverteilung untersucht werden. Außerdem wurde noch ein Versuch durchgeführt, bei dem nur 6 von 10 Belüfterrohren in Betrieb waren, um eine bereichsweise Belüftung zu untersuchen.

6 Ergebnisse

6.1 Messungen an großtechnischen, belüfteten Sandfängen

6.1.1 Ausgeführte Bauformen von belüfteten Sandfängen

Um einen Überblick über in der Praxis realisierte Bauformen von belüfteten Sandfängen zu bekommen, wurden 55 Pläne bestehender Anlagen ausgewertet. Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Querschnittsformen. Ein Trapezquerschnitt bei dem die Sandfanggutterrinne ausmittig nahe den Belüftern platziert ist und ein Rechteckquerschnitt mit mittiger Rinne, deren obere Breite maximal der Sandfangbreite entspricht. Von den 55 ausgewerteten Querschnitten haben 80 % einen trapezförmigen Querschnitt und 20 % einen Rechteckquerschnitt. Die Form der Sandfanggutterrinne entspricht bei allen Querschnitten einem Trapez. In Tabelle 13 sind ausgeführte Bauformen belüfteter Sandfänge bestehender Kläranlagen den Bemessungsempfehlungen der DWA (2008) gegenübergestellt.

Tabelle 13: Gegenüberstellung von Bemessungsempfehlungen (DWA, 2008) mit bestehenden Anlagen (n = 55) (Mittelwerte und Bereich).

Parameter	Bemessungsempfehlungen (DWA, 2008)	Mittelwert ausgeführter Anlagen (n = 55)	von – bis
Horizontale Fließgeschwindigkeit	< 0,2 m/s	0,05	0,02 bis 0,18
Breite/Tiefe-Verhältnis b_{SF}/h_{SF} Regenwetter	0,8 bis 1,0	0,74	0,5 bis 1,6
Breite/Tiefe-Verhältnis b_{SF}/h_{SF} Trockenwetter	0,8 bis 1,0	0,84	0,5 bis 1,6
Querschnittsfläche A_{SF} (ohne Fettfang)	1 bis 15 m ²	8,17	2,3 bis 23
Durchflusszeit für $Q_{max} t_R$	≥ 5 min	10,25	4,5 bis 24
Beckenlänge l_{SF}	Mindestens 10-fache Breite, max. 50 m	$10,7 \cdot b_{SF}$	5 bis $20 \cdot b_{SF}$ 11,5 bis 55 m
Einblastiefe h_{Bel}	$h_{SF}-0,3$ m	$h_{SF}-0,36$ m	$h_{SF}-0,02$ bis 1 m
Spez. Luftertrag bezogen auf das Beckenvolumen	0,5 bis 1,3 Nm ³ /(m ³ ·h)	-	-
Sohlquerneigung der Fettfangkammer α	35 ° bis 45 °	37 °	26 ° bis 46 °
Breite der Fettfangtasche b_{FF}	0,2 bis $0,5 \cdot b_{SF}$	$0,9 \cdot b_{SF}$	0,5 bis $1,6 \cdot b_{SF}$
Tiefe der Sandfanggutrinne	-	$0,16 \cdot h_{SF}$	0,1 bis $0,25 \cdot h_{SF}$
Breite der Sandfanggutrinne oben	-	$0,5 \cdot b_{SF}$	0,14 bis $1,0 \cdot b_{SF}$

Die horizontale Fließgeschwindigkeit wurde rechnerisch aus dem Quotienten aus maximalem Durchfluss und Querschnittsfläche ermittelt. Der so ermittelte Wert befindet sich innerhalb der Bemessungsempfehlung. Das Breite/Tiefe-Verhältnis sollte zwischen 0,8 und 1,0 liegen. Hier fällt auf, dass der Mittelwert der ausgeführten Anlagen diese Vorgabe unterschreitet. Die Schwankungsbreite dieses Werts ist mit 0,5 bis 1,6 relativ groß. Die Querschnittsfläche liegt mit durchschnittlich 8,17 m² innerhalb der Bemessungsempfehlungen, einzelne Anlagen weisen jedoch deutlich höhere Querschnittsflächen von bis zu 23 m² auf. Die Empfehlung dass die Länge mindestens der 10-fachen Breite des Sandfanges betragen soll wird bei 70 % der untersuchten Anlagen eingehalten. Die Einblastiefe ist im Mittel 36 cm statt 30 cm über der Sandfanggutrinne angeordnet und somit

kleiner als empfohlen. Die Sandfangtiefe bei Regenwetter beträgt im Mittel 3,45 m, bei Trockenwetter 3,0 m mit einer großen Schwankungsbreite von 1,50 m bis 6,60 m.

Bei der Betrachtung der Zulauf und Ablaufgestaltung fällt auf, dass bei 78 % der untersuchten Sandfänge der Zulaufstrom oben in den Sandfang eingeleitet wird und bei 22 % mittig. Der Ablauf wird bei 59 % der untersuchten Sandfänge oben abgezogen und bei 41 % mittig.

6.1.2 Ergebnisse der Messungen der Fließgeschwindigkeiten

6.1.2.1 Sandfang mit Rechteckquerschnitt (Kläranlage München I)

Vorteilhaft an den Messungen an der Kläranlage München I war die Einstellbarkeit verschiedener Betriebsbedingungen. Es konnte sowohl der Lufteintrag, als auch der Durchfluss variiert werden. Die Messungen wurden bei den zwei verschiedenen Lufteinträgen $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ bei einem Durchfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$ (Durchflusszeit $t_R = 42,6 \text{ min}$), sowie den zwei verschiedenen Durchflüssen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ durchgeführt. Da die Messungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt worden sind, waren die Durchflüsse bei den Messungen mit verschiedenen Durchflüssen geringfügig höher, als bei den Messungen mit den zwei Lufteinträgen. Der Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ wird im Normalbetrieb eingesetzt. Ein erhöhter Lufteintrag von $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ wird nur bei Störfällen, z. B. dem Ausfall eines Sandfanges, eingesetzt. Die Einblastiefe im Sandfang beträgt 3,1 m. Durch Absperren zweier Sandfänge konnte der Durchfluss von $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Durchflusszeit $t_R = 35,5 \text{ min}$) auf den Wert $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Durchflusszeit $t_R = 17,8 \text{ min}$) verdoppelt werden. Der Wert $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ entspricht ungefähr dem Bemessungsdurchfluss bei Trockenwetter von $0,62 \text{ m}^3/\text{s}$ (Durchflusszeit $t_R = 17,3 \text{ min}$). In Tabelle 14 sind die Maximalwerte der Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung und der oberen und unteren Randgeschwindigkeit der Wasserwalze bei den Lufteinträgen $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ gegenübergestellt.

Tabelle 14: Fließgeschwindigkeiten an den Messprofilen 1-3 im Sandfang der Kläranlage München I bei Lufteinträgen von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$.

Parameter	Einheit	Messprofil 1		Messprofil 2		Messprofil 3	
		0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
q_{LV}	$\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
u_{\max}	m/s	0,23	0,23	0,20	0,24	0,09	0,11
u_{Sohl}	m/s	-0,14	-0,11	-0,02	-0,02	-0,05	-0,07
v_{\max}	m/s	0,12	0,13	0,20	0,18	0,22	0,18
v_{Sohl}	m/s	-0,16	-0,20	-0,23	-0,27	-0,25	-0,30
TKE	m^2/s^2	0,00373	0,00472	0,00422	0,00557	0,00367	0,00801

Eine Verdopplung des Lufteintrags ergibt schon im unbelüfteten Bereich (Messprofil 1) eine erhöhte Sohlgeschwindigkeit der Wasserwalze. Am Boden des Sandfanges beträgt v_{Sohl} $-0,16 \text{ m/s}$ bei $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $-0,2 \text{ m/s}$ bei $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. Bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ ergibt sich am Messprofil 3 eine Sohlgeschwindigkeit v_{Sohl} von $-0,25 \text{ m/s}$. Diese erhöht sich bei einem Lufteintrag von $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ auf $-0,3 \text{ m/s}$. Aus Tabelle 14 wird ersichtlich, dass der Maximalwert der Fließgeschwindigkeit u bei Steigerung des Lufteintrages von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ auf $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ am Messprofil 2 von $0,2$ auf $0,24 \text{ m/s}$ und am Messprofil 3 von $0,9$ auf $0,11 \text{ m/s}$ erhöht wird. Die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung nimmt zudem mit zunehmendem Fließweg ab. Am Messprofil 1 beträgt sie bei beiden Lufteinträgen noch $0,23 \text{ m/s}$, am Messprofil 3 nur noch $0,09 \text{ m/s}$ beim Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $0,11 \text{ m/s}$ beim Lufteintrag von $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. In Abbildung 61 ist die Geschwindigkeitsverteilung der Walzenströmung an den Messprofilen 1 bis 3 gegenübergestellt. Während beim unbelüfteten Messprofil 1 die Sekundärströmung insbesondere im Bereich oberhalb des Walzenmittelpunktes ungerichtet erscheint, ist die Walzenströmung beim Messprofil 3 schon voll ausgebildet. Die Belüfter sind in diesem Sandfang auf der linken Seite angeordnet. Dies führt zu einer Drehung der Walzenströmung im Uhrzeigersinn.

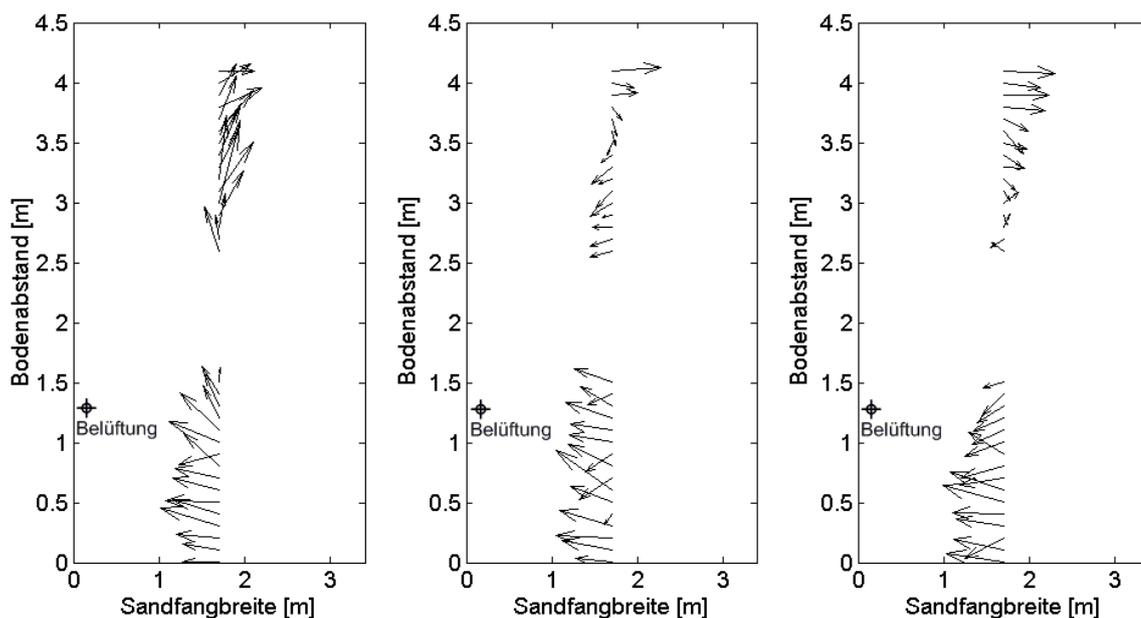


Abbildung 61: Sekundärströmung v und w im Sandfang der Kläranlage München I an den Messprofilen 1, 2 und 3 bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In der Literatur finden sich Maximalwerte für die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze zwischen $0,2 \text{ m/s}$ (Kalbskopf, 1966; ATV, 1997), $0,25 \text{ m/s}$ (Patt, 1990) und $0,3 \text{ m/s}$ (ATV, 1983). Die Ergebnisse in Tabelle 14 zeigen, dass der Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ schon ausreicht, diese Werte zu erreichen. Am Messprofil 2 beträgt die Sohlgeschwindigkeit beim Lufteintrag $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $-0,23 \text{ m/s}$, am Messprofil 3 $-0,25 \text{ m/s}$. Durch Steigerung des Lufteintrags auf $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ werden am Messprofil 2 $-0,27 \text{ m/s}$ und am Messprofil 3 $-0,3 \text{ m/s}$ erreicht. Für die Korngröße $0,2 \text{ mm}$ ist nach Gleichung (61) die Geschwindigkeit $0,23 \text{ m/s}$ kritisch, da ab dieser Geschwindigkeit Sohltransport stattfindet. Suspensionsbeginn kann schon ab einer Geschwindigkeit von $0,12 \text{ m/s}$ erfolgen. Das bedeutet dass bei diesen Messungen abgelagerter Sand mit hoher Wahrscheinlichkeit wiederaufgewirbelt wird.

Auffällig ist, dass sich die maximale Sohlgeschwindigkeit direkt an der Sohle ausbildet und nicht wie von Stein (1992) festgestellt auf Höhe $0,95 \cdot h_{\text{bel}}$. Die Belüfter sind zu hoch angeordnet, außerhalb des Gültigkeitsbereiches des mathematischen Modells von Stein (1992).

In Tabelle 15 sind die Messergebnisse der Fließgeschwindigkeiten bei zwei verschiedenen Durchflüssen gegenübergestellt. Die Messungen wurden nur an Messprofil 0 und Messprofil 3 durchgeführt. Daraus ist ersichtlich, dass sich auch im Bereich ohne Belüftung (Messprofil 0) eine Walzenströmung mit einer maximalen Geschwindigkeit v von $0,17 \text{ m/s}$ ausbildet.

Tabelle 15: Fließgeschwindigkeiten an den Messprofilen 0 und 3 im Sandfang der Kläranlage München I bei den Durchflüssen 0,3 m³/s und 0,6 m/s.

Parameter	Einheit	Messprofil 0		Messprofil 3	
Q	m ³ /s	0,3	0,6	0,3	0,6
u _{max}	m/s	0,23	0,40	0,11	0,13
u _{Sohl}	m/s	-0,08	-0,09	-0,06	-0,04
v _{max}	m/s	0,14	0,17	0,35	0,34
v _{Sohl}	m/s	-0,08	-0,08	-0,22	-0,26
TKE	m ² /s ²	0,00280	0,00497	0,00509	0,00706

Durch Verdopplung des Durchflusses von 0,3 m³/s auf 0,6 m³/s erhöht sich v_{Sohl} am Messprofil 3 von -0,22 m/s auf -0,26 m/s. Der Maximalwert u_{max} am Messprofil 0 bei dem Durchfluss von 0,3 m³/s beträgt 0,23 m/s. Eine Verdopplung des Durchflusses auf 0,6 m³/s bewirkt eine ungefähre Verdopplung von u_{max} auf 0,4 m/s.

In Abbildung 62 sind die Fließgeschwindigkeiten in Sandfanglängsrichtung an den Messprofilen 0 und 3 bei Durchflüssen von 0,3 m³/s bzw. 0,6 m³/s dargestellt. Im Bereich des Bodenabstandes zwischen 1,5 m und 2,5 m wurden keine Messungen durchgeführt. Der Zulauf wird durch ein Rechteckgerinne im Abstand von 2,6 m vom Sandfangboden eingeleitet. Die Höhe des Gerinnes reicht bis zur Wasseroberfläche. Am Messprofil 0 erhöht sich die Fließgeschwindigkeit nur im Bereich des Zulaufes, während am Messprofil 3 die gesamten Messwerte um im Mittel 0,04 m/s parallel nach rechts verschoben werden.

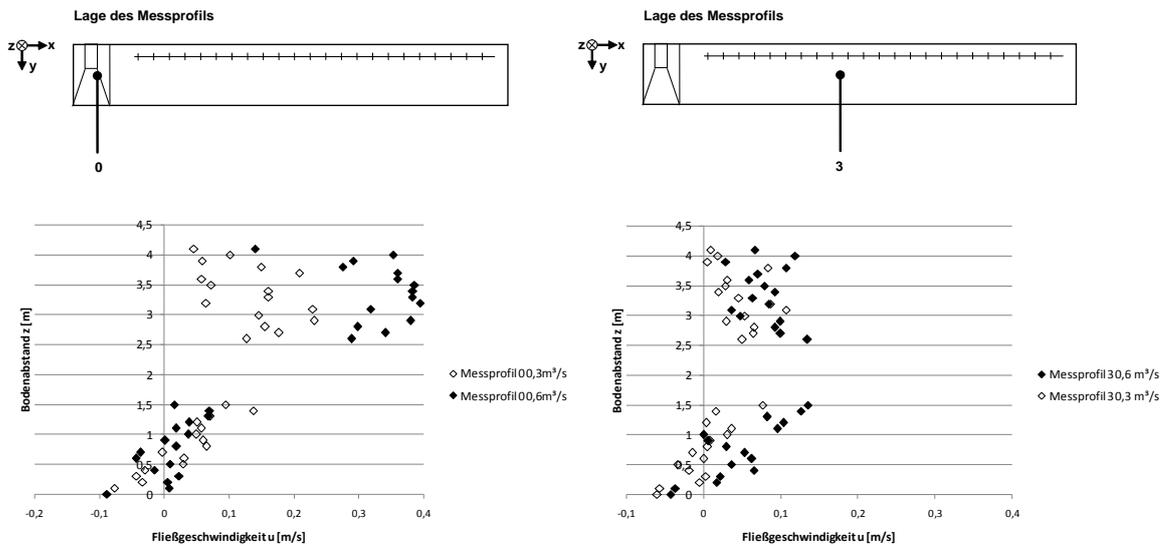


Abbildung 62: Fließgeschwindigkeit $u(z)$ im Sandfang der Kläranlage München I an den Messprofilen 0 und 3 bei den Durchflüssen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Literatur empfiehlt für die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung einen Bereich zwischen $0,2 \text{ m/s}$ (ATV, 1997; ATV, 1998) und $0,3 \text{ m/s}$ (DIN EN 12255-3, 2001). Diese Werte werden nur im Einlaufbereich des Sandfanges (Messprofil 0) überschritten. Bei Messprofil 3 beträgt der Maximalwert der Fließgeschwindigkeit u $0,13 \text{ m/s}$.

In Abbildung 63 ist die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung an drei Messprofilen dargestellt. Auffällig ist eine Rückströmung an der Sohle.

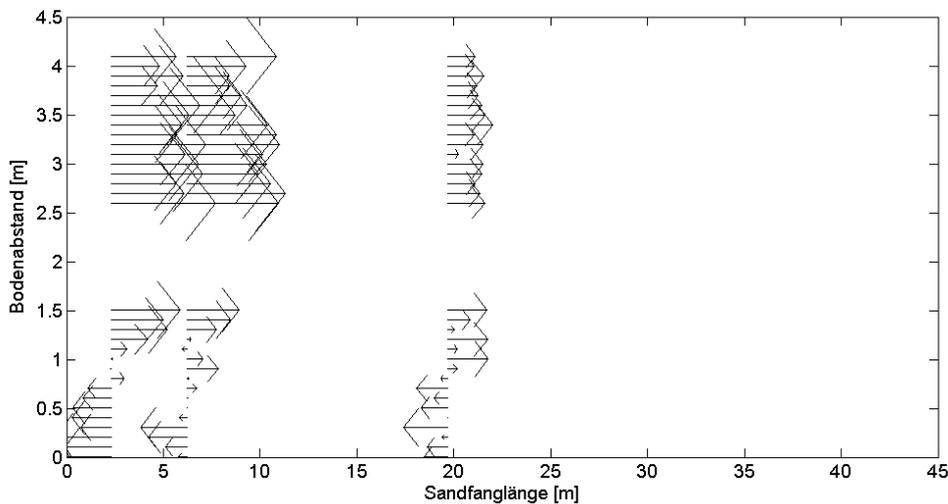


Abbildung 63: Längsdurchströmung im Sandfang der Kläranlage München I bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einem Durchfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

In Abbildung 64 ist die Längsdurchströmung bei einem Lufteintrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ dargestellt. Die Werte der Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche sind geringer, der Lufteintrag scheint im Zulaufbereich die Fließgeschwindigkeit u an der Wasseroberfläche zu bremsen.

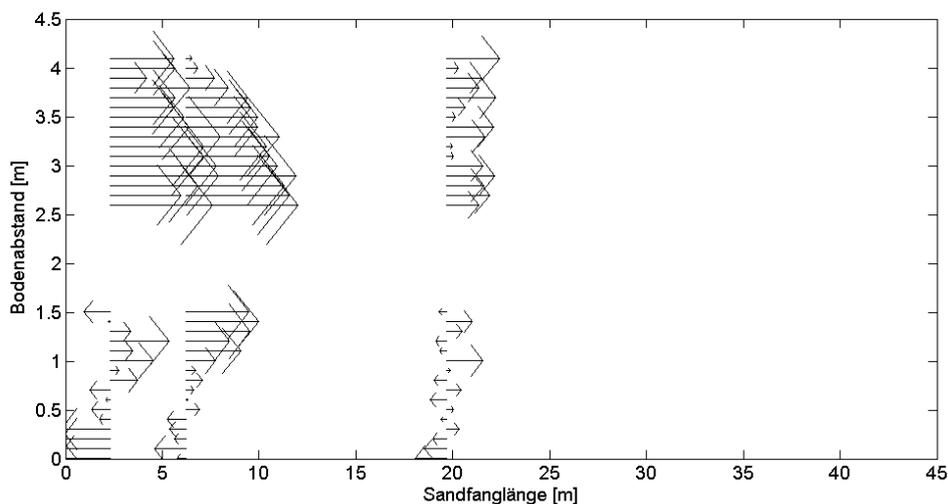


Abbildung 64: Längsdurchströmung im Sandfang der Kläranlage München I bei einem Lufteintrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einem Durchfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.1.2.2 Sandfang mit Trapezquerschnitt (Kläranlage Karlsfeld)

In Tabelle 16 sind die Fließgeschwindigkeiten an den Messprofilen (MP) 1 bis 7 zusammengefasst. Es fällt auf, dass die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{\max} an fast allen Messprofilen den empfohlenen Wert von 0,2 m/s überschreitet. Dies könnte auf eine geringe Sandabscheidung hindeuten. Dies wird im nächsten Abschnitt genauer untersucht. Die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} beträgt 0,12 m/s bis 0,23 m/s. Die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung u_{\max} ist nur am Messprofil 1 erhöht, an den anderen Messprofilen sehr gering. Zusätzlich wurde die turbulente kinetische Energie ausgewertet.

Tabelle 16: Fließgeschwindigkeiten im belüfteten Sandfang der Kläranlage Karlsfeld an den Messprofilen 1 bis 7.

Parameter	Einheit	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6	MP 7
u_{\max}	m/s	0,28	0,10	0,14	0,10	0,12	0,20	0,13
u_{Rinne}	m/s	-	-	0,04	0,04	0,03	0,05	0,02
v_{\max}	m/s	-0,33	-0,33	-0,17	-0,15	-0,32	-0,29	-0,27
v_{Sohl}	m/s	0,23	0,22	0,16	0,16	0,12	0,12	0,14
TKE	m ² /s ²	0,0022	0,0013	0,0019	0,0008	0,0009	0,0010	0,0010

In Abbildung 65 ist die Geschwindigkeitsverteilung der Walzenströmung über die Sandfanghöhe als Mittelwert über alle sieben Messprofilen dargestellt. Die Belüftung ist in diesem Sandfang auf der rechten Seite angeordnet, daher ergibt sich eine Strömung gegen den Uhrzeigersinn.

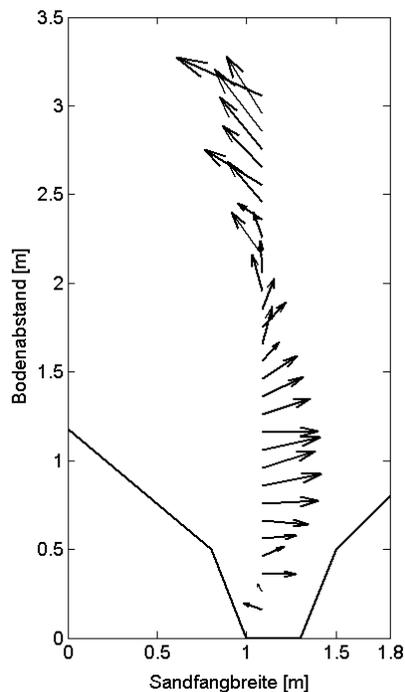


Abbildung 65: Geschwindigkeitskomponenten v und w im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld (Mittelwert Messprofile 1-7).

Die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung $u(z)$ an den Messprofilen 1 und 3 im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld mit Sandfanggutrinne ist in Abbildung 66 dargestellt. Am Messprofil 1 treten im Bereich des Zulaufes an der Wasseroberfläche Fließgeschwindigkeiten u von maximal 0,28 m/s auf, während auf Höhe des Walzenmittelpunkts ($z=2,2$ m) Rückströmungen von -0,07 m/s zu erkennen sind. Bei Messprofil 3 sind die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche mit 0,06 m/s gering, auf Höhe des Walzenmittelpunkts betragen die Rückströmungen -0,08 m/s und in der Sandfanggutrinne tritt eine deutliche Vorwärtsströmung von 0,14 m/s auf.

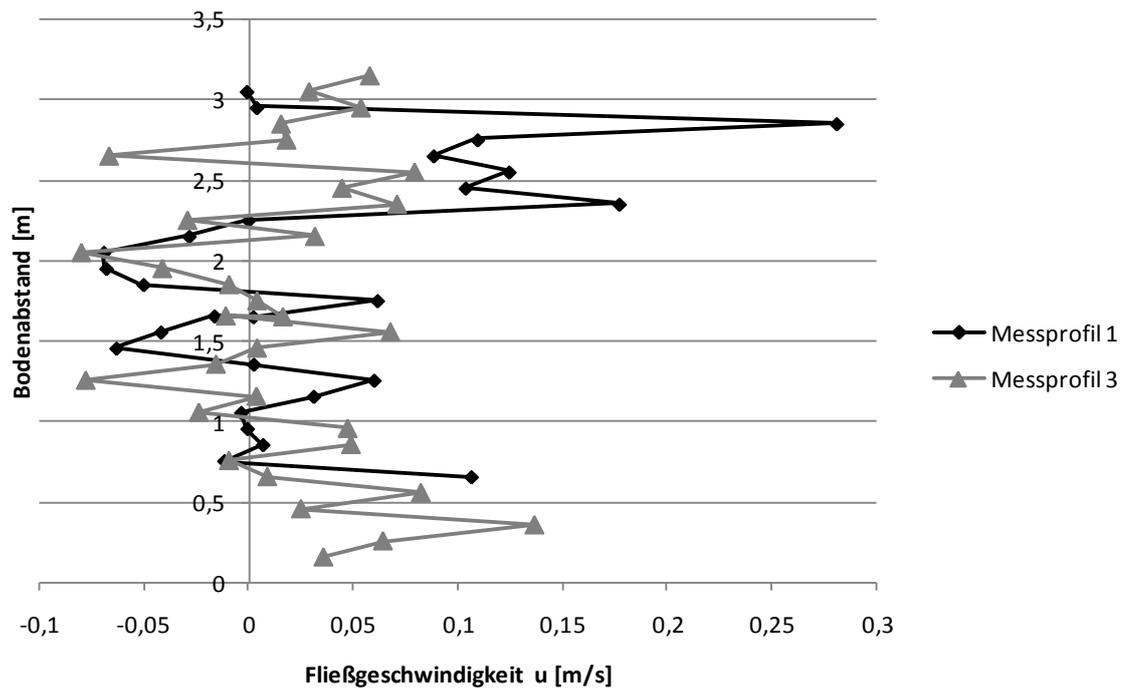


Abbildung 66: Längsdurchströmung u an den Messprofilen 1 und 3 im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld bei einem Lufteintrag von $1,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 67 ist ein Vergleich der Quergeschwindigkeiten v im Sandfang der Kläranlage München I mit denen im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld dargestellt. Die Tiefe wurde auf die jeweilige Tiefe des Sandfanges (mit Rinne) bezogen. Da der Sandfang der Kläranlage Karlsfeld einen Meter weniger tief ist, als der der Kläranlage München I, ergab sich in der Darstellung eine leichte Streckung des Geschwindigkeitsprofils. Die Fließgeschwindigkeiten sind auf die gemessene Maximalgeschwindigkeit von $0,3 \text{ m/s}$ bezogen. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeit an der Sandfangoberfläche beim Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, trotz des höheren Lufteintrags, ungefähr gleich groß ist, wie beim Sandfang der Kläranlage München I. Dies könnte an der geringeren Einblastiefe des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld von $2,2 \text{ m}$, gegenüber $3,2 \text{ m}$ beim Sandfang der Kläranlage München I liegen. Ein weiterer Grund könnte das ungünstigere Breite/Tiefe-Verhältnis des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld von $0,64$ sein. Das Breite/Tiefe-Verhältnis des Sandfanges der Kläranlage München I beträgt $0,8$. Auffällig ist außerdem, dass sich die maximale Geschwindigkeit auf einer Höhe von $z = 0,3 \cdot H$ ausbildet, während sich beim Querschnitt ohne Sandfanggutrinne die Maximalgeschwindigkeiten am Boden ausbilden. Letzteres ist sehr ungünstig für die Abscheidung von Sandfanggut, da die Gefahr von Aufwirbelungen besteht. Der Nulldurchgang ist in beiden Fällen ungefähr auf gleicher Höhe.

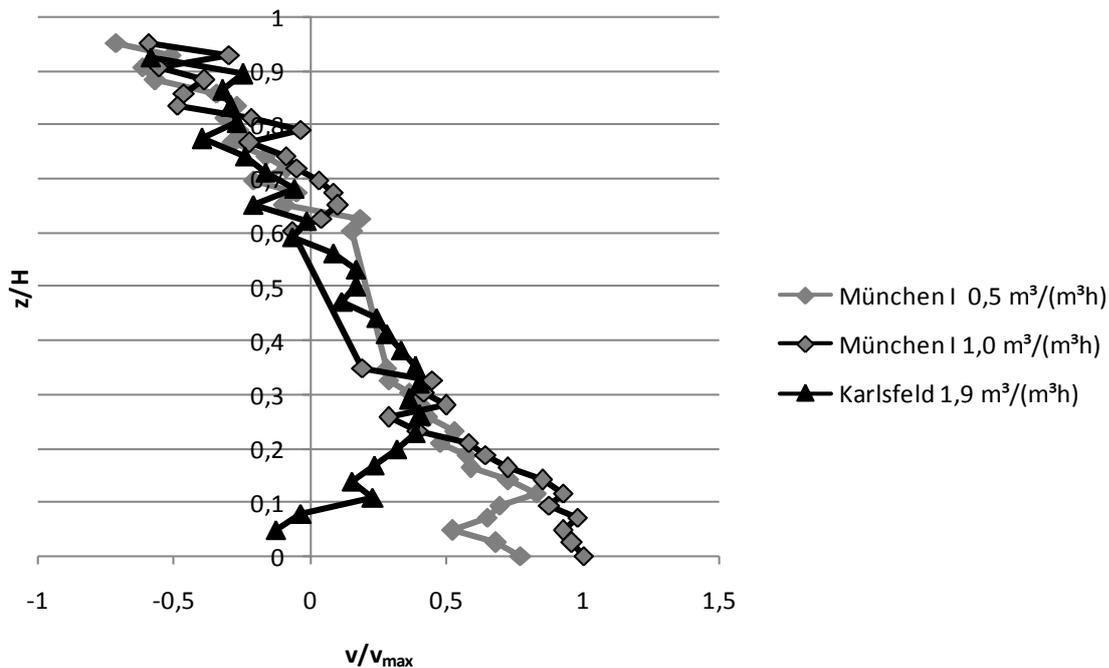


Abbildung 67: Normierter Vergleich zwischen den Messungen am Sandfang der Kläranlage München I und der Kläranlage Karlsfeld.

6.1.3 Ergebnisse der Messungen des Abscheidegrades

6.1.3.1 Abscheidegrad durch Probenahme im Zu- und Ablauf des Sandfanges

In Abbildung 68 sind Sieblinien im Zulauf der Sandfänge von 6 Kläranlagen im Raum München bei Trockenwetter dargestellt. Der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm liegt im Mittel bei 67 %, wobei der Feinkornanteil im Zulauf des Sandfanges der Kläranlage Dachau nur 48 % beträgt. Das Größtkorn bei diesen Korngrößenverteilungen war 8 mm. Dieses hängt von der Spaltweite des vorgeschalteten Rechens ab. Bei den untersuchten Kläranlagen war im Zulauf meist ein Feinrechen mit 6 mm Stababstand angeordnet. In der Abbildung ist auch der Mittelwert der Messungen von Stein (1992) mit der gleichen Tendenz dargestellt.

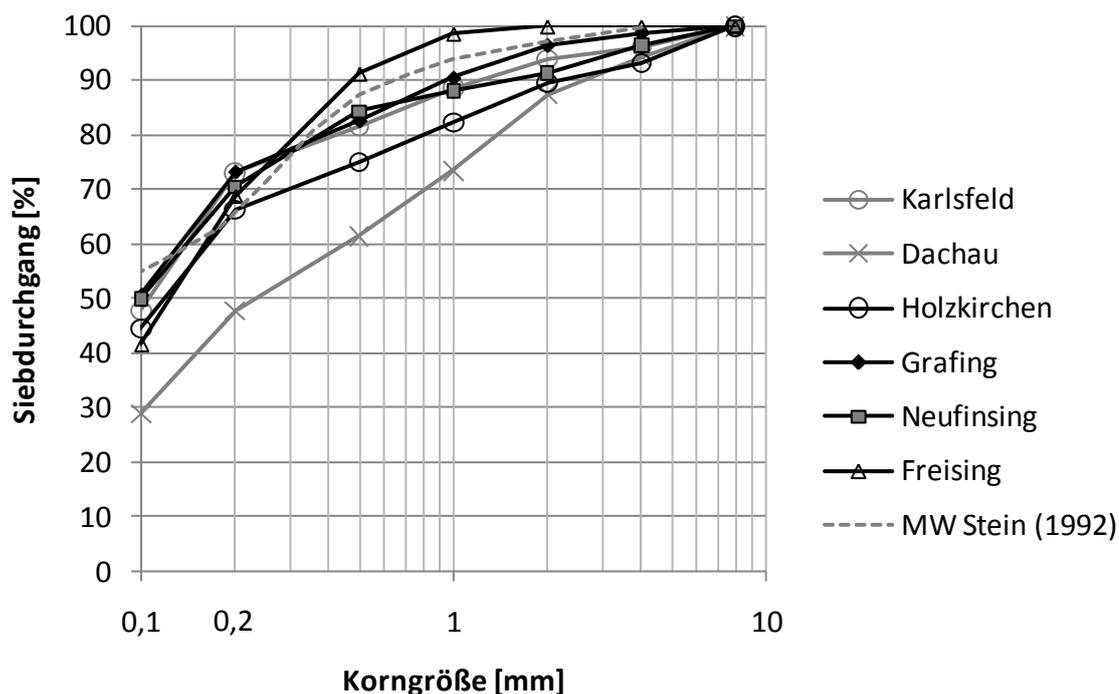


Abbildung 68: Sieblinien im Zulauf von 6 Kläranlagen bei Trockenwetter.

In Abbildung 69 sind Sieblinien im Ablauf der Sandfänge von 6 Kläranlagen im Raum München dargestellt. Die Messungen wurden jeweils zeitversetzt zu den Zulaufmessungen durchgeführt. Die Kornverteilungen sind feiner als im Zulauf. Der Mittelwert des Anteils der Korngrößen $< 0,2$ mm beträgt 80 %. Verglichen mit dem Mittelwert der Messungen von Stein (1992) von 98 % ist der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm im Ablauf bei den vorliegenden Messungen deutlich kleiner. Dies deutet auf geringere Abscheidegrade der untersuchten Sandfänge hin. Möglicherweise beeinflusst aber die Probenahme von Stein (1992), der den Ablauf mittels Hydrozyklon aufkonzentriert hat, das Ergebnis negativ. Denn insbesondere beim Ablauf ist wegen der geringen Sandkonzentration eine sehr starke Aufkonzentrierung nötig, die eine Zerstörung der Kornstruktur zur Folge haben kann und daher geringere Korngrößen als Ergebnis liefert.

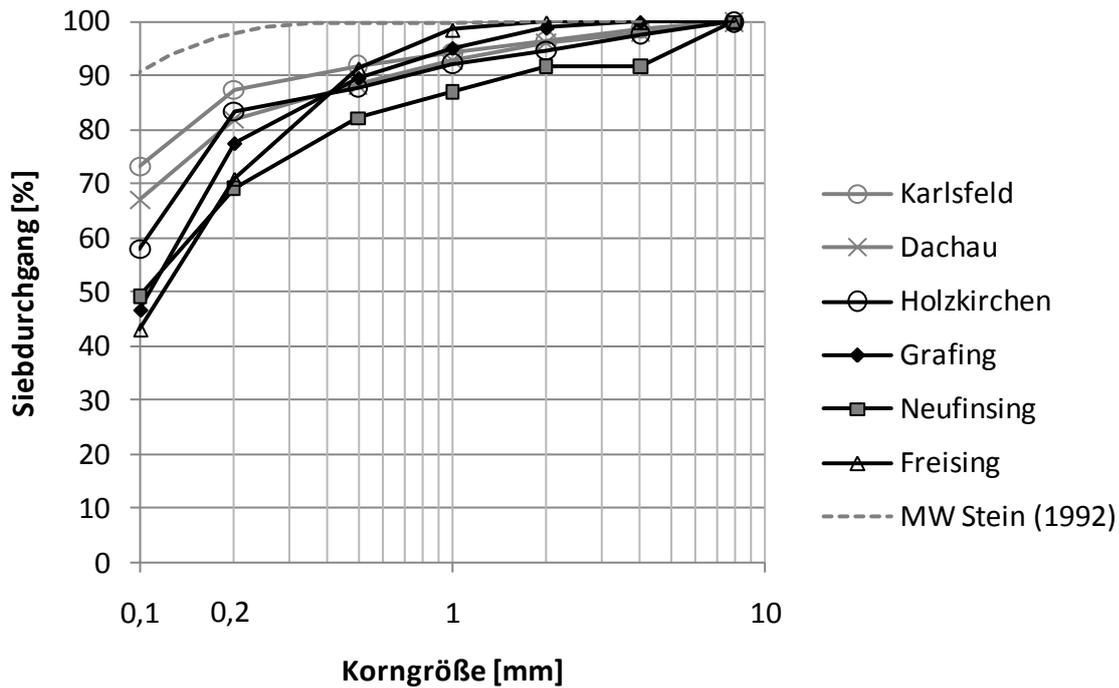


Abbildung 69: Sieblinien im Ablauf von 6 Kläranlagen bei Trockenwetter.

In Abbildung 70 ist die mittlere Kornverteilung im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges von der Kläranlage Geiselbullach bei Regenwetter dargestellt. Der Feinkornanteil im Zulauf ist mit 32 % hier deutlich kleiner als bei Trockenwetter. Der Unterschied zwischen der Kornverteilung im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges wird hier besonders deutlich. Im Ablauf des Sandfanges beträgt der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm 72 %, was auf eine gute Abscheideleistung des Sandfanges hindeutet. Der Glühverlust der Zulaufproben betrug im Mittel 64,2 %, der Glühverlust der Ablaufproben 81,8 %.

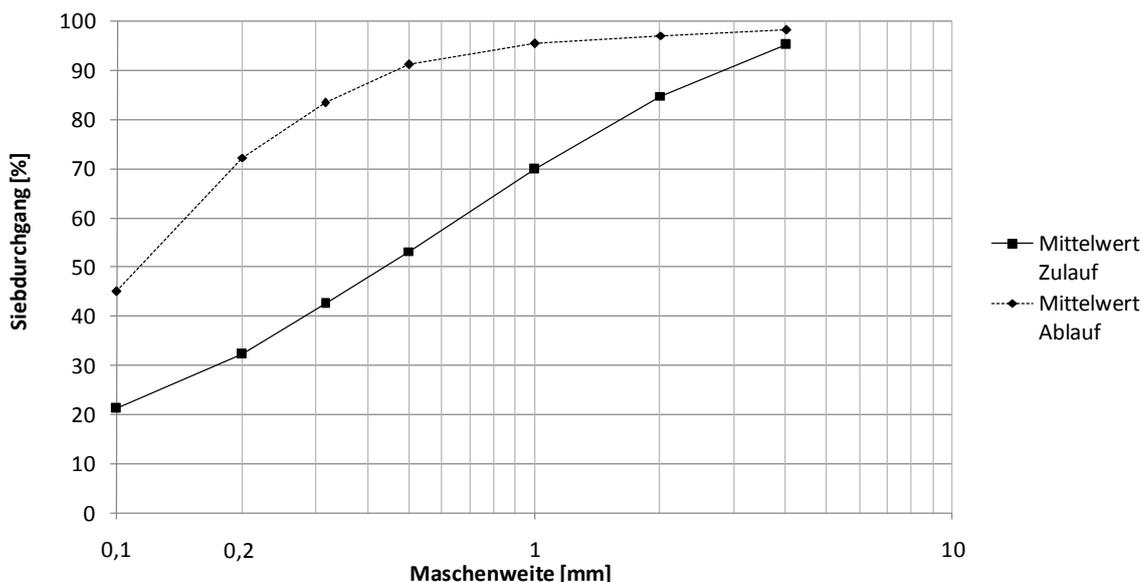


Abbildung 70: Mittlere Kornverteilung im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach (Durchflusszeit 20 min) bei Regenwetter.

Abbildung 71 zeigt die Ergebnisse von Messungen des Abscheidegrades am belüfteten Sandfang der Kläranlage Dachau. Die Konzentration an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm im Zulauf und im Ablauf, sowie der zugehörige Abscheidegrad, ist dargestellt. Es wird deutlich, dass der Abscheidegrad mit abnehmender Sandkonzentration im Zulauf des Sandfanges sinkt. Der geforderte Abscheidegrad von 95 % der Korngrößen $\geq 0,2$ mm wurde bei diesen Messungen nur beim ersten Wertepaar erreicht. Im Mittel beträgt der Abscheidegrad des belüfteten Sandfanges der Kläranlage Dachau bei diesen Messungen 87,2 % (Tabelle 17).

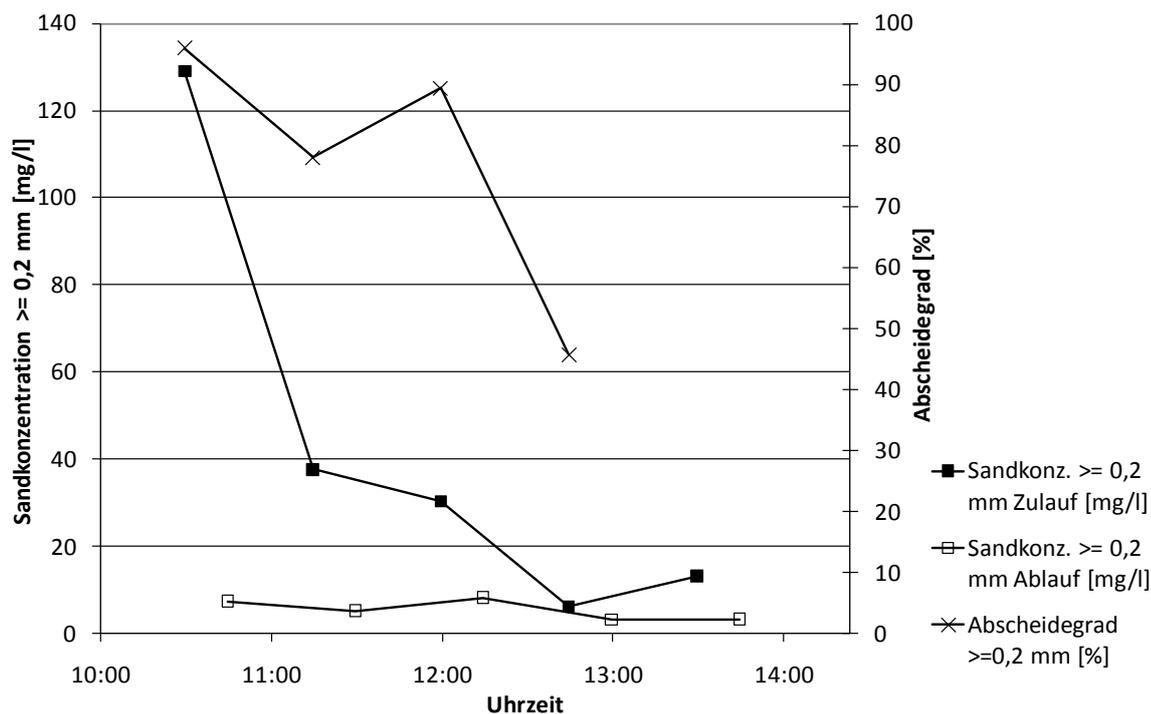


Abbildung 71: Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Dachau mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 55 min).

Auch bei den Messungen am Sandfang der Kläranlage Karlsfeld (Abbildung 72) hängt der Abscheidegrad stark von der Sandkonzentration im Zulauf ab. Je höher die Sandkonzentration im Zulauf, desto besser ist der Abscheidegrad. Die Konzentration an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm beträgt im Zulauf nur maximal 19,3 mg/l. Bei diesen Messungen wurde der Abscheidegrad nach DIN 19569, Teil 2 (2002) nicht erreicht. Ursache hierfür könnte beim Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, neben den geringen Sandkonzentrationen im Zulauf des Sandfanges, der Lufteintrag von $1,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ sein. Dieser Lufteintrag ist höher als die Empfehlungen der ATV (1998) von maximal $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden die Fließgeschwindigkeiten und der Turbulenzen gemessen (Kapitel 0). Die Walzengeschwindigkeiten waren mit bis zu $-0,33 \text{ m/s}$ tatsächlich zu hoch (Tabelle 16). Der Abscheidegrad könnte hier vermutlich durch Reduzierung der Luftzufuhr verbessert werden.

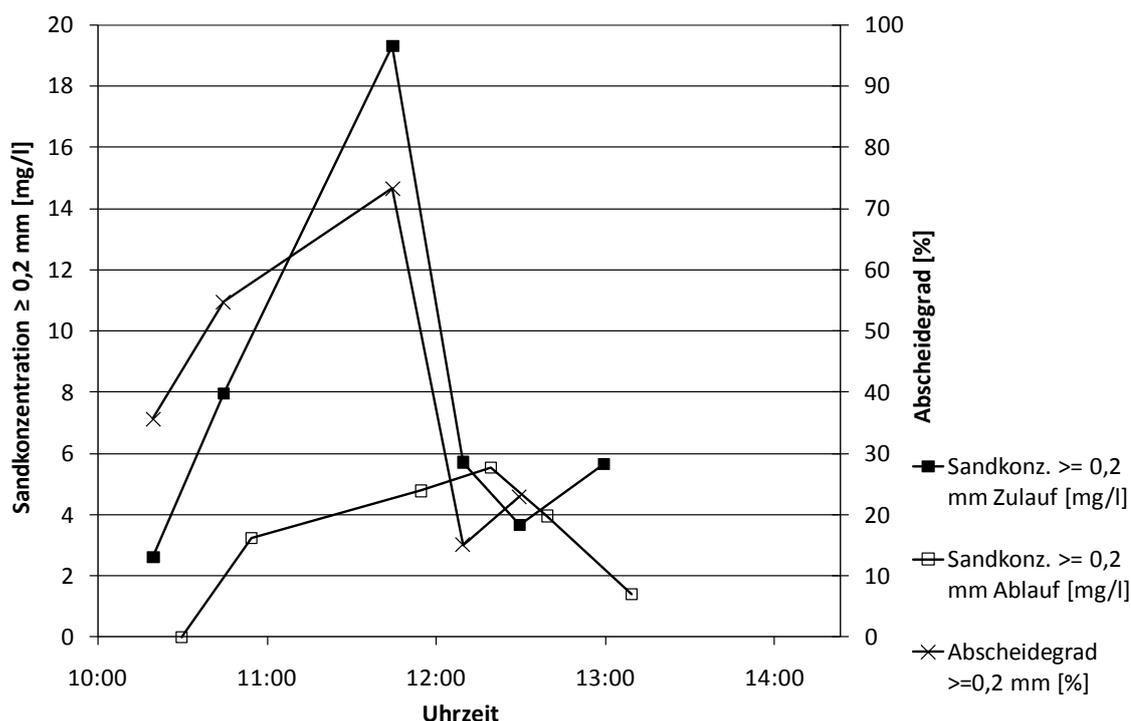


Abbildung 72: Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 23 min).

In Abbildung 73 sind die Ergebnisse der Messungen des Abscheidegrades des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach bei Regenwetter dargestellt. Zu Beginn der Messungen liegen Konzentrationen an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm von maximal 1.200 mg/l vor, die dann aber stark absinken. Hier wird die Konzentrationsabhängigkeit des Abscheidegrades besonders deutlich. Bei hohen Sandkonzentrationen wird der geforderte Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm von 95 % eingehalten. Erst bei Absinken der Sandkonzentration im Zulauf auf unter 100 mg/l verringert sich der Abscheidegrad unter den geforderten Wert. Im Mittel beträgt der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm 91,1 %. Die Sandkonzentration im Ablauf beträgt im Mittel 27,7 mg/l.

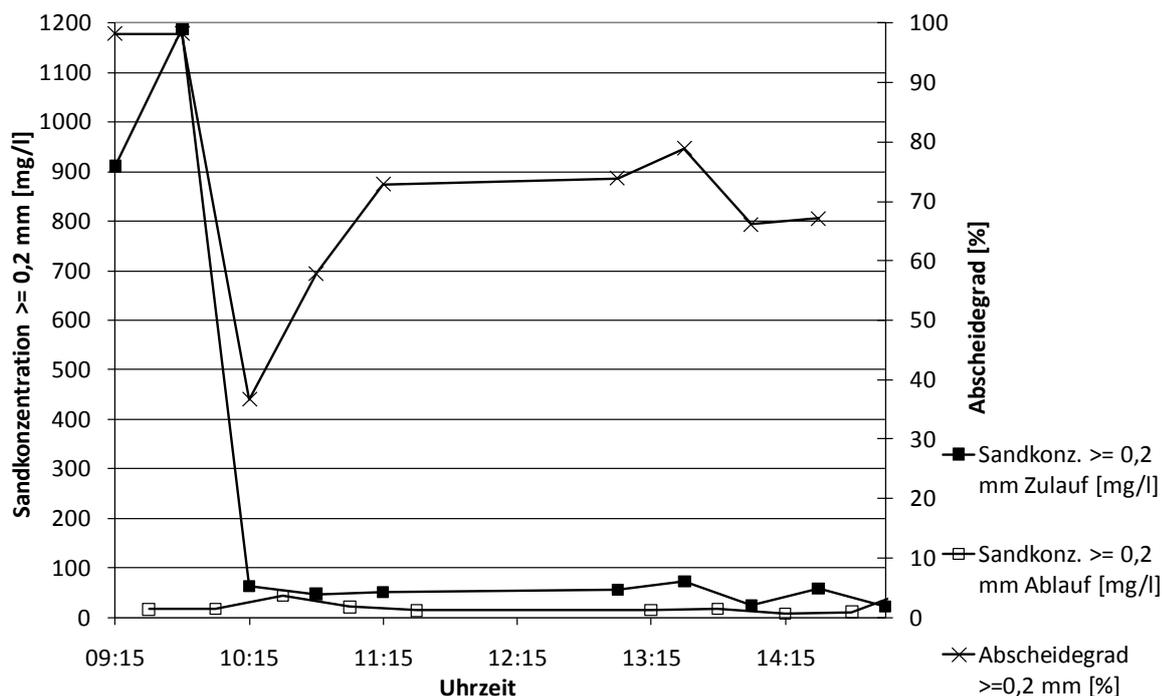


Abbildung 73: Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 20 min) bei Regenwetter.

In Tabelle 17 sind die Ergebnisse aller Messungen der Korngrößenverteilungen und Abscheidegrade zusammengefasst. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aller Messungen. Im Zulauf der Sandfänge der Kläranlagen Karlsfeld, Holzkirchen und Neufinsing wurden sehr geringe Sandkonzentrationen von 35,8 mg/l, 13,7 mg/l und 20,6 mg/l gemessen. Dies liegt zum einen daran, dass das Entwässerungsverfahren bei diesen Kläranlagen im Trennverfahren erfolgt, zum anderen daran, dass die Messungen bei Trockenwetter durchgeführt wurden. Die berechneten, zugehörigen Gesamtabseidegrade sind mit 23,7 % im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld und mit 39,9 % im Sandfang der Kläranlage Neufinsing gering, bei Holzkirchen tritt sogar ein negativer Wert auf. Gründe für den niedrigen Abscheidegrad des Sandfanges der Kläranlage Holzkirchen sind die geringe Sandkonzentration im Zulauf, sowie die geringe Fließtiefe im Zulaufgerinne und im Ablaufgerinne, wodurch die Probenahme erschwert wurde.

Die Abscheidegrade an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm liegen bei den Trockenwettermessungen im Mittel zwischen 20 % und 87 %, bei der Regenwettermessung bei 91 %. Dies zeigt, dass trotz teilweise hoher Durchflusszeit die Vorgaben bezüglich Abscheidegrad nach DIN 19562 (2002) und DIN EN 12255-3 (2001) nicht erreicht werden. Betrachtet man aber Einzelwerte, wird deutlich, dass insbesondere bei hohen Sandkonzentrationen bei den Sandfängen der Kläranlagen Dachau und Geiselbullach, Abscheidegrade von 95 % der Korngrößen $\geq 0,2$ mm zeitweise erreicht werden.

Alle vier bei Trockenwetter beprobten Kläranlagen weisen bei unterschiedlichen Abscheidegraden im Mittel ähnlich niedrige Ablaufkonzentrationen an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm zwischen 3,2 mg/l und 5,5 mg/l auf. Lediglich bei der Messung bei Regenwetter auf der Kläranlage Geiselbullach beträgt die Ablaufkonzentration an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm 27,7 mg/l bei einem Abscheidegrad von durchschnittlich 91,1 %.

Tabelle 17: Zusammenstellung der Ergebnisse der Messungen der Sandkonzentrationen und der Abscheidegrade an fünf Kläranlagen.

Sandfang	Sandkonzentration Zulauf	Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm Zulauf	Sandkonzentration Ablauf	Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm Ablauf	Durchflusszeit	Luft-eintrag	Abscheidegrad gesamt	Abscheidegrad $\geq 0,2$ mm
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	min	$\frac{Nm^3}{m^3h}$	%	%
Dachau	72,4	43,3	32,8	5,5	55	1,3	54,7	87,2
Karlsfeld	35,8	7,5	27,3	3,2	23	1,9	23,7	57,9
Holz-kirchen	13,7	4,2	14,3	3,4	75	k.A.	-4,4	20,3
Geisel-bullach	283,7	249,6	75,7	27,7	20	1,1	73,3	91,1
Neufinsing	20,6	6,3	12,4	3,8	25	k.A.	39,9	39,0

Aus Tabelle 17 geht hervor, dass die Konzentration der Korngrößen $\geq 0,2$ mm im Zulauf des Sandfanges den Abscheidegrad beeinflusst. Je höher die Sandkonzentration ansteigt, desto besser wird der Abscheidegrad. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 74 dargestellt. Es ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Abscheidegrad und Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm. Besonders deutlich ist die Verringerung des Abscheidegrades bei Sandkonzentrationen unter 50 mg/l. Bei dieser Darstellung ist zu beachten, dass die anderen Randbedingungen, die den Abscheidegrad wesentlich beeinflussen, wie z.B. Lufteintrag und Einblastiefe bei den Messungen unterschiedlich waren.

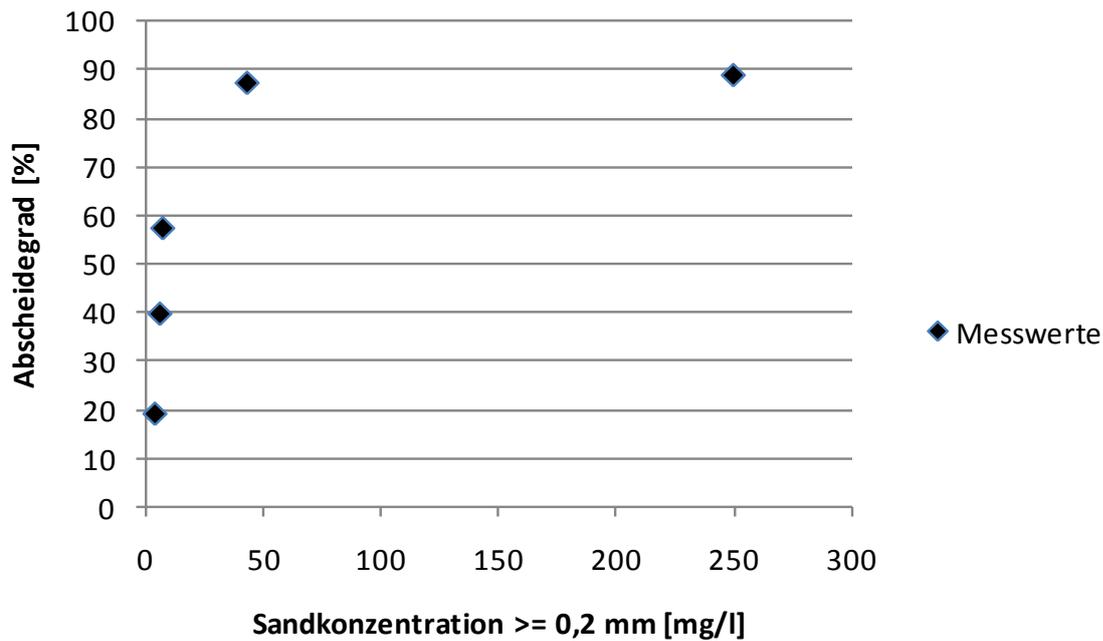


Abbildung 74: Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm in Abhängigkeit von der Sandkonzentration $\geq 0,2$ mm im Rohabwasser.

6.1.3.2 Abscheidegrad durch Untersuchung von Sandfanggut und Primärschlamm des Vorklärbeckens

Der Zulauf des Sandfanges der Kläranlage München I kann bei Regenwetter maximal $10 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen. Aufgrund der Größe dieses Volumenstroms wurde hier kein Teilstrom aus dem Zu- und Ablaufgerinne entnommen, sondern versucht, die Abscheideleistung des Sandfanges über Analysen des Sandfanggutes und des Schlammes im Vorklärbecken zu beurteilen. Nachteilig bei dieser Untersuchungsmethode ist, dass der Abscheidegrad nur qualitativ beurteilt werden kann. Über drei Tage hinweg wurden insgesamt 15 Proben des Sandfanggutes genommen und von diesen die Parameter Trockenrückstand, Glühverlust und die Korngrößenverteilung untersucht. Die Proben wurden aus dem Zulauf des Sandklassierers genommen. Die Proben wiesen einen durchschnittlichen Trockenrückstand von 15,6 % und einen durchschnittlichen Glühverlust von 77,3% auf. Bei vorhergegangenen betriebseigenen Messungen wurde ein ähnlich hoher Glühverlust von 76 % ermittelt. Der hohe Glühverlust lässt auf eine sehr hohe Abscheidung organischen Materials und somit auf einen sehr hohen Abscheidegrad im Sandfang schließen. In Abbildung 75 ist die Korngrößenverteilung des Sandfanggutes dargestellt. Der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm beträgt zwischen 20 und 60 %.

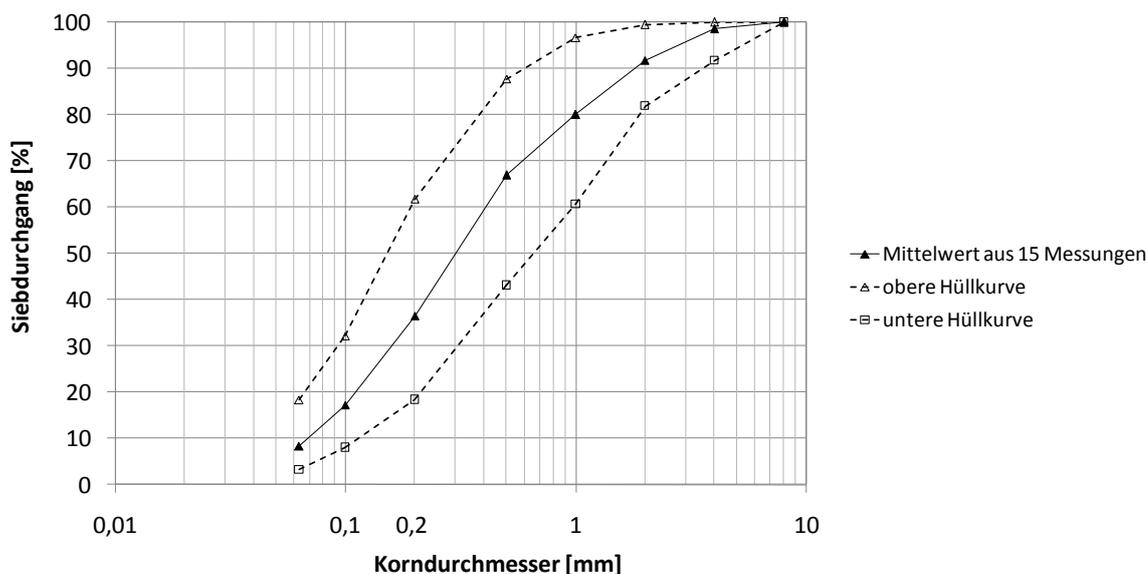


Abbildung 75: Kornverteilung des Sandfangguts der Kläranlage München I.

Im Vergleich mit Messungen von Londong (1990) und Hitzler (2002), die einen Bereich der Korngrößen $< 0,2$ mm von 10 % bis 35 % ermittelt haben, sind die Anteile der Korngrößen $< 0,2$ mm größer, was wiederum auf einen hohen Abscheidegrad schließen lässt.

Schließlich wurden Proben aus der Frischschlammleitung des Vorklärbeckens auf die Parameter Trockenrückstand, Glühverlust und Korngrößenverteilung untersucht. Im Vorklärbecken lag ein durchschnittlicher Trockenrückstand von 5,20 % vor, sowie ein durchschnittlicher Glühverlust von 73,46 %. Dieser geringe Trockenrückstand und der hohe Glühverlust deuten darauf hin, dass der Schlamm im Vorklärbecken vorwiegend aus Wasser und organischer Substanz besteht und nur wenig Sand eingetragen wird. Aus Siebanalysen ergab sich ein Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm von 70 bis 80 %. Diese qualitative Beurteilung lässt auf einen sehr hohen Abscheidegrad schließen, eine absolute Aussage kann aber nicht getroffen werden.

6.2 Untersuchungen an einem physikalischen Sandfangmodell im Maßstab 1:4

6.2.1 Auswahl des Versuchssandes

Der Versuchssand wurde unter der Annahme ausgewählt, dass die Sinkgeschwindigkeiten in der großtechnischen Anlage in Karlsfeld und im physikalischen Modell ähnlich sind. Nach den Ähnlichkeitsgesetzen von Froude halbieren sich bei einem Maßstab von 1:4 die Sinkgeschwindigkeiten im physikalischen Modell gegenüber der großtechnischen Anlage. Diesen Ansatz hat

schon Patt (1990) seinen Versuchen zugrundegelegt und dessen Gültigkeit bewiesen. Er wählte allerdings den Widerstandsbeiwert nach Kazanskij (1981) ohne Berücksichtigung der Kornform zur Berechnung der Sinkgeschwindigkeit.

In Abbildung 76 sind im Maßstab 1:4 verkleinerte Korngrößen nach verschiedenen Ansätzen für die Sinkgeschwindigkeit dargestellt (Oseen, 1927; Zanke, 1982; Dietrich, 1982; Cheng, 1997; Wu und Wang, 2006). Für die Berechnung wurde zunächst die Sinkgeschwindigkeit jedes Korndurchmessers im großtechnischen Maßstab berechnet, dann halbiert und daraus iterativ der Korndurchmesser im physikalischen Modell (Maßstab 1:4) bestimmt. Für die Trennkorngröße von 0,2 mm in der Natur ergab sich je nach gewähltem Ansatz eine verkleinerte Korngröße von 0,1 mm bis 0,13 mm. Für die weitere Auswertung wurde als verkleinerte Trennkorngröße die Korngröße 0,1 mm gewählt.

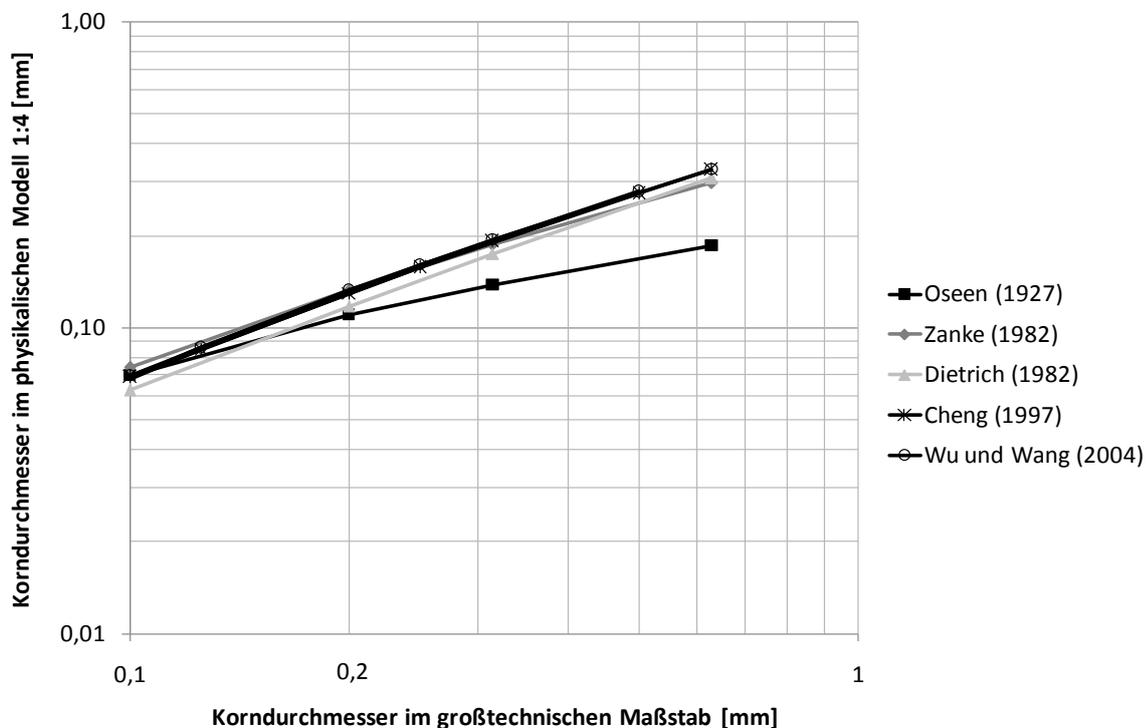


Abbildung 76: Korndurchmesser im großtechnischen Maßstab und im Maßstab 1:4 verkleinerte Korngröße mit verschiedenen Ansätzen für die Sinkgeschwindigkeit.

Nun musste noch die Korngrößenverteilung des Versuchssandes ermittelt werden. Hierfür wurden die in Kapitel 6.1.3.1 dargestellten Korngrößenverteilungen der Sande im Zulauf von belüfteten Sandfängen zu Grunde gelegt und im Maßstab 1:4 verkleinert.

In Abbildung 77 sind die nach dem Ansatz von Dietrich (1982) im Maßstab 1:4 verkleinerten Korngrößenverteilungen der Sande im Zulauf der Kläranlagen Karlsfeld, Dachau und Geiselbullach dargestellt. Zusätzlich sind die vier gewählten

Versuchssande abgebildet. Die Versuchssande sollten sowohl Ähnlichkeit zu den gemessenen Korngrößenverteilungen, aber auch gutes Absetzverhalten aufweisen. Der Sand im Zulauf der Kläranlage Karlsfeld hat in der Verkleinerung einen Anteil der Korngrößen $< 0,06$ mm von 48 %. Da sich diese Kornfraktion nicht mehr absetzt, eignet sich dieser Sand nicht als Versuchssand. Es wurden im Handel erhältliche Sande gewählt, daher besteht keine absolute Übereinstimmung der Sieblinien. Bei Sand 1 handelt es sich um den größten Sand mit einem Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm von nur 7,9 %, Sand 2 hat einen Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm von 27 % und Sand 3 von 33,3 %. Sand 4 hat mit einem Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm von 35 % den höchsten Feinkornanteil. Die Versuchssande 2-4 stimmen sehr gut mit der bei Regenwetter gemessenen Korngrößenverteilung im Zulauf der Kläranlage Geiselbullach überein. Sand 1 wurde gewählt, um den Einfluss von größerem Sand auf das Absetzverhalten zu untersuchen.

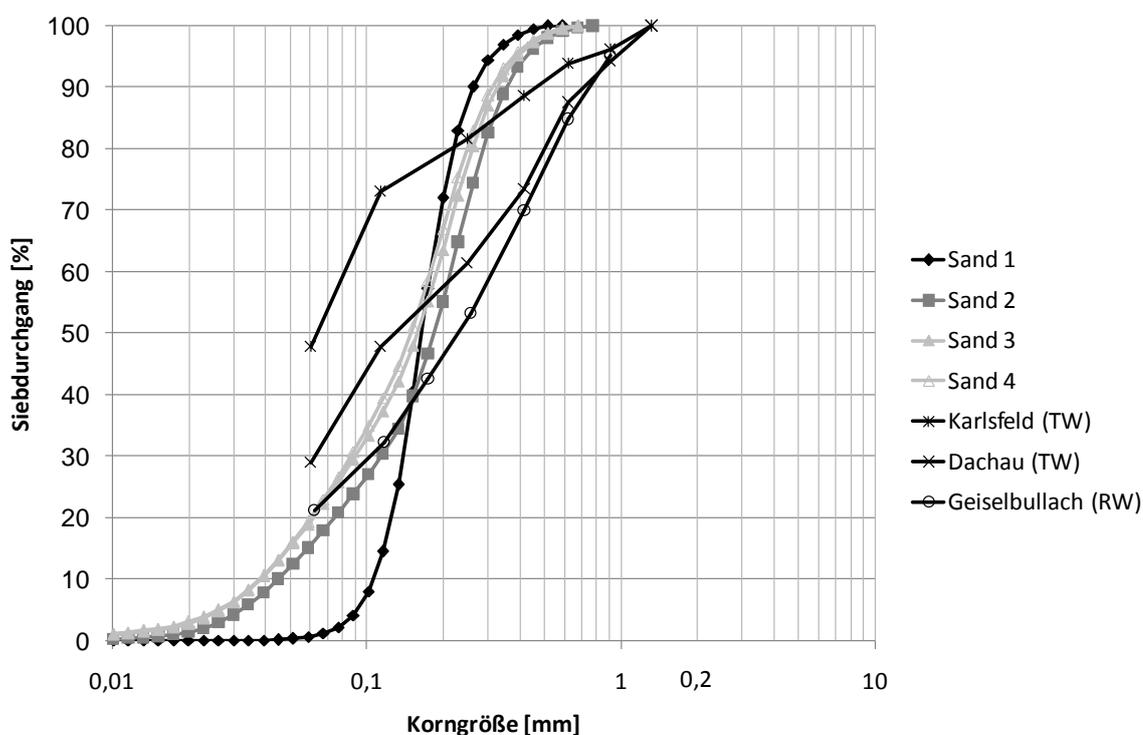


Abbildung 77: Kornverteilungen der nach Dietrich (1982) im Maßstab 1:4 verkleinerten Sande im Zulauf der Kläranlagen Karlsfeld, Dachau und Geiselbullach (Messung mit Siebung) und Korngrößenverteilungen der gewählten Versuchssande 1, 2, 3 und 4 (Messung mit Laserbeugung).

In Tabelle 18 sind die charakteristischen Parameter der Korngrößenverteilung der vier ausgewählten Versuchssande dargestellt. Beim Vergleich der Ergebnisse aus der Siebung mit denen mit Laserbeugung fällt auf, dass der Anteil größerer Korndurchmesser bei Messung mit Laserbeugung deutlich größer ist. Während bei allen vier Sanden die Anteile der Korngrößen $\geq 0,1$ mm für beide Verfahren ähnlich

sind, beträgt der Anteil der Korngrößen $\geq 0,2$ mm bei Sand 1 mit Laserbeugung 28 % und bei Messung durch Siebung nur 6,4 %. Für die weiteren Auswertungen wurde die Laserbeugung gewählt, da die Ergebnisse wegen Homogenität des verwendeten Quarzsandes sehr gut miteinander vergleichbar waren.

Tabelle 18: Charakteristische Parameter der Korngrößenverteilung der vier gewählten Versuchssande.

Messverfahren	Parameter	Einheit	Sand 1	Sand 2	Sand 3	Sand 4
Siebung	d_{50}	mm	0,15	0,17	0,13	0,13
	d_m	mm	0,18	0,19	0,14	0,14
	Anteil $\geq 0,1$ mm	%	94,0	78,4	62,8	63,3
	Anteil $\geq 0,2$ mm	%	6,4	35,8	20,9	15,6
Laserbeugung	d_{50}	mm	0,16	0,18	0,16	0,15
	d_m	mm	0,19	0,21	0,18	0,18
	Anteil $\geq 0,1$ mm	%	92,1	73,0	66,7	65,0
	Anteil $\geq 0,2$ mm	%	28,0	44,9	36,4	33,1

6.2.2 Ergebnisse der Kalibrierung des physikalischen Modells

6.2.2.1 Ähnlichkeit des Lufteintrages

Ziel der Kalibrierung war es, den Lufteintrag zu finden, bei dem sich im physikalischen Modell ein ähnliches Geschwindigkeitsfeld wie in der Natur einstellt. Zur Auswertung der Güte der Anpassung wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 zwischen den Messwerten der Geschwindigkeit v in der Natur und im physikalischen Modell herangezogen. Mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 kann die Anpassung einer Punktwolke durch eine Regression beurteilt werden (Toutenbourg et al., 1995). Je näher R^2 an 1,0 liegt, desto besser ist die Anpassung. Dabei gab es einmal die Möglichkeit das Bestimmtheitsmaß zwischen den im Maßstab 1:4 verkleinerten Messwerten im großtechnischen Sandfang und den Messwerten im physikalischen Modell zu berechnen oder zuerst die Messwerte durch parabolische Ausgleichskurven anzupassen und danach das Bestimmtheitsmaß zu berechnen. Es wurden beide Methoden durchgeführt, hier aber nur die Messwerte dargestellt, da dies das unverfälschtere Ergebnis darstellt. Der Trend war bei beiden Auswertungen gleich. Das Bestimmtheitsmaß wurde mit Gleichung (66) berechnet.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_M - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (66)$$

Für y_i wurden in Gleichung (66) die im Maßstab 1:4 verkleinerten Messwerte der Geschwindigkeitskomponente v am Originalsandfang in Karlsfeld und deren Mittelwert über die Höhe \bar{y} eingesetzt. Für y_M wurden in Gleichung (66) die entsprechenden Messwerte am physikalischen Sandfangmodell eingesetzt. Für die Berechnung des Bestimmtheitsmaßes wurden die Messwerte über alle 7 Messprofile in Sandfanglängsrichtung gemittelt. Je näher das Bestimmtheitsmaß zwischen den Messungen am Originalsandfang in Karlsfeld und den Messwerten am physikalischen Sandfangmodell dem Wert 1 kommt, desto besser die Ähnlichkeit der Geschwindigkeitsprofile. In Abbildung 78 ist das Ergebnis der Kalibrierungsversuche dargestellt.

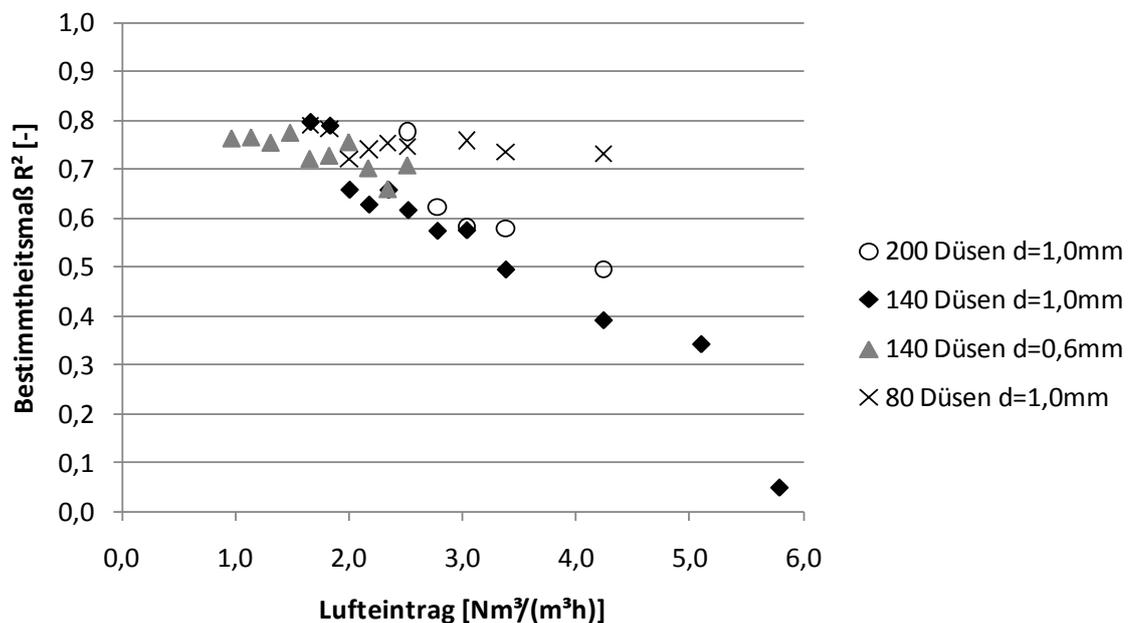


Abbildung 78: Bestimmtheitsmaß R^2 von den Messwerte am Originalsandfang in Karlsfeld und den Messwerten im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag, der Zahl n und dem Durchmesser d_D der Düsen.

Die Verläufe der Bestimmtheitsmaße sind bei 200 Düsen mit $d = 1 \text{ mm}$ und bei 140 Düsen mit $d = 1 \text{ mm}$ ähnlich. Bei 200 Düsen mit Durchmesser 1 mm wird ein Bestimmtheitsmaß von $0,78$ bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erreicht und nimmt mit steigendem Lufteintrag bis auf $0,5$ bei einem Lufteintrag von $4,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ab. Bei 140 Düsen mit Durchmesser 1 mm wird ein Bestimmtheitsmaß von $0,8$ bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erreicht und nimmt dann bis zum Wert $0,05$ bei einem Lufteintrag von $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ab.

Bei 80 Düsen mit Durchmesser 1 mm und 140 Düsen mit $0,6 \text{ mm}$ ergeben sich andere Verläufe. Eine Steigerung des Lufteintrags führt nur zu geringfügiger Verringerung des Bestimmtheitsmaßes. Bei 80 Düsen mit Durchmesser $1,0 \text{ mm}$

beträgt das Bestimmtheitsmaß 0,79 bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Bei 140 Düsen mit Durchmesser von 0,6 mm konnte der minimal mögliche Lufteintrag auf $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ gesenkt werden. Das Optimum des Bestimmtheitsmaßes von 0,77 ergab sich bei diesen Messungen bei Lufteinträgen zwischen $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $1,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Im Hinblick auf möglichst gute Übereinstimmung zwischen Natur und dem physikalischen Modell, bei möglichst niedrigem Energieeintrag, wurde der Lufteintrag $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ mit 140 Düsen mit Durchmesser 0,6 mm gewählt. Vorteil dieser Auswahl ist, dass sowohl bei Senkung und bei Steigerung des Lufteintrags eine Ähnlichkeit zum Originalsandfang gewährleistet ist. Der minimal mögliche Lufteintrag betrug $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Als maximaler Lufteintrag wurde für die folgenden Messungen $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ gewählt, da bei einer weiteren Steigerung des Lufteintrags die Blasengröße sehr groß wird.

6.2.2.2 Einfluss des Düsendurchmessers auf die Walzenströmung und die turbulente kinetische Energie

Beim belüfteten Sandfang ist die Abhängigkeit der Walzenströmung vom Lufteintrag bzw. von der Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen besonders interessant. In Abbildung 79 ist die gemessene Maximalgeschwindigkeit v im Abstand von 0,06 m von der Wasseroberfläche dargestellt. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten mit steigendem Lufteintrag ansteigen. Die geringsten Geschwindigkeiten treten bei 80 Düsen mit 1 mm Durchmesser auf, die größten bei 140 Düsen mit Durchmesser 1 mm. So tritt bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ die niedrigste Geschwindigkeit von $-0,1 \text{ m/s}$ bei 80 Düsen auf und die höchste Geschwindigkeit von $-0,15 \text{ m/s}$ bei 140 Düsen mit Durchmesser 1 mm.

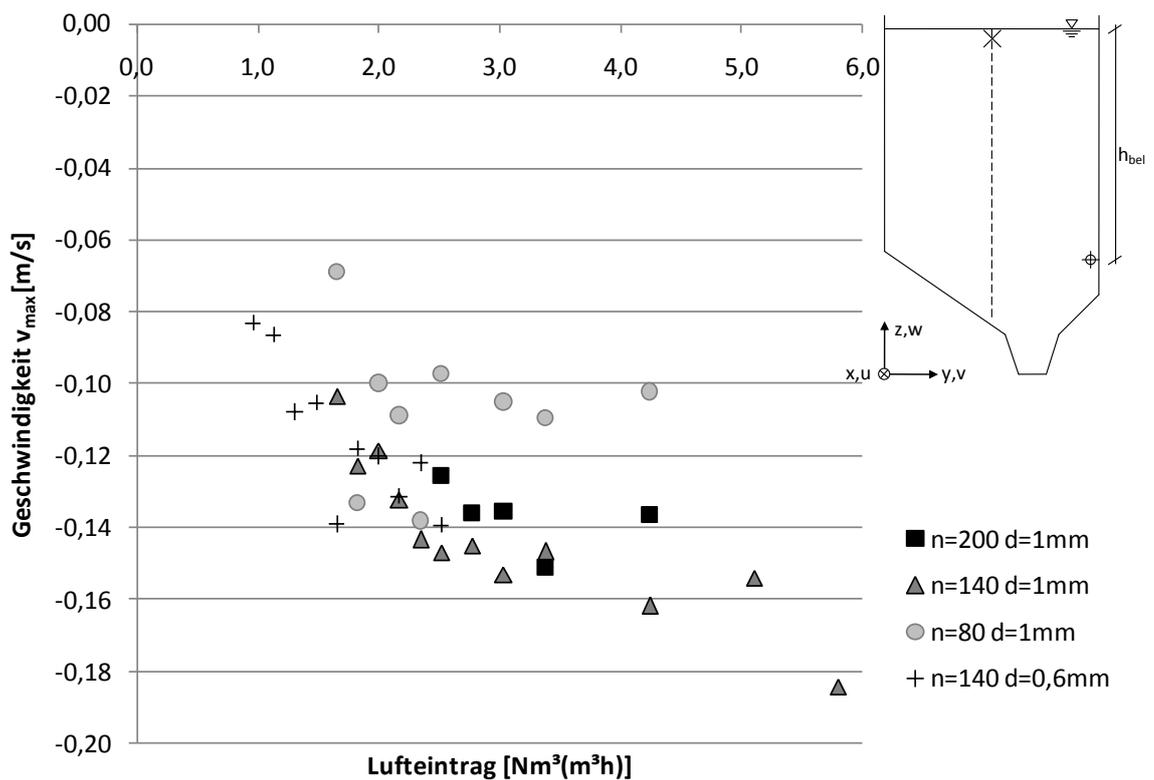


Abbildung 79: Maximalgeschwindigkeit v_{\max} [m/s] im physikalischen Modell nahe der Wasseroberfläche (Messwerte bei $z = 0,76$ m) in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag.

Da die Messungen direkt an der Wasseroberfläche mit der verwendeten Sonde nicht möglich waren, wurden die Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} an der Wasseroberfläche ($z = 0,82$ m) aus den Messwerten durch quadratische Regressionskurven extrapoliert und in Abbildung 80 dargestellt. Vorteil der Arbeit mit durch Regression angepassten Daten ist ein zusätzlicher Glättungseffekt.

Es ergibt sich hier grundsätzlich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Lufteintrag und Maximalgeschwindigkeit, wie auch schon Kobus (1973) festgestellt hat. Je höher der Lufteintrag, desto höher auch die Maximalgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche. Die Verläufe der extrapolierten Geschwindigkeiten v_{\max} in Abhängigkeit vom Lufteintrag stimmen gut mit dem in Abbildung 14 dargestellten Zusammenhang zwischen Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen und Lufteintrag überein.

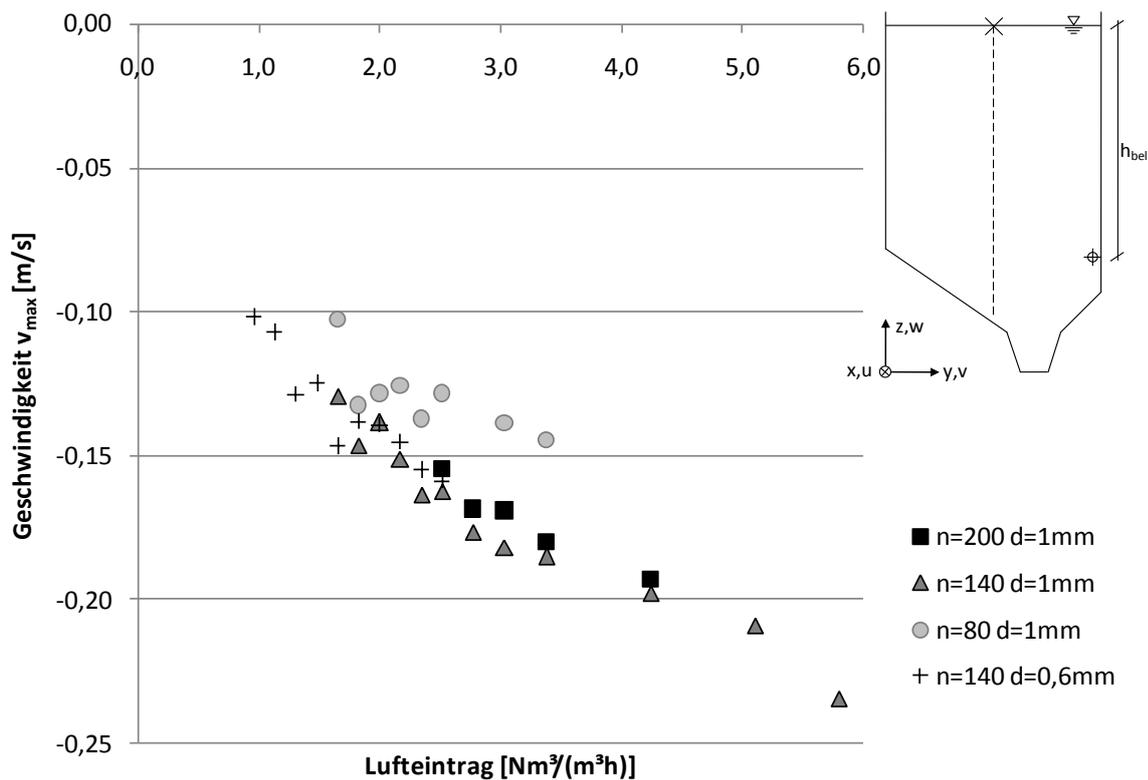


Abbildung 80: Maximale Geschwindigkeit v_{\max} im physikalischen Sandfangmodell direkt an der Wasseroberfläche ($z = 0,82$ m) in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag (extrapoliert mittels Regressionen).

Die Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} an der Wasseroberfläche bei 200 Düsen mit Durchmesser 1,0 mm sind ähnlich der bei 140 Düsen mit Durchmesser 0,6 mm. So führt ein Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³h) sowohl bei 140 Düsen mit Durchmesser 0,6 mm, als auch bei 200 Düsen mit Durchmesser 1,0 mm zu einer Maximalgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche von -0,16 m/s. Die theoretisch berechnete Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen nach Gleichung (13) von Meersmann (1962) und Gleichung (17) von Soo (1990) ist für diese beiden Einstellungen -0,18 m/s. Bei 140 Düsen mit einem Durchmesser 1,0 mm ergeben sich höhere Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche. So betragen die Geschwindigkeiten bei einem Lufteintrag von 2,8 Nm³/(m³h) für 200 Düsen mit Durchmesser 1,0 mm -0,17 m/s und für 140 Düsen mit Durchmesser 1,0 mm -0,18 m/s.

Auffällig ist, dass bei nur 80 Düsen die Maximalgeschwindigkeit nicht wie erwartet am höchsten ist, sondern niedriger ist als bei 140 oder 200 Düsen. Dies könnte daran liegen, dass bei 80 Düsen schon der Zustand „Strahlgasen“ vorliegt. Der Zustand Strahlgasen zeichnet sich nach Kobus (1973) dadurch aus, dass ein voll turbulenter Blasenstrom vorliegt, bei dem die Blasengröße weder vom Düsendurchmesser noch vom Lufteintrag abhängig ist. Ein Vergleich mit dem

Übergangsbereich zwischen Blasengasen und Strahlgasen nach Patt (1990) (Abbildung 11) zeigt, dass für 140 Düsen mit Düsendurchmesser 0,6 mm im physikalischen Sandfangmodell ab einem Lufteintrag von $3,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ der Zustand „Strahlgasen“ vorliegt. Die Versuche wurden also im Zustand „Blasengasen“ durchgeführt. Im Vergleich mit Tabelle 3 von Kobus (1973) liegt dabei der Bereich II vor, in dem die Blasengröße sowohl vom Lufteintrag als auch vom Düsendurchmesser abhängig ist. Das Gleiche gilt für den Düsendurchmesser 1,0 mm mit 140 Düsen und 200 Düsen. Der Übergang zum Strahlgasen erfolgt hier bei $5,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bzw. $7,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Beim Düsendurchmesser von 1,0 mm mit 80 Düsen erfolgt der Übergang zum Strahlgasen schon bei $2,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Bei den letzten drei Messwerten dieser Reihe lag also schon der Zustand „Strahlgasen“ vor.

Die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} ist ebenfalls vom Lufteintrag abhängig (Abbildung 81). Je größer der Lufteintrag, desto größer wird v_{Sohl} . Bei 140 Düsen mit Durchmesser von 1 mm beträgt v_{Sohl} bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $0,05 \text{ m/s}$ und bei einem Lufteintrag von $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $0,1 \text{ m/s}$. Die Werte der unteren Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} betragen ungefähr 40 % der Werte der oberen Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{max} . Die Verläufe der Kurven sind ähnlich. Auch bei der unteren Randgeschwindigkeit der Wasserwalze sind die Werte bei 80 Düsen mit $d = 1 \text{ mm}$ am geringsten. Bei einem Lufteintrag von $4,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ werden maximal $0,07 \text{ m/s}$ erreicht gegenüber $0,09 \text{ m/s}$ bei 140 Düsen mit $d = 1 \text{ mm}$.

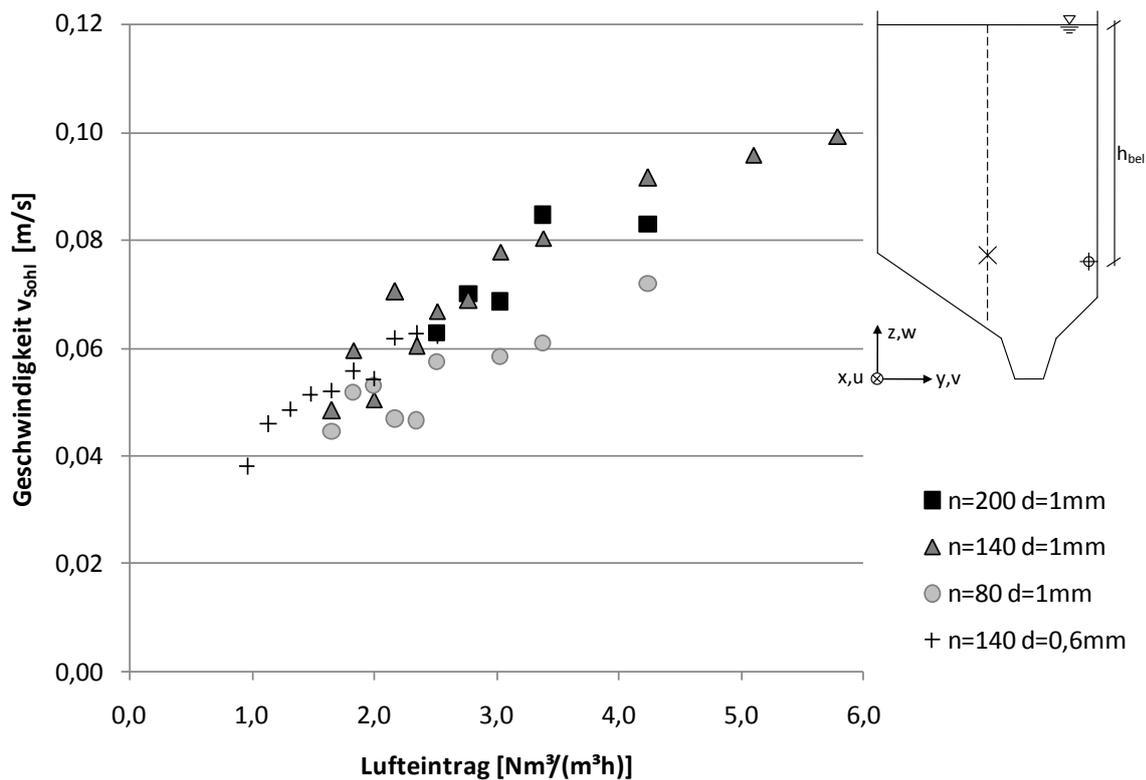


Abbildung 81: Maximalgeschwindigkeit v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Luft eintrag (Messungen).

Eine Betrachtung des Bodenabstands, an dem die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} auftritt, und der Nulldurchgänge ergab, dass diese unabhängig vom Luft eintrag zu sein scheinen. Der Bodenabstand der unteren Randgeschwindigkeit der Wasserwalze beträgt $z = 0,32$ m und der Nulldurchgang der Walzenströmung beträgt $z = 0,6$ m. Eine geringe Erhöhung dieser Werte bei steigendem Luft eintrag ist möglich.

In Abbildung 82 ist die turbulente kinetische Energie in Abhängigkeit vom Luft eintrag dargestellt. Für 200 und 140 Düsen lassen sich die Messwerte durch lineare Gleichungen beschreiben. Wie auch bei der Aufstiegs geschwindigkeit der Luftblasen, ergeben sich auch hier für die turbulente kinetische Energie bei 200 Düsen mit $d = 1$ mm und 140 Düsen mit $d = 0,6$ mm ähnliche Verläufe. Für 140 Düsen mit $d = 1$ mm ergibt sich eine höhere turbulente kinetische Energie. Eine Ausnahme stellen die Messungen mit nur 80 Düsen dar. Bis zu einem Luft eintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ist ein linearer Anstieg der turbulenten kinetischen Energie zu beobachten. Steigt der Luft eintrag weiter an, nimmt die turbulente kinetische Energie nur noch unterproportional zu. Dies stimmt genau mit der zuvor diskutierten Grenze zum „Strahl gasen“ überein, die bei 80 Düsen bei $2,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erreicht wird.

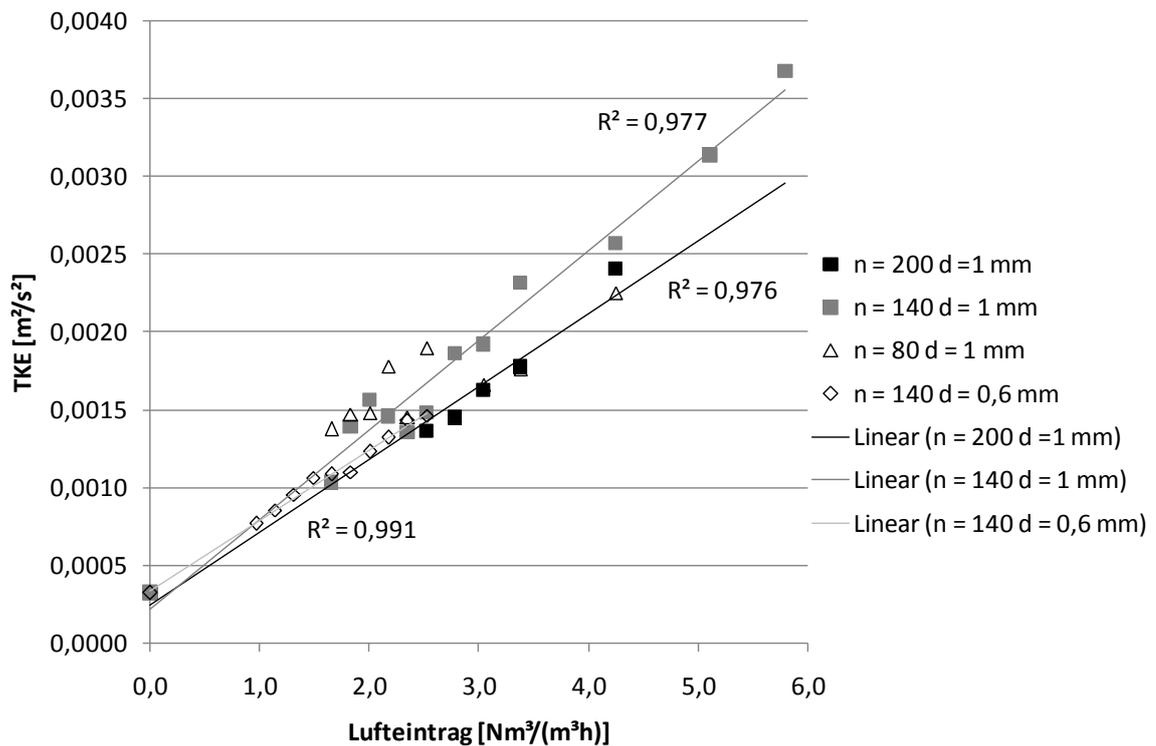


Abbildung 82: Turbulente kinetische Energie TKE im physikalischen Sandfangmodell gemittelt über die Sandfangtiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Luftbeitrag.

6.2.3 Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie im kalibrierten physikalischen Modell

6.2.3.1 Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Blasengröße

Um die tatsächliche Blasenform und Blasengröße mit den theoretischen Ansätzen aus Kapitel 3.4.2.1 zu vergleichen, wurden Bilder von den Luftblasen bei verschiedenen Luftbeiträgen ausgewertet. Hierfür wurden pro Bild 10 Luftblasen ausgemessen, die Breite und Höhe protokolliert, die Fläche der Ellipse errechnet und daraus der äquivalente Kreisdurchmesser bestimmt. Abbildung 83 zeigt beispielhaft das Blasenbild bei einem Luftbeitrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. Der mittlere äquivalente Kreisdurchmesser der Luftblasen beträgt hier $6,6 \text{ mm}$. Die Blasenform entspricht der erwarteten Form eines Rotationsellipsoids. Mit einer Stoppuhr konnte eine Aufstiegsgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m/s}$ gemessen werden.

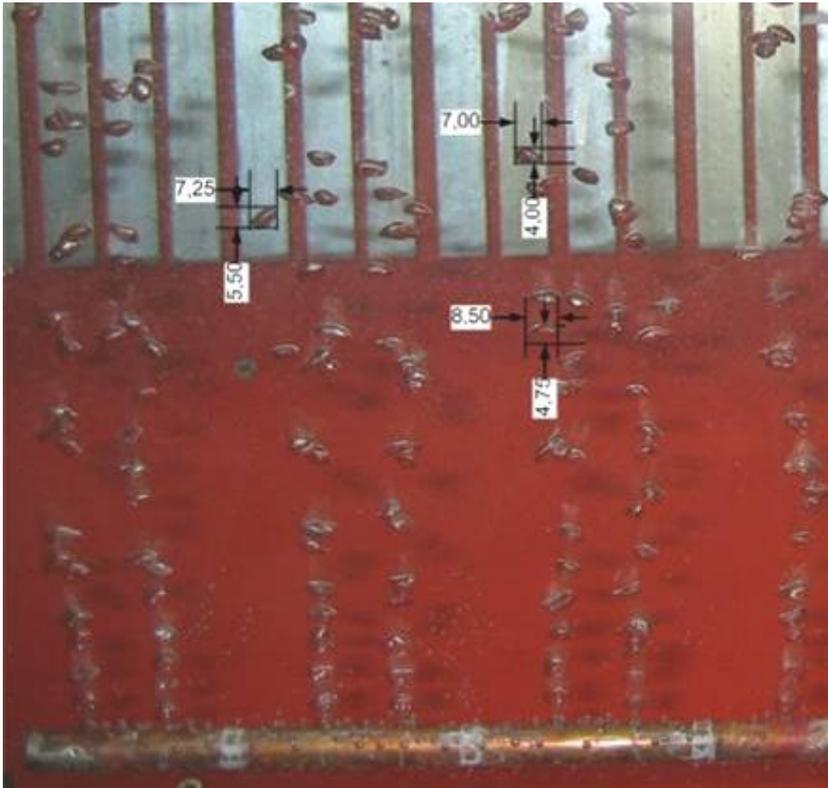


Abbildung 83: Form und Größe der Luftblasen im physikalischen Modell bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (140 Düsen mit $d = 0,6 \text{ mm}$).

In Abbildung 84 sind die rechnerische Blasengrößen nach verschiedenen Ansätzen, sowie die gemessene Blasengröße gegenübergestellt. Mit steigendem Lufteintrag nimmt die Größe der Luftblasen zu. Die gemessene Blasengröße stimmt am besten mit dem Ansatz von Kobus (1973) überein.

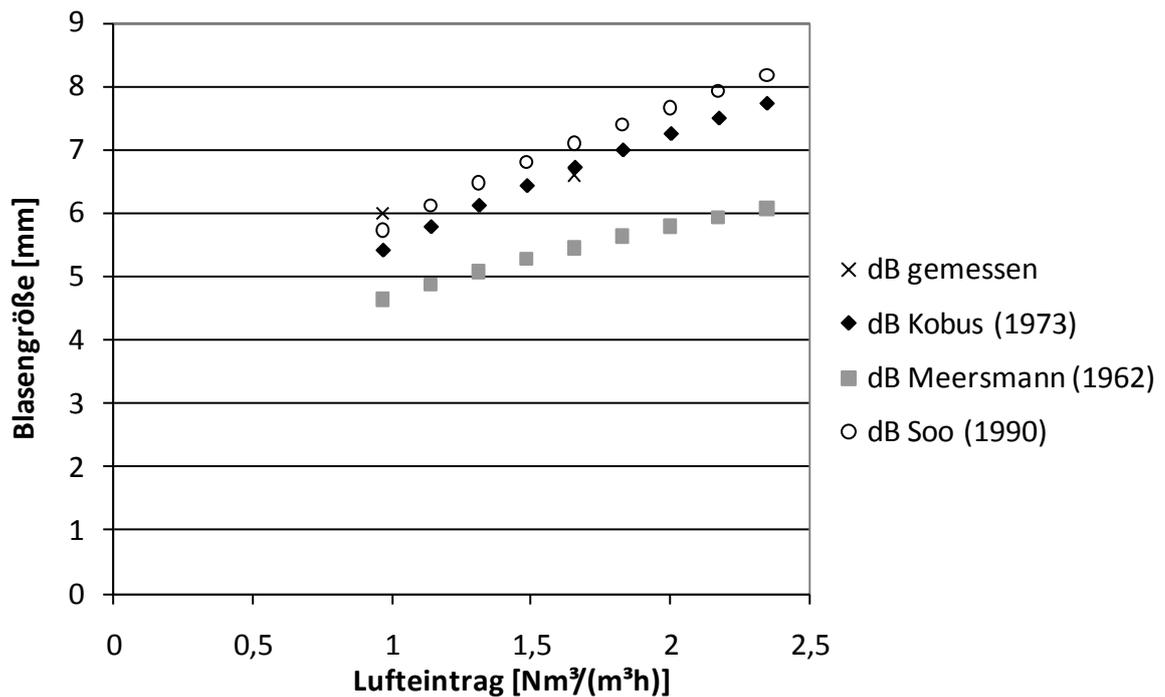


Abbildung 84: Einfluss des Luftertrags auf die Blasengröße d_B (gemessen und gerechnet).

6.2.3.2 Einfluss des Luftvolumenstroms auf die Walzenströmung und die Turbulenz

In Abbildung 85 ist die Geschwindigkeitskomponente v in der Mitte des Sandfangquerschnittes (Querprofil 3) bei verschiedenen Luftvolumenströmen dargestellt. Zur Vergleichmäßigung der Daten wurden Mittelwerte über alle sieben Messprofile in Sandfanglänge gebildet. Es wird deutlich, dass bei steigendem Luftvolumenstrom die Geschwindigkeitskomponente v_{\max} an der Wasseroberfläche größer wird, und die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} ansteigt. So betragen v_{\max} und v_{Sohl} bei einem Luftertrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ nur $-0,08 \text{ m/s}$ und $0,04 \text{ m/s}$. Bei einem Luftertrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ steigen diese Werte auf $-0,13 \text{ m/s}$ und $0,07 \text{ m/s}$ an. Die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze ist dabei ungefähr doppelt so groß wie die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze. Dieser Zusammenhang deutete sich schon bei den Kalibrierungsversuchen an. Der Nulldurchgang liegt bei allen drei Einstellungen bei einem Bodenabstand von $0,58 \text{ m}$ und die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze bei einem Bodenabstand von $0,3 \text{ m}$. Die Feststellung von Stein (1992), dass der Luftvolumenstrom den Nulldurchgang nicht beeinflusst, wird hier bestätigt.

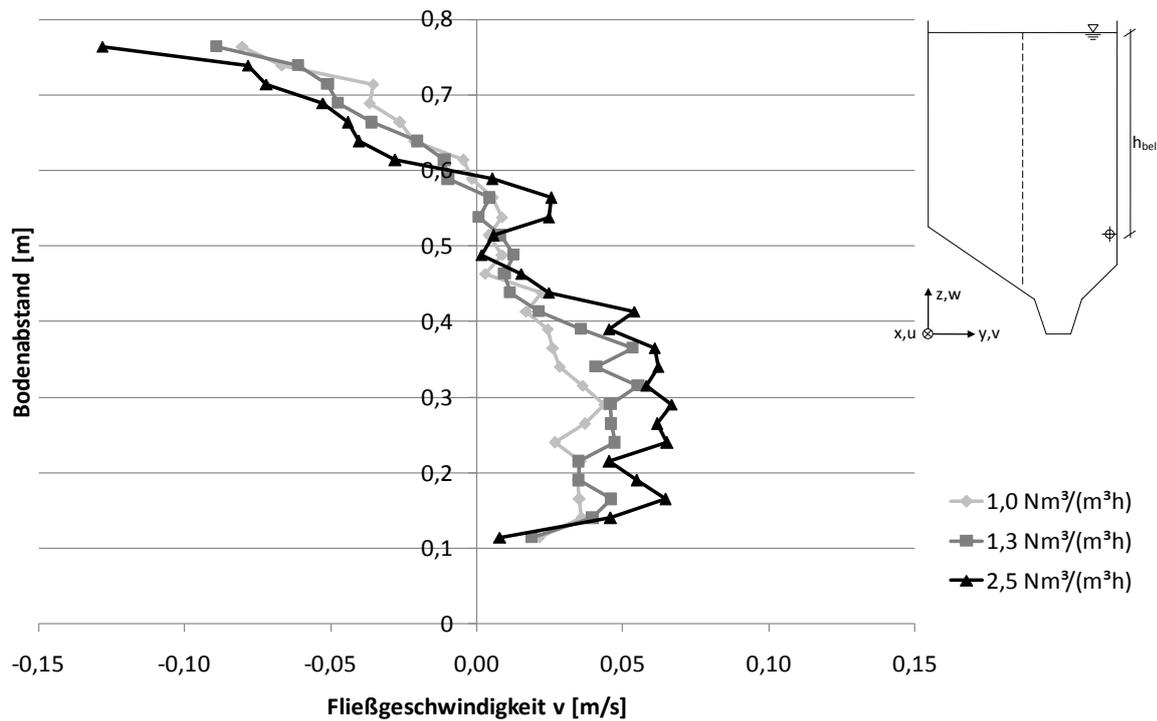


Abbildung 85: Geschwindigkeit v in der Mitte des Querschnitts des physikalischen Sandfangmodells (Querprofil 3) bei den Luftvolumenströmen $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (Messprofile gemittelt über die Sandfanglänge).

In Abbildung 86 sind die obere und untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{\max} und v_{Sohl} als extrapolierte Werte aus den Messwerten dargestellt. Mit steigendem Lufteintrag nehmen auch die Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze zu. Während die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze an der Wasseroberfläche bei einem Lufteintrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ nur $-0,1 \text{ m/s}$ beträgt steigt sie bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ auf $-0,15 \text{ m/s}$ an. Die zugehörigen Werte der unteren Randgeschwindigkeit der Wasserwalze v_{Sohl} betragen $0,04 \text{ m/s}$ und $0,07 \text{ m/s}$. Die Werte sind wieder ungefähr halb so groß wie die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze.

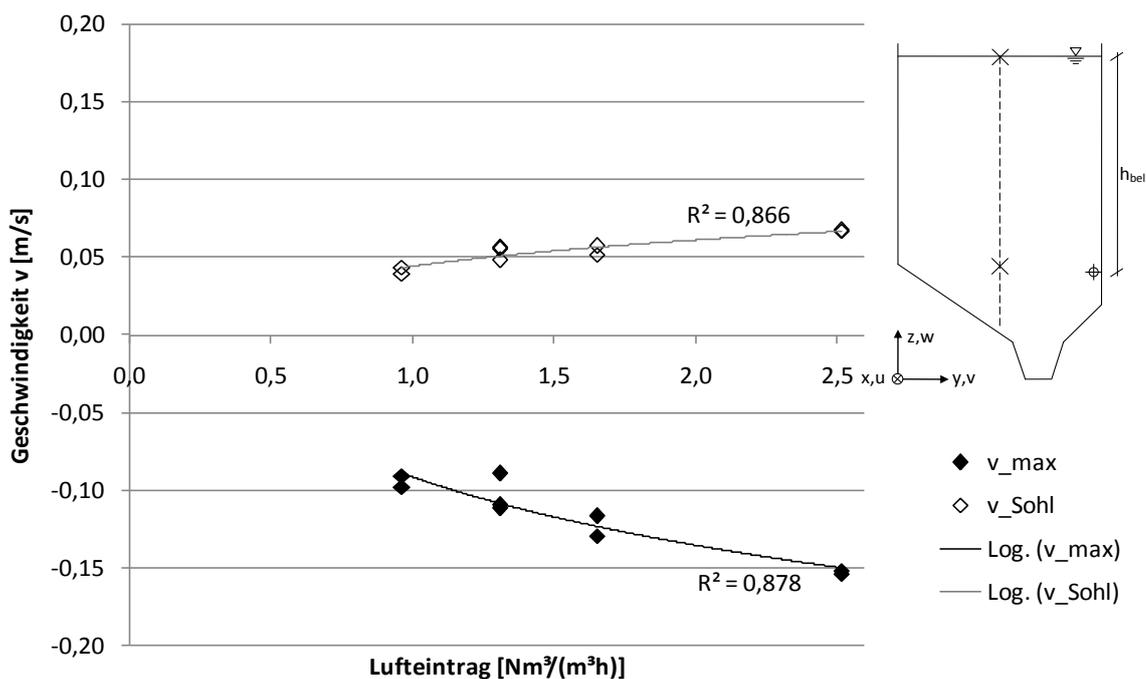


Abbildung 86: Maximalgeschwindigkeiten v_{max} und v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag.

In Abbildung 87 ist der Verlauf der turbulenten kinetischen Energie (Gleichung (36)) über die Sandfanglänge bei verschiedenen Lufteinträgen dargestellt. Für diese Darstellung wurden an jedem der sieben Messquerschnitte in Sandfanglängsrichtung Mittelwerte über den ganzen Querschnitt gebildet. Deutlich ersichtlich ist die höhere turbulente kinetische Energie im Einlaufbereich, im Bereich des ersten Meters der Sandfanglänge. Dies deutet auf einen Einfluss der Zulaufgestaltung hin. Der Zulauf erfolgt im Sandfangmodell über eine Wehrschwelle. Mit steigendem Luftvolumenstrom nimmt auch die turbulente kinetische Energie über die Sandfanglänge zu. Ohne Lufteintrag beträgt die turbulente kinetische Energie am Zulauf $0,0003 \text{ m}^2/\text{s}^2$, in Sandfangmitte $0,00003 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,0001 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Diese Werte erhöhen sich bei einem Luftvolumenstrom von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\text{h})$ auf $0,0017 \text{ m}^2/\text{s}^2$ am Zulauf, $0,0015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte und $0,0012 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Ablaufbereich.

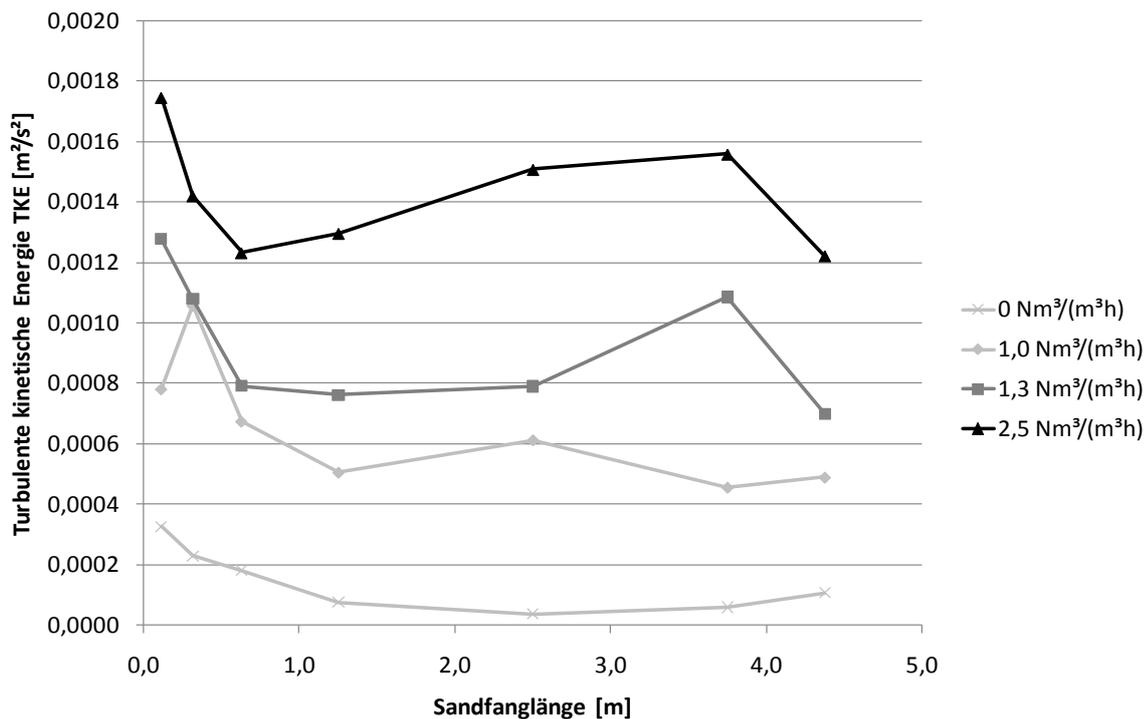


Abbildung 87: Turbulente kinetische Energie TKE [m^2/s^2] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einer Einblastiefe von 0,55 m und den Luftvolumenströmen 0 $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, 1,0 $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, 1,3 $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und 2,5 $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ in Fließrichtung (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).

In Abbildung 88 ist die turbulente kinetische Energie in Abhängigkeit vom Lufteintrag dargestellt. Für diese Darstellung wurden Mittelwerte über alle Messpunkte gebildet. Mit steigendem Lufteintrag steigt auch die turbulente kinetische Energie im Gesamtquerschnitt linear an. Ohne Lufteintrag beträgt die turbulente kinetische Energie im Gesamtsystem 0,0002 m^2/s^2 , bei Steigerung auf 2,5 $\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 0,0016 m^2/s^2 .

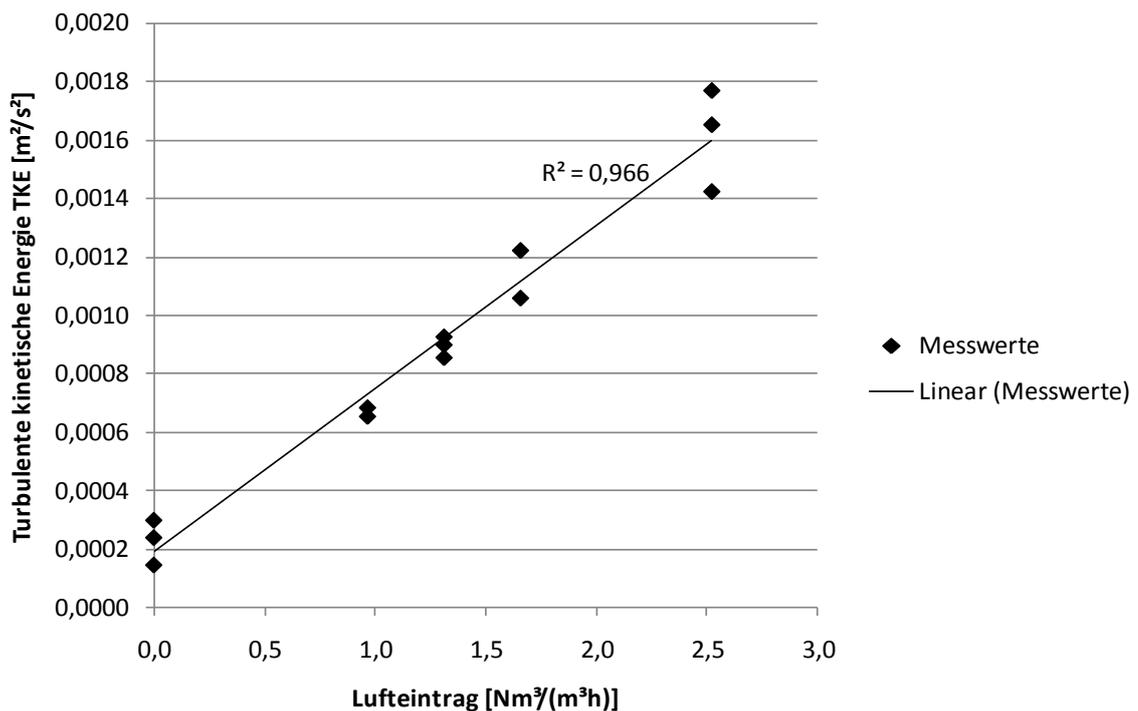


Abbildung 88: Abhängigkeit der turbulenten kinetischen Energie im physikalischen Sandfangmodell vom Luft eintrag (Mittelwert über alle Messpunkte).

Ein zusätzlicher Versuch wurde mit unbelüftetem, hinteren Teil des Sandfanges durchgeführt. Hierfür waren nur die 6 vorderen von 10 Belüfterrohren in Betrieb. Der Luft eintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ wurde um 40 % auf den Wert $0,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ reduziert, um eine Vergleichbarkeit der Geschwindigkeitsverteilung im vorderen Bereich erreichen zu können. Bei den ersten vier Messquerschnitten im belüfteten Bereich treten wie erwartet ähnliche Geschwindigkeitsverteilungen ein. Noch vor Beginn des unbelüfteten Bereichs, im Messquerschnitt 5, sinken die Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze jedoch bei nur 6 Belüftern ab. So beträgt die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze bei 6 Belüftern nur noch $-0,07 \text{ m/s}$, gegenüber $-0,12 \text{ m/s}$ bei 10 Belüftern. Die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze wird von $0,07 \text{ m/s}$ auf $0,05 \text{ m/s}$ reduziert. Am deutlichsten werden die Unterschiede beim letzten Messquerschnitt. Bei 10 Belüftern betragen die Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze $v_{\max} -0,165 \text{ m/s}$ und $v_{\text{Sohl}} 0,08 \text{ m/s}$, während bei 6 Belüftern v_{\max} nur $-0,01 \text{ m/s}$ und v_{Sohl} nur $0,02 \text{ m/s}$ beträgt. Die Wasserwalze wird also schon vor Beginn des unbelüfteten Bereichs, ab Messquerschnitt 5, langsam abgeschwächt. Der gleiche Zusammenhang wird durch Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie deutlich (Abbildung 89). Auch hier treten in den ersten vier Messquerschnitten vergleichbare Werte auf. Bei Messquerschnitt 5 wird die turbulente kinetische Energie von $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei 10 Belüftern auf $0,0006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei 6 Belüftern reduziert. Bei Messquerschnitt 6 und 7 ist die turbulente kinetische Energie bei 6 Belüftern um $0,0009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bzw. $0,00055 \text{ m}^2/\text{s}^2$ geringer als bei 10 Belüftern.

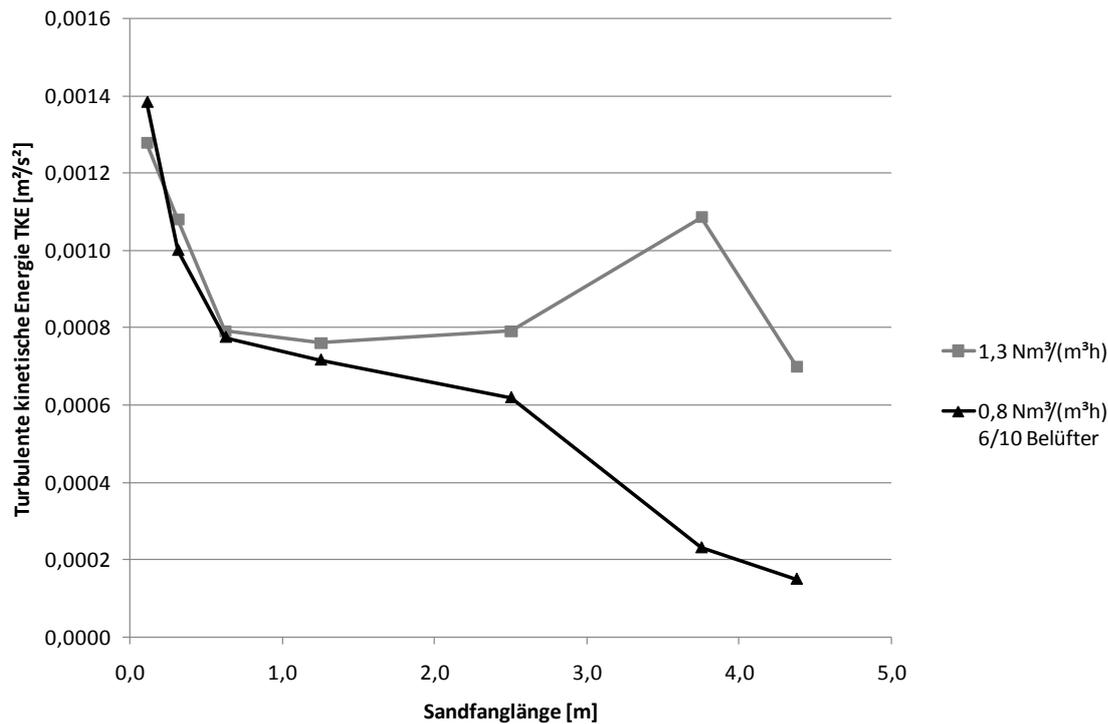


Abbildung 89: Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell bei 10 Belüftern und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und bei den 6 vorderen von 10 Belüftern und einem Lufteintrag von $0,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

6.2.3.3 Einfluss der Einblastiefe auf die Walzenströmung und die Turbulenz

In Abbildung 90 sind die Verläufe der Geschwindigkeitskomponente $v(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen dargestellt. Es wird deutlich, dass die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze mit zunehmender Einblastiefe ansteigt. Dies geht einher mit der Theorie von Kobus (1973). Der flachste Verlauf der Kurve ergibt sich bei einer Einblastiefe von $0,21 \text{ m}$. Die gemessene Maximalgeschwindigkeit v_{max} an der Wasseroberfläche beträgt hier $-0,05 \text{ m/s}$ und die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze im unteren Bereich v_{Sohl} $0,02 \text{ m/s}$. Bei der Einblastiefe von $0,62 \text{ m}$ erhöhen sich diese Werte auf v_{max} von $-0,10 \text{ m/s}$ und v_{Sohl} von $0,05 \text{ m/s}$. Die obere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze ist hier wieder ungefähr doppelt so groß als die untere.

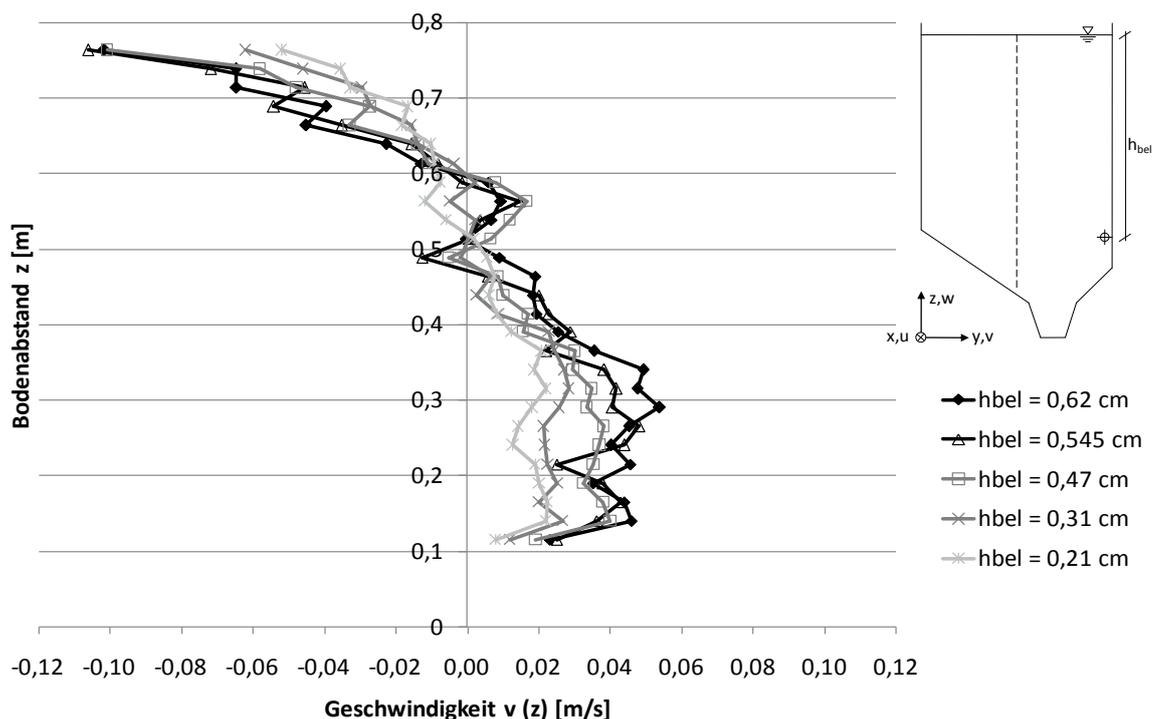


Abbildung 90: Geschwindigkeitskomponente $v(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen.

In Tabelle 19 wurden die gemessenen Werte für die Geschwindigkeit v_{\max} mit berechneten Werten verglichen. Für den Vergleich wurde zunächst der Wert für v_{\max} an der Wasseroberfläche mit der Gleichung (26) von Patt (1990) berechnet. Aus eigenen Messwerten wurden, unter Annahme eines parabolischen Kurvenverlaufs über die Sandfanghöhe, die Werte für die Maximalgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche extrapoliert.

Tabelle 19: Vergleich der gemessenen Maximalgeschwindigkeit v_{\max} nahe der Wasseroberfläche (0,76 m) mit Berechnung.

h_{bel} [m]	v_{\max} Messung ($z = 0,76 \text{ m}$) [m/s]	v_{\max} ($z = 0,82 \text{ m}$) [m/s] extrapoliert	v_{\max} ($z = 0,82 \text{ m}$) [m/s] nach Patt (1990)	Nulldurch- gang [m]	v_{Sohl} [m/s]	$h \ v_{\text{Sohl}}$ [m]
0,62	-0,10	-0,11	-0,18	0,55	0,05	0,29
0,55	-0,11	-0,11	-0,17	0,56	0,06	0,24
0,47	-0,10	-0,09	-0,17	0,59	0,04	0,27
0,31	-0,06	-0,07	-0,15	0,57	0,03	0,34
0,21	-0,05	-0,06	-0,14	0,60	0,02	0,17

Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten durch den Ansatz von Patt (1990) deutlich überschätzt werden. So ergäbe sich theoretisch für die Einblastiefe von 0,62 m eine Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche von -0,18 m/s, gegenüber dem durch Extrapolation bestimmten Wert von -0,11 m/s. Bei einer Einblastiefe von 0,21 m steht einem gemessenen Wert für v_{\max} von -0,06 m/s ein berechneter Wert von -0,14 m/s gegenüber. Aufgrund der Schwankungen der Messwerte ist es teilweise schwierig, den Nulldurchgang zu bestimmen. Um eine Aussage treffen zu können, wurde der Nulldurchgang des in der Sandfangmitte ($y = b_{\text{SF}}/2$) liegenden Querprofils 3 ausgewertet. In Fließrichtung wurde ein Mittelwert aus den Nulldurchgängen der Längsprofile 4 bis 6 gebildet. Es ist ein leichter Aufwärtstrend der Nulldurchgänge bei abnehmender Einblastiefe erkennbar. Die untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze tritt im Mittel bei einem Bodenabstand von 0,26 m auf, das entspricht einem Abstand von der Sandfanggutrinne von $0,2 \cdot h_{\text{SF}}$.

In Abbildung 91 sind die Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} an der Wasseroberfläche und v_{Sohl} in Abhängigkeit von der Einblastiefe dargestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Lufteintrag. Auch hier steigen die Geschwindigkeiten mit steigender Einblastiefe an. Am besten passte hier ein logarithmischer Kurvenverlauf. Dies deckt sich mit den Messungen von Londong (1987), der auch eine logarithmische Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Einblastiefe fand.

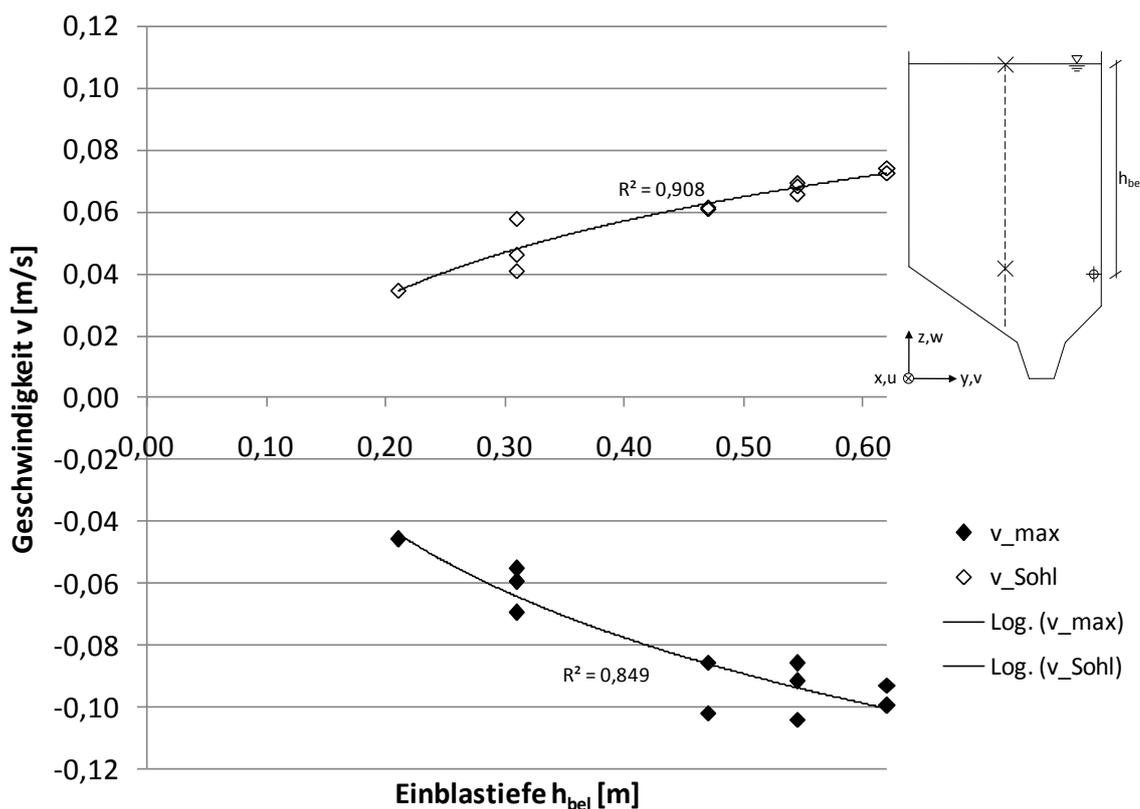


Abbildung 91: Maximalgeschwindigkeiten v_{max} und v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ in Abhängigkeit von der Einblastiefe (Extrapolation der Messwerte).

In Abbildung 92 ist der Verlauf der turbulenten kinetischen Energie, über die Sandfanglänge in Abhängigkeit von verschiedenen Einblastiefen, bei einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ dargestellt. Bei allen Einblastiefen wird eine erhöhte turbulente kinetische Energie im Zulaufbereich deutlich. Die turbulente kinetische Energie sinkt dann zunächst ab, um dann Richtung Ablauf wieder leicht anzusteigen. Bei der Einblastiefe von $0,21 \text{ m}$ ist die turbulente kinetische Energie am geringsten. Sie beträgt im Zulaufbereich $0,0004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,00028 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Bei einer Einblastiefe von $0,62 \text{ m}$ steigt die turbulente kinetische Energie auf $0,0014 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Zulaufbereich und $0,0009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ nahe dem Ablauf (Messquerschnitt 7) an.

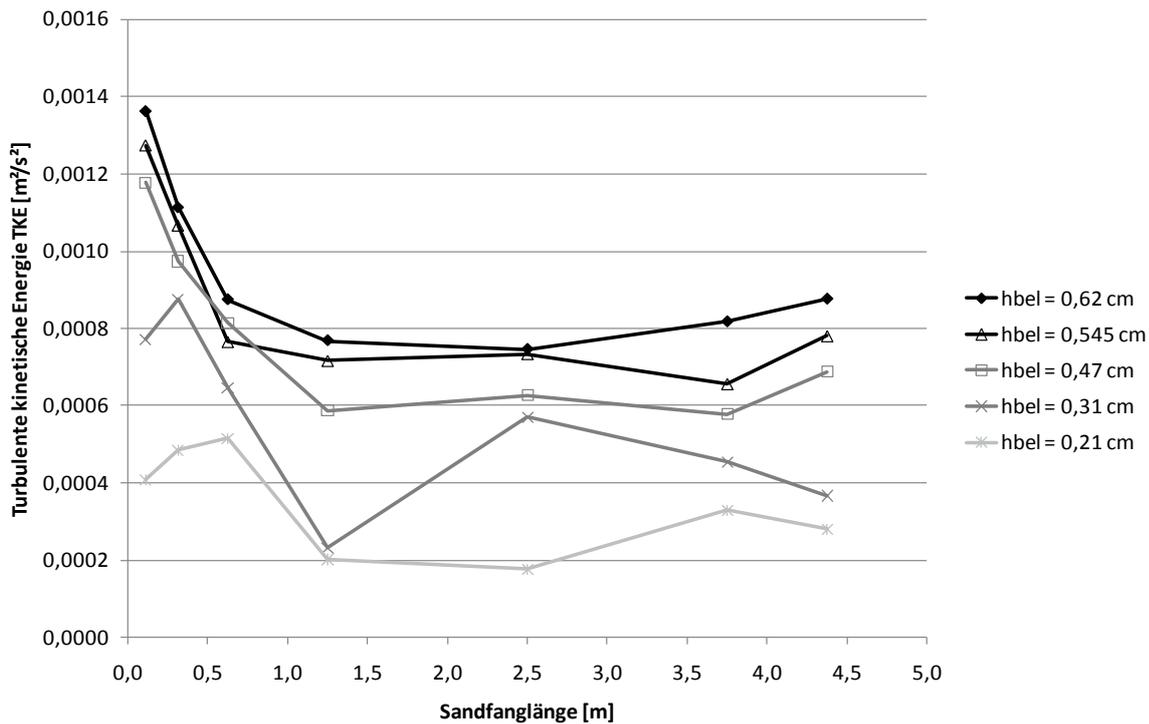


Abbildung 92: Turbulente kinetische Energie im Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) und verschiedenen Einblastiefen (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).

In Abbildung 93 ist die turbulente kinetische Energie in Abhängigkeit von der Einblastiefe als Mittelwert aller Messwerte dargestellt. Bemerkenswert ist der lineare Zusammenhang. Mit zunehmender Einblastiefe nimmt die Turbulenz im System linear zu. Bei einer Einblastiefe von 0 m, für die die Messungen ohne Lufteintrag eingesetzt wurden, ergibt sich eine turbulente kinetische Energie im Gesamtquerschnitt von 0,0002 m²/s². Diese kann bis maximal 0,0009 m²/s² bei einer Einblastiefe von 0,62 m gesteigert werden.

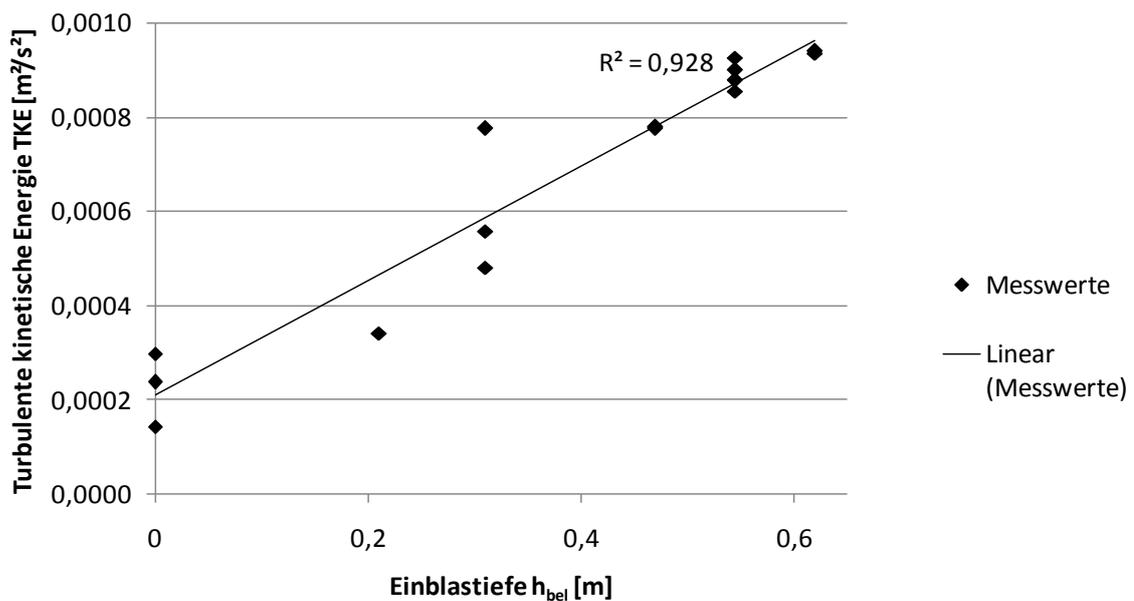


Abbildung 93: Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe (Mittelwert über alle Messpunkte).

6.2.3.4 Einfluss des Durchflusses und des Lufteintrages auf die Strömung in Sandfanglängsrichtung und die Turbulenz

In Abbildung 94 ist die Fließgeschwindigkeit $u(z)$ in Sandfanglängsrichtung über die Sandfanghöhe bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und verschiedenen Durchflüssen im Zulaufbereich des belüfteten Sandfanges dargestellt (Messquerschnitt 1, Querprofil 3). Die größte Fließgeschwindigkeit u herrscht direkt an der Wasseroberfläche, nahe der Höhe des Einlaufes ($z = 0,73 \text{ m}$) vor. Mit zunehmendem Durchfluss steigt dieser Wert. Bei einem Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ beträgt er $0,001 \text{ m/s}$, bei $3,5 \text{ l/s}$ $0,06 \text{ m/s}$ und bei $5,5 \text{ l/s}$ $0,11 \text{ m/s}$. Die positive Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche geht einher mit einer Rückströmung an der Sandfangsohle. Hier ergibt sich ein Wert von $-0,002 \text{ m/s}$ für den Durchfluss von $1,5 \text{ m/s}$, $-0,03 \text{ m/s}$ für den Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ und der betragsmäßig höchste Wert von $-0,05 \text{ m/s}$ bei einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$.

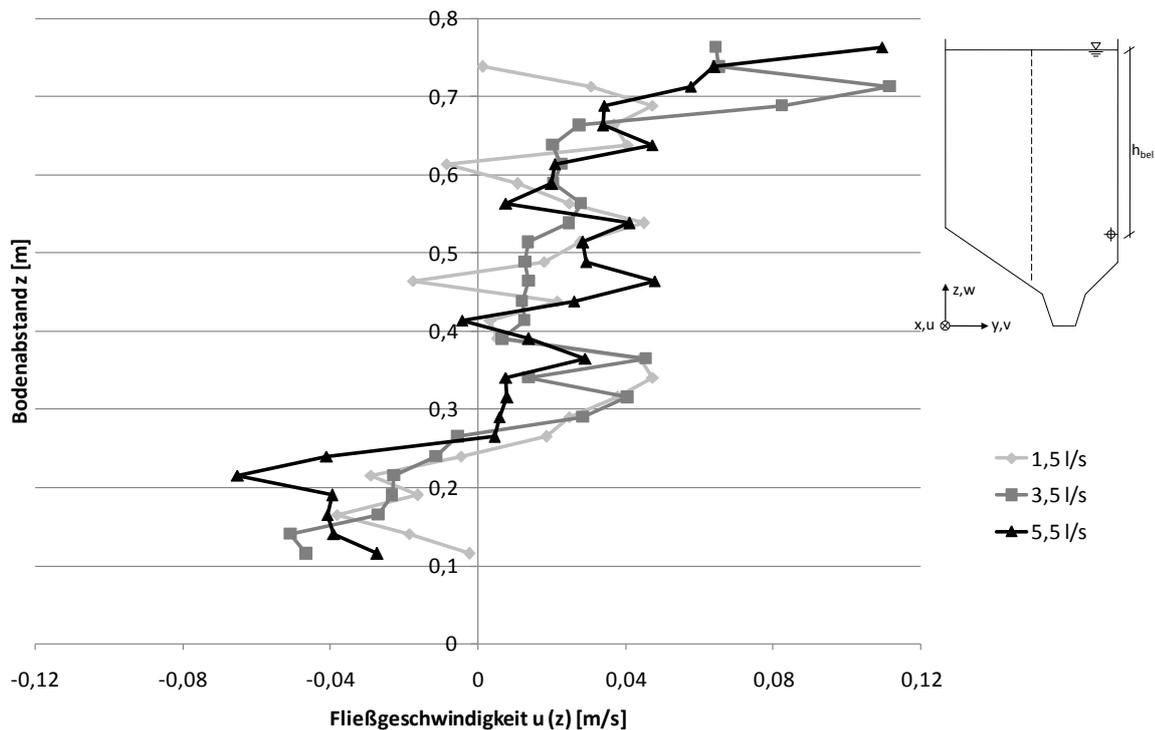


Abbildung 94: Fließgeschwindigkeit $u(z)$ im Zulauf des Sandfanges (Messquerschnitt 1, Querprofil 3) im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen 1,5 l/s, 3,5 l/s und 5,5 l/s und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 95 ist die turbulente kinetische Energie im Zulaufbereich des Sandfanges (Messquerschnitt 1, Querprofil 3) bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einer Einblastiefe von 0,55 m und verschiedenen Durchflüssen dargestellt. Es wird deutlich, dass die turbulente kinetische Energie auf Höhe des Zulaufes ($z = 0,73 \text{ m}$) am höchsten ist. Bei einem Durchfluss von 1,5 l/s tritt der geringste Wert von $0,0033 \text{ m}^2/\text{s}^2$ auf, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ein Wert von $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ein Wert von $0,0064 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Hier wird die Störung durch den Zulaufbereich sehr deutlich. Unmittelbar unterhalb der Höhe der Weherschwelle ($z = 0,73 \text{ m}$) nimmt die turbulente kinetische Energie bei allen drei Durchflüssen auf Werte unter $0,001 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ab.

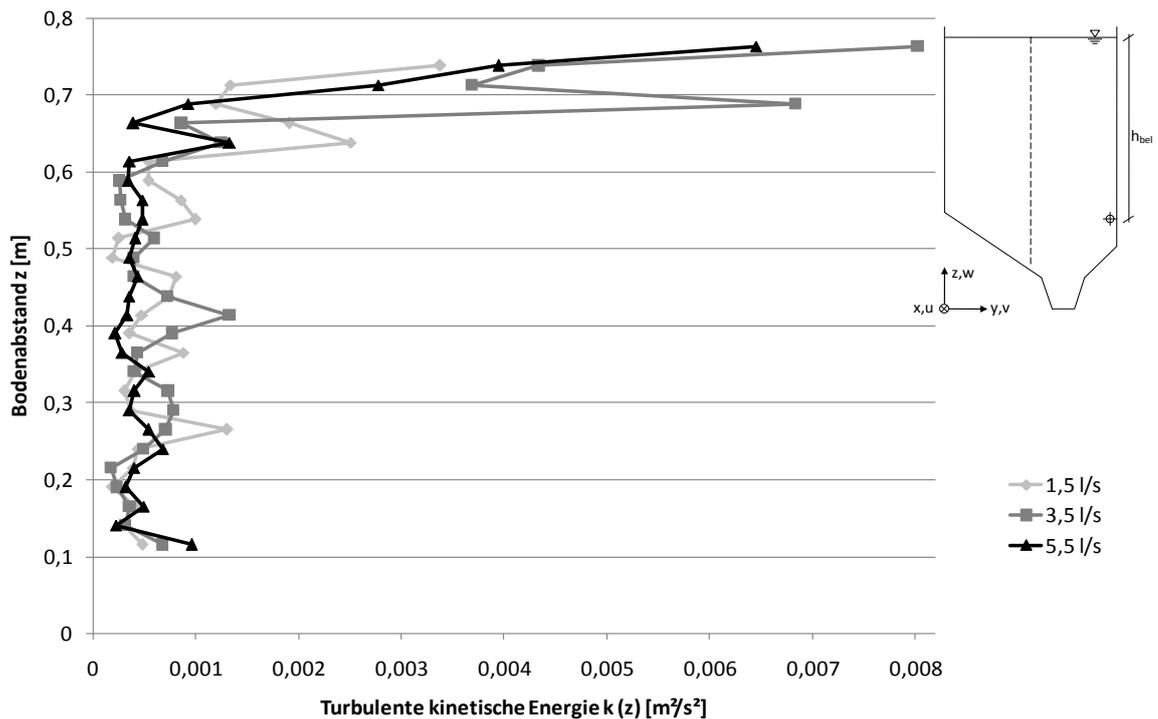


Abbildung 95: Turbulente kinetische Energie $TKE(z)$ am Zulauf des Sandfanges (Messquerschnitt 1, Querprofil 3) im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen 1,5 l/s, 3,5 l/s und 5,5 l/s und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 96 ist die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung bei verschiedenen Durchflüssen und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ am Messquerschnitt 5 dargestellt. Es fällt auf, dass die Werte insgesamt sehr klein sind. Nahe der Wasseroberfläche sind die Fließgeschwindigkeiten negativ. So betragen die Fließgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche bei einem Durchfluss von 3,5 l/s $-0,02 \text{ m/s}$ und bei einem Durchfluss von 5,5 l/s $-0,002 \text{ m/s}$. Wegen des niedrigeren Wasserstandes bei einem Durchfluss von 1,5 l/s konnte der oberste Wert nicht gemessen werden. Auffällig ist die Rückströmung im Bereich des Walzenmittelpunktes ($z = 0,55 \text{ m}$). Die Rückströmung ist bei dem Durchfluss von 1,5 l/s mit $-0,05 \text{ m/s}$ am größten, bei 3,5 l/s beträgt sie $-0,03 \text{ m/s}$ und bei 5,5 l/s $-0,02 \text{ m/s}$. Bemerkenswert ist, dass nicht wie beim logarithmischen Geschwindigkeitsprofil erwartet, die Maximalgeschwindigkeiten an der Oberfläche auftreten, sondern im Bereich der Sandfanggutrinne. Bei einem Durchfluss von 5,5 l/s tritt dort eine Fließgeschwindigkeit von maximal $0,06 \text{ m/s}$ auf, beim Durchfluss von 3,5 l/s $0,04 \text{ m/s}$ und beim Durchfluss von 1,5 l/s ein negativer Wert von $-0,04 \text{ m/s}$.

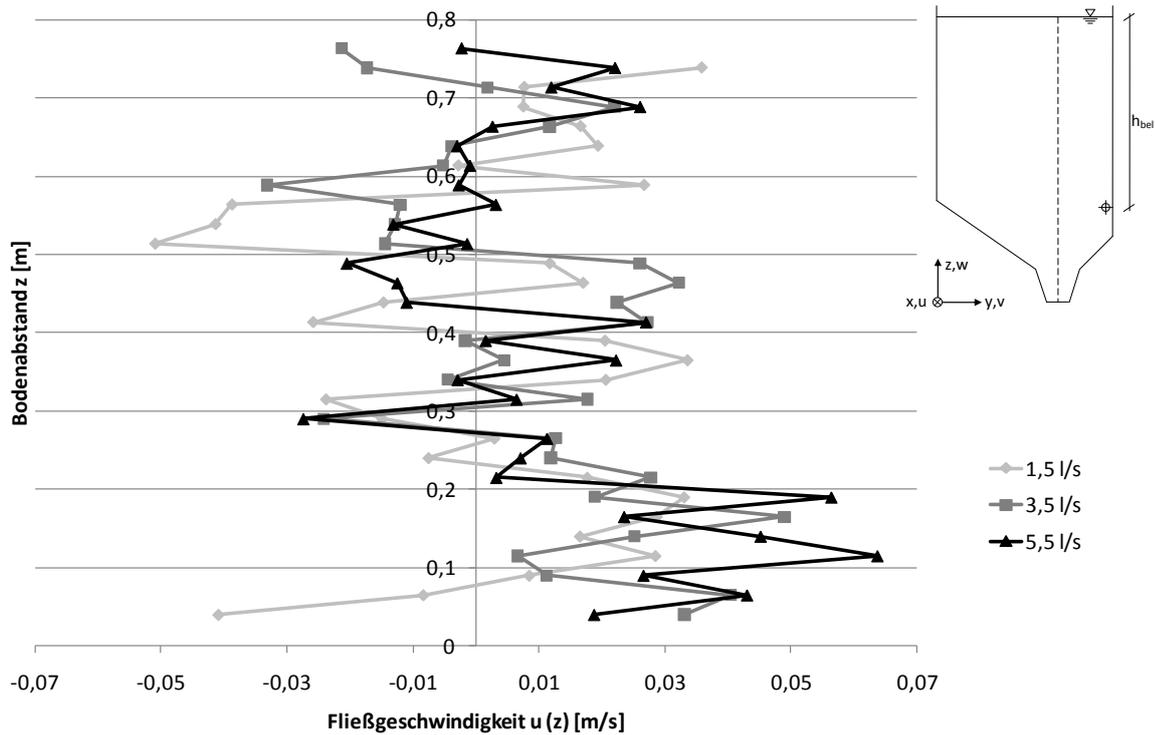


Abbildung 96: Geschwindigkeitskomponente $u(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell in der Mitte des Sandfanges (Messquerschnitt 5, Querprofil 5) bei verschiedenen Durchflüssen und einem Luftertrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 97 sind die Verläufe der turbulenten kinetischen Energie, über die Sandfanglänge bei verschiedenen Durchflüssen dargestellt. An jedem der sieben Messquerschnitte in Sandfanglängsrichtung wurde für jede Versuchseinstellung ein Mittelwert gebildet. Es fällt auf, dass ein höherer Durchfluss insbesondere im Bereich des Zulaufes eine deutlich größere turbulente kinetische Energie erzeugt. Am Messquerschnitt 2 in Fließrichtung beträgt die turbulente kinetische Energie beim Durchfluss von 5,5 l/s $0,0022 \text{ m}^2/\text{s}^2$ gegenüber $0,0011 \text{ m}^2/\text{s}^2$ beim Durchfluss von 3,5 l/s und $0,0006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ beim Durchfluss von 1,5 l/s. Im hinteren Bereich des Sandfanges (Messquerschnitte 4-7) unterscheiden sich die Werte für die turbulente kinetische Energie, in Abhängigkeit vom Durchfluss, nur geringfügig. In der Mitte des Sandfanges herrscht sogar für alle drei Durchflüsse die gleiche turbulente kinetische Energie von $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ vor.

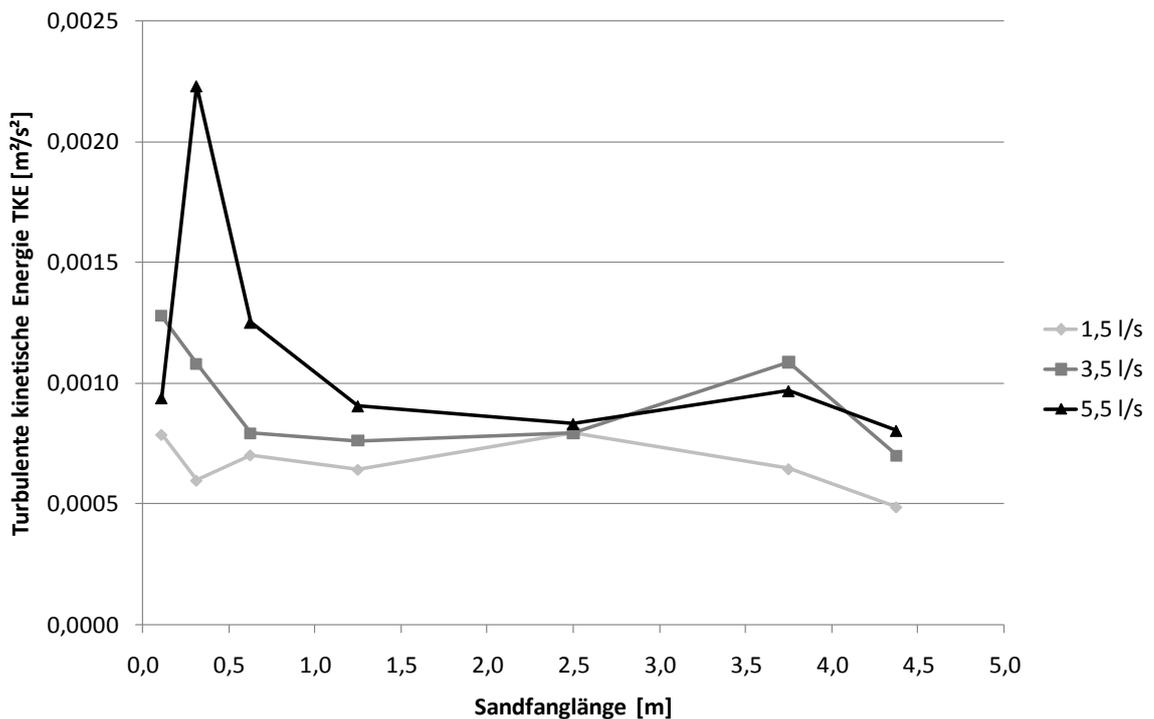


Abbildung 97: Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge bei verschiedenen Durchflüssen [l/s] (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).

Wenn man den Mittelwert über alle Messwerte im physikalischen Modell betrachtet gilt der in Abbildung 98 dargestellte Zusammenhang, dass die turbulente kinetische Energie linear mit dem Durchfluss steigt. Die geringste turbulente kinetische Energie mit einem Wert von 0,0007 m²/s² tritt bei einem Durchfluss von 1,5 l/s auf, die höchste mit einem Wert von 0,0011 m²/s² bei einem Durchfluss von 5,5 l/s.

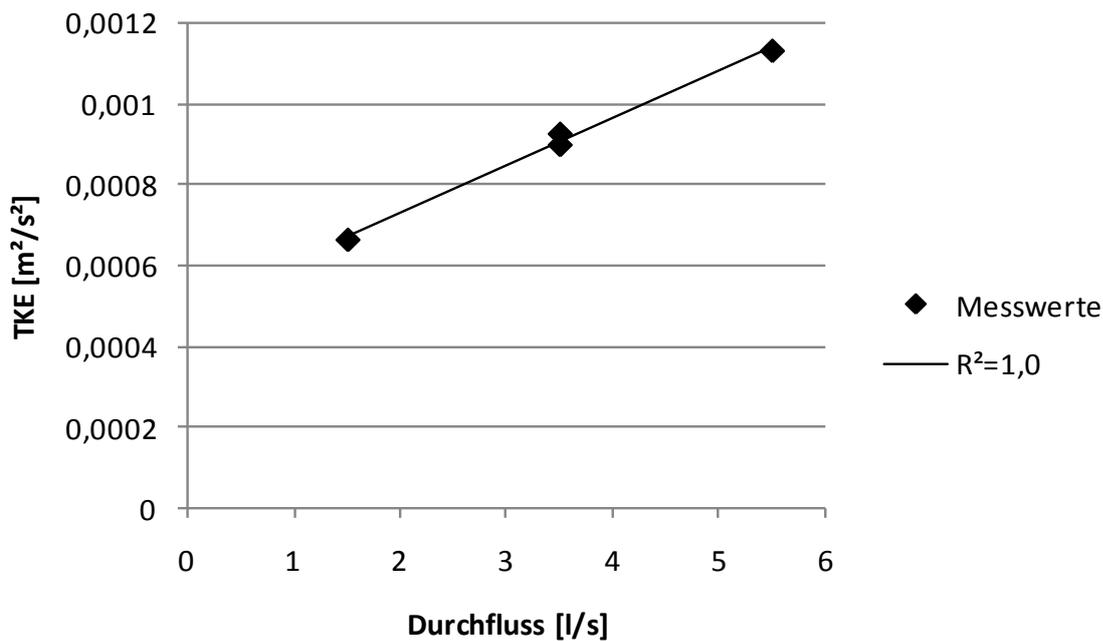


Abbildung 98: Turbulente kinetische Energie TKE im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Durchfluss bei einem Luftvolumenstrom von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (Mittelwert aller Messpunkte).

Bemerkenswert ist die Betrachtung der Fließgeschwindigkeit $u(z)$ in Abhängigkeit vom Lufteintrag am Messquerschnitt 5 (Abbildung 99). Während die Fließgeschwindigkeit $u(z)$ ohne Lufteintrag fast über die ganze Höhe positive Werte hat, ergibt sich bei den Lufteinträgen von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ eine deutliche Rückströmung auf Höhe des Walzenmittelpunktes. Bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ beträgt diese $-0,03 \text{ m/s}$, bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $-0,06 \text{ m/s}$. Die größten positiven Fließgeschwindigkeiten ergeben sich dagegen im Bereich der Sandfanggutrinne. Während ohne Lufteintrag auch die Fließgeschwindigkeit u in der Sandfanggutrinne 0 m/s beträgt, erhöht sich diese auf $0,03 \text{ m/s}$ bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und auf $0,07 \text{ m/s}$ bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Diese Strömungen treten genau an den Bereichen auf, an denen die luftblaseninduzierte Sekundärströmung nahe Null ist.

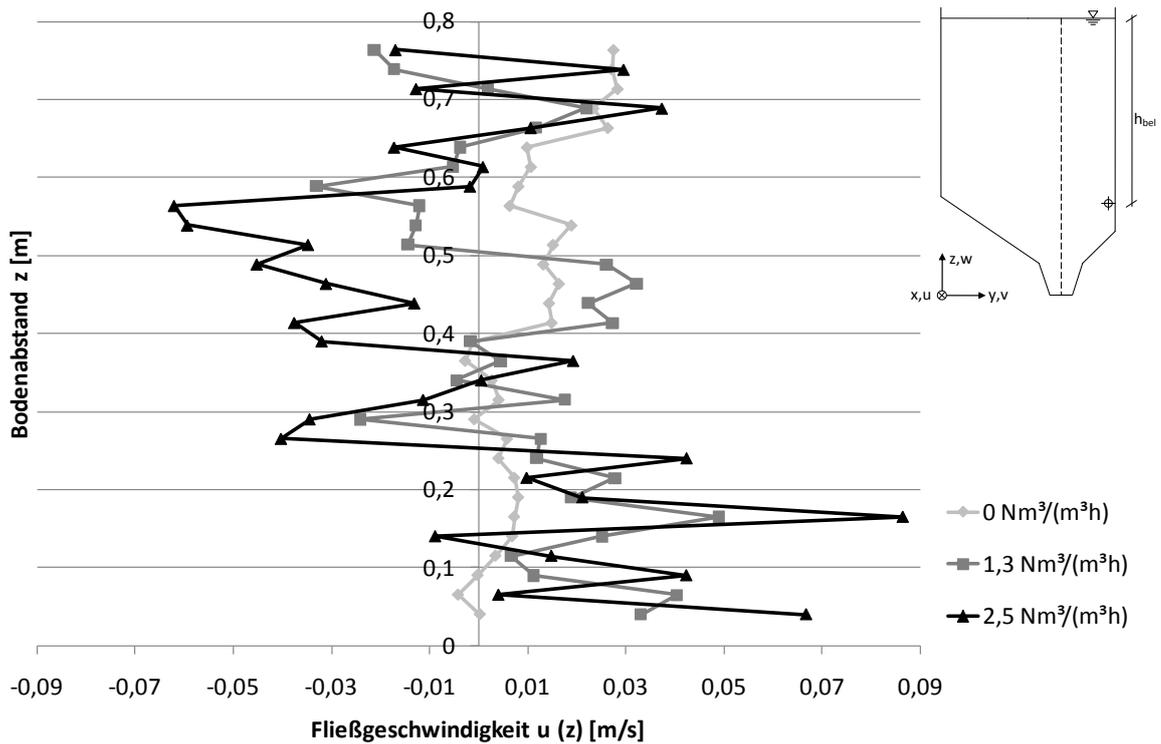


Abbildung 99: Fließgeschwindigkeit $u(z)$ in der Mitte des Sandfanges (Messquerschnitt 5, Querprofil 5) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und den Lufteinträgen $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 100 ist die zugehörige, turbulente kinetische Energie über die Sandfanghöhe dargestellt. Mit zunehmendem Lufteintrag wird die turbulente kinetische Energie größer. Die größte turbulente kinetische Energie wird bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ an der Wasseroberfläche erreicht. Der Wert beträgt $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Bei den Lufteinträgen von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bzw. $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ verringert sich dieser auf $0,0016 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bzw. $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Ohne Lufteintrag beträgt die turbulente kinetische Energie über die gesamte Profilhöhe $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Im Bereich unter der Wasseroberfläche tritt bei steigenden Lufteinträgen eine Parallelverschiebung dieser Kurve auf. Die turbulente kinetische Energie beträgt im unteren Bereich bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ im Mittel $0,0007 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und bei $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $0,0015 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

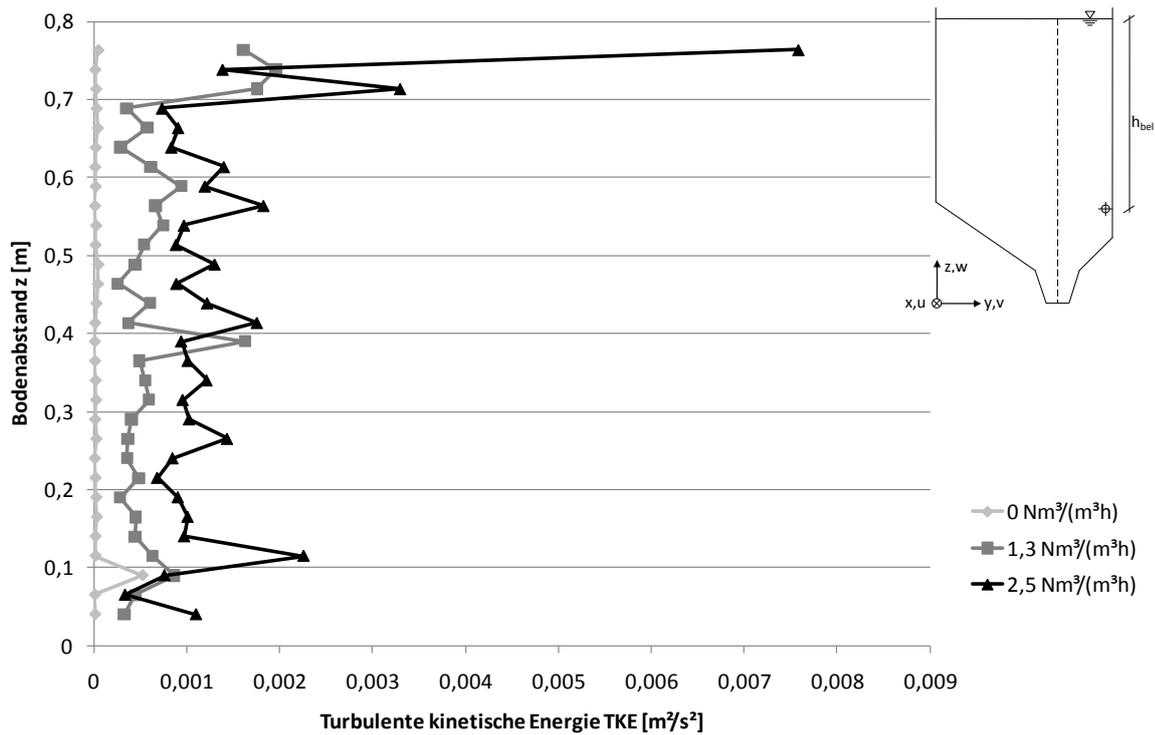


Abbildung 100: Turbulente kinetische Energie am Messquerschnitt 5 (Querprofil 5) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und den Luftinträgen $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$.

6.2.3.5 Einfluss der Querschnittsgestaltung auf die Strömung und auf die Turbulenz

Die Querschnittsform wurde nun durch Einlegen eines Bretts im Abstand von 0,29 m vom Boden in einen Rechteckquerschnitt verändert (Abbildung 101). So konnten die Ergebnisse mit Trapezquerschnitt mit denen mit Rechteckquerschnitt verglichen werden. Die Einblastiefe wurde für beide Querschnittsformen mit $h_{\text{bel}} = 0,47 \text{ m}$ gewählt. Die Durchflusszeit in beiden Fällen auf 7,14 min eingestellt.

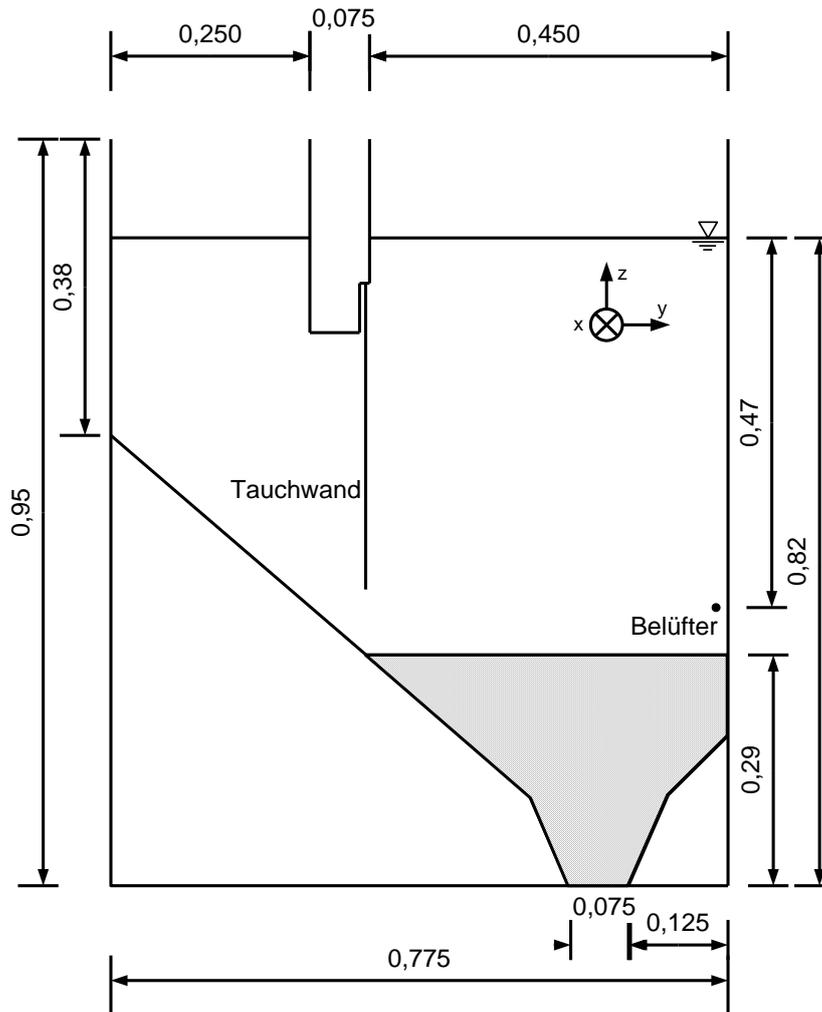


Abbildung 101: Veränderte Querschnittsform (Rechteckquerschnitt) nach Einlegen eines Bretts.

In Abbildung 102 ist die Geschwindigkeitskomponente $v(z)$ in der Querschnittsmitte in Abhängigkeit von der Querschnittsform dargestellt. Der Lufteintrag betrug in beiden Fällen $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bei einer Einblastiefe von $0,47 \text{ m}$. Es wird deutlich, dass die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche bei beiden Querschnitten mit $-0,11 \text{ m/s}$ gleich sind. Die Geschwindigkeiten unterhalb des Walzenmittelpunktes weichen dagegen stark voneinander ab. Bei dem von der DWA (2008) empfohlenen Querschnitt beträgt die Maximalgeschwindigkeit v_{Sohl} $0,04 \text{ m/s}$, bei dem Rechteckquerschnitt $0,08 \text{ m/s}$. Es bilden sich also beim Rechteckquerschnitt deutlich höhere Sekundärströmungen am Boden des Sandfanges aus.

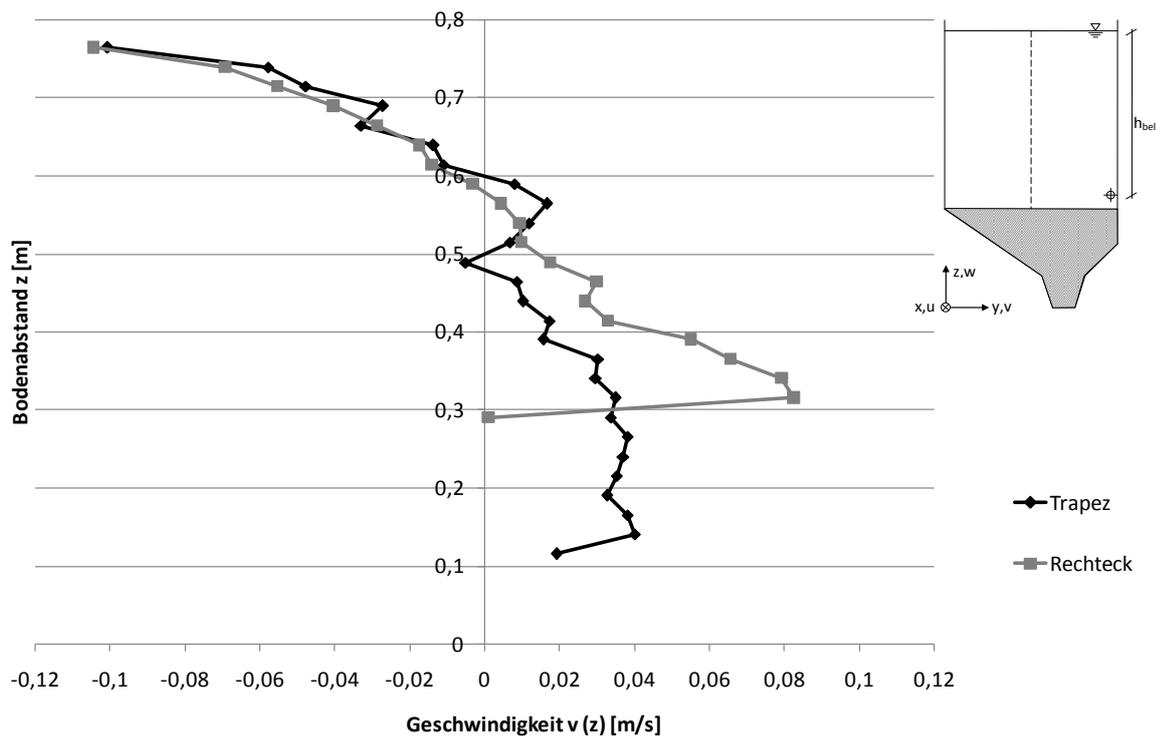


Abbildung 102: Geschwindigkeit $v(z)$ im physikalischen Sandfangmodell mit und ohne Sandfanggutrinne, bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe h_{bel} von 0,47 m.

In Abbildung 103 ist die Fließgeschwindigkeit $u(z)$ in Abhängigkeit von der Querschnittsgestaltung dargestellt. Bei beiden Querschnittsformen gibt es im Bereich des Walzenmittelpunktes eine Rückströmung in Höhe von $-0,02 \text{ m/s}$. Vergleicht man die bodennahen Geschwindigkeiten sind diese beim Rechteckquerschnitt nahe Null, wogegen beim Trapezquerschnitt im Bereich der Sandfanggutrinne Geschwindigkeiten bis zu $0,05 \text{ m/s}$ auftreten.

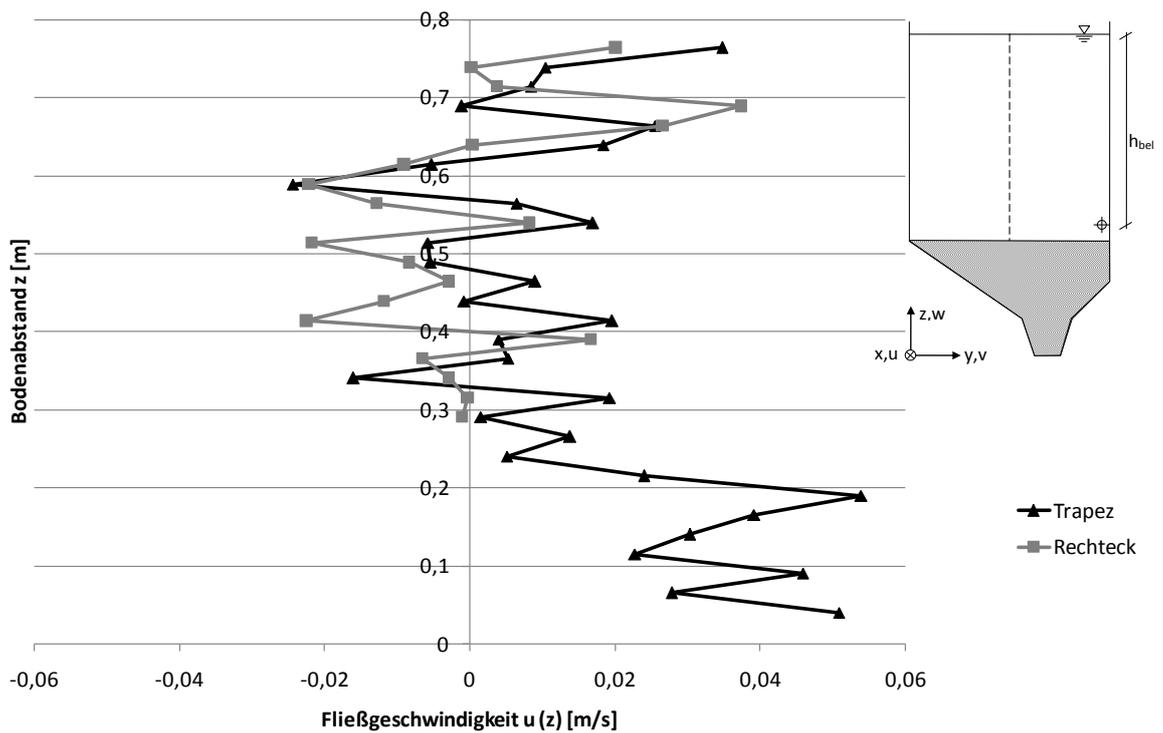


Abbildung 103: Fließgeschwindigkeit $u(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit vom Querschnitt, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einer Durchflusszeit von $7,14 \text{ min}$ und einer Einblastiefe von $0,47 \text{ m}$ (Messquerschnitt 4, Querprofil 3).

In Abbildung 104 ist die turbulente kinetische Energie über die Sandfanglänge für beide Querschnittsformen dargestellt. Der Mittelwert im Gesamtsystem ist bei beiden Fällen ähnlich, mit $0,00077 \text{ m}^2/\text{s}^2$ beim Trapezquerschnitt und $0,00075 \text{ m}^2/\text{s}^2$ beim Rechteckquerschnitt. Während beim Rechteckquerschnitt die Werte in der Mitte des Sandfangs um $0,0002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ niedriger sind, sind diese am Ende des Sandfangs um diesen Betrag höher.

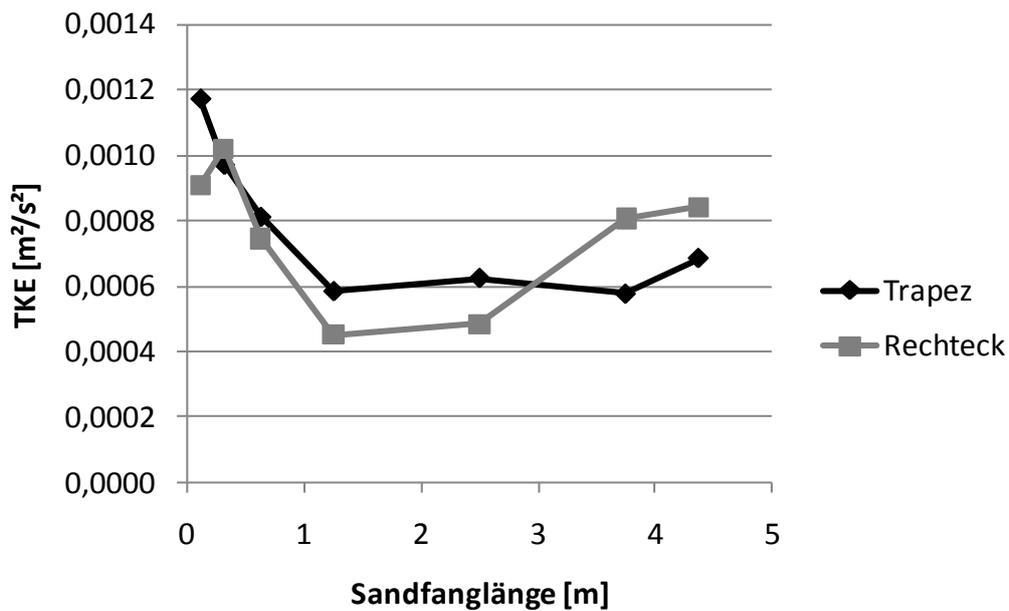


Abbildung 104: Turbulente kinetische Energie [m^2/s^2] im physikalischen Sandfangmodell, mit und ohne Sandfanggutrinne, bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe h_{bel} von 0,47 m (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).

6.2.3.6 Lage des Walzenmittelpunktes

In Abbildung 105 ist der Bodenabstand des Walzenmittelpunktes in Abhängigkeit von der Zahl der Düsen und dem Lufteintrag dargestellt. Ausgewertet wurden hier die Messwerte und die Regressionen der Messwerte. Für die Darstellung wurden die Regressionen gewählt. Auf den ersten Blick scheint die Lage des Walzenmittelpunktes unabhängig von den untersuchten Parametern zu sein. Allerdings verschiebt sich sowohl bei hohen Lufteinträgen als auch bei den nur 80 Düsen der Walzenmittelpunkt geringfügig nach oben. Bei 200 Düsen mit Durchmesser von 1 mm hat der Walzenmittelpunkt bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ den Bodenabstand 0,56 m und bei einem Lufteintrag von $4,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ den Bodenabstand 0,57 m. Bei 140 Düsen mit Durchmesser 1 mm beträgt der Bodenabstand des Walzenmittelpunktes bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 0,55 m und bei einem Lufteintrag von $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 0,58 m. Bei 140 Düsen mit Durchmesser 0,6 mm beträgt der Bodenabstand des Walzenmittelpunktes konstant 0,56 m. Der größte Bodenabstand des Walzenmittelpunktes von 0,6 m wird bei 80 Düsen mit Durchmesser 1 mm erreicht.

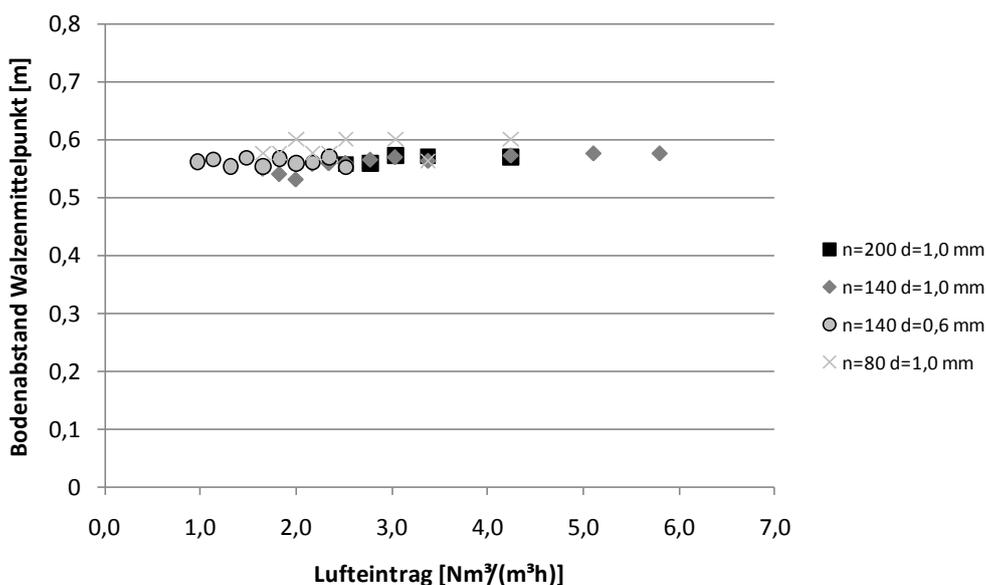


Abbildung 105: Bodenabstand des Walzenmittelpunktes im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit von der Zahl der Düsen und dem Luftp eintrag.

Bei Betrachtung des Walzenmittelpunktes in Abhängigkeit von der Einblastiefe (Abbildung 106) bei einem Luftp eintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ergibt sich ein leicht ansteigender Verlauf. Der geringste Bodenabstand von $0,53 \text{ m}$ wird bei einer Einblastiefe von $0,21 \text{ m}$ erreicht, der größte Bodenabstand von $0,56 \text{ m}$ bei einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$.

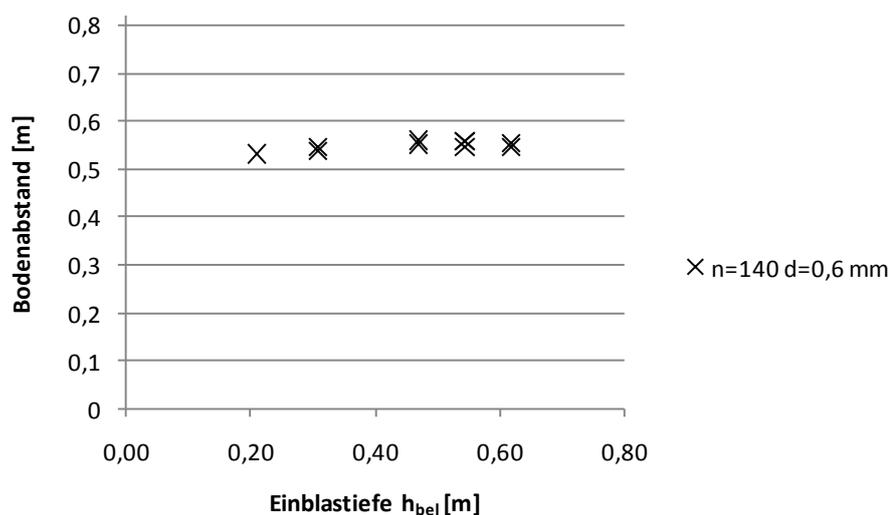


Abbildung 106: Lage des Walzenmittelpunktes im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe.

Zusammengefasst ergibt sich eine Schwankungsbreite für den Abstand des Walzenmittelpunktes von der Wasseroberfläche z_{MP} zwischen $0,32 \cdot h_{\text{SF}}$ und $0,42 \cdot h_{\text{SF}}$.

Dies stimmt zum Teil mit den Ergebnissen von Stein (1992) überein, der für Sandfangtiefen $h_{SF} < 2$ m ein z_{MP} von $0,4 \cdot h_{SF}$ und für Tiefen > 2 m ein z_{MP} von $0,35 \cdot h_{SF}$ gemessen hat. Allerdings ergibt sich die Schwankungsbreite bei den vorliegenden Messungen bei gleichbleibender Sandfangtiefe, in Abhängigkeit von den Parametern Lufteintrag, Zahl der Düsen (Belüftungsart) und Einblastiefe.

6.2.4 Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell

6.2.4.1 Einfluss des Luftvolumenstroms auf den Abscheidegrad

In Abbildung 107 sind der Gesamtabscheidegrad und der Abscheidegrad bezogen auf die Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 3 dargestellt, die im verkleinerten Maßstab der Trennkorngröße entspricht. Sowohl der Gesamtabscheidegrad, als auch der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm nehmen mit steigendem Lufteintrag nahezu linear ab. Der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm beträgt ohne Lufteintrag im Mittel 88 % und bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 79,9 %. Der beste Gesamtabscheidegrad von im Mittel 78,3 % wird ohne Lufteintrag erreicht. Bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ nimmt der Gesamtabscheidegrad auf 69,6 % ab. Der zugegebene Sand weist einen Anteil von 20 % $< 0,063$ mm auf. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass sich dieser sehr feine Sand unterhalb der Schluffgrenze nicht abscheidet. Diese Korngröße ist im physikalischen Sandfangmodell vereinfachend analog zur Organik zu sehen. Das Absetzverhalten von Organik unterscheidet sich aber wegen der Aggregatbildung von dem von Schluff.

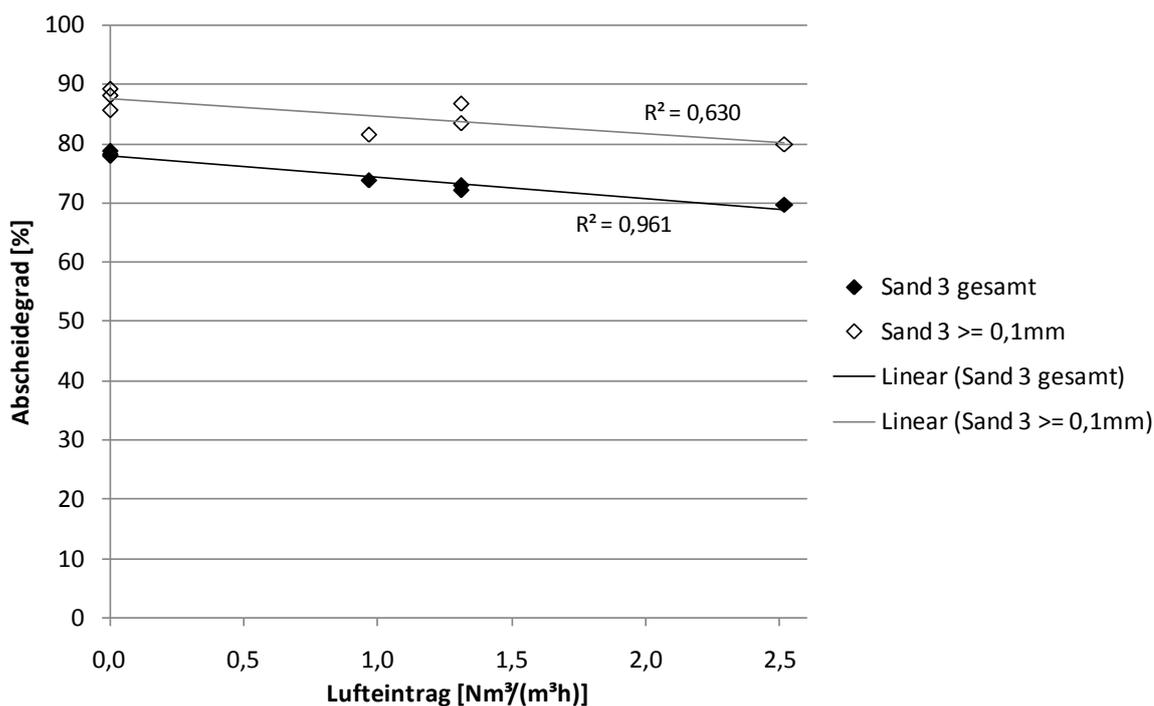


Abbildung 107: Abscheidegrade von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min) und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Eine Betrachtung der abgeschiedenen Korngrößen in Abhängigkeit vom Fließweg zeigt, dass der beste Abscheidegrad ohne Lufteintrag erreicht wird. So beträgt der Abscheidegrad nach einem Fließweg von 0,91 m ohne Lufteintrag schon 77,3 %, mit Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) 60,3 % und mit Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) 50,5 %. In allen drei Fällen lagert sich ein Großteil der Korngrößen $\geq 0,1$ mm schon im Zulaufbereich ab. Nach einem Fließweg von 2,81 m beträgt der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm ohne Lufteintrag schon 87,3 %, bei einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) 83,8 % und bei einem Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) 76,8%. Das bedeutet, dass sich der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm auf den letzten 40 % des Fließwegs nur noch um 1 bis 3 % verbessert.

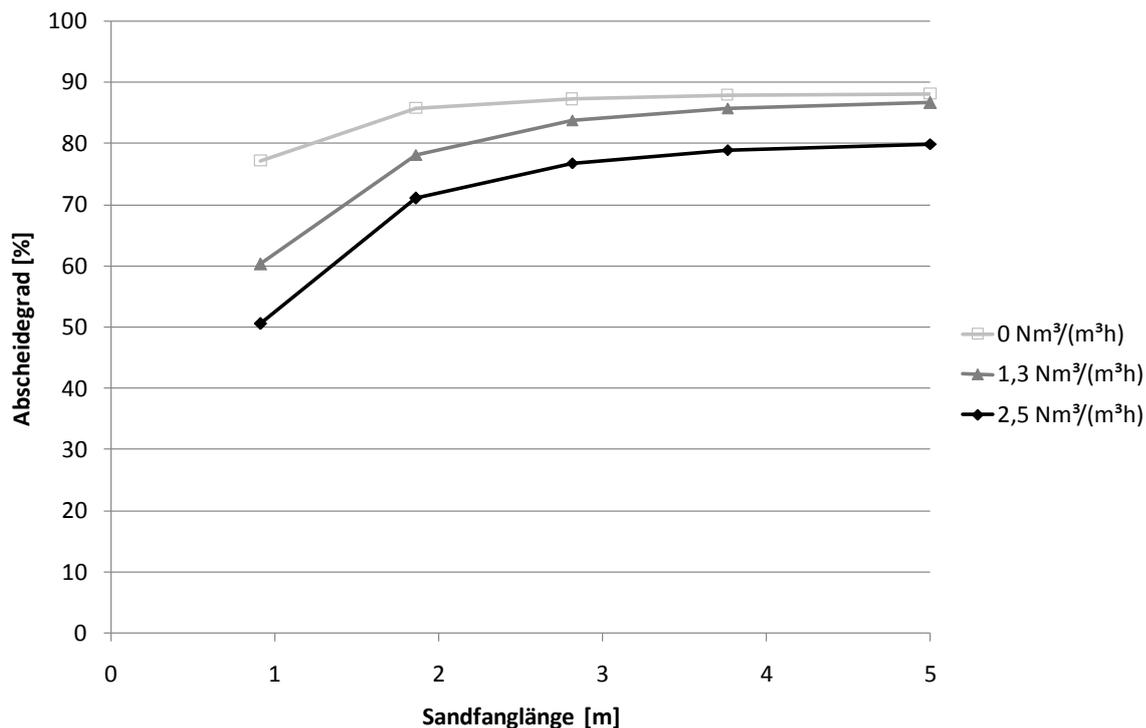


Abbildung 108: Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 3 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($t_R = 7,14$ min), einer Einblastiefe von $0,55$ m und Lufteinträgen von 0 Nm³/(m³·h), $1,3$ Nm³/(m³·h) und $2,5$ Nm³/(m³·h).

In Abbildung 109 sind die Korngrößenverteilungen des abgesetzten Sandes bei den Lufteinträgen 0 Nm³/(m³·h) und $2,5$ Nm³/(m³·h) dargestellt. Es wird deutlich, dass ohne Lufteintrag der abgesetzene Sand in den Abschnitten 2 bis 5 deutlich feiner ist. Ohne Lufteintrag beträgt der Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm im Abschnitt 2 $51,8$ % und im Abschnitt 5 93 %. Beim Lufteintrag von $2,5$ Nm³/(m³·h) beträgt der Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm im Abschnitt 2 $26,8$ % und im Abschnitt 5 $76,1$ %. Eine Ausnahme stellt der Abschnitt 1 dar, in dem der Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm mit 10 % gleich groß ist. Ein Grund dafür könnte die durch den Lufteintrag induzierte Spiralströmung sein, die die nahe der Wasseroberfläche zugegebenen Teilchen im Zulaufbereich erfasst und so früher zum Absetzen zwingt.

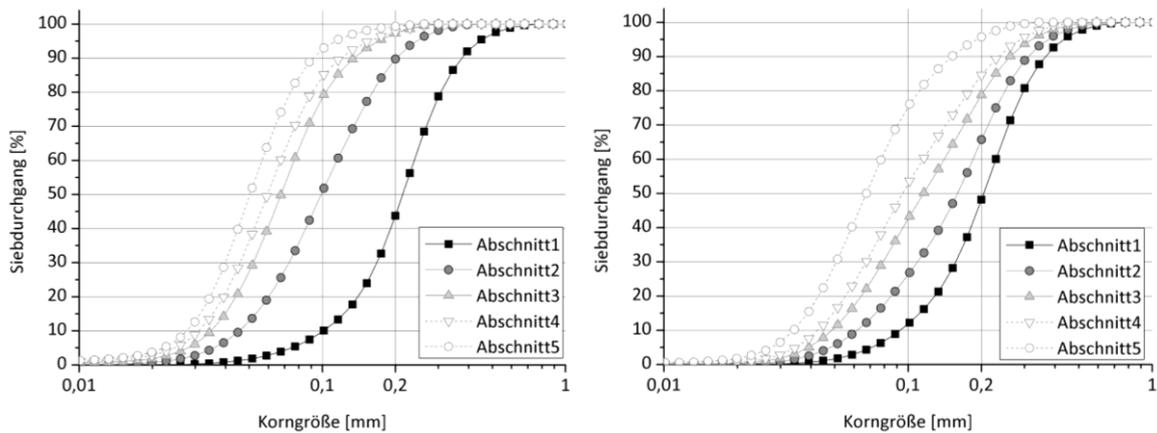


Abbildung 109: Korngrößenverteilungen von Sand 3 in den Abschnitten 1 bis 5 des physikalischen Sandfangmodells bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einer Einblastiefe von 0,55 m und Lufteinträgen von 0 Nm³/(m³·h) (links) und 2,5 Nm³/(m³·h) (rechts).

Um diese Hypothese näher zu untersuchen ist in Abbildung 110 die Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne bei einem Durchfluss von 5,5 l/s und den Lufteinträgen von 0 Nm³/(m³·h) und 2,5 Nm³/(m³·h) bei einer Einblastiefe von 0,55 m dargestellt. Es fällt auf, dass sich der abgeschiedene Sand bei einem Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) nach vorne verlagert. Auf den ersten 50 cm nach dem Zulauf lagert sich der meiste Sand ab und in Fließrichtung nimmt die abgesetzte Sandmenge ab. Ohne Lufteintrag liegt die größte Sandmasse dagegen im Bereich zwischen 1 m und 1,5 m vom Zulauf entfernt. Dies unterstützt die oben genannte Vermutung, dass die Spiralströmung des Lufteintrags die Teilchen früher zum Absetzen zwingt.

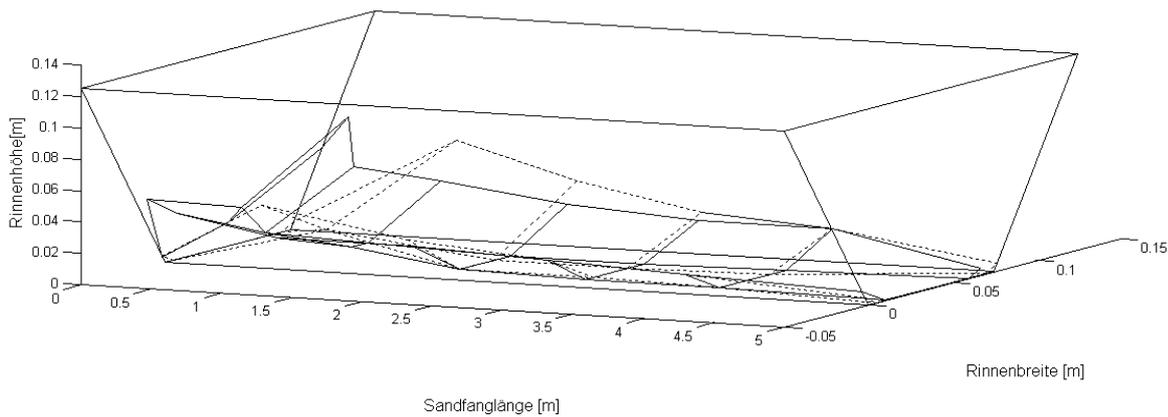


Abbildung 110: Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutterinne des physikalischen Sandfangmodells, bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ($t_R = 4,5$ min) und Lufteinträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (gestrichelte Linie) und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (durchgezogene Linie).

In Abbildung 111 sind der zugehörige quantitative Gesamtabscheidegrad und der Abscheidegrad, bezogen auf die Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 4, über die Sandfanglänge dargestellt. Hier fällt auf, dass zwar offensichtlich die Körner mit Lufteintrag früher sedimentieren, aber der Abscheidegrad mit Lufteintrag insgesamt niedriger ist. Während nach einem Fließweg von 0,91 m der Abscheidegrad mit Lufteintrag noch geringfügig höher ist, unterscheiden sich die Abscheidegrade mit zunehmendem Fließweg immer deutlicher voneinander. Nach einem Fließweg von 5 m beträgt der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 78,6 % und ohne Lufteintrag 90,5 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch den Lufteintrag die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die Teilchen wiederaufgewirbelt werden, so dass der quantitative Abscheidegrad ohne Lufteintrag besser ist.

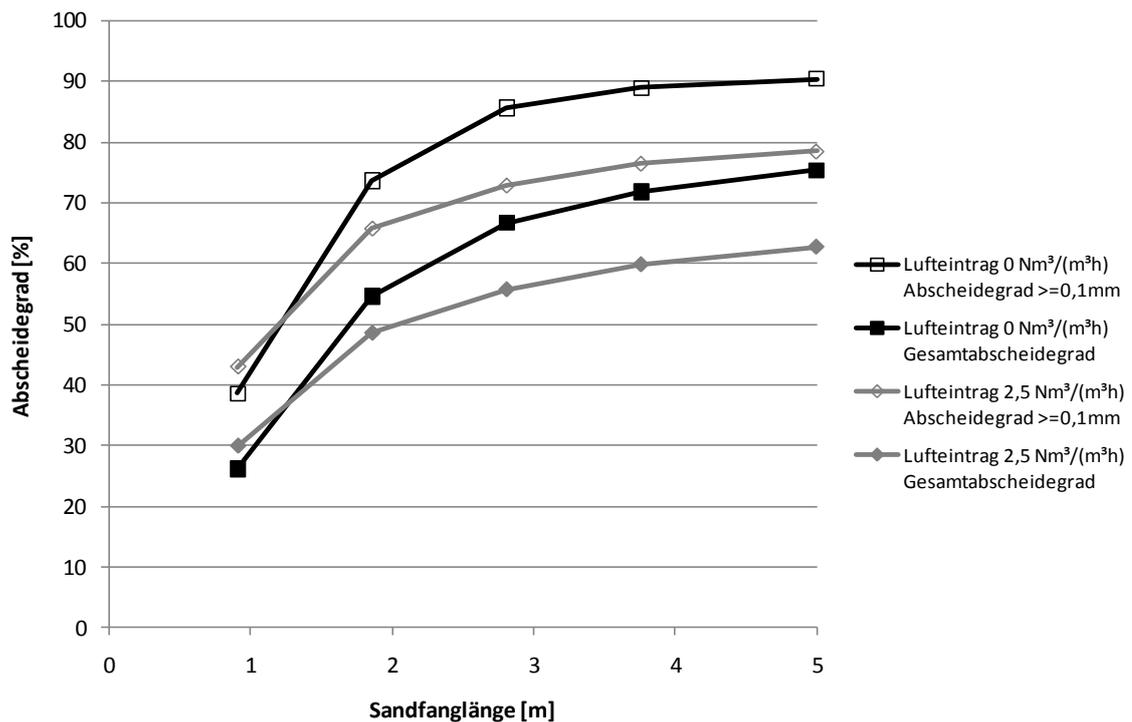


Abbildung 111: Gesamtabscheidegrad und Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 4 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ($t_R = 4,5$ min) und Luftbeiträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Ein Versuch mit nur 6 von 10 Belüftern wurde durchgeführt. Die Luftmenge wurde hierfür von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ um 60 % auf $0,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ verringert, um ein vergleichbares Geschwindigkeitsfeld zu erhalten. Der Gesamtabscheidegrad erhöhte sich dabei von 71,6 % auf 74,7 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 78,2 % auf 85,4 %. Diese deutliche Verbesserung des Abscheidegrades ist auf den geringeren Energieeintrag zurückzuführen. Beim Betrachten der turbulenten kinetischen Energie konnte gezeigt werden, dass diese mit nur 6 Belüftern, insbesondere im hinteren Teil des Querschnitts, deutlich geringer ist als mit 10 Belüftern (Abbildung 89). Die Versuchsreihe wurde trotz des besseren Abscheidegrades nicht mehr weitergeführt, weil sich starke Ablagerungen von Feinkorn auf der Sohle, im unbelüfteten Bereich des Sandfanges, bildeten. Um diese zu verhindern, müsste der Luftbeitrag im vorderen Bereich gesteigert werden, was zu einem erhöhten Energieeintrag führt.

6.2.4.2 Einfluss der Einblastiefe auf den Abscheidegrad

Die Ergebnisse in Abbildung 112 lassen einen zunehmenden Abscheidegrad von Sand 4 bei abnehmender Einblastiefe erkennen. Dies ist auf die abnehmende turbulente kinetische Energie im Querschnitt zurückzuführen. Ähnlich wie zuvor beim Lufteintrag ist der kurvenverlauf linear. Der beste Gesamtabscheidegrad mit 77,6 % wird bei einer Einblastiefe von 0,31 m erreicht, der geringste mit 69,5 % bei einer Einblastiefe von 0,62 m. Der Gesamtabscheidegrad, bei einer Einblastiefe von 0,21 m, ist mit 74 % geringfügig niedriger, als bei einer Einblastiefe von 0,31 m. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich beim Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm. Der beste Wert von 91,1 % wird bei einer Einblastiefe von 0,31 m erreicht, der geringste mit 78,2 % bei einer Einblastiefe von 0,55 m.

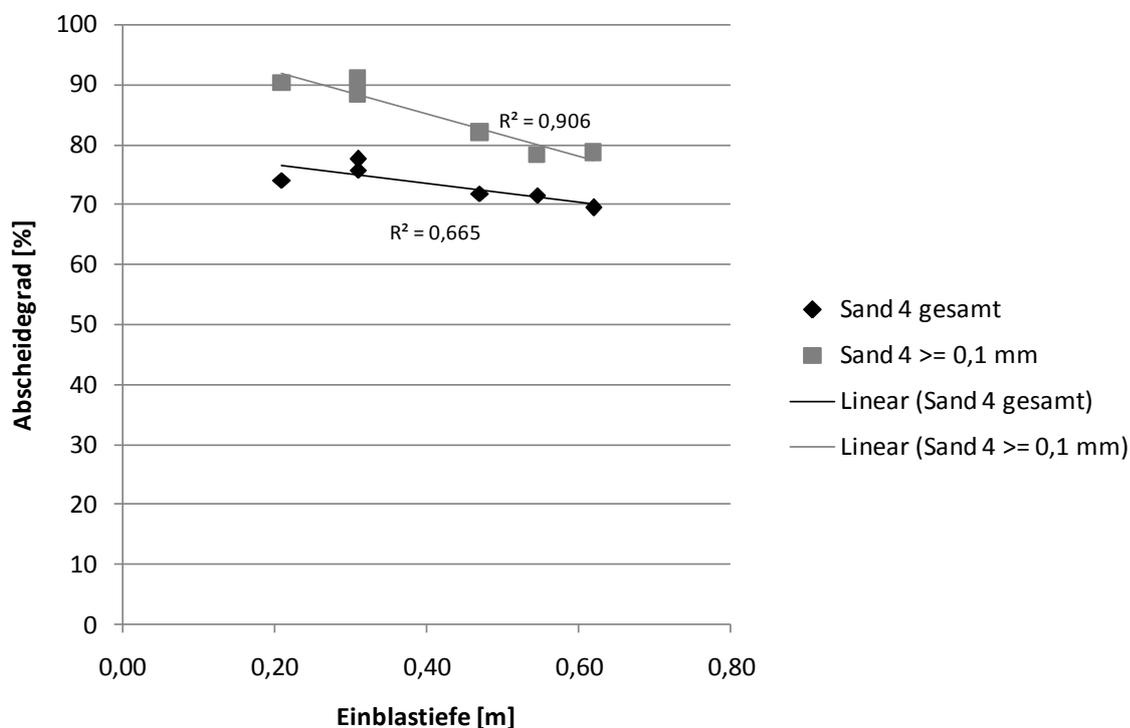


Abbildung 112: Abscheidegrad von Sand 4 im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min) und einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h).

In Abbildung 113 ist der Abscheidegrad von Sand 4 über die Sandfanglänge bei verschiedenen Einblastiefen dargestellt. Der Abscheidegrad verbessert sich mit abnehmender Einblastiefe. Die Unterschiede zwischen den Einblastiefen und 0,55 m und 0,62 m, sowie den Einblastiefen 0,21 m und 0,31 m, sind bei diesen Messungen allerdings sehr gering. Der beste Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 90,2 %, wird bei einer Einblastiefe von 0,31 m erreicht, der geringste von 78,2 %, bei einer Einblastiefe von 0,55 m. Ein ähnliches Ergebnis liefert der Gesamtabscheidegrad. Auch hier wird der beste Abscheidegrad von 75,8 % bei

einer Einblastiefe von 0,31 m erreicht und der geringste von 69,5 % bei einer Einblastiefe von 0,62 m.

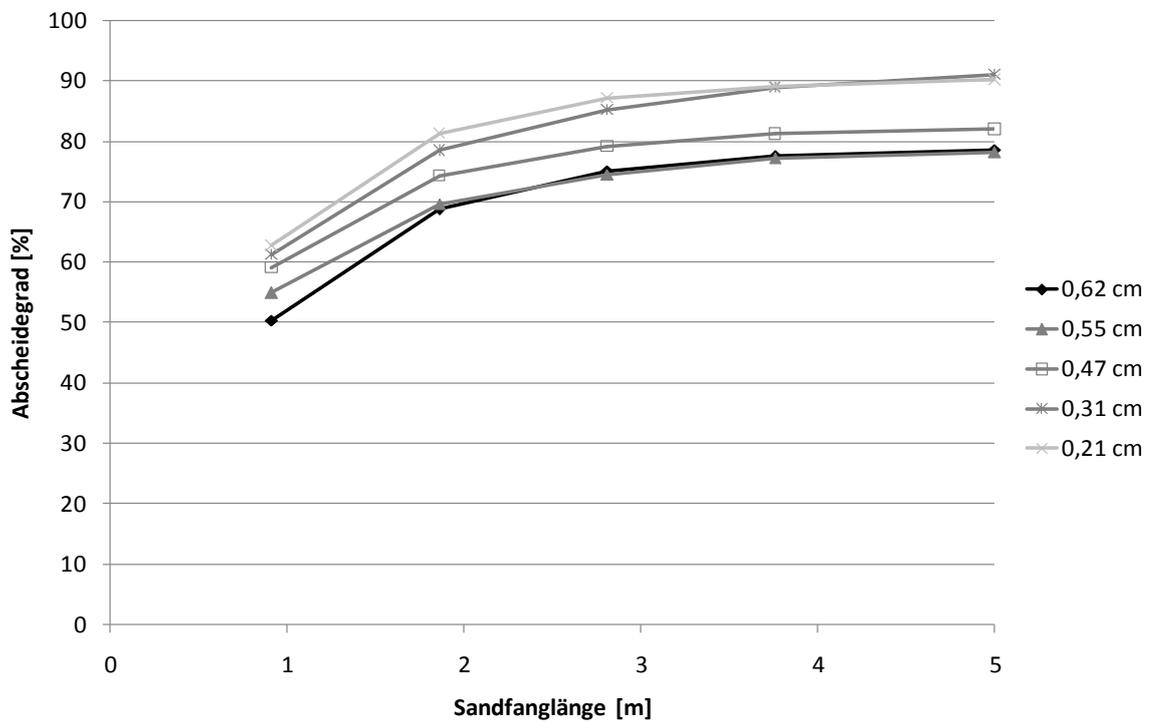


Abbildung 113: Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 4 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen.

Eine Betrachtung der Korngrößenverteilungen des abgeschiedenen Sandes 3 in den Abschnitten 1 bis 5 (Abbildung 114) zeigt, dass eine Verringerung der Einblastiefe zu einem ähnlichen Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm im Abschnitt 1 von 12 % bei 0,21 m, gegenüber 13 % bei 0,55 m führt. Im Abschnitt 2 und 3 sind die Anteile der Korngrößen $< 0,1$ mm dagegen bei einer Einblastiefe von 0,21 m mit 23,4 % und 42,1 % geringer als bei der Einblastiefe von 0,55 m, wo sie 39,1 % und 47,8 % betragen. Im Abschnitt 4 sind die Anteile der Korngrößen $< 0,1$ mm bei der Einblastiefe von 0,21 m mit 60,6 % höher, als bei 0,55 m mit 53,7 %. Im letzten Abschnitt unterscheiden sich die Anteile der Korngrößen $< 0,1$ mm bei beiden Einblastiefen nur wenig.

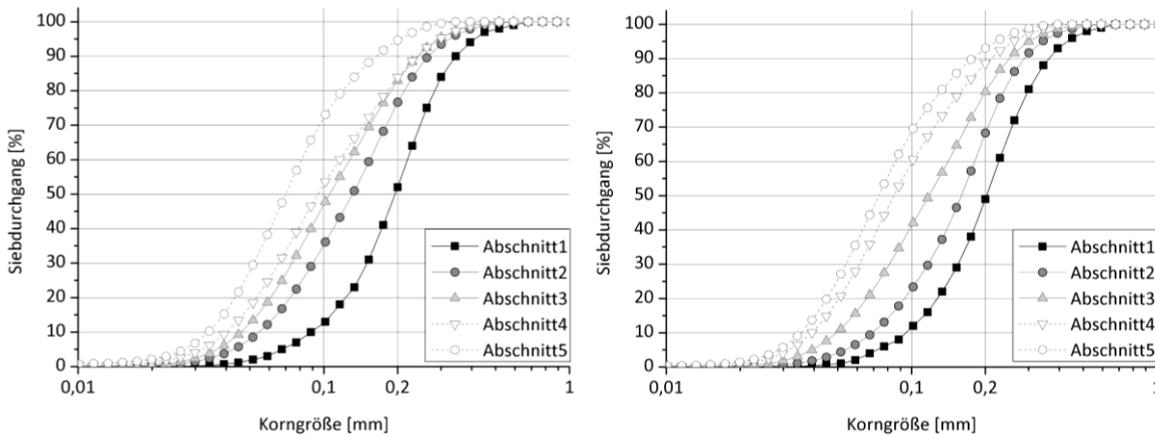


Abbildung 114: Korngrößenverteilungen von Sand 4 in den Abschnitten 1-5 des physikalischen Sandfangmodells bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und den Einblastiefen 0,55 m (links) und 0,21 m (rechts).

In Abbildung 115 ist die Verteilung des Sandes in der Sandfanggutrinne bei zwei verschiedenen Einblastiefen dargestellt. Es wird deutlich, dass bei geringerer Einblastiefe die Sedimentation nach vorne verlagert wird. Bei der Einblastiefe von nur 0,21 m liegt deutlich mehr Sediment im Zulaufbereich als bei der Einblastiefe von 0,55 m. Dieser Effekt dreht sich ab einem Fließweg von 1 m um. Ab einem Fließweg von 3 m ist die Sandabscheidung für beide Einblastiefen dann ähnlich gering.

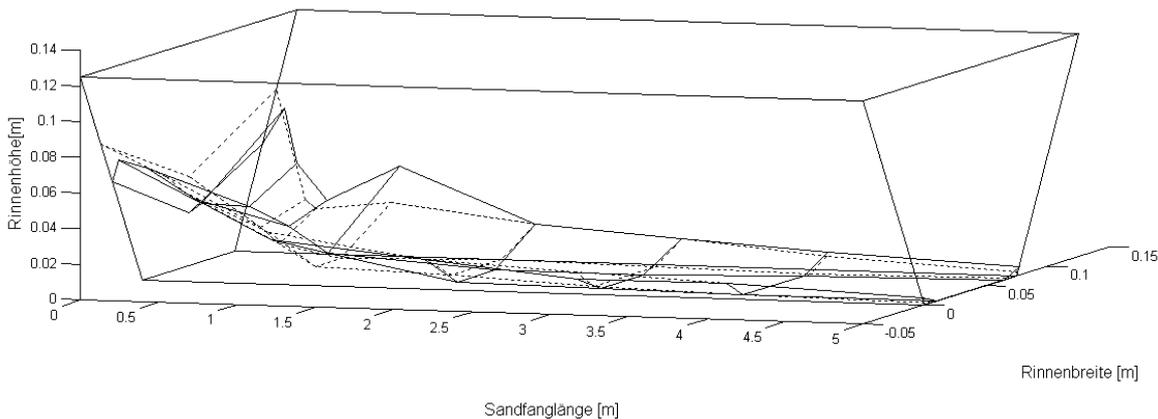


Abbildung 115: Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $h_{\text{bel}} = 0,55$ m (durchgezogene Linie) sowie $h_{\text{bel}} = 0,21$ m (gestrichelte Linie).

6.2.4.3 Einfluss des Durchflusses auf den Abscheidegrad

Eine Verringerung des Durchflusses bewirkt eine lineare Erhöhung des Abscheidegrades (Abbildung 116). So beträgt bei einem Durchfluss von 1,5 l/s ($t_R = 16,7$ min) der Gesamtabscheidegrad von Sand 3 77,9 % und bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ($t_R = 4,6$ min) 67,3 %. Der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm beträgt bei einem Durchfluss von 1,5 l/s 87,5 % und bei einem Durchfluss von 5,5 l/s 81,7 %. Bei allen Versuchen wurde die gleiche Sandmasse von 6400 g zugegeben, um eine bessere Vergleichbarkeit des abgelagerten Sandes zu erreichen. Dies führte bei dieser Versuchsreihe zu unterschiedlichen Zugabekonzentrationen von 83 mg/l bei 5,5 l/s, 130 mg/l bei 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min) und 296 mg/l bei 1,5 l/s.

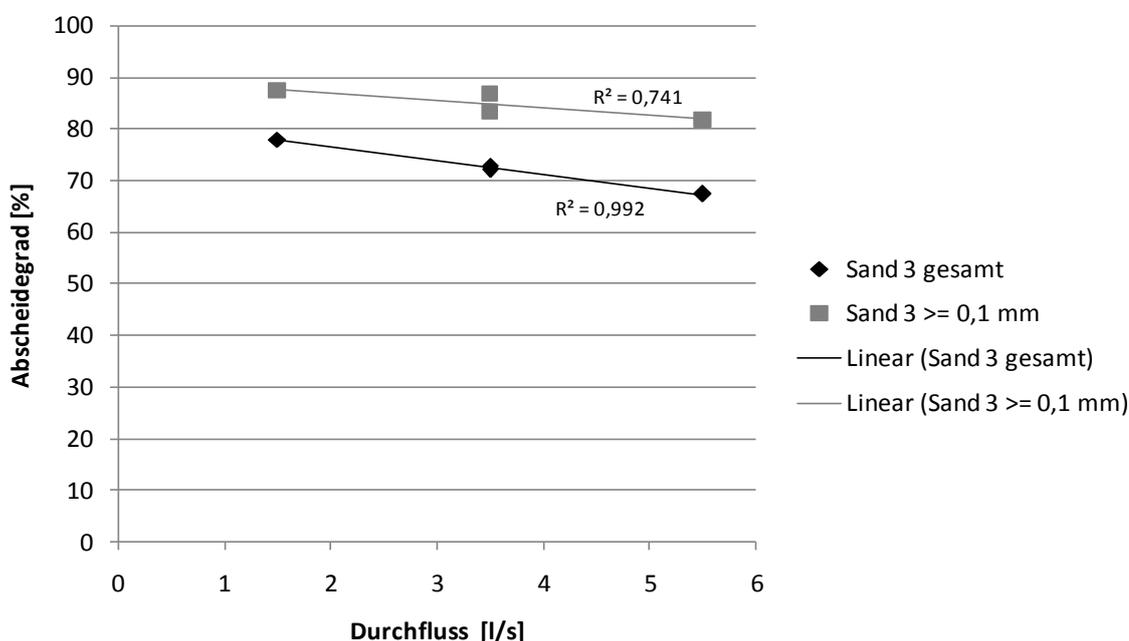


Abbildung 116: Einfluss des Durchflusses auf den Abscheidegrad von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.

In Abbildung 117 ist der Abscheidegrad von Sand 3 bei verschiedenen Durchflüssen über die Sandfanglänge dargestellt. Hier ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung der Lufteinträge. Bei einem Durchfluss von 1,5 l/s sind der Gesamtabscheidegrad mit 77,9 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm mit 87,5 % am besten, während bei einem Durchfluss von 5,5 l/s der Gesamtabscheidegrad mit 67,3 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm mit 81,7 % am geringsten sind.

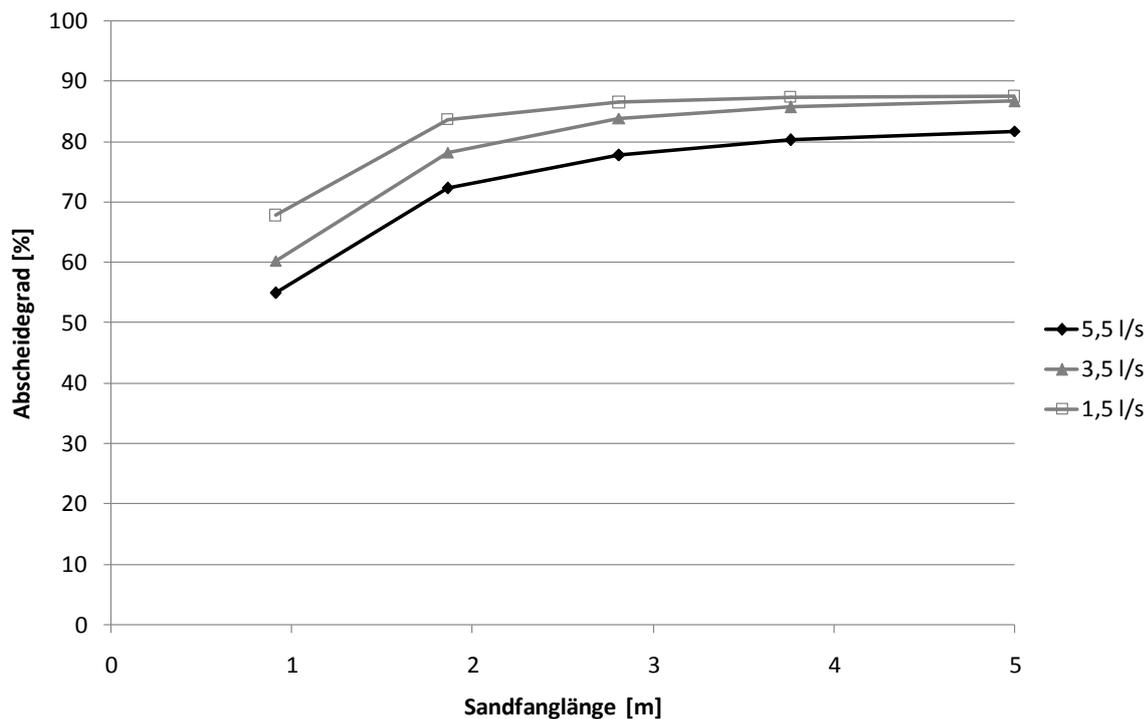


Abbildung 117: Abscheidegrad von Sand 3 der Korngrößen $\geq 0,1$ mm im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge, bei verschiedenen Durchflüssen und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

In Abbildung 118 sind Korngrößenverteilungen des Sandfanggutes bei verschiedenen Durchflüssen dargestellt. Der Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ entspricht einer Durchflusszeit von 16,7 Minuten, der Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ entspricht einer Durchflusszeit von 4,6 Minuten. Bei einem Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ ist der Klassiereffekt größer als bei $5,5 \text{ l/s}$. Beim Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ beträgt der Anteil der Korngrößen $< 0,1 \text{ mm}$ im Abschnitt 1 15,6 % und im Abschnitt 5 90,6 %. Beim Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ beträgt der Anteil der Korngrößen $< 0,1 \text{ mm}$ im Abschnitt 1 7,8 % und im Abschnitt 5 nur 55,2 %. Die Bandbreite zwischen Abschnitt 1 und Abschnitt 5 ist also bei $1,5 \text{ l/s}$ etwa doppelt so groß, wie bei dem Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$. Besonders in den Abschnitten 3 bis 5 ist der Feinkornanteil beim Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ größer, die Werte beim Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ liegen mit 47,1 % bis 55,2 % sehr dicht beieinander.

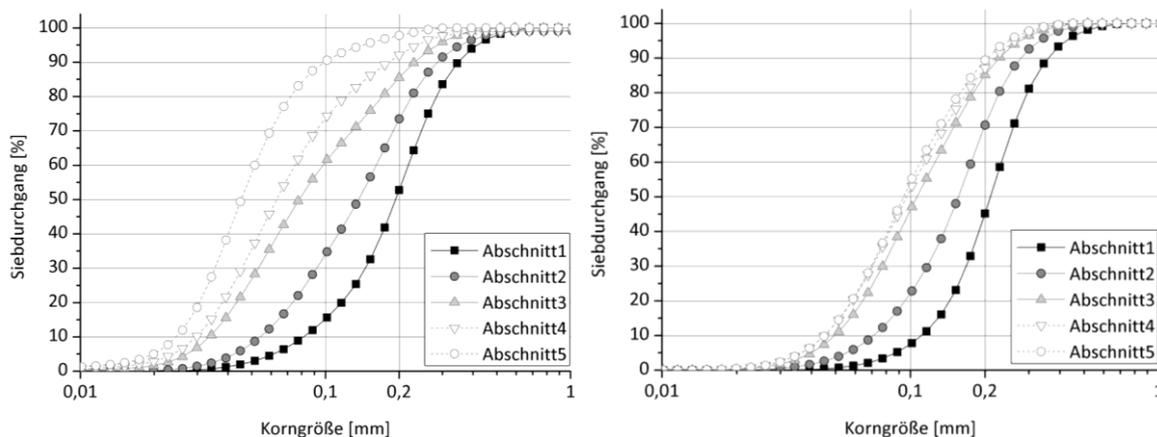


Abbildung 118: Korngrößenverteilung von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell in den Abschnitten 1 bis 5, bei den Durchflüssen von 1,5 l/s (links) und 5,5 l/s (rechts), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.

In Abbildung 119 ist die Sandverteilung von Sand 4 in der Sandsammelrinne ohne Lufteintrag bei den Durchflüssen 1,5 l/s und 5,5 l/s dargestellt. Es wird deutlich, dass sich der abgelagerte Sand bei dem Durchfluss von 5,5 l/s nach hinten verlagert. Beim Durchfluss von 1,5 l/s lagern sich 66,4 % des abgeschiedenen Sandes im Zulaufbereich ab, beim Durchfluss von 5,5 l/s nur 26,2 %. Der Gesamtabscheidegrad beträgt beim Durchfluss von 1,5 l/s 81,5 %, bei 5,5 l/s 75,4 %.

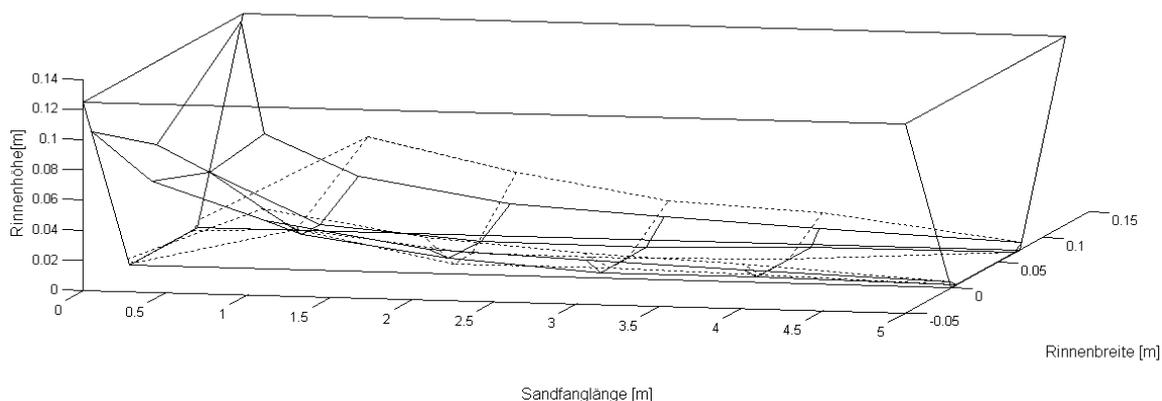


Abbildung 119: Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutterrinne im physikalischen Sandfangmodell ohne Lufteintrag, bei den Durchflüssen 1,5 l/s ($t_R=16,7 \text{ min}$) (durchgezogene Linie) und 5,5 l/s ($t_R=4,5 \text{ min}$) (gestrichelte Linie).

6.2.4.4 Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad

In Abbildung 120 sind die Abscheidegrade von Sand 2 und Sand 3 in Abhängigkeit vom Lufteintrag dargestellt. Beim gröberen Sand 2 beträgt der Anteil $\geq 0,1$ mm 73 %, beim feineren Sand 3 66,7 %. Die Abscheidegrade sind beim feineren Sand deutlich geringer, fallen aber mit steigendem Lufteintrag nicht so steil ab. Wenn man die Abscheidegrade bezogen auf die Korngrößen $\geq 0,1$ mm auswertet fällt auf, dass sich die Kurven parallel nach oben verschieben.

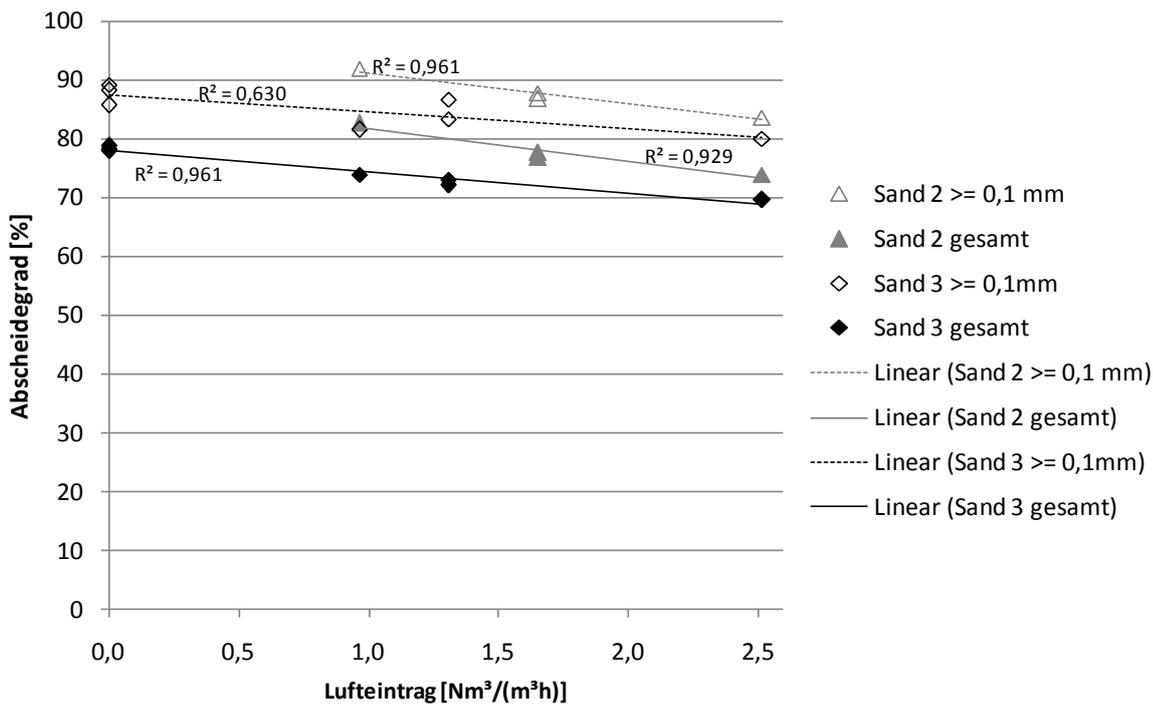


Abbildung 120: Einfluss der Korngrößenverteilung (Sand 2 und Sand 3) auf den Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und einer Einblastiefe von 0,55 m.

In Abbildung 121 sind die Abscheidegrade der Sande 1, 2 und 3 über die Sandfanglänge dargestellt. Beim feineren Sand 3 beträgt der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm im Abschnitt 1 nur 50,5 %, gegenüber 64,3 % beim gröberen Sand 1. Der Abscheidegrad nach 5 m Fließweg beträgt bei Sand 3 79,9 % und bei Sand 1 87,8 %. Dies zeigt einen deutlichen Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad. Das gleiche Ergebnis ergibt sich beim Vergleich der Gesamtabscheidegrade. So beträgt der Gesamtabscheidegrad von Sand 1 am Ende des Sandfanges 87,0 % und von Sand 3 69,6 %. Hier wird deutlich, dass beim groben Sand 1 der Gesamtabscheidegrad ähnlich hoch ist, wie der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm, wogegen beim feineren Sand 3 der Gesamtabscheidegrad deutlich geringer ist, als der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm.

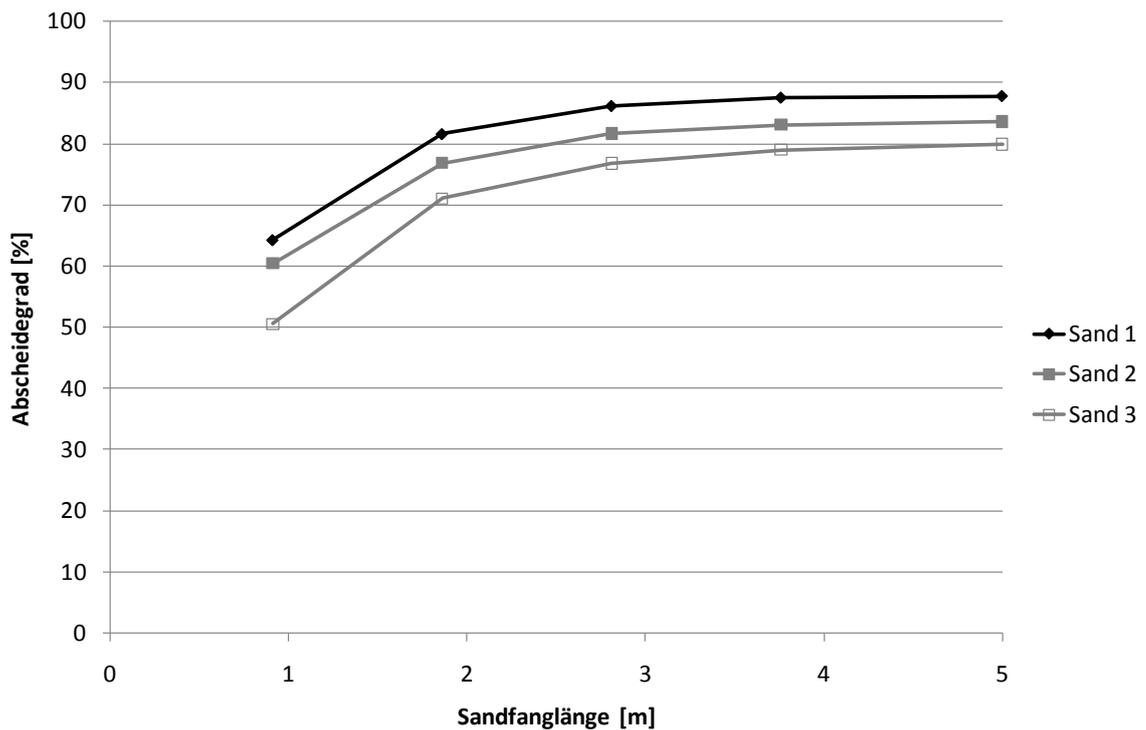


Abbildung 121: Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 1, 2 und 3 im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Interessant ist hier auch die Betrachtung der Korngrößenverteilungen des abgelagerten Sandes in den Abschnitten 1 bis 5 (Abbildung 122). Der Klassiereffekt ist beim feinen Sand 3 viel größer. Im Abschnitt 1 hat der abgeschiedene Sand 1 einen Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm von 6,5 % und im Abschnitt 5 von 34,5 %. Der abgelagerte Sand 3 hat im Abschnitt 1 einen Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm von 12,1 % und im Abschnitt 5 von 76,1 %.

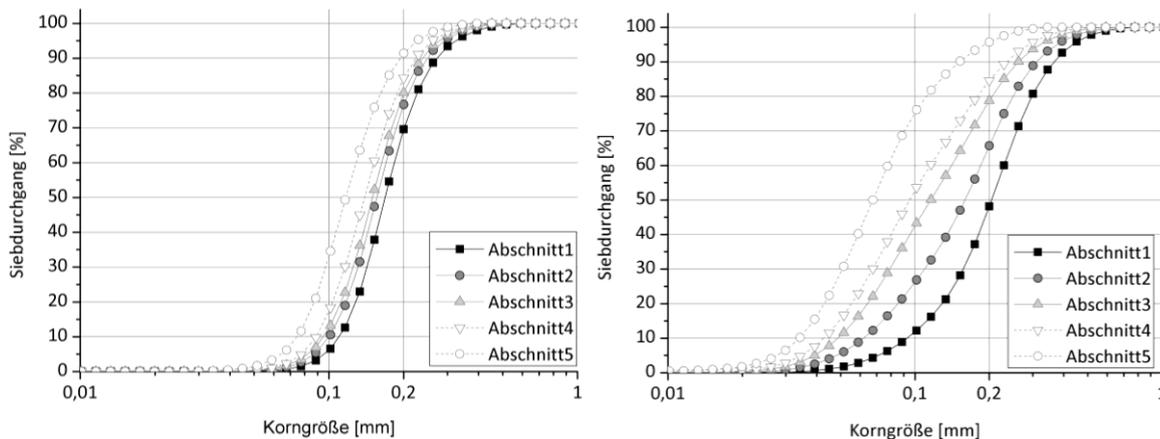


Abbildung 122: Korngrößenverteilungen von Sand 1 (links) und Sand 3 (rechts) in den Abschnitten 1-5 des physikalischen Sandfangmodells, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) und einer Einblastiefe von 0,55 m.

In Abbildung 123 wurden beispielhaft zwei Parameter verändert, um zu zeigen, ob eine Kompensation verschiedener Einflüsse auf den Abscheidegrad möglich ist. So wurde bei einer Versuchsreihe der Durchfluss von 1,5 l/s über 3,5 l/s auf 5,5 l/s erhöht und einmal der feinere Sand 3, bei einem geringeren Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), zugegeben. Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde gröberer Sand 2, bei einem höheren Lufteintrag von 1,7 Nm³/(m³·h), zugegeben. Es ist zu beobachten, dass sich der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm gegenüber dem Gesamtabscheidegrad parallel nach oben verschiebt. Die Abscheidegrade von Sand 2 fallen bei steigendem Durchfluss steiler ab, als von Sand 3. Sonst sind die Ergebnisse sehr ähnlich. So ist bei einem Durchfluss von 1,5 l/s der Gesamtabscheidegrad von Sand 2, mit einem Lufteintrag von 1,7 Nm³/(m³·h), 78,7 % und bei Sand 3, mit einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), 77,9 %. Die Werte für den Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm betragen 84,9 % für Sand 2 und 87,5 % für Sand 3. Bei einem Durchfluss von 5,5 l/s weichen die Werte, insbesondere der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm, stärker voneinander ab. Bei Sand 3 beträgt der Wert 81,7 % und bei Sand 2 70,2 %. Der Gesamtabscheidegrad von Sand 3 beträgt beim Durchfluss von 5,5 l/s 67,3 % und der von Sand 2 62,9 %. Bemerkenswert ist, dass bei dem Durchfluss von 5,5 l/s und dem Lufteintrag von 1,7 Nm³/(m³·h) der Abscheidegrad des Sandes 2 geringer ist, als der des Sandes 3. Grund hierfür kann die erhöhte turbulente kinetische Energie sein. Darauf wird in der Diskussion näher eingegangen. Trotzdem wird hier deutlich, dass die Verwendung einer feineren Korngröße mit geringerem Lufteintrag, einen ähnlichen Abscheidegrad erzielen kann, wie eine gröbere Korngröße mit höherem Lufteintrag. Deshalb ist es für den Betrieb von belüfteten Sandfängen sehr wichtig, die Korngrößenverteilung des Sandes im Abwasser zu kennen.

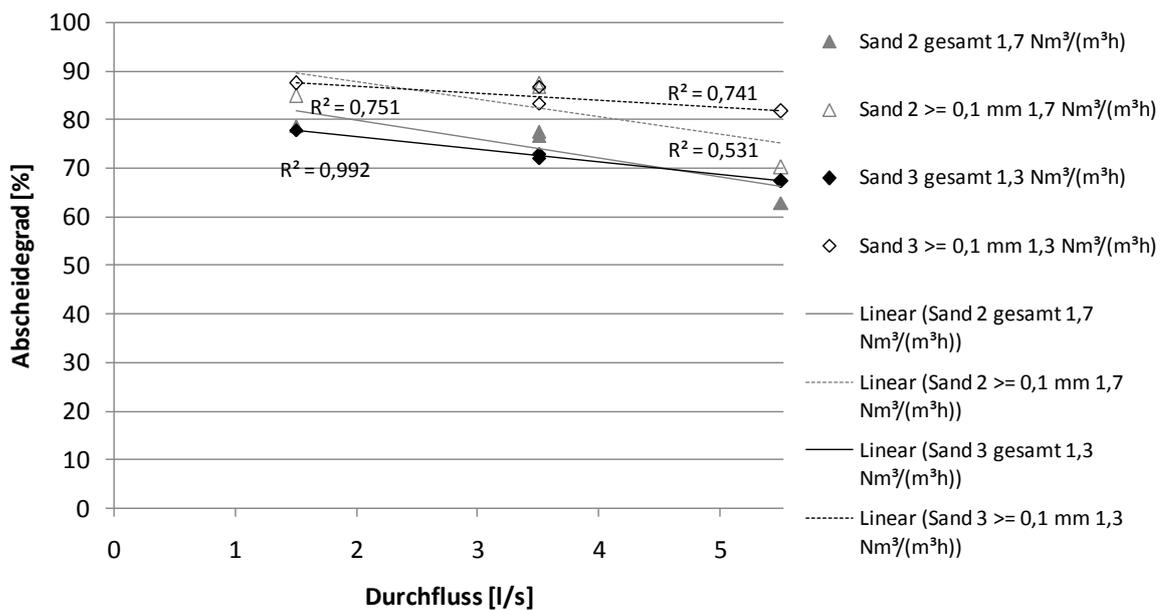


Abbildung 123: Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit vom Durchfluss, bei verschiedenen Lufteinträgen.

6.2.4.5 Einfluss der Sandkonzentration auf den Abscheidegrad

In Abbildung 124 ist der Einfluss der Sandkonzentration auf den Abscheidegrad dargestellt. Gemessen wurde der Abscheidegrad von Sand 4 bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), einer Einblastiefe von 0,55 m und den Sandkonzentrationen 125 mg/l, 250 mg/l und 500 mg/l. Es ergibt sich hier ein ähnlicher Zusammenhang des Abscheidegrades von der Sandkonzentration, wie bei den großtechnischen Messungen (Abbildung 74). Im physikalischen Sandfangmodell wurden als beste Ergebnisse der Gesamtabscheidegrad von 76,4 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 84,1 %, bei der höchsten Sandkonzentration von 500 mg/l erzielt. Der Verlauf der Messwerte lässt eine exponentielle Abnahme des Abscheidegrades bei Sandkonzentrationen von unter 100 mg/l vermuten.

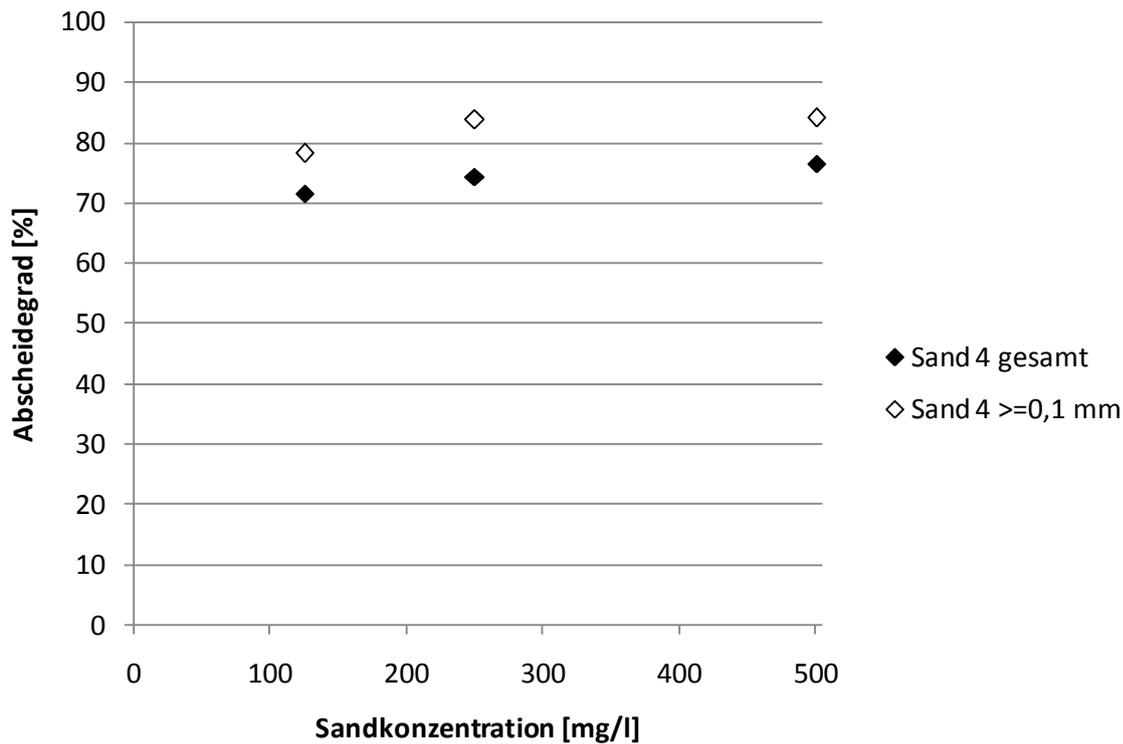


Abbildung 124: Einfluss der Sandkonzentration von Sand 4 auf den Gesamtabscheidegrad und den Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.

In Abbildung 125 ist die gemessene Sandverteilung in der Sandfanggutterinne bei den Sandkonzentrationen 125 mg/l und 500 mg/l und oben beschriebenen Versuchseinstellungen dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die abgesetzte Sandmenge an jeder Stelle deutlich erhöht. Die größte Sandmenge setzt sich in beiden Fällen wieder im Abschnitt 1 nahe dem Zulauf ab.

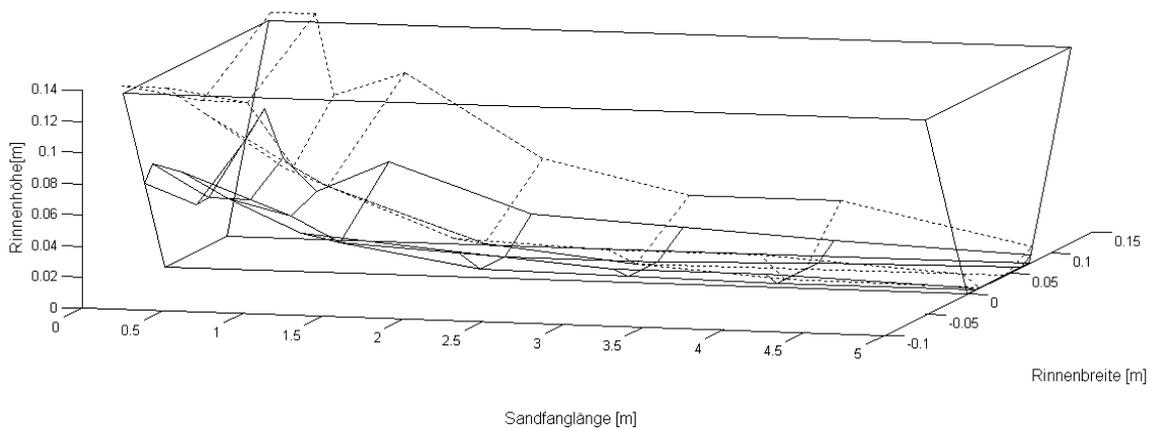


Abbildung 125: Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutterinne im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Sandkonzentration von 125 mg/l (durchgezogene Linie) sowie 500 mg/l (gestrichelte Linie).

6.2.4.6 Einfluss der Querschnittsgestaltung auf den Abscheidegrad

Zwei Messungen des Abscheidegrades am Rechteckquerschnitt wurden analog zu denen am Trapezquerschnitt, bei einer Durchflusszeit von 7,14 min durchgeführt. Diese wurde durch einen Durchfluss von 2,8 l/s erreicht. Die Einblastiefe betrug bei beiden Messungen 0,47 m und der Lufteintrag $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Ohne Lufteintrag war der Gesamtabscheidegrad für beide Querschnitte sehr ähnlich. Er betrug 76,7 % beim Rechteckquerschnitt und 78,7 % beim Trapezquerschnitt. Der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ war beim Rechteckquerschnitt 90,4 % und beim Trapezquerschnitt 88,1 %. Ein anderes Ergebnis ergab die Betrachtung der Ergebnisse bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Hier war sowohl der Gesamtabscheidegrad, als auch der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$, beim Trapezquerschnitt um rund 6 % geringer als beim Rechteckquerschnitt. Es wurde bei den Messungen, zur besseren Vergleichbarkeit, allerdings immer die gleiche Sandmasse eingetragen, so dass die Sandkonzentration aufgrund des größeren Durchflusses im Trapezquerschnitt mit 125,3 mg/l kleiner war als beim Rechteckquerschnitt, wo sie 156,7 mg/l betrug. Dies könnte den geringeren Abscheidegrad des Trapezquerschnitts erklären. Ein weiterer Grund könnten die höhere Fließgeschwindigkeit u in der Sandsammelrinne des Trapezquerschnitts von 0,06 m/s, gegenüber 0 m/s am Boden des Rechteckquerschnittes (Abbildung 103), und die geringere turbulente kinetische Energie auf den ersten 3 m der Sandfanglänge des Rechteckquerschnitts (Abbildung 104), sein. Ansonsten herrschen beim Rechteckquerschnitt die gleichen linearen Abhängigkeiten zwischen Abscheidegrad und Lufteintrag wie beim Trapezquerschnitt. Dies wurde durch zwei weitere Messungen, mit Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,47 m, sowie mit Lufteintrag von

1,3 Nm³/(m³·h) und einer Einblastiefe von 0,31 m, festgestellt. Diese Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen A 44 und A 45 aufgeführt.

6.2.5 Modellierung der Strömung und des Partikeltransports

6.2.5.1 Wirkungsgraph

Um das Verhalten eines Systems untersuchen zu können, muss ein Modell als vereinfachte Abbildung erstellt werden. Von einem System spricht man, wenn ein Objekt in unserer Umwelt durch einen bestimmten Systemzweck definiert werden kann (Bossel, 1994). Die Elemente des Systems müssen zueinander in bestimmten Wirkungsverknüpfungen stehen, durch die die Funktionen gewährleistet werden. Ein System ist nicht teilbar, das heißt, es kann kein Element entfernt werden, ohne dass der Systemzweck zerstört wird. Als Beispiel kann man eine Kläranlage nennen, die den Zweck Reinigung von Abwasser erfüllt. Diesen Zweck kann sie nach Entfernung bestimmter Elemente, z. B. dem Sandfang, oder dem Nachklärbecken, nicht mehr vollständig erfüllen.

Ein System, das über den betrachteten Zeitraum den Zustand ändert, heißt dynamisches System. Dies trifft auch auf Kläranlagen zu, bei denen der Zulauf über den Tag deutlichen Schwankungen unterliegt. Systeme sind von ihrer Umwelt klar durch Systemgrenzen abgetrennt. Bei einer Kläranlage handelt es sich bei den Systemgrenzen um den Zu- und den Ablauf.

Nach Bossel (1994) müssen zunächst die wichtigsten Modellgrößen definiert werden. In Hunze (2005) findet sich ein Beispiel für einen unbelüfteten Sandfang. Ziel des Modellaufbaus ist die Berechnung der Sandfracht im Becken, bzw. der Sandfracht im Ablauf. Die dort aufgeführten Modellgrößen müssen um den Lufteintrag ergänzt werden, so dass folgende Modellgrößen definiert werden können:

- Länge
- Tiefe
- Querschnitt
- Volumen
- Durchflusszeit
- Zulauf
- Ablauf
- Sinkgeschwindigkeit
- Korngröße
- Geschwindigkeiten u, v, w
- Turbulente kinetische Energie
- Sandkonzentration im Zulauf
- Sandkonzentration im Ablauf
- Sandfracht im Zulauf

- Sedimentierte Sandfracht
- Lufteintrag
- Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen.

Aus den Modellgrößen lässt sich nun ein Wortmodell erstellen, in dem die Wirkungsbeziehungen erklärt werden. Wichtig hierbei ist, dass nur direkte Wirkungsbeziehungen definiert werden (Bossel, 1994; Hunze, 2005):

- Je größer die Länge, desto größer die Durchflusszeit.
- Je größer die Tiefe, desto geringer die sedimentierte Sandfracht.
- Je größer der Querschnitt, desto größer die Durchflusszeit.
- Je größer das Volumen, desto größer die Durchflusszeit.
- Je größer die Durchflusszeit, desto mehr sedimentierte Sandfracht.
- Je größer die Korngröße, desto größer die Sinkgeschwindigkeit.
- Je größer die Sinkgeschwindigkeit, desto mehr sedimentierte Sandfracht.
- Je größer die Sandfracht im Zulauf, desto größer die sedimentierte Sandfracht.
- Je größer der Querschnitt, desto kleiner die Fließgeschwindigkeit u .
- Je größer der Zulauf, desto größer die Fließgeschwindigkeit u .
- Je kleiner die Fließgeschwindigkeiten u , v und w desto kleiner turbulente kinetische Energie
- Je kleiner die turbulente kinetische Energie, desto weniger Sandkonzentration im Becken.
- Je weniger Sandkonzentration im Becken, desto mehr sedimentierte Sandfracht.
- Je weniger Sandkonzentration im Becken, desto weniger Sandfracht im Ablauf.
- Je mehr Lufteintrag, desto größere Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen
- Je größer die Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen, desto mehr v , w .

Diese Wirkungsbeziehungen sind nun in Abbildung 126 grafisch dargestellt. Sie können als Grundlage für eine Simulation benutzt werden.

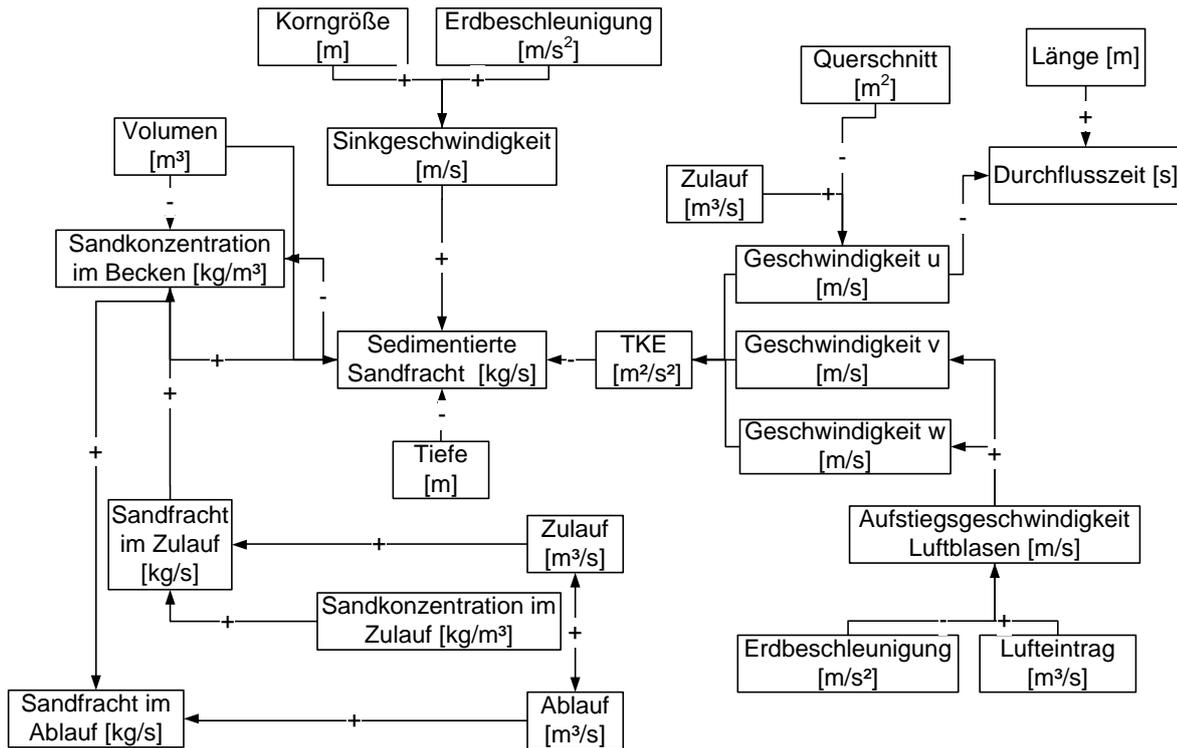


Abbildung 126: Wirkungsbeziehungen in einem belüfteten Sandfang (nach Hunze, 2005).

6.2.5.2 Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes

Das hier vorgestellte mathematische Modell wurde aus den zuvor gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen entwickelt. In Abbildung 127 ist die gewählte Vorgehensweise zur Berechnung von $v(y,z)$ und $w(y,z)$ dargestellt. Am Anfang wird v_{\max} an der Wasseroberfläche in der Mitte des Sandfanges und daraus w_{\max} an der Seitenwand (bzw. Tauchwand) des Sandfanges auf Höhe des Walzenmittelpunktes berechnet. Aus v_{\max} wird dann zunächst eine Verteilung $v(y)$ über die Wasseroberfläche berechnet. Die Werte von $v(y)$ sind an jeder Stelle y die Eingangsparameter für die Berechnung von $v(z)$. Analog dazu wird $w(x,z)$ berechnet. Die detaillierte Berechnung wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

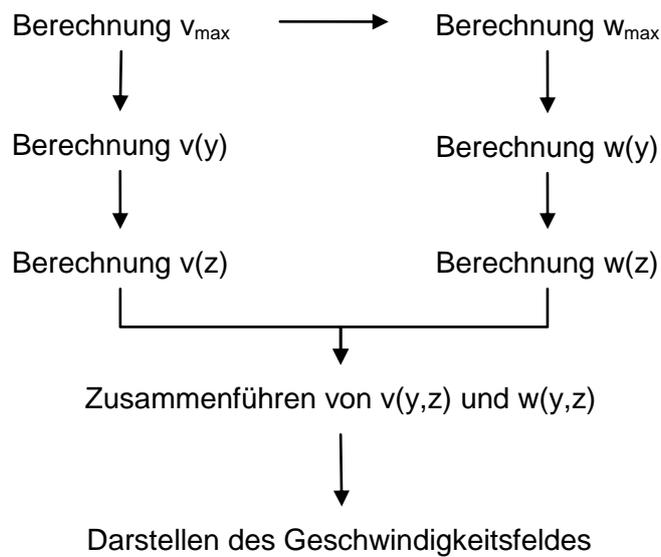


Abbildung 127: Vorgehensweise zur Berechnung von $v(y,z)$ und $w(y,z)$.

Für die Berechnung von v_{\max} an der Wasseroberfläche wurden in Kapitel 3.4.2.3 die Ansätze von Kobus (1973) und Sawicki (2004) erläutert. Diese sollen nun mit den Messwerten verglichen werden. Da die Messwerte einer gewissen Streuung unterliegen, wurden für diese Auswertung zunächst Regressionen mit quadratischen Funktionen durchgeführt und die so erhaltenen Werte dann ausgewertet. Vorteil dieser Methode ist, dass die Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche so extrapoliert werden können.

In Abbildung 128 ist ein Vergleich der Messwerte und mit den berechneten Werten nach verschiedenen Ansätzen dargestellt. Es fällt auf, dass die Rechnung nach Kobus (1973) die tatsächlichen Geschwindigkeiten überschätzt und die Rechnung nach Sawicki (2004) die Geschwindigkeiten unterschätzt.

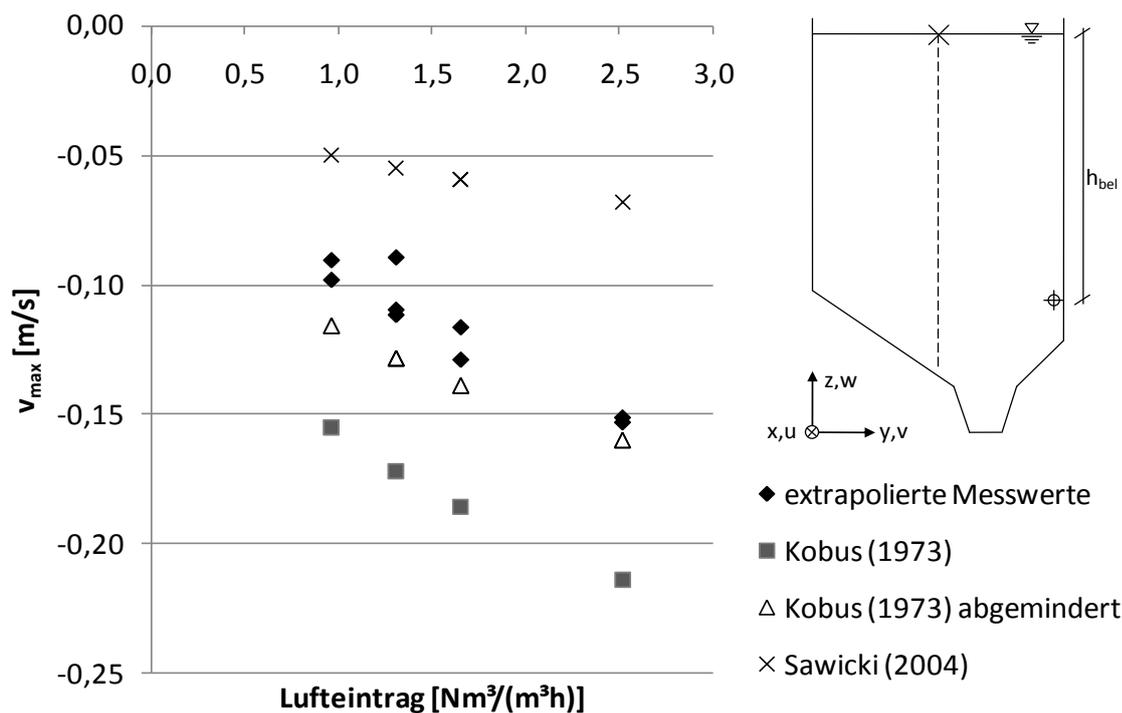


Abbildung 128: Vergleich zwischen extrapolierten Messwerten von v_{max} und Ansätzen von Kobus (1973) und Sawicki (2004) in Abhängigkeit vom Lufteintrag.

Die besten Ergebnisse ergaben sich mit dem Ansatz von Kobus (1973), in den der Lufteintrag nach Patt (1990) doppelt eingesetzt wurde, multipliziert mit einem Abminderungsfaktor, der sich aus den Überlegungen von Londong (1987) für die Einblastiefe und Sohlgeschwindigkeit ergibt.

Er stellte eine logarithmische Abhängigkeit der Sohlgeschwindigkeit von der Einblastiefe und eine quadratische Abhängigkeit der Sohlgeschwindigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis fest. Diese Abhängigkeiten wurden nun auf die Oberflächengeschwindigkeit übertragen.

Die Ergebnisse der eigenen Messungen zeigten, dass vereinfachend auch eine lineare Abhängigkeit der Oberflächengeschwindigkeit von der Einblastiefe herangezogen werden kann. Mit den Randbedingungen, dass die Oberflächengeschwindigkeit bei der Einblastiefe von 0 m gleich Null und bei der Einblastiefe von h_{SF} maximal ist, ergibt sich Gleichung (67).

$$v_{max} = v \frac{h_{bel}}{h_{SF}} \quad (67)$$

Für die quadratische Gleichung der Form $y=a \cdot x^2+b \cdot x+c$ zur Beschreibung der Oberflächengeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis des Sandfanges können die folgenden drei Randbedingungen definiert werden.

- Die Geschwindigkeit v wird bei einem Wert von 0 zu Null.
- Die Geschwindigkeit v hat den Betrag v_{\max} bei einem Breite/Tiefe-Verhältnis von 0,85.
- Aufgrund des Maximums bei dem Breite/Tiefe-Verhältnis von 0,85 ist dort die Ableitung der quadratischen Funktion gleich 0.

Daraus ergeben sich folgende Werte für die Parameter a und b in den Gleichungen (68) bis (70).

$$a = -1,384083045 \quad (68)$$

$$b = 2,352941176 \quad (69)$$

$$c = 0 \quad (70)$$

Als Vorfaktoren zur Geschwindigkeit v multipliziert, ergibt sich daraus der Zusammenhang für die Oberflächengeschwindigkeit in Gleichung (71).

$$v_{\max} = v \frac{h_{bel}}{h_{SF}} \cdot \left(-1,384 \left(\frac{b_{SF}}{h_{SF}} \right)^2 + 2,353 \left(\frac{b_{SF}}{h_{SF}} \right) \right) \quad (71)$$

Für v wird die Geschwindigkeit nach Gleichung (26) nach Patt (1990) und Kobus (1973) eingesetzt. In Abbildung 129 sind die extrapolierten Messwerte für v_{\max} , in Abhängigkeit von der Einblastiefe, zusammen mit dem Ansatz von Kobus (1973) und Sawicki (2004) dargestellt. Bei geringen Einblastiefen werden die Messwerte trotz Korrekturfaktor unterschätzt. Dies ist aber von untergeordneter Bedeutung, da diese geringen Einblastiefen energetisch nicht sinnvoll sind.

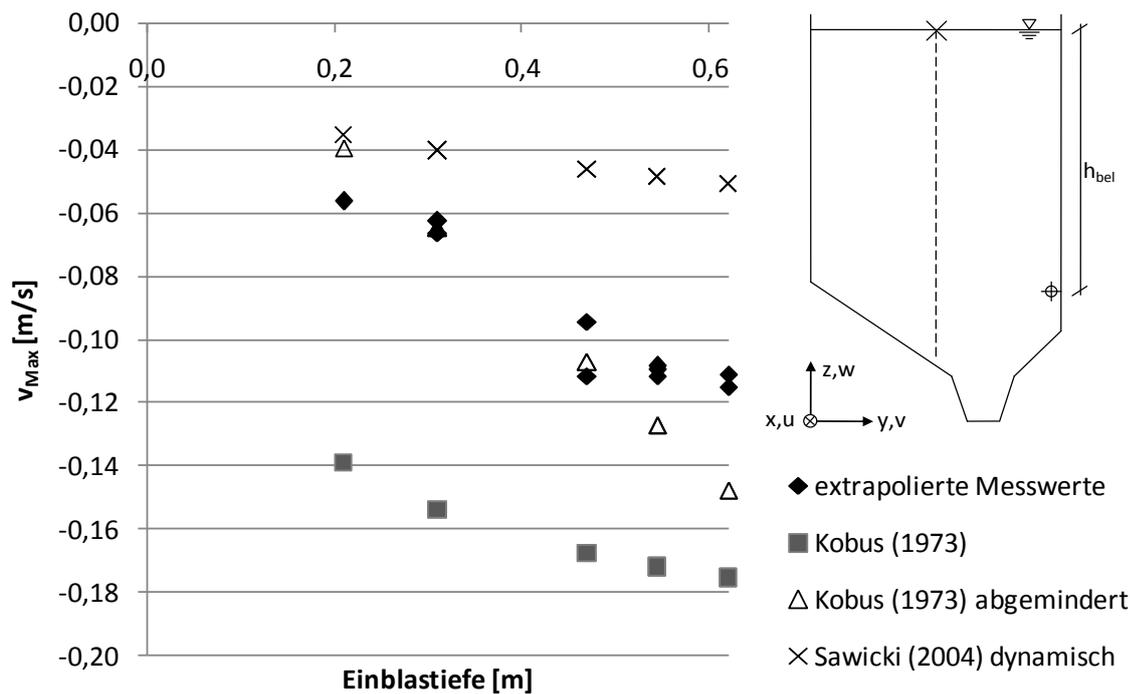


Abbildung 129: Vergleich zwischen extrapolierten Messwerten für v_{\max} und Ansätzen von Kobus (1973) und Sawicki (2004) in Abhängigkeit von der Einblastiefe.

Der Maximalwert w_{\max} kann mittels eines Kräftegleichgewichts um den Walzenmittelpunkt berechnet werden. Daraus ergibt sich Gleichung (72).

$$w_{\max} = 2 \frac{v_{\max} \cdot z_{Mp}}{b_{SF}} \quad (72)$$

Als Eingangsparameter für die Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung $v(y)$ über die Sandfangbreite wird der mit Gleichung (71) berechnete Wert für v_{\max} an der Wasseroberfläche genommen. Es stellt sich die Frage, wie die Geschwindigkeitsverteilung $v(y)$ an der Wasseroberfläche über die Sandfangbreite aussieht. Kobus (1973) hatte festgestellt, dass die maximale Geschwindigkeit, bei fehlender seitlicher Begrenzung, im Abstand der 1 bis 1,2 fachen Breite des Auftriebsstrahls auftritt. Stein (1992) und Patt (1990) haben diesen Ansatz in Ermangelung von Messungen für belüftete Sandfänge übernommen. Nun muss geklärt werden, inwieweit dies auch bei Vorhandensein einer seitlichen Begrenzung, wie es bei Sandfängen üblich ist, gilt. Hierfür wurden zunächst die Messungen näher betrachtet. Zur Auswertung wurden wieder die durch Regression extrapolierten Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche über die Sandfangbreite aufgetragen. Eine Regression mit einer quadratischen Gleichung für $v(y)$ ergab Werte für das Bestimmtheitsmaß zwischen 0,88 und 0,94. Da die Geschwindigkeit v theoretisch an den beiden Seitenwänden zu Null werden muss, wurden nun diese zwei Nullstellen „künstlich“ eingefügt und daraufhin eine Regression mit einer quadratischen Gleichung durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 130

dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionen war mit 0,96 bis 0,98 sehr hoch.

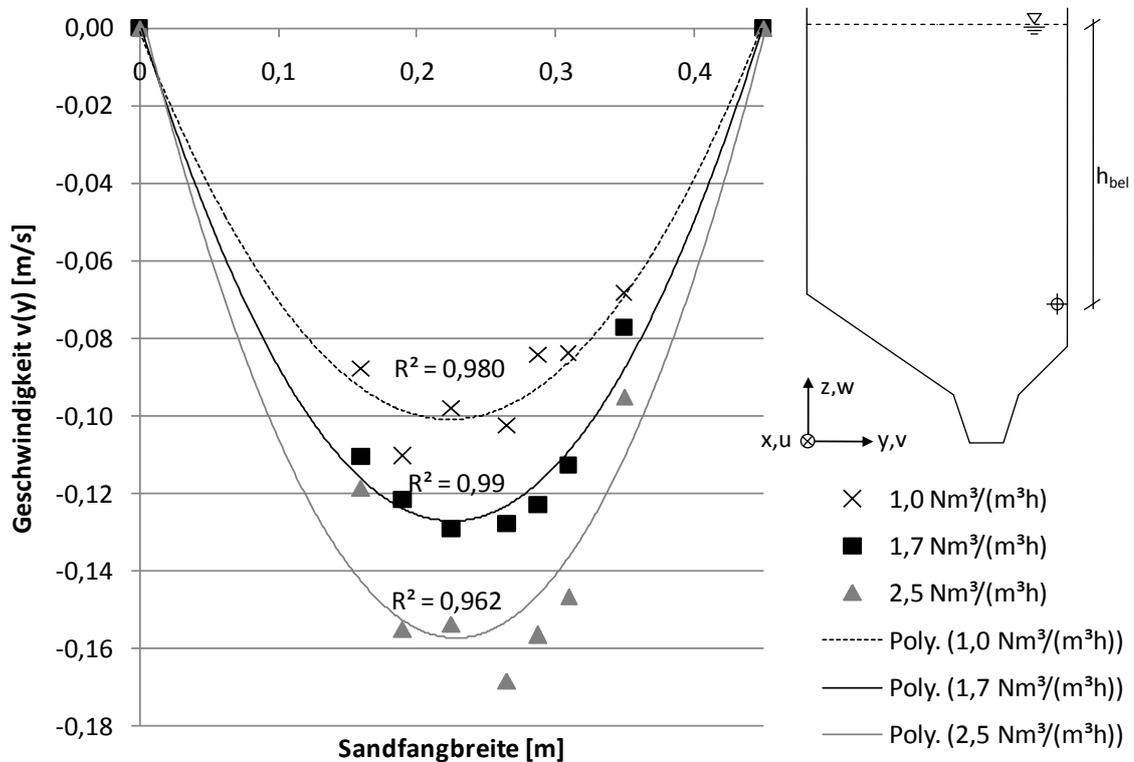


Abbildung 130: Extrapolierte Werte der Geschwindigkeit $v(y)$ an der Wasseroberfläche im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Luftenstrag mit zwei angenommenen Nulldurchgängen.

Daraus lässt sich folgende Gleichung für den Verlauf der Geschwindigkeit $v(y)$ an der Wasseroberfläche ($z = H$) über die Sandfangbreite ableiten.

$$v(y) = -\frac{4 \cdot v_{max}}{b_{SF}^2} \cdot y^2 + \frac{4 \cdot v_{max}}{b_{SF}} \cdot y \quad (73)$$

Die gleiche Abhängigkeit ergibt sich auch für unterschiedliche Einblastiefen, da sich die Einblastiefe direkt proportional auf v_{max} auswirkt und somit dort schon berücksichtigt ist. Im nächsten Schritt soll nun der Verlauf von $v(z)$ in Abhängigkeit von den jeweiligen Werten für $v(y)$ berechnet werden.

Aufgrund des guten Übereinstimmens der quadratischen Gleichung (74) mit den Messwerten von $v(z)$, wurden in Anlehnung an Stein (1992) Randbedingungen definiert, um die Parameter a , b und c berechnen zu können.

$$v(z) = a \cdot z^2 + b \cdot z + c \quad (74)$$

Das beste Ergebnis wurde mit den folgenden drei Randbedingungen erzielt, wobei darauf verzichtet wurde, den Sandfang in Bereiche einzuteilen.

- Die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche hat den Wert $v(y)$ nach Gleichung (73).
- Die Geschwindigkeitsverteilung hat ihren Nulldurchgang bei $z = z_{MP}$.
- Das Integral unter $v(z)$ zwischen Bodenhöhe $h_R(y)$ und Wasseroberfläche ist 0.

Für die letzte Bedingung wird ein Hilfswert $h_R(y)$ eingeführt, der die Höhe eventueller Einbauten auf dem Sandfangboden (Sohlschräge, etc.) beschreibt. Für rechteckige Querschnitte wird dieser Wert über die ganze Sandfangbreite zu 0. In der vorliegenden Arbeit verwendeten, physikalischen Sandfangmodell mit Trapezquerschnitt muss $h_R(y)$ in fünf Abschnitte eingeteilt werden, die den Bodenverlauf mit Sohle und Rinne beschreiben. Im Bereich der Sandfanggutterinne gilt $h_R(y) = 0$.

$$0 \leq y \leq 0,2 \quad h_R(y) = 0,2945 - \frac{0,2945-0,125}{0,2} \cdot y$$

$$0,2 < y \leq 0,25 \quad h_R(y) = 0,125 - \frac{0,125}{0,05} \cdot (y - 0,2)$$

$$0,25 < y \leq 0,325 \quad h_R(y) = 0$$

$$0,325 < y \leq 0,375 \quad h_R(y) = \frac{0,125}{0,05} \cdot (y - 0,325)$$

$$0,375 < y \leq 0,45 \quad h_R(y) = 0,125 + \frac{0,2-0,125}{0,45-0,375} \cdot (y - 0,375)$$

Daraus ergeben sich folgende Werte für die Parameter a, b und c:

$$a = \frac{3 \cdot v \cdot (H - 2z + h_R)}{H^3 - 4H^2z + 3Hz^2 + H^2h_R + 2Hh_Rz - 3h_Rz^2 - 2h_R^2H + 2h_R^2z} \quad (75)$$

$$b = \frac{-2 \cdot v \cdot (H^2 + h_RH - 3z^2 + h_R^2)}{(H - z) \cdot (H^2 - 3Hz + h_RH + 3zh_R - 2h_R^2)} \quad (76)$$

$$c = \frac{z \cdot v \cdot (2H^2 - 3Hz + 2h_RH - 3zh_R + 2h_R^2)}{(H - z) \cdot (H^2 - 3Hz + h_RH + 3zh_R - 2h_R^2)} \quad (77)$$

In Tabelle 20 sind die nötigen Ausgangsparameter, um die Parameter a,b und c zu berechnen, gegenübergestellt. Daraus kann an jeder Stelle $v(y,z)$ berechnet werden.

Tabelle 20: Ausgangsparameter für die Berechnung von $v(z)$.

Parameter	Erklärung	Formel
H	Gesamthöhe	$h_{SF}+h_R$
z	Abstand Walzenmittelpunkt zum Boden	$H-0,4 \cdot h_{SF}$
$v(y)$ bei $z = H$	Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche in Abhängigkeit von y	Gleichung (73)
$h_R(y)$	Höhe der Sohleinbauten in Abhängigkeit von y	

Für die Geschwindigkeit $w(y)$ über die Sandfangbreite wurde mit Gleichung (78) ein quadratischer Verlauf analog zu $v(z)$ über die Sandfangtiefe angenommen.

$$w(y) = a \cdot y^2 + b \cdot y + c \quad (78)$$

Es wurden dazu die folgenden drei Randbedingungen definiert, um die Parameter a, b, und c zu bestimmen.

- Die Geschwindigkeit bei $y = 0$ hat den Wert w_{max} nach Gleichung
- Die Geschwindigkeitsverteilung hat ihren Nulldurchgang bei $y = b_{SF}/2$.
- Das Integral unter der Kurve ist 0.

Daraus ergibt sich ein linearer Kurvenverlauf mit den Gleichungen (79) bis (81) für die Parameter a, b und c.

$$a = 0 \quad (79)$$

$$b = \frac{-2w_{max}}{b_{SF}} \quad (80)$$

$$c = w_{max} \quad (81)$$

Die Geschwindigkeiten auf der Seite des Lufteintrags werden durch diese Gleichung überschätzt (Abbildung 131). Dies könnte durch das Ersetzen der dritten Bedingung, durch die Bedingung, dass die Kurve das Maximum in einer Entfernung b_{as} vom Auftriebsstrahl hat, verhindert werden. Dann widerspricht der Kurvenverlauf allerdings dem Erhalt der Kontinuitätsbedingung. Außerdem können in der Nähe der Belüfter Messfehler durch die Luftblasen, die um die Sonde strömen, nicht ausgeschlossen werden, so dass für die weitere Berechnung der oben beschriebene Kurvenverlauf gewählt wird.

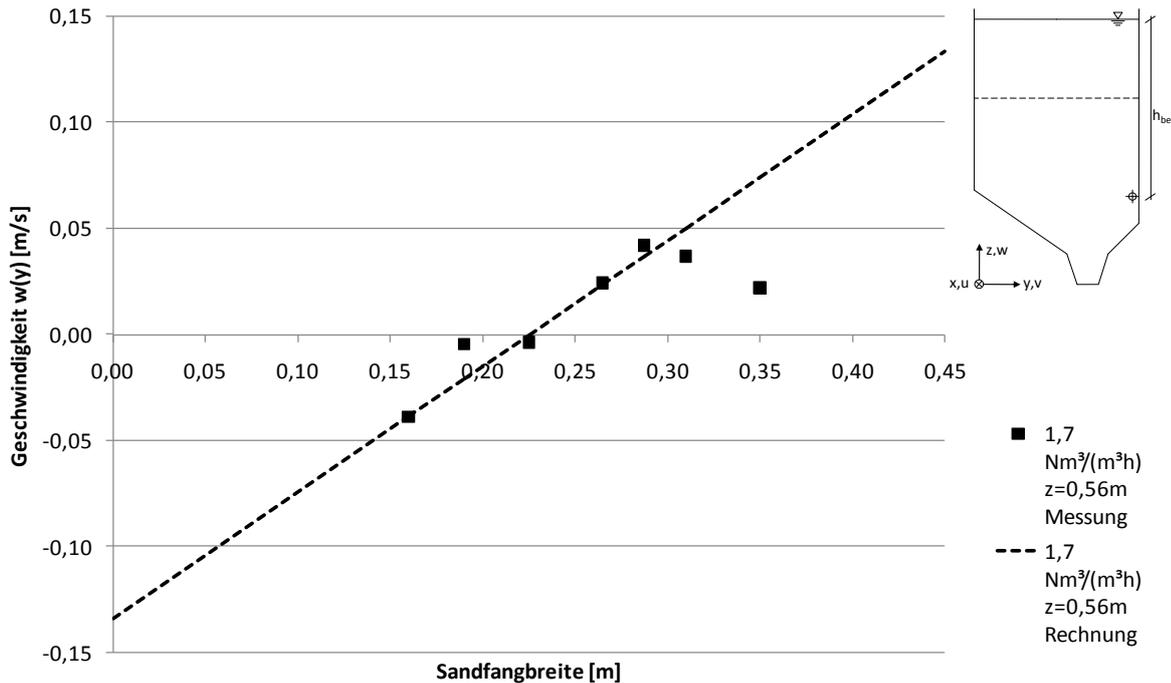


Abbildung 131: Verlauf der Geschwindigkeit $w(y)$ im physikalischen Sandfangmodell auf Höhe des Walzenmittelpunktes ($z = 0,56$ m) bei einem Luftpfeintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (Mittelwert über die Messquerschnitte 1-7).

Als letzter Schritt wird nun die Geschwindigkeit $w(z)$ über die Sandfangtiefe berechnet. In Abbildung 132 ist der Verlauf der Geschwindigkeit $w(z)$, auf der linken Sandfangseite ($y = 0,16$ m), in der Mitte ($y = 0,225$ m), sowie auf der rechten Sandfangseite ($y = 0,35$ m), dargestellt. Eine Kurvenanpassung mit quadratischer Funktion ergab rechts eine gute Übereinstimmung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8. Links konnte die Anpassung mit dem künstlichen Einfügen eines Nullpunkts am Wasserspiegel verbessert werden. Für den Verlauf in der Sandfangmitte wurde konstant $w(z) = 0$ angenommen. Aus diesen Überlegungen ergibt der in Gleichung (82) definierte Kurvenverlauf.

$$w(z) = -\frac{4 \cdot w_{\max}}{(H - h_R(y))^2} (z - h_R(y))^2 + \frac{4 \cdot w_{\max}}{(H - h_R(y))} (z - h_R(y)) \quad (82)$$

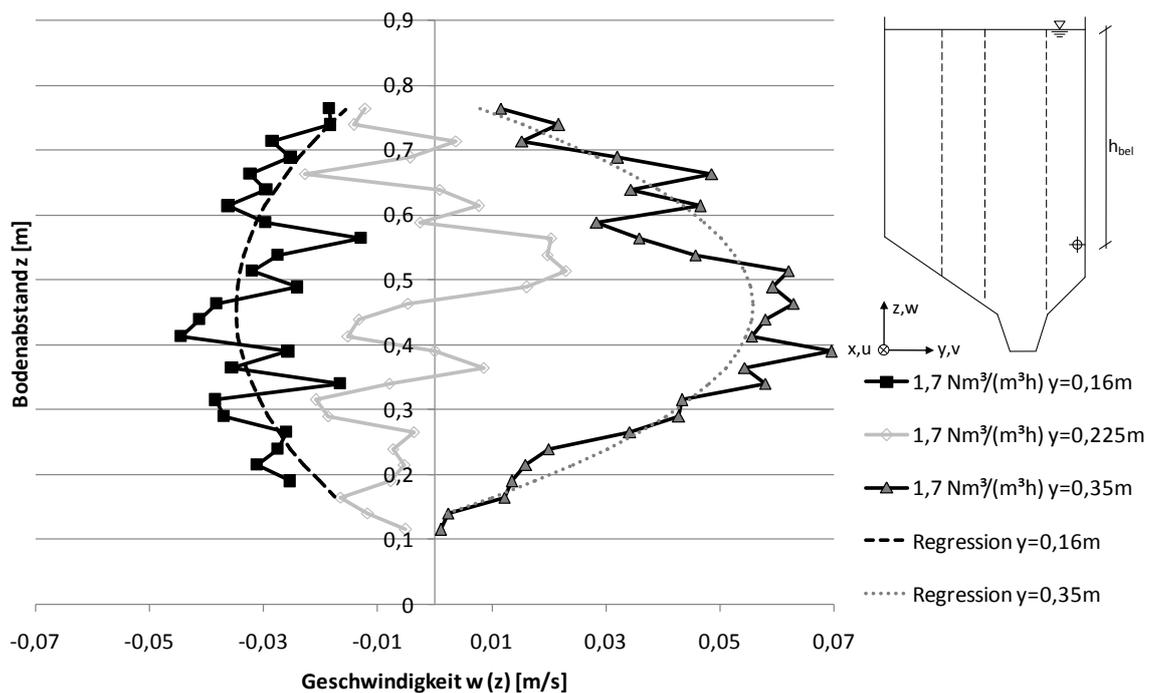


Abbildung 132: Verlauf der Geschwindigkeit $w(z)$ [m/s] im physikalischen Modell an drei Positionen bei einem Luftenrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ mit quadratischen Regressionskurven (Mittelwert über die Messquerschnitte 1-7).

In Abbildung 133 ist ein Vergleich der Messwerte mit dem berechneten Geschwindigkeitsfeld dargestellt. Es wird deutlich, dass die Berechnung insgesamt die gemessenen Werte gut wiedergibt. In der rechten Querschnittshälfte wird die aufwärtsgerichtete Geschwindigkeit $w(z)$, wie oben bereits erwähnt, überschätzt. Ferner verlaufen die Geschwindigkeitsvektoren in der linken Querschnittshälfte nicht parallel zur Sohle, da die berechnete abwärtsgerichtete Geschwindigkeit $w(z)$ hier wegen der Berandung nahe Null ist, in Wirklichkeit aber einen Wert von $-0,02 \text{ m/s}$ hat. In der Sandfanggutrinne wird die Walzenströmung nicht richtig wiedergegeben, die Kontinuitätsbedingung ist dort nicht eingehalten. Diese Verletzung wurde wegen des großen Aufwandes vernachlässigt.

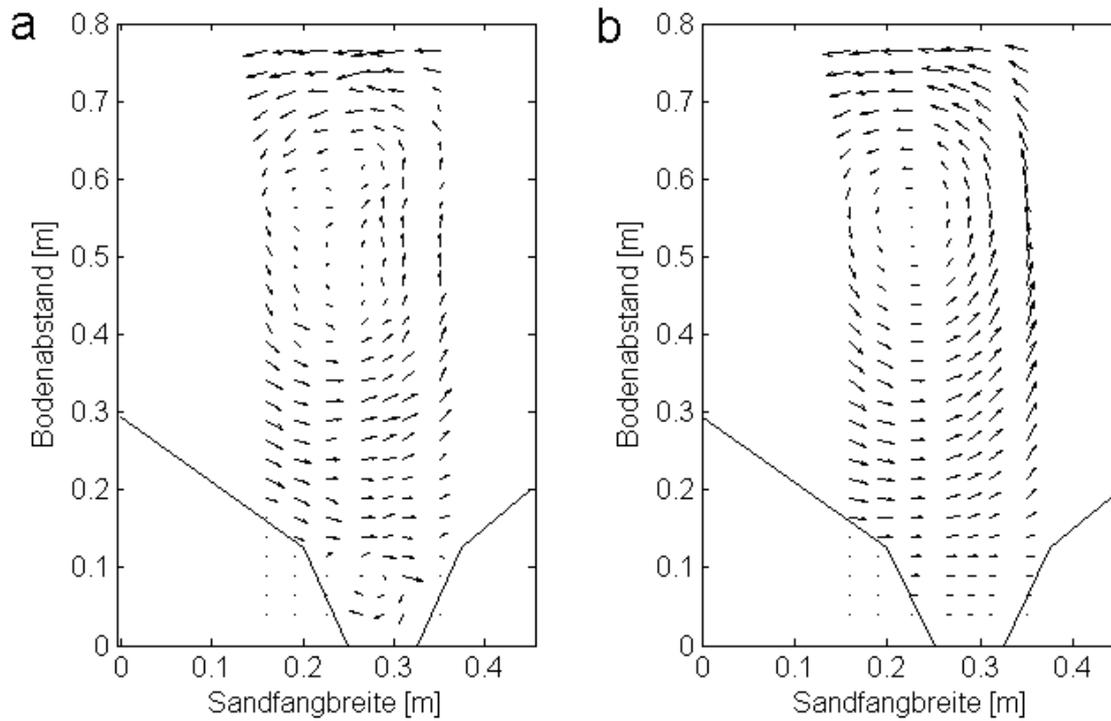


Abbildung 133: Vergleich von Messwerten (a) mit dem berechneten Geschwindigkeitsfeld (b) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

6.2.5.3 Verifikation des mathematischen Modells anhand von eigenen Messungen

Das mathematische Modell wurde anhand von Messwerten bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$ entwickelt. Nun wurde die Geschwindigkeitsverteilung mit einem höheren Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$ überprüft. In Abbildung 134 sind die gemessenen Geschwindigkeiten $v(z)$, über die Sandfanghöhe, mit den berechneten gegenübergestellt. Oberhalb des Walzenmittelpunktes ist die Übereinstimmung sehr gut, im unteren Bereich des Walzenmittelpunktes werden die Geschwindigkeiten leicht unterschätzt. Insgesamt beträgt das Bestimmtheitsmaß R^2 $0,92$, was auf eine sehr gute Kurvenanpassung schließen lässt.

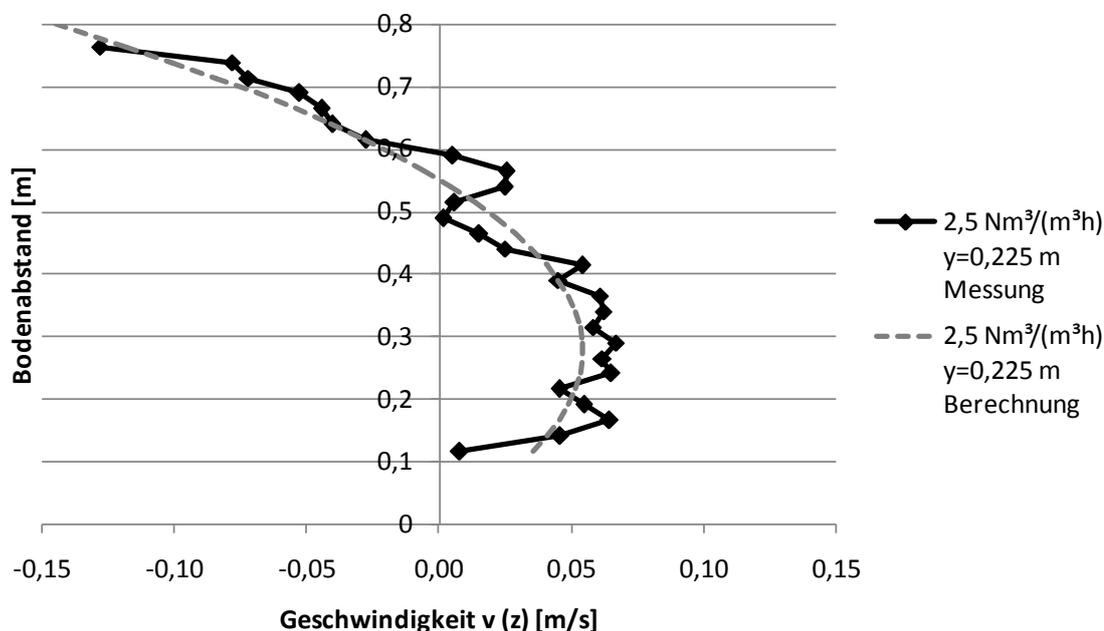


Abbildung 134: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $v(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$ mit Berechnung.

Eine in Abbildung 135 dargestellte Berechnung von $w(z)$ ergibt eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten auf der linken Seite des Walzenmittelpunktes, mit einem Bestimmtheitsmaß von $0,67$. Auf der rechten Seite beträgt das Bestimmtheitsmaß $0,82$. Im Vergleich dazu wird bei der Geschwindigkeit $v(z)$ eine bessere Güte der Anpassung erreicht. Die Geschwindigkeit $w(z)$ erreicht auf der Sohle in der Berechnung einen Nullpunkt, weil die Schräge ins mathematische Modell als Rand mit der Geschwindigkeit 0 m/s eingeht. Dies ist in der Realität nicht richtig, da sich, wie auch die Messungen

gezeigt haben, eine Strömungskomponente parallel zur Sohle ausgebildet. Hier müssen die Randbedingungen noch besser definiert werden.

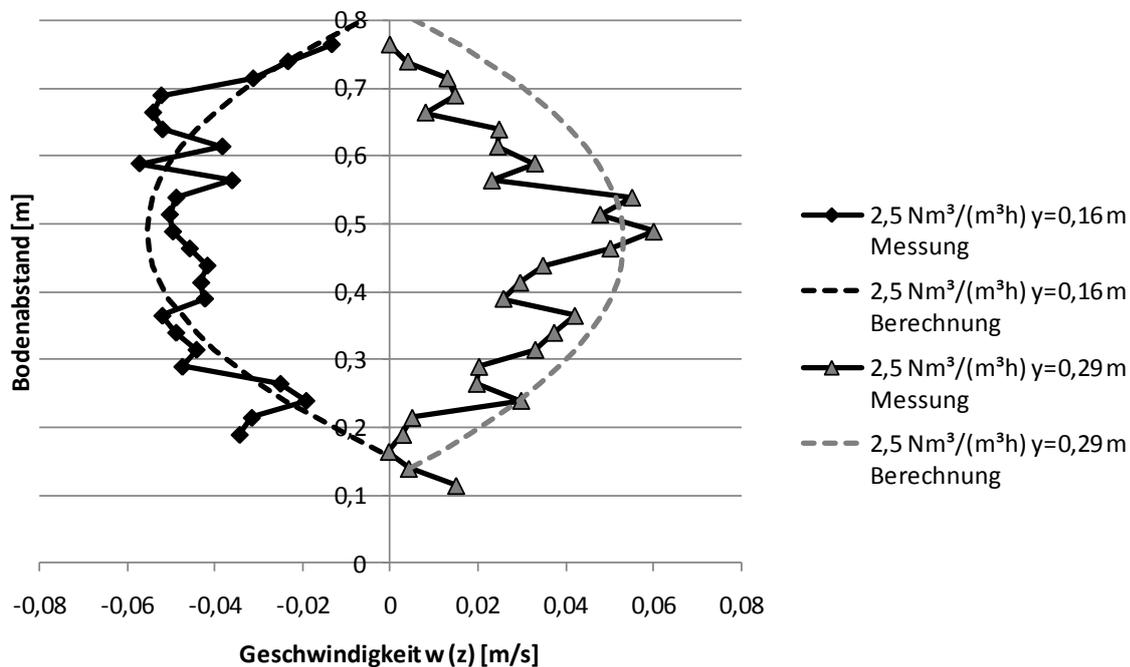


Abbildung 135: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $w(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$.

Für eine weitere Verifikation des Modells wurden Messungen mit dem Lufteintrag $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,31 \text{ m}$ herangezogen (Abbildung 136). Hier betrug das Bestimmtheitsmaß bei der Berechnung der Geschwindigkeitskomponente $v(z)$ $0,93$, was wieder auf eine sehr gute Anpassung schließen lässt.

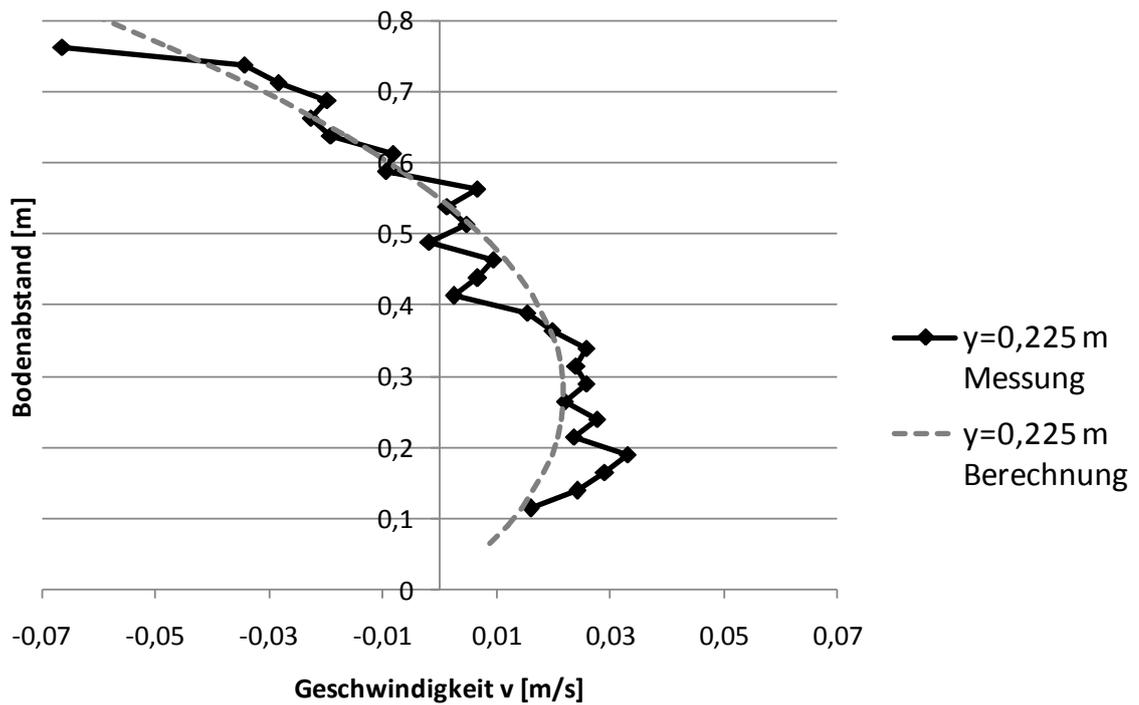


Abbildung 136: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $v(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,31 \text{ m}$ mit Berechnung.

In Abbildung 137 ist der Vergleich zwischen Messung und Berechnung von $w(z)$ dargestellt. Hier wird deutlich, dass bei der Einblastiefe von $0,31 \text{ m}$ die Übereinstimmung nicht mehr besonders gut ist.

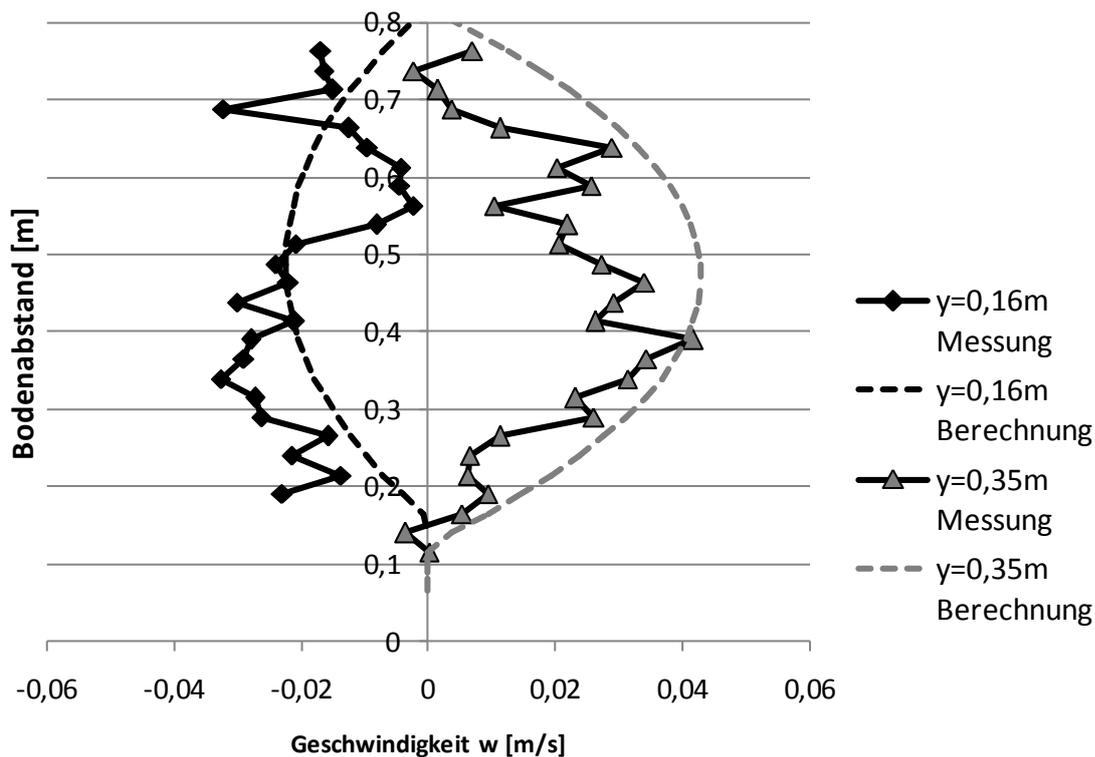


Abbildung 137: Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $w(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,31 \text{ m}$ mit Berechnung.

6.2.5.4 Verifikation des mathematischen Modells anhand von Literaturangaben

Schrimpf (1987) hat Messungen an seinem physikalischen Sandfangmodell mit einem Lufteintrag von $4,6 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von $0,65 \text{ m}$ durchgeführt. Das Ergebnis seiner Messung ist in Abbildung 138 dargestellt. Zusätzlich ist noch die theoretische Berechnung nach Kapitel 6.2.5 ergänzt. Das mathematische Modell gibt den Verlauf der Messwerte, mit einem Bestimmtheitsmaß von $0,97$, sehr gut wieder.

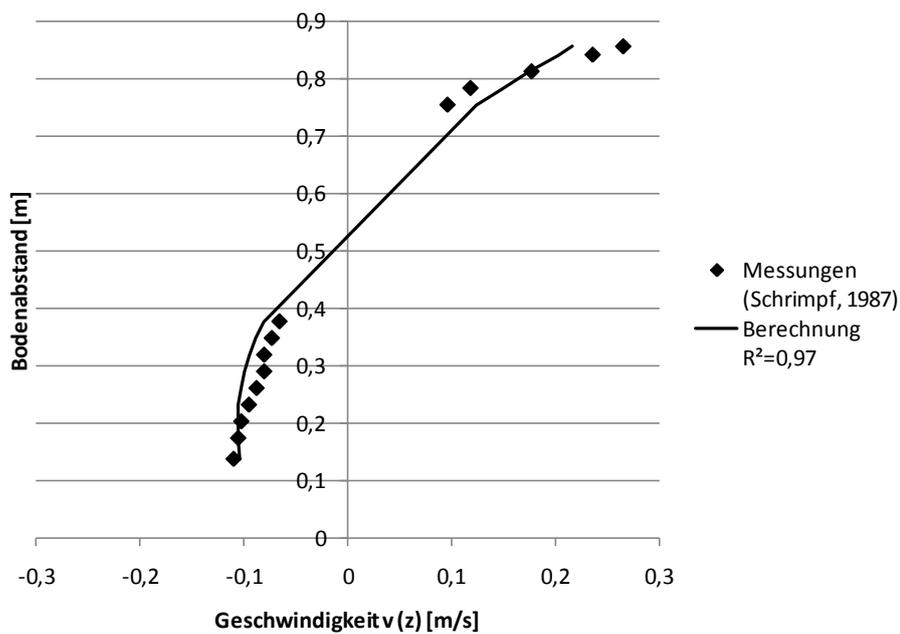


Abbildung 138: Vergleich von Messungen von Schrimpf (1987) mit dem mathematischen Modell.

In Abbildung 139 ist ein Vergleich von Messwerten von Stein (1992) an einem belüfteten Sandfang mit dem in Kapitel 6.2.5 entwickelten mathematischen Modell dargestellt. Die Breite des Sandfangs betrug hierbei 2 m, die Höhe 2,5 m und der Lufteintrag $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, bei einer Einblastiefe von 2,2 m. Das Bestimmtheitsmaß beträgt 0,86, im Bereich oberhalb der Wasserwalze werden die Geschwindigkeiten unterschätzt, im unteren Bereich leicht überschätzt.

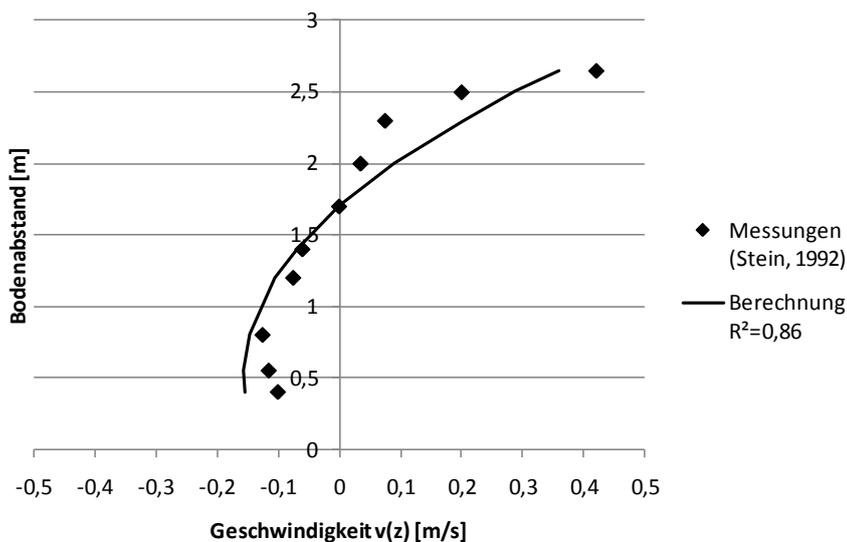


Abbildung 139: Vergleich von Messungen von Stein (1992) mit dem mathematischen Modell.

Auch die Messungen von Stelzer et al. (2004) am Sandfang der Kläranlage Hildesheim gibt die Berechnung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,93 sehr gut wieder. Die Messungen wurden bei einem Lufteintrag von $1,4 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 3 m durchgeführt.

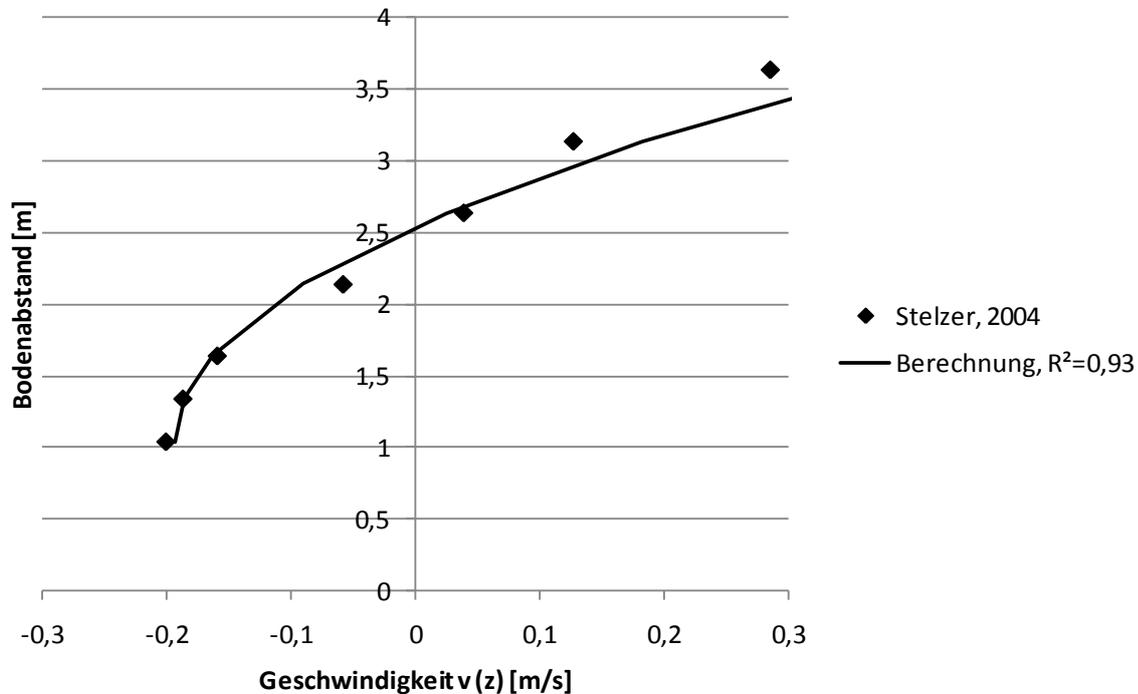


Abbildung 140: Vergleich von Messungen von Stelzer et al. (2004) mit dem mathematischen Modell.

6.2.5.5 Partikelbahnen

In Abbildung 141 ist das nach Kapitel 6.2.5.2 berechnete Geschwindigkeitsfeld dargestellt. Der Darstellung liegen ein Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und ein Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ zugrunde.

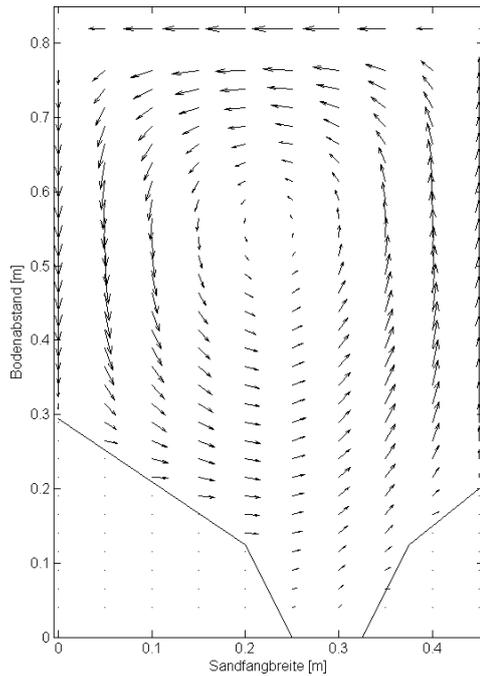


Abbildung 141: Berechnetes Geschwindigkeitsfeld bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$ über den ganzen Querschnitt.

Für die Berechnung der Partikelbahnen wurde die Gleichung (40) (BBO Gleichung) verwendet und mit Hilfe des Euler'schen Polygonzugverfahrens nach u_p , v_p und w_p aufgelöst. Beim Euler'schen Polygonzugverfahren wird die Ableitung der Geschwindigkeit nach der Zeit durch Gleichung (83) angenähert (Malcherek (2008c)).

$$\frac{du}{dt} \cong \frac{u^{n+1} - u^n}{t} \quad (83)$$

Aus den Gleichungen (84) bis (86) ergeben sich die Partikelgeschwindigkeiten.

$$u_p^{n+1} = -\frac{6}{8} \cdot C_D \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_W}{\rho_S} |u_p^n - u_f^n| \cdot (u_p^n - u_f^n) \cdot t + u_p^n \quad (84)$$

$$v_p^{n+1} = -\frac{6}{8} \cdot C_D \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_W}{\rho_S} |v_p^n - v_f^n| \cdot (v_p^n - v_f^n) \cdot t + v_p^n \quad (85)$$

$$w_p^{n+1} = \left(-\frac{\rho_S - \rho_W}{\rho_S} \cdot 9,81 - \frac{6}{8} \cdot C_D \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_W}{\rho_S} |w_p^n - w_f^n| \cdot (w_p^n - w_f^n) \right) \cdot t + w_p^n \quad (86)$$

Mit den Gleichungen (87) bis (89) kann der Wegfortschritt des Partikels pro Zeitschritt berechnet werden.

$$x_{n+1} = x_n + u_{p,n} \cdot \Delta t \quad (87)$$

$$y_{n+1} = y_n + v_{p,n} \cdot \Delta t \quad (88)$$

$$z_{n+1} = z_n + w_{p,n} \cdot \Delta t \quad (89)$$

Die Startgeschwindigkeit des Partikels im Fluid wurde nach Gleichung (90) gewählt.

$$\vec{u}_{p,0} = \begin{pmatrix} u_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (90)$$

Vor der Simulation der Partikelbahnen müssen Randbedingungen für die Wände des Versuchsstandes und den Zu- und Ablaufbereich definiert werden. In Stovin & Saul (1998) finden sich Beispiele für mögliche Randbedingungen, wenn das Partikel auf eine Wand trifft, so wie sie im Programm Fluent verwendet werden (Fluent, 2006). Diese sind in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Randbedingungen für das Auftreffen eines Partikels auf eine Wand.

Randbedingung	Erklärung
Reflexion	Das Partikel prallt von der Wand ab.
Einfangen	Das Partikel bleibt am Absetzort liegen.
Entkommen	Das Partikel trifft auf den Rand und verlässt das System.
Springen	Das Partikel springt in Fließrichtung und setzt danach wieder auf der Wand auf.

Das beste Ergebnis wurde bei diesen Simulationen mit der Randbedingung „Abprallen“ an allen Seiten, beziehungsweise „Abprallen“ für Wände, bei denen die Schubspannung größer als der kritische Wert war und „Einfangen“ für Wände, bei denen die Schubspannung kleiner als der kritische Wert war, erzielt. Für die Berechnung in der vorliegenden Arbeit wurde für die Seitenwände die Randbedingung „Abprallen“ und für den Boden die Randbedingung „Einfangen“ gewählt.

Das Gleichungssystem wurde tabellarisch gegenübergestellt und die Absetzwege mit dem Eulerverfahren berechnet. Die Korngrößen 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm wurden für die Berechnung ausgewählt. Als Widerstandsbeiwert wurde vereinfachend für alle drei Korngrößen der Wert von 0,44 angesetzt. In Abbildung 142 sind die Partikelbahnen für eine Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von -0,12 m/s, die der berechneten Geschwindigkeit bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ entspricht, dargestellt. Als Zugabeort wurde die Höhe der

Zulaufschwelle gewählt ($z = 0,73$ m), weil der zudosierte Sand im physikalischen Sandfangmodell auf dieser Höhe vom zufließenden Wasserstrom in den Sandfang eingetragen wird. Es wird deutlich, dass alle drei Korngrößen auf die Kreisbahn der Spiralströmung gelangen und sich in der Sandfanggutrinne absetzen. Die Absetzorte in x-Richtung sind für den Korndurchmesser 0,063 mm 0,13 m vom Zulauf entfernt, für den Korndurchmesser 0,1 mm 0,10 m vom Zulauf entfernt und für den Korndurchmesser 0,2 mm 0,08 m vom Zulauf entfernt. Das bedeutet, dass sich alle Teilchen in unmittelbarem Abstand vom Zulauf absetzen.

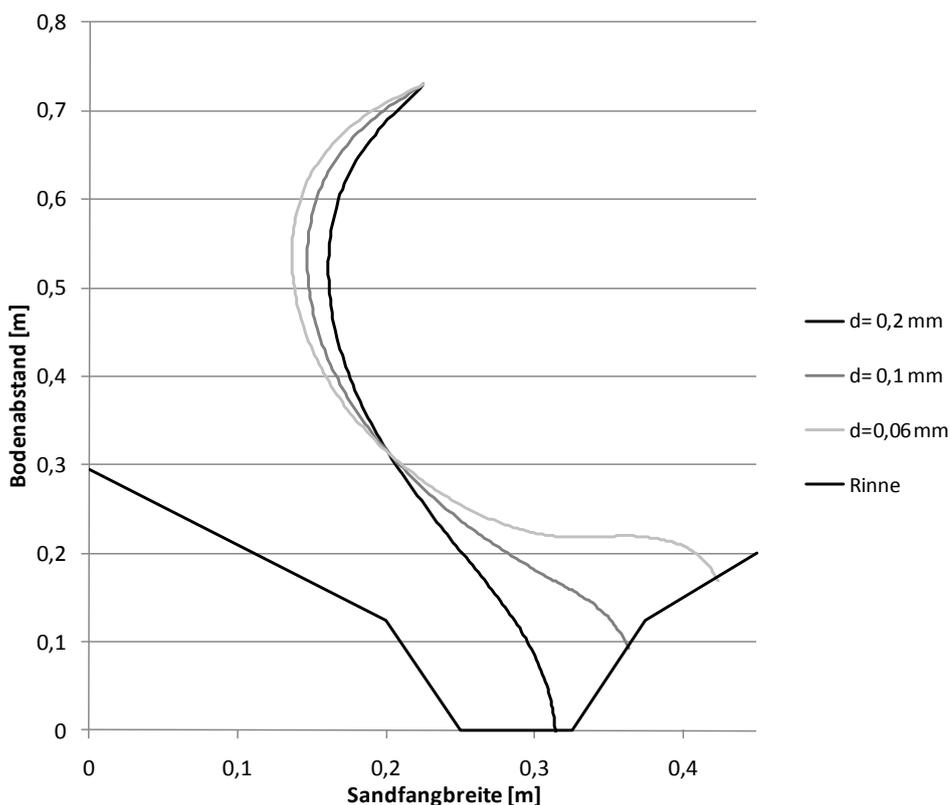


Abbildung 142: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche ($z = 0,73$ m) bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,12$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s.

In Abbildung 143 sind die Partikelbahnen für die drei gewählten Korngrößen bei einem Durchfluss von $5,5$ l/s, mit einem Lufteintrag von $2,5$ Nm³/(m³·h) und ohne Lufteintrag dargestellt. Für die Korngröße 0,063 mm beträgt die Absetzlänge ohne Lufteintrag 0,23 m, für die Korngröße 0,1 mm 0,19 m, und für die Korngröße 0,2 mm 0,13 m. Bei einem Lufteintrag von $2,5$ Nm³/(m³·h) beträgt die Absetzlänge für die Korngröße 0,1 mm 0,15 m und für die Korngröße 0,2 mm 0,11 m. Die Korngröße 0,063 mm wird von der Spiralströmung erfasst und bis zum Ablauf getragen. Für Teilchen die sedimentieren, sind die Absetzlängen ohne Lufteintrag geringfügig länger, als mit Lufteintrag. Die gleiche Tendenz ergab sich auch bei Messung am physikalischen Modell mit den gleichen Versuchsbedingungen

(Abbildung 110). Bei der Messung ohne Lufteintrag erreichten die Körner später den Boden. Der quantitative Abscheidegrad war aber bei der Messung mit Lufteintrag geringer als ohne Lufteintrag. Dies liegt daran, dass in der Realität die Körner wieder aufgewirbelt werden, besonders bei Lufteintrag. In der Berechnung durch das mathematische Modell wird eine idealisierte Absetzbahn berechnet. Sobald das Partikel den Boden berührt gilt es als abgesetzt. Ein Springen des Partikels wird dabei nicht berücksichtigt.

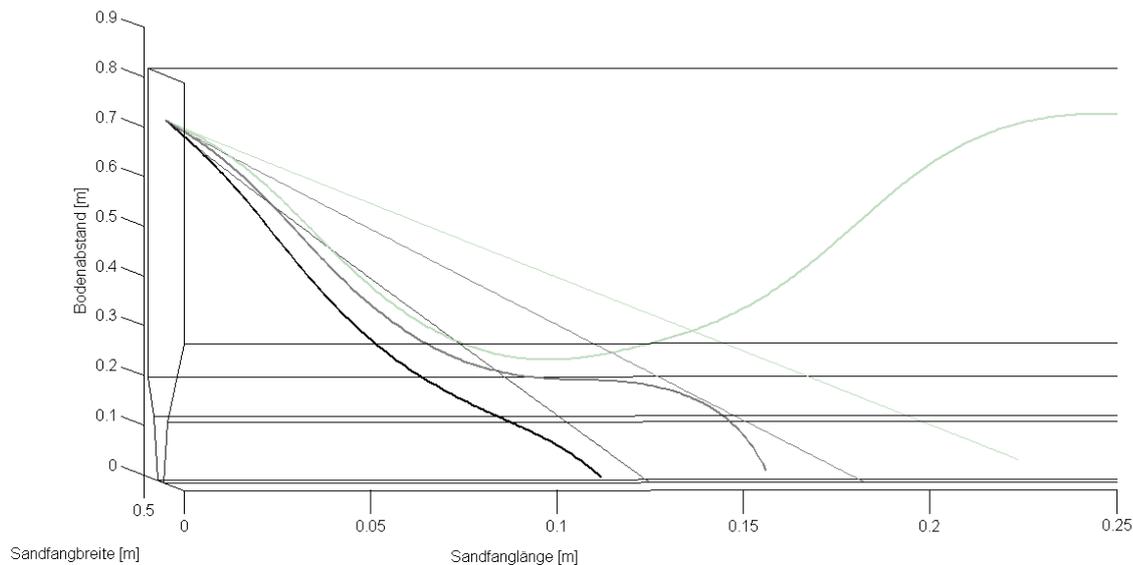


Abbildung 143: Absetzlängen der Korngrößen 0,06 mm (hellgrau), 0,1 mm (grau) und 0,2 mm (schwarz) nach Berechnung mit dem mathematischen Modell bei den Lufteinträgen von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (spiralförmige Linien) und $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (gerade Linien).

In Abbildung 144 sind die berechneten Partikelbahnen der Korngrößen 0,063 mm, 0,1 mm und 0,2 mm, bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einem Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ im Querschnitt dargestellt. Die Korngröße 0,063 mm bewegt sich auf einer spiralförmigen Partikelbahn von außen nach innen und bleibt dann bis zum Ablauf auf Höhe des Walzenmittelpunkts. Die Korngröße 0,1 mm setzt sich nach $0,15 \text{ m}$ und die Korngröße 0,2 mm nach $0,11 \text{ m}$ ab.

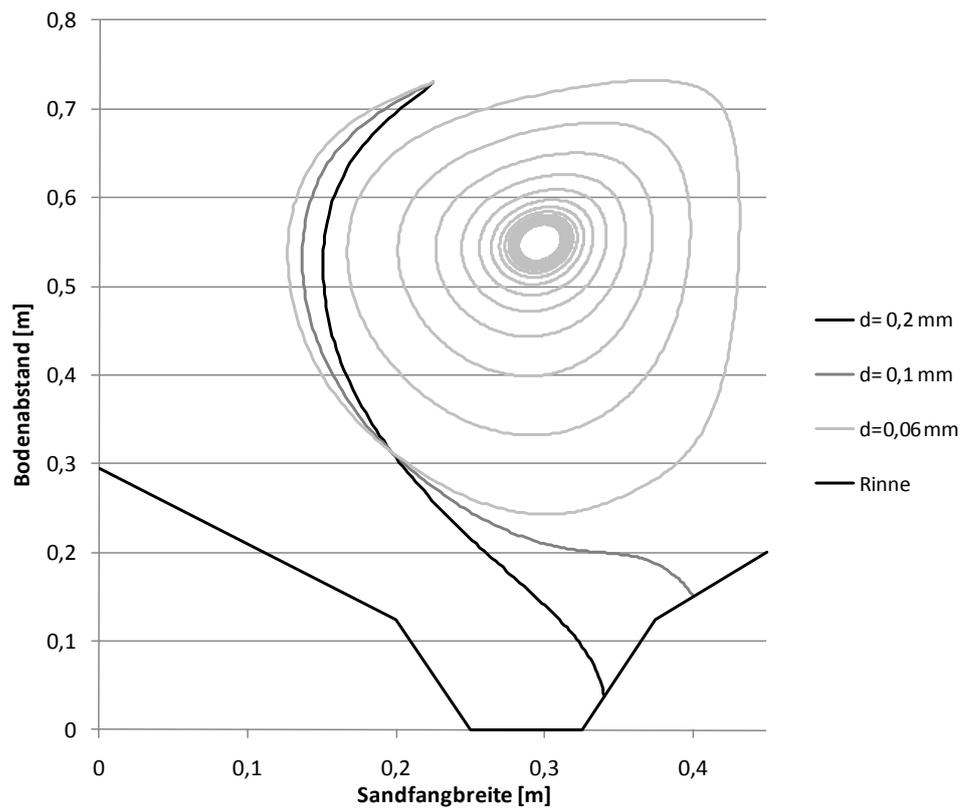


Abbildung 144: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche bei einer Oberflächengeschwindigkeit $v_{\max} = -0,16\text{m/s}$ und einem Durchfluss von $3,5\text{ l/s}$ ($z = 0,73\text{ m}$).

In Abbildung 145 sind die Absetzwege im Schrägbild dargestellt. Während sich die Korngrößen $0,1\text{ mm}$ und $0,2\text{ mm}$ nahe dem Zulauf absetzen, wird die Korngröße $0,63\text{ mm}$ bis zum Ablauf transportiert.

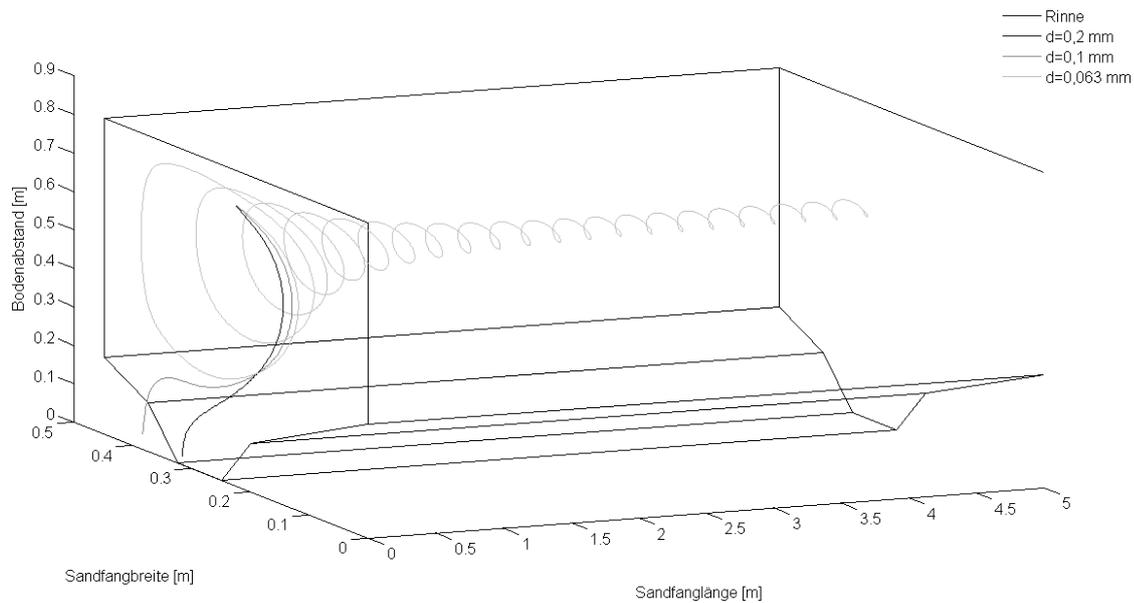


Abbildung 145: Berechnete Absetzwege von Teilchen mit den Korngrößen 0,063 mm, 0,1 mm und 0,2 mm bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche ($z = 0,73$ m), einem Durchfluss von 5,5 l/s und einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Um den Einfluss der Zugabehöhe zu verdeutlichen, sind in Abbildung 146 berechnete Partikelbahnen von Teilchen, mit den Durchmessern 0,063 mm, 0,1 mm und 0,2 mm bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und Zugabe im Walzenmittelpunkt dargestellt. Während sich, wie in Abbildung 142 dargestellt, bei der Zugabe nahe der Wasseroberfläche ($z = 0,73$ m) alle Korngrößen nahe des Zulaufs absetzen, setzt sich hier nur die Korngröße 0,2 mm im Abstand von 0,07 m vom Zulauf ab. Die zwei kleineren Korngrößen werden aufgewirbelt und bis zum Ablauf transportiert. Eine Zugabe im Walzenmittelpunkt beeinflusst den Sedimentationsvorgang also negativ.

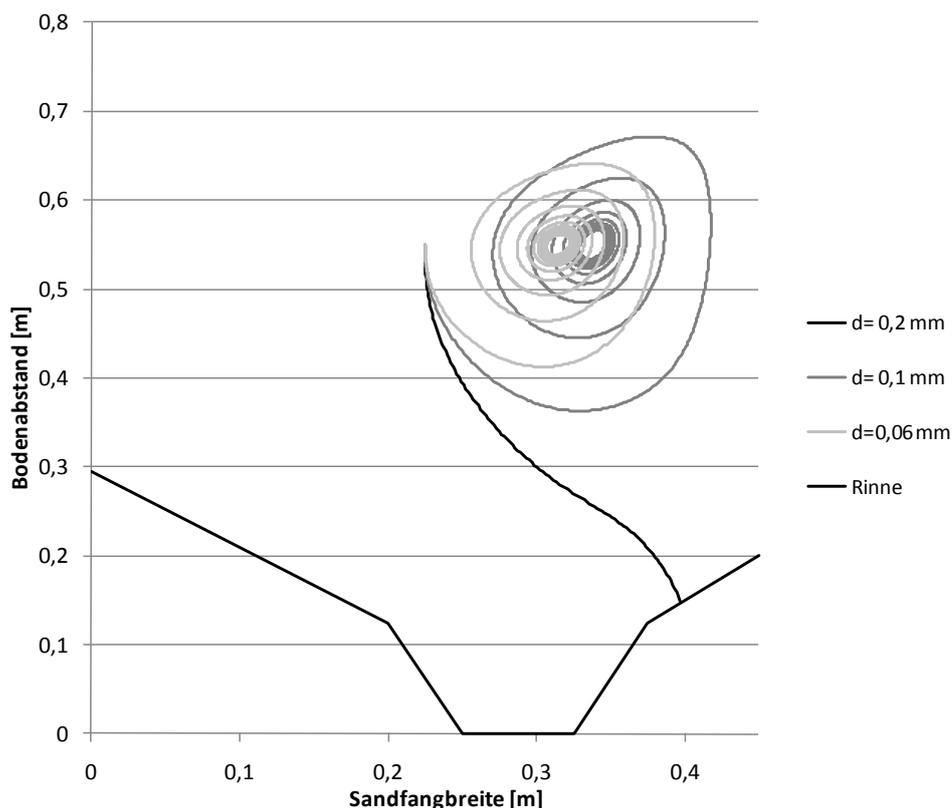


Abbildung 146: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von -0,12 m/s und einem Durchfluss von 3,5 l/s ($z = 0,55$ m).

Die gleiche Berechnung wurde mit geringerer Oberflächengeschwindigkeit von -0,06 m durchgeführt (Abbildung 147). Diese Oberflächengeschwindigkeit entspricht der berechneten Oberflächengeschwindigkeit bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,31 m. Der gewählte Durchfluss war 3,5 l/s. Die Absetzlängen für die Zugabe der Teilchen nahe der Wasseroberfläche sind für die Korngröße 0,063 mm 0,15 m, für die Korngröße 0,1 mm 0,12 m und für die Korngröße 0,2 mm 0,08 m. Im Vergleich zu den Simulationen mit der Einblastiefe von 0,55 m (Abbildung 142) sind die Absetzwege länger. Hier wird wieder deutlich, dass eine höhere Geschwindigkeit der Wasserwalze, verursacht durch einen höheren Lufteintrag oder eine größere Einblastiefe, die Teilchen theoretisch schneller zum Absetzen zwingt, da die Teilchen mit einer höheren Geschwindigkeit auf der spiralförmigen Bahn zum Boden transportiert werden. In der Praxis werden jedoch Teilchen durch höhere Geschwindigkeiten wiederaufgewirbelt, oder springen hoch und werden dann weitertransportiert, so dass sich der quantitative Abscheidegrad, wie auch die Messungen im physikalischen Sandfangmodell gezeigt haben, mit abnehmenden Geschwindigkeiten und Turbulenzen verbessert.

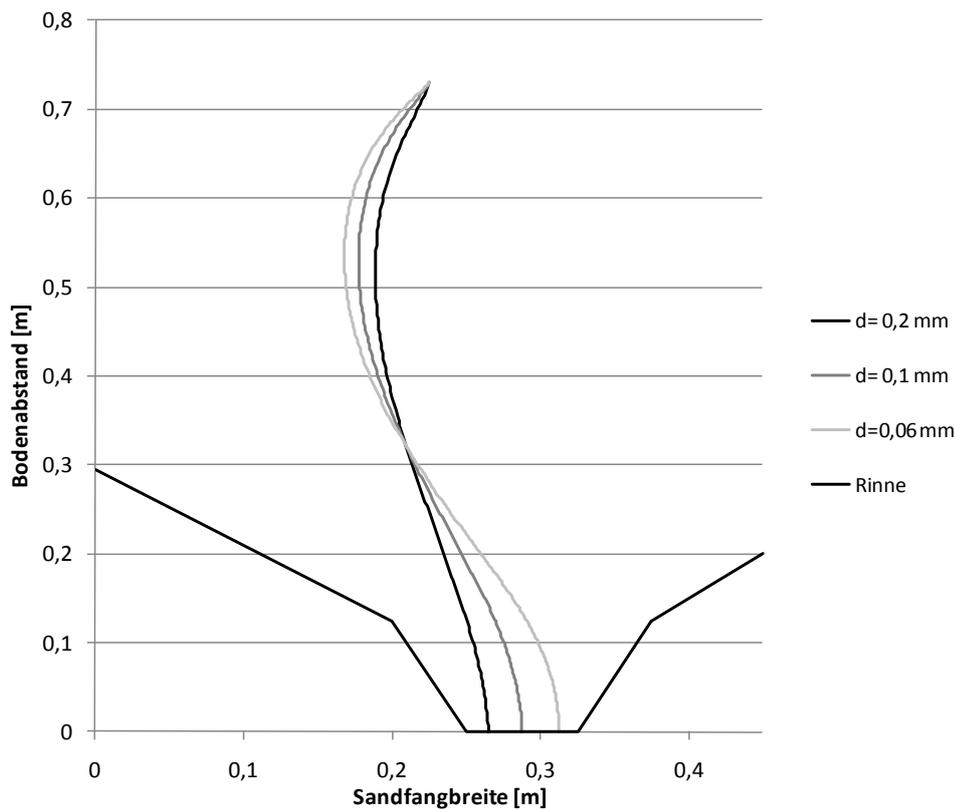


Abbildung 147: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe an der Wasseroberfläche bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,06$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($z = 0,73$ m).

Gibt man bei dieser geringeren Oberflächengeschwindigkeit von $-0,06$ m/s Teilchen im Walzenmittelpunkt zu, reicht die Strömung nicht aus, diese mitzureißen und die Teilchen setzen sich alle unmittelbar im Zulaufbereich ab. Verglichen mit der Zugabe nahe der Wasseroberfläche sind die Absetzwege sogar geringfügig kürzer. So beträgt nun die Absetzlänge für die Korngröße $0,063$ mm $0,13$ m, für die Korngröße $0,1$ mm $0,10$ m und für die Korngröße $0,2$ mm $0,07$ m.

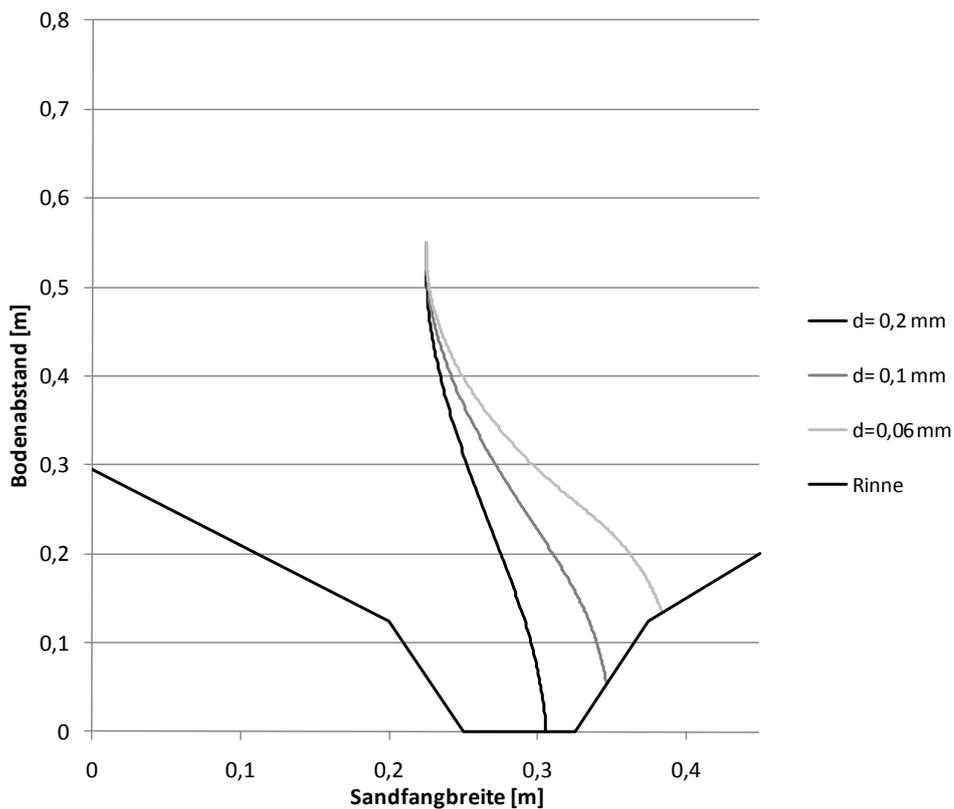


Abbildung 148: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,06$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($z = 0,55$ m).

Im Gegensatz dazu führt eine Erhöhung des Lufteintrages auf $2,5$ $\text{Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bei Zugabe der Teilchen im Walzenmittelpunkt dazu, dass alle drei Korngrößen auf eine spiralförmige Bahn gelangen und sich überhaupt nicht mehr absetzen (Abbildung 149).

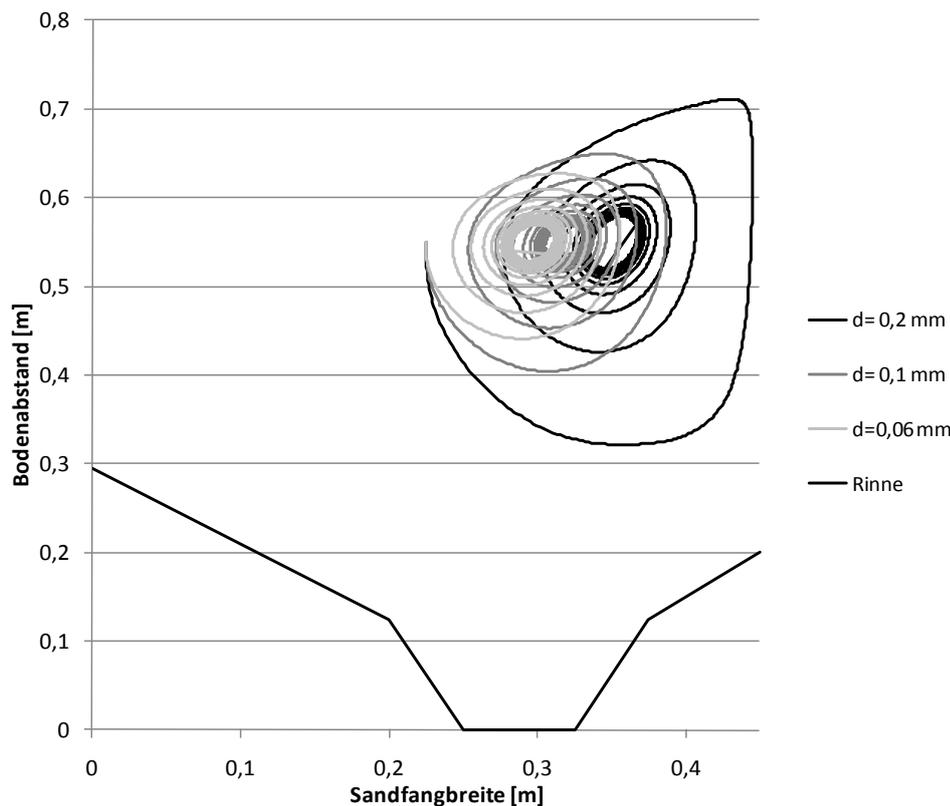


Abbildung 149: Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit $v_{\max} = -0,16$ m/s und einem Durchfluss von 3,5 l/s ($z = 0,55$ m).

In der Berechnung wird deutlich, dass sich die Körner entweder sofort absetzen, oder auf einer Spiralbahn bis zum Ablauf des Sandfanges transportiert werden. Durch die geringer werdenden Geschwindigkeiten in Richtung Walzenmittelpunkt entsteht eine spiralförmige Bewegung von außen nach innen. Ist das Teilchen einmal auf der spiralförmigen Bahn, gelangt es bis zum Ablauf. Dies liegt auch an den definierten Randbedingungen, dass ein Teilchen, wenn es einmal die Rinne berührt hat, dort liegen bleibt. In der Realität entsteht eine statistische Verteilung der Korngrößen, da sie abprallen oder hochspringen oder wiederaufgewirbelt werden. Es müssten genauere Randbedingungen definiert werden, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten. Eine derartige Abschätzung der Sedimentation ist als erster Ansatz zu sehen. Um detailliertere Aussagen zu erhalten empfiehlt es sich, komplexere Simulationen durchzuführen.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Fließgeschwindigkeit und turbulente kinetische Energie

In der vorliegenden Arbeit wurden Geschwindigkeitsmessungen an zwei Sandfängen mit Trapez- und Rechteckquerschnitt und im physikalischen Sandfangmodell durchgeführt. Der Sandfang der Kläranlage Karlsfeld hat einen trapezförmigen Querschnitt mit Sandfanggutrinne, während der Sandfang der Kläranlage München I keine Sandfanggutrinne aufweist. Bei der Kläranlage München I konnten betriebsbedingt die zwei verschiedenen Lufteinträge $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und die zwei Durchflüsse $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ realisiert werden, bei der Kläranlage Karlsfeld wurde bei Normalbetrieb, bei einem Lufteintrag von $1,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einem Durchfluss von 110 l/s gemessen. Um differenziertere Abhängigkeiten zu untersuchen, wurde der Sandfang der Kläranlage Karlsfeld als physikalisches Sandfangmodell im Maßstab 1:4 abgebildet. Dort wurden Lufteinträge von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ bis $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, Einblastiefen von $0,62 \text{ m}$ bis $0,21 \text{ m}$ und Durchflüsse von $1,5 \text{ l/s}$ bis $5,5 \text{ l/s}$ eingestellt.

7.1.1 Kritische Geschwindigkeiten für eine Wiederaufwirbelung von Sand

Aus Abbildung 29 geht hervor, dass die Korngröße $0,2 \text{ mm}$, bei Ansatz der Sinkgeschwindigkeit nach Dietrich (1982), ab einer Geschwindigkeit von $0,23 \text{ m/s}$ an der Sohle transportiert wird und schon ab einer Geschwindigkeit von $0,14 \text{ m/s}$ in der Schwebelagerung transportiert werden kann. Die Werte für den Suspensionsbeginn sind unter anderem abhängig vom gewählten theoretischen Ansatz für die Sinkgeschwindigkeit und vom Abstand von der Sohle. Für die Darstellung in Abbildung 29 wurden Abstände von der Sohle von $0,01 \text{ m}$ und $0,20 \text{ m}$ gewählt. Bei steigendem Abstand von der Sohle steigen die Werte für die Grenzgeschwindigkeit für Suspensionsbeginn. Ortmanns (2006) hat die Grenzgeschwindigkeiten für den Sohltransport und Schwebetransport für Entsander in Wasserkraftanlagen, in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit, für ein Betonbett und ein Kiesbett dargestellt und ermittelte so für die Korngröße $0,2 \text{ mm}$ den Suspensions- und Bewegungsbeginn bei einer Kiessohle bei Geschwindigkeiten von $0,15 \text{ m/s}$ und bei Betonsohle bei Geschwindigkeiten von $0,23 \text{ m/s}$. Der Bereich stimmt mit dem oben erwähnten gut überein. Die kritische Geschwindigkeit in belüfteten Sandfängen stellt die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze dar, die durch den Lufteintrag eingestellt wird. Insbesondere bei hohen Lufteinträgen werden die Grenzgeschwindigkeiten überschritten, was zur Resuspension von Sand führen kann. Deshalb ist es besonders wichtig, den Lufteintrag möglichst niedrig zu wählen und die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze auf $\leq 0,15 \text{ m/s}$ zu begrenzen.

7.1.2 Geschwindigkeitsverteilung in Querrichtung

Die empfohlene Randgeschwindigkeit der Wasserwalze wurde im Laufe der Jahre nach unten korrigiert. So war der empfohlene Wert früher noch bei 0,61 m/s (Kappe & Neigbor, 1951) und ist heute bei $\leq 0,2$ m/s (ATV, 1997). In den neuesten Empfehlungen für die Bemessung belüfteter Sandfänge (ATV, 1998; DWA, 2008) fehlt der Wert allerdings, obwohl er sehr wichtig zur Begrenzung des Lufteintrages, besonders im Hinblick auf den Schwebstoff und Sedimenttransport ist.

Vergleicht man die Messwerte für die Walzenströmung der Kläranlage München I bei den Lufteinträgen von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, wird deutlich, dass der Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ausreicht, um eine Walzenströmung zu bilden. Die empfohlene Randgeschwindigkeit der Wasserwalze von maximal 0,2 m/s wird an zwei von drei Messprofilen mit $-0,23$ m/s und $-0,25$ m/s sogar schon überschritten. Bei Erhöhung des Lufteintrags auf $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ steigt die Sohlgeschwindigkeit dann auf maximal $-0,3$ m/s an. Die maximale Sohlgeschwindigkeit tritt bei dieser Querschnittsform am Boden des Sandfanges auf und nicht wie von Stein (1992) vermutet, auf Höhe $0,95 \cdot h_{\text{bel}}$. Beim Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, dem Querschnitt mit Sandfanggutrinne, beträgt die maximale Sohlgeschwindigkeit 0,23 m/s im Abstand von $0,25 \cdot h_{\text{SF}}$ von der Oberkante der Sandfanggutrinne. In der Sandfanggutrinne bildet sich eine kleine Walze entgegen der Hauptwasserwalze. Die Geschwindigkeiten dieser Wasserwalze sind aber mit 0,04 m/s bis 0,09 m/s deutlich geringer als beim Querschnitt ohne Sandfanggutrinne, wo sie beim Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $-0,16$ m/s bis $-0,25$ m/s und beim Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $-0,2$ m/s bis $-0,3$ m/s betragen.

Die Abhängigkeiten der Querströmung an der Sohle vom Lufteintrag wurden in den Arbeiten von Schrimpf (1987), Londong (1987) und Patt (1990) dargestellt. Nach allen drei Messungen steigt die Quergeschwindigkeit an der Sohle mit zunehmendem Lufteintrag an. Schrimpf (1987) näherte den Kurvenverlauf mit der logarithmischen Abhängigkeit von Kobus (1973) an, Londong (1987) mit dem Kurvenverlauf einer Potenzfunktion. Auf die eigenen Messungen passte der logarithmische Kurvenverlauf am besten. Die Maximalgeschwindigkeit der Wasserwalze an der Wasseroberfläche konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 und die maximale untere Randgeschwindigkeit der Wasserwalze mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,87 angenähert werden (Abbildung 86). Auch hier lag eine Steigerung der Geschwindigkeiten mit zunehmendem Lufteintrag vor. So betrug bei einem Lufteintrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einem Durchfluss von 3,5 l/s und einer Einblastiefe von 0,55 m, die Maximalgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche $-0,1$ m/s und die Sohlgeschwindigkeit 0,04 m/s. Diese Werte erhöhten sich bei Steigerung des Lufteintrags auf $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, auf $-0,15$ m/s bzw. auf 0,07 m/s. Die maximale Sohlgeschwindigkeit tritt bei diesen Messungen nicht wie von Stein (1992) vermutet auf Höhe $0,95 \cdot h_{\text{bel}}$ auf, sondern auf ungefähr halber Höhe der Sohlschräge, im Abstand von $0,25 \cdot h_{\text{SF}}$ von der Oberkante der Sandfanggutrinne.

Stein (1992) hat an Querschnitten von großtechnischen belüfteten Sandfängen Geschwindigkeitsmessungen in Querrichtung durchgeführt. Als Messprofil wählte er allerdings die Mitte des Sandfangquerschnitts, so dass keine Aussage über eine Geschwindigkeitsverteilung in der Sandfanggutrinne getroffen werden konnte. Die Messwerte nahe der Wasseroberfläche waren deutlich größer, als die Messwerte im unteren Bereich. Nahe der Wasseroberfläche traten Werte bis zu 0,71 m/s auf, unmittelbar darunter nur noch deutlich geringere Werte. Dies könnte daran liegen, dass die Messungen mit einem Messflügel durchgeführt worden sind. Bei den Messungen mit einer ADV Sonde konnte dieser extreme Anstieg nicht beobachtet werden. Allerdings konnte mit der ADV Sonde nicht direkt an der Wasseroberfläche gemessen werden, weil sich das Messvolumen der Sonde 5 cm unter dem Sondenkopf befindet. Hier sind noch weitere Messungen, insbesondere näher an der Oberfläche, nötig, um die Geschwindigkeitsverteilung zu untersuchen. Dies könnte mit einer seitlich montierten Sonde (side looking probe) geschehen. Wegen der erhöhten Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche vermutete Stein (1992), dass der bewegte Wasserstrom im Bereich oberhalb des Walzenmittelpunktes größer war als unterhalb des Walzenmittelpunktes. Bei den eigenen Messungen konnte dagegen beobachtet werden, dass das Integral unter den Geschwindigkeiten oberhalb des Walzenmittelpunktes gleich dem Integral der Geschwindigkeiten unterhalb des Walzenmittelpunktes war, also auch der bewegte Wasserstrom gleich groß war. Dies steht im Einklang mit der Kontinuitätsbedingung.

In den eigenen Untersuchungen am physikalischen Sandfangmodell wurde eine starke Abhängigkeit der Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze v_{\max} und v_{Sohl} von der Einblastiefe deutlich. So betrug die maximale Geschwindigkeit an der Oberfläche bei einer Einblastiefe von 0,21 m, einem Durchfluss von 3,5 l/s und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, $-0,05 \text{ m/s}$ und die Sohlgeschwindigkeit v_{Sohl} $0,03 \text{ m/s}$ (Abbildung 91). Diese Werte erhöhten sich bei einer Einblastiefe von 0,62 m auf ein v_{\max} von $-0,1 \text{ m/s}$ und ein v_{Sohl} von $0,07 \text{ m/s}$. Der Kurvenverlauf kann für beide Geschwindigkeiten mit einer logarithmischen Abhängigkeit der Randgeschwindigkeiten der Wasserwalze von der Einblastiefe beschrieben werden. Für v_{\max} ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,91 m für v_{Sohl} ein Bestimmtheitsmaß von 0,85. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Londong (1987), der auch einen logarithmischen Zusammenhang der Sohlgeschwindigkeit von der Einblastiefe gefunden hat. Bei ihm beträgt die Geschwindigkeit an der Sohle, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Einblastiefe von 1,65 m nur $0,10 \text{ m/s}$, bei einer Einblastiefe von 2,85 m steigt diese auf $0,20 \text{ m/s}$. Auch Patt (1990) hat in seinen Ergebnissen eine starke Abhängigkeit der Geschwindigkeit $0,05 \text{ m}$ über der Sohle von der Einblastiefe festgestellt. Bei einem Lufteintrag von ca. $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ beträgt die Sohlgeschwindigkeit bei seinen Messungen bei einer Einblastiefe von 0,72 m, $0,31 \text{ m/s}$ und bei einer Einblastiefe von 0,92 m, $0,36 \text{ m/s}$. Daraus folgt, dass bei gleichem Lufteintrag eine größere Einblastiefe zu einer besseren Ausnutzung der eingetragenen Energie führt. Da bei den Messungen von

Patt (1990) der empfohlene Wert von 0,2 m/s für die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze überschritten wird, könnte der Lufteintrag reduziert werden.

Am physikalischen Sandfangmodell wurden im Rahmen der Kalibrierung des physikalischen Modells Quergeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Luftblasengrößen gemessen. Bei 200 Düsen mit $d = 1,0$ mm und bei 140 Düsen mit $d = 0,6$ mm waren die erreichbaren Oberflächengeschwindigkeiten bei gleichem Lufteintrag ähnlich, bei 140 Düsen mit $d = 1$ mm geringfügig höher und bei 80 Düsen mit $d = 1,0$ mm deutlich geringer. So betrug bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche v_{max} bei 200 Düsen mit $d = 1,0$ mm $-0,154$ m/s und bei 140 Düsen mit $d = 0,6$ mm $-0,158$, bei 140 Düsen mit $d = 1,0$ mm $-0,162$ m/s und bei 80 Düsen mit $d = 1,0$ mm nur $-0,128$ m/s. Dies konnte durch einen Vergleich mit dem von Patt (1990) angegebenen Übergangsbereich zum Strahlgasen erklärt werden. So liegt der Übergangsbereich zum Strahlgasen, bei 200 Düsen mit $d = 1,0$ mm bei einem Lufteintrag von $7,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, bei 140 Düsen mit $d = 1,0$ mm bei $5,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, bei 80 Düsen mit $d = 1,0$ mm bei $2,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und bei 140 Düsen mit $d = 0,6$ mm bei $3,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Alle Versuche, bis auf drei Messungen mit 80 Düsen mit $d = 1,0$ mm und eine Messung mit 140 Düsen mit $d = 1,0$ mm, bei dem Lufteintrag $5,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, wurden im Bereich des Blasengases durchgeführt. Bei 80 Düsen ist die Grenze zum Zustand „Strahlgasen“ am kleinsten. Das heißt, dass diese Messungen im Übergangsbereich zwischen Blasen- und Strahlgasen durchgeführt wurden (Tabelle 3).

Auch Londong (1987) beobachtete in seinen Messungen deutliche Unterschiede zwischen grobblasiger und feinblasiger Belüftung. Bei feinblasiger Belüftung ließen sich bei ihm bei gleichem Lufteintrag deutlich größere Sohlgeschwindigkeiten erreichen, als bei grobblasiger. So war bei ihm die gemessene Sohlgeschwindigkeit, bei einem Lufteintrag von $3,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, bei grobblasiger Belüftung, $0,2$ m/s und bei feinblasiger $0,3$ m/s. Die größeren Werte als bei den vorliegenden Messungen sind durch eine deutlich größere Einblastiefe von $1,65$ m, gegenüber $0,55$ m im physikalischen Sandfangmodell, zu erklären.

7.1.3 Geschwindigkeitsverteilung in Längsrichtung

Für die empfohlene Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung fand sich in der Literatur ein Bereich von $\leq 0,15$ m/s (Albrecht, 1967) bis $\leq 0,3$ m/s (DIN_EN_12255-3, 2001; Imhoff & Imhoff, 2007). Auch hier erscheint wegen der Resuspensionsgefahr die Begrenzung auf $\leq 0,15$ m/s sinnvoll.

Der Vergleich der maximalen Fließgeschwindigkeiten in Sandfanglängsrichtung zeigte, dass bei beiden Querschnittsformen die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung über die Sandfanglänge abnimmt. Beim Sandfang der Kläranlage München I beträgt diese Geschwindigkeit im Zulaufbereich noch $0,23$ m/s und in der Sandfangmitte nur noch $0,1$ m/s. Eine Verdopplung des Durchflusses von $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ wirkt sich besonders auf den Zulaufbereich

aus. Dort verdoppelt sich die Fließgeschwindigkeit von 0,23 m/s auf 0,4 m/s. Am Messprofil 3 sind die Fließgeschwindigkeiten mit 0,11 m/s bei 0,3 m³/s und 0,13 m/s bei 0,6 m³/s sehr ähnlich. Der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils ist logarithmisch mit Rückströmung an der Sohle. Beim Durchfluss von 0,6 m³/s ist die maximale Rückströmung an der Sohle mit -0,04 m/s geringer, als beim Durchfluss von 0,3 m³/s, wo sie -0,06 m/s beträgt. In einem kreisförmigen Sandfangmodell, ohne Sandfanggutrinne, hat Patt (1990) auch ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil gemessen.

Beim Trapezquerschnitt des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld, mit Sandfanggutrinne, entsteht kein gerichtetes Geschwindigkeitsprofil der Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung. Bei Messprofil 3 tritt in Walzenmitte eine Rückströmung von -0,08 m/s auf und in der Sandfanggutrinne eine Vorwärtsströmung von 0,14 m/s. In der Literatur finden sich keine Messungen der Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung an großtechnischen Anlagen mit Sandfanggutrinne. Deshalb wurde im physikalischen Sandfangmodell der Einfluss des Lufteintrages auf die Längsdurchströmung im Trapezquerschnitt näher untersucht. Dabei wurden Versuche ohne Lufteintrag und mit den Lufteinträgen von 1,3 Nm³/(m³·h) und 2,5 Nm³/(m³·h), bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, durchgeführt. Während ohne Lufteintrag die Fließgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung im Walzenmittelpunkt in der Mitte des physikalischen Sandfangmodells (Messprofil 5) 0,006 m/s beträgt, stellen sich bei den Lufteinträgen von 1,3 Nm³/(m³·h) und 2,5 Nm³/(m³·h) Rückströmungen von -0,01 m/s und -0,06 m/s ein. In der großtechnischen Anlage bedeutet dies, wegen des Maßstabs 1:4, Rückströmungen von -0,02 m/s und -0,12 m/s. Dieses Ergebnis stimmt gut mit den großtechnischen Messungen überein. Die Beobachtung einer Rückströmung im Bereich des Walzenmittelpunktes könnte also Hinweis auf eine zu hohe Belüftung sein. Weiterer Nachteil einer zu hohen Belüftung ist die zunehmende Vorwärtsströmung in der Sandfanggutrinne mit zunehmendem Lufteintrag. So betrug bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und ohne Lufteintrag die Fließgeschwindigkeit in der Sandfanggutrinne 0 m/s. Bei einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) erhöhte sich diese auf 0,03 m/s und bei 2,5 Nm³/(m³·h) auf 0,07 m/s. Dies ist insbesondere im Hinblick auf Wiederaufwirbelungen kritisch. Für eine Optimierung des Abscheidegrades ist es deshalb zielführend, den von der DWA (2008) vorgeschlagenen Bereich für den Lufteintrag von 0,5 Nm³/(m³·h) bis 1,3 Nm³/(m³·h) nach unten zu korrigieren.

7.1.4 Turbulente kinetische Energie

Bemerkenswert ist die Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie, da sie einen Überblick über die Gesamtturbulenz im Querschnitt gibt. Entscheidender Vorteil des Parameters der turbulenten kinetischen Energie ist, dass in ihm die Parameter Lufteintrag, Einblastiefe und Durchfluss zusammengefasst sind. Ein Vergleich der turbulenten kinetischen Energie in den Sandfängen München I und Karlsfeld über die Sandfanglänge zeigte deutliche Unterschiede (Abbildung 150).

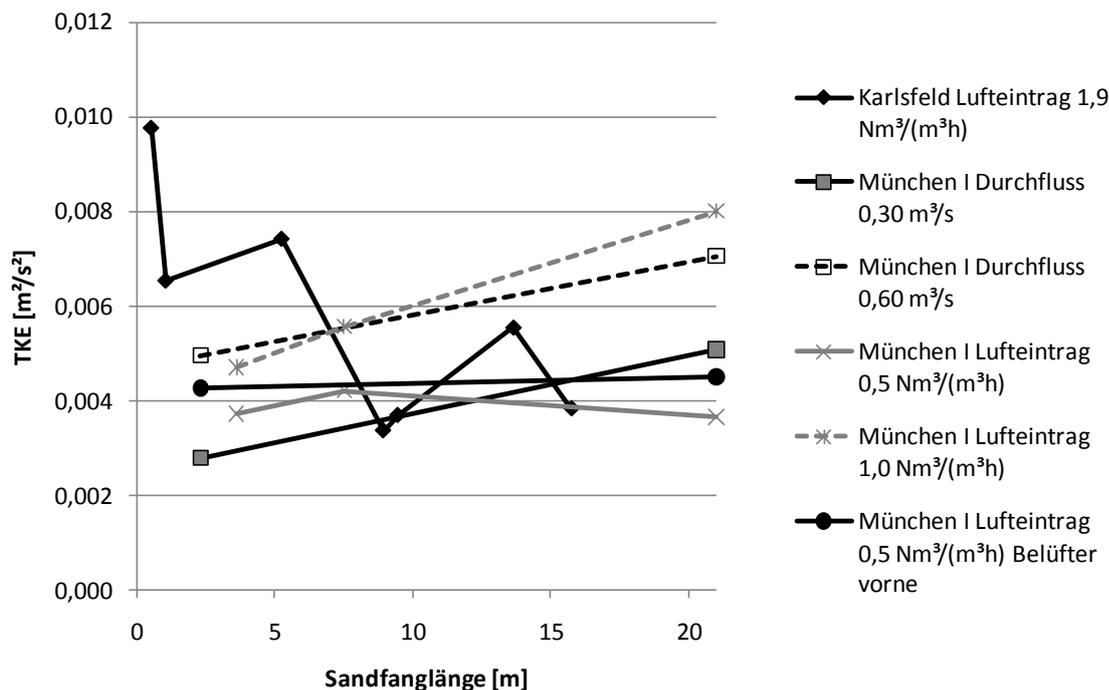


Abbildung 150: Turbulente kinetische Energie in den Sandfängen der Kläranlagen München I und Karlsfeld über die Sandfanglänge bei verschiedenen Durchflüssen und Lufteinträgen.

Während die turbulente kinetische Energie im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld im Zulaufbereich mit $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sehr hoch ist und in Fließrichtung auf einen Wert von $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ abnimmt, ist die turbulente kinetische Energie im Sandfang der Kläranlage München I bei Normalbetrieb am Anfang mit $0,003 \text{ m}^2/\text{s}^2$ deutlich niedriger und steigt mit zunehmendem Fließweg auf einen Wert von $0,005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte an. Die Unterschiede könnten durch die Anordnung der Belüfter, den unterschiedlichen Lufteintrag mit unterschiedlicher Einblastiefe oder die Zulaufgestaltung erklärt werden. So sind im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld die Belüfter schon im Zulaufbereich montiert und in der Kläranlage München I erst nach einer Länge von 4 m. Nachdem aber die nachträgliche Montage von Belüftern im Zulaufbereich nur eine Erhöhung von $0,003 \text{ m}^2/\text{s}^2$ auf $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ zur Folge hatte, scheint dies nicht der Grund für die geringere turbulente kinetische Energie gewesen zu sein. Im Folgenden werden die Auswirkungen der Parameter Lufteintrag, Einblastiefe und Durchfluss auf die turbulente kinetische Energie diskutiert.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge ist in Abbildung 151 die turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag, bei verschiedenen Durchflüssen und Einblastiefen dargestellt. Es wird deutlich, dass die turbulente kinetische Energie in allen Fällen linear vom Lufteintrag abhängt. Die Steigung der Gerade wird bei einer Verringerung der Einblastiefe oder bei einer Verringerung des Durchflusses flacher, bei einer

Erhöhung des Durchflusses steiler. Die niedrigsten Werte für die turbulente kinetische Energie wurden bei einer Verringerung der Einblastiefe von 0,55 m auf 0,31 m gemessen. Auch dies deutet darauf hin, dass die Ausnutzung der eingetragenen Energie mit steigender Einblastiefe zunimmt.

Aus diesen Zusammenhängen können, zusammen mit den im Folgenden (Kapitel 7.3) diskutierten Einflüssen auf den Abscheidegrad, Schlussfolgerungen für eine Optimierung des Abscheidegrads abgeleitet werden.

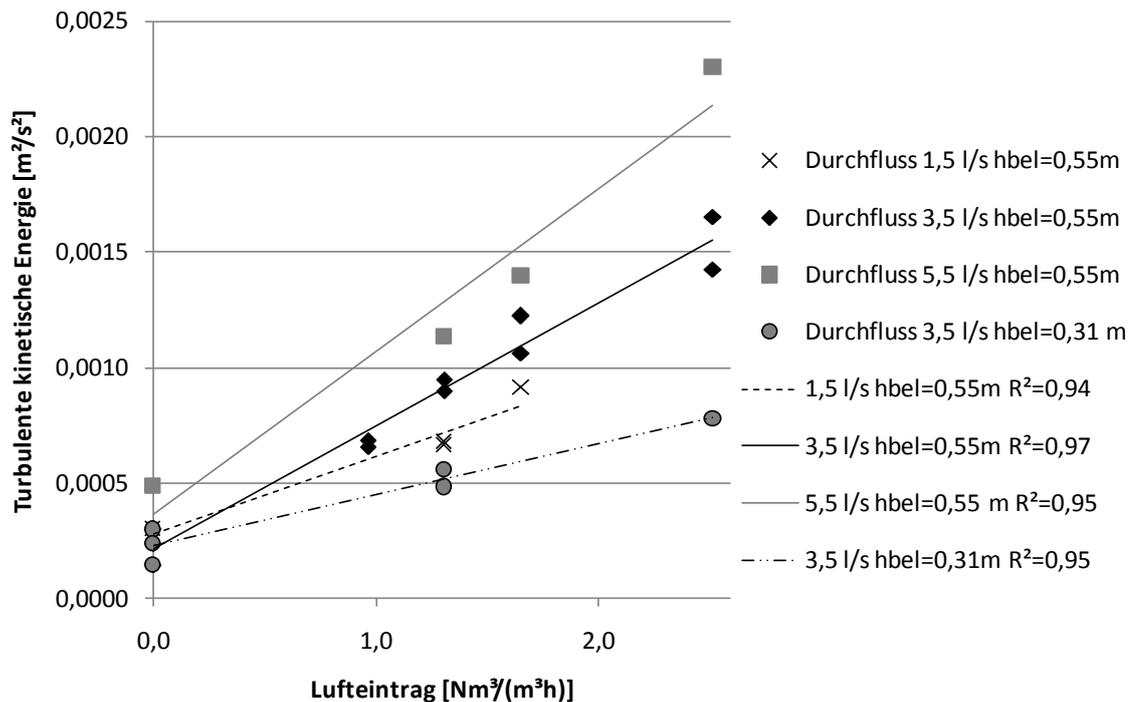


Abbildung 151: Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen 1,5 l/s, 3,5 l/s und 5,5 l/s und den Einblastiefen 0,55 m und 0,31 m in Abhängigkeit vom Lufteintrag.

Lufteintrag

Der Lufteintrag im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld ist mit $1,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ höher, als bei der Kläranlage München I mit $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Die Messungen zeigten, dass ein höherer Lufteintrag zu einer Steigerung der turbulenten kinetischen Energie über die ganze Sandfanglänge führt. Durch Steigerung des Lufteintrages wurde die turbulente kinetische Energie im Zulaufbereich des Sandfanges der Kläranlage München I von $0,0037 \text{ m}^2/\text{s}^2$ auf $0,0047 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und in Sandfangmitte von $0,0037 \text{ m}^2/\text{s}^2$ auf $0,008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ erhöht. Im physikalischen Sandfangmodell wurde der Einfluss des Lufteintrags auf die turbulente kinetische Energie näher untersucht. Bei der Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie über die Sandfanglänge betrug diese, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, im Zulaufbereich $0,0013 \text{ m}^2/\text{s}^2$, in Sandfangmitte $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,0007 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Wird der

Luft eintrag auf $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erhöht, erhöhen sich die Werte für die turbulente kinetische Energie auf $0,0017 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Zulaufbereich, $0,0015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte und $0,0012 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Ablaufbereich (Abbildung 87). Über den ganzen Sandfangquerschnitt gemittelt steigt die turbulente kinetische Energie mit steigendem Luft eintrag linear an (Abbildung 88). Ohne Luft eintrag beträgt die turbulente kinetische Energie $0,0002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und bei einem Luft eintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ $0,0016 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Einblastiefe

Aus den eigenen Untersuchungen am physikalischen Sandfangmodell geht eine deutliche Abhängigkeit zwischen Einblastiefe und der turbulenten kinetischen Energie hervor. Bei der geringsten untersuchten Einblastiefe von $0,21 \text{ m}$ beträgt die über die Höhe gemittelte turbulente kinetische Energie, bei einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$ und bei einem Luft eintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, im Zulaufbereich $0,0004 \text{ m}^2/\text{s}^2$, in Sandfangmitte $0,0002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,0003 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (Abbildung 92). Diese Werte können durch Erhöhung der Einblastiefe auf $0,62 \text{ m}$, auf $0,0014 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Zulaufbereich, $0,0007 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte und $0,0009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ im Ablaufbereich, gesteigert werden. Mittelt man die turbulente kinetische Energie über den ganzen Sandfangquerschnitt, ergibt sich wie beim Luft eintrag eine lineare Abhängigkeit von der Einblastiefe, mit einer turbulenten kinetischen Energie von $0,0002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei einer Einblastiefe von 0 m und $0,0009 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei einer Einblastiefe von $0,62 \text{ m}$ (Abbildung 93). Londong (1987) beschreibt den Einfluss der Einblastiefe auf den Turbulenzgrad dagegen als gering. Für feinblasige Belüftung fand er dennoch ein Optimum der Einblastiefe auf der Höhe $0,58 \cdot h_{\text{SF}}$.

Durchfluss

Eine Verdopplung des Durchflusses von $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ im Sandfang der Kläranlage München I mit Rechteckquerschnitt brachte eine gleichmäßige Steigerung der turbulenten kinetischen Energie um $0,002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ über die ganze Sandfanglänge mit sich. Auch dieser Sachverhalt wurde im physikalischen Sandfangmodell mit Trapezquerschnitt genauer untersucht. Bei Auswertung der turbulenten kinetischen Energie über die Sandfanglänge, bei den Durchflüssen $1,5 \text{ l/s}$, $3,5 \text{ l/s}$ und $5,5 \text{ l/s}$, stieg die turbulente kinetische Energie nur im Zulaufbereich im Messprofil 2 deutlich an, in Sandfangmitte ist die turbulente kinetische Energie bei allen drei Durchflüssen gleich (Abbildung 97). So betrug die turbulente kinetische Energie bei einem Durchfluss von $1,5 \text{ l/s}$ im Zulaufbereich $0,0006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,0005 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und bei einem Durchfluss von $5,5 \text{ l/s}$ im Zulaufbereich $0,0022 \text{ m}^2/\text{s}^2$ in Sandfangmitte $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und im Ablaufbereich $0,0008 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Aus den dargestellten Überlegungen folgt, dass die unterschiedliche Zulaufgestaltung als Erklärung für die Unterschiede in der turbulenten kinetischen Energie bei der Kläranlage München I und der Kläranlage Karlsfeld zu sehen ist. Bei dem Sandfang der Kläranlage Karlsfeld erfolgte der Zulauf über eine

Wehrschwelle, beim Sandfang der Kläranlage München I durch einen Rechteckkanal. Es liegt nahe, dass durch die Wehrschwelle die zusätzliche höhere Turbulenz erzeugt wurde. Durch die Betrachtung der turbulenten kinetischen Energie über die Sandfangtiefe im Zulaufbereich konnte diese Vermutung zusätzlich gestützt werden. Während die Werte an der Wasseroberfläche im Zulaufbereich bis zu $0,028 \text{ m}^2/\text{s}^2$ betragen, sanken sie unterhalb der Wasseroberfläche schnell auf Werte um die $0,012 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ab. Die Störung im Ablaufbereich dagegen war gering. Auch Ortmanns (2006) stellte einen deutlichen Einfluss des Zulaufbereichs bei Entsandern von Wasserkraftanlagen auf die turbulente kinetische Energie fest. Die von ihm an drei Entsandern gemessenen Werte von turbulenter kinetischer Energie betragen im Zulaufbereich $0,01$ bis $0,03 \text{ m}^2/\text{s}^2$, an einer Anlage sogar $0,04$ bis $0,1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und nahmen über die Länge auf bis zu $0,0025 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ab. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Ortmanns (2006) bei Entsandern, erstreckte sich die Störung beim belüfteten Sandfang nur auf die ersten 20 % des Fließwegs. Bei Entsandern dagegen war durch die zusätzliche Querschnittsaufweitung im Einlaufbereich fast 50 % der Sandfanglänge nötig, um die Strömung zu beruhigen.

Grobblasige und feinblasige Belüftung

Die turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell war am höchsten bei einem Lufteintrag mit 80 Düsen und am geringsten bei 200 Düsen. Dies stimmt mit den Messungen von Londong (1987) überein, der bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, bei feinblasiger Belüftung, einen niedrigeren Turbulenzgrad mit einem Wert von $0,2$ erreichte als mit grobblasiger Belüftung mit knapp $0,4$. Allerdings blieb bei ihm der Turbulenzgrad bei feinblasiger Belüftung, trotz steigendem Lufteintrag, konstant bei einem Wert von $0,2$. Für Lufteinträge ab $3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ war bei ihm der Turbulenzgrad bei beiden Belüftungsarten gleich bei $0,2$. Ein ähnlicher Effekt konnte bei den eigenen Messungen bei den 80 Düsen mit Düsendurchmesser 1 mm festgestellt werden. Bei Lufteinträgen bis $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ stieg die turbulente kinetische Energie linear bis auf einen Wert von $0,0019 \text{ m}^2/\text{s}^2$ an und ab $3,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ fiel sie auf das Niveau der 200 Bohrungen mit Düsendurchmesser 1 mm von $0,0017 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ab, um bei weiter steigenden Lufteinträgen dann wieder linear anzusteigen. Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Messungen steigt die turbulente kinetische Energie im Bereich des Blasengasens linear mit steigendem Lufteintrag an (Abbildung 82). Bei Erreichen des Strahlgasens steigt die turbulente kinetische Energie mit geringerer Steigung an. Dieser Effekt wurde in den Untersuchungen bei den 80 Düsen mit Düsendurchmesser 1 mm ab einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ beobachtet. Daraus lässt sich folgern, dass bei zu großen Blasen die Umsetzung der eingetragenen Energie in Bewegungsenergie des Wasserstroms nicht mehr optimal funktioniert.

7.2 Simulation der Partikelbahnen

Das in dieser Arbeit entwickelte mathematische Modell zur Beschreibung des Geschwindigkeitsfeldes hat gegenüber dem früheren Ansatz von Stein (1992) den Vorteil, dass es auf die Aufteilung des Sandfangquerschnittes in Bereiche verzichtet und die Kontinuitätsbedingung über die Höhe und über die Breite eingehalten ist. Für die Berechnung der Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche nach Patt (1990) und Kobus (1973) waren Korrekturfaktoren nötig. Die Güte der Anpassung des Geschwindigkeitsprofils $v(z)$ war mit den Bestimmtheitsmaßen von 0,92 und 0,93 sehr gut, bei dem Geschwindigkeitsprofil $w(z)$ mit 0,67 und 0,82 etwas geringer. Das Geschwindigkeitsprofil $w(y)$ überschätzt die Geschwindigkeiten auf der Seite des Lufteintrags. Bei dem Vergleich des Verlaufs der Geschwindigkeit $v(y)$ an der Wasseroberfläche über die Sandfangbreite ergaben die Messungen, dass das Maximum nicht wie bei Kobus (1973) im Abstand der Breite des Auftriebsstrahls, sondern in der Mitte des Sandfangquerschnittes auftrat. Dies könnte an der seitlichen Begrenzung durch die beiden Seitenwände liegen, denn Kobus (1973) hat seine Messungen ohne Einbauten durchgeführt. Insgesamt gelang eine gute Anpassung des Geschwindigkeitsfeldes, das für die Simulation der Absetzwege genutzt werden konnte.

In der Simulation wurde jeweils die Partikelgröße 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm bei verschiedenen Lufteinträgen, Einblastiefen und verschiedenen Zugabehöhen zugegeben.

Korngröße und Lufteintrag

Es wurden die Partikelbahnen der drei Partikelgrößen 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm, bei einem Durchfluss von 5,5 l/s und einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, mit denen ohne Lufteintrag verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 152 dargestellt.

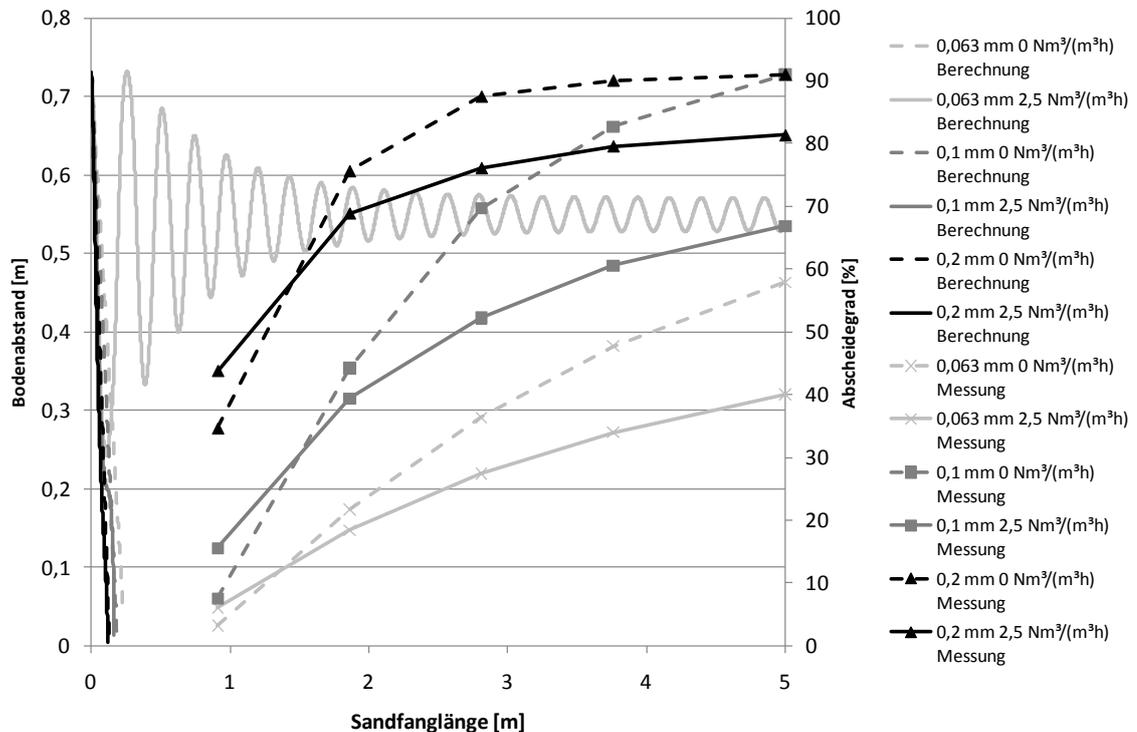


Abbildung 152: Vergleich des im physikalischen Sandfangmodell gemessenen Abscheidegrades der Partikel 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm über die Sandfanglänge ohne Lufteintrag und mit Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ mit den berechneten Partikelbahnen.

Ohne Lufteintrag betragen die Absetzlängen der Korngröße 0,06 mm 0,23 m, der Korngröße 0,1 mm 0,19 m und der Korngröße 0,2 mm 0,13 m. Alle drei Partikel setzen sich nahe dem Zulauf ab. Beim Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ beträgt die Absetzlänge der Korngröße 0,1 mm 0,15 m und für die Korngröße 0,2 mm 0,11 m. Die Korngröße 0,06 mm wird auf einer spiralförmigen Bahn bis zum Ablauf transportiert. Das heißt, dass mit Lufteintrag die Absetzlängen der Teilchen, die den Boden erreichen kürzer sind, als ohne Lufteintrag, aber diejenigen Teilchen, die leicht genug sind, mitgerissen werden.

Bei einem Vergleich der berechneten Ergebnisse mit den Abscheidegraden der Partikel ergibt sich eine ähnliche Tendenz. Der Abscheidegrad der Korngröße 0,063 mm beträgt nach 0,91 m ohne Lufteintrag 3 %. Mit Lufteintrag verdoppelt dieser sich auf 6 %. Der Abscheidegrad der Korngröße 0,1 mm beträgt nach 0,91 m

ohne Lufteintrag 8 % und mit Lufteintrag 16 %. Die Korngröße 0,2 mm wurde nach 0,91 m ohne Lufteintrag zu 35 %, ohne Lufteintrag bereits zu 44 % abgeschieden. Ab einem Fließweg von 1,5 m wird der Abscheidegrad ohne Lufteintrag besser. Am Ende des Sandfanges ist der Abscheidegrad ohne Lufteintrag der Korngröße 0,063 mm um 45 % höher, der Korngröße 0,1 mm um 36 % höher und der Korngröße 0,2 mm um 12 % höher als bei den Messungen mit Lufteintrag.

Vergleicht man die Ergebnisse mit der Messung der Sandverteilung in der Sandfanggutrinne (Abbildung 110) erhält man ein ähnliches Bild. Ohne Lufteintrag liegt direkt am Zulauf wenig Sand und der meiste Sand liegt ca. einen Meter vom Zulauf entfernt. Mit Lufteintrag verlagert sich dieser Sand nach vorne und der meiste Sand lagert sich unmittelbar beim Zulauf ab. Dieses Ergebnis stimmt gut mit dem von Patt (1990) überein, der auch Absetzlängen der Partikelgrößen 0,1 mm, 0,3 mm und 0,5 mm berechnete und bei der höchsten Walzengeschwindigkeit die kürzesten Absetzlängen erreichte. Vergleicht man aber die abgelagerten Massen bei den Messungen ohne Lufteintrag und mit Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ergibt sich bei der Messung ohne Lufteintrag ein besserer Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ von 91 % gegenüber 79 % mit einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Bei der Simulation handelt es sich um ein idealisiertes mathematisches Modell, das ein Teilchen als abgesetzt wertet, wenn es den Boden berührt. Statistische Einflüsse wie Springen und Aufwirbeln wurden in dem mathematischen Modell vernachlässigt. Deshalb gibt es zwar die Tendenzen richtig wieder, eine quantitative Abschätzung des Abscheidegrades ist jedoch nicht möglich.

Zugabehöhe

Aus der Simulation wird deutlich, dass eine Zugabe des Sandes nahe der Wasseroberfläche am günstigsten für den Abscheidegrad ist. Eine Zugabe des Sandes in Walzenmitte führt nur bei sehr großen Körnern, die ohnehin unkritisch für die Abscheideleistung sind, zu einer schnelleren Sedimentation. Dies kann in der Simulation am Beispiel der Oberflächengeschwindigkeit $v_{\text{max}} = -0,12 \text{ m/s}$ und einer kleineren Oberflächengeschwindigkeit von $-0,06 \text{ m/s}$ gezeigt werden. Bei der Zugabe von Teilchen mit den Durchmessern 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm an der Wasseroberfläche, bei der Oberflächengeschwindigkeit $-0,12 \text{ m/s}$ (Abbildung 142), setzt sich das Teilchen mit dem Durchmesser 0,06 mm nach 0,13 m, das Teilchen mit dem Durchmesser 0,1 mm nach 0,10 m und das Teilchen mit dem Durchmesser 0,2 mm bereits nach 0,08 m ab. Dies unterscheidet sich von der Simulationsrechnung von Patt (1990) bei dem das Teilchen mit dem kleinsten Durchmesser bei Lufteintrag den kürzesten Weg hat.

Gibt man die Teilchen im Walzenmittelpunkt zu (Abbildung 146), bewegen sich die Teilchen mit den Durchmessern 0,06 mm und 0,1 mm auf einer spiralförmigen Bahn zum Ablauf und nur das Teilchen mit dem Durchmesser 0,2 mm setzt sich 0,07 m vom Zulauf ab. Die Absetzlänge des Teilchens ist damit kürzer als vorher. Halbiert man die Oberflächengeschwindigkeit sind bei einer Zugabe an der

Wasseroberfläche die Absetzlängen für alle drei Teilchen mit 0,15 m, 0,12 m und 0,08 m geringfügig länger (Abbildung 147). Dies liegt am unterschiedlichen Absetzort. Bei der höheren Oberflächengeschwindigkeit lagern sich die Teilchen auf der Schräge beim Belüfter ab, bei der niedrigeren Oberflächengeschwindigkeit in der Rinne. Gibt man die Teilchen nun im Walzenmittelpunkt zu (Abbildung 148), reicht die Strömung nicht mehr aus, um diese mitzureißen und das Teilchen mit dem Durchmesser 0,06 mm lagert sich 0,13 m, das Teilchen mit dem Durchmesser 0,1 mm 0,10 m und das Teilchen mit dem Durchmesser 0,2 mm 0,07 m vom Zulauf ab. Die Absetzlängen sind nun verglichen mit einer Zugabe an der Wasseroberfläche kürzer. Dies bedeutet, dass nur bei sehr geringen Lufteinträgen und großen Partikeldurchmessern eine Zugabe im Walzenmittelpunkt vorzuziehen ist. Patt (1990) hat durch Messung an seinem physikalischen Sandfangmodell und Simulation ein ähnliches Ergebnis erzielt und kommt zu dem Schluss, dass bei Teilchen mit dem Durchmesser $\leq 0,3$ mm eine Zugabe an der Wasseroberfläche am besten ist. Für Teilchen $> 0,3$ mm würden sich dann zwar die Absetzwege verlängern, aber die Abscheidung dieser Teilchen sei sowieso unkritisch. Die Auswertung der ausgeführten Sandfangquerschnitte ergab, dass bei 78 % der untersuchten 55 Anlagen, das Abwasser oben zugeleitet wird. Dies kann als günstig für die Abscheidung bewertet werden.

7.3 Maßgebliche Einflußfaktoren auf den Abscheidegrad

Es gibt drei wesentliche Einflussfaktoren auf den Abscheidegrad. Zum einen beeinflussen die Sandkonzentration und die Korngrößenverteilung den Abscheidegrad maßgeblich, zum anderen die turbulente kinetische Energie. Im Parameter der turbulenten kinetischen Energie können die Parameter Lufteintrag, Einblastiefe, Durchfluss und Querschnittsgestaltung zusammengefasst werden. Die Ergebnisse der Messungen zum Abscheidegrad werden im Folgenden diskutiert.

Sandkonzentration

An den belüfteten Sandfängen von fünf Kläranlagen wurden die Abscheidegrade gemessen. Bei den Kläranlagen Dachau, Karlsfeld, Holzkirchen und Neufinsing wurden die Messungen bei Trockenwetter und bei der Kläranlage Geiselbullach bei Regenwetter durchgeführt. Bei den Kläranlagen Karlsfeld, Holzkirchen und Neufinsing waren die Zulaufkonzentrationen an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm mit 7,5 mg/l, 4,2 mg/l und 6,3 mg/l sehr gering. Diese Konzentrationen konnten im belüfteten Sandfang auf 3,2 mg/l, 3,4 mg/l und 3,8 mg/l reduziert werden. Die erreichten Abscheidegrade von 57,9 %, 20,3 % und 39,0 % lagen deutlich unter dem bei Maximalzufluss geforderten Wert von 95 % (DIN_19569-2, 2002). Bei den höheren Sandkonzentrationen der Korngrößen $\geq 0,2$ mm der Kläranlage Dachau von 43,4 mg/l und Geiselbullach bei Regenwetter von 283,7 mg/l wurden deutlich bessere mittlere Abscheidegrade von 87,2 % und 91,1 % erzielt. Bei den Spitzenkonzentrationen bei Regenwetter von 900 mg/l bzw. 1.200 mg/l war der Abscheidegrad des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach bei 98 %, also besser als der bei Maximalzufluss geforderte Wert von 95 % (DIN_19569-2, 2002). Die

Ablaufkonzentrationen waren dabei aber mit im Mittel 27,7 mg/l deutlich höher als bei den Messungen bei Trockenwetter. Diesen Messungen nach ist der Abscheidegrad ein sehr stark konzentrationsabhängiger Parameter, der besonders bei Konzentrationen an Sand der Korngrößen $\geq 0,2$ mm von unter 50 mg/l geringe Ergebnisse erzielt. In der Literatur fanden sich diesbezüglich noch keine Messungen an belüfteten Sandfängen. Dieser Zusammenhang wurde daher im physikalischen Sandfangmodell näher untersucht. Während der Gesamtabseidegrad im Sandfangmodell bei einer Sandkonzentration von 500 mg/l 76,4 % beträgt, verringert sich dieser bei einer Sandkonzentration von 125 mg/l auf 71,6 %. Dem stehen ein Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 84,1 % bzw. 78,2 % gegenüber. Die Ergebnisse der großtechnischen Messungen und der Messungen am physikalischen Sandfangmodell sind in Abbildung 153 dargestellt. Es besteht eine annähernd logarithmische Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Sandkonzentration. Dies deutet darauf hin, dass für geringe Sandkonzentrationen ein Abminderungsfaktor für die Sinkgeschwindigkeit gefunden werden muss. Bei hohen Sandkonzentrationen entsteht durch die Abwärtsbewegung der einzelnen Partikeln offensichtlich ein Sog, der andere Partikel mitzieht.

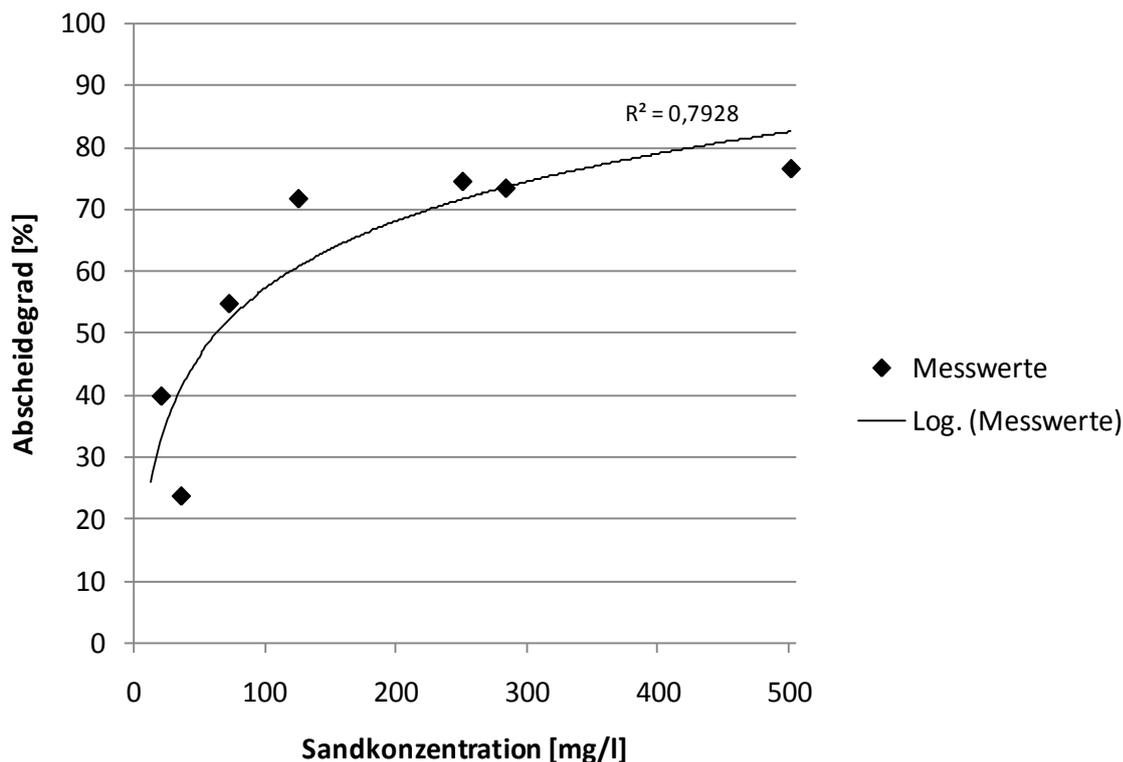


Abbildung 153: Gesamtabseidegrad in Abhängigkeit von der Sandkonzentration im physikalischen Sandfangmodell und bei den großtechnischen Messungen.

Die Messungen in der Literatur wurden mit geringen Sandkonzentrationen von 12 mg/l bzw. 78,8 mg/l (Patt, 1990), 25 mg/l (Schrimpf, 1987), durchgeführt. Eine Ausnahme bilden die Messungen von Theilen & Luthardt-Behle (2004), die bei

Sandkonzentrationen von 333,3 mg/l bis maximal 677,4 mg/l durchgeführt worden sind. Zusätzlich wurde sehr grober Versuchssand mit einem Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm von nur 17,8 % verwendet. Die Korngrößenverteilung reicht von 0,06 bis 8 mm, im Gegensatz zu den von anderen Autoren verwendeten Sanden, die als Größtkorn maximal 0,5 mm verwendeten. Aufgrund dieser Versuchsbedingungen ist ein guter Abscheidegrad zu erwarten. Allerdings wurden die Lufteinträge mit $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $2,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ höher als empfohlen gewählt und die Durchflusszeiten betragen nur 0,8 bis 1 min. Die erreichten Abscheidegrade der Korngrößen $\geq 0,2$ mm lagen zwischen 92,5% und 97,4 %. Dies deutet darauf hin, dass sowohl der grobe Sand, insbesondere der enthaltene Anteil der Korngrößen $\geq 1,0$ mm von noch 40 %, als auch die hohe Sandkonzentration hier einen positiven Einfluss auf den Abscheidegrad haben.

Korngrößenverteilung

Um den Einfluss der Korngrößenverteilung genauer zu untersuchen wurden eigene Messungen zum Abscheidegrad bei verschiedenen Korngrößenverteilungen durchgeführt. Wie bereits nach den Messungen an den großtechnischen Sandfängen und nach den Literaturergebnissen von Patt (1990) und Schrimpf (1987) vermutet, konnte der Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad durch die eigenen Messungen bestätigt werden. Während beim groben Sand 1 bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ein Gesamtabscheidegrad von 87 % und ein Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 87,8 % erreicht werden konnte, wurde bei dem feineren Sand 3 ein Gesamtabscheidegrad von nur 69,6 % und ein Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 79,9% erreicht. Patt (1990) führte Versuche mit Sanden mit verschiedenen Korngrößenverteilungen durch, und stellte einen abnehmenden Gesamtabscheidegrad bei feinerer Korngröße fest. Er gab allerdings keine Sieblinie an, sondern nur einen Bereich der Korngrößenverteilung. Die gemessenen Werte für die Gesamtabscheidegrade betragen bei einem feinen Sand mit den Korngrößen 0,06 mm bis 0,2 mm ohne Belüftung 80 %. Bei einem gröberen Sand mit den Korngrößen 0,1 mm bis 0,4 mm betrug der Gesamtabscheidegrad mit einer Belüftung von $1,6 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ 75 %. Der Sand von Schrimpf (1987) hat eine ähnliche Korngrößenverteilung, wie der von Patt (1990) verwendete. Er erreichte bei einem Versuch ohne Belüftung einen Gesamtabscheidegrad von 98 %.

Diese unterschiedlichen Ergebnisse für die Abscheidegrade verdeutlichen, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur bei der Verwendung von gleichem Prüfsand erreicht werden kann. Dabei reicht es nicht aus, eine Breite der Korngrößenverteilung, wie z. B. 0,06 bis 0,2 mm anzugeben, sondern es muss genau quantifiziert werden, welche Korngröße zu wie viel Prozent enthalten ist. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist es deshalb wichtig, eine Sieblinie anzugeben.

Aus diesen Ergebnissen folgt, dass der Abscheidegrad als Beurteilungsparameter für belüftete Sandfänge unzureichend ist, da insbesondere bei geringen

Konzentrationen im Zulauf des Sandfanges geringe Abscheidegrade erzielt werden, obwohl die absoluten Ablaufkonzentrationen sehr gering sind. Nachteilig am Parameter Abscheidegrad ist auch, dass er theoretisch durch die Wiederfindungsrate größerer Teilchen positiv beeinflusst wird. Dies kann am Beispiel eines sehr großen Steins im Zulauf deutlich gemacht werden. Wenn dieser Stein in der Sandfanggutrinne wiedergefunden wird, wird dadurch automatisch ein guter Abscheidegrad erreicht und kleinere Körner fallen Massenproportional nicht mehr ins Gewicht. Ein derartiger Effekt kann auch durch Verwendung eines Prüfsandes mit einem hohem Anteil der Korngrößen ≥ 1 mm erreicht werden.

Als Alternative kommt die Festlegung einer kritischen Ablaufkonzentration in Frage. Problematisch ist dabei allerdings, dass hierfür von Kläranlagenbetreibern und Anlagenbauern keine Aussagen zu gewinnen waren. Die Resonanz auf eine Anfrage im Arbeitsbericht blieb aus (DWA, 2008). Dies liegt sicher auch an der Schwierigkeit der Festlegung dieses Wertes.

Turbulente kinetische Energie

Bei großtechnischen Messungen ist es schwer, die Einflüsse einzelner Parameter isoliert zu betrachten. So hat Londong (1987) zwar den qualitativen Abscheidegrad von 12 Sandfängen durch Analyse des Sandfanggutes zusammen mit dem Turbulenzgrad gemessen, es konnte aber keine Abhängigkeit dieser beiden Parameter gefunden werden, da die Belastungsparameter der einzelnen Anlagen deutlich unterschiedlich waren. Da der Turbulenzgrad nur an einer Stelle und nicht, wie bei den in dieser Arbeit durchgeführten Messungen, als Mittelwert über den ganzen Sandfang ausgewertet wurde, ergaben sich auch größere Schwankungsbreiten der Ergebnisse.

In der Literatur wurde bisher noch nicht die Abhängigkeit des Abscheidegrades von der turbulenten kinetischen Energie in belüfteten Sandfängen untersucht. Im Hinblick auf eine Betrachtung der Absetzwege der Partikel lag die Vermutung nahe, dass es einen Unterschied macht, ob die turbulente kinetische Energie durch eine Durchflusserhöhung oder eine Erhöhung des Lufteintrages bzw. der Einblastiefe verursacht wird. Mit Abbildung 154 kann dies aber widerlegt werden. Bei den vorliegenden Messungen ergab sich ein linearer Zusammenhang zwischen den Parametern Lufteintrag, Durchfluss und Einblastiefe und der turbulenten kinetischen Energie. Zusätzlich konnte bewiesen werden, dass der Abscheidegrad linear von der turbulenten kinetischen Energie abhängt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Veränderung der turbulenten kinetischen Energie durch den Lufteintrag, den Durchfluss, oder die Einblastiefe verursacht wird. Dieser Zusammenhang ist entscheidend für den Betrieb von belüfteten Sandfängen, weil sich damit durch gezielte Senkung der turbulenten kinetischen Energie der Abscheidegrad verbessern lässt.

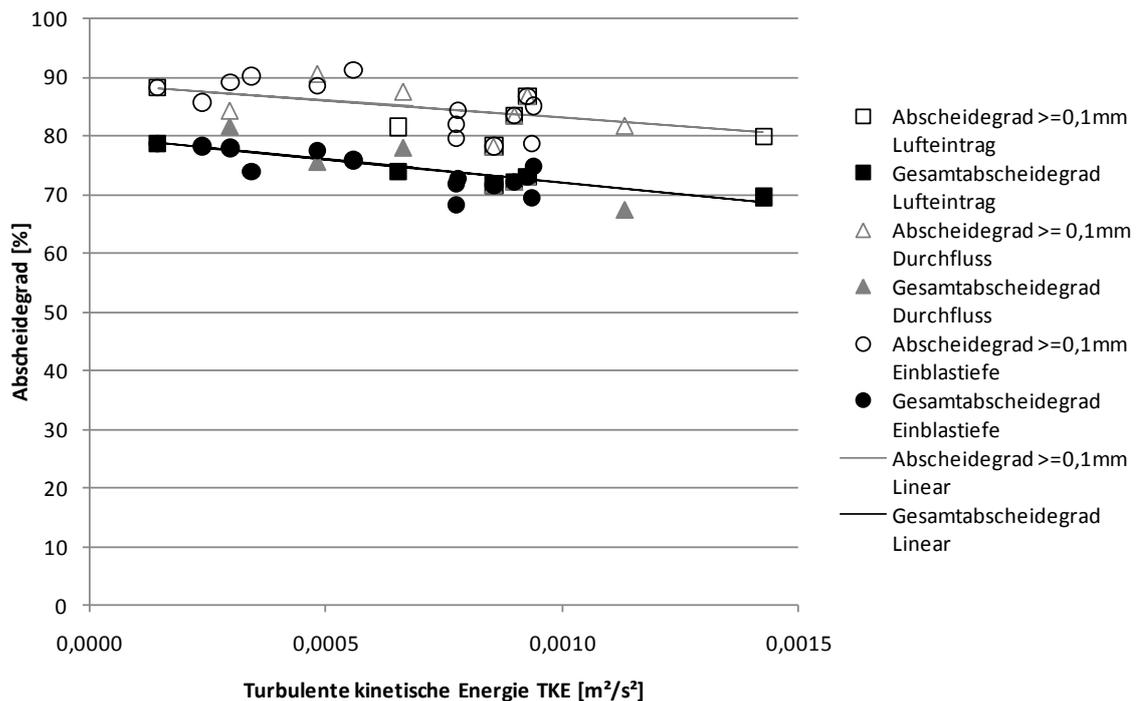


Abbildung 154: Einfluss der turbulenten kinetischen Energie im physikalischen Sandfangmodell auf den Abscheidegrad.

Die in Abbildung 154 dargestellten Zusammenhänge sollen im Folgenden anhand von Messergebnissen am physikalischen Sandfangmodell kurz erläutert werden.

Lufteintrag

In den Messungen zum Abscheidegrad am physikalischen Sandfangmodell besteht eine lineare Abhängigkeit zwischen Lufteintrag, der dadurch verursachten turbulenten kinetischen Energie und Abscheidegrad. Im Versuch ohne Belüftung konnte der beste Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm des Sandes 3 von 88 % und ein Gesamtabscheidegrad von 78,3 % erreicht werden. Bei steigendem Lufteintrag nahm der Abscheidegrad linear ab. Bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ betrug der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm nur noch 79,9 % und der Gesamtabscheidegrad 69,6 %. Patt (1990) hat ähnliche Ergebnisse erzielt. Bei seinem Versuch ohne Belüftung betrug der Gesamtabscheidegrad allerdings 90 %. Bei einer Belüftung von $1,26 \text{ Nm}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$ sank dieser bis auf 88 % ab. Ein Grund für den besseren Gesamtabscheidegrad ist die Korngrößenverteilung der verwendeten Versuchssande. Wie die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen ergeben haben, ist der Abscheidegrad stark von der Korngrößenverteilung abhängig. Der von Patt (1990) verwendete Versuchssand (Abbildung 35) hat einen Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm von nur 17 % gegenüber 55,4 % bis 72 % bei den in dieser Arbeit verwendeten Versuchssanden. Der Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm beträgt bei Patt (1990) 0 % gegenüber 7,9 % bis 35 % bei den in dieser Arbeit verwendeten Versuchssanden.

Einblastiefe

In der Literatur wurde zwar die Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung von der Einblastiefe dargestellt, aber keine direkte Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Einblastiefe und der daraus induzierten turbulenten kinetischen Energie. Bei den Messungen von Londong (1987) hatte die Einblastiefe nur geringen Einfluss auf den Turbulenzgrad. Ein Optimum des Turbulenzgrads ließ sich bei ihm bei einer Einblastiefe von $0,58 \cdot h_{SF}$ erreichen. Bei den eigenen Messungen ergab sich eine lineare Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Einblastiefe und der turbulenten kinetischen Energie. Der beste Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von 91,1 % wurde bei einer Einblastiefe von 0,31 m erreicht, gegenüber 78,2 % bei einer Einblastiefe von 0,55 m. Die entsprechenden Gesamtabscheidegrade betragen 77,6 % bei einer Einblastiefe von 0,31 m und 69,5 % bei einer Einblastiefe von 0,62 m. Bei der geringsten Einblastiefe von 0,21 m waren die Abscheidegrade mit 90,2 % und 74,0 % geringfügig niedriger. Hier wären noch weitere Messungen notwendig, um zu überprüfen, ob es sich hier um eine zufällige Abweichung handelt, oder ob bei zu geringer Einblastiefe der Abscheidegrad stagniert. Es handelt sich hier aber um eine sehr geringe Einblastiefe, die energetisch nicht sinnvoll ist, deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit keine nähere Untersuchung dieses Sachverhalts unternommen.

Durchfluss

Wenige Messungen in der Literatur beschäftigten sich bisher mit der Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Durchflusszeit. Stein (1992) hat anhand von Messungen an großtechnischen Sandfängen festgestellt, dass bei Durchflusszeiten von weniger als 10 bis 15 Minuten, der Abscheidegrad deutlich abnimmt. Er wies allerdings schon darauf hin, dass eine Steigerung der Durchflusszeit auf 30 Minuten keine deutliche Steigerung des Abscheidegrades mehr mit sich bringt. Bei den eigenen Messungen konnte eine lineare Verbesserung des Abscheidegrades mit zunehmender Durchflusszeit und abnehmender turbulenter kinetischer Energie beobachtet werden. So betragen bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Durchflusszeit von 4,5 Minuten der Gesamtabscheidegrad von Sand 3 67,3 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm 81,7 %. Bei einer Vergrößerung dieser Durchflusszeit auf 16,7 Minuten verbesserten sich Gesamtabscheidegrad von Sand 3 auf 77,9 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm auf 87,5 %. Bei den Messungen fiel aber auch auf, dass sich der Abscheidegrad auf den letzten zwei Metern der Sandfanglänge nur noch geringfügig verbesserte. Die in der Literatur empfohlenen Werte für die Durchflusszeit wurden im Lauf der Jahre immer weiter nach unten korrigiert. So wurde von ATV (1998) noch eine Durchflusszeit von 20 Minuten bei hohen Anforderungen an den Sandrückhalt empfohlen. Seit 2008 wird stattdessen eine Durchflusszeit von > 5 Minuten empfohlen (DWA, 2008). Die amerikanische Literatur (Metcalf & Eddy, 2003) gibt Werte zwischen 2 und 5 Minuten vor. Die eigenen Messungen haben gezeigt, dass an großtechnischen Anlagen der geforderte Wert für den Abscheidegrad von 95 %, zumindest bei hohen Sandkonzentrationen,

eingehalten wird. Andererseits waren die Ablaufkonzentrationen bei den hohen Sandkonzentrationen deutlich höher, trotz besserem Abscheidegrad. Im physikalischen Sandfangmodell hat sich auch gezeigt, dass der Abscheidegrad auf den ersten 40 % des Sandfanges am höchsten war und dann nur noch um einige Prozent gesteigert werden konnte.

7.4 Prüfverfahren zum Abscheidegrad

Es wurden mehrere Prüfverfahren für den Abscheidegrad vorgestellt und eigene Messungen durchgeführt. Stein (1992) hat bei seinen Messungen einen Hydrozyklon zum Aufkonzentrieren des Sandes im Zu- und im Ablauf benutzt. Hydrozyklone haben eine sehr gute Trennwirkung, die bereits von Chasik & Burger (1964) untersucht wurde. Dennoch erlaubt die Aufkonzentrierung über einen längeren Zeitraum keine Aussage über einen Abscheidegrad, in Abhängigkeit von Durchflussschwankungen. Es ist auch unsicher, inwieweit der Hydrozyklon die Kornverteilung beeinflusst.

Ostermann (1966) hat bei seinen Messungen die Proben aus dem Zu- und Ablaufstrom von Tangentialsandfängen mit einem Heber entnommen. Aufgrund von sehr geringen Sandkonzentrationen bei Trockenwetter gab er Versuchssand zu, um eine Sandkonzentration von rund 100 mg/l zu erreichen. Bei Verwendung von zusätzlichem Versuchssand, ist keine Aussage über die ungestörte Kornverteilung des Abwassers mehr möglich. Der Abscheidegrad des Sandfanges hängt dann stark von der Kornverteilung des Prüfsandes ab.

Aufgrund von diesen Überlegungen wurde bei den eigenen Messungen eine Stichprobenentnahme mit Sammlung der Proben in 120 l Behältern durchgeführt, um Sandkonzentrationsganglinien im Zu- und im Ablauf der untersuchten Sandfänge zu erhalten. Die Sandkonzentrationen, insbesondere im Ablauf, waren teilweise sehr gering. Trotzdem konnte bei allen vier untersuchten Kläranlagen ein zeitabhängiger Verlauf der Sandkonzentrationen gemessen werden. Um die Ergebnisse zu verbessern, ist eine größere Anzahl von Probenahmegefäße im Zu- und im Ablauf zu empfehlen.

Bei der Kläranlage München I wurde, aufgrund der großen Volumenströme im Zu- und Ablauf des Sandfanges, auf eine Teilstromentnahme verzichtet und der Abscheidegrad qualitativ durch Untersuchung des Sandfangguts und des Schlammes aus dem Vorklärbecken beurteilt. Auch Londong (1987) hat auf diese Weise 15 großtechnische belüftete Sandfänge untersucht. Zwar konnte von ihm kein quantitativer Wert für den Abscheidegrad angegeben werden, doch konnte über den Anteil organischer Substanz im Sandfanggut und den Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm der Abscheidegrad zumindest mit „gut“ oder „schlecht“ beurteilt werden. Nachteilig sind hier allerdings die hohen Schwankungsbreiten beim Glühverlust des Sandfanggutes, so dass die Beurteilung erschwert wird. Für den Glühverlust von Sandfanggut wurden Schwankungsbreiten zwischen 5 % und 55 % (Kalbskopf, 1966; Roos, 1995) gefunden, für den Anteil der

Korngrößen $< 0,2$ mm Schwankungsbreiten zwischen 10 % und 35 %. (Abbildung 32).

Für die Festlegung einer Korngrößenverteilung und einer Sandkonzentration für Prüfsand müssen zunächst die Ergebnisse der vorliegenden Messungen an großtechnischen Anlagen betrachtet werden. Es gibt sehr wenige Literaturangaben über Sandkonzentrationen und Kornverteilungen im Zulauf von Kläranlagen. Häufiger sind Literaturangaben von Kornverteilungen von Sandfanggut, da diese einfacher zu bestimmen sind. Ostermann (1966) hat als Vorlage für seinen Prüfsand Sieblinien von Hartmann und Pöpel (1958) genutzt, die allerdings Sandfanggut untersucht hatten. Daher entstand zum Teil der Eindruck, dass in früheren Untersuchungen der Sand im Zulauf gröber war als in der heutigen Zeit.

Sowohl die Messungen von Stein (1992), als auch die in dieser Arbeit beschriebenen, weisen nahezu gleich hohe Anteile der Korngrößen $< 0,2$ mm von 65 % im Zulauf auf. Dieser hohe Feinkornanteil hat seine Ursache aber auch in der Untersuchungsmethode, bei der der Sand zuerst getrocknet und dann geglüht wird, so dass die Asche des organischen Materials den Feinkornanteil erhöht. Es besteht die Möglichkeit die Asche der geglühten Proben mit Schwefelsäure zu waschen (Ostermann, 1966), was aber auch wieder einen Eingriff darstellt, der das Ergebnis anderweitig verfälschen kann, so dass darauf hier verzichtet wurde. Bei Regenwetter ist der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm im Rohabwasser mit 30 % deutlich geringer als bei Trockenwetter. Im Ablaufbereich dagegen unterscheiden sich die Anteile der Korngrößen $< 0,2$ mm nur unwesentlich. Der Bereich reicht, je nach Abscheidegrad, von einem Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm von 70 % bis 90 %. Der Mittelwert aller Messungen von Stein (1992) weist dagegen einen deutlich höheren Anteil der Korngröße $< 0,2$ mm von 98 % auf, was auf einen guten Abscheidegrad der untersuchten Sandfänge hindeutet.

Die gemessenen Sandkonzentrationen bei Trockenwetter waren mit 13,7 mg/l bis 72,4 mg/l durchwegs sehr gering und stimmen sehr gut mit den in der Literatur gefundenen Werten überein (Tabelle 7). Bei Regenwetter betrug die im Mittel gemessene Sandkonzentration 284 mg/l. Es wurden aber Einzelwerte von 900 mg/l bis 1200 mg/l gemessen, was die große mögliche Schwankungsbreite verdeutlicht. In der Literatur sind Werte zwischen 400 mg/l (Stein, 1992) und 500 mg/l (Ostermann, 1966) angegeben. Diese große Bandbreite zeigt, dass es unmöglich ist, den Sandanfall bei Regenwetter vorherzusehen. Je nach Ablagerungen im Kanal, Länge der Trockenwetterperiode und Regendauer bzw. Regenintensität können die Werte zwischen unter 100 mg/l und 1.200 mg/l schwanken.

Sehr wichtig bei der Auswahl eines Versuchssandes ist die Begrenzung des Größtkorns, da die vorliegenden Messungen eine starke Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Korngrößenverteilung gezeigt haben. Durch einen hohen Anteil an großen Körnern kann ein guter Abscheidegrad erreicht werden. Hier scheint eine Begrenzung auf 0,5 mm bis maximal 1,0 mm sinnvoll. Da Schäden an der Kläranlage schon ab einer Korngröße von 0,2 mm entstehen (Brunner, 1971),

erscheint eine Verschiebung der Gewichtung des Abscheidegrades in Richtung größerer Körner, deren Abscheidung unproblematisch ist, nicht zielführend. Für den Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm, werden anhand der vorliegenden Messungen ca. 20 bis 70 % empfohlen. Die Abscheidung der Korngrößen $< 0,1$ mm wird im Moment nicht vorgeschrieben. Diesen Korngrößen werden positive Eigenschaften der Entwässerbarkeit des Schlammes zugeschrieben. Deshalb muss der Prüfsand keinen Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm enthalten. Ab der Korngrößen $< 0,063$ mm wird die Abscheidung aufgrund der schluffigen Eigenschaften des Materials problematisch. Diese Korngruppe sollte im Prüfsand möglichst nicht enthalten sein.

Schwierig ist die Festlegung der Sandkonzentration. Es konnte sowohl bei großtechnischen Messungen, als auch im physikalischen Sandfangmodell, gezeigt werden, dass eine große Sandkonzentration die Abscheideleistung verbessert. Folglich ist die Annahme falsch, dass stoßartiger Sandanfall der kritische Belastungszustand ist. Bei diesem Lastfall sind prozentual bessere Abscheidegrade zu erwarten. Nach DIN 12255-3 (2001) ist der maximale Sandanfall als maßgebender Belastungszustand vorgeschrieben. Aus der vorliegenden Arbeit geht allerdings hervor, dass der Abscheidegrad sich bei Sandkonzentrationen < 100 mg/l deutlich verringert. Zusätzlich führen so geringe Sandkonzentrationen im Zulauf zu sehr geringen Ablaufkonzentrationen, die für die Kläranlage unkritisch sind. Für die Prüfung von Sandfängen scheinen Konzentrationen im Bereich zwischen 200 mg/l und 500 mg/l sinnvoll. Um ein Leistungsspektrum des Sandfanges zu erhalten, wird die Prüfung zweier Lastfälle „Trockenwetter“, bei einer Sandkonzentration von 200 mg/l und Durchfluss bei Trockenwetter und „Regenwetter“, bei der Sandkonzentration von 500 mg/l und maximalem Durchfluss Q_{\max} empfohlen.

Die eigenen Messungen haben eine deutliche Verringerung des Abscheidegrades bei Verkürzung der Durchflusszeit gezeigt. Daraus folgt, dass der kritische Durchflusszustand Q_{\max} ist.

7.5 Betriebliche und konstruktive Aspekte

Durchflusszeit

Auffällig bei der Betrachtung der Sandfänge sind die hohen Durchflusszeiten, insbesondere bei Trockenwetter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich häufig um ältere Bauwerke handelt, die auf den damaligen Maximaldurchfluss bemessen wurden. Der Rückgang des Wasserverbrauchs in den letzten Jahrzehnten führt nun zu hohen Durchflusszeiten, teilweise im Stundenbereich bei Trockenwetter. Dies hat eine sehr gute Abscheideleistung insbesondere im Bezug auf Organik zur Folge, die eigentlich im Sandfang noch nicht gewollt ist, da die Organik dann bei der Denitrifikation fehlt.

Lufteintrag

Der tatsächliche Lufteintrag, der in belüftete Sandfänge eingetragen wird, ist oft zu hoch. Dies hat seine Ursache darin, dass für die Bemessung oft ein Wert im oberen Bereich der Empfehlungen der DWA (2008) gewählt wird und dann der Kompressor aus Sicherheitsgründen auch größer gewählt wird, so dass sich in Summe ein höherer Lufteintrag als empfohlen ergibt. Dies hat eine Verringerung der Abscheideleistung zur Folge. Bei den Messungen der Fließgeschwindigkeiten konnte gezeigt werden, dass ein zu hoher Lufteintrag beim Trapezquerschnitt zu einer Rückströmung im Walzenmittelpunkt und zu einer Vorwärtsströmung in der Sandfanggutterrinne führt, wodurch der Abscheidegrad negativ beeinflusst wird.

Der negative Einfluss des zu hohen Lufteintrags wird durch den positiven Einfluss der hohen Durchflusszeit teilweise kompensiert, was durch die Messungen gezeigt werden konnte. Im Hinblick auf Kosteneinsparung, sowohl bei den Investitionskosten für das Bauwerksvolumen, als auch bei den Betriebskosten für den Lufteintrag, ist dies aber nicht zielführend.

Bereichsweise Belüftung

Zur bereichsweisen Belüftung wurde eine eigene Messung, bei der die letzten vier von 10 Belüftern abgeschaltet wurden, durchgeführt. Die Messreihe wurde allerdings abgebrochen, da sich im unbelüfteten Bereich sehr starke Ablagerungen von Feinkorn bildeten. Deshalb wurde es als sinnvoller erachtet, die Belüftung insgesamt zu reduzieren und nicht in einem Bereich auszuschalten, da die Sohle vom Räumler nicht erfasst wird. Seyfried (1988) empfiehlt, die letzten 2 bis 3 m im belüfteten Sandfang unbelüftet zu lassen, Stein (1992) hat aber in seinen Messungen festgestellt, dass diese Maßnahme nur bei Sandfängen Wirkung zeigte, die bei gleichmäßiger Belüftung mit zu hohem Lufteintrag einen geringen Abscheidegrad aufwiesen. Schrimpf (1987) hat die Auswirkungen einer unterschiedlichen Belüftung in vier Segmenten eines kreisförmigen Modellsandfanges untersucht und hat das beste Ergebnis mit entlang des Fließwegs abnehmenden Lufteinträgen von $3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ zu $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ zu $0,19 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ zu $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erhalten. Das Ergebnis war eine Verbesserung des Abscheidegrades von nur 4 % gegenüber einer gleichmäßigen Belüftung mit $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Nachteilig ist der überdurchschnittlich hohe erforderliche Lufteintrag im ersten Segment. Dem ist ein geringerer Lufteintrag über die gesamte Sandfanglänge vorzuziehen, was zusätzlich noch eine Verringerung des Energieeintrages zur Folge hätte. Boes (1990) hat aus seinen Untersuchungen ein Optimum der Abscheideleistung, bei einem vorne zu hinten abnehmenden Lufteintrag im Verhältnis 2:1, festgestellt. Dies hat den Vorteil, dass die Bildung von Ablagerungen auf der Sohle verhindert wird.

Statt einer bereichsweisen Veränderung des Lufteintrages besteht die Möglichkeit, den Lufteintrag durchflussabhängig zu steuern und bei Trockenwetter zu steigern und bei Regenwetter zu reduzieren. Hierfür soll zunächst der Energieverbrauch von

Sandfängen betrachtet werden (Abbildung 155). Der Sandfang benötigt 6 % vom Energieverbrauch von Belebungsanlagen.

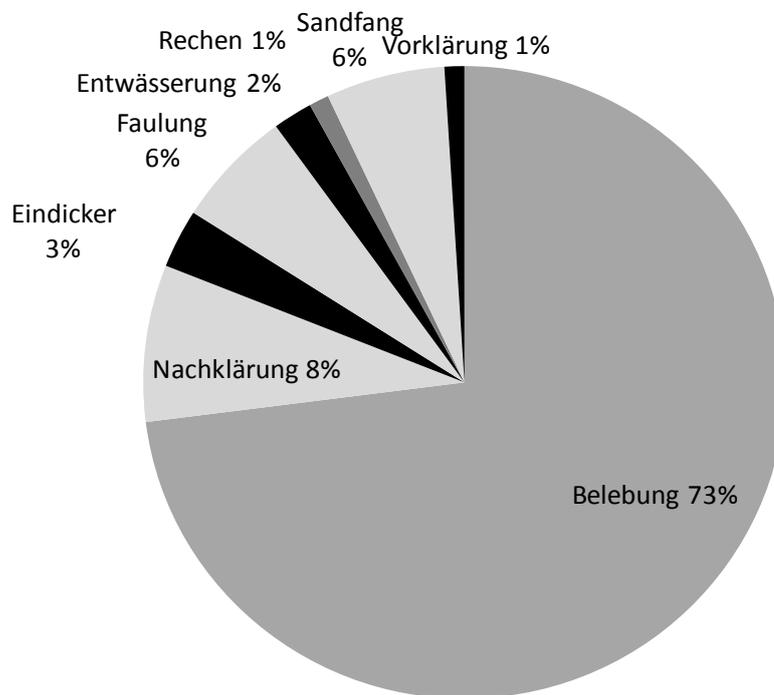


Abbildung 155: Anteile der einzelnen Verfahrensstufen am Energieverbrauch von Belebungsanlagen (nach Wagner und Loock, 2006; nach Bohn, 1997).

Der Stromverbrauch der Belüftung des Sandfanges hängt vom Lufteintrag und von der Einblastiefe ab. Je nach Volumen des Sandfanges beträgt der Stromverbrauch zwischen 1 und 5 kWh pro Betriebsstunde.

In Abbildung 156 sind die Kosten für die Belüftung des Sandfanges mit einem Volumen von 200 m³ in Abhängigkeit verschiedener Einblastiefen und Lufteinträgen dargestellt unter der Annahme von Kosten von 0,2 €/kWh. Es wird deutlich, dass Kosten linear mit der Einblastiefe ansteigen. Je größer der Lufteintrag ist, umso größer sind auch der Stromverbrauch und die daraus resultierenden Kosten.

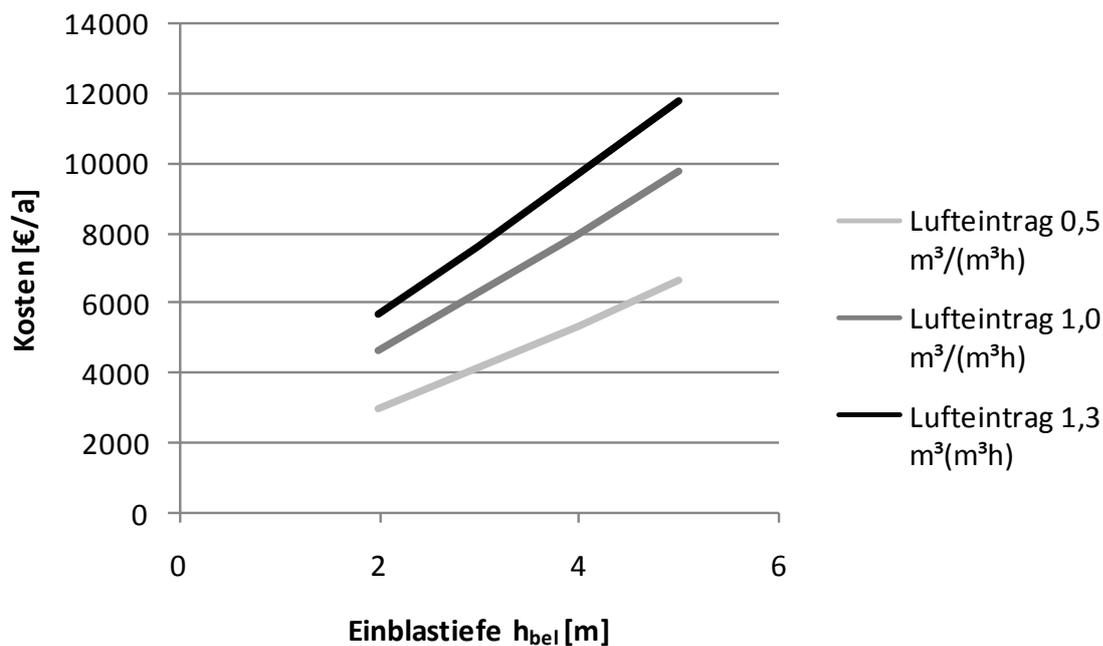


Abbildung 156: Kosten der Belüftung in €/a eines Sandfanges mit einem Volumen von $200 m^3$ in Abhängigkeit von der Einblastiefe und vom Lufteintrag.

Ziel dieser Überlegungen ist es, im Regenwetterfall die Belüftung abzuschalten bzw. zu reduzieren, da die Turbulenz schon durch den erhöhten Durchfluss erzeugt wird. Die Messungen in der vorliegenden Arbeit haben gezeigt dass der Abscheidegrad linear von der turbulenten kinetischen Energie abhängt und es keine Rolle spielt, ob diese Energie durch den Lufteintrag oder den Durchfluss verursacht wird. In Betriebstagebüchern wurde die Anzahl der Trockenwettertage ausgewertet, um die Zahl der Tage mit Regenwetterzufluss zu erhalten. In Tabelle 22 ist die Anzahl der Trockenwettertage pro Jahr für einige Kläranlagen in Bayern zusammengestellt. Im Mittel über die letzten 4 Jahre ergibt sich die Anzahl von 180 Trockenwettertagen pro Jahr, das sind knapp 50 %. Also kann davon ausgegangen werden, dass 50 % der Tage Regenwettertage sind. Für eine realistische Abschätzung soll davon ausgegangen, dass an 30 % der Tage eines Jahres die Belüftung abgeschaltet bzw. reduziert werden könnte.

Tabelle 22: Anzahl Trockenwettertage auf 7 Kläranlagen in Bayern mit Mittelwert.

Jahr	Holz- kirchen	Karlsfeld	Viech- tach	Berch- tesgaden	Starn- berg	Neu- finsing	Passau	Mittelwert
2005	-	183	159	150	-		208	175
2006	-	214	156	185	173		185	183
2007	121	184	-	180	152	174	-	162
2008	215	170	-	217	-	178	-	195

Eine Möglichkeit ist, die Belüftung bei Regenwetter auszuschalten. Das Einsparpotential wäre dann 33 % gegenüber einer kontinuierlichen Belüftung mit einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Gegen eine vollständige Abschaltung der Belüftung sprechen aber die Ablagerungen, die sich dann auf der Sohle bilden würden, sowie die zu erwartende schlechtere Fettabscheidung.

Daher wird hier eine Reduzierung des Lufteintrages bei Regenwetter empfohlen. Für einen Sandfang mit einem Volumen von 200 m^3 ergibt sich, bei einer Reduzierung des Lufteintrages von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ auf $0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ im Regenwetterfall, bei einer Einblastiefe von 3 m bereits ein Einsparpotential von 12 %, gegenüber einer kontinuierlichen Belüftung mit einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$.

Querschnittsgestaltung

Bei der Auswertung der Bauformen von 55 ausgeführten Sandfangquerschnitten fiel auf, dass 20 % einen rechteckigen Querschnitt ohne Sandfanggutrinne aufweisen. Bei dem Vergleich der Abscheidegrade des Rechteckquerschnitts und des Trapezquerschnitts konnten keine signifikanten Unterschiede herausgearbeitet werden. Der Abscheidegrad des Rechteckquerschnitts war sogar teilweise geringfügig besser, als der des Trapezquerschnitts. Durch Verwendung der gleichen zugegebenen Sandmassen für die Versuche an beiden Querschnitten, war allerdings die Sandkonzentration beim Rechteckquerschnitt mit $156,7 \text{ mg/l}$ höher, als die beim Trapezquerschnitt mit 125 mg/l , so dass der erreichte Abscheidegrad bei beiden als ungefähr gleich bewertet werden kann. Dies kann daran liegen, dass die erreichten Geschwindigkeiten beim eingestellten Lastfall zu klein waren, um Aufwirbelungen zu erreichen. Bei den Messungen mit einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ und einer Durchflusszeit von 7,14 Minuten, traten zwar beim Rechteckquerschnitt mit $0,08 \text{ m/s}$ höhere Sohlgeschwindigkeiten v_{Sohl} auf, als beim Trapezquerschnitt mit $0,04 \text{ m/s}$, dafür betrug die Fließgeschwindigkeiten in der Sandfanggutrinne beim Trapezquerschnitt $0,05 \text{ m/s}$. Die kritische Geschwindigkeit zum Sandtransport beträgt für die Korngröße $0,1 \text{ mm}$ $0,26 \text{ m/s}$ (Abbildung 29). Allerdings beträgt die kritische Geschwindigkeit zum Transport in der Schwebel, im Abstand $0,1 \text{ m}$ von der Sohle, für die Korngröße $0,1 \text{ mm}$ nur $0,03 \text{ m/s}$. Diese Geschwindigkeit wird in

beiden Fällen überschritten, so dass in beiden Fällen ein negativer Einfluss auf den Abscheidegrad vorliegt. Da sich beim Trapezquerschnitt das Sandfanggut in der Sandsammelrinne konzentriert und somit besser mit dem Räumler entfernt werden kann, überwiegen konstruktiv die Vorteile des Trapezquerschnitts.

8 Schlussfolgerungen und Bemessungshinweise

8.1 Prüfverfahren zum Abscheidegrad

Es wurden mehrere Prüfverfahren zum Abscheidegrad vorgestellt und für die Untersuchungen die Methode der Messung der Sandkonzentrationen im Zu- und im Ablauf von Sandfängen, ohne künstliche Sandzugabe, gewählt. Vorteil dieser Methode ist, dass neben einer quantitativen Aussage zum Abscheidegrad, auch eine Aussage über die Korngrößenverteilungen im Zu- und im Ablauf gewonnen werden kann. Wenn parallel zur Messung auch der Durchfluss protokolliert wird, können auch Durchflussschwankungen mit erfasst werden. Durch Verzicht auf eine zusätzliche Zugabe von Versuchssand, können positive Einflüsse einer höheren Sandkonzentration auf den Abscheidegrad ausgeschlossen werden. Nachteilig ist, dass es sich um Stichproben handelt. Für die Anwendung des Verfahrens wird ein längerer Versuchszeitraum, und verschiedene Lastfälle, möglichst bei Trockenwetter und bei Regenwetter, mit einem dichteren Abstand der Probenahmen empfohlen. Wenn möglich sollten größere Probenahmegefäße von bis zu 500 l eingesetzt werden. Der dichtere Abstand der Probenahmen kann durch die Verwendung mehrere Gefäße im Zu- und Ablauf des Sandfanges realisiert werden (Abbildung 157). Dann lässt sich eine durchflussabhängige Konzentrationsganglinie des Sandes im Zu- und im Ablauf des Sandfanges erstellen. Sinnvoll ist eine, um die Durchflusszeit versetzte, Probenahme im Zu- und im Ablauf. Für die Probenahme ist eine Tauchpumpe mit Freistromrad und freiem Durchgang von > 10 mm zu empfehlen, damit die Kornverteilung nicht beeinträchtigt wird.

Da der Sand sich in den Probenahmegefäßen sehr gut abgesetzt hat, ist das Verfahren der Sedimentation nach der Probenahme, der Verwendung von Hydrozyklonen zur Aufkonzentrierung vorzuziehen, da es einfacher und kostengünstiger ist. Das Überstandswasser kann nach einer Absetzzeit von ca. 30 Minuten vorsichtig dekantiert werden und die Proben getrocknet und gewogen werden. Für eine Aussage über den Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm genügt eine Siebung über ein Sieb mit der Maschenweite 0,2 mm. Grundsätzlich ist die Verwendung von zusätzlichem Prüfsand nur bei Sandgehalten im Abwasser von deutlich unter 100 mg/l zu empfehlen.

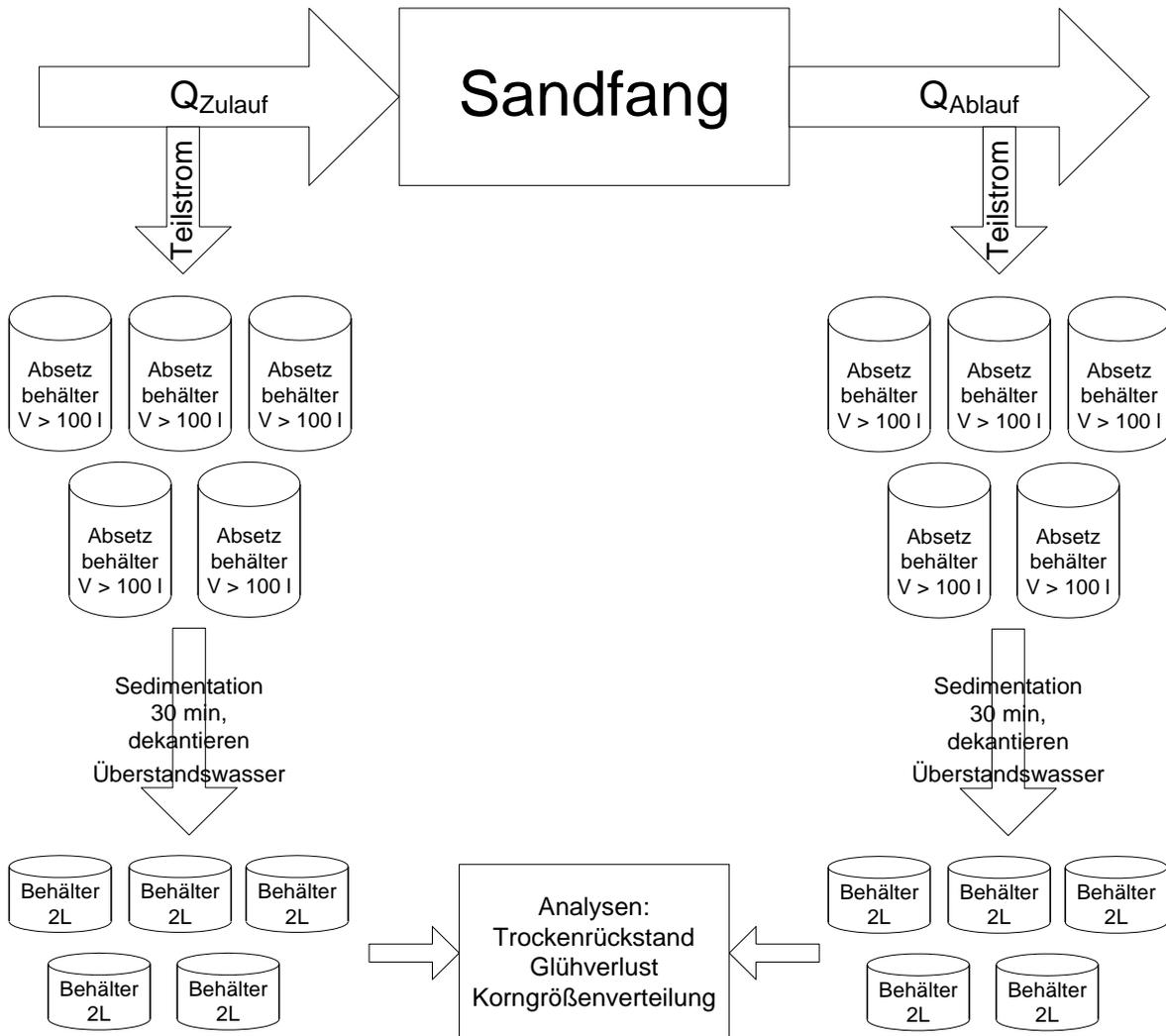


Abbildung 157: Vorschlag eines Prüfverfahrens für den Abscheidegrad von bestehenden Sandfängen.

Aus den Ergebnissen der Messungen der Sandkonzentrationen und Kornverteilungen im Zulauf von Sandfängen und den Ergebnissen der Messungen des Abscheidegrades in der vorliegenden Arbeit können Empfehlungen für zu verwendenden Prüfsand gewonnen werden. Die vorliegenden Messungen haben eine deutliche Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Korngrößenverteilung und von der Sandkonzentration gezeigt. In Abbildung 158 ist der Vorschlag eines Korngrößenbereichs für Prüfsand und ein Vorschlag für einen im Handel erhältlichen Prüfsand (Branner, 2005), der den Kriterien entspricht, dargestellt.

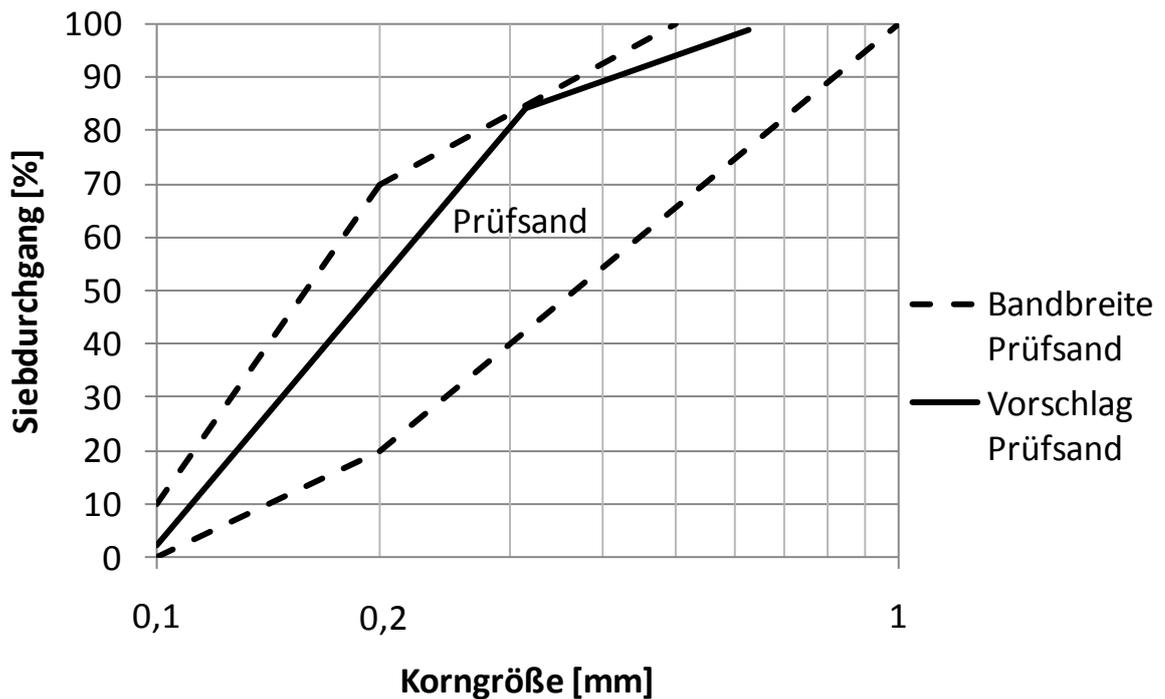


Abbildung 158: Vorschlag eines Korngrößenbereichs für Prüfsand verändert nach DWA (2008) und Vorschlag einer Sieblinie für Prüfsand.

Als maximale Korngröße des Prüfsandes sollte 1 mm gewählt werden, weil es zum einen nicht zielführend ist, die Gewichtung des Abscheidegrades in Richtung größerer Körner zu verschieben und zum anderen größere Körner nach Londong (1987) unkritisch sind, da sie sich ohnehin absetzen. Der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm wurde nach den vorliegenden Ergebnissen zwischen 20 bis 70 % gewählt. Der Prüfsand sollte keine Korngrößen $< 0,06$ mm enthalten, da diese Fraktion nicht mehr abgeschieden werden kann. Um die Breite der Verteilung einzuschränken, sollte die Ungleichförmigkeitszahl < 3 betragen. Sehr wichtig ist, die Sieblinie des Prüfsandes vor jeder Messung zu kontrollieren. Schon das Nachfüllen von Versuchssand kann zu einer Verschiebung der Sieblinie führen und die Vergleichbarkeit beeinträchtigen. Für die Sandkonzentration konnte gezeigt werden, dass Werte unter 100 mg/l zu sehr niedrigen Konzentrationen im Sandfangablauf führen, was als unkritisch für die nachfolgenden Stufen zu werten ist. Deshalb wird als Zugabekonzentration von Prüfsand der Bereich 200 mg/l bis 500 mg/l empfohlen. Als Zugabezeitraum sollte mindestens die Dauer einer Durchflusszeit gewählt werden. Um zuverlässige Massenbilanzen erstellen zu können, empfiehlt sich je nach Größe der Anlage, die Zugabe von mindestens 1 kg Versuchssand. Die Dauer der Zugabe ergibt sich dann aus gewählter Zugabekonzentration und Zuflussvolumenstrom. Als Zuflussvolumenstrom muss der maximale Regenwetterzufluss genommen werden, weil dies den kritischen Fall darstellt.

Für die Erstellung eines Leistungsspektrums des Sandfanges wird die Prüfung zweier Lastfälle „Trockenwetter“, bei einer Sandkonzentration von 200 mg/l mit Durchfluss bei Trockenwetter und „Regenwetter“, bei der Sandkonzentration von 500 mg/l mit maximalem Durchfluss Q_{\max} empfohlen.

Als Prüfverfahren für Kompaktanlagen wird das in Abbildung 159 dargestellte Vorgehen empfohlen. Der Prüfsand wird mit der oben beschriebenen Konzentration und Korngrößenverteilung dem Zulauf an Klarwasser zudosiert, um den Abscheidegrad aus Massenbilanzen des zugegebenen Sandes und des abgeschiedenen Sandes zu berechnen.

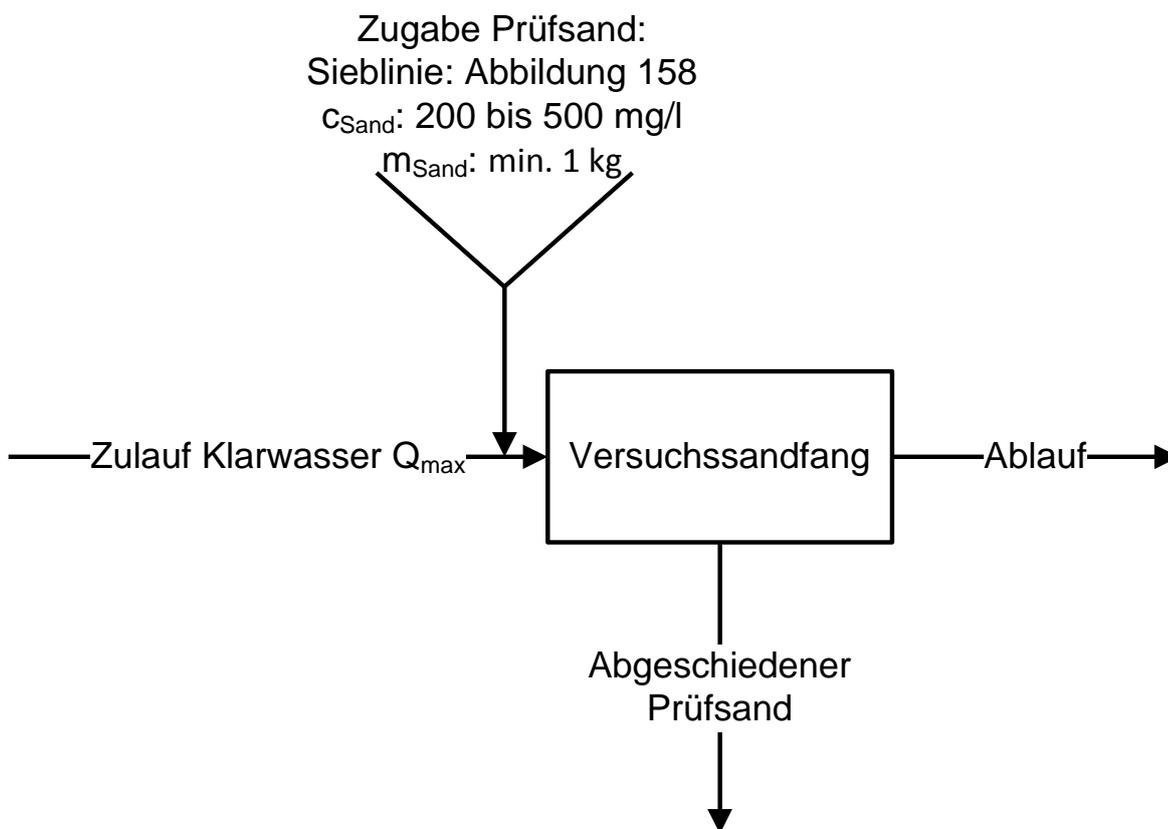


Abbildung 159: Prinzipskizze eines Prüfverfahrens zur Messung des Abscheidegrades von Kompaktanlagen.

8.2 Betriebliche und konstruktive Aspekte

Die Wahl des richtigen Lufteintrages hat eine entscheidende Bedeutung bei der Bemessung von Sandfängen. Es gibt viele Argumente, die für einen möglichst niedrigen Lufteintrag sprechen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei steigendem Lufteintrag eine Rückströmung in Sandfangmitte und bei Vorhandensein einer Sandfanggutrinne auch eine starke Vorwärtsströmung in der Rinne auftritt. Dies sind genau die Bereiche, in denen die Sekundärströmungen nahe Null sind. Besonders die Vorwärtsströmung in der Sandfanggutrinne kann bei Überschreitung der kritischen Geschwindigkeiten zu Aufwirbelung des

Sandfanggutes führen. Ferner tritt bei zunehmendem Lufteintrag ein Abbau von organischer Substanz ein, die später dann bei der Denitrifikation und bei der biologischen Phosphorelimination fehlt.

Besonders aber aus energetischer Hinsicht ist ein niedriger Lufteintrag vorteilhaft. So kann bei einem Sandfang von 200 m³ Volumen und einer Einblastiefe von 2 m der Jahresstromverbrauch bei einem Lufteintrag von 0,5 Nm³/(m³·h), gegenüber einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), halbiert werden. Schon sehr geringe Lufteinträge reichen zur Ausbildung der Walzenströmung aus. Ein gewisser Lufteintrag ist allerdings zur Fettabscheidung notwendig. Aufgrund dieser Feststellungen wird empfohlen, die Bemessungswerte für den Lufteintrag in Anlehnung an Seyfried (1994) und Obenaus et al. (1998) auf den Bereich 0,1 Nm³/(m³·h) bis 0,5 Nm³/(m³·h) zu verringern, mit dem Hinweis, dass im Hinblick auf weitergehende Denitrifikation und Phosphorelimination, sowie Energieeinsparungen, ein Lufteintrag im unteren Bereich des Spektrums vorzuziehen ist.

Die Messreihe mit den 6 vorderen von 10 Belüftern wurde trotz des besseren erreichbaren Abscheidegrades abgebrochen, da sich deutliche Ablagerungen von Feinkorn gebildet hatten. Dieses Feinkorn hatte sich im physikalischen Sandfangmodell, insbesondere im unbelüfteten Bereich, auf der Sohle abgelagert. Um diese Ablagerungen zu vermeiden, müsste der Energieeintrag im belüfteten Bereich erhöht werden, was wieder einen erhöhten Energieverbrauch zur Folge hätte. Der von der DWA (2008) empfohlene Trapezquerschnitt ist wegen der Bildung von Ablagerungen auf der Sohle für eine bereichsweise Belüftung nicht geeignet. Bei einem Rechteckquerschnitt, bei dem der Räumler den ganzen Boden erfasst, wie beispielsweise bei der Kläranlage München I, wäre dies möglich. Grundsätzlich ist aber die Wahl eines gleichmäßigen, dafür geringeren Lufteintrages vorzuziehen.

Die Messungen haben gezeigt, dass mit zunehmender Einblastiefe die turbulente kinetische Energie im Sandfang und die Randgeschwindigkeit der Wasserwalze ansteigen. Zur Erreichung der gleichen Turbulenz ist bei größerer Einblastiefe weniger Luft nötig. Allerdings steigt der Energiebedarf mit der Einblastiefe. Diese Faktoren relativieren sich. Im Hinblick auf die Ausbildung der Walzenströmung wird hier empfohlen die von der DWA (2008) vorgeschlagene Einblastiefe von h_{SF} -0,3 m nicht zu unterschreiten. Besonders im Hinblick auf die oben empfohlene Reduzierung der Luftmenge, ist diese Einblastiefe zur Erzeugung der nötigen Turbulenz notwendig.

Es ist gelungen, eine direkte Abhängigkeit der turbulenten kinetischen Energie von Lufteintrag, Durchfluss und Einblastiefe herzustellen. Der Zusammenhang ist in Abbildung 160 dargestellt.

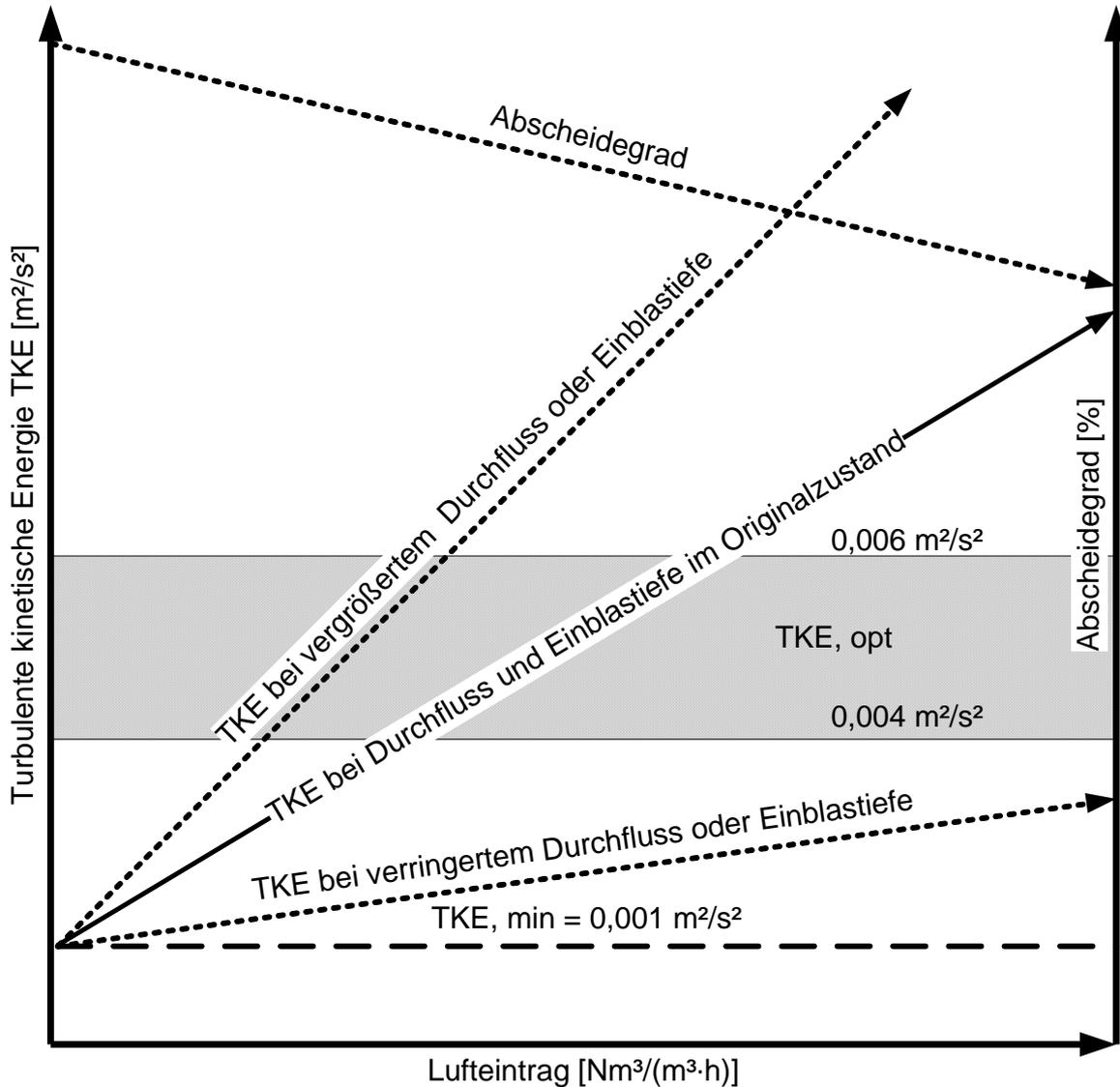


Abbildung 160: Darstellung der turbulenten kinetischen Energie in Abhängigkeit vom Lufteintrag bei unterschiedlichen Durchflüssen und Einblastiefen.

Die Untersuchungen am physikalischen Sandfangmodell haben ergeben, dass die erreichten Abscheidegrade indirekt proportional von der turbulenten kinetischen Energie abhängen. Nun muss noch ein quantitativer Grenzwert für die turbulente kinetische Energie, zur Erreichung des geforderten Abscheidegrades gefunden werden. Im physikalischen Sandfangmodell war der mittlere erreichbare Wert für die minimale turbulente kinetische Energie $0,00024 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Dies entspricht bei einem Maßstab 1:4 einem Wert von $0,001 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei großtechnischen Anlagen. Im Modellversuch wurde bei minimaler turbulenter kinetischer Energie ein Abscheidegrad von 92 % der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$, die der verkleinerten Trennkorngröße von $0,2 \text{ mm}$ entspricht, erreicht. Das bedeutet, dass der geforderte Abscheidegrad von 95 % nicht erreicht wurde. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Ergebnisse der Messungen der Abscheidegrade aus

halbtechnischen Untersuchungen nur tendenziell auf großtechnische Anlagen übertragen werden können. Aufgrund der Annahmen bei der Verkleinerung des Korndurchmessers bei den verwendeten Versuchssanden, können absolute Werte nur schwer übertragen werden. Eine vollständige Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell ist nicht möglich, da Froudsche und Reynoldsche Ähnlichkeit nicht gleichzeitig in einem Modell hergestellt werden können. Um einen Wertebereich für die turbulente kinetische Energie empfehlen zu können, sollen deshalb die Ergebnisse der großtechnischen Messungen herangezogen werden. Bei den Messungen auf der Kläranlage München I war, bei einer turbulenten kinetischen Energie von unter $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$, der Glühverlust im Sandfanggut mit 77 % sehr hoch. Dieser hohe Glühverlust konnte durch Anbringen von zusätzlichen Belüftern im Zulaufbereich und somit Steigerung der turbulenten kinetischen Energie auf über $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$, auf 41 % bis 65 % verringert werden. Bei der Kläranlage Karlsfeld war die turbulente kinetische Energie im Zulaufbereich mit $0,0065 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bis $0,01 \text{ m}^2/\text{s}^2$ sehr hoch, erst im hinteren Teil des Sandfanges nahm diese auf $0,003 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bis $0,0055 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ab. Dies geht einher mit einem geringen Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2 \text{ mm}$ von 57,9 %. Aus diesen Ergebnissen lässt sich eine Empfehlung für einen optimalen Bereich der turbulenten kinetischen Energie zwischen $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und $0,006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ geben. Dieser Bereich muss aber noch durch weitere großtechnische Messungen bzw. numerische Simulationen bestätigt werden.

Des Weiteren ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Ein zu hoher Abscheidegrad an organischem Material (GV des Sandfangguts $> 50 \%$) und an Feinkorn (Anteil der Korngrößen $< 0,2 \text{ mm}$ im Sandfanggut $> 30 \%$) kann durch Vergrößerung der Einblastiefe auf maximal $h_{\text{SF}} - 0,3 \text{ m}$ oder Erhöhung des Lufteintrags auf maximal $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ vermindert werden.
- Ein zu geringer Abscheidegrad an Sand ($\eta_{\text{T}} < 95 \%$) kann durch Verringerung der Einblastiefe auf minimal $h_{\text{SF}}/2$ oder Verringerung des Lufteintrags auf minimal $0,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ verbessert werden.
- Eine zu hohe turbulente kinetische Energie von über $0,006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ bei Regenwetterdurchfluss kann durch Verringerung der Luftzufuhr auf minimal $0,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ vermindert werden.

Von den dargestellten Parametern ist der Lufteintrag direkt steuerbar. Die Veränderung der Einblastiefe kann nur durch einen baulichen Eingriff erfolgen, indem die Belüfterrohre höher oder tiefer angeordnet werden. Daraus folgt, dass eine kurzfristige Steuerung nur über den Lufteintrag erfolgen kann. Der Durchfluss ist bei kleinen Kläranlagen als vorgegeben anzusehen. Bei Kläranlagen, die über mehrere parallele Sandfänge verfügen, besteht die Möglichkeit den Durchfluss durch Absperren einzelner Sandfänge zu erhöhen.

Energieeinsparpotential bietet eine durchflussabhängige Steuerung des Lufteintrages. Ein Ergebnis der Messungen ist eine gesteigerte turbulente kinetische Energie, bei höheren Durchflüssen. Daher kann bei Regenwetter, durch

Reduzierung der Belüftung, Energie gespart werden. Dies kann in der Praxis durch Anbringen eines Frequenzumrichters an den Kompressor realisiert werden. Wenn der Kompressor nicht regelbar ist, besteht die Möglichkeit, bei Regenwetter den Lufteintrag abzuschalten. Ablagerungen, die sich dann auf der Sohle bilden, werden beim Wiedereinschalten der Belüftung abgetragen. Diese Betriebsweise geht allerdings auf Kosten der Fettabcheidung, die ohne Lufteintrag beeinträchtigt wird. Bei Neuplanungen ist auf jeden Fall auf einen regelbaren Lufteintrag zu achten, damit während des Betriebes der Abscheidegrad optimiert werden kann. Dies wurde schon von Seyfried (1988) empfohlen.

Aus den Untersuchungsergebnissen geht hervor, dass größere Luftblasen, bei gleichem Lufteintrag, eine höhere Turbulenz erzeugen und sich die Randgeschwindigkeit der Walzenströmung nur unwesentlich verändert. Bei zu großen Blasen jedoch funktioniert die Umsetzung der Aufstiegs geschwindigkeit in Bewegungsenergie der Walzenströmung nicht mehr. Dies wird deutlich an den geringeren Oberflächengeschwindigkeiten, bei den nur 80 verwendeten Düsen bei den Untersuchungen. Da bei belüfteten Sandfängen die Turbulenz zur Verhinderung der Abscheidung organischer Substanz sehr wichtig ist, ist eine mittelblasige Belüftung mit einem Düsendurchmesser d_D im Bereich 0,3 mm bis 3 mm, gleichmäßig über den Querschnitt, zu empfehlen. Gegenüber feinblasiger Belüftung hat eine mittelblasige Belüftung auch den betrieblichen Vorteil, dass die Belüfter nicht so leicht verstopfen, weil die Austrittsgeschwindigkeit an den einzelnen Düsen größer ist.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass das Anordnen einer Sandfanggutrinne zwar zu kleineren Sekundärgeschwindigkeiten im Sohlbereich führt, aber insbesondere bei hohem Lufteintrag hohe Fließgeschwindigkeiten in Sandfanglängsrichtung auftreten können. Nachteilig ist auch, dass sich auf der Sohle Ablagerungen bilden können. Vorteil der Anordnung einer Sandfanggutrinne ist, dass sich das Sandfanggut an einer Stelle konzentriert und der Räumler kleiner gewählt werden kann als beim Rechteckquerschnitt, bei dem der ganze Boden geräumt werden muss. Für die Bemessung wird die Beibehaltung des Trapezquerschnittes (DWA, 2008) mit geringerem Lufteintrag empfohlen, um das Auftreten großer Fließgeschwindigkeiten in der Sandfanggutrinne zu vermeiden.

Wie schon Stein (1992) festgestellt hat, ist eine Einleitung des Abwassers nahe der Wasseroberfläche günstig für die Sedimentation, da die Sandteilchen direkt auf eine äußere Umlaufbahn geschickt werden. Dies wird auch durch die Simulationsrechnungen am Beispiel des physikalischen Sandfangmodells bestätigt. Während eine Zugabe an der Wasseroberfläche zur Sedimentation führt, gelangen die Sandteilchen bei einer Zugabe in Sandfangmitte auf eine spiralförmige Bahn und setzen sich nicht mehr ab. Bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ sedimentieren in der Modellrechnung die Teilchen mit den Durchmessern 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm, bei einer Zugabe an der Sandfangoberfläche, unmittelbar im Zulaufbereich, während sich bei einer Zugabe im Walzenmittelpunkt nur noch die Teilchen mit einem Durchmesser von 0,2 mm dort absetzen. Die kleineren Teilchen

bleiben bis zum Ablauf in Schwebe. Bei kleinen Luftmengen führt dies auch bei kleinen Teilchen sogar zu einer früheren Sedimentation als ohne Lufteintrag. Dieses Ergebnis konnte auch durch die Messungen am physikalischen Sandfangmodell bestätigt werden. Im großtechnischen Versuch kamen Hartmann & Pöpel (1958) auf ein ähnliches Ergebnis. Sie konnten auf der Kläranlage Heilbronn aufgrund des Neubaus eines belüfteten Sandfanges neben einem bestehenden Langsandfang vergleichende Untersuchungen durchführen und kamen zu dem Ergebnis, dass die zurückgehaltenen Sande im belüfteten Sandfang bei einem Lufteintrag von umgerechnet $0,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ deutlich feiner waren, als im Langsandfang ohne Lufteintrag.

Der Abzug des Abwassers sollte aus der Mitte der Wasserwalze erfolgen, da sich kleinere Teilchen und organische Substanz in der Mitte der Wasserwalze konzentrieren, während größere Teilchen an den Rand der Wasserwalze bewegt werden. Als Ablaufkonstruktion wird eine Dükerleitung auf Höhe des Walzenmittelpunkts empfohlen mit freiem Auslauf ins Unterwasser. Eine beispielhafte Berechnung erfolgt im Kapitel 0.

Wichtig ist die Wahl eines günstigen Breite/Tiefe-Verhältnisses von 0,8 (DWA, 2008), da dadurch die Walzenströmung optimiert werden und somit Energie gespart werden kann.

Da die letzten 20 % des Sandfanges den Abscheidegrad nur unwesentlich verbessern, sollte überlegt werden, ob nicht für zukünftige Bemessungen die Vorgabe von Gieseke & Mosonyi (1997) eingehalten werden sollte, dass eine Länge von mindestens der achtfachen Breite ausreichend ist.

9 Berechnungsbeispiel

Für einen belüfteten Sandfang wird ein Bemessungsbeispiel mit folgenden Ausgangsdaten dargestellt:

$$\text{Trockenwetterzufluß } Q_{\text{tx}} = 500 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Regenwetterzufluß } Q_m = 1.000 \text{ m}^3/\text{h}$$

9.1 Bemessung nach den vorliegenden Ergebnissen

Die grundsätzlichen geometrischen Abmessungen wurden nach DWA (2008) gewählt. Im ersten Beispiel wird aber dann der Lufteintrag kleiner gewählt und im zweiten Beispiel die Sandfanglänge.

$$\text{Durchflusszeit } t_R = 6 \text{ min}$$

$$\text{Erforderliches Volumen } V = \frac{Q_m}{t_R} = 100 \text{ m}^3$$

Mit der empfohlenen Maximalgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung u von 0,2 m/s nach Tabelle 1 ergibt sich:

$$\text{Erforderliche Fläche } A_{\text{SF}} \geq \frac{Q_m}{u} = 1,4 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Fläche } A_{\text{SF}} = 4,0 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Länge } L_{\text{SF}} = \frac{V_{\text{SF}}}{A_{\text{SF}}} = 25 \text{ m}$$

$$\text{Gewähltes Breite/Tiefe-Verhältnis } \frac{b_{\text{SF}}}{h_{\text{SF}}} = 0,8$$

$$\text{Gewählte Sohlquerneigung der Fettfangkammer } \alpha = 45^\circ$$

$$\text{Gewähltes Verhältnis Rinnenbreite oben/Sandfangbreite } \frac{b_R}{b_{\text{SF}}} = 0,2$$

$$\text{Sandfangbreite: } b_{\text{SF}} = - \frac{\sqrt{\left(-\frac{4}{\frac{b_{\text{SF}}}{h_{\text{SF}}} + 2 \cdot \tan \alpha} - 4 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{\text{SF}}} + 2 \cdot \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{\text{SF}}} \right)^2 \right) \cdot A_{\text{SF}}}}{-\frac{2}{\frac{b_{\text{SF}}}{h_{\text{SF}}} + \tan \alpha} - 2 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{\text{SF}}} + \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{\text{SF}}} \right)^2}} = 2,1 \text{ m}$$

$$\text{Sandfangtiefe: } h_{\text{SF}} = \frac{b_{\text{SF}}}{0,8} = 2,6 \text{ m}$$

$$\text{Rinnenbreite } b_R = 0,2 \cdot b_{\text{SF}} = 0,4 \text{ m}$$

$$\text{Einblastiefe: } h_{\text{bel}} = h_{\text{SF}} - 0,3 \text{ m} = 2,3 \text{ m}$$

$$\text{Lufteintrag } q_{LV} = 0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

$$\text{Vorhandene Sandfangfläche } A = b_{SF} \cdot h_{SF} - \frac{(b_{SF} - b_R)^2 \cdot \tan \alpha}{2} = 4 \text{ m}^2$$

$$\text{Fließgeschwindigkeit } u \text{ in Sandfanglängsrichtung } \frac{Q_m}{A_{SF}} = 0,07 \text{ m/s}$$

Abschätzung der Randgeschwindigkeit der Wasserwalze:

$$v_{\max} \text{ nach Gleichungen (26) und (71)} = 0,22 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Sohl}} \text{ nach Gleichung (74) an der Stelle } z = H - 2 \cdot z_{MP} = -0,07 \text{ m/s}$$

$$\text{Mittlere Randgeschwindigkeit } \frac{v_{\max} + v_{\text{Sohl}}}{2} = 0,14 \text{ m/s}$$

$$\text{Zahl der Walzenumdrehungen nach Gleichung (2) } n = \frac{L_{SF} \cdot v}{2u\sqrt{\pi} \sqrt{A_{SF}}} = 7,4$$

Abschätzung Energiebedarf z.B. aus Datenblatt Aerzener Drehkolbengebläse Deltablower GM 3 S/DN 50:

$$\text{Energiebedarf (gewählt bei } h_{\text{bel}} = 2,3 \text{ m } \Delta p = 300 \text{ mbar)} = 6.170 \text{ kWh/a}$$

$$\text{Kosten bei } 0,2 \text{ €/kWh} = 1.234 \text{ €/a}$$

Das folgende Beispiel soll den Einfluss einer kürzeren Sandfanglänge $L \geq 8 \cdot b_{SF}$ zeigen:

$$\text{Durchflusszeit } t_R = 6 \text{ Minuten.}$$

$$\text{Erforderliches Volumen } V = \frac{Q_m}{t_R} = 100 \text{ m}^3$$

Mit der empfohlenen Maximalgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung u von 0,2 m/s nach Tabelle 1 ergibt sich:

$$\text{Erforderliche Fläche } A_{SF} \geq \frac{Q_m}{u} = 1,4 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Fläche } A_{SF} = 5,0 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Länge } L_{SF} = \frac{V_{SF}}{A_{SF}} = 20 \text{ m}$$

$$\text{Gewähltes Breite/Tiefe-Verhältnis } \frac{b_{SF}}{h_{SF}} = 0,8$$

$$\text{Gewählte Sohlquerneigung der Fettfangkammer } \alpha = 45^\circ$$

$$\text{Gewähltes Verhältnis Rinnenbreite/Sandfangbreite } \frac{b_R}{b_{SF}} = 0,2$$

$$\text{Sandfangbreite: } b_{SF} = \frac{\sqrt{\left(-\frac{4}{\frac{b_{SF}}{h_{SF}}} + 2 \cdot \tan \alpha - 4 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{SF}} + 2 \cdot \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{SF}}\right)^2\right) A}}{-\frac{2}{\frac{b_{SF}}{h_{SF}}} + \tan \alpha - 2 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{SF}} + \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{SF}}\right)^2} = 2,4 \text{ m}$$

$$\text{Sandfangtiefe: } h_{SF} = \frac{b_{SF}}{0,8} = 2,9 \text{ m}$$

$$\text{Rinnenbreite } b_R = 0,2 \cdot b_{SF} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Einblastiefe: } h_{bel} = h_{SF} - 0,3 \text{ m} = 2,6 \text{ m}$$

$$\text{Luftetrug } q_{LV} = 0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

$$\text{Vorhandene Sandfangfläche } A = b_{SF} \cdot h_{SF} - \frac{(b_{SF} - b_R)^2 \tan \alpha}{2} = 5,1 \text{ m}^2$$

$$\text{Fließgeschwindigkeit } u \text{ in Sandfanglängsrichtung } \frac{Q_m}{A_{SF}} = 0,05 \text{ m/s}$$

Abschätzung der Randgeschwindigkeit der Wasserwalze:

$$v_{\max} \text{ nach Gleichung (26)} = 0,24 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Sohl}} \text{ nach Gleichung (74) an der Stelle } z = H - 2z_{MP} = -0,08 \text{ m/s}$$

$$\text{Mittlere Randgeschwindigkeit } \frac{v_{\max} + v_{\text{Sohl}}}{2} = 0,16 \text{ m/s}$$

$$\text{Zahl der Walzenumdrehungen nach Gleichung (2) } n = \frac{L_{SF} \cdot v}{2u\sqrt{\pi}\sqrt{A_{SF}}} = 7,3$$

Abschätzung Energiebedarf z.B. aus Datenblatt Aerzener Drehkolbengebläse Deltablower GM 3 S/DN 50:

$$\text{Energiebedarf (gewählt bei } h_{bel} = 2,6 \text{ m } \Delta p = 400 \text{ mbar)} = 11.746 \text{ kWh/a}$$

$$\text{Kosten bei } 0,2 \text{ €/kWh} = 2.349 \text{ €/a}$$

Eine größere Fläche erfordert bei gleichem Breite/Tiefe-Verhältnis auch eine größere Tiefe und somit eine größere Einblastiefe, also zunächst einen höheren Energiebedarf. Durch die größere Einblastiefe wird aber der Luftvolumenstrom besser ausgenutzt und könnte daher noch weiter reduziert werden.

In Abbildung 161 ist ein Vorschlag für die Gestaltung des Auslaufbereichs in Anlehnung an DWA A 112 (2007) und ATV A 111 (1994) dargestellt. Zusätzlich sind die Energielinie und die Drucklinie dargestellt. Das Wasser soll aus dem Walzenmittelpunkt in einem Düker abgezogen werden und fließt im Ablaufgerinne im Freispiegelabfluss ab.

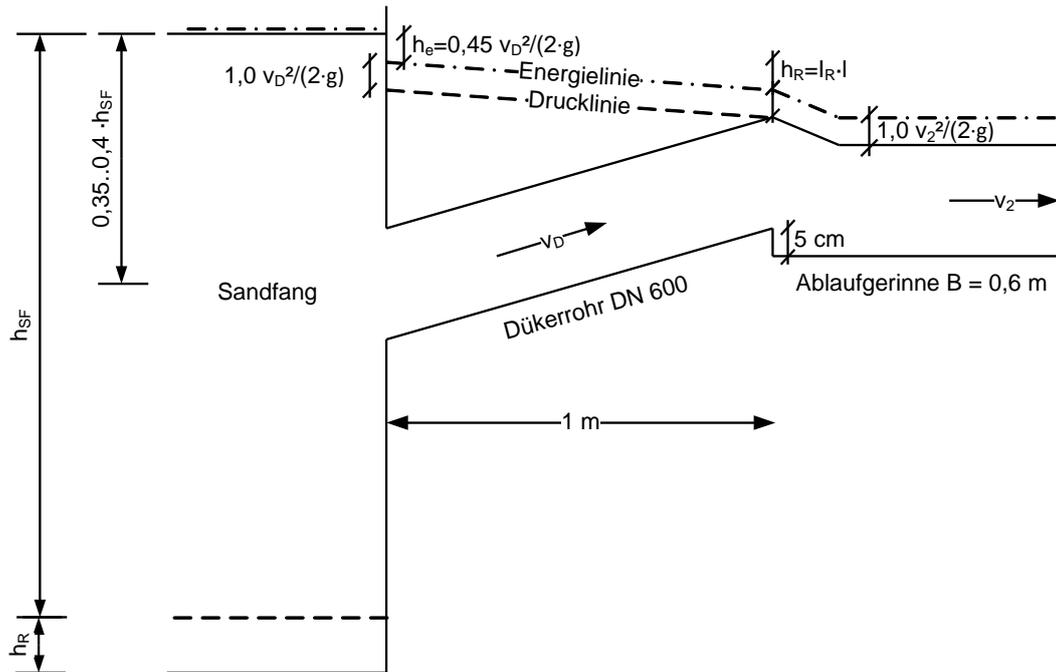


Abbildung 161: Vorschlag der Ablaufgestaltung nach DWA A 112 (2007).

Bemessung des Ablaufgerinnes:

Stricklerbeiwert für Beton: $k_{ST} = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$

Sohlgefälle $I = 1\text{‰}$

Verhältnis Gerinnebreite zu Wassertiefe ~ 1 bei Q_m .

Berechnung nach Gaukler/Strickler

$$Q = k_{ST} \cdot \sqrt{I} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot A$$

$$R = \frac{A}{U} = \frac{BT}{2T + B}$$

Daraus folgt für $B/T = 1$ mit $Q_m = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ bei Regenwetter aus iterativer Lösung:

Gerinnebreite $B = 0,6 \text{ m}$

Wassertiefe $T = 0,6 \text{ m}$

Fließgeschwindigkeit bei Regenwetter:

$$v_{RW} = v_2 = \frac{Q_m}{A} = 0,76 \text{ m/s}$$

Energiehöhe Ablaufgerinne:

$$H_{e2} = 1 \cdot v_2^2 / (2 \cdot g) = 0,03 \text{ m}$$

Wasserstand bei Trockenwetter:

$$T_{TW} = 0,35 \text{ m}$$

$$v_{TW} = \frac{Q_t}{A} = 0,66 \text{ m/s}$$

Bemessung des Dükerrohrs nach DWA A 112 (2007) und ATV A 111 (1994):

Stahlbetonrohr $k_b = 1,0 \text{ mm}$

RW 1,0 m/s TW > 0,3 m/s

Gewählt: DN 600, L = 1 m

$$v_D = 0,98 \text{ m/s}$$

Energiehöhe im Dükerrohr:

$$H_{eD} = v_D^2 / (2 \cdot g) = 0,05 \text{ m}$$

Eintrittsverlust (Annahme: H_e im Sandfang gleich Wasserspiegel)

$$h_e = 0,45 v_D^2 / (2 \cdot g) = 0,022 \text{ m}$$

Reibungsverlust nach Prandtl/Colebrook:

$$I_R = 1,9 \text{ ‰}$$

$$h_r = I_R \cdot L = 0,002 \text{ m}$$

Ermittlung Austrittsverlust (Sohlsprung 5 cm):

$$\text{Energiehöhe Ablaufgerinne: } T + v_2^2 / (2 \cdot g) = 0,63 \text{ m}$$

$$\text{Energiehöhe Dükerende: } d + v_D^2 / (2 \cdot g) + 0,05 \text{ m} = 0,70 \text{ m}$$

$$\text{Energiehöhendifferenz } \Delta H_e = 0,70 \text{ m} - 0,63 \text{ m} = 0,07 \text{ m} > v_D^2 / (2 \cdot g)$$

(somit freier Auslauf)

$$\text{Gesamtverlust } h_e + h_r + \Delta H_e = 0,10 \text{ m}$$

Wasserspiegeldifferenz Sandfang-Dükerrohrende (ATV A 111, 1994):

$$h_e + h_r + v_D^2 / (2 \cdot g) = 0,08 \text{ m}$$

Wasserspiegeldifferenz Sandfang-Ablaufgerinne:

$$h_e + h_r + \Delta H_e + v_2^2 / (2 \cdot g) = 0,13 \text{ m}$$

Aus der Berechnung folgt, dass der Rohrscheitel des Dükerrohrs 0,08 m unter dem Wasserspiegel im Sandfang angeordnet werden muss. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Energiehöhe im Sandfang, wegen der geringen Fließgeschwindigkeiten gleich dem Wasserspiegel ist.

9.2 Bemessung nach DWA (2008)

Bei der Bemessung sollen die Auswirkungen der Wahl des Lufteintrages an der Untergrenze und an der Obergrenze der Empfehlung der DWA (2008) verdeutlicht werden.

$$\text{Durchflusszeit } t_R = 6 \text{ Minuten}$$

$$\text{Erforderliches Volumen } V = \frac{Q_m}{t_R} = 100 \text{ m}^3$$

Mit der empfohlenen Maximalgeschwindigkeit in Sandfanglängsrichtung u von 0,2 m/s nach Tabelle 1 ergibt sich:

$$\text{Erforderliche Fläche } A_{SF} \geq \frac{Q_m}{u} = 1,4 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Fläche } A_{SF} = 4,0 \text{ m}^2$$

$$\text{Gewählte Länge } L_{SF} = \frac{V_{SF}}{A_{SF}} = 25 \text{ m}$$

$$\text{Gewähltes Breite/Tiefe-Verhältnis } \frac{b_{SF}}{h_{SF}} = 0,8$$

$$\text{Gewählte Sohlquerneigung der Fettfangkammer } \alpha = 45^\circ$$

$$\text{Gewähltes Verhältnis Rinnenbreite/Sandfangbreite } \frac{b_R}{b_{SF}} = 0,2$$

$$\text{Sandfangbreite: } b_{SF} = \frac{\sqrt{\left(-\frac{4}{\frac{b_{SF}}{h_{SF}}} + 2 \cdot \tan \alpha - 4 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{SF}} + 2 \cdot \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{SF}} \right)^2 \right) A_{SF}}}{-\frac{2}{\frac{b_{SF}}{h_{SF}}} + \tan \alpha - 2 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{b_R}{b_{SF}} + \tan \alpha \cdot \left(\frac{b_R}{b_{SF}} \right)^2} = 2,1 \text{ m}$$

$$\text{Sandfangtiefe: } h_{SF} = \frac{b_{SF}}{0,8} = 2,6 \text{ m}$$

$$\text{Rinnenbreite } b_R = 0,2 \cdot b_{SF} = 0,4 \text{ m}$$

$$\text{Einblastiefe: } h_{bel} = h_{SF} - 0,3 \text{ m} = 2,3 \text{ m}$$

$$\text{Lufteintrag } q_{LV} = 0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

$$\text{Vorhandene Sandfangfläche } A = b_{SF} \cdot h_{SF} - \frac{(b_{SF} - b_R)^2 \tan \alpha}{2} = 4 \text{ m}^2$$

$$\text{Fließgeschwindigkeit } u \text{ in Sandfanglängsrichtung } \frac{Q_m}{A_{SF}} = 0,07 \text{ m/s}$$

Abschätzung der Randgeschwindigkeit der Wasserwalze:

$$v_{\max} \text{ nach Gleichung (26)} = 0,29 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Sohl}} \text{ nach Gleichung (74) an der Stelle } z = H - 2z_{MP} = -0,10 \text{ m/s}$$

$$\text{Mittlere Randgeschwindigkeit } \frac{v_{\max} + v_{\text{Sohl}}}{2} = 0,20 \text{ m/s}$$

$$\text{Zahl der Walzenumdrehungen nach Gleichung (2) } n = \frac{L_{SF} \cdot v}{2u\sqrt{\pi}\sqrt{A_{SF}}} = 10$$

Abschätzung Energiebedarf z.B. aus Datenblatt Aerzener Drehkolbengebläse Deltablower GM 3 S/DN 50:

$$\text{Energiebedarf (gewählt bei } h_{\text{bel}} = 2,3 \text{ m } \Delta p = 300 \text{ mbar)} = 11.746 \text{ kWh/a}$$

$$\text{Kosten bei } 0,2 \text{ €/kWh} = 2.349 \text{ €/a}$$

Bei einer Erhöhung des Lufteintrags auf $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ ergeben sich bei gleicher Querschnittsgestaltung folgende Werte:

$$\text{Lufteintrag } q_{LV} = 1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$$

$$\text{Vorhandene Sandfangfläche } A = b_{SF} \cdot h_{SF} - \frac{(b_{SF} - b_R)^2 \tan \alpha}{2} = 4 \text{ m}^2$$

$$\text{Fließgeschwindigkeit } u \text{ in Sandfanglängsrichtung } \frac{Q_m}{A_{SF}} = 0,07 \text{ m/s}$$

Abschätzung der Randgeschwindigkeit der Wasserwalze:

$$v_{\max} \text{ nach Gleichung (26)} = 0,40 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{Sohl}} \text{ nach Gleichung (74) an der Stelle } z = H - 2z_{MP} = -0,14 \text{ m/s}$$

$$\text{Mittlere Randgeschwindigkeit } \frac{v_{\max} + v_{\text{Sohl}}}{2} = 0,27 \text{ m/s}$$

$$\text{Zahl der Walzenumdrehungen nach Gleichung (2) } n = \frac{L_{SF} \cdot v}{2u\sqrt{\pi}\sqrt{A_{SF}}} = 13,8$$

Abschätzung Energiebedarf z.B. aus Datenblatt Aerzener Drehkolbengebläse Deltablower GM 3 S/DN 50:

$$\text{Energiebedarf (gewählt bei } h_{\text{bel}} = 2,3 \text{ m } \Delta p = 300 \text{ mbar)} = 20.784 \text{ kWh/a}$$

Kosten bei 0,2 €/kWh

= 4.157 €/a

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse zusammengefasst. Es wird deutlich, dass schon bei sehr kleinen Lufteinträgen, unterhalb der Empfehlung der DWA (2008), eine ausreichende Anzahl der Walzenumdrehungen von > 3 erreicht werden kann. Bei Verringerung des Lufteintrages wird deutlich weniger Energie benötigt. Bei einem Lufteintrag von $0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ beträgt der Energiebedarf bei gleicher Sandfanggeometrie nur 6.170 kWh/a gegenüber einem Energiebedarf von 11.746 kWh/a beim minimal von der DWA empfohlenen Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$. Wählt man den maximal empfohlenen Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ erhöht sich der Energiebedarf auf 20.784 kWh/a.

Tabelle 23: Bemessung eines belüfteten Sandfanges nach verschiedenen Bemessungsansätzen.

Parameter	Eigene Untersuchungen	Eigene Untersuchungen	DWA	DWA
	$L_{SF} \geq 10 \cdot b_{SF}$ Lufteintrag klein	$L_{SF} \geq 8 b_{SF}$ Lufteintrag klein	Lufteintrag min.	Lufteintrag max.
Q_m	1.000	1.000	1.000	1.000
Q_{tx}	500	500	500	500
t_R	6	6	6	6
V_{SF}	101,22	102,336	101,22	101,22
A_{SF}	4,0488	5,1168	4,0488	4,0488
L_{SF}	25	20	25	25
α	45	45	45	45
b_{SF}	2,1	2,4	2,1	2,1
h_{SF}	2,6	2,9	2,6	2,6
h_{bel}	2,3	2,6	2,3	2,3
b_{SF}/h_{SF}	0,81	0,83	0,81	0,81
b_R	0,5	0,5	0,5	0,5
q_{LV}	0,2	0,2	0,5	1,3
u	0,07	0,05	0,07	0,07
v_{max}	0,22	0,24	0,29	0,40
v_{Sohl}	-0,07	-0,08	-0,10	-0,14
n	7,40	7,31	10,04	13,81
Energie kWh/a	6.170	11.746	11.746	20.784
Kosten €/a	1.234	2.349	2.349	4.157

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil wurden Messungen des Abscheidegrades durch Massenbilanzen an bestehenden Sandfängen durchgeführt. Für die Auswahl der Sandfänge wurde zunächst erhoben, welche verschiedene Bauformen für belüftete Sandfänge in Deutschland üblich sind und inwieweit diese den Bemessungsempfehlungen entsprechen und dann Sandfänge mit unterschiedlichen Querschnitten ausgewählt. Dabei stellte sich heraus, dass die meisten Sandfänge einen Trapezquerschnitt haben und ungefähr 20 % der betrachteten Sandfänge keine Sandfanggutter besitzen.

Korngrößenverteilung und Abscheidegrad

An fünf ausgewählten Sandfängen mit unterschiedlichen Querschnitten, wurden die Sandkonzentrationen und die Korngrößenverteilungen im Rohabwasser gemessen. Die Sandkonzentrationen bei Trockenwetter lagen zwischen 3 mg/l und 176 mg/l und bei Regenwetter zwischen 22 mg/l und 1.200 mg/l. Der Mittelwert des Anteils der Korngrößen $< 0,2$ mm bei Trockenwetter betrug im Zulauf der Sandfänge 67 %, im Ablauf 80 %. Bei Regenwetter ergab sich der Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm zu 32 % im Zulauf und zu 72 % im Ablauf. Die gemessenen Sandkonzentrationen und Korngrößenverteilungen wurden mit Literaturwerten verglichen und dienten zugleich als Vorlage für den später im physikalischen Modellversuch eingesetzten Versuchssand.

Es konnten die folgenden drei maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Abscheidegrad identifiziert werden: Sandkonzentration, Korngrößenverteilung und turbulente kinetische Energie.

Der Einfluss der Sandkonzentration auf den Abscheidegrad wurde schon in den großtechnischen Versuchen festgestellt. Der Abscheidegrad wurde an fünf verschiedenen Sandfängen ausgewertet. Bei Trockenwetter lagen die Gesamtabscheidegrade zwischen 24 % und 55 % und die Abscheidegrade der Korngrößen $\geq 0,2$ mm zwischen 20 % und 87 %. Bei Regenwetter wurde ein Gesamtabscheidegrad von 73 % und ein Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm von 91 % erreicht. Die geringen Abscheidegrade bei Trockenwetter waren bedingt durch sehr niedrige Sandkonzentrationen im Zulauf der Sandfänge. Hier wird die Abhängigkeit des Abscheidegrades von der Sandkonzentration im Zulauf des Sandfanges besonders deutlich. Der beste Abscheidegrad wurde bei der höchsten Sandkonzentration erreicht. Die Betrachtung einzelner Messwerte zeigt, dass insbesondere bei höheren gemessenen Sandkonzentrationen von 900 mg/l und 1.200 mg/l im Zulauf der Kläranlage Geiselbullach und 130 mg/l im Zulauf der Kläranlage Dachau, der nach DIN 19569-2 (2002) geforderte Abscheidegrad von 95 % der Korngrößen $\geq 0,2$ mm eingehalten wird.

Um einzelne Parameter isoliert betrachten zu können, wurde im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit ein physikalisches Sandfangmodell im Labor des Instituts für

Wasserwesen aufgebaut. Hierfür wurde der Sandfang der Kläranlage Karlsfeld im Maßstab 1:4 abgebildet. Es gelang, den Lufteintrag im physikalischen Modell, über den Vergleich ausgewählter Geschwindigkeitsprofile im großtechnischen Sandfang und im Sandfangmodell, zu kalibrieren. Das erreichte Bestimmtheitsmaß war 0,8.

Aus den Ergebnissen der Kalibrierversuche konnte abgeleitet werden, dass kleinere Luftblasen, bei gleichem Lufteintrag, zu einer geringeren turbulenten kinetischen Energie im Sandfang führen. Die maximale Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche nahm mit steigendem Lufteintrag zu, unabhängig von der Zahl der Düsen. Nur bei sehr großen Luftblasen, die durch 80 Düsen auf einer Länge von 5 m erreicht wurden, war die maximale Geschwindigkeit kleiner als bei den kleineren Luftblasen. Dies liegt daran, dass die Messungen bei dieser Einstellung im Zustand „Strahlgasen“ durchgeführt wurden. Bei großtechnischen Sandfängen wird eine mittelblasige Belüftung mit einem Düsendurchmesser zwischen 0,3 mm und 3,0 mm empfohlen, da ein gewisses Maß an Turbulenz beim Betrieb von Sandfängen zur Verhinderung der Abscheidung von Organik nötig ist.

Die Geschwindigkeitsfelder am kalibrierten physikalischen Sandfangmodell wurden detailliert an 7 Messquerschnitten mit je 194 Messpunkten gemessen. Als Parameter zur Beurteilung der Strömung wurden die maximale Randgeschwindigkeit der Wasserwalze und die turbulente kinetische Energie gewählt. Die turbulente kinetische Energie berechnet sich aus den turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen in x, y und z Richtung. Sie wird also sowohl vom Durchfluss, als auch vom Lufteintrag und der Einblastiefe beeinflusst. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Parameters der turbulenten kinetischen Energie ist, dass er bei Simulationsrechnungen als sogenannter k-Wert berechnet wird. Die Messergebnisse können gut mit Simulationsrechnungen verglichen werden.

Die Messungen der Fließgeschwindigkeiten am kalibrierten physikalischen Sandfangmodell ergaben eine steigende Randgeschwindigkeit der Wasserwalze, bei zunehmendem Lufteintrag und zunehmender Einblastiefe. Zwischen der maximalen Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche und dem Lufteintrag, sowie der Einblastiefe, besteht ein logarithmischer Zusammenhang. Bei ansteigendem Lufteintrag konnten beim Trapezquerschnitt deutliche Vorwärtsströmungen in der Sandsammelrinne und Rückströmungen im Walzenmittelpunkt beobachtet werden. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass bei einer Steigerung der Parameter Lufteintrag, Einblastiefe oder Durchfluss die turbulente kinetische Energie im Gesamtsystem linear ansteigt.

Für die Messung der Abscheidegrade wurden vier verschiedene Versuchssande zugegeben. Sand 1 hatte mit 7,9 % den kleinsten Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm, Sand 4 mit 35 % den größten.

Auch der Anteil der Korngrößen $\geq 0,2$ mm beeinflusst den Abscheidegrad positiv. Im physikalischen Sandfangmodell wurde bei einem Lufteintrag von

2,5 Nm³/(m³·h) beim groben Sand 1 ein Abscheidegrad der verkleinerten Trennkorngröße $\geq 0,1$ mm von 88 % erreicht, beim feineren Sand 3 nur 70 %.

Die vorliegenden Untersuchungen des Abscheidegrades ergab eine Abhängigkeit des Abscheidegrades von der turbulenten kinetischen Energie. Der Abscheidegrad verbesserte sich linear mit abnehmendem Lufteintrag. Auch bei geringerem Durchfluss und somit höherer Durchflusszeit verbesserte sich der Abscheidegrad. Mit geringerer Einblastiefe sank der Wert für die turbulente kinetische Energie und der Abscheidegrad stieg an. Aus diesen Ergebnissen konnte Abbildung 160 zur Verbesserung des Abscheidegrades entwickelt werden. Die turbulente kinetische Energie ist in Abhängigkeit vom Lufteintrag, bei veränderlichem Durchfluss und veränderlicher Einblastiefe dargestellt. Es zeigt Möglichkeiten, den Abscheidegrad durch Senkung der turbulenten kinetischen Energie zu verbessern. Die am einfachsten durchzuführende Empfehlung ist die Verringerung des Lufteintrages. Dauerhaft kann aber auch eine Verringerung der Einblastiefe, durch Setzen der Belüfter auf eine höhere Position, bessere Abscheidegrade bewirken.

Eine Analyse der turbulenten kinetischen Energie bei den großtechnischen Messungen ergab bei der Kläranlage München I, bei Werten unter 0,004 m²/s², hohe Glühverluste im Sandfanggut von im Mittel 77 %. Bei der Kläranlage Karlsfeld war der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2$ mm mit 57,9 % gering, weil die turbulente kinetische Energie im Zulaufbereich mit Werten zwischen 0,0065 m²/s² und 0,01 m²/s² sehr hoch war. Daraus ergibt sich ein empfohlener Bereich für die turbulente kinetische Energie von 0,004 m²/s² bis 0,006 m²/s², der aber noch durch weitere großtechnische Untersuchungen bestätigt werden muss. Aus der Übertragung aus dem physikalischen Sandfangmodell ergibt sich ein minimal möglicher Wert für die turbulente kinetische Energie von 0,001 m²/s².

Der Abscheidegrad erscheint als Bemessungsparameter, insbesondere bei niedrigen Sandkonzentrationen, ungeeignet. Besser wäre die Definition einer kritischen Sandkonzentration, mit einer kritischen Korngrößenverteilung im Ablauf von Sandfängen. Dies scheiterte bisher an mangelnder Information, welches die kritische Sandkonzentration im Ablauf eines Sandfanges ist, im Hinblick auf Schädigung der weiteren Behandlungsstufen durch Abrasion und Ablagerungen.

Prüfverfahren zum Abscheidegrad

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann ein Vorschlag für eine Korngrößenverteilung und Sandkonzentration von Prüfsand und die Randbedingungen für die Versuchsdurchführung erstellt werden. Für den Prüfsand ergibt sich aus den vorliegenden Untersuchungen die Empfehlung für ein Größtkorn von 0,5 mm bis 1 mm und einen Anteil der Korngrößen $< 0,2$ mm von 20 bis 70 %. Die Ungleichförmigkeitszahl sollte < 3 betragen. Als Anteil der Korngrößen $< 0,1$ mm ergibt sich ≤ 10 %. Da bei Sandkonzentrationen < 100 mg/l der Abscheidegrad stark absinkt, aber die Ablaufkonzentrationen im Sandfang sehr niedrig und somit unkritisch für die Kläranlage sind, sollte die Zugabekonzentration ≥ 100 mg/l betragen. Eine steigende Sandkonzentration hat einen positiven Einfluss auf den Abscheidegrad, also sollte die Zugabekonzentration nach oben auf ≤ 500 mg/l begrenzt werden. Aus der Durchflussabhängigkeit des Abscheidegrades kann gefolgert werden, dass wie bisher, der maximale Zufluss bei Regenwetter den kritischen Bemessungslastfall darstellt. Somit wird dieser Lastfall auch für die Prüfung von Kompaktanlagen vorgeschlagen. Um ein Leistungsspektrum der Anlage zu erhalten, werden folgende zwei Lastfälle empfohlen:

- Lastfall 1: „Regenwetter“ mit maximaler Sandkonzentration von 500 mg/l.
- Lastfall 2: „Trockenwetter“ mit Sandkonzentration von 200 mg/l.

Bei Kompaktanlagen empfiehlt sich die Berechnung des Abscheidegrades aus einer Massenbilanz zwischen Sand im Zulauf und abgeschiedenem Sand.

Als Prüfverfahren für den Abscheidgrad für großtechnische Sandfanganlagen hat sich die Probenahme im Zulauf und Ablauf des Sandfanges mit Tauchpumpen, ohne Sandzugabe, bewährt. Hierfür sind kurze zeitliche Abstände bei der Probenahmen und große Probenahmegefäße von 500 l vorteilhaft. Der Abscheidegrad muss hier durch Massenbilanzen des Sandes im Zulauf und des Sandes im Ablauf berechnet werden. Als Kontrollmöglichkeit der Messung bietet sich die Erfassung von Masse und Korngrößenverteilung des abgeschiedenen Sandes in der Sandsammelrinne an. Dadurch kann auch festgestellt werden, ob ein zu hoher Anteil an organischer Substanz mit abgeschieden wird.

Im Zuge der Abbildung des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld, in einem physikalischen Modell, musste der Sand im Maßstab verkleinert werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen Natur und Modell herzustellen. Für großtechnische Anlagen, sowie Kompaktanlagen, ist keine Verkleinerung der Korngrößen des Prüfsandes erforderlich, auch wenn sich die Abmessungen zum Teil deutlich unterscheiden, da für alle Anlagen die gleichen Anforderungen an die Abscheidung der Trennkorngröße 0,2 mm gelten.

Simulation der Partikelbahnen

Auf der Basis von theoretischen Überlegungen, Messergebnissen und Literaturwerten, wurde ein mathematisches Modell für das Geschwindigkeitsfeld entwickelt und als Grundlage für die Simulation der Absetzwege genutzt.

Die Simulation der Absetzwege ergab einen deutlichen Einfluss der Zugabestelle von Sand auf die Sedimentation. Wird der Sand an der Wasseroberfläche zugegeben, gelangen die Teilchen auf die kreisförmige Umlaufbahn der Wasserwalze und setzen sich am Boden ab. Bei Zugabe in Walzenmitte werden die Teilchen in spiralförmiger Bahn zum Ablauf transportiert. Daraus kann für die Einlaufgestaltung gefolgert werden, dass eine Einleitung des Abwassers an der Wasseroberfläche für die Sedimentation am günstigsten ist. Auch wird in der Simulation der Einfluss des Lufteintrags deutlich, der insbesondere kleinere Teilchen aufwirbelt. Ein weiteres Ergebnis der Simulationsrechnungen ist, dass die Absetzlängen ohne Lufteintrag zum Teil länger sind, als mit Lufteintrag. Dies konnte auch in einer Messung am physikalischen Sandfangmodell bestätigt werden. Bei einem Vergleich der Abscheidegrade mit und ohne Luft ergab sich, dass die Sandkörner sich mit Luft zwar tendenziell früher absetzen, aber der quantitative Abscheidegrad ohne Luft prozentual besser ist.

Betriebliche und konstruktive Empfehlungen

Im physikalischen Sandfangmodell wurde der Einfluss der Sandfanggutrinne auf den Abscheidegrad untersucht. Die Sandfanggutrinne verhindert, dass sich an der Sandfangsohle große Quergeschwindigkeiten ausbilden. In der Sandfanggutrinne entsteht eine Wasserwalze, entgegengesetzt zur Wasserwalze im Sandfang. Bei steigenden Lufteinträgen konnten allerdings Rückströmungen im Walzenmittelpunkt und Vorwärtsströmungen in der Sandfanggutrinne beobachtet werden. Im physikalischen Sandfangmodell konnten keine signifikanten Unterschiede beim Abscheidegrad zwischen Rechteckquerschnitt und Trapezquerschnitt festgestellt werden. Dennoch wird als Bemessungsempfehlung vorgeschlagen, den Trapezquerschnitt mit Sandfanggutrinne beizubehalten, weil sich dort das Sandfanggut konzentriert in der Rinne sammelt und vom Räumler besser erfasst werden kann.

Von einer bereichsweisen Belüftung, wird im Hinblick auf die Bildung von Ablagerungen im unbelüfteten Teil des Sandfanges abgeraten. Ein Versuch mit nur 6 von 10 Belüftern, mit um 60 % verringertem Lufteintrag, wurde durchgeführt. Der Gesamtabscheidegrad erhöhte sich dabei um 3 % und der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm um 7 %. Beim Betrachten der turbulenten kinetischen Energie konnte gezeigt werden, dass diese mit nur 6 Belüftern, insbesondere im hinteren Teil des Querschnitts, deutlich geringer ist als mit 10 Belüftern. Die Versuchsreihe wurde trotz des besseren Abscheidegrades nicht mehr weitergeführt, weil sich starke Ablagerungen von Feinkorn auf der Sohle, im unbelüfteten Bereich des Sandfanges, bildeten. Um diese zu verhindern, müsste der Lufteintrag im

vorderen Bereich gesteigert werden, was zu einem erhöhten Energieeintrag führt. Als Alternative wurde die Möglichkeit einer zeitlichen Steuerung der Belüftung des Sandfanges, im Hinblick auf Energieeinsparung diskutiert. Da sich bei einer Durchflusssteigerung bei Regenwetter eine höhere turbulente kinetische Energie im Sandfang einstellt, könnte der Energieeintrag durch die Belüftung verringert werden. Eine Auswertung der Anzahl der Regenwettertage bei sieben Kläranlagen, ergab 50 % pro Jahr. Für eine weitere Berechnung wurden 30 % angesetzt. Bei einer Reduzierung des Lufteintrages von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ auf $0,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bei Regenwetter, lassen sich dadurch 12 % der Belüftungskosten pro Jahr einsparen.

Trotz der Tatsache, dass der Energieverbrauch bei kleinerem Lufteintrag umso kleiner ist, wird in der Praxis häufig ein sehr hoher Lufteintrag gewählt. Im Hinblick auf Energieeinsparung und gute Sandabscheidung, erscheint als Bemessungsgrundlage ein Lufteintrag im Bereich von $0,1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bis $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, gemäß den Empfehlungen von Seyfried (1994), sinnvoll. Durch die Messungen konnte gezeigt werden, dass mit steigender Belüftung Vorwärtsströmungen in der Sandsammelrinne entstehen, die zu Wiederaufwirbelungen von Sandfanggut führen. Auch im Hinblick darauf ist eine Minimierung des Lufteintrages zu empfehlen.

Bei der Analyse des Geschwindigkeitsfeldes im Vergleich mit Literaturwerten fiel auf, dass das Breite/Tiefe-Verhältnis die Geschwindigkeit an der Wasseroberfläche sehr stark beeinflusst. Ein Breite/Tiefe-Verhältnis von 0,8 bzw. 0,85 wurde von Londong (1987) bzw. Patt (1990) als optimal identifiziert. Allerdings bezieht sich dieser Wert auf die Strömung an der Sandfangsohle. Die Messergebnisse haben gezeigt, dass proportional mit der Strömung an der Wasseroberfläche auch die Strömung an der Sandfangsohle ansteigt, somit gelten diese Beobachtungen auch für die Wasseroberfläche. Aufgrund dieser Überlegungen kann die Empfehlung eines Breite/Tiefe-Verhältnisses von 0,8 bzw. 0,85 beibehalten werden.

Die Messungen haben gezeigt, dass sich der Gesamtabscheidegrad auf den letzten 40 % des physikalischen Sandfangmodells um maximal 9 %, der Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ um maximal 8,1 % verbesserte. Auf den letzten 20 % des physikalischen Sandfangmodells traten Verbesserungen des Gesamtabscheidegrades um maximal 3,6 %, des Abscheidegrades der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ um maximal 4,3 % ein. Daraus kann gefolgert werden, dass für zukünftige Bemessungen die Vorgabe von Gieseke & Mosonyi (1997) eingehalten werden sollte, nach der eine Sandfanglänge von mindestens der achtfachen Breite des Sandfanges ausreichend ist.

Die sich aus der vorliegenden Arbeit ergebenden betrieblichen und konstruktiven Empfehlungen sind Tabelle 24 zusammengefasst.

Tabelle 24: Zusammengefasste Bemessungsempfehlungen.

Parameter	Empfehlung	Begründung
Horizontale Fließgeschwindigkeit u	$\leq 0,15$ m/s	Verhinderung von Resuspensionen
Randgeschwindigkeit der Wasserwalze	$\leq 0,15$ m/s	Verhinderung von Resuspensionen
Zufluss Abwasser	Nahe der Wasseroberfläche	Begünstigung der Sandabscheidung
Abzug des Abwassers	Aus dem Walzenmittelpunkt	Abzug der Organik
Querschnittsform	Trapezquerschnitt mit Sandsammelrinne	Bessere Möglichkeit der Räumung des Sandfanggutes
Beckenlänge	> 8 bis $10 \cdot b_{SF} < 50$ m	Gleichmäßige Durchströmung des Beckens
Breite/Tiefe Verhältnis	0,8 bis 0,85	Optimale Umsetzung des Lufteintrags in Walzenströmung
Lufteintrag	0,1 Nm ³ /(m ³ ·h) bis 0,5 Nm ³ /(m ³ ·h)	Verbesserte Sandabscheidung, Vermeidung von Vorwärtsströmungen in der Sandsammelrinne
Lufteintrag	Gleichmäßig über die ganze Länge	Verhinderung von Ablagerungen auf der Sohle
Belüftung	Mittelblasige Belüftung mit Düsendurchmesser 0,3 mm bis 3,0 mm	Verhinderung der Verstopfung der Belüfter, Begrenzung der turbulenten kinetischen Energie
Turbulente Kinetische Energie	0,004 m ² /s ² bis 0,006 m ² /s ²	Optimale Sandabscheidung, Begrenzung der Abscheidung von Organik

Weiterer Forschungsbedarf

Interessant für weitere Forschungsarbeiten ist eine intensive Beschäftigung mit der turbulenten kinetischen Energie. Wegen der schwierigen Übertragbarkeit zwischen Natur und Modellversuch sind hierfür großtechnische Messungen am besten geeignet. Zusätzlich könnte die Größe theoretisch hergeleitet werden und geklärt werden, ob sich die für die einzelnen Parameter ermittelten Werte für die turbulente kinetische Energie addieren lassen. Als Ergebnis wäre ein kritischer Wert für die turbulente kinetische Energie erstrebenswert, bis zu dem sich ein bestimmter Abscheidegrad erreichen ließe. So ließen sich auch die Zulauf- und Ablaufgestaltung optimieren. Mit Hilfe von numerischen Simulationen, auf

Grundlage der vorliegenden Untersuchungen, könnte ein vertiefter Einblick in die turbulente kinetische Energie gewonnen werden. Der aus den großtechnischen Versuchen der vorliegenden Arbeit vorgeschlagene optimale Wertebereich für die Sandabscheidung zwischen $0,004 \text{ m}^2/\text{s}^2$ und $0,006 \text{ m}^2/\text{s}^2$, muss noch durch weitere Untersuchungen bestätigt werden.

Der Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell wurde mit Quarzsand durchgeführt. Für einen Grenzwert für die turbulente kinetische Energie, die für den optimalen Abscheidegrad nötig ist, müssen weitere Versuche mit einem Ersatzmaterial für Organik durchgeführt werden.

Zusätzlich muss noch die Frage geklärt werden, welche Sandkonzentration und welche Korngrößenverteilung im Ablauf des Sandfanges kritisch ist für eine Kläranlage. Bisher konnten noch keine Aussagen hierzu gewonnen werden.

Es ergab sich eine Abhängigkeit vom Abscheidegrad und der Sandkonzentration. Bei geringen Sandkonzentrationen überschätzen die theoretischen Ansätze die tatsächliche Sinkgeschwindigkeit. Daher muss ein Abminderungsfaktor für die Sinkgeschwindigkeit bei geringen Sandkonzentrationen gefunden werden.

Es konnte gezeigt werden, dass der Ansatz von Kobus (1973) für die maximale Oberflächengeschwindigkeit, nur unter Verwendung von Korrekturfaktoren für das Breite/Tiefe-Verhältnis und für die Einblastiefe anwendbar ist. Um den Einfluss der seitlichen Begrenzungen im Sandfang und des Breite/Tiefe-Verhältnisses auf die maximale Oberflächengeschwindigkeit und die Ausbildung der Walzenströmung zu überprüfen, wäre eine Fortführung der Messungen von Kobus (1973) interessant. Hier sind detaillierte Messungen der Oberflächengeschwindigkeit unter verschiedenen Bedingungen notwendig, um daraus einen neuen Ansatz abzuleiten.

Ein wichtiger offener Punkt ist die Fettabscheidung. Hier muss geklärt werden, ob bei der vorgeschlagenen Reduzierung der Belüftung die Fettabscheidung beeinträchtigt wird.

11 Literaturverzeichnis

- Albrecht, A. E. (1967). Aerated grit operation design and chamber. *Water and sewage works* , S. 331-335.
- Artières, O. (1988). Bildung und Remobilisierung von Ablagerungen in Mischkanalisationen. *Korrespondenz Abwasser* , 35 (10), S. 1026-1033.
- ASCE. (1962). Sediment Transportation Mechanics: Introduction and Properties of Sediment. *Journal of the Hydraulics Division* , 4.
- ATV A 111 (1994). Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Regenwasser-Entlastungsanlagen in Abwasserkanälen und –leitungen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef.
- ATV. (1996). Abfälle aus Abwasseranlagen, Arbeitsbericht der ATV/VKS Arbeitsgruppe 3.11.2 . *Korrespondenz Abwasser* , 43 (11), S. 2008-2013.
- ATV. (1997). Handbuch Mechanische Abwasserreinigung . Berlin: Ernst und Sohn.
- ATV. (1998). Sandabscheideanlagen (Sandfänge und Sandfanggutaufbereitungsanlagen). *Korrespondenz Abwasser* , 45 (3), S. 535-549.
- ATV. (2004). Sandfanggutaufbereitung, Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe KA-5.1 "Sandfänge" im ATV-DVWK Fachausschuss KA-5 "Absetzverfahren". *Korrespondenz Abwasser* , 51 (5), S. 534-536.
- ATV-DVWK-M_369. (2003). Infrastrukturabfälle: Abfälle aus der Reinigung von Kanälen, Sinkkästen und Regenbecken - Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (Rechen- und Sandfanggut). (A. u. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Hrsg.) Hennef.
- Baier, V. (1996). Bestimmung und Beschreibung der Form von Schwebstoffpartikeln mittels Unterwasservideomikroskop und digitaler Bildverarbeitung. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München* , 57 .
- Batel, W. (1971). *Einführung in die Korngrößenmesstechnik*. Braunschweig: Springer-Verlag.
- Bechteler, W. (1981). Mathematische Modelle zur Dimensionierung von Langsandfängen. *GWF Wasser Abwasser* , 11, S. 518-526.
- Blunk, H. (1933). Beitrag zur Berechnung von Sandfängen. *Ges. Ing.* , 54 (40), S. 478.
- Boes, M. (1990). Anordnung und Bemessung der Luftzufuhr von belüfteten Sandfängen. *Korrespondenz Abwasser* , 7, S. 785.
- Bohn, T. (1997). Aktuelle Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen mit weitergehender Reinigung. 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 16./17.09.98 Weimar. *Schriftenreihe WAR*, Band 102.
- Bollrich, G. (2000). *Technische Hydromechanik 1*. Berlin: Huss-Medien Verlag Bauwesen.
- Bossel, H. (1994). *Modellbildung und Simulation*. Vieweg Verlag.
- Branner, W. (2005). Persönliche Mitteilung.
- Brunner, P. G. (1971). Bemessung und Konstruktion von Sandfängen. Berichte aus dem Institut für Wasserwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen der TU-München , 5 , 1-64.
- Camp, T. R. (1944). Effect of Turbulence on Sedimentation (Discussion). *American Society of Civil Engineers Transactions* , Paper No. 2218, S. 660-667.
- Camp, T. R. (1953). Studies of Sedimentation Basin Design. *Sewage Works* , 25 (1), S. 1-14.
- Chasik, A. H., & Burger, T. B. (1964). Using graded Sand to test grit removal Apparatus. *Journal WPCF* , 36 (7), S. 884-894.
- Cheng, N. S. (1997). A simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* , 123 (2), S. 149-152.

- Dietrich, W. E. (1982). Settling Velocity of Natural Particles. *Water Resources Research* , 18 (6), S. 1615-1626.
- DIN 18123 (1996). Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag.
- DIN_19551-2. (2002). Kläranlagen Rechteckbecken Teil 3: Sandfänge mit Saug- und Schildräumer Bauformen, Hauptmaße, Ausrüstungen. Normenausschuß Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN_19569-2. (2002). Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil 2: Besondere Baugrundsätze zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN_4022. (1987). Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels. Beuth.
- DIN_EN_12255-3. (2001). Kläranlagen, Teil 3: Abwasservorreinigung. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN_ISO_14688_1. (2002). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung. Beuth.
- DIN EN_ISO_14688_2. (2004). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. Beuth.
- Dobbins, W. E. (1944). Effect on Turbulence on Sedimentation. *American Society of Civil Engineers Transactions* , Paper No. 2218, S. 629-656.
- DWA A 112 (2007). Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Sonderbauwerken in Abwasserleitungen und -kanälen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef.
- DWA. (2008). Sandfänge - Anforderungen, Systeme und Bemessung. Arbeitsbericht des DWA-Fachausschusses KA-5 "Absetzverfahren". *Korrespondenz Abwasser* , 55 (5), S. 508-518.
- Fluent. (2006). User's Guide 6.3.
- Gardner, P., & Deamer, A. (1996). An evaluation methods for assessing the removal efficiency of a grit separation device. *Water Science and Technology* , 33 (9), S. 269-275.
- Geiger, H. (1942). Sandfänge für Abwasserkläranlagen. *Archiv für Wasserwirtschaft* .
- Gieseke, J., & Mosonyi, E. (1997). *Wasserkraftanlagen, Planung Bau und Betrieb*. Springer Verlag.
- Godehardt, M. (1996). Stoffliche Verwertung der Reststoffe aus Abwasser- und Straßenanlagen. *Korrespondenz Abwasser* , 43 (10), S. 1800-1807.
- Gruber, Y., Farchill, D., & Goldstein, M. (1988). Design, testing and operation of grit chambers with hydraulic roll. *Water Science and Technology* , 20 (4/5), S. 237-248.
- Günther, F. W., Schwarz, C., & Kulisch, H. (2004). Untersuchungen an einem Sandfang – Geschwindigkeitsmessungen und Sandfanggutanalyse. *Dresdner Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft* , 24 , 1-14.
- Hartmann, H. (1966). Der belüftete Sandfang. *GWF* , 20, S. 559.
- Hartmann, H., & Pöpel, F. (1958). Der neue belüftete Sandfang auf der biologischen Reinigungsanlage der Stadt Heilbronn. *GWF* , 22.
- Hazen, A. M. (1904). On Sedimentation. *American Society of Civil Engineers Transactions* , 980, S. 45-88.
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T., Wentzel, M. C., & Marais, G. v. (1994). Activated Sludge Model No. 2. *IAWQ Scientific and Technical Reports* , 3 . London.
- Hitzler, A. (2002). Beurteilung und Optimierung von Sandfwaschanlagen auf Kläranalgen. *Mitteilungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)* , 109 . Karlsruhe.
- Horvath, I., 1972, Tanulmányok és kutatási Eredmények. Forschungen auf dem Gebiet des belüfteten Sandfanges. Wissenschaftliches Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft, Veröffentlichung Nr. 38.

- Hunze, M. (2005). Simulation in der kommunalen Abwasserreinigung, Grundlagen, Hintergründe und Anwendungsfälle. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Imhoff, K., & Imhoff, K. R. (2007). *Taschenbuch der Stadtentwässerung*. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
- Kalbskopf, K. H. (1966). Über den Absatzvorgang in Sandfängen. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der TH Hannover , 24 .
- Kalbskopf, K.-H. (1977). Entfernung, Aufbereitung und Beseitigung von Rechengut, Sandfanggut und Schwimmstoffen. *ATV-Fortbildungskurs* .
- Kalbskopf, K.-H. (1981). Schlämme und Abfallstoffe aus der mechanischen Reinigungsstufe. *ATV Fortbildungskurs für Wassergütwirtschaft- Abwasser- und Abfalltechnik C1* . Kaiserslautern.
- Kappe, S. E., & Neigbor, J. B. (1951). Some developments in aeration, 1. pre-aeration and aerated grit chambers. *Sewage and Industrial Wastes* , 23 (7), S. 833-838.
- Kauffmann, M., & Holthausen, E. (2000). Numerische Strömungssimulation in Kläranlagen: Belüfteter Sandfang. *Korrespondenz Abwasser* , 47 (3), S. 357-365.
- Kazanskij, I. (1981). Über theoretische und praxisbezogene Aspekte des hydraulischen Feststofftransports. *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover* , 52 , 262-496. Hannover.
- Kobus, H. (1973). Bemessungsgrundlagen und Anwendungen für Lufschleier im Wasserbau. *Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis* , Nr. 7 .
- Koppe, P., & Stozek, A. (1990). *Kommunales Abwasser*. Essen: Vulkan Verlag.
- Londong, J. (1988). Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge. *Korrespondenz Abwasser* , 35 (1), S. 51-56.
- Londong, J. (1987). Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge unter besonderer Berücksichtigung der gleichzeitigen Nutzung als Adsorptionsstufe. *Gewässerschutz Wasser Abwasser* , 94 . Aachen.
- Londong, J. (1990). Sandfanggut in kommunalen Kläranlagen. *Korrespondenz Abwasser* , 37 (12), S. 1473-1475.
- Malcherek, A. (2009). Fließgewässer-Hydraulik und Wasserbau. *Skriptum des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München* . Neubiberg.
- Malcherek, A. (2008a). Hydraulik für Bauingenieure Version 6.2. *Skriptum des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München* . Neubiberg.
- Malcherek, A. (2008b). Sedimenttransport und Morphodynamik. *Skriptum des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München* . Neubiberg.
- Malcherek, A. (2008c). Numerische Methoden der Strömungsmechanik. *Skriptum des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München* . Neubiberg.
- Martin, H., & Pohl, R. (2000). Technische Hydrodynamik 4, Hydraulische und numerische Modelle. Verlag Bauwesen.
- Meersmann, A. (1962). Druckverlust und Schaumhöhen von gasdurchströmten Flüssigkeitsschichten auf Siebböden. *VDI Forschungsheft* , 491.
- Möller, U. (1968). Berechnung der Sauerstoffaufnahme und wirtschaftliche Gestaltung von Druckluft-Belüftungsbecken, *Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Heft 32.
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill.
- Neighbor, J. B., & Cooper, T. W. (1965). Design and Operation Criteria for aerated grit chambers. *Water and Sewage Works* , 12.
- Neitzel, V., & Tschsch, E. (2007). *Betriebsstörungen auf Kläranlagen*. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

- Obenaus, F., Hinrichs, W., Scheer, C., Seyfried, C. F., & Rosenwinkel, K.-H. (1998). Bemessung von belüfteten Sandfängen unter Berücksichtigung des Einflusses auf die biologische Reinigungsstufe. *awt abwassertechnik*, 2, S. 42-46.
- Ortmanns, C. (2006). Entsander von Wasserkraftanlagen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der ETHZ, 193. Zürich.
- Ortmanns, C., Volkart, P., & Minor, H.-E. (2006). Entsander von Wasserkraftanlagen. *Wasser Energie Luft*, 98 (1), S. 28-33.
- Oseen, C.W. *Neuere Methoden und Ergebnisse in der Hydrodynamik*. Akademie-Verlag, Leipzig, 1927.
- Ostermann, G. (1966). Neue Erkenntnisse über Wirkungsweisen und Leistung von Tangential- und Quersandfängen. *Dissertation an der Technischen Universität Dresden*.
- Ostermann, G. (1969). Über den Verlauf der Sandsedimentation und dessen Einfluß auf den Wirkungsgrad von Sandfanganlagen. *Water Research*, 3, S. 495-506.
- Ostermann, G. (1968). Untersuchungen über die Sandabscheidung in Tangentialsandfängen. *WWT*, 18 (8), S. 273-278.
- Patt, H. (1990). Hydromechanische Untersuchungen an einem belüfteten Sandfang. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München*, Nr. 36. Neubiberg.
- Patt, H., & Stein, A. (1996). Einsatz belüfteter Sandfänge auf Kläranlagen. *Korrespondenz Abwasser*, 43 (9), S. 1544-1551.
- Rodi, W. (1993). *Turbulence models and their application in hydraulics*. Rotterdam: A. A. Balkema.
- Rölle, R., & Huber, M. (1997). Neue Anordnung belüfteter Sandfänge zur konsequenten Trennung kommunaler Reststoffen. *Korrespondenz Abwasser*, 44 (7), S. 1221-1225.
- Roos, H. J. (1995). Recycling von Rückständen aus Sandfängen. Tagungsband der ATV-Landesgruppentagung 1995 zum 3. Saarländischer Abwassertag, 161-182.
- Rosenwinkel, K. H., & Brinkmeier, J. (2006). Stellenwert der mechanischen Vorreinigung: Rechen, Sandfang, Vorklärung bei modernen Abwasserbehandlungsanlagen. *Kommunale Abwasserbehandlung, WasserWirtschaftskurs M/2 11.-13. Oktober 2006 in Kassel*. Hennef: Vasen Big Print.
- Sawicki, J. M. (September 2004). Aerated grit chambers hydraulic design equation. *Journal of environmental engineering, ASCE*, S. 1050-1058.
- Schrimpf, W. (1987). Ein Beitrag zur Sedimentation von Feststoffen in horizontal durchströmten Sandfängen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München*, Nr. 20. Neubiberg.
- Schrimpf, W., & Steinle, E. (1984). Untersuchung an horizontal durchströmten Sandfängen zur Verbesserung der Sandabscheidung und Vorreinigung kommunaler Abwässer. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München*, 12. Neubiberg.
- Schwarz, C., Günthert, F. W., & Kulisch, H. (2008). Belüftete Sandfänge – Technische Untersuchungen zur Abscheideleistung. *41. Essener Tagung GWA*, 211, 26/1-14.
- Schwarz, C., Günthert, F. W., Kulisch, H., & Langer, F. (2007). Untersuchungen zur Verbesserung von Sandfanganlagen, 35. Abwassertechnisches Seminar „Ertüchtigung von Kläranlagen“. *Berichte aus Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität München*, 192, 9-32.
- Seyfried, C. F. (1988). Abwassersiebung, Sandfang, Vorklärung. ATV-Fortbildungskurs F/2, 2.-4.11.1988 in Fulda Abwasserreinigung im Lichte neuer Forderungen. Fulda.
- Seyfried, C. F. (1994). Rechen, Siebe und Sandfänge - Betriebserfahrungen und Entwicklungen. Schriftenreihe WAR der Technischen Hochschule Darmstadt, 36. Darmstädter Seminar: Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen, 75, 189-223. Darmstadt.
- Seyfried, C. F., Lohse, M., Schüßler, H., & Bebandorf, G. (1985). Vergleich der Reinigungsleistung von Rechen, Sieben und Siebrechen sowie deren Einfluß auf die weiteren Reinigungsstufen. *Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover*, 85. Hannover.
- Soo, S.L. (1967). *Fluid Dynamics of multiphase systems*. Blaisdell Publishing Company.

- Soo, S. L. (1990). *Multiphase Fluid Dynamics*. Hong Kong: Science Press und Gower Technical.
- Stein, A. (1992). Ein Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge kommunaler Kläranlagen. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Nr. 37*. Neubiberg.
- Stelzer, M., Beier, M., & Rosenwinkel, K.-H. (2004). Bewertung und Optimierung der Leistungsfähigkeit von Sandfängen. *Dresdner Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 24*, 15-24.
- Stieß, M. (1995). *Mechanische Verfahrenstechnik 1*. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Stovin, V. R., & Saul, A. J. (1998). A computational fluid dynamics (CFD) particle tracking approach to efficiency prediction. *Water Science and Technology, 37 (1)*, S. 285-293.
- Stovin, V. R., & Saul, A. J. (1996). Efficiency prediction for storage chambers using computational fluid dynamics. *Water Science and Technology, 33 (9)*, S. 163-170.
- Theilen, U., & Luthardt-Behle, T. (2004). Untersuchungen an einem neu entwickelten belüfteten Walzensandfang mit Rundprofil. *Korrespondenz Abwasser, 51 (5)*, S. 511-516.
- Toutenburg, H., Fieger, A., & Kastner, C. (1995). *Induktive Statistik für Betriebs- und Volkswirte*. München: Prentice Hall.
- Wagner & Loock (2006). Neue Maschinen- und verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Einsparung von Betriebskosten bei der Abwasserbehandlung. 78. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 2. November 2006 Darmstadt. *Schriftenreihe WAR*, Band 176.
- Wiedenroth, W. (1967). Untersuchungen über die Förderung von Sand- Wasser- Gemischen durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen. Dissertation an der TH Hannover.
- Wu, W., & Wang, S. S. (2006). Formulas for sediment porosity and settling velocity. (ASCE, Hrsg.) *Journal of hydraulic engineering, 132 (8)*, S. 858-862.
- Zanke, U. (1976). Über die Naturähnlichkeit von Geschiebeversuchen bei einer Gewässersohle mit Transportkörpern. *Mitteilungen des Franzius-Instituts der Universität Hannover*, Heft 44.
- Zanke, U. (1982). *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Berlin: Springer Verlag.
- Zlokarnik, M. (2005). *Scale-up, Modellübertragungen in der Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-Vch.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Empfehlungen verschiedener Autoren für den Lufteintrag $[Nm^3/(m^3 \cdot h)]$ in Abhängigkeit von der Querschnittsfläche des Sandfanges (nach Boes, 1990).	10
Abbildung 2:	Empfohlene Querschnittsform für belüftete Sandfänge (DWA, 2008).	12
Abbildung 3:	Ablaufplan für die Bemessung eines belüfteten Sandfanges nach Londong (1987) und DWA (2008).	15
Abbildung 4:	Beckenquerschnitt des physikalischen Modells eines belüfteten Sandfanges von Kalbskopf (1966).	16
Abbildung 5:	Beckenquerschnitt des physikalischen Modells eines belüfteten Sandfanges von Schrimpf (1987).	17
Abbildung 6:	Versuchssandfänge nach Londong (1987).	18
Abbildung 7:	Übertragungsfaktor für den Lufteintrag nach Patt (1990) am Beispiel zweier Modellsandfänge mit $A_1 = 2m^2$ und $A_2 = 0,3 m^2$ im Vergleich mit theoretischen Betrachtungen von Froude und Horvath (1972).	20
Abbildung 8:	Geschwindigkeitsrichtungen und Teilchenbahn im belüfteten Sandfang.	21
Abbildung 9:	Für den Bewegungsbeginn erforderliche Schubspannung nach Shields.	23
Abbildung 10:	Logarithmisches Geschwindigkeitsprofil nach Kármán-Prandtl.	24
Abbildung 11:	Übergangsbereich zwischen Blasengasen und Strahlgasen in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser, der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag nach Gleichung (11) von Patt (1990).	27
Abbildung 12:	Luftblasengröße in Abhängigkeit vom Lufteintrag nach Gleichung (13) von Meersmann (1962)	28
Abbildung 13:	Aufstiegsgeschwindigkeit und Blasenform in Abhängigkeit vom Blasendurchmesser (nach Patt, 1990).	29
Abbildung 14:	Aufstiegsgeschwindigkeit der Luftblasen in Abhängigkeit vom Lufteintrag nach den Gleichungen (13) von Meersmann (1962) und (17) von Soo (1967).	30
Abbildung 15:	Definitionsskizze für das Luftschleier-Strömungsfeld (nach Kobus, 1973).	31
Abbildung 16:	Maximale Oberflächengeschwindigkeit v_{max} in Abhängigkeit vom Lufteintrag und von der Einblastiefe h_{bel} nach Gleichung (26) von Kobus (1973) und Patt (1990).	34
Abbildung 17:	Relative Oberflächengeschwindigkeit über Düsenreihen (Kobus, 1973).	35
Abbildung 18:	Sohlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Breite/Tiefe-Verhältnis und vom Lufteintrag nach den Messwerten von Patt (1990).	37
Abbildung 19:	Kreisförmiges Vektorfeld nach Malcherek (2008a).	39
Abbildung 20:	Mathematisches Geschwindigkeitsprofil (Patt, 1990).	40
Abbildung 21:	Lage ausgewählter Geschwindigkeitsprofile (Stein, 1992).	40
Abbildung 22:	Physikalisches Modell eines belüfteten Sandfanges mit wasserinduzierter Sekundärströmung, Düsendurchmesser 9,6 mm, Abstand der Düsen 37,5 cm, Durchfluss 0,4 l/s (nach Gruber et al., 1988).	42
Abbildung 23:	Geschwindigkeitsverteilungen der Geschwindigkeitskomponente v bei Messung mit einer ADV Sonde an der Wasseroberfläche.	43
Abbildung 24:	Kräftegleichgewicht an einem sphärischen Sedimentpartikel.	46
Abbildung 25:	Raumachsen eines Ellipsoids zur Berechnung des Corey Shape Faktors nach Baier (1996).	48

Abbildung 26:	Sinkgeschwindigkeit nach Stokes, Oseen (1927), Zanke (1982), Dietrich (1982), Cheng (1997) und Wu und Wang (2006) (Corey Shape Faktor 0,7; Powers Rundheitsbeiwert 3,0).....	50
Abbildung 27:	Absetzvorgang in laminarer Strömung (ATV, 1997).	51
Abbildung 28:	Einfluss der Strömungsturbulenz auf den Absetzvorgang (nach Camp, 1944).	52
Abbildung 29:	Unterschiedliche Transportarten für Sand in Wasser mit $T=20^{\circ}\text{C}$ in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und der mittleren Geschwindigkeit im Abstand von 1 cm und 20 cm von der Sohle nach Londong (1987).....	53
Abbildung 30:	Kornverteilung im Kanal nach Artières (1988).	56
Abbildung 31:	Kornverteilungen von Sand im Rohabwasser (gestrichelte Linien: Ostermann ,1966; Brunner, 1971; durchgezogene Linien: Stein, 1992).	57
Abbildung 32:	Sieblinien von Sandfanggut nach Londong (1987) 1-5, Hartmann & Pöpel (1958) 6 und Hitzler (2002) 7.	58
Abbildung 33:	Beschaffenheit von gewaschenem Sand (Hitzler, 2002).	59
Abbildung 34:	Schema der Versuchsanordnung (nach Stein, 1992).	61
Abbildung 35:	Sieblinien verwendeter Prüfsande nach verschiedenen Quellen.....	62
Abbildung 36:	Im belüfteten Sandfang nach der Zeit t [s] abgesetzte Sandmenge (Kalbskopf, 1966). .	64
Abbildung 37:	Einer von acht Sandabscheideräumen der Kläranlage München I.....	74
Abbildung 38:	Draufsicht auf einen Sandabscheideraum mit Fettabscheideraum der Kläranlage München I mit Messprofilen und Koordinatensystem (nach Günthert et al., 2004).	75
Abbildung 39:	Querschnitt eines Sandfanges der Kläranlage München I mit Messachse und Koordinatensystem.	75
Abbildung 40:	Belüfteter Sandfang der Kläranlage Dachau.	76
Abbildung 41:	Belüfteter Sandfang der Kläranlage Karlsfeld.....	77
Abbildung 42:	Querschnitt des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit Messprofil.	78
Abbildung 43:	Längsschnitt des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit 7 Messprofilen.....	78
Abbildung 44:	Querschnitt des Sandfanges Kläranlage Neufinsing.	79
Abbildung 45:	Querschnitt eines Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach.....	80
Abbildung 46:	Querschnitt des physikalischen Sandfangmodells (Maßstab 1:4).....	81
Abbildung 47:	Längsschnitt des physikalischen Sandfangmodells (Maßstab 1:4).	82
Abbildung 48:	Belüfterrohr im physikalischen Sandfangmodell (Schwarz, 2008).	82
Abbildung 49:	Sandzugabe ins physikalische Sandfangmodell mit Dosierschnecke (Schwarz, 2008).....	83
Abbildung 50:	Messkopf und Messprinzip einer ADV-Sonde (http://nortekusa.com/hardware/Vectrino.html , Stand Mai 2009).	84
Abbildung 51:	Beispiel für eine quadratische Regression der Messwerte der Geschwindigkeit v über die Sandfanghöhe im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einem Durchfluss von $3,5 \text{ l/s}$	86
Abbildung 52:	Mögliche Wechselwirkungen von Licht mit einem Teilchen (nach retsch-technology.de, 2009).	87
Abbildung 53:	Dispergiereinheit des Laser-Streulichtspektrometers Horiba LA-950 (nach www.retsch-technology.de , 2009).	88
Abbildung 54:	Funktionsprinzip des Laser-Streulichtspektrometers Horiba LA-950 (nach retsch-technology.de, 2009).	88

Abbildung 55:	Schematische Versuchsanordnung zur Bestimmung des Abscheidegrades von großtechnischen Sandfängen (Schwarz, 2007).....	89
Abbildung 56:	Versuchsanordnung zur Probenahme auf der Kläranlage Holzkirchen (Schwarz, 2007).....	90
Abbildung 57:	Versuchsablauf für die Kalibrierungsmessungen am physikalischen Sandfangmodell.....	92
Abbildung 58:	Versuchsablauf für Messungen der Fließgeschwindigkeit und des Abscheidegrades am physikalischen Sandfangmodell.....	95
Abbildung 59:	Querprofile 1 bis 7 und Koordinatensystem für die Strömungsmessungen im physikalischen Sandfangmodell.....	97
Abbildung 60:	Ausgewählte Querschnitte (Längsprofile 1 bis 7) für die Geschwindigkeitsmessungen im physikalischen Sandfangmodell.....	98
Abbildung 61:	Sekundärströmung v und w im Sandfang der Kläranlage München I an den Messprofilen 1,2 und 3 bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	103
Abbildung 62:	Fließgeschwindigkeit $u(z)$ im Sandfang der Kläranlage München I an den Messprofilen 0 und 3 bei den Durchflüssen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$	105
Abbildung 63:	Längsdurchströmung im Sandfang der Kläranlage München I bei einem Lufteintrag von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einem Durchfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	106
Abbildung 64:	Längsdurchströmung im Sandfang der Kläranlage München I bei einem Lufteintrag von $1 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einem Durchfluss von $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$	106
Abbildung 65:	Geschwindigkeitskomponenten v und w im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld (Mittelwert Messprofile 1-7).....	108
Abbildung 66:	Längsdurchströmung u an den Messprofilen 1 und 3 im Sandfang der Kläranlage Karlsfeld bei einem Lufteintrag von $1,9 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	109
Abbildung 67:	Normierter Vergleich zwischen den Messungen am Sandfang der Kläranlage München I und der Kläranlage Karlsfeld.....	110
Abbildung 68:	Sieblinien im Zulauf von 6 Kläranlagen bei Trockenwetter.....	111
Abbildung 69:	Sieblinien im Ablauf von 6 Kläranlagen bei Trockenwetter.....	112
Abbildung 70:	Mittlere Kornverteilung im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach (Durchflusszeit 20 min) bei Regenwetter.....	113
Abbildung 71:	Sandkonzentration $\geq 0,2 \text{ mm}$ im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Dachau mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 55 min).....	114
Abbildung 72:	Sandkonzentration $\geq 0,2 \text{ mm}$ im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Karlsfeld mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 23 min).....	115
Abbildung 73:	Sandkonzentration $\geq 0,2 \text{ mm}$ im Zulauf und im Ablauf des Sandfanges der Kläranlage Geiselbullach mit Abscheidegrad (Durchflusszeit 20 min) bei Regenwetter.....	116
Abbildung 74:	Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,2 \text{ mm}$ in Abhängigkeit von der Sandkonzentration $\geq 0,2 \text{ mm}$ im Rohabwasser.....	118
Abbildung 75:	Kornverteilung des Sandfangguts der Kläranlage München I.....	119
Abbildung 76:	Korndurchmesser im großtechnischen Maßstab und im Maßstab 1:4 verkleinerte Korngröße mit verschiedenen Ansätzen für die Sinkgeschwindigkeit.....	120
Abbildung 77:	Kornverteilungen der nach Dietrich (1982) im Maßstab 1:4 verkleinerten Sande im Zulauf der Kläranlagen Karlsfeld, Dachau und Geiselbullach (Messung mit Siebung) und Korngrößenverteilungen der gewählten Versuchssande 1, 2, 3 und 4 (Messung mit Laserbeugung).....	121

Abbildung 78:	Bestimmtheitsmaß R^2 von den Messwerte am Originalsandfang in Karlsfeld und den Messwerten im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag, der Zahl n und dem Durchmesser d_D der Düsen.	123
Abbildung 79:	Maximalgeschwindigkeit v_{\max} [m/s] im physikalischen Modell nahe der Wasseroberfläche (Messwerte bei $z = 0,76$ m) in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag.	125
Abbildung 80:	Maximale Geschwindigkeit v_{\max} im physikalischen Sandfangmodell direkt an der Wasseroberfläche ($z = 0,82$ m) in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag (extrapoliert mittels Regressionen).	126
Abbildung 81:	Maximalgeschwindigkeit v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag (Messungen).....	128
Abbildung 82:	Turbulente kinetische Energie TKE im physikalischen Sandfangmodell gemittelt über die Sandfangtiefe in Abhängigkeit von der Anzahl der Düsen und vom Lufteintrag.	129
Abbildung 83:	Form und Größe der Luftblasen im physikalischen Modell bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (140 Düsen mit $d = 0,6$ mm).....	130
Abbildung 84:	Einfluss des Lufteintrags auf die Blasengröße d_B (gemessen und gerechnet).	131
Abbildung 85:	Geschwindigkeit v in der Mitte des Querschnitts des physikalischen Sandfangmodells (Querprofil 3) bei den Luftvolumenströmen $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (Messprofile gemittelt über die Sandfanglänge). .	132
Abbildung 86:	Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} und v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag.	133
Abbildung 87:	Turbulente kinetische Energie TKE [m^2/s^2] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5$ l/s, einer Einblastiefe von $0,55$ m und den Luftvolumenströmen $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ in Fließrichtung (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).	134
Abbildung 88:	Abhängigkeit der turbulenten kinetischen Energie im physikalischen Sandfangmodell vom Lufteintrag (Mittelwert über alle Messpunkte).....	135
Abbildung 89:	Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell bei 10 Belüftern und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und bei den 6 vorderen von 10 Belüftern und einem Lufteintrag von $0,8 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	136
Abbildung 90:	Geschwindigkeitskomponente $v(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5$ l/s, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen.	137
Abbildung 91:	Maximalgeschwindigkeiten v_{\max} und v_{Sohl} im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ in Abhängigkeit von der Einblastiefe (Extrapolation der Messwerte).	139
Abbildung 92:	Turbulente kinetische Energie im Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5$ l/s, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).	140
Abbildung 93:	Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe (Mittelwert über alle Messpunkte).....	141
Abbildung 94:	Fließgeschwindigkeit $u(z)$ im Zulauf des Sandfanges (Messquerschnitt 1, Querprofil 3) im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen $1,5$ l/s, $3,5$ l/s und $5,5$ l/s und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	142
Abbildung 95:	Turbulente kinetische Energie TKE(z) am Zulauf des Sandfanges (Messquerschnitt 1, Querprofil 3) im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen $1,5$ l/s, $3,5$ l/s und $5,5$ l/s und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$. .	143

Abbildung 96:	Geschwindigkeitskomponente $u(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell in der Mitte des Sandfanges (Messquerschnitt 5, Querprofil 5) bei verschiedenen Durchflüssen und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	144
Abbildung 97:	Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge bei verschiedenen Durchflüssen [l/s] (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).	145
Abbildung 98:	Turbulente kinetische Energie TKE im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Durchfluss bei einem Luftvolumenstrom von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (Mittelwert aller Messpunkte).	146
Abbildung 99:	Fließgeschwindigkeit $u(z)$ in der Mitte des Sandfanges (Messquerschnitt 5, Querprofil 5) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und den Lufteinträgen $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	147
Abbildung 100:	Turbulente kinetische Energie am Messquerschnitt 5 (Querprofil 5) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und den Lufteinträgen $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	148
Abbildung 101:	Veränderte Querschnittsform (Rechteckquerschnitt) nach Einlegen eines Bretts.	149
Abbildung 102:	Geschwindigkeit $v(z)$ im physikalischen Sandfangmodell mit und ohne Sandfanggutrinne, bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe h_{bel} von 0,47 m.	150
Abbildung 103:	Fließgeschwindigkeit $u(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit vom Querschnitt, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Einblastiefe von 0,47 m (Messquerschnitt 4, Querprofil 3).	151
Abbildung 104:	Turbulente kinetische Energie [m^2/s^2] im physikalischen Sandfangmodell, mit und ohne Sandfanggutrinne, bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe h_{bel} von 0,47 m (Mittelwerte der Messquerschnitte 1 bis 7).	152
Abbildung 105:	Bodenabstand des Walzenmittelpunktes im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit von der Zahl der Düsen und dem Lufteintrag.	153
Abbildung 106:	Lage des Walzenmittelpunktes im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe.	153
Abbildung 107:	Abscheidegrade von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14 \text{ min}$) und einer Einblastiefe von 0,55 m.	155
Abbildung 108:	Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 3 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14 \text{ min}$), einer Einblastiefe von 0,55 m und Lufteinträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	156
Abbildung 109:	Korngrößenverteilungen von Sand 3 in den Abschnitten 1 bis 5 des physikalischen Sandfangmodells bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14 \text{ min}$), einer Einblastiefe von 0,55 m und Lufteinträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (links) und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (rechts).	157
Abbildung 110:	Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne des physikalischen Sandfangmodells, bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ($t_R = 4,5 \text{ min}$) und Lufteinträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (gestrichelte Linie) und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (durchgezogene Linie).....	158
Abbildung 111:	Gesamtabscheidegrad und Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 4 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 5,5 l/s ($t_R = 4,5 \text{ min}$) und Lufteinträgen von $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	159
Abbildung 112:	Abscheidegrad von Sand 4 im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit von der Einblastiefe bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14 \text{ min}$) und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	160

Abbildung 113:	Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 4 über die Sandfanglänge im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und verschiedenen Einblastiefen.	161
Abbildung 114:	Korngrößenverteilungen von Sand 4 in den Abschnitten 1-5 des physikalischen Sandfangmodells bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und den Einblastiefen 0,55 m (links) und 0,21 m (rechts).....	162
Abbildung 115:	Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s ($t_R = 7,14$ min), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $h_{\text{bel}} = 0,55$ m (durchgezogene Linie) sowie $h_{\text{bel}} = 0,21$ m (gestrichelte Linie).....	162
Abbildung 116:	Einfluss des Durchflusses auf den Abscheidegrad von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	163
Abbildung 117:	Abscheidegrad von Sand 3 der Korngrößen $\geq 0,1$ mm im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge, bei verschiedenen Durchflüssen und einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	164
Abbildung 118:	Korngrößenverteilung von Sand 3 im physikalischen Sandfangmodell in den Abschnitten 1 bis 5, bei den Durchflüssen von 1,5 l/s (links) und 5,5 l/s (rechts), einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.....	165
Abbildung 119:	Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne im physikalischen Sandfangmodell ohne Lufteintrag, bei den Durchflüssen 1,5 l/s ($t_R=16,7$ min) (durchgezogene Linie) und 5,5 l/s ($t_R=4,5$ min) (gestrichelte Linie).	165
Abbildung 120:	Einfluss der Korngrößenverteilung (Sand 2 und Sand 3) auf den Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s und einer Einblastiefe von 0,55 m.	166
Abbildung 121:	Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm von Sand 1, 2 und 3 im physikalischen Sandfangmodell über die Sandfanglänge, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	167
Abbildung 122:	Korngrößenverteilungen von Sand 1 (links) und Sand 3 (rechts) in den Abschnitten 1-5 des physikalischen Sandfangmodells, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	168
Abbildung 123:	Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Abscheidegrad im physikalischen Sandfangmodell, in Abhängigkeit vom Durchfluss, bei verschiedenen Lufteinträgen.	169
Abbildung 124:	Einfluss der Sandkonzentration von Sand 4 auf den Gesamtabdscheidegrad und den Abscheidegrad der Korngrößen $\geq 0,1$ mm im physikalischen Sandfangmodell, bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	170
Abbildung 125:	Sandverteilung von Sand 4 in der Sandfanggutrinne im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von 3,5 l/s, Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Sandkonzentration von 125 mg/l (durchgezogene Linie) sowie 500 mg/l (gestrichelte Linie).....	171
Abbildung 126:	Wirkungsbeziehungen in einem belüfteten Sandfang (nach Hunze, 2005).	174
Abbildung 127:	Vorgehensweise zur Berechnung von $v(y,z)$ und $w(y,z)$	175
Abbildung 128:	Vergleich zwischen extrapolierten Messwerten von v_{max} und Ansätzen von Kobus (1973) und Sawicki (2004) in Abhängigkeit vom Lufteintrag.	176
Abbildung 129:	Vergleich zwischen extrapolierten Messwerten für v_{max} und Ansätzen von Kobus (1973) und Sawicki (2004) in Abhängigkeit von der Einblastiefe.	178

Abbildung 130:	Extrapolierte Werte der Geschwindigkeit $v(y)$ an der Wasseroberfläche im physikalischen Sandfangmodell in Abhängigkeit vom Lufteintrag mit zwei angenommenen Nulldurchgängen.	179
Abbildung 131:	Verlauf der Geschwindigkeit $w(y)$ im physikalischen Sandfangmodell auf Höhe des Walzenmittelpunktes ($z = 0,56$ m) bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (Mittelwert über die Messquerschnitte 1-7).....	182
Abbildung 132:	Verlauf der Geschwindigkeit $w(z)$ [m/s] im physikalischen Modell an drei Positionen bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ mit quadratischen Regressionskurven (Mittelwert über die Messquerschnitte 1-7).....	183
Abbildung 133:	Vergleich von Messwerten (a) mit dem berechneten Geschwindigkeitsfeld (b) im physikalischen Sandfangmodell bei einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	184
Abbildung 134:	Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $v(z)$ [m/s] im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einer Einblastiefe von $0,55$ m mit Berechnung.	185
Abbildung 135:	Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $w(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einer Einblastiefe von $0,55$ m.	186
Abbildung 136:	Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $v(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einer Einblastiefe von $0,31$ m mit Berechnung.....	187
Abbildung 137:	Vergleich der gemessenen Geschwindigkeit $w(z)$ im physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einer Einblastiefe von $0,31$ m mit Berechnung.....	188
Abbildung 138:	Vergleich von Messungen von Schrimpf (1987) mit dem mathematischen Modell.....	189
Abbildung 139:	Vergleich von Messungen von Stein (1992) mit dem mathematischen Modell.	189
Abbildung 140:	Vergleich von Messungen von Stelzer et al. (2004) mit dem mathematischen Modell.....	190
Abbildung 141:	Berechnetes Geschwindigkeitsfeld bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einem Durchfluss von $3,5$ l/s und einer Einblastiefe von $0,55$ m über den ganzen Querschnitt.	191
Abbildung 142:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche ($z = 0,73$ m) bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,12$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s.	193
Abbildung 143:	Absetzlängen der Korngrößen $0,06$ mm (hellgrau), $0,1$ mm (grau) und $0,2$ mm (schwarz) nach Berechnung mit dem mathematischen Modell bei den Lufteinträgen von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (spiral förmige Linien) und $0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ (gerade Linien).	194
Abbildung 144:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche bei einer Oberflächengeschwindigkeit $v_{\max} = -0,16$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($z = 0,73$ m).....	195
Abbildung 145:	Berechnete Absetzwege von Teilchen mit den Korngrößen $0,063$ mm, $0,1$ mm und $0,2$ mm bei Zugabe nahe der Wasseroberfläche ($z = 0,73$ m), einem Durchfluss von $5,5$ l/s und einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	196
Abbildung 146:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,12$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($z = 0,55$ m).....	197
Abbildung 147:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe an der Wasseroberfläche bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von $-0,06$ m/s und einem Durchfluss von $3,5$ l/s ($z = 0,73$ m).....	198

Abbildung 148:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit v_{\max} von -0,06 m/s und einem Durchfluss von 3,5 l/s ($z = 0,55$ m).....	199
Abbildung 149:	Berechnete Partikelbahnen von Teilchen verschiedener Durchmesser bei Zugabe im Walzenmittelpunkt bei einer Oberflächengeschwindigkeit $v_{\max} = -0,16$ m/s und einem Durchfluss von 3,5 l/s ($z = 0,55$ m).....	200
Abbildung 150:	Turbulente kinetische Energie in den Sandfängen der Kläranlagen München I und Karlsfeld über die Sandfanglänge bei verschiedenen Durchflüssen und Lufteinträgen.	206
Abbildung 151:	Turbulente kinetische Energie im physikalischen Sandfangmodell bei den Durchflüssen 1,5 l/s, 3,5 l/s und 5,5 l/s und den Einblastiefen 0,55 m und 0,31 m in Abhängigkeit vom Lufteintrag.	207
Abbildung 152:	Vergleich des im physikalischen Sandfangmodell gemessenen Abscheidegrades der Partikel 0,06 mm, 0,1 mm und 0,2 mm über die Sandfanglänge ohne Lufteintrag und mit Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ mit den berechneten Partikelbahnen.	211
Abbildung 153:	Gesamtabscheidegrad in Abhängigkeit von der Sandkonzentration im physikalischen Sandfangmodell und bei den großtechnischen Messungen.	214
Abbildung 154:	Einfluss der turbulenten kinetischen Energie im physikalischen Sandfangmodell auf den Abscheidegrad.	217
Abbildung 155:	Anteile der einzelnen Verfahrensstufen am Energieverbrauch von Belebungsanlagen (nach Wagner und Loock, 2006; nach Bohn, 1997).	223
Abbildung 156:	Kosten der Belüftung in €/a eines Sandfanges mit einem Volumen von 200 m^3 in Abhängigkeit von der Einblastiefe und vom Lufteintrag.....	224
Abbildung 157:	Vorschlag eines Prüfverfahrens für den Abscheidegrad von bestehenden Sandfängen.	228
Abbildung 158:	Vorschlag eines Korngrößenbereichs für Prüfsand verändert nach DWA (2008) und Vorschlag einer Sieblinie für Prüfsand.	229
Abbildung 159:	Prinzipskizze eines Prüfverfahrens zur Messung des Abscheidegrades von Kompaktanlagen.	230
Abbildung 160:	Darstellung der turbulenten kinetischen Energie in Abhängigkeit vom Lufteintrag bei unterschiedlichen Durchflüssen und Einblastiefen.	232
Abbildung 161:	Vorschlag der Ablaufgestaltung nach DWA A 112 (2007).	239

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bemessungsgrundlagen für belüftete Sandfänge.	13
Tabelle 2:	Maßstabsfaktoren nach Froude (Patt, 1990 und Zlokarnik, 2005).....	19
Tabelle 3:	Bereiche der Blasenbildung an Düsen (Kobus, 1973).	26
Tabelle 4:	Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen an großtechnischen Sandfängen (Stein, 1992).....	37
Tabelle 5:	Gegenüberstellung verschiedener Ansätze für C_D für Kugeln (Kazanskij, 1981).	47
Tabelle 6:	Gegenüberstellung der Widerstandsbeiwerte für verschiedene Korngrößen nach unterschiedlichen Quellen.	50
Tabelle 7:	Typische Sandkonzentrationen im Abwasser bei Trockenwetter und bei Regenwetter.	55
Tabelle 8:	Statistische Kenngrößen der von verschiedenen Autoren verwendeten Prüfsande.....	63
Tabelle 9:	Abscheidegrad in Abhängigkeit verschiedener Versuchsparameter (nach Schrimpf, 1987).....	65
Tabelle 10:	Tabellarische Gegenüberstellung der belüfteten Sandfänge.	80
Tabelle 11:	Gegenüberstellung der Kalibrierversuche mit unterschiedlichen Düsenzahlen, Düsendurchmessern und Lufterträgen.	93
Tabelle 12:	Austrittsflächen der Luft im physikalischen Sandfangmodell bei unterschiedlichen Düsendurchmessern und Düsenzahlen.	94
Tabelle 13:	Gegenüberstellung von Bemessungsempfehlungen (DWA, 2008) mit bestehenden Anlagen (n = 55) (Mittelwerte und Bereich).	100
Tabelle 14:	Fließgeschwindigkeiten an den Messprofilen 1-3 im Sandfang der Kläranlage München I bei Lufterträgen von $0,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	102
Tabelle 15:	Fließgeschwindigkeiten an den Messprofilen 0 und 3 im Sandfang der Kläranlage München I bei den Durchflüssen $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ und $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$	104
Tabelle 16:	Fließgeschwindigkeiten im belüfteten Sandfang der Kläranlage Karlsfeld an den Messprofilen 1 bis 7.	107
Tabelle 17:	Zusammenstellung der Ergebnisse der Messungen der Sandkonzentrationen und der Abscheidegrade an fünf Kläranlagen.....	117
Tabelle 18:	Charakteristische Parameter der Korngrößenverteilung der vier gewählten Versuchssande.	122
Tabelle 19:	Vergleich der gemessenen Maximalgeschwindigkeit v_{\max} nahe der Wasseroberfläche (0,76 m) mit Berechnung.....	137
Tabelle 20:	Ausgangsparameter für die Berechnung von $v(z)$	181
Tabelle 21:	Randbedingungen für das Auftreffen eines Partikels auf eine Wand.	192
Tabelle 22:	Anzahl Trockenwettertage auf 7 Kläranlagen in Bayern mit Mittelwert.....	225
Tabelle 23:	Bemessung eines belüfteten Sandfanges nach verschiedenen Bemessungsansätzen....	243
Tabelle 24:	Zusammengefasste Bemessungsempfehlungen.	250

14 Anhang

Tabelle A - 1:	Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Dachau	269
Tabelle A - 2:	Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Karlsfeld	270
Tabelle A - 3:	Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Holzkirchen	273
Tabelle A - 4:	Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Geiselbullach	274
Tabelle A - 5:	Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Neufinsing	275
Tabelle A - 6:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,25 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 0.	277
Tabelle A - 7:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 0.	278
Tabelle A - 8:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 0, Zusätzliche Belüfer im vorderen Bereich.	279
Tabelle A - 9:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 1.	281
Tabelle A - 10:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 1,0 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 1.	282
Tabelle A - 11:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 2.	283
Tabelle A - 12:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 1,0 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 2.	284
Tabelle A - 13:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 3.	285
Tabelle A - 14:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 1,0 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 3.	286
Tabelle A - 15:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,25 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 3.	287
Tabelle A - 16:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 3.	288
Tabelle A - 17:	Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m ³ /s, Lufteintrag 0,5 Nm ³ /m ³ h, Messprofil 3, Zusätzliche Belüfter vorne.	289
Tabelle A - 18:	Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm ³ /m ³ h, Geschwindigkeit u, Messprofil 1-7.....	291
Tabelle A - 19:	Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm ³ /m ³ h, Geschwindigkeit v, Messprofil 1-7.....	292
Tabelle A - 20:	Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm ³ /m ³ h, Geschwindigkeit w, Messprofil 1-7.....	293
Tabelle A - 21:	Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm ³ /m ³ h, turbulente kinetische Energie, Messprofil 1-7.....	294
Tabelle A - 22:	Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlichem Lufteintrag bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Einblastiefe von 0,55 m.	295
Tabelle A - 23:	Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlichem Durchfluss und einer Einblastiefe von 0,55 m.	295
Tabelle A - 24:	Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlicher Einblastiefe bei einer Durchflusszeit von 7,14 min.	296

Tabelle A - 25:	Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlicher Sandkonzentration bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und Sand 3.	296
Tabelle A - 26:	Gesamtabscheidegrad von Sand 1 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	297
Tabelle A - 27:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 1 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von $2,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	297
Tabelle A - 28:	Gesamtabscheidegrad von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 131 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.601 \text{ g}$).	297
Tabelle A - 29:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 131 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.601 \text{ g}$).	298
Tabelle A - 30:	Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 127 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.403 \text{ g}$).	298
Tabelle A - 31:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 127 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.403 \text{ g}$).	299
Tabelle A - 32:	Gesamtabscheidegrad von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Sandzugabe von 6.601 g und einer Einblastiefe von 0,55 m.	299
Tabelle A - 33:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Sandzugabe von 6.601 g und einer Einblastiefe von 0,55 m.	300
Tabelle A - 34:	Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	300
Tabelle A - 35:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von 0,55 m.	300
Tabelle A - 36:	Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Einblastiefe von 0,55 m.	301
Tabelle A - 37:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Einblastiefe von 0,55 m.	301
Tabelle A - 38:	Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 127 mg/l	301
Tabelle A - 39:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 127 mg/l	302
Tabelle A - 40:	Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l	302
Tabelle A - 41:	Abscheidegrad $\geq 0,1 \text{ mm}$ von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l	303
Tabelle A - 42:	Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l	303

Tabelle A - 43:	Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l.	303
Tabelle A - 44:	Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell mit Rechteckquerschnitt bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 156,7 mg/l.	304
Tabelle A - 45:	Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand am physikalischen Sandfangmodell mit Rechteckquerschnitt bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 156,7 mg/l.	304

Tabelle A - 1: Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Dachau.

Parameter/Probenr.	1	3	5	7	9	Mittelwert
Zulauf, m ³ /h	672,5	640,4	641,5	606,2	672,5	646,6
Zulauf, l/s	186,8	177,9	178,2	168,4	186,8	179,6
Uhrzeit	10:30	11:15	12:00	12:45	13:30	
Probe, l	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	
Probe, trocken, g	39,516	48,42	20,52	14,189	7,981	26,1
Glühverlust, %	46,5	78,5	68,3	80,5	67,2	68,2
m _{Sand} , g	21,1	10,4	6,5	2,8	2,6	8,7
c _{Sand} , mg/l	176,1	86,7	54,2	23,1	21,8	72,4
c _{Sand} ≥ 0,2 mm	129,1	37,7	30,5	6,2	13,2	43,3
Parameter/Probenr.	2	4	6	8	10	Mittelwert
Ablauf	786,2	632,9	646,2	640,4	540,0	649,2
Ablauf	218,4	175,8	179,5	177,9	150,0	180,3
Uhrzeit	10:45	11:30	12:15	13:00	13:45	
Probe, l	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	
Probe, trocken, g	13,129	22,91	35,51	21,315	20,461	22,7
Glühverlust, %	65,0	85,9	79,6	91,8	86,1	81,7
m _{Sand} , g	4,6	3,2	7,3	1,8	2,8	3,9
c _{Sand} , mg/l	38,3	27,0	60,5	14,6	23,6	32,8
c _{Sand} ≥ 0,2 mm	7,5	5,3	8,3	3,2	3,4	5,5
Abscheidegrad	94,2	86,0	72,8	47,8	74,5	75,2
Abscheidegrad	95,9	78,0	89,4	45,8		77,3
Abscheidegrad Mittelwert						54,7
Abscheidegrad ≥ 0,2mm Mittelwert						87,2

Tabelle A - 2: Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Karlsfeld.

Zulauf Kläranlage Karlsfeld		1	3	5	7	9	11	Mittelwert
Uhrzeit		10:20	10:45	11:45	12:10	12:30	13:00	
Durchfluss	m ³ /h	244,4	267,5	222,5	243,0	221,0	234,0	238,7
Durchfluss	l/s	67,9	74,3	61,8	67,5	61,4	65,0	66,3
Probe	l	120	120	120	120	120	120	120
Sand in Probe	g	3,3	3,0	14,0	2,0	2,0	1,4	4,3
Sandkonzentration	mg/l	27,8	25,2	116,7	16,3	16,9	12,0	35,8
Anteil ≤ 4 mm	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Anteil ≤ 2 mm	%	100,0	97,4	100,0	90,0	95,7	94,1	96,2
Anteil ≤ 1 mm	%	100,0	94,7	99,3	90,0	91,3	88,2	93,9
Anteil ≤ 0,5 mm	%	100,0	89,5	94,2	85,0	87,0	76,5	88,7
Anteil ≤ 0,315 mm	%	96,9	81,6	89,2	75,0	82,6	64,7	81,7
Anteil ≤ 0,2 mm	%	90,6	68,4	83,5	65,0	78,3	52,9	73,1
Anteil ≤ 0,1 mm	%	56,2	36,8	64,0	45,0	60,9	23,5	47,8
c _{Sand} < 4 mm	mg/l	27,8	25,2	116,7	16,3	16,9	12,0	35,8
c _{Sand} < 2 mm	mg/l	27,8	24,6	116,7	14,7	16,1	11,3	35,2
c _{Sand} < 1 mm	mg/l	27,8	23,9	115,8	14,7	15,4	10,6	34,7
c _{Sand} < 0,5 mm	mg/l	27,8	22,6	110,0	13,9	14,7	9,2	33,0
c _{Sand} < 0,315 mm	mg/l	26,9	20,6	104,1	12,2	13,9	7,8	30,9
c _{Sand} < 0,2 mm	mg/l	25,2	17,3	97,4	10,6	13,2	6,4	28,3
c _{Sand} < 0,1 mm	mg/l	15,6	9,3	74,7	7,3	10,3	2,8	20,0
c _{Sand} ≥ 0,2 mm	%	9,4	31,6	16,5	35,0	21,7	47,1	26,9
	g	0,3	1,0	2,3	0,7	0,4	0,7	0,9
	mg/l	2,6	8,0	19,3	5,7	3,7	5,7	7,5

Mittelwerte Ablauf		10:42	11:10	12:07	12:30	12:55	MW
Durchfluss	m³/h	259,74	268,83	238,5	233,28	225	
Durchfluss	l/s	72,15	74,68	66,25	64,8	62,5	
Probe	l	120	120	120	120	120	
Sand in Probe	g	3,4	3,58	4,6	3,8	1,8	
Sandkonzentration	mg/l	28,5	29,80	38,1	31,7	15,4	
Anteil ≤ 4 mm	%	100,0	100,00	100,0	100,0	100,0	
Anteil ≤ 2 mm	%	98,5	97,79	99,0	97,3	98,3	
Anteil ≤ 1 mm	%	98,5	97,79	99,0	95,7	91,7	
Anteil ≤ 0,5 mm	%	95,6	92,84	95,9	93,7	91,7	
Anteil ≤ 0,315 mm	%	94,1	89,55	91,7	90,0	90,0	
Anteil ≤ 0,2 mm	%	94,1	87,92	86,5	84,7	81,7	
Anteil ≤ 0,1 mm	%	81,1	73,63	74,0	72,0	65,0	
c _{Sand} ≤ 4 mm	mg/l	28,5	29,80	38,1	31,7	15,4	
c _{Sand} ≤ 2 mm	mg/l	28,1	29,20	37,7	30,9	15,0	
c _{Sand} ≤ 1 mm	mg/l	28,1	29,20	37,7	30,5	14,3	
c _{Sand} ≤ 0,5 mm	mg/l	27,3	27,78	36,5	29,7	14,3	
c _{Sand} ≤ 0,315 mm	mg/l	26,9	26,78	34,9	28,5	13,9	
c _{Sand} ≤ 0,2 mm	mg/l	26,9	26,18	33,0	26,9	12,7	
c _{Sand} ≤ 0,1 mm	mg/l	23,2	21,95	28,2	23,0	10,4	
Sand > 0,2 mm	%	5,88	12,08	13,52	15,33	18,33	
	g	0,20	0,43	0,62	0,58	0,34	
	mg/l	1,7	3,60	5,15	4,85	2,83	3,62
Abscheidegrad η	%	35,66	54,80	73,30	15,04	22,94	40,35

Tabelle A - 3: Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Holzkirchen.

Parameter/Probenr.	1	3	5	7	9	Mittelwert
Zulauf, m ³ /h	178	178	172	181	181	178
Zulauf, l/s	49,4	49,4	47,8	50,3	50,3	49,4
Uhrzeit	10:40	11:00	11:25	12:00	12:30	
Probe, l	120	120	120	120	120	120
Probe, trocken, m	6,8	23,8	1,6	6,5	26,2	13,0
GV, %	88,9	86,7	77,3	89,1	87,8	86,0
m _{Sand} , g	0,8	3,2	0,4	0,7	3,2	1,6
c _{Sand} , mg/l	6,3	26,4	3,1	5,9	26,6	13,7
c _{Sand} ≥ 0,2 mm	2,1	7,1	1,9	0,8	9,1	4,2
Parameter/Probenr.	2	4	6	8	10	Mittelwert
Ablauf, m ³ /h	178	172	172	181	181	176,8
Ablauf, l/s	49,4	47,8	47,8	50,3	50,3	49,1
Uhrzeit	10:50	11:10	11:35	12:10	12:40	
Probe, l	120	120	120	120	120	120
Probe, trocken, m	18,4	14,5	10,8	27,0	44,1	23,0
GV, %	90,1	90,0	90,0	90,6	49,0	81,9
m _{Sand} , g	1,8	1,4	1,1	2,5	22,5	5,9
c _{Sand} , mg/l	15,2	12,0	9,0	21,1	187,5	14,3
c _{Sand} ≥ 0,2 mm	3,0	2,8	1,9	3,1	5,8	3,4
Abscheidegrad	-44,0	60,3	-3,9	-270,6	35,8	48,0
Abscheidegrad	8,1	56,2	-212,8			32,1
Abscheidegrad gesamt						-5,0
Abscheidegrad ≥ 0,2mm Mittelwert						20,3

Tabelle A - 5: Messung des Abscheidegrades der Kläranlage Neufinsing.

Zulauf Kläranlage Neufinsing	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	MW
Uhrzeit	09:45	10:10	10:35	11:00	11:20	11:45	12:10	12:30	13:00	13:30	
Durchfluss, m ³ /h	514,8	514,8	817,2	817,2	817,2	817,2	849,6	849,6	849,6	849,6	769,7
Durchfluss, l/s	143,0	143,0	227,0	227,0	227,0	227,0	236,0	236,0	236,0	236,0	213,8
Probe, l	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
Sand in Probe, g	0,6	1,9	3,7	3,0	2,0	3,6	2,0	1,4	2,8	3,6	2,5
Sandkonzentration, mg/l	4,9	15,7	30,7	25,3	17,1	30,4	17,0	11,8	23,0	30,3	20,6
Anteil < 0,2 mm, %	90,6	78,9	83,3	57,1	80,0	52,9	62,5	64,7	66,7	76,7	71,4
Anteil ≥ 0,2 mm, %	9,4	21,1	16,7	42,9	20,0	47,1	37,5	35,3	33,3	23,3	28,6
m _{Sand} ≥ 0,2 mm, g	0,1	0,4	0,6	1,3	0,4	1,7	0,8	0,5	0,9	0,8	0,8
c _{Sand} ≥ 0,2 mm, mg/l	0,5	3,3	5,1	10,8	3,4	14,3	6,4	4,2	7,7	7,0	6,3

Tabelle A - 6: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,25 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 0.

z	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
M	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,1	0,0455	0,138	-0,001	0,0473	0,0517	0,048	0,003621535
4,0	0,1016	0,0992	0,0684	0,0554	0,0615	0,054	0,004894525
3,9	0,0583	0,1104	0,0028	0,0269	0,0374	0,029	0,00149043
3,8	0,1492	0,1102	0,0294	0,0553	0,0355	0,039	0,00290415
3,7	0,2089	0,1082	0,0194	0,0521	0,048	0,038	0,003246485
3,6	0,0576	0,1351	0,0192	0,082	0,0486	0,047	0,005661625
3,5	0,0727	0,0867	0,0287	0,0674	0,0292	0,033	0,0032422
3,4	0,1608	0,1062	0,009	0,0647	0,0366	0,037	0,003432605
3,3	0,1611	0,1093	0,0955	0,0697	0,0353	0,049	0,004267335
3,2	0,0644	0,0402	0,0527	0,0626	0,0468	0,034	0,0036325
3,1	0,2294	0,1088	0,0517	0,0426	0,033	0,051	0,002737125
3,0	0,1456	0,1008	0,0751	0,0643	0,0326	0,048	0,00373627
2,9	0,231	0,0488	0,044	0,0375	0,0503	0,045	0,00298969
2,8	0,1554	0,1026	0,1086	0,0552	0,051	0,049	0,0040442
2,7	0,1769	0,0716	0,0662	0,0505	0,0454	0,044	0,00326931
2,6	0,1271	0,0810	0,0087	0,0469	0,044	0,057	0,003669585
1,505	0,0942	0,0309	0,0159	0,0487	0,0563	0,016	0,002897095
1,405	0,1375	0,0074	0,0437	0,0393	0,0493	0,044	0,002942335
1,305	0,0702	-0,0287	-0,0544	0,0336	0,0387	-0,050	0,002793005
1,205	0,0505	-0,0088	-0,0338	0,0382	0,0306	-0,030	0,00176902
1,105	0,0574	-0,0236	-0,0318	0,0155	0,0177	-0,03	0,00078239
1,005	0,0497	-0,0045	0,0058	0,0294	0,0330	0,006	0,0009935
0,905	0,0596	-0,0662	-0,0264	0,0401	0,0372	-0,03	0,001844405
0,805	0,0647	-0,0023	-0,0212	0,0512	0,0334	-0,02	0,00209322
0,705	-0,0025	0,0164	-0,0359	0,0395	0,0546	-0,04	0,00291511
0,605	0,0308	-0,0128	-0,0322	0,0332	0,0288	-0,03	0,00148426
0,505	0,0291	0,0263	-0,0555	0,0315	0,0297	-0,06	0,002477295
0,405	-0,0298	-0,0541	-0,0092	0,0356	0,0259	-0,01	0,001011405
0,305	-0,0426	-0,0785	0,0000	0,0362	0,0321	0,00	0,001170425
0,205	-0,0333	-0,0278	-0,0182	0,0527	0,0593	-0,02	0,00331251
0,105	-0,0768	-0,0242	0,0227	0,0333	0,0351	0,023	0,001428095

Tabelle A - 7: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 0.

z	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,1	0,1406	0,1331	0,0747	0,1377	0,0864	0,064	0,015286805
4,0	0,3538	0,1008	0,0091	0,0768	0,0806	0,045	0,007196345
3,9	0,2918	0,1231	0,0449	0,0763	0,0688	0,065	0,007377085
3,8	0,2752	0,1354	0,0316	0,1056	0,0703	0,052	0,009409145
3,7	0,3598	0,1551	0,0387	0,0566	0,0408	0,058	0,004133545
3,6	0,3598	0,1157	0,0585	0,0487	0,0502	0,055	0,00396387
3,5	0,386	0,1181	0,0290	0,0389	0,0372	0,032	0,00195097
3,4	0,3833	0,1471	0,0337	0,0423	0,0403	0,029	0,00212719
3,3	0,3825	0,1710	0,0461	0,064	0,0444	0,045	0,004023805
3,2	0,3953	0,1350	0,0289	0,0406	0,0493	0,033	0,00259387
3,1	0,3181	0,1171	0,0692	0,2379	0,1051	0,06	0,035639255
3,0	0,4048	0,1642	0,0568	0,0600	0,0449	0,049	0,004028185
2,9	0,3806	0,1369	0,0709	0,0554	0,0531	0,045	0,003974965
2,8	0,2986	0,1131	0,0755	0,1338	0,0906	0,079	0,016152245
2,7	0,3412	0,1149	0,0842	0,0566	0,0554	0,054	0,004588965
2,6	0,2894	0,1200	0,0651	0,0605	0,0938	0,068	0,00854815
1,505	0,0152	0,0805	-0,0155	0,0351	0,052	-0,02	0,00208813
1,405	0,0698	0,0387	0,0048	0,0424	0,0781	0,005	0,003960205
1,305	0,0686	0,0224	0,0054	0,0301	0,0326	0,005	0,000998965
1,205	0,0379	-0,0144	-0,0011	0,0163	0,0276	-0	0,00051433
1,105	0,0180	-0,0463	0,0304	0,0266	0,0295	0,03	0,001250985
1,005	0,0370	-0,0066	-0,0271	0,0196	0,0236	-0,03	0,000837765
0,905	0,0016	-0,0083	0,0036	0,0329	0,0261	0,004	0,00088829
0,805	0,0187	0,0237	0,0232	0,0383	0,0319	0,023	0,00151137
0,705	-0,0369	-0,0495	-0,0289	0,0432	0,0334	-0,03	0,001908505
0,605	-0,0437	-0,046	-0,0224	0,0214	0,0384	-0,02	0,00121714
0,505	0,0087	-0,0758	0,0084	0,0236	0,0305	0,008	0,000778885
0,405	-0,0155	-0,054	-0,0158	0,0182	0,0396	-0,02	0,00107452
0,305	0,0227	-0,0365	-0,0153	0,0676	0,0505	-0,02	0,00367705
0,205	0,0055	-0,0261	-0,0013	0,0240	0,0335	-0	0,00084997
0,105	0,0078	-0,0677	0,0275	0,0365	0,0284	0,028	0,00144753
0,005	-0,0885	-0,1221	0,0475	0,0423	0,041	0,048	0,00286327

Tabelle A - 8: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 0, Zusätzliche Belüfer im vorderen Bereich.

z	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,3	0,0883	0,2712	-0,0037	0,0745	0,0805	0,066	0,00818007
4,2	0,0179	0,2089	0,0006	0,0728	0,129	0,064	0,013024825
4,1	0,0154	0,1941	0,0178	0,0778	0,1088	0,086	0,01266036
4,0	0,0499	0,1294	-0,0352	0,0434	0,0677	0,056	0,00478467
3,9	0,0985	0,0925	-0,0185	0,0814	0,0633	0,057	0,006918205
3,8	0,1107	0,1009	-0,0415	0,0582	0,0616	0,066	0,0057689
3,7	0,1554	0,0971	-0,0279	0,0544	0,0511	0,048	0,003946905
3,6	0,138	0,1057	-0,0093	0,0815	0,0898	0,048	0,008486025
3,5	0,1594	0,0330	0,0039	0,0562	0,0484	0,050	0,00398058
3,4	0,168	0,0814	-0,0132	0,0560	0,0617	0,064	0,00550029
3,3	0,1254	0,0480	0,0079	0,0624	0,0639	0,068	0,00628013
3,2	0,1709	0,0453	0,0069	0,0842	0,0636	0,063	0,00756442
3,1	0,2077	0,0968	0,0150	0,0661	0,0511	0,047	0,00460413
3,0	0,1811	0,0933	0,0080	0,058	0,0549	0,064	0,005262685
2,9	0,1594	0,0742	0,0171	0,0707	0,0511	0,071	0,00629703
2,8	0,0989	0,0721	0,0354	0,0477	0,0616	0,054	0,004471405
2,7	0,1023	0,0332	-0,0093	0,0473	0,0587	0,073	0,005527935
2,6	0,1354	0,0950	0,0105	0,0582	0,0453	0,067	0,004991045
2,5	0,0841	0,1123	0,0375	0,052	0,0483	0,037	0,00318457
2,4	0,1267	0,1140	0,0496	0,0576	0,0424	0,051	0,003863365
2,3	0,1346	0,0354	0,0552	0,0364	0,0266	0,033	0,001570705
2,2	0,0978	0,0979	0,0134	0,0382	0,0239	0,050	0,00225027
2,1	0,1229	0,0326	0,0419	0,0330	0,0307	0,035	0,001642325
2,0	0,0975	0,0641	0,0150	0,0399	0,0379	0,051	0,00282493
1,9	0,1067	0,0694	-0,0279	0,0267	0,0278	0,047	0,001837985
1,8	0,0661	0,0304	0,0080	0,0244	0,0234	0,024	0,000847585
1,7	-0,0303	0,0144	0,0235	0,0308	0,0279	0,016	0,000988345
1,6	0,0286	-0,0550	0,0754	0,0302	0,0494	0,027	0,002048845
1,5	-0,0361	-0,0342	0,0337	0,0550	0,0631	0,040	0,004287385
1,4	0,0495	-0,0423	0,0716	0,0436	0,0323	0,030	0,00190725
1,3	-0,0249	0,0393	-0,0463	0,0649	0,0579	0,050	0,005037215
1,2	-0,0019	-0,0628	-0,0856	0,0454	0,0646	0,061	0,004983765
1,505	-0,016	0,0100	-0,0074	0,0375	0,041	0,049	0,002753945

1,405	0,0302	-0,0090	-0,0503	0,0365	0,031	0,033	0,00167475
1,305	0,0406	-0,0586	-0,0295	0,0321	0,030	0,060	0,002789285
1,205	-0,0004	-0,0658	0,0445	0,0432	0,0315	0,034	0,00201749
1,105	-0,0129	-0,0700	0,0297	0,074	0,0611	0,048	0,005766225
1,005	0,0454	-0,0632	-0,0855	0,0432	0,0602	0,055	0,004274185
0,905	0,0184	-0,0798	0,0082	0,0464	0,0301	0,044	0,00247561
0,805	0,0448	-0,0491	-0,0541	0,0594	0,0495	0,038	0,00371511
0,705	0,0097	-0,0590	-0,0220	0,0525	0,0482	0,034	0,003117745
0,605	0,0199	-0,0416	-0,0378	0,059	0,0483	0,041	0,003747445
0,505	-0,0014	-0,1445	0,0345	0,0341	0,0367	0,036	0,001906455
0,405	0,0049	-0,1376	0,0076	0,0429	0,0384	0,034	0,002242305
0,305	-0,0256	-0,1393	0,0319	0,0717	0,0441	0,050	0,00481293
0,205	-0,0218	-0,1445	0,0545	0,0525	0,0361	0,040	0,00282175
0,105	-0,095	-0,1507	0,0474	0,053	0,0393	0,043	0,003084125
0,005	-0,0383	-0,1389	0,1027	0,0366	0,0411	0,041	0,002346705

Tabelle A - 9: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 1.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,1333	0,0949	-0,002	0,0591	0,0767	0,057	0,00630097
3,6	0,0979	0,0876	0,0358	0,0469	0,0605	0,037	0,00361074
3,5	0,1461	0,0459	0,0599	0,0545	0,0711	0,043	0,00492438
3,4	0,0943	0,117	0,037	0,0544	0,0424	0,048	0,00350669
3,3	0,2284	0,0475	0,082	0,0952	0,0495	0,041	0,00661363
3,2	0,1805	0,0915	0,078	0,0698	0,0441	0,042	0,00427371
3,1	0,1588	0,0484	0,064	0,0426	0,043	0,05	0,00306196
3,0	0,1447	0,0586	0,0993	0,04	0,0299	0,051	0,00253225
2,9	0,1354	0,0518	0,07	0,0247	0,0241	0,026	0,00092313
2,8	0,1929	0,0199	0,1228	0,0666	0,0596	0,046	0,00503354
2,7	0,1504	0,0942	0,0937	0,091	0,0416	0,056	0,00659626
2,6	0,1782	0,0568	0,1584	0,0912	0,0625	0,068	0,00841027
2,5	0,1867	0,0647	0,0852	0,0735	0,0623	0,051	0,00596275
2,4	0,1337	0,0179	0,063	0,0476	0,0457	0,041	0,00302173
2,3	0,1497	-0,0099	0,0461	0,046	0,0462	0,046	0,00316035
2,2	0,2136	-0,0404	0,0855	0,0519	0,0499	0,058	0,00429126
1,505	0,1406	0,0023	0,0286	0,0366	0,0377	0,029	0,00178941
1,405	0,1065	-0,0468	0,0524	0,0342	0,03	0,052	0,0024077
1,305	0,1138	-0,0398	0,0639	0,0443	0,0434	0,064	0,00396463
1,205	0,0737	-0,0424	0,062	0,0344	0,0367	0,062	0,00318713
1,105	0,0318	-0,1043	0,0718	0,0517	0,055	0,072	0,00542657
1,005	0,0032	-0,1342	0,0401	0,0508	0,0465	0,04	0,00317545
0,905	-0,0012	-0,1106	-0,022	0,0476	0,0377	-0,02	0,00208553
0,805	0,0274	-0,0969	0,0628	0,041	0,0411	0,063	0,00365703
0,705	-0,0468	-0,1196	0,0195	0,0444	0,0536	0,02	0,00261229
0,605	-0,0571	-0,1273	0,0223	0,0709	0,0568	0,022	0,00437517
0,505	-0,0787	-0,1459	0,0026	0,0523	0,0598	0,003	0,00315905
0,405	-0,0795	-0,1241	0,0277	0,0362	0,0448	0,028	0,00204239
0,305	-0,062	-0,1587	0,0353	0,0426	0,0563	0,035	0,00311527
0,205	-0,1164	-0,1151	0,0068	0,0437	0,0541	0,007	0,00244137
0,105	-0,096	-0,0993	0,012	0,0462	0,026	0,012	0,00147722
0,005	-0,1388	-0,1002	-0,0002	0,0517	0,0415	0	0,00219759

Tabelle A - 10: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 1,0 Nm³/m³h, Messprofil 1.

z	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,1362	0,1154	-0,0015	0,0717	0,0559	0,048	0,005289655
3,6	0,1369	0,1282	0,0186	0,0346	0,0345	0,04	0,002009785
3,5	0,0769	0,0988	0,048	0,0689	0,0672	0,073	0,00730333
3,4	0,1682	0,1011	0,0724	0,0563	0,0635	0,038	0,00433825
3,3	0,1387	0,1036	-0,0009	0,0394	0,0527	0,048	0,00331203
3,2	0,1352	0,1035	0,0681	0,0485	0,037	0,046	0,00289575
3,1	0,1563	0,0671	0,0967	0,0501	0,042	0,041	0,002985725
3,0	0,1663	0,0209	0,055	0,0401	0,0423	0,06	0,00348667
2,9	0,2327	-0,0338	0,0422	0,0717	0,066	0,051	0,006028625
2,8	0,1985	0,0696	0,1082	0,0808	0,0636	0,061	0,0071473
2,7	0,1977	0,0524	0,04	0,0689	0,061	0,067	0,006465225
2,6	0,2252	-0,059	0,0523	0,0546	0,0521	0,083	0,006308905
2,5	0,2285	-0,0086	0,0268	0,0528	0,052	0,065	0,00487144
2,4	0,1863	-0,0462	0,05	0,0539	0,0557	0,055	0,004532895
2,3	0,1501	0,0359	0,0049	0,0464	0,0371	0,039	0,00252909
2,2	0,2167	-0,0269	0,0759	0,0634	0,0465	0,056	0,00465331
1,505	-0,0565	-0,0251	0,0253	0,0441	0,08	0,025	0,00449245
1,405	-0,0035	-0,0565	0,0229	0,0591	0,0792	0,023	0,00514493
1,305	0,0441	-0,1899	0,0119	0,0775	0,0556	0,012	0,00461961
1,205	0,1244	-0,0925	0,0213	0,0452	0,0602	0,021	0,003060385
1,105	0,0484	-0,0637	0,0267	0,0887	0,0754	0,027	0,00713287
1,005	0,0912	-0,1065	0,0302	0,04	0,0413	0,03	0,002108865
0,905	0,0187	-0,0937	0,0523	0,0414	0,0573	0,052	0,00386627
0,805	0,0591	-0,147	0,0755	0,0388	0,0355	0,076	0,00423297
0,705	-0,0441	-0,1917	0,0145	0,0607	0,0441	0,015	0,002919775
0,605	-0,0075	-0,1681	0,0511	0,0432	0,0561	0,051	0,00381233
0,505	-0,0393	-0,1198	0,0501	0,0835	0,0658	0,05	0,00690595
0,405	-0,0232	-0,1635	0,0258	0,0635	0,0753	0,026	0,00518399
0,305	-0,1044	-0,1451	-0,0032	0,0741	0,0492	-0	0,003960845
0,205	-0,1037	-0,1931	0,0577	0,0552	0,0663	0,058	0,00538601
0,105	-0,1801	-0,1996	-0,0019	0,0578	0,0596	-0	0,003448305
0,005	-0,1145	-0,1749	-0,0065	0,1061	0,099	-0,01	0,01055023

Tabelle A - 11: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 2.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,1821	0,2046	0,0094	0,0802	0,1043	0,067	0,01090647
3,6	0,121	0,0956	-0,0151	0,0761	0,0604	0,058	0,00638433
3,5	0,0872	0,1107	0,0054	0,0814	0,0711	0,074	0,00857119
3,4	0,0874	0,0408	-0,0412	0,038	0,0342	0,036	0,001951225
3,3	0,1102	0,0221	-0,0526	0,0365	0,0466	0,03	0,00221095
3,2	0,1228	0,0173	-0,0454	0,0281	0,0361	0,037	0,001712535
3,1	0,0981	-0,0183	-0,0356	0,0427	0,0295	0,033	0,00190455
3,0	0,1655	-0,0427	-0,0236	0,0319	0,0514	0,038	0,00253291
2,9	0,1824	-0,0815	-0,0518	0,0355	0,0423	0,037	0,002190895
2,8	0,1879	-0,0551	-0,015	0,0519	0,0426	0,037	0,002923965
2,7	0,1541	-0,0625	-0,0513	0,0569	0,0486	0,05	0,00406483
2,6	0,1634	-0,0873	-0,0409	0,0448	0,0471	0,047	0,003198505
2,5	0,1459	-0,0406	-0,0093	0,0362	0,0426	0,034	0,00213382
2,4	0,1717	-0,0781	-0,0024	0,0387	0,047	0,038	0,002582965
2,3	0,2014	-0,0897	-0,0249	0,0391	0,0434	0,045	0,00271419
2,2	0,1867	-0,0891	-0,0188	0,0561	0,037	0,048	0,003390985
1,505	0,107	-0,1533	0,039	0,0753	0,0495	0,039	0,00482067
1,405	0,089	-0,0987	-0,0336	0,0656	0,0432	-0,03	0,00364928
1,305	0,0608	-0,1292	0,0561	0,061	0,0656	0,056	0,005585785
1,205	0,0089	-0,1924	0,047	0,0719	0,061	0,047	0,005549805
1,105	-0,0092	-0,1726	0,0173	0,0462	0,0552	0,017	0,002740385
1,005	0,0322	-0,1751	0,02	0,0676	0,0496	0,02	0,00371496
0,905	0,0644	-0,1077	-0,0542	0,0709	0,0912	-0,05	0,008140945
0,805	0,0036	-0,1791	0,0643	0,057	0,053	0,064	0,005096245
0,705	0,0198	-0,1368	-0,063	0,0387	0,0602	-0,06	0,004545365
0,605	0,0022	-0,2301	0,116	0,0496	0,0639	0,116	0,009999685
0,505	0,001	-0,1728	0,0458	0,0729	0,0586	0,046	0,005423005
0,405	-0,0157	-0,0267	-0,0316	0,0491	0,0643	-0,03	0,00377193
0,305	-0,0939	-0,2174	0,0455	0,0487	0,043	0,046	0,00314547
0,205	-0,0786	-0,2315	0,0057	0,0758	0,0389	0,006	0,00364567
0,105	-0,0434	-0,2044	0,0271	0,0755	0,0365	0,027	0,003883455
0,005	-0,0166	-0,1491	0,0102	0,0391	0,0454	0,01	0,001847005

Tabelle A - 12: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 1,0 Nm³/m³h, Messprofil 2.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,0132	0,179	-0,0494	0,0694	0,048	0,048	0,004707385
3,6	0,0259	0,1545	-0,0226	0,054	0,0525	0,041	0,003693105
3,5	0,0617	0,1517	-0,0372	0,1067	0,1113	0,084	0,01543111
3,4	0,0902	0,0733	-0,0258	0,0361	0,0344	0,03	0,00169629
3,3	0,132	0,0363	-0,018	0,0383	0,0445	0,038	0,00244557
3,2	0,137	-0,0032	-0,0809	0,0721	0,063	0,042	0,005448985
3,1	0,1528	-0,0303	-0,0486	0,0459	0,0436	0,035	0,00261989
3,0	0,1516	-0,0506	-0,1096	0,0948	0,0571	0,058	0,00782317
2,9	0,1979	-0,0046	-0,0327	0,088	0,0542	0,052	0,00669282
2,8	0,1721	0,021	-0,0289	0,0496	0,0492	0,046	0,003475525
2,7	0,1783	-0,0623	-0,0575	0,0633	0,0443	0,055	0,00448621
2,6	0,1949	-0,0285	-0,0483	0,0325	0,0373	0,036	0,00187177
2,5	0,2337	-0,0155	-0,0459	0,0432	0,0627	0,048	0,00405557
2,4	0,2093	-0,0238	-0,0472	0,0267	0,0365	0,036	0,001666975
2,3	0,2179	-0,0218	-0,0303	0,0401	0,048	0,054	0,00343025
2,2	0,2371	-0,1134	-0,04	0,0623	0,0403	0,043	0,00369447
1,505	0,1345	-0,052	-0,0534	0,0848	0,0883	-0,05	0,008919745
1,405	0,1543	-0,0737	0,0175	0,0738	0,0656	0,018	0,005028025
1,305	0,1366	-0,1137	-0,0147	0,0656	0,0731	-0,01	0,00493153
1,205	0,0929	-0,1433	-0,0403	0,0756	0,0737	-0,04	0,00638557
1,105	0,1161	-0,1245	0,0266	0,0598	0,0495	0,027	0,003366925
1,005	0,0636	-0,125	0,0084	0,0744	0,0775	0,008	0,005806085
0,905	0,0205	-0,1258	-0,0136	0,0632	0,0692	-0,01	0,00448392
0,805	0,0352	-0,1913	0,0028	0,1091	0,1107	0,003	0,01208257
0,705	0,0175	-0,127	0,0175	0,0692	0,0599	0,018	0,00434145
0,605	0,0044	-0,1825	0,0183	0,0829	0,0861	0,018	0,007310255
0,505	0,029	-0,1985	-0,0059	0,0922	0,048	-0,01	0,005419825
0,405	-0,0387	-0,274	0,0275	0,0778	0,069	0,028	0,005785045
0,305	-0,0341	-0,2473	0,0329	0,062	0,0518	0,033	0,003804825
0,205	-0,0251	-0,2315	0,0323	0,0928	0,1059	0,032	0,01043497
0,105	-0,0653	-0,226	0,0266	0,0859	0,0679	0,027	0,00634839
0,005	-0,0191	-0,2804	0,0042	0,1106	0,0942	0,004	0,01056182

Tabelle A - 13: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 3.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,0572	0,2198	-0,0103	0,0595	0,0772	0,072	0,00732049
3,6	0,0559	0,1577	-0,0177	0,0566	0,0395	0,041	0,003222405
3,5	0,0742	0,1908	-0,0006	0,0575	0,0628	0,074	0,006348265
3,4	0,0614	0,1762	-0,0129	0,0489	0,0492	0,045	0,003409445
3,3	0,0635	0,1059	-0,0391	0,0304	0,0321	0,04	0,00175741
3,2	0,0709	0,0838	-0,069	0,0383	0,0269	0,042	0,00197725
3,1	0,0767	0,0975	-0,0187	0,0491	0,0319	0,072	0,004327855
3,0	0,0939	0,0818	-0,037	0,0445	0,0338	0,045	0,002573845
2,9	0,0558	0,0875	-0,0045	0,0446	0,0489	0,043	0,003106105
2,8	0,0727	0,0515	-0,0368	0,0428	0,0379	0,037	0,00231493
2,7	0,0237	0,0291	-0,0301	0,0585	0,0559	0,028	0,003662735
2,6	0,0725	0,0656	0,029	0,0472	0,0383	0,037	0,00252817
2,5	0,0714	0,0154	-0,0292	0,0499	0,0411	0,035	0,002684735
2,4	0,0569	0,0296	0,0388	0,043	0,0401	0,038	0,00243915
2,3	0,0661	-0,0562	-0,0285	0,0393	0,0308	0,031	0,001720885
2,2	0,0761	-0,0474	0,0227	0,0424	0,0377	0,057	0,00323973
1,505	0,0811	-0,085	-0,0184	0,039	0,0338	-0,02	0,001501
1,405	0,0465	-0,0874	-0,0631	0,0377	0,0346	-0,06	0,00330003
1,305	0,0146	-0,111	-0,0504	0,0413	0,0517	-0,05	0,00345937
1,205	0,083	-0,1234	-0,0385	0,0536	0,0448	-0,04	0,003181125
1,105	0,0212	-0,1325	-0,0426	0,0527	0,0633	-0,04	0,00429947
1,005	0,0839	-0,162	-0,0413	0,0724	0,0499	-0,04	0,00471873
0,905	0,0199	-0,1458	0,0661	0,066	0,0849	0,066	0,00796661
0,805	-0,0123	-0,176	-0,0348	0,06	0,0528	-0,03	0,00379944
0,705	-0,063	-0,1803	-0,0217	0,0505	0,0587	-0,02	0,003233415
0,605	-0,0268	-0,2235	0,0534	0,0624	0,0651	0,053	0,005491665
0,505	-0,0541	-0,2546	0,0491	0,0595	0,039	0,049	0,00373603
0,405	0,0015	-0,2134	0,0052	0,0945	0,0457	0,005	0,00552289
0,305	-0,0897	-0,1986	0,0209	0,0487	0,0418	0,021	0,00227787
0,205	-0,011	-0,1606	-0,0603	0,0497	0,0572	-0,06	0,00468901
0,105	-0,0408	-0,2094	0,0332	0,0484	0,0555	0,033	0,003262525
0,005	-0,0478	-0,2376	0,0243	0,0698	0,0549	0,024	0,00423827

Tabelle A - 14: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 1,0 Nm³/m³h, Messprofil 3.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
3,7	0,1136	0,184	-0,0307	0,1006	0,117	0,073	0,0145546
3,6	0,0249	0,0924	-0,006	0,0446	0,0641	0,049	0,004269165
3,5	0,0759	0,1726	-0,0032	0,0995	0,1572	0,102	0,02249785
3,4	0,0705	0,1203	0,0278	0,081	0,1256	0,073	0,013825385
3,3	0,1057	0,1435	0,0097	0,0837	0,0972	0,095	0,01274877
3,2	0,0398	0,1514	-0,0147	0,0463	0,0613	0,057	0,00456381
3,1	0,0199	0,0683	0,0056	0,0339	0,0354	0,041	0,00202943
3,0	0,1006	0,0107	-0,0416	0,0393	0,0442	0,036	0,002404285
2,9	0,0819	0,0694	-0,0702	0,0453	0,0445	0,06	0,003798215
2,8	0,0129	0,029	0,0102	0,0671	0,0342	0,046	0,00388027
2,7	0,0156	0,016	-0,0075	0,0392	0,0331	0,043	0,002257905
2,6	0,0774	-0,0083	-0,0276	0,0411	0,0319	0,034	0,00194509
2,5	0,1035	-0,025	0,0177	0,03	0,0324	0,041	0,001819485
2,4	0,0795	-0,031	-0,0083	0,0472	0,0392	0,053	0,00326562
2,3	0,0918	-0,0123	-0,019	0,0503	0,0345	0,038	0,00259745
2,2	0,0691	0,0215	-0,0225	0,0597	0,0407	0,03	0,00306631
1,505	-0,015	-0,0585	0,0305	0,1208	0,1298	0,031	0,016185465
1,405	0,0559	-0,1376	-0,0029	0,0836	0,0748	-0	0,006296205
1,305	0,0337	-0,1281	-0,0814	0,062	0,0661	-0,08	0,007419585
1,205	-0,0225	-0,1522	-0,0193	0,1028	0,0531	-0,02	0,00687997
1,105	-0,0139	-0,0873	-0,0101	0,0764	0,0727	-0,01	0,00561213
1,005	0,0785	-0,1212	-0,0193	0,0955	0,1228	-0,02	0,01228629
0,905	0,0085	-0,1776	0,049	0,1683	0,2186	0,049	0,039255925
0,805	-0,026	-0,1978	-0,0051	0,0786	0,0576	-0,01	0,004760865
0,705	0,032	-0,2217	0,0208	0,0871	0,078	0,021	0,007051525
0,605	-0,0335	-0,2621	-0,0812	0,1089	0,1029	-0,08	0,01452053
0,505	0,0161	-0,2849	-0,0523	0,0685	0,0616	-0,05	0,00561105
0,405	-0,011	-0,2703	0,009	0,0702	0,0743	0,009	0,005264765
0,305	0,0275	-0,3016	0,0003	0,0795	0,0648	3E-04	0,00525969
0,205	-0,0283	-0,2856	0,0096	0,0592	0,0567	0,01	0,003405845
0,105	-0,0465	-0,2957	0,0334	0,0875	0,0742	0,033	0,007138725
0,005	-0,0661	-0,308	0,0109	0,1103	0,0847	0,011	0,009729495

Tabelle A - 15: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,25 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 3.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,1	0,0091	0,3494	0,0002	0,0926	0,1426	0,068	0,01676676
4,0	0,0186	0,296	-0,004	0,0828	0,1287	0,072	0,01430897
3,9	0,0051	0,1968	-0,0249	0,0455	0,0416	0,048	0,00306685
3,8	0,083	0,2364	-0,0294	0,0885	0,0922	0,049	0,009347525
3,7	0,0703	0,2499	0,0245	0,1122	0,168	0,094	0,024852665
3,6	0,0301	0,2537	0,0242	0,0823	0,0913	0,068	0,009873295
3,5	0,0284	0,1677	-0,0158	0,0375	0,0272	0,053	0,002477545
3,4	0,0187	0,1123	-0,0195	0,052	0,0399	0,051	0,00343325
3,3	0,0456	0,1491	-0,0009	0,0361	0,0285	0,038	0,001791175
3,2	0,0865	0,0979	-0,0227	0,0343	0,0297	0,038	0,001732415
3,1	0,1071	0,0788	0,0083	0,0395	0,0404	0,035	0,002215725
3,0	0,0532	0,0031	-0,019	0,0453	0,0457	0,032	0,002591935
2,9	0,0293	0,0882	0,026	0,0478	0,0443	0,043	0,003039585
2,8	0,0649	0,0607	0,0226	0,0363	0,0276	0,032	0,00154853
2,7	0,0638	0,0925	-0,0129	0,0309	0,0314	0,026	0,00130063
2,6	0,0499	0,0361	-0,0567	0,0435	0,0256	0,039	0,00204605
1,505	0,0762	-0,0804	-0,0309	0,0282	0,0357	-0,03	0,00151227
1,405	0,0155	-0,1133	-0,0151	0,029	0,0202	-0,02	0,000738525
1,305	0,0822	-0,1227	0,0195	0,0412	0,0786	0,02	0,004127825
1,205	0,0034	-0,09	-0,0009	0,0362	0,028	-0	0,001047625
1,105	0,0356	-0,166	0,0031	0,0721	0,0537	0,003	0,004045855
1,005	0,0306	-0,1545	-0,0532	0,0945	0,0719	-0,05	0,00846505
0,905	0,0084	-0,2022	0,0683	0,0777	0,0741	0,068	0,008096495
0,805	0,0051	-0,176	-0,0406	0,0631	0,0419	-0,04	0,00369279
0,705	-0,0147	-0,1989	0,0057	0,0533	0,0336	0,006	0,00200117
0,605	0	-0,2018	-0,0547	0,0471	0,0583	-0,05	0,004304695
0,505	-0,0336	-0,1712	0,0371	0,0747	0,0532	0,037	0,00489337
0,405	-0,0187	-0,2051	0,0388	0,052	0,043	0,039	0,00302922
0,305	0,0026	-0,2071	0,0536	0,0528	0,0591	0,054	0,004576805
0,205	-0,0051	-0,2128	-0,0009	0,0418	0,0399	-0	0,00167003
0,105	-0,0569	-0,2185	0,0437	0,0773	0,0713	0,044	0,006484335
0,005	-0,0604	-0,2118	0,0199	0,0759	0,0349	0,02	0,003687415

Tabelle A - 16: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 3.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,1	0,0091	0,3494	0,0002	0,0926	0,1426	0,068	0,01676676
4,0	0,0186	0,296	-0,004	0,0828	0,1287	0,072	0,01430897
3,9	0,0051	0,1968	-0,0249	0,0455	0,0416	0,048	0,00306685
3,8	0,083	0,2364	-0,0294	0,0885	0,0922	0,049	0,009347525
3,7	0,0703	0,2499	0,0245	0,1122	0,168	0,094	0,024852665
3,6	0,0301	0,2537	0,0242	0,0823	0,0913	0,068	0,009873295
3,5	0,0284	0,1677	-0,0158	0,0375	0,0272	0,053	0,002477545
3,4	0,0187	0,1123	-0,0195	0,052	0,0399	0,051	0,00343325
3,3	0,0456	0,1491	-0,0009	0,0361	0,0285	0,038	0,001791175
3,2	0,0865	0,0979	-0,0227	0,0343	0,0297	0,038	0,001732415
3,1	0,1071	0,0788	0,0083	0,0395	0,0404	0,035	0,002215725
3,0	0,0532	0,0031	-0,019	0,0453	0,0457	0,032	0,002591935
2,9	0,0293	0,0882	0,026	0,0478	0,0443	0,043	0,003039585
2,8	0,0649	0,0607	0,0226	0,0363	0,0276	0,032	0,00154853
2,7	0,0638	0,0925	-0,0129	0,0309	0,0314	0,026	0,00130063
2,6	0,0499	0,0361	-0,0567	0,0435	0,0256	0,039	0,00204605
1,505	0,0762	-0,0804	-0,0309	0,0282	0,0357	-0,03	0,00151227
1,405	0,0155	-0,1133	-0,0151	0,029	0,0202	-0,02	0,000738525
1,305	0,0822	-0,1227	0,0195	0,0412	0,0786	0,02	0,004127825
1,205	0,0034	-0,09	-0,0009	0,0362	0,028	-0	0,001047625
1,105	0,0356	-0,166	0,0031	0,0721	0,0537	0,003	0,004045855
1,005	0,0306	-0,1545	-0,0532	0,0945	0,0719	-0,05	0,00846505
0,905	0,0084	-0,2022	0,0683	0,0777	0,0741	0,068	0,008096495
0,805	0,0051	-0,176	-0,0406	0,0631	0,0419	-0,04	0,00369279
0,705	-0,0147	-0,1989	0,0057	0,0533	0,0336	0,006	0,00200117
0,605	0	-0,2018	-0,0547	0,0471	0,0583	-0,05	0,004304695
0,505	-0,0336	-0,1712	0,0371	0,0747	0,0532	0,037	0,00489337
0,405	-0,0187	-0,2051	0,0388	0,052	0,043	0,039	0,00302922
0,305	0,0026	-0,2071	0,0536	0,0528	0,0591	0,054	0,004576805
0,205	-0,0051	-0,2128	-0,0009	0,0418	0,0399	-0	0,00167003
0,105	-0,0569	-0,2185	0,0437	0,0773	0,0713	0,044	0,006484335
0,005	-0,0604	-0,2118	0,0199	0,0759	0,0349	0,02	0,003687415

Tabelle A - 17: Fließgeschwindigkeit und Turbulenz, Sandfang der Kläranlage München I, Durchfluss 0,5 m³/s, Lufteintrag 0,5 Nm³/m³h, Messprofil 3, Zusätzliche Belüfter vorne.

Höhe	u	v	w	u'	v'	w'	TKE
m	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m ² /s ²
4,3	-0,0103	0,4108	0,0238	0,0879	0,1273	0,082	0,01529513
4,2	-0,0085	0,3336	-0,0159	0,0988	0,0971	0,082	0,01296513
4,1	0,0115	0,2468	-0,023	0,0474	0,0479	0,038	0,003000205
4,0	0,0009	0,2977	0,0679	0,0791	0,0811	0,093	0,010769455
3,9	0,0259	0,2351	0,0409	0,0588	0,0468	0,05	0,00407384
3,8	0,0644	0,1879	0,0126	0,0373	0,038	0,052	0,00277485
3,7	0,0757	0,1675	0,0098	0,0568	0,0383	0,066	0,004498245
3,6	0,0938	0,1812	-0,0196	0,0609	0,0284	0,048	0,00338581
3,5	0,0768	0,1155	0,0231	0,0421	0,0556	0,044	0,00340429
3,4	0,0773	0,1366	0,023	0,0496	0,039	0,028	0,0023882
3,3	0,0819	0,1108	0,0474	0,0333	0,0412	0,03	0,001865245
3,2	0,0883	0,0865	0,062	0,0297	0,0422	0,054	0,00279487
3,1	0,1197	0,0855	0,0094	0,0321	0,0345	0,042	0,001996535
3,0	0,0884	0,0481	0,0076	0,0204	0,033	0,031	0,001223825
2,9	0,0761	-0,0048	0,0276	0,0323	0,0367	0,069	0,003596335
2,8	0,1089	-0,0051	0,0444	0,0389	0,0481	0,045	0,002912455
2,7	0,0954	0,0221	-0,0077	0,0257	0,029	0,031	0,00124059
2,6	0,0733	0,0051	-0,031	0,0341	0,043	0,03	0,001949925
2,5	0,0703	-0,0403	0,0055	0,0257	0,0291	0,026	0,00110213
2,4	0,0822	-0,0703	0,0134	0,0657	0,0665	0,056	0,00591505
2,3	0,0841	-0,026	0,0123	0,032	0,0325	0,026	0,00138597
2,2	0,0541	-0,0391	0,0034	0,0491	0,03	0,037	0,00235105
2,1	0,0921	-0,1333	0,0155	0,0677	0,0616	0,039	0,004957245
2,0	0,0836	-0,0474	0,0057	0,0489	0,0279	0,023	0,00184473
1,9	0,0874	-0,0835	0,0102	0,0445	0,0499	0,045	0,003234175
1,8	0,06	-0,0547	-0,0335	0,0849	0,04	0,073	0,00703213
1,7	0,0851	-0,0552	-0,0418	0,0442	0,0318	0,033	0,00203356
1,6	0,0836	-0,0533	-0,0788	0,0358	0,048	0,066	0,00398404
1,5	0,0552	-0,1135	-0,0147	0,0494	0,0693	0,062	0,00553723
1,4	0,1163	-0,0763	0,0194	0,0615	0,0449	0,055	0,00441163
1,3	0,0527	-0,1642	0,0188	0,0814	0,0808	0,087	0,010353105
1,2	0,0681	-0,1882	-0,0647	0,0635	0,0624	0,071	0,00646225
1,505	0,0604	-0,1145	0,0145	0,0398	0,0438	0,031	0,002234845
1,405	0,0551	-0,1465	-0,0469	0,0537	0,0506	0,078	0,005732905
1,305	0,0325	-0,1352	-0,0715	0,0688	0,0549	0,051	0,005184445
1,205	0,0387	-0,1582	-0,0566	0,0595	0,0831	0,059	0,006969335

1,105	0,047	-0,1193	-0,0326	0,0514	0,0484	0,064	0,004521105
1,005	0,062	-0,179	-0,0105	0,0519	0,0637	0,067	0,00562015
0,905	-0,0262	-0,2384	0,0223	0,0807	0,0613	0,046	0,00619309
0,805	0,0396	-0,1364	-0,0212	0,0633	0,0402	0,066	0,004989465
0,705	0,0045	-0,2079	0,0299	0,0451	0,049	0,056	0,00379111
0,605	-0,0073	-0,1873	-0,012	0,0663	0,0433	0,065	0,005215415
0,505	0,0235	-0,1634	-0,1042	0,0464	0,0467	0,051	0,003447105
0,405	-0,038	-0,2349	0,0581	0,0606	0,0527	0,071	0,005773805
0,305	-0,0174	-0,2071	0,05	0,0506	0,0457	0,062	0,00424023
0,205	0,0006	-0,2131	-0,0085	0,0635	0,0429	0,053	0,004356775
0,105	0,0413	-0,2167	-0,0211	0,0755	0,0478	0,049	0,00517839
0,005	0,0464	-0,1316	-0,0036	0,0588	0,0384	0,014	0,00256122

Tabelle A - 18: Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm³/m³h, Geschwindigkeit u, Messprofil 1-7.

z	u1	u2	u3	u4	u5	u6	u7
m	m/s						
3,155	-0,247	-0,0425	0,0578	-0,1463	-0,0113	0,2692	0,1267
3,055	-0,0014	-0,0543	0,0287	-0,038	-0,0399	0,1961	0,065
2,955	0,0033	-0,0347	0,0536	-0,045	-0,0291	0,0883	0,0078
2,855	0,2808	0,0271	0,0153	0,0172	0,032	0,1698	0,0172
2,755	0,109	-0,0503	0,0179	0,0817	-0,0127	0,0481	-0,0324
2,655	0,088	-0,03	-0,0671	0,0487	0,0044	0,0308	0,0129
2,555	0,1241	-0,0345	0,0793	0,063	0,0533	0,0858	-0,0513
2,455	0,1033	-0,0085	0,0445	-0,035	0,0193	0,0326	0,0279
2,355	0,1768	-0,0501	0,0709	0,0462	0,0029	0,0076	0,0346
2,255	-0,0006	0,0045	-0,0295	-0,0398	-0,0402	-0,0377	0,0311
2,155	-0,029	-0,03	0,0315	0,0101	-0,0267	0,0731	0,0013
2,055	-0,0698	0,0167	-0,0804	-0,0443	-0,0981	-0,0552	0,0265
1,955	-0,0686	-0,0814	-0,0416	0,0258	0,0024	-0,0113	-0,013
1,855	-0,0508	-0,052	-0,0096	-0,0174	-0,0538	-0,0623	0,0411
1,755	0,0611	-0,02	0,0038	0,0364	-0,0366	-0,0287	-0,0161
1,655	0,0017	-0,0249	0,0162	0,0465	0,0371	-0,0625	0,0424
1,66	-0,0169	-0,1234	-0,0112	0,0088	0,0556	-0,0189	-0,0219
1,56	-0,0425	-0,0375	0,0677	0,0561	0,0842	-0,0122	-0,013
1,46	-0,0638	0,0398	0,0038	0,0571	-0,0283	-0,0576	0,0017
1,36	0,0019	-0,0091	-0,0159	0,0164	0,0801	-0,0859	-0,0249
1,26	0,0595	0,0446	-0,0783	0,0487	0,0092	-0,1155	0,037
1,16	0,0306	0,0609	0,0035	0,0051	0,0073	-0,1034	0,0251
1,06	-0,0041	-0,0405	-0,0241	0,0235	-0,0056	-0,1401	0,0044
0,96	-0,0011	-0,0089	0,0472	0,0254	0,0114	-0,0626	-0,0151
0,86	0,0063	0,0274	0,0488	0,0284	0,0398	-0,077	0,009
0,76	-0,0122	0,0953	-0,0097	0,0598	0,0084	-0,1341	0,0292
0,66	0,106	0,0918	0,0087	-0,0024	0,0173	-0,0837	0,008
0,56	0	-0,0207	0,0823	-0,0042	0,0613	-0,1245	-0,017
0,46	0	-0,0028	0,0248	-0,0009	0,0882	-0,0008	0,0119
0,36	0	0,044	0,1367	0,0847	0,1199	-0,0928	0,0122
0,26	0	-0,1638	0,0641	0,0966	0,0492	-0,0134	0,0812
0,16	0	-0,157	0,0356	0,0425	0,0332	0,0539	0,0226

Tabelle A - 19: Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm³/m³h, Geschwindigkeit v, Messprofil 1-7.

Z	v 1	v 2	v3	v4	v5	v6	v7	Mittelwert
m	m/s							
3,155	0,3318	0,3254	0,0951	0,1523	0,3246	0,2875	0,2692	0,255129
3,055	0,2705	0,2747	0,1521	0,1264	0,1312	0,1159	0,1961	0,180986
2,955	0,0391	0,1192	0,1375	0,0761	0,1010		0,0883	0,093533
2,855	0,0755	0,1496	0,0572	0,0643	0,0370	0,1532	0,1698	0,100943
2,755	0,0623	0,2604	0,0219	0,0603	0,0481	0,1409	0,0481	0,091714
2,655	0,0530	0,1368	0,1371	0,0817	0,0697	0,0764	0,0308	0,083643
2,555	0,1256	0,1201	0,1716	0,1324	0,0367	0,1899	0,0858	0,123157
2,455	0,1028	0,0476	0,1283	0,0408	0,0659	0,1050	0,0326	0,074714
2,355	0,0345	-0,0125	0,0865	0,0903	0,0662	0,0916	0,0076	0,052029
2,255	0,0157	-0,0157	0,1005	0,0484	0,0248	-0,0014	-0,0377	0,019229
2,155	-0,0295	0,0074	0,1214	0,1229	0,0579	0,1018	0,0731	0,065000
2,055	-0,0435	-0,0198	0,1094	0,0032	-0,0125	0,0565	-0,0552	0,005443
1,955	-0,0075	0,0294	0,1016	0,0552	-0,0057	-0,0069	-0,0113	0,022114
1,855	-0,0620	-0,0015	0,0451	-0,0133	-0,0389	-0,0405	-0,0623	-0,024771
1,755	-0,1121	-0,1295	0,0146	-0,0346	0,0082	-0,0681	-0,0287	-0,050029
1,655	-0,0256	0,0312	0,0368	-0,0390	-0,0350	-0,0449	-0,0625	-0,019857
1,660	-0,1428	-0,0547	0,0233	-0,0438	-0,0620	-0,0586	-0,0189	-0,051071
1,560	-0,0457	-0,0754	-0,0153	0,0019	-0,0731	-0,0293	-0,0122	-0,035586
1,460	-0,0837	-0,0768	-0,0759	-0,0954	-0,0618	-0,0604	-0,0576	-0,073086
1,360	-0,1335	-0,0626	-0,0472	-0,1337	-0,0735	-0,0674	-0,0859	-0,086257
1,260	-0,1801	-0,1149	-0,0689	-0,1164	-0,0599	-0,0567	-0,1155	-0,101771
1,160	-0,1623	-0,1453	-0,1362	-0,1183	-0,0881	-0,0732	-0,1034	-0,118114
1,060	-0,1482	-0,1499	-0,0697	-0,1635	-0,0854	-0,0983	-0,1401	-0,122157
0,960	-0,1841	-0,0959	-0,1591	-0,1161	-0,0725	-0,0837	-0,0626	-0,110571
0,860	-0,2294	-0,1304	-0,1230	-0,1015	-0,1225	-0,0844	-0,0770	-0,124029
0,760	-0,0531	-0,1566	-0,0984	-0,1493	-0,2100	-0,1139	-0,1341	-0,118071
0,660	0,1078	-0,2184	-0,1392	-0,1535	-0,0752	-0,1169	-0,0837	-0,097014
0,560		-0,0021	-0,0211	-0,1341	-0,1070	-0,0369	-0,1245	-0,070950
0,460		0,0109	-0,0542	-0,0360	-0,0995	-0,0946	-0,0008	-0,045700
0,360		-0,1167	-0,0196	-0,0759	-0,0270	-0,0896	-0,0928	-0,070267
0,260		0,0858	-0,0390	0,0180	-0,0112	0,0270	-0,0134	0,011200
0,160		-0,0744	0,0454	0,0889	0,0815	0,0457	0,0539	0,040167

Tabelle A - 20: Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm³/m³h, Geschwindigkeit w, Messprofil 1-7.

z	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7
m	m/s						
3,155	-0,0276	-0,0949	-0,1284	-0,0826	-0,0132	-0,1768	-0,0214
3,055	0,0103	-0,1341	-0,1095	-0,049	-0,0945	-0,062	-0,1412
2,955	-0,0411	-0,0854	-0,2743	-0,0828	-0,1342	-0,0482	-0,1957
2,855	0,003	-0,0477	-0,2392	-0,0205	-0,2405	-0,2209	-0,1637
2,755	-0,0566	-0,0278	-0,2404	0,0205	-0,0485	-0,2563	-0,1666
2,655	0,0425	-0,0209	-0,3451	-0,0826	-0,1023	-0,0387	-0,0697
2,555	-0,0025	-0,0243	-0,1468	-0,1184	-0,0777	-0,0301	-0,1193
2,455	0,0666	-0,047	-0,2423	-0,0467	-0,1775	-0,0905	-0,0774
2,355	0,1921	-0,0322	-0,0631	-0,0773	-0,0474	-0,1924	-0,0372
2,255	-0,0267	0,0629	-0,1973	-0,0603	-0,0956	-0,0214	-0,0529
2,155	-0,0255	-0,0435	-0,1276	-0,1062	-0,1506	-0,0966	-0,0978
2,055	-0,0426	0,0128	-0,2052	-0,0782	-0,0571	-0,1193	0,0002
1,955	-0,0975	-0,0572	-0,1509	-0,0881	-0,0818	-0,0646	-0,0003
1,855	-0,125	-0,0464	-0,104	-0,0427	-0,1126	-0,017	-0,0025
1,755	-0,0817	0,0455	-0,112	-0,0453	-0,0959	-0,0259	-0,0446
1,655	-0,0061	-0,1206	-0,1101	-0,0746	-0,0954	-0,0984	-0,0585
1,66	-0,0814	0,0205	-0,0916	-0,046	-0,071	-0,0323	-0,073
1,56	-0,0873	0,0106	-0,0763	-0,0538	-0,0618	0,0205	-0,0378
1,46	-0,1105	-0,0549	-0,0503	-0,052	-0,0421	-0,0135	-0,0176
1,36	0,0188	-0,0248	-0,0656	-0,0555	-0,1208	-0,0337	-0,0122
1,26	-0,0606	0,0702	-0,0349	-0,0207	-0,0999	-0,0923	-0,0039
1,16	0,0407	0,0576	-0,0224	-0,0347	-0,0028	-0,0658	0,0106
1,06	-0,0043	0,0549	-0,026	-0,0396	-0,0757	-0,0282	-0,0649
0,96	-0,0433	0,0139	-0,0433	-0,0187	-0,0103	-0,077	-0,0649
0,86	-0,0126	-0,0407	-0,0366	-0,0238	-0,0067	-0,0192	-0,032
0,76	0,0143	0,0194	-0,038	-0,0409	-0,0112	-0,0039	0,0284
0,66	-0,0292	0,0374	0,0017	0,0727	-0,0504	0,0068	0,0081
0,56		0,004	-0,0077	0,0061	0,0184	-0,0799	0,0219
0,46		-0,0195	-0,0032	-0,0231	0,0014	0,0049	-0,0848
0,36		-0,0292	0,0016	0,0547	-0,0534	0,0463	-0,0206
0,26		-0,0031	-0,0017	-0,0357	-0,0096	-0,0631	0,0149
0,16		0,0043	-0,0114	-0,0361	-0,034	-0,0041	-0,0088

Tabelle A - 21: Sandfang der Kläranlage Karlsfeld, Durchfluss 110 l/s, Lufteintrag 1,9 Nm³/m³h, turbulente kinetische Energie, Messprofil 1-7.

z	TKE1	TKE2	TKE3	TKE4	TKE5	TKE6	TKE7
m	m ² /s ²						
3,055	0,02827	0,03945	0,01532	0,01391	0,00895	0,04635	0,01790
2,955	0,02718	0,00943	0,02082	0,01276	0,01183	0,01376	0,02547
2,855	0,02095	0,01873	0,02718	0,00614	0,01310	0,01800	0,00928
2,755	0,01202	0,01273	0,02239	0,01600	0,00614	0,02018	0,01345
2,655	0,02793	0,01689	0,02081	0,00466	0,00160	0,00328	0,00379
2,555	0,01384	0,00835	0,00000	0,00556	0,00326	0,01410	0,00298
2,455	0,00795	0,00163	0,02345	0,00130	0,01780	0,00197	0,00177
2,355	0,01481	0,00458	0,00911	0,00115	0,00231	0,01183	0,00079
2,255	0,00074	0,00662	0,00671	0,00239	0,00460	0,00121	0,00230
2,155	0,00468	0,00122	0,00920	0,00231	0,00566	0,00163	0,00256
2,055	0,00211	0,00253	0,00950	0,00178	0,00105	0,00176	0,00154
1,955	0,00210	0,00195	0,00888	0,00194	0,00118	0,00074	0,00132
1,855	0,00664	0,00222	0,00167	0,00282	0,00199	0,00136	0,00137
1,755	0,00612	0,00586	0,00297	0,00122	0,00183	0,00243	0,00120
1,655	0,00205	0,00183	0,00281	0,00228	0,00085	0,00182	0,00122
1,56	0,00352	0,00222	0,00146	0,00122	0,00153	0,00301	0,00163
1,46	0,00368	0,00567	0,00124	0,00188	0,00102	0,00110	0,00158
1,36	0,01142	0,00569	0,00080	0,00220	0,00256	0,00158	0,00158
1,26	0,00610	0,00270	0,00145	0,00143	0,00137	0,00151	0,00350
1,16	0,00618	0,00399	0,00268	0,00175	0,00244	0,00098	0,00262
1,06	0,00376	0,00329	0,00171	0,00073	0,00092	0,00159	0,00126
0,96	0,00494	0,00329	0,00190	0,00289	0,00092	0,00270	0,00097
0,86	0,00809	0,00161	0,00174	0,00173	0,00444	0,00104	0,00212
0,76	0,00000	0,00233	0,00231	0,00272	0,00174	0,00273	0,00180
0,66	0,00000	0,00359	0,00160	0,00199	0,00159	0,00100	0,00141
0,56	0,00000	0,00186	0,00115	0,00097	0,00059	0,00136	0,00108
0,46	0,00000	0,00000	0,00325	0,00118	0,00342	0,00193	0,00488
0,36	0,00000	0,00000	0,00282	0,00243	0,00183	0,00290	0,00086
0,26	0,00000	0,00000	0,00325	0,00131	0,00143	0,00127	0,00236
0,16	0,00000	0,00000	0,00000	0,00058	0,00299	0,00139	0,00060
MW	0,00979	0,00655	0,00743	0,00337	0,00370	0,00555	0,00384

Tabelle A - 22: Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlichem Lufteintrag bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	Lufteintrag	Sand- konzentration	Anteil $\geq 0,1$ mm
-	Nm ³ /(m ³ ·h)	mg/l	%
14.12.2007	2,5	107,76	92,1
17.12.2007	2,5	106,17	92,1
18.12.2007	2,5	106,49	92,1
30.01.2008	1,7	130,98	73,0
06.02.2008	1,7	130,98	73,0
13.02.2008	2,5	130,98	73,0
20.02.2008	1,0	130,98	73,0
11.03.2008	0,0	127,04	66,7
09.04.2008	0,0	127,04	66,7
20.05.2008	1,3	127,04	66,7
15.06.2008	1,3	127,04	66,7
16.07.2008	2,5	127,04	66,7
04.08.2008	0,0	127,04	66,7
06.08.2008	1,0	127,04	66,7

Tabelle A - 23: Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlichem Durchfluss und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	Lufteintrag	Durchflusszeit	Sand- konzentration	Anteil $\geq 0,1$ mm
-	Nm ³ /(m ³ ·h)	min	mg/l	%
30.01.2008	1,7	7,14	130,98	73,0
06.02.2008	1,7	7,14	130,98	73,0
26.02.2008	1,7	16,67	305,61	73,0
04.03.2008	1,7	4,55	83,35	73,0
20.05.2008	1,3	7,14	127,04	66,7
02.06.2008	1,3	16,67	296,42	66,7
10.06.2008	1,3	4,55	80,84	66,7
15.06.2008	1,3	7,14	127,04	66,7
03.11.2008	1,3	7,14	125,34	65,0
27.01.2009	0	4,55	79,76	65,0
05.02.2009	0	16,67	292,47	65,0
11.02.2009	2,5	4,55	79,76	65,0

Tabelle A - 24: Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlicher Einblastiefe bei einer Durchflusszeit von 7,14 min.

Datum	Luft eintrag	Sand- konzentration	Anteil $\geq 0,1$ mm	Einblastiefe
-	Nm ³ /(m ³ ·h)	mg/l	%	m
11.03.2008	0	127,0	66,7	0
09.04.2008	0	127,0	66,7	0
20.05.2008	1,3	127,0	66,7	0,55
15.06.2008	1,3	127,0	66,7	0,55
24.06.2008	1,3	127,0	66,7	0,47
08.07.2008	1,3	127,0	66,7	0,62
04.08.2008	0	127,0	66,7	0
03.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,55
05.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,62
07.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,47
11.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,31
14.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,21
18.11.2008	1,3	125,3	65,0	0,31
19.02.2009	2,5	125,3	65,0	0,31

Tabelle A - 25: Versuche im physikalischen Sandfangmodell mit unterschiedlicher Sandkonzentration bei einem Luft eintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und Sand 3.

Datum	Sand- konzentration
-	mg/l
20.05.2008	127,04
15.06.2008	127,04
14.07.2008	254,08
13.10.2008	501,37
16.10.2008	250,69
03.11.2008	125,34

Tabelle A - 26: Gesamtabscheidegrad von Sand 1 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	m _{Sand,Zu}	c _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	g	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
14.12.07	6110	107,8	4992	0,0028	35,7	76,5	81,0	81,7	81,7
17.12.07	6020	106,2	5234	0,0028	63,3	80,2	85,0	86,6	87,0
18.12.07	7380	106,5	5924	0,0018	52,0	69,9	76,2	78,5	80,3

Tabelle A - 27: Abscheidegrad ≥ 0,1 mm von Sand 1 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einem Lufteintrag von 2,5 Nm³/(m³·h) und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	m _{Sand,Zu}	c _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	g	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
14.12.07	6110	107,8	4992	0,0028	36,2	76,9	81,2	81,9	81,9
17.12.07	6020	106,2	5234	0,0028	64,3	81,6	86,2	87,5	87,8
18.12.07	7380	106,5	5924	0,0018	66,4	86,3	91,6	93,0	93,7

Tabelle A - 28: Gesamtabscheidegrad von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 131 mg/l (m_{Sand,Zu} = 6.601 g).

Datum	q _{LV}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	Nm ³ /(m ³ ·h)	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
30.01.2008	1,7	5125	0,0012	53,2	67,7	73,4	76,2	77,6
06.02.2008	1,7	5068	0,0011	51,7	67,1	72,7	75,4	76,8
13.02.2008	2,5	4880	0,0017	49,0	64,4	70,2	72,5	73,9
20.02.2008	1,0	5453	0,0007	63,2	73,6	77,5	80,4	82,6

Tabelle A - 29: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 131 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.601$ g).

Datum	q_{LV}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	Nm ³ / (m ³ ·h)	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
30.01.2008	1,7	5125	0,0012	65,6	79,7	84,4	86,2	86,8
06.02.2008	1,7	5068	0,0011	65,1	80,8	85,7	87,2	87,7
13.02.2008	2,5	4880	0,0017	60,4	76,9	81,6	83,1	83,6
20.02.2008	1,0	5453	0,0007	78,7	87,7	90,1	91,2	91,9

Tabelle A - 30: Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 127 mg/l ($m_{\text{Sand,Zu}} = 6.403$ g).

Datum	q_{LV}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	Nm ³ / (m ³ ·h)	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
11.03.2008	0,0	4989	0,0003	51,3	67,2	73,1	75,9	77,9
09.04.2008	0,0	5008	0,0002	49,1	66,4	72,9	75,9	78,2
20.05.2008	1,3	6925	0,0009	45,8	60,1	66,7	70,0	72,1
15.06.2008	1,3	4673	0,0009	45,6	61,2	67,6	70,9	73,0
16.07.2008	2,5	4456	0,0014	38,4	57,1	63,9	67,0	69,6
04.08.2008	0,0	5039	0,0001	57,3	69,1	73,8	76,7	78,7
06.08.2008	1,0	4725	0,0007	49,8	62,5	68,1	71,8	73,8

Tabelle A - 31: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Durchflusszeit von 7,14 min, einer Einblastiefe von 0,55 m und einer Sandkonzentration von 127 mg/l ($m_{\text{Sand,zu}}=6.403$ g).

Datum	q_{LV}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91 m	x2 = 1,86 m	x3 = 2,81 m	x4 = 3,76 m	x5 = 5 m
	Nm ³ / (m ³ ·h)	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
11.03.2008	0,0	4989	0,0003	70,3	86,0	88,4	88,9	89,2
09.04.2008	0,0	5008	0,0002	66,9	81,4	84,5	85,2	85,6
20.05.2008	1,3	6925	0,0009	60,6	75,3	80,4	82,4	83,4
15.06.2008	1,3	4673	0,0009	60,3	78,2	83,8	85,8	86,7
16.07.2008	2,5	4456	0,0014	50,5	71,0	76,8	79,0	79,9
04.08.2008	0,0	5039	0,0001	77,3	85,8	87,3	87,9	88,1
06.08.2008	1,0	4725	0,0007	65,4	77,1	80,9	82,9	83,5

Tabelle A - 32: Gesamtabscheidegrad von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von 1,7 Nm³/(m³·h), einer Sandzugabe von 6.601 g und einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	t_R	c_{Sand}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	min	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
30.01.2008	7,1	131,0	5125	0,0012	53,2	67,7	73,4	76,2	77,6
06.02.2008	7,1	131,0	5068	0,0011	51,7	67,1	72,7	75,4	76,8
26.02.2008	16,7	305,6	5195	0,0009	58,9	72,6	76,4	78,0	78,7
04.03.2008	4,5	83,3	4153	0,0014	36,4	51,2	57,4	60,7	62,9

Tabelle A - 33: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 2 am physikalischen Sandfangmodell einem Lufteintrag von $1,7 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, einer Sandzugabe von 6.601 g und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$.

Datum	t_R	C_{Sand}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	min	mg/l	g	m^2/s^2	%	%	%	%	%
30.01.2008	7,1	131,0	5125	0,0012	65,6	79,7	84,4	86,2	86,8
06.02.2008	7,1	131,0	5068	0,0011	65,1	80,8	85,7	87,2	87,7
26.02.2008	16,7	305,6	5195	0,0009	70,3	82,5	84,5	84,8	84,9
04.03.2008	4,5	83,3	4153	0,0014	46,9	61,9	66,7	69,1	70,2

Tabelle A - 34: Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$.

Datum	t_R	C_{Sand}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	min	mg/l	g	m^2/s^2	%	%	%	%	%
20.05.2008	7,1	127,0	6925	0,0009	45,8	60,1	66,7	70,0	72,1
02.06.2008	16,7	296,4	4985	0,0007	53,6	69,8	74,8	76,9	77,9
10.06.2008	4,5	80,8	4312	0,0011	39,7	54,7	61,6	65,2	67,3
15.06.2008	7,1	127,0	4673	0,0009	45,6	61,2	67,6	70,9	73,0

Tabelle A - 35: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ und einer Einblastiefe von $0,55 \text{ m}$.

Datum	t_R	C_{Sand}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	min	mg/l	g	m^2/s^2	%	%	%	%	%
20.05.2008	7,1	127,0	6925	0,0009	60,6	75,3	80,4	82,4	83,4
02.06.2008	16,7	296,4	4985	0,0007	67,8	83,6	86,5	87,3	87,5
10.06.2008	4,5	80,8	4312	0,0011	54,9	72,3	77,8	80,3	81,7
15.06.2008	7,1	127,0	4673	0,0009	60,3	78,2	83,8	85,8	86,7

Tabelle A - 36: Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einer Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	q _{LV}	t _R	C _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
						x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	Nm ³ /(m ³ ·h)	min	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
03.11.2008	1,3	7,1	125,3	4524	0,0009	44,4	59,4	65,4	69,2	71,6
27.01.2009	0,0	4,5	79,8	4766	0,0005	26,2	54,6	66,7	71,9	75,4
05.02.2009	0,0	16,7	292,5	5147	0,0003	66,4	75,4	78,7	80,4	81,5
11.02.2009	2,5	4,5	79,8	3961	0,0023	29,9	48,5	55,7	59,8	62,7

Tabelle A - 37: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei Einblastiefe von 0,55 m.

Datum	q _{LV}	t _R	C _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
						x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	Nm ³ /(m ³ ·h)	min	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
03.11.2008	1,3	7,1	125,3	4524	0,0009	54,9	69,7	74,5	77,2	78,2
27.01.2009	0,0	4,5	79,8	4766	0,0005	38,7	73,7	85,7	89,0	90,5
05.02.2009	0,0	16,7	292,5	5147	0,0003	81,2	83,8	84,1	84,2	84,3
11.02.2009	2,5	4,5	79,8	3961	0,0023	43,0	65,8	72,9	76,6	78,6

Tabelle A - 38: Gesamtabscheidegrad von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³h) und einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 127 mg/l.

Datum	h _{bel}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	m	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
20.05.2008	0,55	6925	0,00090	45,8	60,1	66,7	70,0	72,1
15.06.2008	0,55	4673	0,00093	45,6	61,2	67,6	70,9	73,0
24.06.2008	0,47	4660	0,00078	46,6	60,8	67,2	70,6	72,8
08.07.2008	0,62	4784	0,00094	44,6	61,2	68,2	72,2	74,7

Tabelle A - 39: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 3 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von $1,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3\text{h})$ und einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 127 mg/l.

Datum	h_{bel}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
				x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	m	g	m^2/s^2	%	%	%	%	%
20.05.2008	0,55	6925	0,0009	60,6	75,3	80,4	82,4	83,4
15.06.2008	0,55	4673	0,0009	60,3	78,2	83,8	85,8	86,7
24.06.2008	0,47	4660	0,0008	61,2	76,1	81,4	83,5	84,3
08.07.2008	0,62	4784	0,0009	58,1	75,8	81,4	84,1	85,1

Tabelle A - 40: Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l.

Datum	q_{LV}	h_{bel}	$m_{\text{Sand,Sed}}$	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	$\text{Nm}^3/(\text{m}^3\cdot\text{h})$	m	g	m^2/s^2	%	%	%	%	%
03.11.2008	1,3	0,55	4524	0,00086	44,4	59,4	65,4	69,2	71,6
05.11.2008	1,3	0,62	4388	0,00094	39,2	56,1	63,1	67,0	69,5
07.11.2008	1,3	0,47	4536	0,00078	44,5	60,0	66,2	69,6	71,8
11.11.2008	1,3	0,31	4788	0,00056	42,2	59,4	67,2	72,3	75,8
14.11.2008	1,3	0,21	4673	0,00034	46,2	62,0	68,5	71,9	74,0
18.11.2008	1,3	0,31	4899	0,00048	44,4	60,8	69,3	74,2	77,6
19.02.2009	2,5	0,31	4314	0,00078	40,4	56,1	62,5	66,1	68,3

Tabelle A - 41: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l.

Datum	q _{LV}	h _{bel}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	Nm ³ /(m ³ ·h)	m	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
03.11.2008	1,3	0,55	4524	0,0009	54,9	69,7	74,5	77,2	78,2
05.11.2008	1,3	0,62	4388	0,0009	50,4	68,8	75,1	77,6	78,7
07.11.2008	1,3	0,47	4536	0,0008	59,1	74,4	79,2	81,2	82,0
11.11.2008	1,3	0,31	4788	0,0006	61,3	78,5	85,2	89,0	91,1
14.11.2008	1,3	0,21	4673	0,0003	62,7	81,3	87,2	89,2	90,2
18.11.2008	1,3	0,31	4899	0,0005	56,1	73,3	80,5	84,2	88,4
19.02.2009	2,5	0,31	4314	0,0008	53,9	70,4	76,0	78,4	79,5

Tabelle A - 42: Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h), einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l.

Datum	m _{Sand,Zu}	C _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	g	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
13.10.2008	25269	501,4	19317	0,00086	47,2	62,5	69,3	73,5	76,4
16.10.2008	12635	250,7	9399	0,00087	45,2	60,7	67,4	71,3	74,4
03.11.2008	6317	125,3	4524	0,00086	44,4	59,4	65,4	69,2	71,6

Tabelle A - 43: Abscheidegrad $\geq 0,1$ mm von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell bei einem Lufteintrag von 1,3 Nm³/(m³·h) einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 125 mg/l.

Datum	m _{Sand,Zu}	C _{Sand}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	g	mg/l	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
13.10.2008	25269	501,4	19317	0,00086	60,3	75,7	80,6	83,1	84,1
16.10.2008	12635	250,7	9399	0,00087	59,5	75,0	80,2	82,5	83,8
03.11.2008	6317	125,3	4524	0,00086	54,9	69,7	74,5	77,2	78,2

Tabelle A - 44: Gesamtabscheidegrad von Sand 4 am physikalischen Sandfangmodell mit Rechteckquerschnitt bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 156,7 mg/l.

Datum	q _{LV}	h _{bel}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	Nm ³ / (m ³ ·h)	m	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
20.04.2009	1,3	0,47	4846,7	0,0008	47,0	62,4	68,6	72,9	76,7
23.04.2009	2,5	0,47	4652,7	0,0013	49,5	63,3	67,6	70,9	73,6
27.04.2009	1,3	0,31	4854,8	0,0005	48,5	62,2	68,5	72,7	76,8
05.05.2009	0	0	4961,7	0,0001	56,9	68,8	73,1	76,2	78,5

Tabelle A - 45: Abscheidegrad $d \geq 0,1$ mm von Sand am physikalischen Sandfangmodell mit Rechteckquerschnitt bei einer Durchflusszeit von 7,14 min und einer Sandkonzentration von 156,7 mg/l.

Datum	q _{LV}	h _{bel}	m _{Sand,Sed}	TKE (MW)	Abscheidegrad über Sandfanglänge				
					x1 = 0,91	x2 = 1,86	x3 = 2,81	x4 = 3,76	x5 = 5
	Nm ³ / (m ³ ·h)	m	g	m ² /s ²	%	%	%	%	%
20.04.2009	1,3	0,47	4846,7	0,0008	61,8	79,2	84,4	87,1	88,9
23.04.2009	2,5	0,47	4652,7	0,0013	64,3	79,3	82,7	84,4	85,5
27.04.2009	1,3	0,31	4854,8	0,0005	62,8	77,0	82,3	84,8	86,8
05.05.2009	0	0	4961,7	0,0001	79,7	88,8	89,9	90,3	90,4