

# **Beurteilung und Optimierung von Sandwaschanlagen im Einsatz auf Kläranlagen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur- und Vermessungswesen

der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl. Ing.     Andreas Hitzler  
aus             Augsburg

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 2002  
Hauptreferent: Prof. Dr. – Ing. E. h. Hermann H. Hahn Ph. D.  
Korreferent: Prof. Dr.– Ing. F. W. Günthert

Karlsruhe 2002

## KURZFASSUNG

Bei der Abwasserableitung- und -behandlung fallen in der Regel die Reststoffe Kanalspül-, Rechen-, und Sandfanggut sowie verschiedene Arten von Klärschlämmen an. Im Rahmen dieser Arbeit wird für Kläranlagensande die Abtrennung aus dem Abwasser bis hin zu einer möglichen Verwertung behandelt.

Die neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen - das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) und die TA Siedlungsabfall (TASI) – erfordern zukünftig anstelle der Beseitigung eine geeignete Verwertung.

Für Kanalsande werden verschiedene Entnahmemöglichkeiten aus dem Kanalnetz sowie für Sandfanggut die Grundlagen der Absetzvorgänge dargestellt. Diesbezüglich wird auf die DIN 19569, verschiedene Sandfangtypen und deren Besonderheiten bei einer Abtrennung der mineralischen Abwasserinhaltsstoffe sowie deren anschließenden Aufbereitung in einer Sandwaschanlage eingegangen. In diesem Zusammenhang wird die Wirkungsweise und Konsequenz der Einheit Sandfang/Sandwäsche auf den Klärprozeß untersucht und geänderte Rahmenbedingungen postuliert.

Ziel der Sandaufbereitung ist eine Verwertung der Kläranlagensande unter Einhaltung der Empfehlungen der Ländergemeinschaft Abfall (LAGA) zu realisieren. Das aufbereitete Material aller untersuchten Sandwaschanlagen erfüllt alle Anforderungen für einen eingeschränkten Einbau nach LAGA, für den die Zuordnungswerte Z 2 einzuhalten sind. Die Grenzwerte für einen uneingeschränkten Einbau (LAGA) wurden nicht oder nur in seltenen Fällen erreicht.

Beim Betrieb von Sandwaschanlagen ist festzustellen, daß verschiedene Optimierungspotentiale bestehen. In diesem Zusammenhang wird eine Feinsandrückgewinnung aus dem anfallenden Waschwasser ebenso wie eine zusätzliche Schadstoffreduzierung des bereits gewaschenen Sandes mittels Attritionszellen diskutiert.

Werden auf einer Kläranlage Sandwaschanlagen nachgerüstet, entstehen nicht unerhebliche Kosten. Aus diesem Grund ist es für einen Betreiber um so wichtiger, vor dem Kauf die Verwertung der gewaschenen Sande bzw. die Entsorgung der Reststoffe sicherzustellen. Dazu ist es notwendig, vorab die zu erwartende Restbelastung zu ermitteln. Statt aufwendige Untersuchungen mittels Testanlagen durchzuführen, ist eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Bestimmung der Restkontamination anwendbar.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse und nicht zuletzt auch infolge langjähriger Zusammenarbeit mit Kläranlagenbetreibern sowie Entsorgerfirmen ist festzuhalten, daß vielfältige Verwertungsmöglichkeiten im Landschaftsbau, im Zuge von Kanalbauarbeiten, in Dränschichten und in der Betonindustrie bestehen.

## ABRIDGED VERSION

During the process of sewage drainage and treatment, recyclings such as sand from sewers, screenings and grits, as well as various other types of sludge normally occur. This treatise deals with the separation of grits of sewage treatment plants from the waste water up to a possible subsequent treatment.

The new legal stipulations – the circulation economy and waste laws ('Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz KrW-/AbfG) and the technical directions on domestic waste (TA Siedlungsabfall TASI) in the future require a suitable subsequent treatment instead of disposal.

The various possibilities of taking out sewerage grits out of the sewerage system, as well as the basics of the sedimentation process of grits are being described. Relating thereto, the following items are being considered: DIN 19569, various sand traps and their specific properties when separating the mineral substances, as well as the subsequent processing of those in a grit recycling device. In this connection, the function and consequences of the unity grit/grit washing on the treatment process are being explored and modified conditions are being postulated.

Aim of the grit treatment is to realise the exploitation of sewerage grits in compliance with the recommendations of the Federal State community for waste (Ländergemeinschaft Abfall LAGA). The processed material of all examined grit recycling devices fulfils all standards for a limited utilization according to LAGA for which the cross-reference values Z2 must be met.

For the operation of grit recycling devices the existence of various optimisation potentials was observed. In this connection, a reclamation of fine sand out of the incurring wash water, as well as an additional pollutant reduction of the washed sand via attrition is being discussed.

The retrofitting of a sewage treatment plant with a grit recycling device causes considerable costs. For this reason, it is even more important for the operator to assure the exploitation of the washed grits and the disposal of all recyclings respectively before purchasing the plant. Therefore, it is necessary, to determine the expected remaining impact in advance. Instead of large-scale examinations by means of test plants, a method for the determination of the rest contamination which was elaborated in the course of this treatise is applicable.

Based on the existing examination results, and not at least due to the long-term co-operation with operators of sewage treatment plants, as well as recycling companies, it must be pointed out that there is a diversity of treatment possibilities in the fields of landscaping, in the course of sewerage works, in de-watering layers and in the concrete industries.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....	1
1.2 VORGEHENSWEISE .....	3
<b>2 ENTSTEHUNG, VERWERTUNG UND ENTSORGUNG VON KANALSAND UND SANDFANGGUT 4</b>	<b>4</b>
2.1 HERKUNFT-MENGE-BESCHAFFENHEIT .....	4
2.2 KANALSAND/SANDFANGGUT .....	7
2.2.1 Kanalnetz.....	7
2.2.1.1 Werkstoffe .....	7
2.2.1.2 Räumtechniken .....	8
2.2.2 Sandfänge.....	10
2.2.2.1 Absetzvorgänge .....	10
2.2.2.2 Tiefsandfang [nach BLUNK 1933].....	11
2.2.2.3 Flachsandfänge.....	12
2.2.2.4 Rundsandfang.....	16
2.2.2.4.1 Auslegungskriterien .....	16
2.2.2.4.2 Abscheideleistung .....	19
2.2.2.5 Belüfteter Sandfang (meist mit Fettfang).....	19
2.2.2.5.1 Auslegungskriterien .....	19
2.2.2.5.2 Abscheideleistungen .....	23
2.2.3 Zusammenfassung .....	24
2.3 VERWERTUNG/ENTSORGUNG .....	26
2.3.1 Rechtliche Grundlagen.....	26
2.3.1.1 Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG).....	26
2.3.1.2 Stoffliche Verwertung-LAGA .....	28
2.3.1.3 Beseitigung gemäß TA Siedlungsabfall (TASI) .....	34
2.3.1.4 Lagerung gemäß TA Abfall (TAA).....	36
2.3.1.5 Diskussion .....	37
2.3.2 Parameter.....	39
2.3.2.1 Schwermetalle .....	39
2.3.2.2 Parameter, die organische Inhaltsstoffe erfassen .....	42
2.3.2.3 weitere anorganische Parameter .....	45
2.4 PHYSIKALISCHE/CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN MINERALISCHER STOFFE .....	46
2.4.1 Ausgangssituation .....	46
2.4.2 Bindungsformen verwandter Stoffgruppen.....	47
2.4.3 Verfahren aus der Aufbereitungstechnik – Übertragbarkeit von Boden .....	50
2.4.4 Bindungsformen an Sande (Sedimente/Uferfiltrat) – Übertragbarkeit.....	54
<b>3 BETRIEB VON SANDWASCHANLAGEN AUF KLÄRANLAGEN.....</b>	<b>56</b>
3.1 VERFAHRENSBESCHREIBUNG .....	56
3.2 EINHEIT SANDFANG–SANDWASCHANLAGE.....	61
3.2.1 Waschwasserrückführung vor den Sandfang.....	63
3.2.2 Waschwasserrückführung nach den Sandfang.....	63
3.2.3 Rückführung mit Organikabtrennung.....	63
<b>4 MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>64</b>
4.1 ALLGEMEINES – UNTERSUCHTE ANLAGEN.....	64
4.2 VERSUCHSBESCHREIBUNG ATTRITION .....	67
<b>5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN - VORGEHENSWEISE.....</b>	<b>68</b>
5.1 ERMITTLUNG DER REINIGUNGSLEISTUNG VON KANALSAND UND SANDFANGGUT .....	68
5.1.1 Grundlagen.....	68
5.1.2 Massenfluß der Prozeßprodukte und Untersuchungsparameter .....	70
5.1.2.1 Sieblinien.....	71
5.1.2.2 Untersuchungsparameter .....	72
5.2 UNTERSUCHUNGEN ZUR OPTIMIERUNG DER WIRKUNGSWEISE.....	73
5.2.1 Attrition .....	73
5.2.2 Verbesserung der Abscheideleistung - Hydrozyklontechnik.....	73
5.3 KRITISCHE PARAMETER BEI EINER VERWERTUNG.....	75

<b>6 AUSWERTUNG/ERGEBNISSE.....</b>	<b>76</b>
6.1 ARBEITSWEISE VON SANDWASCHANLAGEN.....	76
6.1.1 <i>Untersuchungsparameter</i> .....	76
6.1.1.1 Glühverlust.....	77
6.1.1.2 Feststoff.....	78
6.1.1.3 Eluat.....	78
6.1.2 <i>Reinigungsleistung</i> .....	78
6.1.3 <i>Zwischenergebnisse</i> .....	80
6.2 MASSENFLUß.....	82
6.2.1 <i>Prozeßprodukte - Sieblinien</i> .....	82
6.2.1.1 Abscheideleistung im Sandfang.....	82
6.2.1.2 Abscheideleistung von Sandwaschanlagen.....	83
6.2.1.3 Anforderungen an Sandwaschanlagen auf Kläranlagen.....	86
6.2.2 <i>Untersuchungsparameter</i> .....	88
6.2.3 <i>Ergebnisse</i> .....	91
6.3 OPTIMIERUNG VON SANDWASCHANLAGEN.....	94
6.3.1 <i>Attrition</i> .....	94
6.3.2 <i>Hydrozyklontechnik</i> .....	96
6.4 VORHERSAGE DER RESTBELASTUNG INFOLGE SANDAUFBEREITUNG.....	98
6.4.1 <i>Ausgangssituation</i> .....	98
6.4.2 <i>Wirkungsgrade - Leitparameter</i> .....	98
6.4.3 <i>Rohabwasser – Sandfanggut - Klärschlamm</i> .....	99
6.4.3.1 Abhängigkeiten.....	99
6.4.3.2 Vorgehensweise.....	100
<b>7 DISKUSSION UND WEITERFÜHRUNG.....</b>	<b>102</b>
<b>8 ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>106</b>
<b>9 LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>110</b>
<b>10 ANHANG.....</b>	<b>122</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Werkstoffe in der Kanalisation [BIELECKI, 1995] .....	7
Abb. 2.2: Spülsauger mit Wasserrückgewinnung [Fa. Faun, 2000].....	9
Abb. 2.3: Sinkgeschwindigkeit $v_s$ für Kugeln mit einer Dichte von $2,65 \text{ g/cm}^3$ in Abhängigkeit vom Durchmesser und von der Temperatur des Wassers [KALBSKOPF, 1997] .....	10
Abb. 2.4: Tiefsandfang nach BLUNK [KALBSKOPF, 1997] .....	11
Abb. 2.5: Essener Langsandfang [KALBSKOPF, 1997].....	13
Abb. 2.6: Korrekturfaktor $v_s/v_o$ in Abhängigkeit vom Korndurchmesser der Sande I und II nach Langsandfangversuchen mit $v_M=27,5 \text{ cm/s}$ und nach CAMP [KALBSKOPF, 1997] .....	13
Abb. 2.7: Zulässige Oberflächenbeschickung eines Langsandfanges [KALBSKOPF, 1997] .....	14
Abb. 2.8: Staupprofile zur Erzielung einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit [KALBSKOPF, 1997] ..	15
Abb. 2.9: Wasserspiegellage und Strömungskomponenten im Rundsandfang [GEIGER, 2000] .....	17
Abb. 2.10: Zulässige Beschickungsmenge $Q$ in Abhängigkeit vom Abscheidegrad und Sandfangdurchmesser [BOTSCH, 1974].....	18
Abb. 2.11: Spiralförmige Bahn eines Feststoffpartikels in einem belüfteten Sandfang PATT/STEIN, 1996].....	20
Abb. 2.12: Mögliche Partikelbahn in einem belüfteten Sandfang in Abhängigkeit von Zugabestelle und Partikeldurchmesser [PATT/STEIN, 1996].....	20
Abb. 2.13: Einfluß der Zugabestelle auf den Rückhalt [PATT/STEIN, 1996].....	21
Abb. 2.14: Querschnitt eines belüfteten Sandfanges [PATT/STEIN, 1996].....	23
Abb. 2.15: Verfahrbare Räumrichtungen von Sandfängen [GEIGER, 2000, modifiziert].....	25
Abb. 2.16: Entsorgungs- und Behandlungswege des Sandfanggutes [ESCH/KRÜGER, 1999] .....	27
Abb. 2.17: Darstellung der einzelnen Einbauklassen mit den dazugehörigen Zuordnungswerten [LAGA, 1997] .....	29
Abb. 2.18: Bindungsformen, Mechanismen und Reaktionspartner der Schwermetalle an Feststoffe [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974, modifiziert].....	47
Abb. 2.19: Wirbelschichtsortierer [SCHAUENBURG, 1998].....	50
Abb. 2.20: Apparateprinzipien des Naßaufschlusses kontaminierter Böden [NEEßE/GROHS, 1990] .....	51
Abb. 2.21: Attritionszelle [NEEßE/GROHS, 1990].....	51
Abb. 3.1: Verfahrensfießbild Sandwaschanlage HUBER/ GEIGER.....	57
Abb. 3.2: Reststoffentnahme aus dem Abwasser einer Kläranlage .....	62
Abb. 5.1: Belastung von Einzelfractionen verschiedener Parameter .....	70
Abb. 5.2: Prozeßprodukte einer Sandwaschanlage.....	71
Abb. 5.3: Typische Sieblinie von ungewaschenem Sandfanggut .....	71
Abb. 5.4: Hydrozyklon [Firmenprospekt Fa. SCHAUENBURG, 2000].....	74
Abb. 6.1: Sieblinie von Sandfanggut und Sandanteil des Klärschlammes der Kläranlage B.....	82
Abb. 6.2: Sieblinie von Prozeßprodukten einer Sandwaschanlage .....	84
Abb. 6.3: Abscheiderate einer Sandwaschanlage in Abhängigkeit der Korngröße .....	85
Abb. 6.4: Reduktion von Zink in Abhängigkeit der Korngröße und des Glühverlustes (Ausgangsmaterial) .....	88
Abb. 6.5: Schadstoffreduktion (Zn, Cu, Pb, KW) bei Attrition [BRANNER, HITZLER, u. a., 2001].....	94
Abb. 6.6: Sieblinie von gewaschenem Sand und Zyklon Unterlauf.....	96
Abb. 6.7: Abscheiderate eines Hydrozyklons zur Feinsandrückgewinnung aus Waschwässern .....	97
Abb. 7.1: Charakteristisches Stoff- und Materialflußdiagramm .....	105

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Summenlinie des Sandfanggutgewichtes nach Kläranlagen [ESCH, KRÜGER, 1999] .....	6
Tab. 2.2: Abscheidegrade in Abhängigkeit vom Korndurchmesser [BOTSCH, 1974] .....	19
Tab. 2.3: Parameter zur Auslegung belüfteter Sandfänge [PATT/STEIN, 1996].....	22
Tab. 2.4: Mittlerer erreichbarer Rückhalt in Abhängigkeit vom Korndurchmesser ( $t_r = 10$ min) [PATT/STEIN, 1996].....	23
Tab. 2.5: Angaben zu den betrachteten Sandfängen .....	27
Tab. 2.6: Zuordnungswerte Feststoff Boden [LAGA, 1997] .....	31
Tab. 2.7: Zuordnungswerte Eluat Boden [LAGA, 1997].....	32
Tab. 2.8: Vorgaben für den Umfang der Dokumentation [LAGA, 1997] .....	33
Tab. 2.9: Zuordnungskriterien für Deponien [TASI,1993] .....	35
Tab. 2.10:Überprüfung der untersuchten Vorschriften (ohne zulässige Abweichungen ) anhand des 99%igen Konfidenzniveaus [Berger, 2000, modifiziert] .....	38
Tab. 2.11: Austauschkapazität wichtiger sedimentbildender Materialien [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974]....	55
Tab. 4.1: Angewandte Normen für die Untersuchung nach LAGA/TASI .....	65
Tab. 4.2: Untersuchte Kläranlagen .....	66
Tab. 5.1: Belastung von Kanalsand und Sandfanggut respektive Zuordnungswerte nach LAGA.....	68
Tab. 5.2: Meßwerte für Abwasser (Zulauf), Sandfanggut (ungew.) und Klärschlamm für diverse Schadstoffe.....	75
Tab. 6.1: Belastung von gewaschenem Material respektive Einbauklassen (LAGA) .....	77
Tab. 6.2: Wirkungsgrad (Mittelwerte) verschiedener Sandaufbereitungsanlagen (8+1 Stück) in Abhängigkeit des Untersuchungsparameters .....	79
Tab. 6.3: Anzahl überschrittener Parameter (ohne erlaubte Abweichung) für Mittelwerte aus Anhang 1 für 9 untersuchte Anlagen .....	81
Tab. 6.4: Prozentuale Verteilung in Abhängigkeit von Korngröße und Anfallort .....	83
Tab. 6.5: Abscheiderate von Sandwaschanlagen.....	84
Tab. 6.6: Auswertung nach Gleichung 6.2/ 6.3; Anhang III & IV.....	90
Tab. 6.7: Abscheideraten für Sandfänge .....	91
Tab. 6.8: Rückbelastung der Kläranlage durch eingeleitetes Waschwasser (jeweils ohne Kanalsand)93	
Tab. 6.9: Meßwerte für Rohabwasser (Zulauf), Sandfanggut (ungew.) und Klärschlamm für diverse Schadstoffe verschiedener Kläranlagen.....	100
Tab. 6.10:Mittelwerte je Parameter sowie Gesamt für Faktor RS und SK.....	101

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Problematik der stetig wachsenden Entsorgungskosten für Abfälle jeglicher Art sowie die neuen gesetzlichen Rahmenbedingungen – das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) – erfordern zukünftig anstelle der Beseitigung eine geeignete Verwertung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird im KrW-/AbfG für die Bundesrepublik Deutschland in erster Linie die Vermeidung von Abfällen definiert. Da dieses Ziel nur in wenigen Fällen erreichbar ist, sollte vor einer Entsorgung der anfallenden Reststoffe die Verwertung in Betracht gezogen werden.

Die TA-Siedlungsabfall (TASI), welche für eine Beseitigung der Reststoffe einzuhalten ist, fordert, ebenso wie das KrW-/AbfG, vorrangig eine Aufbereitung und Verwertung von Rückständen aus der Abwasserbehandlung anzustreben, anstelle sie zu entsorgen. Da diese Reststoffe nicht vermeidbar sind, gewinnt nach SCHÄFER/HOFFMANN (1998) die Reststoffverwertung und Entsorgung im Vergleich zur bewährten Abwasserreinigung zunehmend an Bedeutung.

Im Zuge der Abwasserbehandlung fallen an unterschiedlichen Stellen Reststoffe an. Neben Klärschlämmen und Rechengut sind auch Sande dazuzurechnen, die vorwiegend aus Straßeneinläufen stammen. Bereits im Kanalsystem können sich Sande an Orten mit geringen Fließgeschwindigkeiten ablagern und müssen aus dem Kanalnetz mit Kanalspülfahrzeugen in regelmäßigen Abständen abgesaugt werden. Alle mineralischen Bestandteile des Abwasserstroms, die sich nicht im Kanalnetz ablagern, gelangen schließlich zu Kläranlagen, wo sie im Sandfang abgeschieden und gemeinsam mit Kanalspülgut aufbereitet werden.

Unter welchen Voraussetzungen die Kläranlagensande verwertbar sind, wo sie anfallen und wie sie aufbereitet werden, soll in vorliegender Arbeit betrachtet werden. Dazu werden für den Betrieb dieser Aufbereitungsanlagen insbesondere folgende Punkte analysiert:

- *Wirkungsweise und Auswirkungen des Zusammenhangs von Sandfang/Sandwäsche auf den Klärprozeß anhand eines Massenflusses der anfallenden Sande*

Die im Sandfang abgeschiedenen Bestandteile des Abwassers werden vermehrt in Sandwaschanlagen aufbereitet. Bei der Auslegung sowie beim Betrieb der Einheit Sandfang/Sandwäsche ist die Trennleistung der funktionalen Einheit sowie der einzelnen Behandlungsschritte zu beachten. Diesbezüglich wird speziell auf die Kornverteilung des Sandfanggutes eingegangen, um die erreichbare Abscheideleistung einer nachgeschalteten Aufbereitungsanlage zu ermitteln. Nach DIN 19569 muß die Trennleistung dieser Aggregate größer als die des Sandfangs sein.

In Ergänzung zur DIN 19569 soll eine geeignete Methode zur Überprüfung der Abscheideleistung entwickelt werden, um eine einheitliche Grundlage für die Fachwelt zu schaffen.

Für den Fall, daß die anfallenden Waschwässer Feinsande enthalten, sind geeignete Maßnahmen zur Behandlung dieser zu diskutieren.



- *Reduzierung der Sandkontamination mit Sandwaschanlagen respektive der Untersuchungsparameter der Ländergemeinschaft Abfall (LAGA)*

Verschiedenen Veröffentlichungen (SCHÜßLER, 1995; ATV/VKS-FACHAUSSCHUß 3.11, 1996; BAUER, 1996; SCHÄFER/HOFFMANN, 1998) ist die Sandkontamination des Sandfanggutes sowie vereinzelt des gewaschenen Sandes zu entnehmen. Jedoch ist für den Aufbereitungsprozeß zur Zeit kein Wirkungsgrad, unabhängig von dem verwendeten Verfahren, bekannt. Da zukünftig vermehrt Sande einer Verwertung zuzuführen sind, müssen die für alle Untersuchungsparameter geforderten Grenzwerte eingehalten werden.

In diesem Zusammenhang sollen für die Untersuchungsparameter der LAGA Wirkungsgrade für die Sandaufbereitung ermittelt und eine Erklärung für ablaufende physikalische sowie chemische Reaktionen gefunden werden.

- *Erarbeitung von Optimierungsmöglichkeiten für Sandwaschanlagen*

In manchen Fällen können die gesetzlich geforderten Grenzwerte (Verwertung, Deponierung) nicht eingehalten werden. Mit Hilfe von Zusatzaggregaten, wie sie in der Bodenaufbereitung verwendet werden, besteht die Möglichkeit, die Wirkungsweise zu optimieren.

Diese Aggregate sind hinsichtlich des Betriebs auf Kläranlagen zu untersuchen und, soweit realisierbar, durch Versuche sowie vor Ort Untersuchungen, sind Leistungsdiagramme zu ermitteln. Anhand dieser soll es zukünftig möglich sein, die maschinelle Einrichtung in Verbindung mit einer Sandwaschanlage zu bemessen.

- *Ermittlung von Abhängigkeiten des Aufbereitungsprozesses, mit der Absicht, gewonnene Erkenntnisse auf unbekannte Einsatzfälle anzuwenden*

Bevor ein Kläranlagenbetreiber heutzutage in eine Aufbereitungsanlage investiert, ist vorab die zu erwartende Kontamination des gewaschenen Materials von Interesse. Damit ist es im Vorfeld erreichbar, sich um geeignete Verwertungsmöglichkeiten zu bemühen.

Zu diesem Punkt wird ein Verfahren entwickelt, das es unter Einbeziehung vorhandener Größen ermöglicht, die Belastung des gewaschenen Sandes zu bestimmen. Darüber hinaus ist für die Sandaufbereitung ein Stoff-Materialflußdiagramm zu erstellen, das alle anfallenden Prozeßprodukte berücksichtigt. Damit soll bereits im Planungsstadium erreicht werden, die anfallenden Massen der jeweiligen Stoffgruppe zuordnen zu können.

## 1.2 Vorgehensweise

Für Kanalsande werden verschiedene Entnahmemöglichkeiten aus dem Kanalnetz sowie für Sandfanggut die Grundlagen der Absetzvorgänge dargestellt. Dazu wird speziell auf verschiedene Sandfangtypen und deren Besonderheiten bei einer Abtrennung der mineralischen Abwasserinhaltsstoffe eingegangen. Sowohl für Kanalsand wie auch für Sandfanggut erfolgt eine Analyse in Bezug auf Zusammensetzung, Korngrößen, Organikanteil und Menge. Diese Daten werden benötigt, um den Input einer Sandwaschanlage zu charakterisieren und damit Vorgänge während der Wäsche zu beschreiben.

Anhand von Massenbilanzen für alle Prozeßprodukte einer Sandwaschanlage können die Auswirkungen auf den Klärprozeß dargestellt werden. Dazu ist es notwendig, Sieblinien auszuwerten sowie die absoluten Massen aller relevanten Reststoffe mit mineralischem Anteil (Sandfanggut, Klärschlamm) zu ermitteln. Mit den Massenbilanzen wird die Wirkungsweise und vor allem die Abscheideleistung der Aufbereitung ermittelt.

Neben der Erstellung von Massenbilanzen sollen Zusammenhänge über die physikalischen und chemischen Abläufe evaluiert werden. Da für Kläranlagensande nur bedingt Untersuchungsergebnisse vorliegen, werden verwandte Bereiche aufgrund ihrer ähnlichen Zusammensetzung (mineralischer und organischer Anteil) herangezogen, mit dem Ziel, sie auf Sandwaschanlagen zu übertragen.

Da die beschriebenen Reststoffe nicht vermeidbar sind, wird eine Verwertung, wie im KrW-/AbfG gefordert, nach einer Behandlung angestrebt. Eine Möglichkeit, die aufbereiteten Sande zu verwerten, ist die Anwendung der „Technischen Regeln“ der Ländergemeinschaft Abfall (LAGA). Darin sind für verschiedene Einsatzfälle Einbauklassen mit substanzspezifischen Grenzwerten definiert. Kann das Material nicht verwertet werden, erfolgt eine Deponierung, bei der die Forderungen der TASI bzw. der TA Abfall einzuhalten sind.

Da in manchen Fällen die Anforderungen für eine Verwertung nicht erfüllt sind, besteht die Forderung, Sandwaschanlagen zu optimieren. Mit dem Hintergedanken Ressourcen zu schonen, wird diese Problematik aufgegriffen. Diesbezüglich werden zusätzliche Verfahrensschritte untersucht.

Die Parameter Blei, Kupfer, Zink sowie PAKs und KWs entscheiden in der Regel, ob das aufbereitete Material verwertbar ist oder nicht. Für diese kritischen Parameter wird ein Verfahren entwickelt, um die Schadstoffbelastung von Sandfanggut aus abhängigen Größen (Klärschlamm, Rohabwasser) zu bestimmen. Daraus kann für eine Sandaufbereitung die Restbelastung bestimmt werden.

## 2 Entstehung, Verwertung und Entsorgung von Kanalsand und Sandfanggut

### 2.1 Herkunft-Menge-Beschaffenheit

Der in Kanalnetzen und Kläranlagen anfallende Sand stammt vorwiegend aus Straßeneinläufen, Grünanlagen und bedingt auch aus Haushaltsabwässern. Zusätzlich ist ein vermehrter Sandanfall aus Neubaugebieten festzustellen, welcher häufig zu Problemen wie Verschleiß und Beeinträchtigung der Betriebssicherheit in der Kanalisation und auf Kläranlagen führen kann.

Ablagerungen von Sand und Kies in Kanalnetzen sind auf verschiedene Ursachen zurückzuführen. Vor allem treten diese bei geringen Gefällen, unterschiedlichen hydraulischen Belastungen sowie bei Rückstau im Netz auf. Im Abwasser enthaltene Faserstoffe begünstigen natürliche Absetzvorgänge durch Bildung von Faserbündeln. Selbst Abflußspitzen reichen dann nicht mehr aus, um diese Ablagerungen zu remobilisieren. Deshalb ist eine periodische Reinigung der Kanalnetze notwendig, um eine Beeinträchtigung der Betriebssicherheit auszuschließen [HINZ, 1995].

Reinigungsintervalle von 2 - 5 Jahren haben sich bewährt, um Hindernisse wie Wurzeln oder eingeleitete Grobstoffe zu beseitigen bzw. Bauschäden rechtzeitig zu erkennen. Problematische Bereiche sollten unter Umständen in kürzeren Intervallen gereinigt oder inspiziert werden. [HINZ, 1995; HAUBMANN, 1997]

Eine allgemein gültige Regel für die Zusammensetzung der Kanalsande läßt sich wegen der großen Inhomogenität nur sehr schwer erstellen. Der größte Anteil besteht aus Sand und Kies, die mit Fäkalien vermischt sind. Weiterhin können jedoch auch Ziegelsteine, Schnüre, Eisenstangen oder Tierkadaver in den Kanalsanden enthalten sein.

Eine mengenmäßige Erfassung von Kanalsand und Sandfanggut erfolgt anhand des spezifischen Anfalls je Einwohnerwert  $g/(EW \cdot d)$  sowie des enthaltenen organischen Anteils, gemessen als Glühverlust (GV). Von einem spezifischen Anfall an Kanalsand kann nach dem bisherigen Kenntnisstand nicht ausgegangen werden. Hierbei ist die Beschaffenheit und der Zustand der Kanalsysteme zu unterschiedlich, um einen Richtwert für die Ermittlung nach Einwohnerwerten festzulegen. Als Orientierung kann jedoch von einer Streuung in der Größenordnung von 1 bis 20  $g/(EW \cdot d)$  ausgegangen werden. Die Erfahrungswerte der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kanalsande hinsichtlich des Parameters Glühverlust liegen zwischen 5 % und 35 %, wobei in der Regel Kanalsand weniger organische Bestandteile als Sandfanggut enthält. Auch der Wassergehalt ist abhängig von der Art der Anlieferung; enthält unentwässertes 30 % - 40 % und vorentwässertes Kanalspülgut 40 % - 70 % Feststoff.

Alle Bestandteile des Abwassers, die sich nicht im Kanalnetz ablagern, gelangen schließlich zur mechanischen Reinigung einer Kläranlage. Durch Rechenanlagen werden in der Regel alle Partikel  $> ca. 8 - 15 \text{ mm}$  entfernt. Im Sandfang erfolgt eine Abscheidung von mineralischen Bestandteilen ( $\geq 0,1 - 0,2 \text{ mm}$ ), um betriebliche Störungen im nachfolgenden Klärprozeß auszuschalten.

Die häufigsten Probleme sind versandete Belüftungsbecken, Störungen der Umwälzströmung in Flockungsbecken, Schäden an Schlammräumanlagen oder erhöhter Materialverschleiß bei den maschinellen Ausrüstungen. Sande, die nicht im Sandfang aus dem Abwasserstrom entfernt wurden, gelangen entweder über den Primär- oder Überschußschlamm in die Schlammbehandlung. Vor allem in Faultürmen besteht die Gefahr, daß sich Sand dort absetzt und verdichtet. Rühraggregate sind folglich nicht mehr in der Lage die Ablagerungen zu lösen, was zur Folge hat, daß nur durch teure Entleerungen der Sand entfernt werden kann. Die beschriebenen Ablagerungen können das Faulturmvolume reduzieren, was Beeinträchtigungen in der Schlammfäulung mit sich zieht.

Demzufolge ist es aus Gründen der Betriebssicherheit und um hohe Instandhaltungskosten zu vermeiden, bei vielen Abwasser- und Schlammbehandlungseinheiten einer Kläranlage erforderlich, eine Trennung der mineralischen Bestandteile des Abwassers von den organischen Stoffen durchzuführen.

Für die Entsandung des Abwassers gibt es erprobte Einrichtungen, die je nach Konstruktionsart und Betriebsweise als Tief-, Flach-, Rund- oder belüftete Sandfänge bezeichnet werden. Sie erfüllen folgende Bedingungen:

1. Abscheidung des Sandes und anorganischen Materials bis zu einem Korndurchmesser von 0,2 bis 0,1 mm,
2. Trennung der mineralischen Bestandteile von den faulfähigen, organischen Schlammstoffen.

Da grobe Nahrungsmittelreste, pflanzliche und tierische Abfälle einen wesentlich größeren Durchmesser und damit eine höhere Sinkgeschwindigkeit als Feinsande im Abwasser haben, ist eine vollständige Klassierung zwischen mineralischen und organischen Stoffen im Sandfang nicht möglich. Aus diesem Grund sollte eine größere Gewichtung auf die Entfernung der Feinsande aus dem Abwasser als auf die Gewinnung reiner Sande gelegt werden [KALBSKOPF, 1997; TEICHGRÄBER, 1997].

Weitere Bestandteile des Sandfanggutes sind alle körnigen Bestandteile des Abwassers, wie z. B. Asche, Glas, Metallbruchstücke und Speisereste, die in der vorgeschalteten Rechen-/Siebanlage nicht zurückgehalten werden. Durch die ständig variierende Zusammensetzung des Sandfanggutes bewegt sich der Glühverlust innerhalb weit gesteckter Grenzen. Hier gibt z. B. DIMOVSKY (1993) für seine Untersuchungen 6 % - 80 % an und verweist gleichzeitig auf den von LONDONG (1990) angegebenen Bereich von 4 % - 71 %. Dagegen liegt der Glühverlust bei ROOS (1995) zwischen 5 % und 55 % bei einem Wassergehalt von 30 % - 70 %.

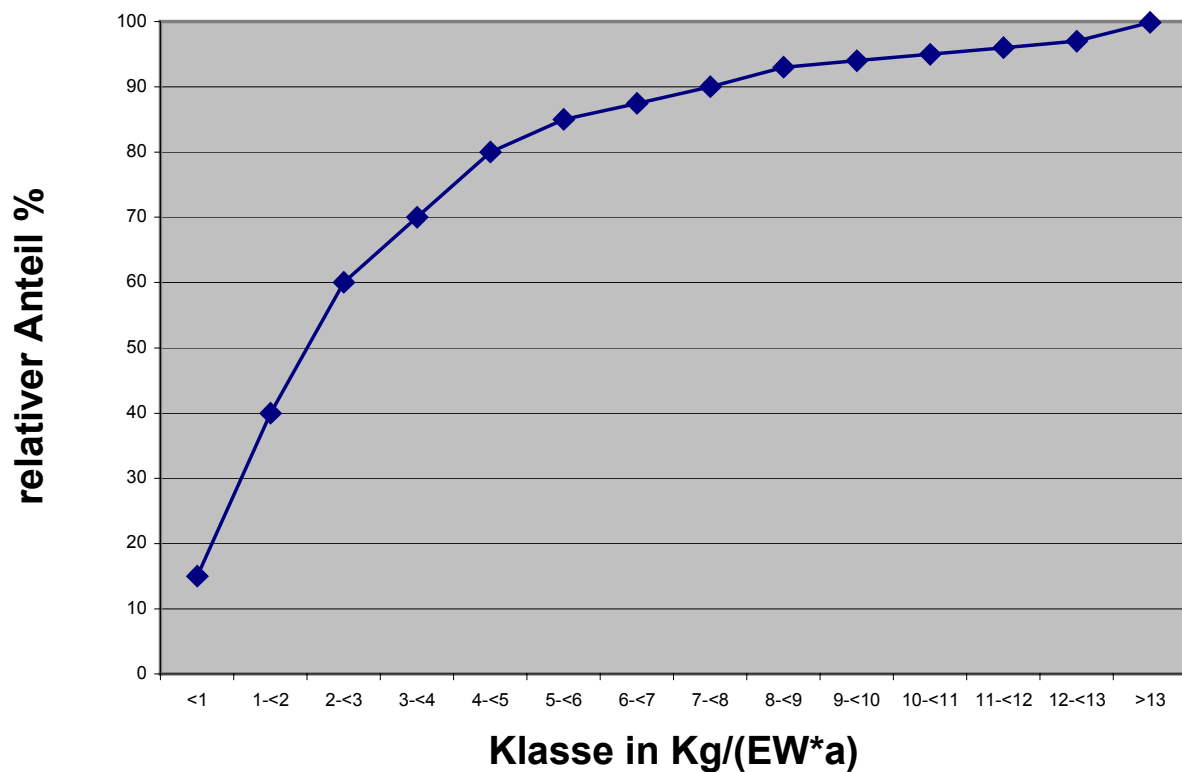
[DIMOVSKY, 1993]

Der abwasserspezifische Sandfanggutanteil wird von DIMOVSKY (in DOHMAN/DIMOVSKY, 1993) aus mehreren Quellen zusammengetragen:

1. HOSANG [1984] = 19,2 bis 46 g/(EW\*d) oder 7,0 bis 16,7 Kg/(EW\*a)
2. KALBSKOPF [1966] = Mittelwert von 16,9 g/(EW\*d) oder 6,2 Kg/(EW\*a)
3. IMHOFF [1979] = Mittelwert von 8,8 g/(EW\*d) oder 3,2 Kg/(EW\*a).

ESCH und KRÜGER (1999) geben unter Berücksichtigung der Anlagengröße im Mittel einen spezifischen Sandfanggutanteil von  $3,8 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$  an. Dieser Wert liegt im unteren Bereich, der von DIMOVSKY zitierten Quellen. Die Summenlinie der Sandmengen ist ergänzend in folgender Abbildung dargestellt:

Tab. 2.1: Summenlinie des Sandfanggutgewichtes nach Kläranlagen [ESCH, KRÜGER, 1999]



In dieser Tabelle findet die Anlagengröße keine Beachtung, was einen geringeren 50 % Wert [ca.  $2\text{-}3 \text{ Kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ ] begründet. Jedoch kann mit dieser Tabelle eine Abschätzung der abgetrennten Sandmenge und deren Häufigkeit getroffen werden.

## 2.2 Kanalsand/Sandfanggut

### 2.2.1 Kanalnetz

#### 2.2.1.1 Werkstoffe

Bereits zur Zeit der Römer wurden Kanäle zur Ableitung der Abwässer eingesetzt. Noch im 19. Jahrhundert sind große Querschnitte überwiegend gemauert und gegen Ende meist aus Ort beton erstellt worden. Im Gegensatz dazu entstanden kleinere Querschnitte meist aus Steinzeug, Gußeisen- oder Betonrohren. Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts wurden zusätzlich Faserzement-, Kunststoff- und Stahlbetonrohre (mit und ohne Auskleidung) eingesetzt. [BIELECKI, 1995]

In der folgenden Abbildung sind die unterschiedlichen Werkstoffe zum Bau einer Kanalisation dargestellt:

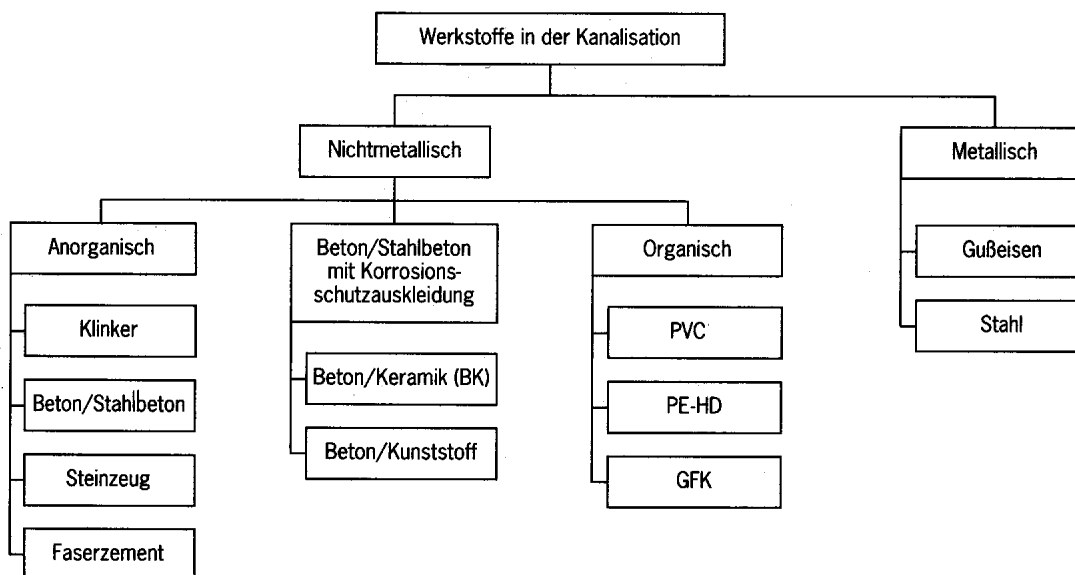


Abb. 2.1: Werkstoffe in der Kanalisation [BIELECKI, 1995]

Die Wahl des Werkstoffes wird den verschiedenen Beanspruchungen angepaßt. Die wichtigsten Auslegungskriterien sind chemische und statische Belastungen. Das Korrosionsverhalten und die Durchflußmenge spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle bei der Bemessung. [BIELECKI, 1995]

In einer Studie über den Zustand des Dresdner Kanalnetzes wurden verschiedene Materialien sowie Altersgruppen untersucht. Dabei ist deutlich zu erkennen, daß die Lebensdauer der Kanäle aus Steinzeug bzw. Beton zu PVC sich ungefähr halbiert. Bei der Untersuchung der Altersgruppen der Kanäle, die vor 1900, zwischen 1900 und 1940, und von 1940 bis heute erbaut wurden, fällt deutlich auf, daß sich die Lebensdauer auf nur noch ein Fünftel reduziert hat. [BAUR, HÖROLD, 2001]

Auf weitere spezielle Anforderungen bei der Bemessung der Kanalisation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen und kann in der einschlägigen Literatur nachgelesen werden.

### 2.2.1.2 Räumtechniken

Da das Kanalsystem einem natürlichen Verschleiß unterliegt und sich unterschiedliche Stoffe ablagern, ist eine regelmäßige Inspektion und Kanalreinigung durchzuführen. Durch Leckagen treten Störstoffe (i. d. R. Kies und Erdreich) in den Kanal ein, die durch folgende Räumfahrzeuge wieder entfernt werden:

- Hochdruckspüler (HD) und Kanalsauger (Gespann-Reinigung)
- Spülsauger
- Spülsauger mit Wasserrückgewinnung

Das verwendete Verfahren ist u.a. abhängig von folgenden Gegebenheiten:

- Kanalquerschnitt
- Ablagerungsmenge
- Beschaffenheit des Kanalgutes
- Lage der Kanäle im Verkehrsraum
- Kanalmaterial

Sind gemauerte Kanäle bereits beschädigt, ist der Einsatz eines HD-Gerätes nicht zu empfehlen. Zumindest sollte der Wasserdruck auf ein Minimum reduziert werden. Bei kleinen Nennweiten aus PVC Rohren ist ebenfalls Vorsicht geboten. Für die Reinigung der Sinkkästen im Einlaufbereich der Kanäle eignen sich dagegen Kanalsauger besonders gut. Kombinationen von Hochdruckspülern und Kanalsaugern können Ablagerungen äußerst effektiv beseitigen. Erst sollte eine Freispülung, anschließend eine Aufnahme des verflüssigten Mediums durch den Kanalsauger erfolgen. Diese Art der Reinigung ist besonders für große Einzelstücke und Mengen an Kanalsanden geeignet. [BIELECKI, 1995; HAUßMANN, 1997]

Die wichtigsten Charakteristika des Kanalspülgutes können wie folgt beschrieben werden:

- Menge: 1 - 20 g/(EW\*d)
- Feststoffgehalt: 40 % - 70 % (bereits vorentwässert)
- Glühverlust: 5 % - 35 %

Als Kombigerät wird der Spülsauger eingesetzt. Er ermöglicht sowohl die Spülung als auch die Möglichkeit Ablagerungen abzusaugen.

Folgende Abbildung zeigt einen Spülsauger mit Wasserrückgewinnung:

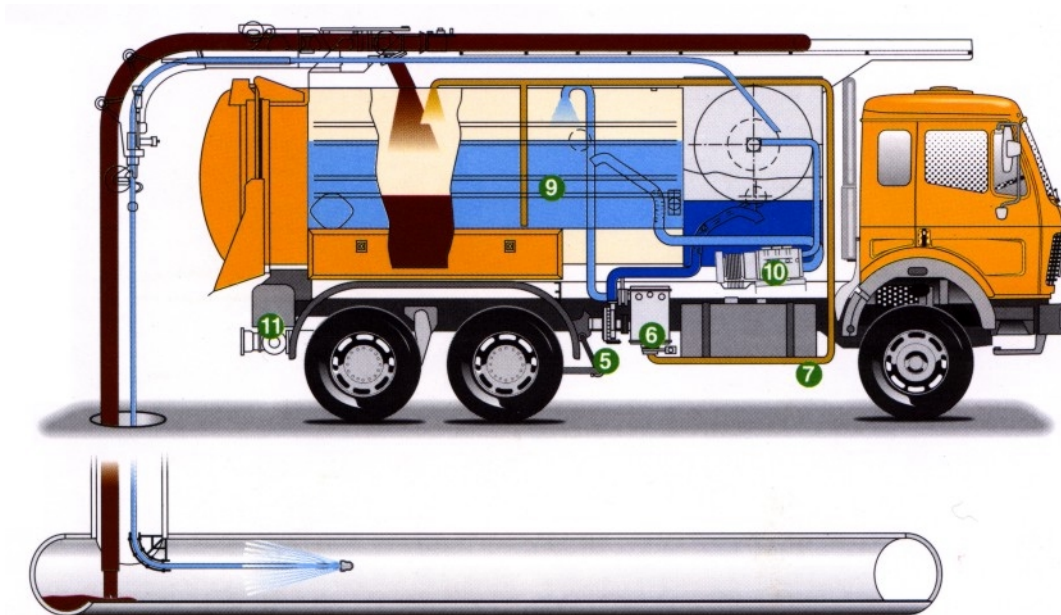


Abb. 2.2: Spülsauger mit Wasserrückgewinnung [Fa. Faun, 2000]

Als Zusatzmodul für das Spül- und Sauggerät gibt es die Wasserrückgewinnung, welche das eingesaugte Wasser filtriert und somit zur Spülung verwendet werden kann. Dieses Modul macht es möglich, mit einem minimalen Verlust an Frischwasser zu arbeiten und die zum Nachfüllen von Wasser bedingten Standzeiten zu minimieren.



## 2.2.2 Sandfänge

### 2.2.2.1 Absetzvorgänge

Die allgemeinen Auslegungskriterien zur Sandabscheidung sind der einschlägigen Fachliteratur (z. B. KALBSKOPF, 1966/1997; LONDONG, 1987; PATT/STEIN, 1996) zu entnehmen und werden im folgenden kurz zusammengestellt. Da zur Bemessung von Sandfängen die Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  von Sandkörnern und der unten aufgeführte Oberflächensatz von HAZEN (in KALBSKOPF, 1997) nötig ist, werden diese hier nochmals aufgeführt.

KALBSKOPF (1997) gibt nach LANE für Abwasser in Abhängigkeit von Temperatur und Korndurchmesser folgende Sinkgeschwindigkeiten (Standzylinder, ruhendes Medium) für Quarzsand an:

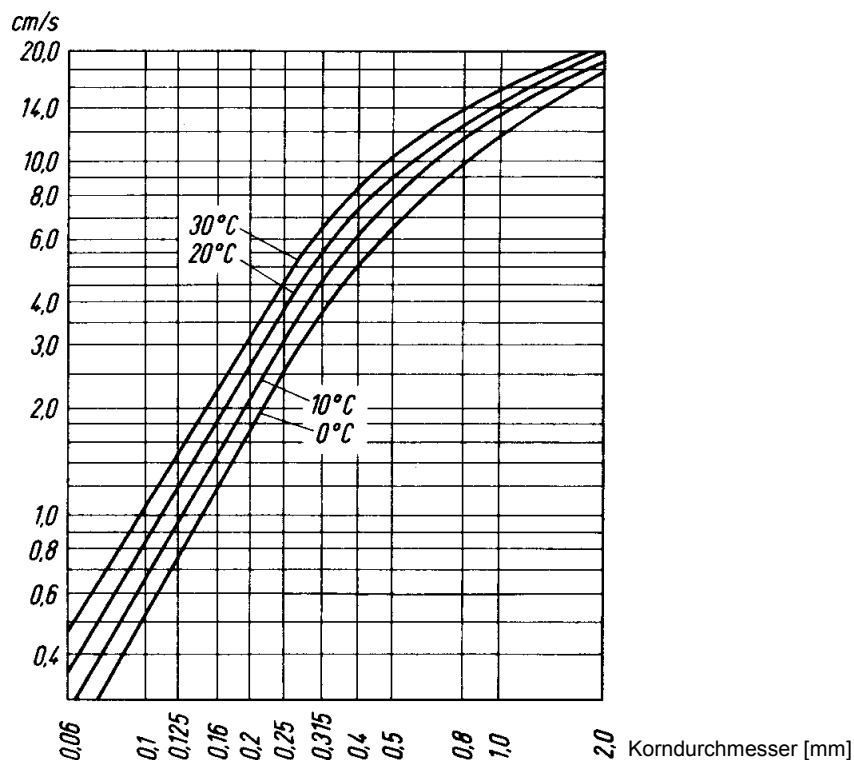


Abb. 2.3: Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  für Kugeln mit einer Dichte von  $2,65 \text{ g/cm}^3$  in Abhängigkeit vom Durchmesser und von der Temperatur des Wassers [KALBSKOPF, 1997]

Der Oberflächensatz nach HAZEN (in KALBSKOPF, 1997) als Pfropfenströmungsreaktor sei hier kurz erwähnt:

$$O = Q / v_s \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{(Gleichung 2.1)}$$

$v_s$  = Sinkgeschwindigkeit des Sandkorns [m/h]

$Q$  = Zuflußwassermenge [m<sup>3</sup>/h]

$O$  = Sandfangoberfläche [m<sup>2</sup>]

### 2.2.2.2 Tiefsandfang [nach BLUNK 1933]

Der Tiefsandfang besteht aus einem zylindrischen Behälter, der vertikal in den Boden eingelassen ist. Durch einen geeigneten Zuführungskanal gelangt das Abwasser nach unten (Richtungspfeil) und durchströmt den Sandfang von unten nach oben. Hierbei sinkt der Sand in die untere Behälterspitze ab, sofern die Sinkgeschwindigkeit größer als die nach oben gerichtete Strömungsgeschwindigkeit des Abwassers ist.

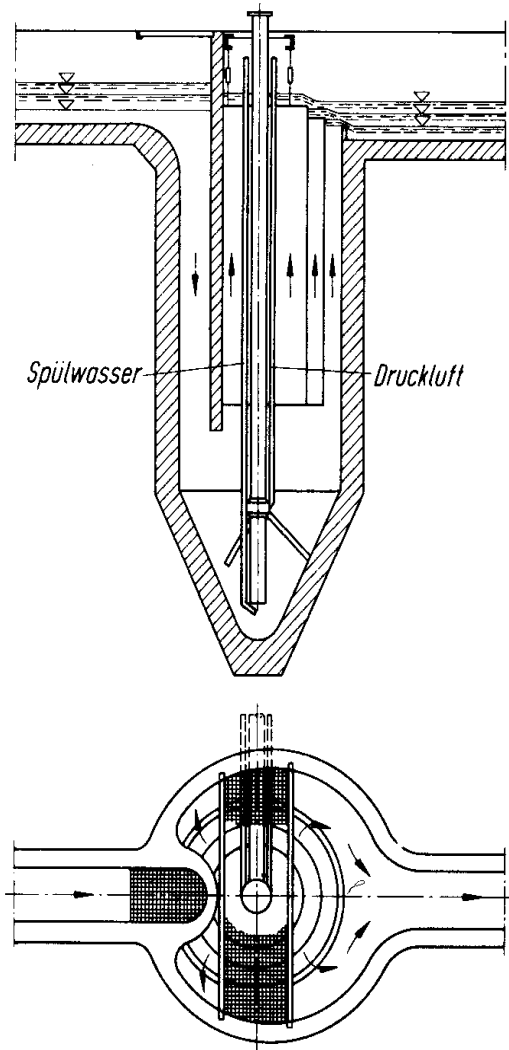


Abb. 2.4: Tiefsandfang nach BLUNK [KALBSKOPF, 1997]

Nach KALBSKOPF (1966, 1997) gilt für vertikal durchströmte Tiefsandfänge, nach durchgeführten Versuchen, der Oberflächensatz auch näherungsweise für turbulente Strömungen. Wird ein Absetzbecken gleichmäßig vertikal durchströmt, setzen sich alle Feststoffe ab, deren Sinkgeschwindigkeit größer als die vorhandene Oberflächenbeschickung ist. Dabei ist eine ausreichende Durchflußhöhe von mindestens 3 m einzuhalten. Etwa vorhandene turbulente Mischbewegungen, senkrecht zur Hauptströmung, verlagern lediglich die Position der Sandkörner bezüglich der Hauptströmungsachse. In Strömungsrichtung wirkende Schwingungen verzögern

den Absetzvorgang, beeinflussen aber bei ausreichend langem Spülweg nicht den Bereich der ausgespülten Korndurchmesser.

Beim Tiefsandfang wird eine gleichbleibende Strömungsgeschwindigkeit des aufsteigenden Wasserstroms angestrebt, indem, abhängig von der Zuflußmenge, die Querschnittsfläche durch konzentrische Tauchzylinder in Zonen unterteilt wird. Bei niedrigen Nachtzuflüssen wird nur die äußere Ringzone durchströmt. Steigt der Zufluß, kommen nacheinander die übrigen Ringzonen zum Einsatz.

Die Bemessung der zylindrischen Ringzonen erfolgt ebenfalls nach dem Oberflächensatz von HAZEN.

Bei verschiedenen Zuflußmengen  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] kann mit Gleichung 2.1 bei vorgegebener Sinkgeschwindigkeit  $v_s$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] der auszuscheidenden Sandkörnung nach Abbildung 2.3 die Abstufung der einzelnen Ringzonen des Gesamtquerschnitts erfolgen. Dazu wird das kleinste abzuscheidende Grenzkorn festgelegt, eine Abwassertemperatur gewählt, und mit Hilfe von Abbildung 2.3 die Sinkgeschwindigkeit abgelesen. Anschließend ist es möglich, anhand von charakteristischen Zuflüssen die Querschnittsfläche der Ringzonen zu berechnen.

Die verschiedenen Ringzonen weisen unterschiedliche geodätische Höhen des Austrittsquerschnittes auf, um bei steigendem Zufluß nach und nach in Betrieb zu gehen. Die Strömungsgeschwindigkeit im abwärts gerichteten Zuführungskanal sollte 1 m/s nicht übersteigen, da die Umlenkturbulenz im unteren Querschnitt auf einen Meter Ausdehnung zu begrenzen ist. [KALBSKOPF, 1997]

Für den Tiefsandfang nach BLUNK wird eine Oberflächenbeschickung ( $Q/O$ ) von 360 m/h (10 cm/s) empfohlen. Bei dieser Wahl wird die entsprechende Sinkgeschwindigkeit von Sand der Korngröße 0,6 mm erreicht. Diese Art Sandfang wurde zur Grobentsandung des Abwassers entwickelt. [KALBSKOPF, 1997]

Das abgesetzte Material wird im allgemeinen durch Mammutpumpen auf Sandstapelplätze gefördert. Um Verstopfungen der Trichterspitze zu verhindern, werden dort mit Druckluft und Wasser operierende Spüllanzen installiert.

Aufgrund einer sehr schlechten Abscheideleistung von Feinsanden wird der Tiefsandfang heute nicht mehr gebaut, verdeutlicht aber sehr gut die Entwicklung bis zu den jetzt gebräuchlichen Sandfangtypen.

### 2.2.2.3 Flachsandfänge

Charakteristisch für Flachsandfänge (z. B. ESSENER-Langsandfang) ist der horizontale Durchfluß des Abwassers. Flachsandfänge werden meistens als Absetzrinnen oder flache Absetzbecken mit überwiegend rechteckigem oder trapezförmigem Querschnitt gebaut. Die Trennung des Sandes aus dem Abwasser soll bei dieser Bauart durch Vorgabe einer horizontalen Fließgeschwindigkeit von  $\leq 0,3$  m/s erreicht werden. Der sedimentierte Sand soll dabei auf dem Grund verbleiben, wobei spezifisch leichtere organische Inhaltsstoffe von der Strömung in Schwebelage gehalten oder abgespült werden.

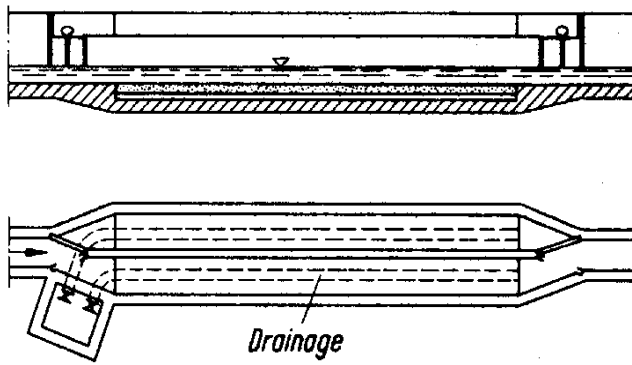


Abb. 2.5: Essener Langsandfang [KALBSKOPF, 1997]

Wie KALBSKOPF (1997) nach DOBBINS und CAMP erwähnt, wirkt sich der rechnerisch nachgewiesene, verzögernde Einfluß der Strömungsturbulenz auf den Absetzvorgang in verstärktem Maße bei Feinsand aus.

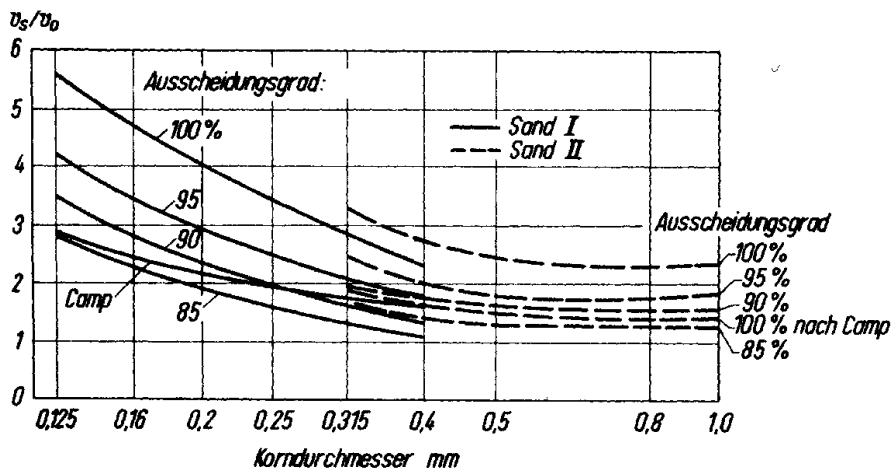
Um dem schlechteren Wirkungsgrad der Praxis gegenüber der Theorie aufgrund von Turbulenzen Rechnung zu tragen, ist die Sandfangoberfläche zu erhöhen. Deshalb wird bei der Bemessung von Flachsandfängen ein Korrekturfaktor  $v_s/v_o > 1$  zu dem bekannten Oberflächensatz eingeführt:

$$O = v_s/v_o \cdot Q/v_s = Q/v_o \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

mit

- $v_s$  = Sinkgeschwindigkeit des Sandkorns [m/h]
- $v_o$  = Oberflächenbeschickung [m/h oder cm/s]
- $Q$  = Zuflußwassermenge [m<sup>3</sup>/h]
- $O$  = Sandfangoberfläche [m<sup>2</sup>]

KALBSKOPF (1997) gibt in Abbildung 2.6 den experimentell ermittelten Korrekturfaktor (dimensionslos)  $v_s/v_o$  in Abhängigkeit vom Korndurchmesser und dem Abscheidegrad an. Für Sande mit unterschiedlichem Korndurchmesser kann in Abhängigkeit der geforderten Abscheideleistung der erforderliche Korrekturfaktor ( $> 1$ ) abgelesen werden:

Abb. 2.6: Korrekturfaktor  $v_s/v_o$  in Abhängigkeit vom Korndurchmesser der Sande I und II nach Langsandfangversuchen mit  $v_M=27,5$  cm/s und nach CAMP [KALBSKOPF, 1997]

Mit Hilfe des Korrekturfaktors und Gleichung 2.2 wird die erforderliche Oberfläche  $O$  des Flachsandfanges ermittelt.

Die zulässigen Oberflächenbeschickungen für verschiedene Korndurchmesser, die ebenfalls versuchstechnisch ermittelt wurden, sind aus Abbildung 2.7 zu entnehmen. Die Oberflächenbeschickung kann in Abhängigkeit der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v_m$  im Sandfang abgelesen werden ( $v_{s_{min}}$  als Referenzgröße; ruhendes Wasser):

*Ausscheidungsgrad 100%*

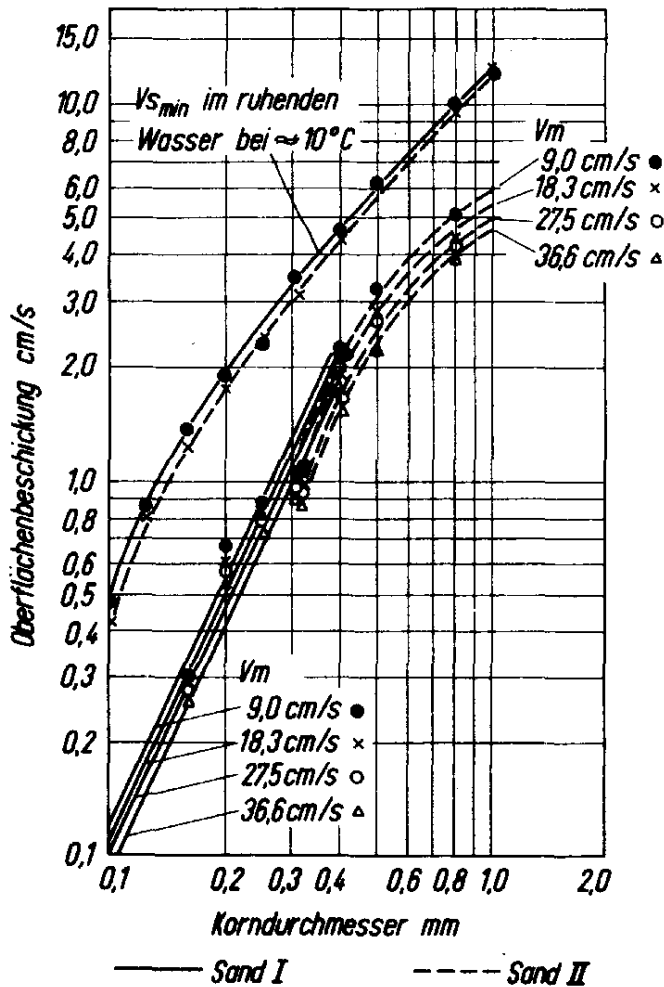


Abb. 2.7: Zulässige Oberflächenbeschickung eines Langsandfanges [KALBSKOPF, 1997]

Um die Geometrie eines horizontal durchflossenen Sandfanges zu bestimmen, stehen zwei Gleichungen zur Verfügung:

$$O = Q/v_0 = L \times B \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

$$F = Q/v_m \text{ [m}^2\text{]} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

mit:

$L$  = Sandfanglänge [m]

$B$  = Sandfangbreite [m]

$F$  = Durchströmte Querschnittsfläche des Sandfanges [m<sup>2</sup>]

$v_m$  = Strömungsgeschwindigkeit horizontal [m/h]

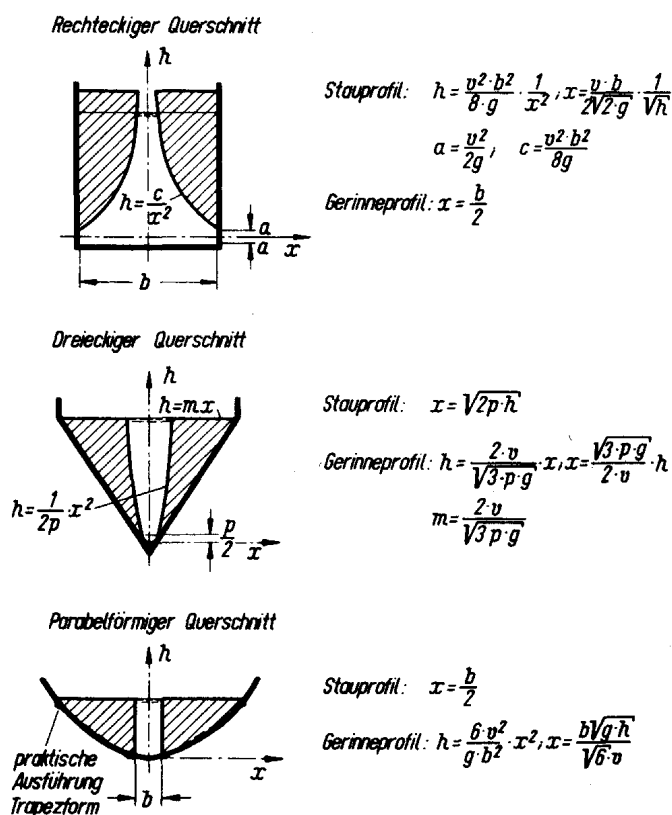
Zur Auslegung werden die Bemessungswassermenge  $Q$  und die zulässige Oberflächenbeschickung  $O$  vorgegeben.

Durch Vorgabe einer Breite  $B$  und einer Wassertiefe  $h$  kann die Form des Durchflußquerschnittes  $F$  festgelegt werden. Zur Bemessung der Größen  $L$ ,  $B$  und  $h$  stehen folglich zwei Gleichungen zur Verfügung. Einer dieser Parameter kann frei gewählt werden.

Unabhängig von der Durchflußmenge sollte sich die horizontale Fließgeschwindigkeit  $v_m$  im Bereich von 0,2 bis 0,3 m/s bewegen. Dies wird durch Anpassen der Sandfangbreite in Abhängigkeit von der Wasserspiegellage bei unterschiedlichen Durchflußmengen erreicht.

Durch die Wahl eines günstigen Gerinneprofils, wie z. B. eines Trapezgerinnes, kann eine annähernd konstante Fließgeschwindigkeit eingehalten werden. Dies wird durch eine steigende Querschnittsfläche (Ablaufrinne) mit steigendem Wasserspiegel erreicht.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anordnung eines Staubleches am Ablauf, wie in Abbildung 2.8 dargestellt. Dadurch ist es möglich, die horizontale Fließgeschwindigkeit konstant zu halten. Die Geometrie des Staubleches ist so berechnet, daß obige Forderungen eingehalten werden. In folgender Abbildung sind Stauprofile für verschiedene Gerinnequerschnitte dargestellt:



$v$  = Strömungsgeschwindigkeit im Sandfang, zumeist 0,30 m/s

$g$  = Erdbeschleunigung 9,81 m/s<sup>2</sup>

$p$  = doppelter Abstand des Brennpunktes der Parabel von der  $x$ -Achse

Abb. 2.8: Stauprofile zur Erzielung einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit [KALBSKOPF, 1997]

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anordnung paralleler Rinnen, deren Zulaufkanten auf verschiedenen Höhen liegen und in Abhängigkeit vom Wasserstand nacheinander in Betrieb genommen werden.

Die Entleerung des Flachsandfanges erfolgt entweder von Hand (z. B. Kläranlage Radeberg) oder durch eine automatische Räumeinrichtung. Im Falle der Handräumung sind zwei parallele Rinnen erforderlich, die wechselseitig betrieben und geräumt werden. Die maschinelle Räumung erfolgt meist durch fahrbare Räumbrücken mit Bodenschilden, Mammutpumpen oder durch Kettenräumer mit Räumbalken bzw. Räumlöffeln. Möglich wäre auch eine maschinelle Räumung durch in Längsrichtung an der Sohle angeordnete Räum-schnecken.

Neben dem beschriebenen ESSENER Langsandfang gibt es u. a. den DORR-Sandfang (Firma DORR-OLIVER), bei welchem ein rundes Absetzbecken Verwendung findet und der Sand mit Hilfe eines Pilgerschrittklassierers gefördert wird. Diese Ausführung wird nicht zu den Rundsandfängen gerechnet, da die Bemessung ausschließlich anhand der Oberflächenbeschickung ohne Ausnutzung einer Ringströmung (verminderte Oberfläche) erfolgt.

#### *2.2.2.4 Rundsandfang*

##### **2.2.2.4.1 Auslegungskriterien**

Der Rundsandfang nach GEIGER oder STRATE wird als trichterförmiges Becken ausgebildet. Das Abwasser wird tangential zugeleitet, legt eine oder mehrere Umdrehungen im Becken zurück und wird anschließend wieder abgeleitet. Mit Hilfe der erzwungenen Kreisbewegung und der dadurch resultierenden Zentrifugalkraft wird im Umlaufquerschnitt eine zusätzliche Umwälzströmung von „oben außen nach unten innen“ hervorgerufen. Dadurch wird der absinkende Sand in die Trichterspitze befördert. Leichte Schwebstoffe werden durch eine aufwärts gerichtete Querströmungswalze, welche sich im Zentrum des Rundsandfanges ausbildet, mitgespült. Somit kann eine gewisse Auswaschung der leichten Schwebstoffe erreicht werden.

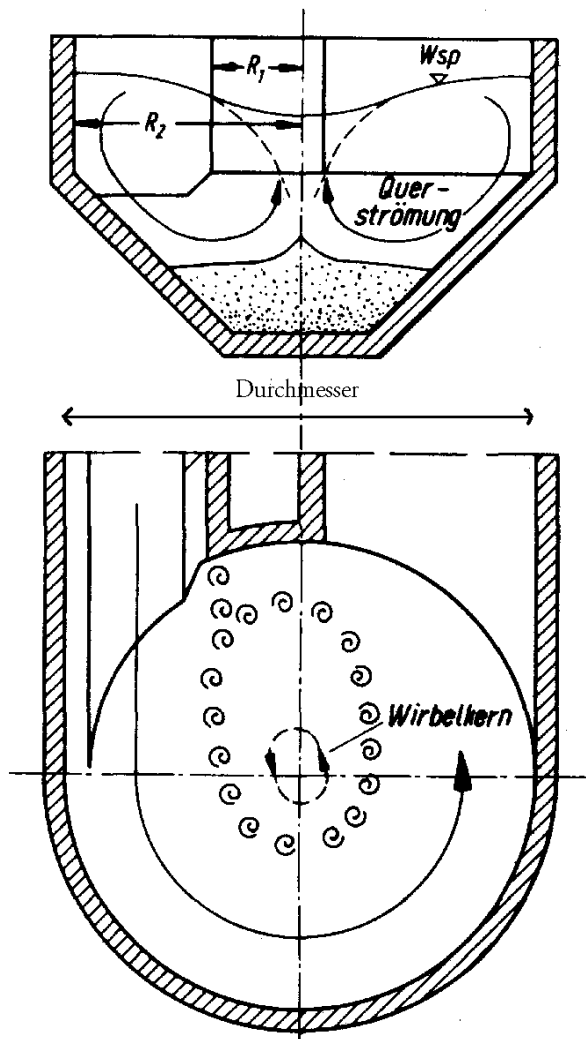


Abb. 2.9: Wasserspiegellage und Strömungskomponenten im Rundsandfang [GEIGER, 2000]

Von den Firmen DORR OLIVER sowie STRATE sind keine Auslegungskriterien ihrer Rundsandfänge veröffentlicht. Die Firma GEIGER verwendet zur Bemessung ihrer Rundsandfänge neben Abbildung 2.10 auch die Aufenthaltszeit  $t$ . Weitere Größen nach GEIGER (2000) können wie folgt zusammengefaßt werden.

- Zulaufgeschwindigkeit  $v_z$ :  $0,75 \text{ m/s} < v_z < 1,0 \text{ m/s}$
- Auslaufgeschwindigkeit  $v_a$ :  $v_a < 0,8 \text{ m/s}$
- theoretische Aufenthaltszeit  $t$ :  $30 \text{ s} < t < 45 \text{ s}$
- Sandfangvolumen  $V$  (OxTiefe):  $V = Q \times t$  (Gleichung 2.5)

Zur Bestimmung der Sandoberfläche  $O$  kann der Durchmesser in Abhängigkeit von der Beschickungswassermenge und dem Abscheidegrad aus folgender Abbildung abgelesen werden:



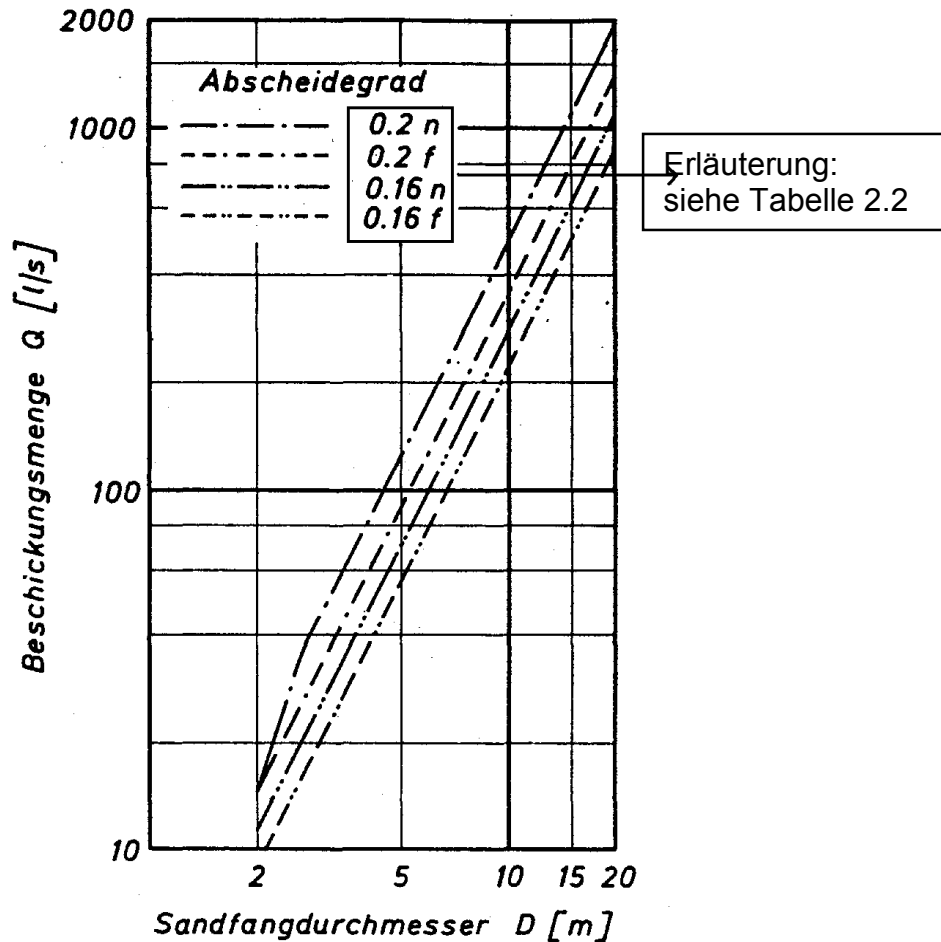


Abb. 2.10: Zulässige Beschickungsmenge  $Q$  in Abhängigkeit vom Abscheidegrad und Sandfangdurchmesser [BOTSCH, 1974]

Die mittlere Tiefe des Rundsandfanges wird nun mit Hilfe von Gleichung 2.5 sowie Abbildung 2.10 bestimmt. Die Neigung der Wände beträgt zwischen 45 und 60 Grad. Das Zentrum des Rundsandfanges muß so bemessen werden, daß eine Räumung durch eine Tauchpumpe oder Druckluftheber gewährleistet ist. Das Sand-Wasser-Gemisch wird aus dem Sandstapelraum im Zentrum des Bauwerkes einer weiteren Behandlung zugeführt.

#### 2.2.2.4.2 Abscheideleistung

Der in Abbildung 2.10 angegebene Abscheidegrad als Auslegungskriterium für Rundsandfänge wird nach BOTSCH (1974) und GEIGER (2000) in Abhängigkeit des Korndurchmessers angegeben:

Tab. 2.2: Abscheidegrade in Abhängigkeit vom Korndurchmesser [BOTSCH, 1974]

Abscheidegrad	Korndurchmesser [mm]	Bezeichnung
95 %	0,20	0,20 normal
99 %	0,20	0,20 fein
95 %	0,16	0,16 normal
99 %	0,16	0,16 fein

Nach GEIGER (2000) wird ein Abscheidegrad von 95 % (99%) bei einem Korndurchmesser von 0,20 mm als der „**normale (feine)** Auslegungswert“ angesehen. Dieser Wert sollte dem Maximalzufluß zugeordnet werden, so daß für Normal- und Minimalzufluß ein Abscheidegrad von 95 % - 99 % - bei einem Korndurchmesser von 0,16 mm - erreicht werden kann.

Im Gegensatz zu den Auslegungskriterien ergibt sich in der Praxis meist eine Abweichung von den geforderten Werten. Es ist schwer, speziell für Rundsandfänge, eine allgemein gültige Aussage über die erzielten Abscheideleistungen sowie die Trennkorngröße zu treffen. Speziell beim Rundsandfang wird keine konstante Strömungsgeschwindigkeit erreicht.

#### 2.2.2.5 Belüfteter Sandfang (meist mit Fettfang)

##### 2.2.2.5.1 Auslegungskriterien

In den Niederlande werden aufgrund des hohen Grundwasserspiegels häufig Rundsandfänge (geringe Tiefe) eingesetzt. Im Gegensatz dazu hat sich der belüftete Sandfang bei Um- oder Neubauten auf den meisten Kläranlagen Deutschlands als Standardlösung durchgesetzt. Für die Bemessung gibt LONDONG (1987) verschiedene Möglichkeiten unterschiedlicher Autoren an. Da die Auslegung nach LONDONG/PATT (1987) u. PATT/STEIN (1996) die häufigste Verwendung findet, wird lediglich diese Bauart näher beschrieben.

Bei diesem Konzept können Auswirkungen schwankender Zuflüsse, die bei allen anderen Sandfangtypen Schwierigkeiten verursachen, ausgeglichen werden. Nicht mehr die Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zulaufmenge und Querschnittsabmessung ist ausschlaggebend, sondern vielmehr eine durch Lufteintrag erzwungene Strömung quer zur Fließrichtung. Durch den Lufteintrag über der Sohle bewegt sich ein Teilchen unter Einfluß der Spiralströmung auf einer räumlichen Bahn durch den Sandfang (Abbildung 2.11).

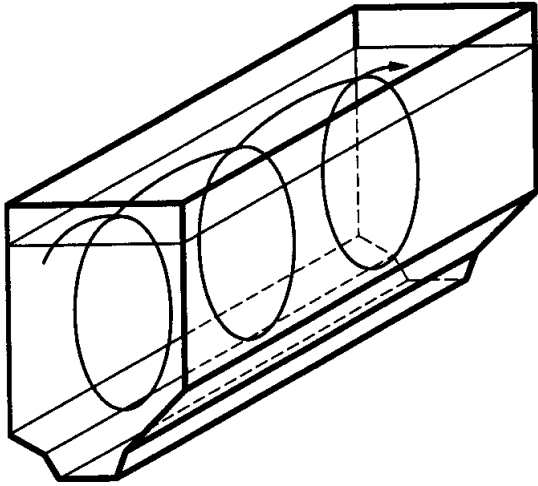


Abb. 2.11: Spiralförmige Bahn eines Feststoffpartikels in einem belüfteten Sandfang [PATT/STEIN, 1996]

Die Einleitung des Abwassers in den Sandfang wird anhand von Abbildung 2.12 exemplarisch für die Zugabestellen a und b beschrieben. In Punkt a sind hohe Walzengeschwindigkeiten und geringe horizontale Fließgeschwindigkeiten anzutreffen, wobei sich dieser Sachverhalt in b genau umgekehrt verhält.

Durch Zugabe von Abwasser mit den darin enthaltenen Feststoffteilchen in einem Bereich mit hohen Walzengeschwindigkeiten, wie sie an der Wasseroberfläche anzutreffen sind, können kleinere Partikel von der Strömung stärker beeinflusst werden als größere. Kleinere Stoffe (Abbildung 2.12; Zugabe bei Punkt a - Partikelbahn 1) erreichen somit schneller Randbereiche mit kleineren Horizontalgeschwindigkeiten und verweilen dadurch länger im Sandfang. Größere Partikel (Abbildung 2.12; Zugabe bei Punkt a - Partikelbahn 3) sinken schneller ab, gelangen so mit hoher Horizontalgeschwindigkeit und geringer Walzengeschwindigkeit in die Querschnittsmitte.

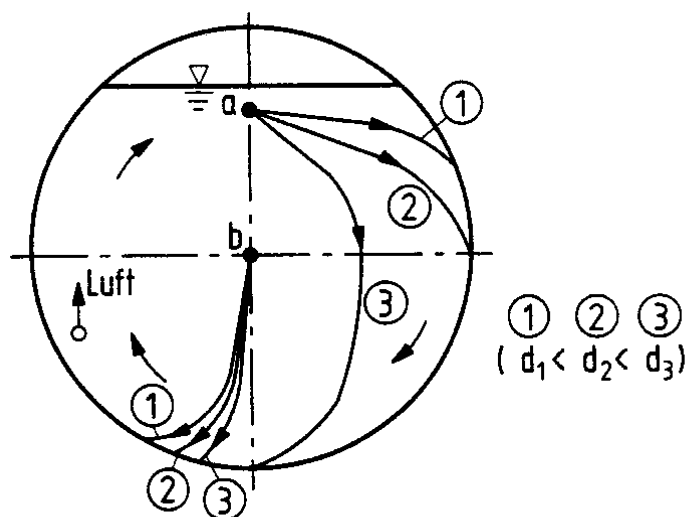


Abb. 2.12: Mögliche Partikelbahn in einem belüfteten Sandfang in Abhängigkeit von Zugabestelle und Partikeldurchmesser [PATT/STEIN, 1996]

In Querschnittsmitteln sind höhere Horizontalgeschwindigkeiten als an den Rändern anzutreffen und folglich legen zugegebene Teilchen (Abbildung 2.12; Kurven ab Punkt b) in Sinkrichtung einen längeren Weg zur Beckenachse zurück als in Querrichtung. Während dieser Bewegung sinken die Feststoffteilchen zur Sohle des Sandfanges ab. Mit zunehmendem Abstand vom Mittelpunkt nimmt die Walzengeschwindigkeit im Laufe des Absetzvorganges zu, wobei sich die Horizontalfließgeschwindigkeit kontinuierlich verringert. Bei dieser Zugabestelle ist es auch möglich, leichtere Feststoffpartikel (Abbildung 2.12; Kurve 1 bzgl. 2 ab Punkt b) stärker von der Walzenströmung zu erfassen, und somit früher in Querrichtung zu transportieren.

Von Interesse ist die Auswirkung der beiden beschriebenen Zugabestellen auf den Rückhaltefaktor  $C/C_0$  (Ausgangssandkonzentration  $C$ ; Eingangssandkonzentration  $C_0$ ) im belüfteten Sandfang. Folgende Abbildung zeigt diesen Faktor für die Zugabe des Abwassers in Rohrachse sowie an der Wasseroberfläche in Abhängigkeit der Sandfanglänge (Z-Koordinate)

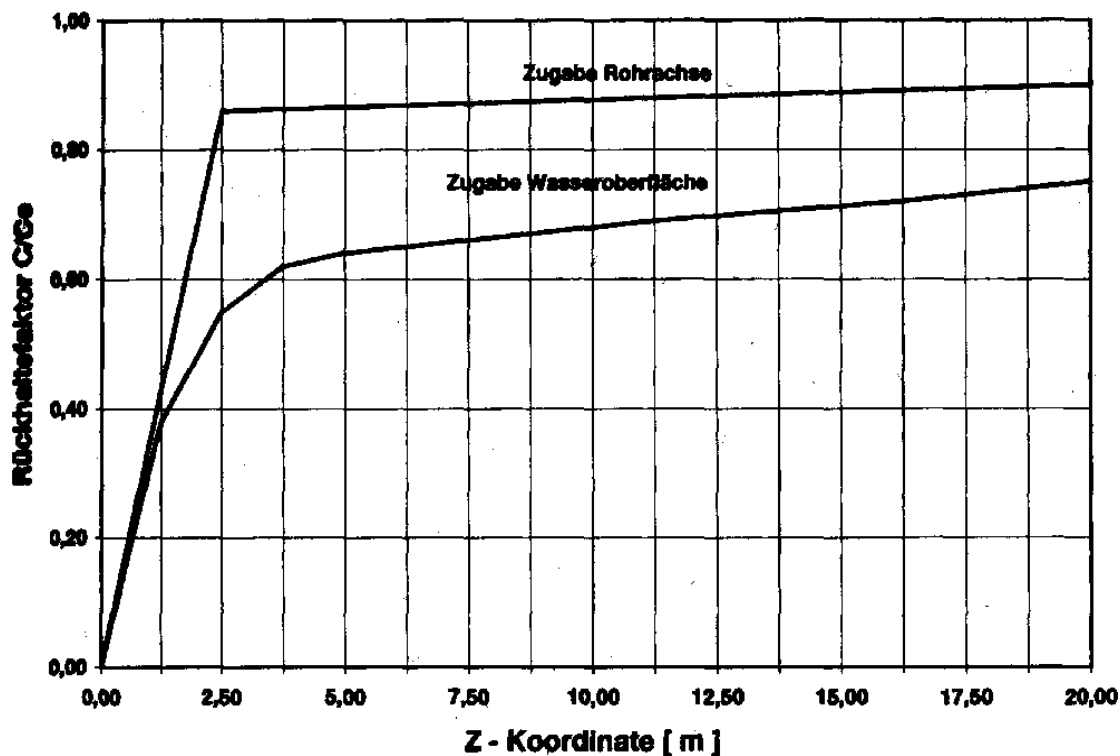


Abb. 2.13: Einfluß der Zugabestelle auf den Rückhalt [PATT/STEIN, 1996]

Ein großer Vorteil des belüfteten Sandfanges liegt in der verbesserten Trennung zwischen organischen und anorganischen Abwasserinhaltsstoffen. Die Verbesserung wird durch Einblasen von Luft erreicht und kann zudem durch Variation der Luftmenge gesteuert werden. Mit zunehmender Luftzugabe ist jedoch ein Austrag an Feinsanden in die nächste Behandlungsstufe nicht gänzlich zu vermeiden.

Für eine konstruktive Gestaltung sind in Tabelle 2.3 die wichtigsten Auslegungskriterien eines belüfteten Langsandfanges nach LONDONG (1987) und PATT/STEIN (1996) zusammengefaßt. Darüber hinaus ist in Abbildung 2.14 ein exemplarischer Querschnitt dargestellt:

Tab. 2.3: Parameter zur Auslegung belüfteter Sandfänge [PATT/STEIN, 1996]

Parameter	Bemerkung
Querschnittsfläche $A_Q$	zwischen 1,0 und 15 m <sup>2</sup>
Breiten/Tiefenverhältnis B/H	B/H = 0,8 bei maximalem Zufluß (Regenwetter); B/H = 1,0 bei Trockenwetterzufluß
Neigung der Sohle	Auf der den Belüftern gegenüberliegenden Seite ca. 45°. (Bei Anordnung einer Fettfangtasche ist aus konstruktiven Gründen u. U. nur eine Sohlneigung von 35-40° möglich; Unterhalb der Belüftung ca. 70° Sohlneigung
Sandfanglänge	Berechnung aus der gewählten Querschnittsfläche und der geforderten Durchflußzeit. (Die Länge eines Beckens muß aus konstruktiven Gründen mindestens die 10-fache Breite haben, darf dabei jedoch eine Länge von 50 m nicht überschreiten.)
Durchflußzeit $t_R$	$t_R \geq 10$ min bei $Q_{max}$ ; $t_R \geq 20$ min bei hohen Anforderungen bzw. $t_R \geq 5$ min bei geringen Anforderung an den Sandrückhalt
Lufteintrag $Q_L$ Einblastiefe $h_E$	$Q_L = 0,5-1,0 \text{ Nm}^3/\text{m}^3\cdot\text{h}$ ; $h_E = 0,875(A_Q)^{0,5}$ Geringere Luftmengen (insbesondere zur Reduzierung des Sauerstoffeintrages) sind für den Sandrückhalt nicht nachteilig, jedoch kann sich der organische Anteil im Sandfanggut erhöhen. Bei größeren Anlagen mit mehreren parallel geschalteten Becken sollten einzelne Becken bei geringen Zuflüssen abgesperrt werden können, um einer Sauerstoffanreicherung und dem damit verbundenen Vorabbau entgegenzuwirken.
Umwälzungen	$n \geq 3$
Belüfter	ca. 30 cm über Rinnenoberkante (siehe Abbildung 2.14)
Einlaufkonstruktion	Der Sandrückhalt kann verbessert werden, wenn sichergestellt ist, daß der Schußstrahl am Beckeneinlauf die wirksame Beckenlänge nicht verkürzt. Die Einlaufkonstruktion ist dementsprechend auszubilden.
Fettfang	Kann auf eine Fettfangtasche nicht verzichtet werden, so muß sie kürzer als der Sandfang sein, um einen optimalen Sandrückhalt zu gewährleisten. Die Trennwand zwischen Sand- und Fettfang muß auch bei Trockenwetterzufluß genügend tief unter die Wasseroberfläche reichen. Bei Sandfängen mit mehr als 5 Minuten Durchflußzeit bietet es sich an, die Lamellenwand zwischen Sand- und Fettfang etwa im letzten Beckendrittel geschlossen auszuführen. Es ist zu prüfen, ob nicht ein baulich getrennter Schwimmstoffabscheider in Betracht kommen kann.
Rechenanlage	Um den organischen Anteil im Sandfanggut zu reduzieren, kann dem Sandfang ein Rechen oder Sieb mit Durchlaßweiten zwischen 3 und 6 mm vorgeschaltet werden. Dabei ist zu beachten, daß es mitunter vor Rechen mit Spaltweiten unter 15 mm zu erheblichen Sandablagerungen kommen kann. Ist mit hohem Sandanfall zu rechnen, sollte der Feinrechen dem Sandfang nachgeschaltet werden.
Abdeckung	Eine Abdeckung des Sandfanges zur Begrenzung etwaiger Geruchsemissionen behindert die Zugänglichkeit zum Becken erheblich und erschwert die Wartung.

Der Querschnitt eines belüfteten Sandfanges gemäß Tabelle 2.3 ist im folgenden dargestellt:

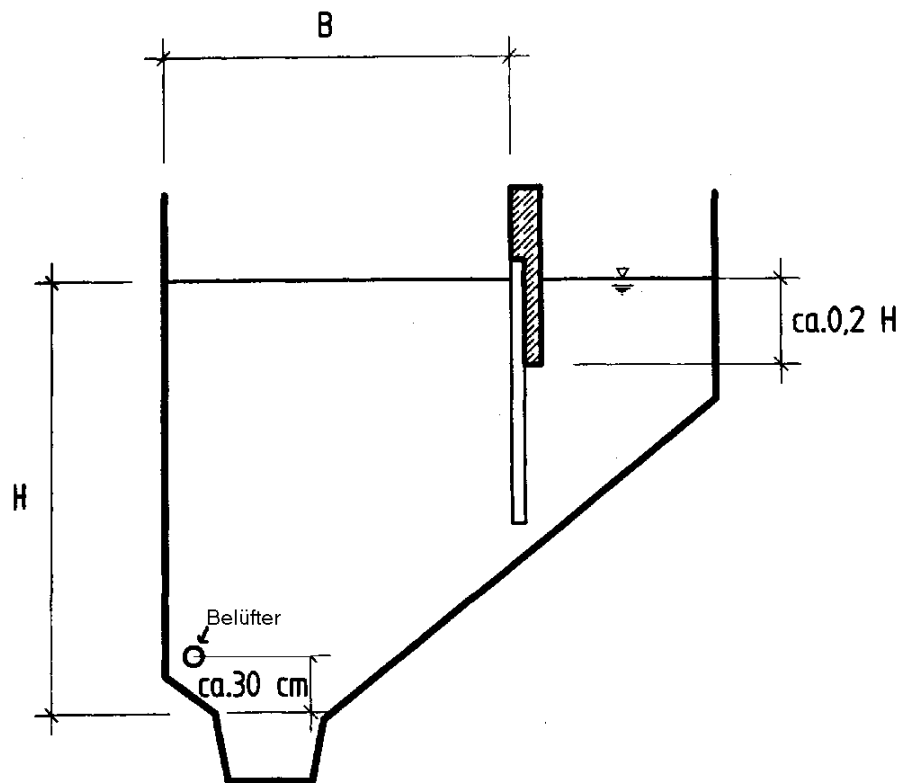


Abb. 2.14: Querschnitt eines belüfteten Sandfanges [PATT/STEIN, 1996]

### 2.2.2.5.2 Abscheideleistungen

Ähnlich der Abscheideleistung (Rückhalt) bei Rundsandfängen wird diese bei belüfteten Sandfängen im Vergleich zu den Auslegungsgrößen selten erreicht. Jedoch ist durch eine konstante Strömung im belüfteten Sandfang die Streuung der unterschiedlichen Rückhalte, hervorgerufen durch unterschiedliche Zuflüsse, nicht so groß wie bei Rundsandfängen. Für die Bemessungsgröße des Maximaldurchflusses und einer Aufenthaltszeit von  $t_r = 10$  Minuten ergibt sich folgender Rückhalt:

Tab. 2.4: Mittlerer erreichbarer Rückhalt in Abhängigkeit vom Korndurchmesser ( $t_r = 10$  min) [PATT/STEIN, 1996]

Korndurchmesser [mm]	Rückhalt [%]
> 0,30	> 95
0,20	85
0,15	75
0,10	50
< 0,07	< 10

Die experimentell gemessenen Werte der Tabelle 2.4 zeigen, daß ein Rückhalt von 100 % aller Sande im Bereich von 0,1 - 0,2 mm, im vor Ort Betrieb, nicht zu garantieren ist. Die Werte beziehen sich auf Regenwettermaximalzufluß, so daß im Trockenwetterfall durch eine geringere Oberflächenbeschickung eine bessere Abscheideleistung erzielt werden kann.

Da gerade während eines Regenereignisses wesentlich größere Sandmengen anfallen, ist in Tabelle 2.4 für die Bemessungsgröße Maximaldurchfluß der erreichbare Rückhalt belüfteter Sandfänge dargestellt.

### 2.2.3 Zusammenfassung

In Kanalnetzen lagern sich Sande und vor allem Kiese ab, die mit Hilfe von Spezialfahrzeugen abgesaugt werden, um Störungen zu verhindern. Darüber hinaus werden im Abwasser enthaltene Sande auch zu Kläranlagen transportiert.

Dort findet im Sandfang neben der Abscheidung auch eine Trennung von mineralischen und biologisch abbaubaren Wasserinhaltsstoffen statt.

Anhand des Tiefsandfanges nach BLUNK kann die Entwicklung der Sandfänge aufgezeigt werden. Die in Kapitel 2.2.2.3 beschriebenen Flachsandfänge werden in der Regel nur auf kleinen Kläranlagen eingesetzt. Diese Bauart zeichnet sich durch geringe Betriebs- (keine Belüftung) und Investitionskosten aus, wodurch sie speziell für Kläranlagen < 10 000 EW geeignet sind. Die Räumung erfolgt in den meisten Fällen manuell, indem das Gerinne seitlich geöffnet, somit der Sand entfernt und einer Entwässerung zugeführt wird. Ebenfalls ist der Einsatz von Räumbrücken (siehe Abbildung 2.15) möglich.

Die Bauart der Rundsandfänge (Kapitel 2.2.2.4) überzeugt durch eine äußerst platzsparende Bauweise. Sand, welcher sich in der Trichterspitze ansammelt, kann mit Mammut- oder Tauchmotorpumpen entnommen und ebenfalls einer Entwässerungs- bzw. Wascheinheit zugeführt werden. Während Tauchmotorpumpen in der Regel nur einen Sandanteil von ca. 2 % - 5 % fördern, ist es möglich mit Mammutpumpen bis zu 10 % zu erreichen. Die Gründungstiefe von Rundsandfängen im Vergleich zu belüfteten Sandfängen ist geringer, was bei einem hohen Grundwasserstand von Vorteil ist. Deshalb ist dieser Sandfangtyp vor allem in den Niederlanden weit verbreitet. Positiv wirkt sich dabei ebenfalls, nach Erfahrungen des Autors, der im Vergleich zu Deutschland geringere Sandanfall aus.

Da weder Flach- noch Rundsandfänge in der Regel über eine Belüftung verfügen, ergibt sich als Konsequenz eine stark unterschiedliche Zusammensetzung des Sandfanggutes. Dies zeigt sich beispielsweise in einem stark schwankenden Glühverlust, der mit Abnahme der Beschickungswassermenge steigt. Wird die Bemessungswassermenge unterschritten, werden sehr feine Sande abgeschieden. Die so erreichte Sieblinie enthält einen höheren Feinanteil, der bei der Bemessung von Sandwaschanlagen speziell berücksichtigt werden sollte.

Belüftete Sandfänge, wie in Kapitel 2.2.2.5 beschrieben, werden am häufigsten zur Entsandung des Abwassers eingesetzt. Ein großer Vorteil des belüfteten Sand-

fanges liegt in der verbesserten Trennung zwischen organischen und anorganischen Wasserinhaltsstoffen.

Der sich absetzende Sand wird mit Hilfe von mechanischen Räumeinrichtungen entnommen. Dabei finden in der Regel fahrbare Räumbrücken Verwendung, die entweder als Saug- oder Schildräumer ausgeführt werden:

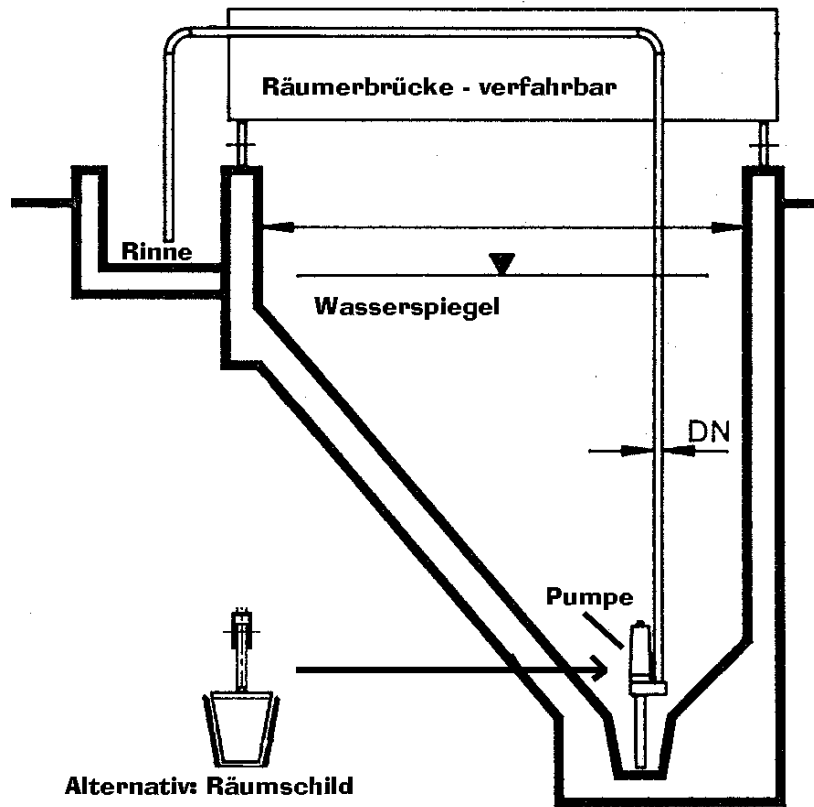


Abb. 2.15: Verfahrbare Räumeinrichtungen von Sandfängen [GEIGER, 2000, modifiziert]

Bei Saugräumern fährt die Räumbrücke über die gesamte Länge und fördert mit Hilfe von Mammut- oder Tauchmotorpumpen das Sand-Wasser-Gemisch in eine seitlich angeordnete Rinne. Über diese Rinne wird das Gemisch der weiteren Behandlung zugeführt.

Bei Schildräumern wird das Sandfanggut während des Räumvorganges durch ein an der Brücke befestigtes Schild in einen stirnseitig angeordneten Sammeltrichter bzw. eine Tasche geschoben. Von dort wird es ebenfalls mit Mammut- oder Tauchmotorpumpen zur weiteren Behandlung gefördert.

Auf die Räumung mit Bandräumer oder Räum Schnecken wird hier nicht näher eingegangen, da sie aufgrund eines enormen Verschleißes im Vergleich zu den ausführlich beschriebenen Verfahren nur selten Verwendung finden.

Die Effizienz einer Sandwäsche hängt maßgeblich von den ursprünglichen Eigenschaften des Materials ab, wie z. B. Feinsandanteile, Verlauf der Sieblinie oder Glühverlust. In welchem Umfang die Reststoffe Kanalsand oder Sandfanggut durch den Einsatz einer Sandaufbereitungsanlage verwertbar sind, soll anhand der zur Zeit verfügbaren Technologien und der gültigen Bestimmungen untersucht werden.



## 2.3 Verwertung/Entsorgung

### 2.3.1 Rechtliche Grundlagen

#### 2.3.1.1 Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen bezüglich anfallender Reststoffe werden im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) geregelt. Dessen zentrale Aussage ist der folgende Leitsatz: **"Vermeidung vor Verwertung vor Beseitigung"**, wobei im § 3, Abs. 1 nach EG-Recht zwischen "Abfällen zur Verwertung" und "Abfällen zur Beseitigung" unterschieden wird. Des Weiteren werden die Abfälle in die Kategorien "nicht überwachungsbedürftig", "überwachungsbedürftig" und "besonders überwachungsbedürftig" eingestuft.

Kläranlagen- und Kanalsande gelten, sowohl bei Verwertung als auch bei Beseitigung, gemäß der "Verordnung zur Bestimmung von überwachungsbedürftigen Abfällen zur Verwertung - BestüVAbfV" als überwachungsbedürftige Abfälle, vorausgesetzt sie werden verwertet.

Laut § 5 des KrW-/AbfG ist die Verwertung von Abfällen Pflicht, "sofern dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist", insbesondere wenn "für einen gewonnenen Stoff oder gewonnene Energie ein Markt vorhanden ist oder geschaffen werden kann. Die Verwertung von Abfällen ist auch dann technisch möglich, wenn hierzu eine Vorbehandlung erforderlich ist. Die wirtschaftliche Zumutbarkeit ist gegeben, wenn die mit der Verwertung verbundenen Kosten nicht außer Verhältnis zu den Kosten stehen, die für eine Abfallbeseitigung zu tragen wären."

Bei Sanden aus der Kanalisation und aus Kläranlagen, die in dieser Arbeit betrachtet werden, handelt es sich um Siedlungsabfälle gemäß dem Abfallgesetz. Diese Eigenschaft ist erst nach einer erfolgreichen Verwertung beendet und setzt die in den §§ 5-9 des KrW-/AbfG beschriebenen Grundpflichten als erfüllt voraus. Danach endet das abfallrechtliche Rechtsverhältnis und es kann davon ausgegangen werden, daß Beeinträchtigungen des Allgemeinwohles ausgeschlossen sind und keine weiteren Schritte erforderlich machen.

Ein allgemeiner Verwertungsvorrang entfällt jedoch, "wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt (z. B. im Hinblick auf die zu erwartenden Emissionen, Schonung der Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie)".

Bei der Verwertung von Abfällen ist besonders darauf zu achten, daß das Endprodukt einen positiven Marktwert hat, "weil andernfalls die abfallspezifische Gefahr besteht, daß es nicht genutzt oder illegal beseitigt wird". Eventuell ist durch geeignete Unterlagen, z. B. Abnahmeverträge, nachzuweisen, daß der gewonnene Stoff tatsächlich der weiteren Verwendung im Sinne seiner Zweckbestimmung zugeführt wird. Außerdem ist sicherzustellen, "daß von dem gewonnenen Stoff keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf (vgl. § 5 Abs. 3 KrW-/AbfG) ausgeht".

[BERGER, 2000]

Von der ATV-DVWK wurde im Jahre 1996 eine Studie mit 1 575 Kläranlagen bezüglich der anfallenden Sandmenge durchgeführt:

Tab. 2.5: Angaben zu den betrachteten Sandfängen

<b>Anzahl aller Kläranlagen</b>	<b>1575</b>
<b>mit belüftetem Sandfang</b>	<b>1051</b>
davon inkl. Wäsche	138
<b>mit unbelüftetem Sandfang</b>	<b>524</b>
davon inkl. Wäsche	13
<b>mit Öl- und Fettfang</b>	<b>668</b>

Eine Hochrechnung für das Jahr 1999 ergibt folgende Abbildung, in der die prozentuale Aufteilung der Entsorgungs- bzw. Behandlungswege von Sandfanggut in Deutschland dargestellt ist.

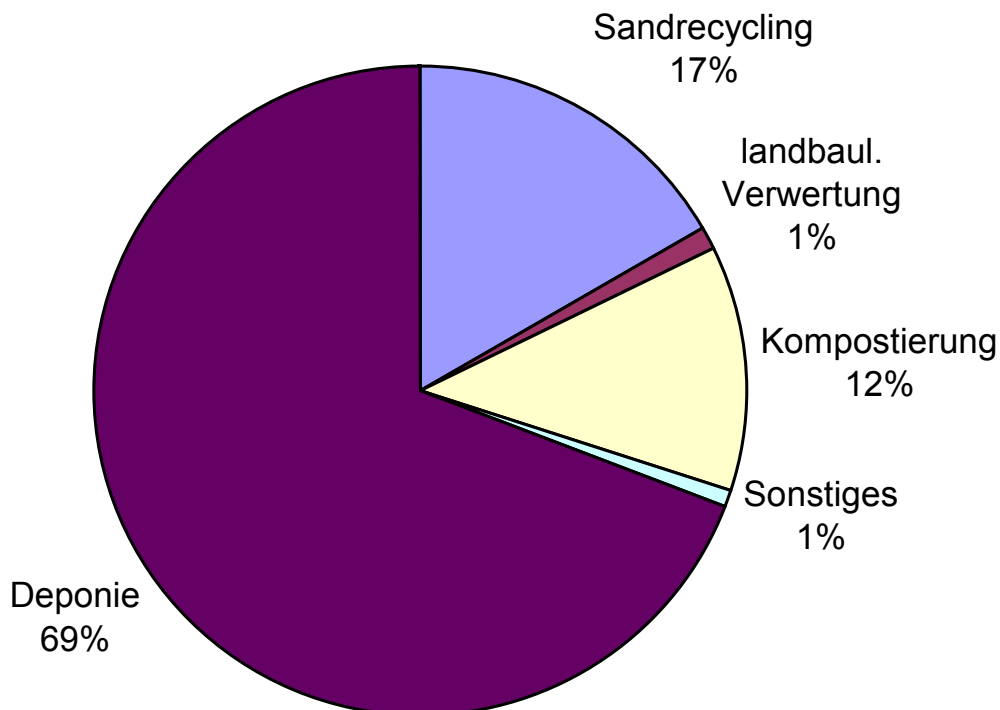


Abb. 2.16: Entsorgungs- und Behandlungswege des Sandfanggutes [ESCH/KRÜGER, 1999]

Der Abbildung kann entnommen werden, daß ca.  $\frac{2}{3}$  der anfallenden Sande aus Kläranlagen deponiert werden. Aus der Grafik geht ebenfalls deutlich hervor, daß nur 17 % des tatsächlich anfallenden Sandfanggutes aufbereitet werden.

Nach den Beobachtungen des Autors sind seit 1999 ca. 150 – 200 Sandaufbereitungsanlagen installiert worden, wobei von einer Verdoppelung dieser zu Lasten der Deponierung und Kompostierung ausgegangen werden kann.

### 2.3.1.2 Stoffliche Verwertung-LAGA

In ihrer Mitteilung bezüglich den "Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln" vom 6. November 1997 befaßt sich die LAGA mit der Problematik, daß es "bundesweit keine einheitlichen Grundsätze zur Untersuchung und Bewertung" von Reststoffen bzw. Abfällen aus ökologischer Sicht gibt.

Ziel der "Technischen Regeln" (LAGA) ist es, "die einzelnen Reststoffe-/Abfälle bzw. Reststoff-/Abfallgruppen in sich geschlossen darzustellen. (...) Die Notwendigkeit, auch die Kapitel für andere Reststoffe/Abfälle zu lesen, entfällt weitgehend."

[LAGA, 1997]

Es ist speziell darauf hinzuweisen, daß in den Mitteilungen der Ländergemeinschaft Abfall, im Gegensatz zum vorher genannten KrW-/AbfG und den in den nachfolgenden Kapiteln behandelten TA Siedlungsabfall (TASl) und TA Abfall (TAA), lediglich "Verwertungsgrundsätze und Rahmenbedingungen" beschrieben werden. In Anlehnung an den Abfallbegriff der EG werden in der Schrift Abfälle behandelt, die der Verwertung zugeführt werden sollen. Einen rechtsverbindlichen Charakter stellen die Mitteilungen nicht dar.

Ähnlich wie auch das KrW-/AbfG stellt die LAGA bei der Umsetzung des Leitsatzes "Vermeidung vor Verwertung vor Beseitigung" (KrW-/AbfG) die Frage nach der ökonomischen und ökologischen Sinnhaftigkeit der Verwertung: „So ist ein Verwertungsvorhaben in der Regel nur dann ökologisch sinnvoll, wenn die Summe aller Umweltbelastungen nicht größer ist, als beim primären Produktionsprozeß bzw. bei einer geordneten Beseitigung als Abfall. (...) Die ökonomischen Grenzen sind im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu ermitteln." [LAGA, 1997]

Ist eine Verwertung des Abfalls ökonomisch und ökologisch sinnvoll, so sollten die aufzubereitenden Stoffe gemäß der Verwertungskaskade "auf der höchsten möglichen nutzbringenden Ebene eingesetzt werden". [LAGA, 1997]

Gemäß den Anforderungen des Abfallgesetzes (§ 2 Abs. 1) sind Abfälle so zu entsorgen, daß weder Menschen (Gesundheit und Wohlbefinden) noch Nutztiere, Vögel, Fische und Wild gefährdet und darüber hinaus Gewässer, Boden und Nutzpflanzen nicht schädlich beeinflusst werden.

Im erweiterten Sinne gilt dies nicht nur für die Entsorgung, sondern auch für die Verwertung von Abfällen, wobei letzteres (siehe Verwertungsgebot § 3 Abs. 2 AbfG) unter Berücksichtigung der im vorhergehenden Kapitel genannten Kriterien der Entsorgung vorzuziehen ist.

Für die Verwertung werden je nach Restschadstoffgehalt und Einbauort Einbauklassen mit Zuordnungswerte genannt. Abweichungen sind zuzulassen, wenn im Einzelfall der Nachweis erbracht wird, daß eine Beeinträchtigung des Allgemeinwohls nicht vorliegt.

Generell ist folgende Bestimmung der LAGA einzuhalten: "Die für die schadlose Verwertung maßgeblichen Konzentrationen an Schadstoffen dürfen zum Zweck ei-

ner umweltverträglichen Verwertung weder durch die Zugabe von geringer belastetem Material gleicher Herkunft noch durch Vermischung mit anderen unbelasteten Stoffen eingestellt werden (**Verdünnungsverbot**)."

In der folgenden Abbildung sind die unterschiedlichen Einbauklassen der LAGA sowie TA Siedlungsabfall und TA Abfall dargestellt:

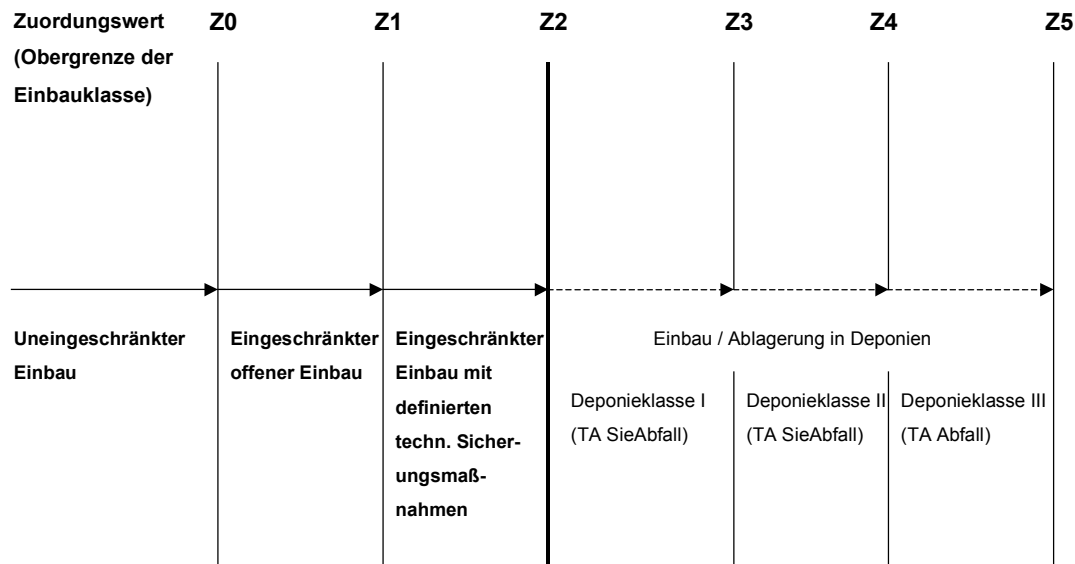


Abb. 2.17: Darstellung der einzelnen Einbauklassen mit den dazugehörigen Zuordnungswerten [LAGA, 1997]

Neben den oben aufgeführten Einbauklassen definiert die LAGA Stoffgruppen, für welche eine Verwertung in Frage kommt:

1. Boden,
2. Straßenaufbruch,
3. Bauschutt.

Die Zuordnungswerte Z 0 bis Z 5 sind als "Vorsorgewerte" anzusehen und wurden hauptsächlich unter Berücksichtigung des Boden- und Grundwasserschutzes festgelegt. Abweichungen von diesen Werten sind akzeptabel, wenn im Einzelfall die Unbedenklichkeit des Einbaus des betreffenden Stoffes bewiesen ist.

Die unterschiedlichen Zuordnungswerte Z 0, Z 1 und Z 2 sind im folgenden näher beschrieben:

### Z 0 - uneingeschränkter Einbau

Der Reststoff/Abfall ist in Zusammensetzung und Schadstoffbelastung dem regional vorkommenden Boden/Gestein ähnlich. Bei Unterschreitung der zulässigen Zuordnungswerte ist eine Beeinträchtigung der Umgebung, insbesondere der Schutzgüter Boden und Grundwasser, nicht anzunehmen.

## **Z 1 - Eingeschränkter offener Einbau**

Die Zuordnungswerte Z 1 werden für Boden in die Unterklassen Z 1.1 und Z 1.2 unterteilt, wobei grundsätzlich die Z 1.1-Werte gelten. Selbst unter ungünstigen hydrogeologischen Umständen kann davon ausgegangen werden, daß der Einbau dieser Klasse keine Beeinträchtigung des Schutzgutes Grundwasser nach sich zieht. Bei Überschreitung des Z 1.1 Wertes ist der Einbau u. a. in Agrarflächen nicht mehr zulässig.

In hydrogeologisch günstigen Gebieten, "in denen der Grundwasserleiter nach oben durch flächig verbreitete, ausreichend mächtige Deckschichten mit hohem Rückhaltevermögen gegenüber Schadstoffen überdeckt ist (LAGA)", können Materialien mit dem Zuordnungswert Z 1.2 in den Boden eingebracht werden. Allerdings gilt dies bei Bodenaustausch und -ersatz nur dann, wenn der Boden bereits eine Schadstoffbelastung von mindestens Z 1.1 aufweist. Darüber hinaus ist aus Gründen des Erosionsschutzes für die Zuordnungswerte Z 1.2 eine geschlossene Vegetationsdecke o.ä. gefordert.

Hat die zuständige Landesbehörde für den Einbau einen gewählten Standort noch nicht bezüglich seiner hydrogeologischen Eigenschaften eingestuft, ist ein entsprechendes Gutachten zu erstellen.

In der Regel soll der Abstand zwischen der Schuttkörperbasis und dem höchsten zu erwartenden Grundwasserstand mindestens 1 m betragen [LAGA, 1997].

## **Z 2 - Eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen**

Die Zuordnungswerte Z 2 stellen die Obergrenze der zulässigen Verunreinigung von Reststoffen für die Einbringung in die Umwelt dar. Auch hierbei ist das Schutzgut Wasser maßgebend: Ein Transport von Schadstoffen in den Boden bzw. in das Grundwasser ist unter Zuhilfenahme von geeigneten technischen Sicherungsmaßnahmen zu verhindern. Laut LAGA ist Bodenmaterial dieser Einbauklasse nicht in Dränschichten zu verwenden.

Die Einbauklassen mit den Zuordnungswerten Z 3 bis Z 5 werden ausführlich in den folgenden Kapiteln behandelt.

Nachfolgend sind in Tabelle 2.6 und 2.7 die verschiedenen Zuordnungswerte „Feststoff“ und „Eluat“ für „Boden“ dargestellt:

Tab. 2.6: Zuordnungswerte Feststoff Boden [LAGA, 1997]

Parameter	Dimension	Zuordnungswert			
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert <sup>1)</sup>		5,5 - 8	5,5 - 8	5 - 9	--
EOX	mg/kg	1	3	10	15
Kohlenwasserstoffe	mg/kg	100	300	500	1000
Σ BTEX	mg/kg	< 1	1	3	5
Σ LHKW	mg/kg	< 1	1	3	5
Σ PAK n. EPA	mg/kg	1	5 <sup>2)</sup>	15 <sup>3)</sup>	20
Σ PCB (Kongenere nach DIN 51527)	mg/kg	0,02	0,1	0,5	1
Arsen	mg/kg	20	30	50	150
Blei	mg/kg	100	200	300	1000
Cadmium	mg/kg	0,6	1	3	10
Chrom (ges.)	mg/kg	50	100	200	600
Kupfer	mg/kg	40	100	200	600
Nickel	mg/kg	40	100	200	600
Quecksilber	mg/kg	0,3	1	3	10
Thallium	mg/kg	0,5	1	3	10
Zink	mg/kg	120	300	500	1500
Cyanide (ges.)	mg/kg	1	10	30	100

- 1) Niedrigere pH-Werte stellen allein kein Ausschlusskriterium dar. Bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen
- 2) Einzelwerte für Naphtalin und Benzo-(a)-Pyren jeweils kleiner als 0,5.
- 3) Einzelwerte für Naphtalin und Benzo-(a)-Pyren jeweils kleiner 1,0.

[LAGA, 1997]

Tab. 2.7: Zuordnungswerte Eluat Boden [LAGA, 1997]

Parameter	Dimension	Zuordnungswert			
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
pH-Wert <sup>1)</sup>		6,5 - 9	6,5 - 9	6 - 12	5,5 - 12
el. Leitfähigkeit	µS/cm	500	500	1000	1500
Chlorid	mg/l	10	10	20	30
Sulfat	mg/l	50	50	100	150
Cyanid (ges.)	µg/l	< 10	10	50	100 <sup>3)</sup>
Phenolindex <sup>2)</sup>	µg/l	< 10	10	50	100
Arsen	µg/l	10	10	40	60
Blei	µg/l	20	40	100	200
Cadmium	µg/l	2	2	5	10
Chrom (ges.)	µg/l	15	30	75	150
Kupfer	µg/l	50	50	150	300
Nickel	µg/l	40	50	150	200
Quecksilber	µg/l	0,2	0,2	1	2
Thallium	µg/l	< 1	1	3	5
Zink	µg/l	100	100	300	600

- 1) Niedrigere pH-Werte stellen allein kein Ausschlußkriterium dar. Bei Überschreitung ist die Ursache zu prüfen
- 2) Bei Überschreitungen ist die Ursache zu prüfen. Höhere Gehalte, die auf Huminstoffe zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlußkriterium dar.
- 3) Verwertung für Z 2 > 100 µg/l ist zulässig, wenn Z 2 Cyanid (leicht freisetzbar) < 50 µg/l

[LAGA, 1997]

Werden die geforderten Zuordnungswerte der jeweiligen Einbauklassen eingehalten, ist gemäß folgender Tabelle eine Dokumentation zu erstellen:

Tab. 2.8: Vorgaben für den Umfang der Dokumentation [LAGA, 1997]

Lieferant/ Aufbereiter	Transporteur/ Einbaufirma	Träger der Baumaßnahme	Bemerkung
x	x	x	Ort des Einbaus (Lage, Koordinaten, Flurbezeichnung)
x	x	x	Art der Maßnahme
x	x	x	Art und Herkunft des Bodens
x		x	Gütenachweis, Analysenergebnisse
x		x	Einbauklasse
x	x	x	Menge (ausgeliefert, transportiert, eingebaut)
		x	hydrologische Verhältnisse (z. B. Abstand zum höchsten Grundwasserstand, Ausbildung der Deckschicht)
		x	bei Einbauklasse 2 die Art der technischen Sicherungsmaßnahme
x	x	x	Träger der Baumaßnahme
	x	x	Aufbereiter
x		x	Transporteur
x	x	x	Einbaufirma

[LAGA, 1997]



### 2.3.1.3 Beseitigung gemäß TA Siedlungsabfall (TASI)

Kann eine Verwertung des Stoffes nicht realisiert werden, muß eine Beseitigung gemäß den Anforderungen der TASI durchgeführt werden. In Abschnitt 5.2.9 der TASI wird auf eine Verwertung hingewiesen: "Eine Aufbereitung und Verwertung der Rückstände (Sandfang- und Fettfangrückstände, Rechengut, Rückstände aus Kanalisations- und Gullyreinigung) ist anzustreben. Soweit dies nicht möglich ist, sind diese Abfälle der weiteren Entsorgung zuzuführen." [TA Siedlungsabfall, 1993]

Können die Reststoffe Kanalsand sowie Sandfanggut nicht verwertet werden, so erfolgt gemäß Abbildung 2.17 eine Entsorgung des Materials auf einer Deponie.

Im Gegensatz zur LAGA, die nur empfehlenden Charakter hat, wurde die TASI vom Bundeskabinett beschlossen und ist somit eine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, das im Jahre 2005 in Kraft tritt.

Ziele mit Inkrafttreten der Technischen Anleitung sind:

1. nicht vermeidbare Abfälle so weit wie möglich zu verwerten (siehe auch LAGA),
2. den Schadstoffgehalt der Abfälle so gering wie möglich zu halten,
3. eine umweltverträgliche Behandlung und Ablagerung der nichtverwertbaren Abfälle sicherzustellen.

Ebenfalls ist sicherzustellen, daß die Entsorgungssicherheit gewährleistet ist und in Zukunft entstehende Entsorgungsprobleme nicht auf künftige Generationen verlagert werden. Um eine Verwertung der Deponierung vorzuziehen, enthält die TASI "Anforderungen an die Verwertung, Behandlung und sonstige Entsorgung von Siedlungsabfällen nach dem Stand der Technik, sowie damit zusammenhängende Regelungen, die erforderlich sind, damit das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird".

Die abzulagernden Abfälle müssen genau definierte Eingangskriterien erfüllen. Um diese zu erreichen, ist es notwendig, den Abfall vorher zu behandeln, was in der Regel mit Hilfe von thermischen Verfahren gelingt. Der Reststoff Sandfanggut kann ebenfalls durch eine Sandwaschanlage den Anforderungen genügen. Ziel der Behandlung ist es hauptsächlich:

- das Volumen und die Menge zu reduzieren,
- die verbliebenen Rückstände in verwertbare zu überführen.

Nach einer in der Regel erfolgten Vorbehandlung wird bei der Entsorgung zwischen zwei Regeldeponien gemäß TA Siedlungsabfall unterschieden:

1. Mineralstoffdeponien (Deponieklasse I) als Nachfolge der Bauschuttdeponie,
2. Reststoffdeponie (Deponieklasse II), die den bisherigen Hausmülldeponien entsprechen soll.

Die in dieser Arbeit untersuchten „Rückstände aus Abwasseranlagen“ werden in Kapitel 5.2.9 der TASI behandelt und es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß eine Aufbereitung und Verwertung anzustreben ist.

Ist dies nicht möglich, erfolgt eine Deponierung (Klasse I oder II); wobei folgende Zuordnungskriterien einzuhalten sind:

Tab. 2.9: Zuordnungskriterien für Deponien [TASI,1993]

Nr.	Parameter	Zuordnungswerte	
		Deponieklasse I	Deponieklasse II
<b>1</b>	<b>Festigkeit <sup>1)</sup></b>		
1.01	Flügelscherfestigkeit	≥ 25 kN/m <sup>2</sup>	≥ 25 kN/m <sup>2</sup>
1.02	Axiale Verformung	≤ 20 %	≤ 20 %
1.03	Einaxiale Druckfestigkeit	≥ 50 kN/m <sup>2</sup>	≥ 50 kN/m <sup>2</sup>
<b>2</b>	<b>Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz <sup>2)</sup></b>		
2.01	bestimmt als Glühverlust	≤ 3 Masse-%	≤ 5 Masse-% <sup>3)</sup>
2.02	bestimmt als TOC	≤ 1 Masse-%	≤ 3 Masse-%
<b>3</b>	<b>Extrahierbare lipophile Stoffe der Originalsubstanz</b>	≤ 0,4 Masse-%	≤ 0,8 Masse-%

Nr.	Parameter	Zuordnungswerte	
		Deponieklasse I	Deponieklasse II
<b>4</b>	<b>Eluatkriterien</b>		
4.01	pH-Wert	5,5 – 13,0	5,5 – 13,0
4.02	Leitfähigkeit	≤ 10000 µS/cm	≤ 50000 µS/cm
4.03	TOC	≤ 20 mg/l	≤ 100 mg/l
4.04	Phenole	≤ 0,2 mg/l	≤ 50 mg/l
4.05	Arsen	≤ 0,2 mg/l	≤ 0,5 mg/l
4.06	Blei	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l
4.07	Cadmium	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.08	Chrom-VI	≤ 0,05 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.09	Kupfer	≤ 1 mg/l	≤ 5 mg/l
4.10	Nickel	≤ 0,2 mg/l	≤ 1 mg/l
4.11	Quecksilber	≤ 0,005 mg/l	≤ 0,02 mg/l
4.12	Zink	≤ 2 mg/l	≤ 5 mg/l
4.13	Fluorid	≤ 5 mg/l	≤ 25 mg/l
4.14	Ammonium-N	≤ 4 mg/l	≤ 200 mg/l
4.15	Cyanide, leicht freisetzbar	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,5 mg/l
4.16	AOX	≤ 0,3 mg/l	≤ 1,5 mg/l
4.17	Wasserlöslicher Anteil (Abdampfrückstand)	≤ 3 Masse-%	≤ 6 Masse-%

- 1) 1.02 kann gemeinsam mit 1.03 gleichwertig zu 1.01 angewandt werden. Die Festigkeit ist entsprechend den statischen Erfordernissen für die Deponiestabilität jeweils gesondert festzulegen. 1.02 in Verbindung mit 1.03 darf dabei insbesondere bei kohäsiven, feinkörnigen Abfällen nicht unterschritten werden.
- 2) 2.01 kann gleichwertig zu 2.02 angewandt werden; Anforderung gilt nicht für verunreinigten Bodenaushub, der auf einer Monodeponie abgelagert wird.
- 3) Gilt nicht für Aschen und Stäube aus nichtgenehmigungsbedürftigen Kohlefeuerungsanlagen nach dem BImSchG.

#### 2.3.1.4 Lagerung gemäß TA Abfall (TAA)

Ebenso wie das KrW-/AbfG und die TASI wurde auch die TAA vom Bundeskabinett beschlossen und ist somit seit 1991 eine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Wie auch die LAGA und die TASI fordert die TAA die Verwertung der Abfälle vorrangig vor deren Beseitigung. Dabei muß die Verwertung technisch möglich, ökonomisch sinnvoll sowie ein Absatzmarkt für das Endprodukt vorhanden sein oder geschaffen werden können.

Ist eine Verwertung des Stoffes auch nach erfolgter Behandlung nicht möglich, darf dieser entsorgt werden. Trotzdem soll der Schadstoffgehalt der Abfälle so gering wie möglich gehalten werden und dadurch eine umweltverträgliche Entsorgung der Abfälle sichergestellt werden.

Wie aus Abbildung 2.17 zu entnehmen ist, findet die TAA bei Abfällen Anwendung, die nicht den Einbauklassen Z 0 bis Z 4 aufgrund deren Kontamination zuzurechnen

sind. Dies sind besonders überwachungsbedürftige Abfälle, wie z. B. organische oder anorganische Chemikalien. Ebenfalls werden in der TAA Schlämme der industriellen Abwasserreinigung aufgeführt. Diese stark belasteten Abfälle werden in oberirdische Deponien mit besonderen Sicherungsmaßnahmen oder sogar in Untertagedeponien im Salzgestein eingelagert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird hier nicht näher auf Einzelheiten der TAA eingegangen, da diese nur in den seltensten Fällen (bei speziellen Belastungen des Stoffes durch unerlaubte Einleitungen, Betriebsunfällen o. ä.) zur Anwendung kommt. Ohne die oben aufgeführten Sonderfälle reichen die LAGA sowie TASI für die in dieser Arbeit untersuchten Sande aus.

### 2.3.1.5 Diskussion

Im Forschungsbericht des Instituts Wasser und Boden (IWB, 2000) werden neben den im Kapitel Rechtliche Grundlagen enthaltenen Vorschriften folgende Richtlinien bzw. Verordnungen zusätzlich aufgeführt:

- **TL Min – StB 2000**

Beinhaltet die technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau und Anforderungen an wasserwirtschaftliche Merkmale von Recyclingbaustoffen.

- **DafStb – Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag**

Behandelt die Verwertung eines rezykliertem Zuschlages zur Herstellung und Verarbeitung von Beton nach DIN 1045.

- **Abfallklärverordnung (AbfKlärV)**

Regelt auf der Basis des § 8 (1) und (2) des KrW./AbfG die Verwertung von Klärschlamm als Sekundärrohstoffdünger.

- **Bioabfallverordnung (BioAbfV)**

Klärt auf der Basis des § 8 (1) und (2) des KrW./AbfG die Verwertung von unbehandelten und behandelten Bioabfällen und Gemischen.

Das IWB hat im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens 36 Proben der Aufbereitungsanlage von Großstadt A von gewaschenem Sandfanggut sowie Kanalsand beprobt und anschließend statistisch ausgewertet. In folgender Tabelle sind die Ergebnisse mit 99 %iger Wahrscheinlichkeit unterschrittener Werte im Endmaterial den überprüften Vorschriften gegenübergestellt:

Tab. 2.10: Überprüfung der untersuchten Vorschriften (ohne zulässige Abweichungen ) anhand des 99%igen Konfidenzniveaus [Berger, 2000, modifiziert]

<b>Statistische Auswertung</b>			
<b>Angewandte Vorschrift</b>	<b>Klasse</b>	<b>99 %iges Konfidenzniveau</b>	<b>Anzahl über- schrittener Pa- rameter</b>
<b>LAGA-Boden</b>	Z0	nicht erfüllt	12
	Z1.1	nicht erfüllt	10
	Z1.2	nicht erfüllt	4
	Z2	erfüllt	0
<b>LAGA-Bauschutt</b>	Z0	nicht erfüllt	9
	Z1.1	nicht erfüllt	2
	Z1.2	erfüllt	0
	Z2	erfüllt	0
<b>TASI</b>	Deponieklasse I	nicht erfüllt	1
	Deponieklasse II	erfüllt	0
<b>TL Min-StB 2000</b> Techn. Lieferbed. für Mine- ralstoffe im Straßenbau	RC-1	erfüllt	0
	RC-2	erfüllt	0
	RC-3	erfüllt	0
<b>Baustoffkreislauf- Richtlinie, (in DafStb)</b>	-	erfüllt	0
<b>Abfall Klärverordnung</b> (AbfKlärV)	Ton > 5 %	nicht erfüllt	1
	Ton < 5 %	nicht erfüllt	1
<b>Bioabfallverordnung</b> (BioAbfV)	Klasse 1	nicht erfüllt	4
	Klasse 2	nicht erfüllt	4

Obige Tabelle zeigt bei einem Konfidenzniveau von 99 % die Anzahl überschrittener Parameter in Abhängigkeit der angewandten Untersuchungsvorschrift. Dabei geht deutlich hervor, daß bei einer Untersuchung nach LAGA und speziell bei der Gruppe "Boden" die größte Anzahl überschrittener Parameter auftrat. Die Unterteilung in drei verschiedene Einbauklassen zeigt außerdem die Möglichkeit, anhand unterschiedlicher Rahmenbedingungen bei der Verwertung, eine Differenzierung bezüglich der Anforderungen vorzunehmen. Zudem sind die einzuhaltenden Zuordnungswerte der Einbauklassen scharf definiert, was für eine Beurteilung aus Sicht der Umweltverträglichkeit als sinnvoll erscheint. Darüber hinaus werden die Empfehlungen der LAGA bereits als länderübergreifende Größe für eine Verwertung in Deutschland angesehen.

[GROßMANN, 2000].

Aus den oben genannten Gründen werden im Rahmen dieser Arbeit die Zuordnungswerte der LAGA "Boden" angewendet. Eine Differenzierung in Abhängigkeit der Einbauklassen und den entsprechenden Zuordnungswerten wird ebenfalls vorgenommen.

Auf weitergehende Anforderungen, die im Straßenbau oder in der Betonindustrie Anwendung finden (siehe Tab. 2.10), wird hier nicht näher eingegangen.

### 2.3.2 Parameter

Die Belastung der Kanalsande sowie des Sandfanggutes setzt sich zum einen aus der natürlichen Hintergrundbelastung sowie der durch den Menschen hervorgerufenen anthropogenen Belastungen zusammen.

Im folgenden werden relevante Parameter näher beschrieben, wobei für die in Kapitel 5.3 definierten kritischen Parameter Blei, Kupfer und PAK zusätzlich eine Charakterisierung aus Sicht der Siedlungswasserwirtschaft erfolgt.

#### 2.3.2.1 Schwermetalle

Nach FENT (1998) werden Metalle mit einer Dichte von  $> 6 \text{ g/cm}^3$  zur Gruppe der Schwermetalle gezählt. Bei Schwermetallen wird zum einen zwischen den für den Stoffwechsel von Mikroorganismen, Pflanzen und Tieren essentiell notwendigen (z. B. Cu, Fe, Cr, Ni) Schwermetallen, und solchen mit ausschließlich toxischer Wirkung (z. B. Cd, Hg, Pb) unterschieden. [HARITOPOULOU, 1996]

GÄTH in PFAFF-SCHLEY (1996) betrachtet in erster Linie den Schwermetallgesamtgehalt des Bodens in Abhängigkeit vom Mineralbestand. Dabei wird zwischen magmatischen, metamorphen und sedimentischen Gesteinen unterschieden. Hohe Gehalte an Cr, Cu, Ni und Zn sind vor allem kennzeichnend für basaltische Gesteine, wobei in Graniten hohe Pb, in Gneisen, Glimmerschiefern und Grauwacken hohe As-, Hg- und Zn-Konzentrationen gemessen werden. Bei Löß und Geschiebemergel, als Vertreter der Lockersedimente, kommt es zu Anreicherungen verschiedener Schwermetalle, da aufgrund von Transport- und Umwandlungsprozessen, hervorgerufen durch Regenerereignisse, eine Vermischung eintritt. [PFAFF-SCHLEY, 1996]

Die meisten anthropogenen Schwermetallbelastungen für die Umwelt resultieren, wie im Folgenden näher beschrieben, von Abfällen und Reststoffen der metallverarbeitenden Industrie, KFZ-Verkehr, Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie Klärschlammaufbringung im landwirtschaftlichen Sektor.

Alle Arten von Verbrennungsprozessen, ob in der Industrie oder im Haushalt, setzen Schwermetalle frei. MANZ (1995) erwähnt bei der Verbrennung von Kohle z. B. die Abgabe der Elemente Blei, Cadmium oder Thallium. Ebenso werden bei der Erzgewinnung, bei der Verhüttung und Verarbeitung obige Elemente in Verbindungen freigesetzt, welche somit in die Natur und den Wasserkreislauf (Abwasser) gelangen.

Durch den KFZ-Verkehr tritt eine nicht zu unterschätzende Belastung der Umwelt auf. So tragen Tropfverluste der Flüssigkeiten von Kraftfahrzeugen (Zn, Pb), genauso wie der Abrieb von Bremsbelägen (Ni, Cr, Pb, Cu) und die seit Einführung bleifreier Benzine allerdings stark abnehmende Menge an Additiven (z. B. Pb), die bei der Verbrennung freigesetzt werden, zur anthropogenen Umweltbelastung bei.

[HARITOPOULOU, 1996]

Durch Korrosionsvorgänge von verzinkten Stahlteilen, verkupferten Dächern oder Regenrinnen sowie Reifenabrieb (Pb, Cr, Cu, Ni, Zn) werden ebenso Schwermetalle

freigesetzt. Diese gelangen in erster Linie in die Kanalisation, anschließend zur Kläranlage und verursachen somit eine Belastung der untersuchten Abfälle.

Eine Auflistung der Schwermetalle wird gemäß ALLOWAY/AYRES (1993), FÖRSTNER (1992), KOPPE STOZEK (1993), SCHÄFER (1999) und MANZ (1995) wie folgt dargestellt:

### **Arsen**

Gewonnen wird Arsen durch Verhüttung von Kupfer, Blei und Nickel. Böden weisen einen durchschnittlichen Arsengehalt von 1 - 40 mg/kg auf. Im Laufe der Jahre kam es vor allem durch Metallverhüttung, Kohleverbrennung, Einsatz von Pestiziden und die Klärschlammasausbringung zu einer anthropogenen Arsenanreicherung.

### **Blei**

Dieses Metall ist im Gestein durchschnittlich zu 16 mg/kg enthalten. Seine Gewinnung erfolgt durch Röstung, Reduktions- und Raffinerieprozesse aus verschiedenen Erzen. Blei kommt hauptsächlich bei der Herstellung von Batterien, Kabelverschaltungen von Rohren, Munition, in der Glasindustrie und als Löt- und Legierungsmetall zum Einsatz.

Bei Mikroorganismen führt eine hohe Bleibelastung zu hemmender Tätigkeit. Bei Mensch und Tier reichert sich Blei in Niere und Leber an, was zu Bleivergiftungen und zu Schäden des Nervensystems führen kann. Gleichzeitig wird eine Gentoxizität sowie Kanzerogenität vermutet.

Das im kommunalen Abwasser enthaltene Blei, bezogen auf den Jahresdurchschnitt, gelangt überwiegend durch Oberflächenabfluß in das Kanalsystem. Neben dem Mischwasser wird Blei im Schmutzwasser zu ca. 80 % in partikulärer, der Rest in gelöster Form transportiert.

Von der üblichen Konzentration von 100 µg Pb/l kann aufgrund der Bleiersatzstoffe (v. a. im Treibstoff) nicht mehr ausgegangen werden. Zur Zeit ist nach SCHÄFER/HOFFMANN (1998) bei erhöhtem Fremdwasseranteil im Zulauf einer Kläranlage maximal von 35 µg Pb/l (davon 15 % gelöst) auszugehen.

Bei Mischwasser muß jedoch mit erheblich höheren Konzentrationen (ca. 70 µg Pb/l und mehr) gerechnet werden. Dabei ist, wie beim Schmutzwasser, ein ähnlicher Anteil gelöst und partikulär anzutreffen.

Nach XANTHOPOULOS, GROTTKEN und PANNECKER (in Schäfer 1999) werden für Frachten städtischer Flächen (niederschlagsbedingt) Werte von 76 - 136 µg Pb/l angegeben.

[SCHÄFER, 1999]

### **Cadmium**

Cadmium tritt vermehrt in Zinkerzen auf, wobei es dabei als Nebenprodukt der Zinkgewinnung auftaucht. Cadmium findet bei der Batterieherstellung, als Bestandteil von Korrosionsschutzmitteln für Eisen und Stahl sowie in der Farbenherstellung Verwendung. Cadmium wird hauptsächlich über Emissionen, wie Zinkverhüttung, Kohleverbrennung oder Autoabgase in Böden eingetragen.

## **Chrom**

Chrom wird als Nebenprodukt bei der Metallerzeugung gewonnen und kann durch Reifenabrieb von Kraftfahrzeugen, verchromten Oberflächen, Abfallprodukte bei der Lederverarbeitung sowie durch die galvanische Industrie in die Umwelt gelangen.

## **Kupfer**

Wie Chrom so gehört auch Kupfer zu den lebensnotwendigen Spurenelementen für den menschlichen Körper. Es wird überwiegend als korrosionsbeständiges Metall eingesetzt, wobei vor allem Kupferdächer, Dachrinnen oder Wasserleitungen zu nennen sind. Desweiteren findet es bei Holzschutzmitteln oder Algiziden Verwendung.

Der anthropogene Schadstoff Kupfer wird überwiegend durch das häusliche Schmutzwasser eingetragen. Es zählt zu der Gruppe von Metallen, die auch gelöst (ca. 20 % – 50 %) transportiert werden können, jedoch kann beim Mischwasserzufluß auch ein größerer Prozentsatz auftreten.

Im Schmutzwasser waren ca. 150 µg Cu/l enthalten und durch bereits umgesetzte Maßnahmen zur Reduktion von Schadstoffquellen (z. B. Wasserrohre) ist von (90 bis) 120 µg Cu/l, je nach Fremdwasser im Zulauf einer Kläranlage, auszugehen. Die einwohnerspezifische Tagesfracht wird mit 18 mg Cu/(E\*d) angegeben.

Im Mischwasser wird jedoch von erheblichen Frachten des Oberflächenabflusses mit der gleichen bzw. leicht erhöhten Konzentration wie im kommunalen Schmutzwasser ausgegangen.

Nach DAUB in SCHÄFER (1999) wird ein gelöster Anteil von ca. 25 % - 75 % angesetzt, welcher erheblich über dem von Blei liegt.

## **Nickel**

Auch dieses Metall wird als Nebenprodukt bei der Metallerzeugung gewonnen. Es gehört zu den lebenswichtigen Spurenelementen, wobei ein Nickelentzug, z. B. beim Menschen, Mangelerscheinungen zur Folge hat.

## **Quecksilber**

Bei der Metallverhüttung fällt es als Nebenprodukt an und hat, wie im folgenden beschrieben, ein sehr weitgestreutes Einsatzfeld. Als Metall selbst findet es in Thermometern, Barometern, UV-Lampen, als Verbindung in Pigmentfarben oder als Konservierungsstoff Verwendung. Auch wird es bei der Herstellung von Zahnplomben neben Silber und Amalgam benutzt.

## **Thallium**

Davon sind Spuren in Eisen-, Kupfer- und Bleimineralien enthalten und besonders in Bezug auf Verhüttungsprozesse zu erwähnen. Auf diesem Weg fällt es als Neben-



produkt an und wird als Legierungsmetall, in der Medizin oder in der Halbleiterindustrie, eingesetzt.

## **Zink**

Zink ist ein essentielles Spurenelement für Pflanze, Mensch und Tier. Eine toxische Gefährdung tritt erst bei hohen Dosen ein. Zink ist in verschiedenen Erzen enthalten, wobei Sphalerit (ZnS) in diesem Zusammenhang besonders zu erwähnen ist.

Wie die meisten Schwermetalle wird auch Zink durch Verhüttungsprozesse, die metallverarbeitende Industrie, den KFZ-Verkehr, durch Verbrennung fossiler Brennstoffe und übermäßige Klärschlammabfuhr anthropogen in der Umwelt angereichert.

Verwendung findet das Metall in Legierungen, Trockenbatterien, Farben, als Korrosionsschutz, in der Medizin und als Fungizid.

In Pflanzen ist Zink in der Regel mit 15 - 100 mg/kg TS enthalten. Ertragsminderungen treten jedoch erst bei einem Gehalt von > 400 mg/kg TS auf. Wachstumsschäden sind erst bei noch höheren Konzentrationen zu beobachten. Bei Menschen ist Zink als Spurenelement u. a. in Muskeln, Knochen und Leber enthalten. Ist im Körper zu wenig Zink vorhanden, können Mangelerscheinungen auftreten, die sich in Wachstumsstörungen oder einer Beeinträchtigung des Immunsystems niederschlagen können.

Das im Abwasser enthaltene Zink stammt zum einen aus dem häuslichen Schmutzwasser, zum anderen aus dem Oberflächeneintrag.

Im Schmutzwasser wird von ca. 100 – 1 000 µg Zn/l (Durchschnitt 500 µg Zn/l) ausgegangen, dabei beträgt die mittlere spezifische Tagesfracht ca. 74 mg Zn/(E\*d). Dieses Zink setzt sich zusammen aus den menschlichen Ausscheidungen (ca. 10 %), jegliche Art von Wasser aus der Haushaltsreinigung (ca. 83 %) und aus dem Leitungswasser (ca. 7 %). Das im Leitungswasser enthaltene Zink stammt nicht vom Wasserwerk, wo ein Maximalwert von 0,1 mg/l nicht überschritten werden darf, sondern von verzinkten Wasserrohren in Haushalten.

Beim Mischwasser muß ebenso von erheblichen Belastungen durch abfließenden Niederschlag (ca. 200 - 400 µg/l) ausgegangen werden.

### *2.3.2.2 Parameter, die organische Inhaltsstoffe erfassen*

Organische Verbindungen werden für die unterschiedlichsten Verwendungszwecke der modernen Industriegesellschaft hergestellt. Zur Zeit sind ca. 100 000 dieser Substanzen bekannt, von denen 60 000 allgemeine Verwendung finden und jährlich etwa 1 000 neue hinzukommen. Ungefähr 1 000 dieser Verbindungen wirken sich nachhaltig durch ihre Freisetzung auf die Umwelt aus. Als Beispiel ist hier DDT zu nennen, das vor seinem Verbot die Population von Vögeln stark dezimierte, da es zur Verdünnung der Eierschalen führte. [FÖRSTNER, 1992]

Zu organischen Verbindungen sind all diejenigen Moleküle zu zählen, die aus einem Kohlenstoffgerüst aufgebaut sind (Ausnahmen  $\text{CO}_x$ ). Je nach Molekülaufbau wird zwischen aliphatischen (kettenförmigen), cyclischen (ringförmigen) und halogenen (Wasserstoffatom wird durch Halogene ersetzt) Kohlenwasserstoffen unterschieden. Jedoch gelangen Kohlenwasserstoffe bei der Verbrennung aller Art von fossilen Brennstoffen z. B. Holz, Kohle oder Erdöl als Abgase in die Atmosphäre, werden dort als Aerosole gebunden und anschließend durch Regenereignisse wieder auf die Erdoberfläche und in die Umwelt gebracht. [FÖRSTNER, 1992; KOPPE/STOZEK, 1993]

### **PAK** (Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe)

PAKs bestehen nur aus den Elementen C und H. Durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe zur Stromerzeugung oder im Straßenverkehr werden diese in großen Mengen freigesetzt. [KOPPE/STOZEK, 1993]

Ungefähr 280 Einzelsubstanzen zählen zur Stoffgruppe der PAKs, wobei ca. 100 in größerem Stil vorkommen bzw. genutzt werden. Am häufigsten ist das Benzo(a)pyren ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$ ), eine Benzolart mit fünf Ringen, als Leitparameter vertreten, welches vor allem durch Verbrennung entsteht. [KOß, 1997]

Die Gruppe der PAK besitzt einen hydrophoben Charakter, was zur Folge hat, daß ein Transport überwiegend partikulär gebunden stattfindet. Ein geringer Teil erfolgt auch in gelöster Form (z. B. PAK-Verbindungen mit vier C-Ringen im Molekül).

Aufgrund der unterschiedlichen Auftretensformen der PAK kann keine einwohner-spezifische Fracht aufgestellt werden. KOPPE und STOZEK (1993) geben für das Abwasser folgende Teilbereiche an:

- Trinkwasser  
bei 75% der Untersuchungen  $< 10 \text{ ng PAK/l}$ ,
- Teilstrome des häuslichen Schmutzwassers  
Größenordnung von  $1\ 000 \text{ ng PAK/l}$ ,
- über Mischkanalisation abfließender Niederschlag  
von  $80 \text{ ng PAK/l}$  in Städten, bis  $5 \text{ } \mu\text{g PAK/l}$  bei Autobahnen.

### **BTEX** (Leichtflüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe)

TRÜSSEL (1991) beschreibt Benzol, Toloul, Ethylbenzol und die unterschiedlichen Xylenole als hauptsächliche Repräsentanten der leichtflüchtigen organischen Kohlenwasserstoffverbindungen. Als überwiegende Quellen der BTEX erwähnt er Roh- und Mineralöle sowie Steinkohle.

### **AOX/EOX** (Halogenierte Kohlenwasserstoffverbindungen)

Die Summenparameter AOX sowie EOX erfassen organische Halogenverbindungen, bei denen H-Atome der polaren Kohlenwasserstoffverbindungen durch Halogene, Chlor, Brom oder Jod ersetzt werden.

Diese Gruppe der Halogene wird bei der Herstellung von unterschiedlichen Kunststoffen, z. B. PVC, oder als Schädlingsbekämpfungsmittel eingesetzt. Wegen guter Fettlöseeigenschaften werden sie auch zur Metallentfettung sowie in chemischen Reinigungen eingesetzt.

### **KWs** (Kohlenwasserstoffe)

Kohlenwasserstoffe sind Verbindungen, die nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff aufgebaut sind. PHILLIP (1995) beschreibt sie auch als MKWs (Mineralölkohlenwasserstoffe), wobei er Mineralöle und dessen Nebenprodukte dazuzählt. Der Weg in unser Ökosystem kann wie bei den PAKs durch jegliche Art von Verbrennungsprozessen beschrieben werden. [KOPPE/STOZEK, 1993]

### **LHKW** (Leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe)

Bei der Gruppe der LHKWs ist die Rede von der Summe unterschiedlicher chlorierter Kohlenwasserstoffe. Durch einen sehr niedrigen Dampfdruck sind sie im Vergleich zu den KWs leicht flüchtig und nur schwer nachweisbar.

### **PCB** (Polychlorierte Biphenyle)

Die Chlorkohlenwasserstoffverbindungen der PCBs bestehen aus zwei miteinander verbundenen Phenylringen. Bei der Bestimmung der PCBs werden von mehr als 200 verschiedenen Kongeneren, nach BALLSCHMITTER nur die sechs häufigsten, gemessen und deren Summe mit sechs multipliziert.

EMMRICH (1987) beschreibt den Einsatz dieser Verbindungen bei der Herstellung von Kunststoffen und der Papierbeschichtungen, als Bestandteil von Klebstoffen und Schmiermitteln. Ebenfalls fanden sie als Beigabe zu Kühlmitteln von Kondensatoren, Transformatoren und Hydraulikanlagen Verwendung.

Die Gruppe der PCBs gehört unter anderem zur Gruppe der AOX. Sie sind nur in geringem Maße flüchtig, so daß sie bei der Abwasserreinigung (Strippen) nicht eliminiert werden können. [KOPPE/STOZEK, 1993].

### **Phenole**

Zu der Gruppe der Phenole gehört eine Vielzahl von organischen Verbindungen, die vom Benzol und dessen Abkömmlingen (Homologen) abgeleitet sind. Hierbei sind ein oder mehrere Wasserstoff-Atome durch Hydroxylgruppen ersetzt.

[KOPPE/STOZEK, 1993].

### 2.3.2.3 weitere anorganische Parameter

In diesem Kapitel werden alle relevanten Parameter behandelt, die nicht zu einer der Gruppen 2.3.2.1-2.3.2.2 gehören.

#### **Glühverlust**

Der organische Anteil der Originalsubstanz wird als Glühverlust gemessen. Dazu wird die Substanz bis zur Massenkonzanz im Trockenschrank bei ca. 104°C aufbewahrt. Anschließend wird die Organik des zu untersuchenden Materials bei ca. 550°C im Ofen rückstandsfrei verbrannt. Der Verlust an organischem Material bei der Verbrennung wird in Relation zum getrockneten Gut als Glühverlust in Prozent bezeichnet.

#### **Sulfat**

Sulfat gehört zu der Gruppe der Schwefelverbindungen, die sowohl durch Haushalte wie industrielle Prozesse ins Abwasser gelangen. Dabei findet das überwiegend als  $\text{SO}_4^{2-}$  vorkommende Ion hauptsächlich in Waschmitteln Verwendung. Der wichtigste Vertreter ist das synthetische Anionensid Laurylalkylsulfonat (LAS).

#### **Chlor**

Eine typische Halogenverbindung ist Kochsalz (NaCl). Der größte Teil gelangt durch Spülicht und menschlichen Harn ins Abwasser, wobei in den Wintermonaten der Eintrag durch Streusalz teilweise beträchtlich höher liegt.

Außerdem findet Chlor bei der PVC-Produktion, Zellstoffbleiche sowie bei der Desinfektion von gereinigtem Abwasser Anwendung. Aufgrund der kanzerogenen Eigenschaften des Halogens findet diese Methode der Abwasserentkeimung fast nur noch im außereuropäischen Ausland Anwendung.

#### **Cyanid**

Cyanide sind Bestandteile der akut giftigsten Stoffe. BEIER (1994) beschreibt sie als toxische Salze der Blausäure, die in der Schädlingsbekämpfung (eingesetzt als Cyanwasserstoff HCN) und bei der Vernichtung von Ungeziefer und Kleintieren Verwendung finden. [OCHMANN, 1985]

Die Gruppe der Cyanide reagiert nach HULPE/KOCH (1993) im stark alkalischen Bereich, geht Reaktionen mit Schwermetallen ein und bildet stabile Komplexe.

#### **pH-Wert**

Die Bezeichnung pH wurde von Soerensen 1909 in die Chemie eingeführt und heute nach DIN 19260 auch als pH-Wert bezeichnet. Er definiert sich als der mit (-1) multiplizierte Zehnerlogarithmus der Wasserstoffionenaktivität. Bei einem pH-Wert < 7 wird der saure, > 7 der basische Bereich definiert. Bei einem Wert von 7 befindet man sich im neutralen Bereich.

## 2.4 Physikalische/Chemische Eigenschaften mineralischer Stoffe

### 2.4.1 Ausgangssituation

Neben der Aufbereitung von Sanden aus Kläranlagen werden u.a. Bodenaufbereitungsanlagen in Deutschland eingesetzt. Da speziell für Kläranlagensande noch keine oder nur sehr wenig Kenntnisse bezüglich physikalischen oder chemischen Verhalten während einer Aufbereitung vorliegen, werden diese Mechanismen an verwandten Stoffgruppen exemplarisch erläutert:

- **Flußsedimente/Uferfiltrate,**

aufgrund von Erkenntnissen bzgl. Reaktionsverhalten mit chemischen Substanzen

- **Böden,**

Aufbereitung in Bodenwaschanlagen

Das vorrangige Ziel, die Verwertung nach dem KrW-/AbfG zu gewährleisten, wird vor allem durch Schwermetallbelastungen und organische Verbindungen wie z. B. PAK gefährdet. Um eine Reduzierung dieser Stoffe genauer zu untersuchen, ist es notwendig, näher auf Bindungsmechanismen und deren Häufigkeit einzugehen.

Bezüglich Flußsedimenten und Uferfiltraten liegen u.a. von FÖRSTNER und MÜLLER (1974) Studien über das Reaktionsverhalten sowie Bindungsmechanismen an Tonminerale, Sandfraktionen sowie Huminstoffe vor.

Neben der Stoffgruppe Flußsedimente und Uferfiltrate besitzen kontaminierte Böden eine große Ähnlichkeit mit Kläranlagensanden. Die Auswahl dieser zweiten Gruppe wird vorgenommen, da Böden ebenfalls Feinanteile, Tonminerale, organische Substanzen unterschiedlichster Größe und Beschaffenheit, sowie Sande und Kiese enthalten.

Auf dem Gebiet der Altlastensanierung und speziell der Bodenaufbereitung liegen seit langem sehr detaillierte Kenntnisse vor. Die dazu benötigte Maschinenteknik, beschränkt sich nicht nur auf eine Wascheinheit, sondern auch auf diverse Peripheriegeräte. Neben einer zentralen Wascheinheit werden Aggregate eingesetzt, die entweder vor- oder nachgeschaltet werden, um die Reinigungsleistung in weiteren Verfahrensschritten zu optimieren. Darüber hinaus können während der Aufbereitung Chemikalien zugegeben werden, um starke Kontaminationen zu beseitigen.

Anhand vorliegender Erkenntnisse über Flußsedimente und Uferfiltrate sollen Bindungsmechanismen zwischen Sanden und Tonmineralen bzw. organischen Stoffen näher erläutert werden. Mit Hilfe chemischer Grundlagen verwandter Stoffgruppen sowie Maschinenteknik aus der Bodenaufbereitung soll überprüft werden, ob bestehende Verfahren in der Aufbereitung von Kläranlagensanden erfolgreich einsetzbar sind.

## 2.4.2 Bindungsformen verwandter Stoffgruppen

Zu einer Kläranlage gelangt bei einer Mischkanalisation neben häuslichem und industriellem Abwasser auch Regenwasser. Im Abwasser und Regenwasser sind Schwermetalle sowie organische Verbindungen enthalten. Diese liegen sowohl gelöst wie auch an Feststoffen gebunden vor.

Wie in Kapitel 2.4.1 erläutert, werden verwandte Stoffgruppen herangezogen, um auf verschiedenste Bindungsmechanismen näher einzugehen. Die beiden Stoffgruppen werden speziell in Hinblick auf Schwermetalle und organische Verbindungen betrachtet. Mögliche Bindungsformen von Schwermetallen an Feststoffen können folgender Tabelle entnommen werden:

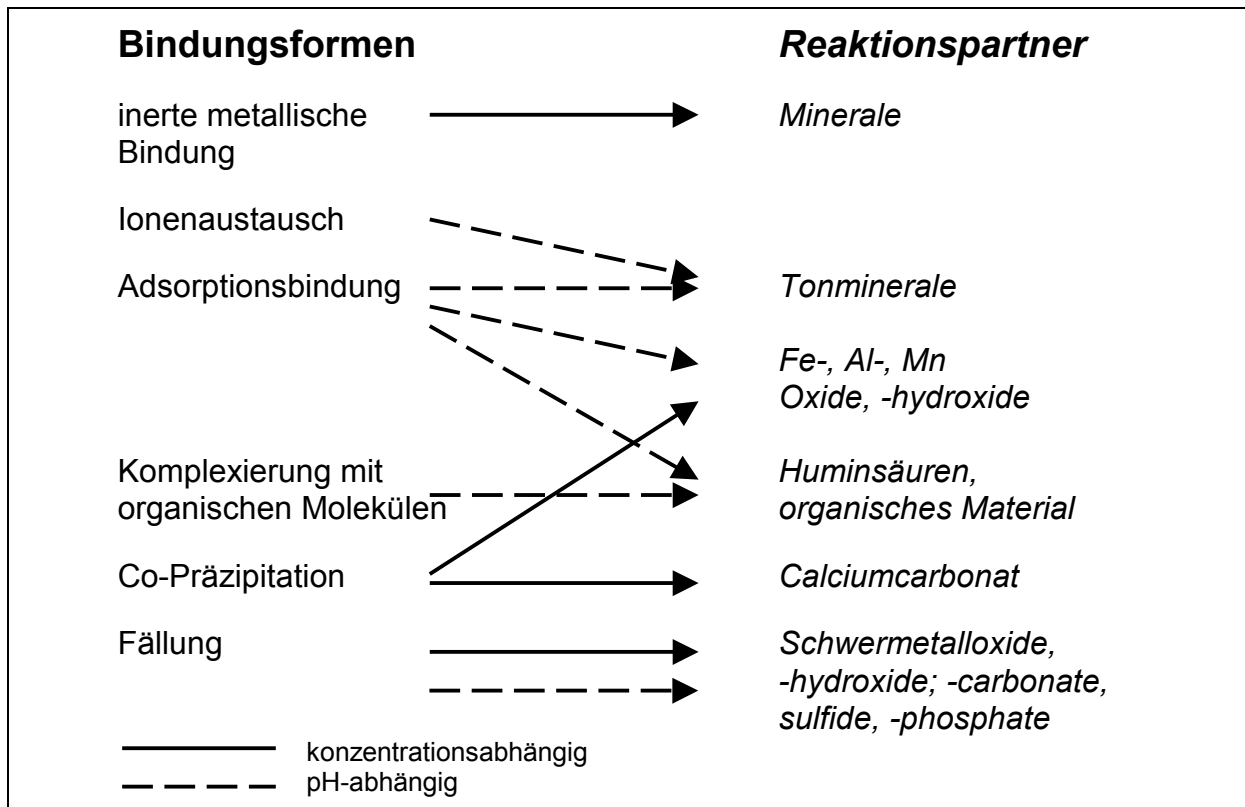


Abb. 2.18: Bindungsformen, Mechanismen und Reaktionspartner der Schwermetalle an Feststoffe [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974, modifiziert]

Wie bei Schwermetallen, liegen bei organischen Parametern ebenfalls verschiedene Auftretensformen sowie Bindungsmechanismen vor. Aufgrund der Vielzahl an organischen Substanzen, werden diese häufig unter Anwendung von Oberbegriffen zusammengefaßt (z. B. Kohlenwasserstoffe). Wie bereits bei Schwermetallen aus Abbildung 2.18 zu entnehmen ist, sind organische Schadstoffe überwiegend in Komplexen oder adsorptiv gebunden. [WINKLER, 1995]

Außerdem beschreibt WINKLER (1995) z. B. für die Gruppe der PAKs wegen der geringen Wasserlöslichkeit das Bestreben, eine partikuläre Bindung an Huminstoffe einzugehen.

Im folgenden werden die in Abbildung 2.18 beschriebenen Bindungsmechanismen und dazugehörige chemische Grundlagen näher beschrieben. In Kapitel 2.4.3 wer-

den diese Grundlagen benötigt, um die in der Aufbereitungstechnik eingesetzten Verfahren näher zu charakterisieren. Bei Sedimenten bzw. Uferfiltraten laufen ständige Reaktionen mit den im Wasser enthaltenen chemischen Substanzen ab.

## **Adsorption**

Bei Böden und Lockergesteinen wird der Tausch von organischen und anorganischen Stoffen beschrieben. Der Tausch von Verbindungen beruht dabei auf Löse- und Fällungsreaktionen sowie auf Ad- und Desorptionsreaktionen. FENT (1998) beschreibt den Transfer von Verbindungen aus der wässrigen an die feste Phase als Adsorption, die Umkehrung als Desorption. Dabei spielt die Konzentration des adsorbierbaren Stoffes in der wässrigen Phase eine entscheidende Rolle.

[KOB, 1997]

In Abhängigkeit von Partikelgröße, organischem Kohlenstoffgehalt und pH-Wert werden Schwermetallionen an das Sediment angelagert. Die Anlagerung von organischen Verbindungen erfolgt ebenfalls in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt des Bindungspartners. Mit abnehmender Wasserlöslichkeit der Substanz steigt die Adsorptionseigenschaft an die organische Fraktion. [FÖRSTNER/Müller, 1974]

Bei verschiedenen Versuchen beobachten WILHELMI (1994) und WINKLER (1995), daß die vorliegenden Adsorptionsreaktionen von Schwermetallen oder organischen Parametern wesentlich schneller ablaufen als die Desorption. Dabei unterscheidet WINKLER (1995) eine Abnahme des Auswaschens von PAKs mit zunehmender Standzeit. Eine Beschleunigung der Desorption beschreibt ARTHEN (1992) durch Änderung des pH-Wertes, Redoxpotentials oder der Temperatur.

Unabhängig vom Adsorber stellten ARTHEN (1992), WINKLER (1995) u. a. eine Korngrößenabhängigkeit fest, da in der kleineren Kornfraktion, die für eine Bindung wichtigen Tonminerale und organischen Kohlenstoffe enthalten, gehäuft anzutreffen sind.

## **Komplexbildung**

Komplexe sowie Komplexverbindungen gehören zur Gruppe der chemischen Verbindungen, wobei eine bestimmte Anzahl von Liganden (Moleküle oder Ionen) direkt an ein Zentralion oder -atom mit unbesetzten Orbitalen gebunden ist. Die Anzahl der Liganden stellt eine charakteristische Zahl dar, welche Werte zwischen 2 und 9 annehmen kann.

Es sind sowohl metallische als auch organische Komplexe bekannt. Ein Komplex kann sowohl aus organischen als auch anorganischen (Metalle) Komponenten aufgebaut sein.

Bei Schwermetallen ist laut KOB (1997) die Art der Komplexbildung mit organischen Liganden eine feste Bindungsart und kann durch Fällung bzw. Adsorption nur schwer mobilisiert werden. Sonstige Schadstoffe lagern sich bei der Komplexbildung an anorganische Stoffe, z. B. Humus, an, welcher durch seine große spezifische Oberfläche viele Bindungsplätze zur Verfügung stellt. In Abhängigkeit von Parametern, wie

Wasserlöslichkeit und Oberflächenladung, die den pH-Wert beeinflussen, werden organische Schadstoffe überwiegend an die Humusfraktion gebunden.

[ALLOW/AYERS, 1993]

## **Ionenbindung**

Wie bereits bei der Gruppe der Komplexe erwähnt, sind Ionen an dieser Bindungsform beteiligt. Vor allem Metalle, die als lösliche Salze Verwendung finden, gelangen unter anderem in gelöster (ionarer) Form in die Kläranlage. Sedimentbildende Minerale mit einer großen Oberfläche oder organische Substanzen besitzen die Fähigkeit, Kationen aus wässriger Lösung zu sorbieren und eine äquivalente Menge anderer Kationen an die Lösung abzugeben. Dieser wird als Kationenaustausch bezeichnet.

[FÖRSTNER/MÜLLER, 1974]

## **Fällung**

Bei der Mitfällung wird ein Stoff an einen Niederschlag gebunden, der im Lösungsmittel ohne Niederschlag löslich wäre. Mit diesen Fällungsreaktionen sind in der Regel weitere Sorptionsmechanismen beteiligt. Bei der Fällung von Schwermetallen in Lösungen werden diese nach dem Ausfallen, z. B. durch Kationenaustausch oder Adsorption, an die Oberfläche von Hydroxiden gebunden. [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974]



### 2.4.3 Verfahren aus der Aufbereitungstechnik – Übertragbarkeit von Boden

Der Gebrauch von Sandwaschanlagen auf deutschen Kläranlagen begann Anfang/Mitte der neunziger Jahre (20. Jh.). In dieser Zeit wurde u.a. von den Firmen NOGGERATH und HUBER eine Maschinenteknik entwickelt, um den organischen Anteil im Sandfanggut zu reduzieren. Unabhängig voneinander hatten beide Firmen ein bewährtes Verfahren aus der Aufbereitungstechnik (z. B. Kiesindustrie oder Bodenwaschanlagen) adaptiert und modifiziert. Das in der Kiesindustrie eingesetzte Aufstromverfahren ist in folgender Abbildung näher dargestellt:

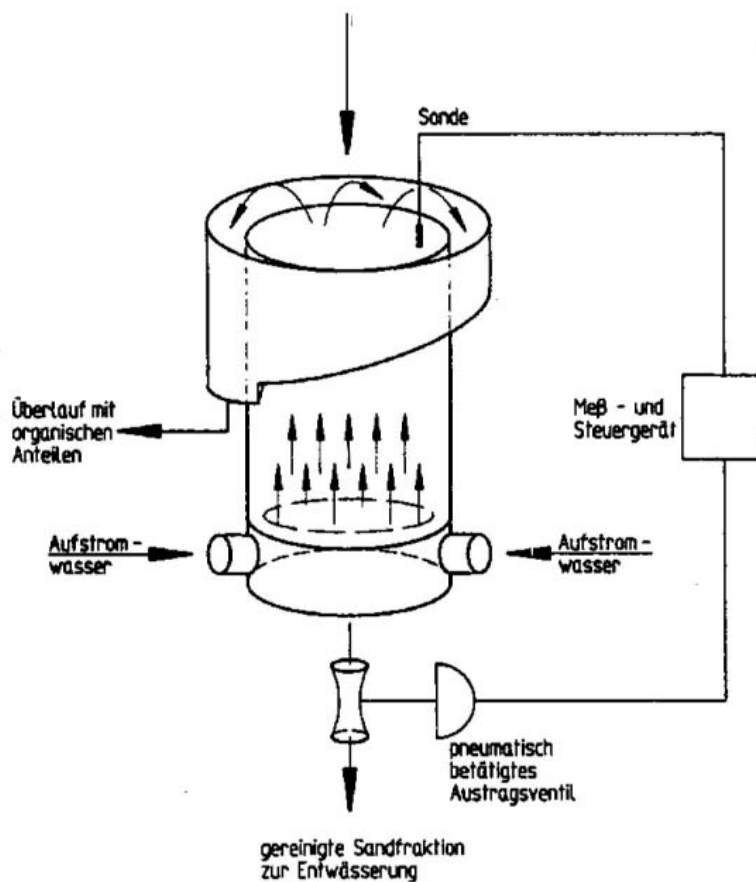


Abb. 2.19: Wirbelschichtsortierer [SCHAUBURG, 1998]

Bei dieser Methode wird ein Wirbelschichtsortierer verwendet, in dem eine Abtrennung der anhaftenden organischen Verunreinigungen vom Sand/ Kies in der Wirbelschicht erfolgt. In dieser Zone werden spezifisch leichtere (organische) Bestandteile mit Aufstromwasser aufgeschwemmt und im Überlauf aus dem System ausgetragen. Der Waschbehälter wird von oben beschickt (siehe Pfeil) und das von organischen Bestandteilen gereinigte Material intermitierend über ein Austragsventil abgelassen.

Die Form sowie konstruktive Gestaltung der Wascheinheiten ist je nach Herstellerfirma modifiziert worden. Im wesentlichen beschränkt sich diese Modifikation auf die Entwässerungseinheit, welche integriert wird. Dabei geht die Waschzone direkt in eine geneigte Schnecke über, um das Material sofort zu entwässern (siehe Abb. 3.2). Beim Einsatz der ersten Sandwaschanlagen war es bereits möglich, unter gün-

stigen Voraussetzungen einen organischen Anteil von ca. 5 % im aufbereiteten Material zu erreichen.

Im folgenden werden weitere Aggregate von Bodenwaschanlagen näher erläutert, da eine Verwendung bei besonders schweren Bedingungen von Kläranlagensanden sinnvoll erscheint.

Bodenwaschanlagen besitzen neben der zentralen Wascheinheit u. a. Aggregate, um stark verklumptes sowie hoch belastetes Material ebenfalls zu reinigen.

Konglomerate bzw. zusammengebackenes Material wird im Zuge der Bodenwäsche erst durch mechanische Beanspruchung behandelt. Dieser erfolgt in der Regel durch Scherung, Reibung oder Prall mit Hilfe von physikalischem Aufschluß durch Löse- und Desorptionsvorgänge. Bei dieser ersten Stufe wird zunächst auf eine Zerteilung von Agglomeraten abgezielt, um eingelagerte Schadstoffteilchen freizusetzen und zu suspendieren. Diese werden in den folgenden Aufbereitungsstufen (v. a. naßmechanisch) abgetrennt.

Die dazu eingesetzten Apparate unterscheiden sich hauptsächlich in der Art des Energieeintrages bzw. der Gutbeanspruchung. Dabei finden überwiegend rotierende Trommeln und sich in Trögen drehende Agitationsorgane (Schwertwäsche) zur Herstellung von eingedickten Suspensionen Verwendung. In folgender Abbildung sind zwei Geräte des Naßaufschlusses dargestellt: [NEEBE/GROHS, 1990]

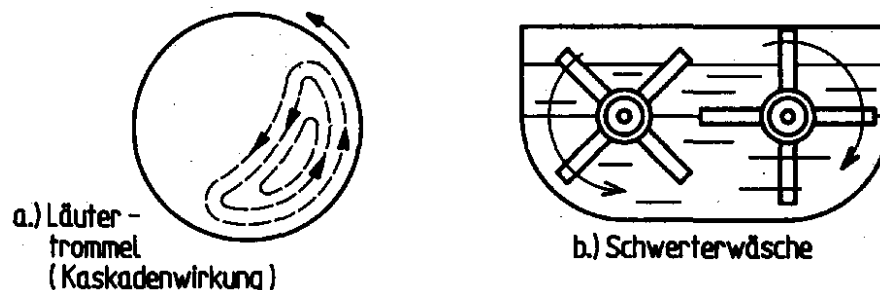


Abb. 2.20: Apparateprinzipien des Naßaufschlusses kontaminierter Böden [NEEBE/GROHS, 1990]

Vor oder nach dem Einsatz eines Wirbelschichtsortierers können durch die Verwendung einer Attritionszelle zusätzlich Schadstoffe von der Kornoberfläche losgelöst und dadurch entfernt werden. Folgende Abbildung zeigt eine schematisch dargestellte Attritionszelle:

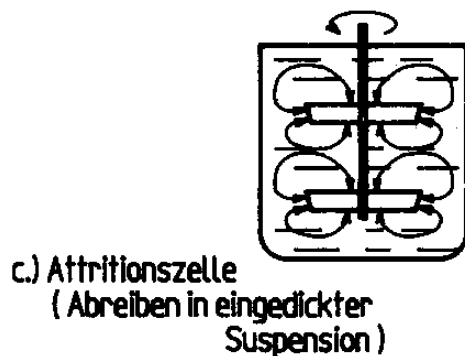


Abb. 2.21: Attritionszelle [NEEBE/GROHS, 1990]

Diese Zellen besitzen vertikal gelagerte Rührorgane. Sie werden in der Regel als Reihenschaltung von Rührkaskaden betrieben.

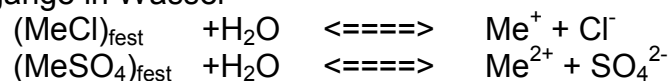
Noch zusammenhängende Bodenkonglomerate, die sowohl mineralischen als auch organischen Ursprungs sein können, werden durch interpartikuläre Bindungskräfte zusammengehalten. Mit Hilfe der Attrition werden diese gelöst und kristalline Bindungen sollten an der Grenzfläche gelockert werden. Eine Zerkleinerung des Materials ist dabei nach Möglichkeit zu vermeiden, wobei der Vorgang von Scherbeanspruchungen dominieren sollte. Die Energie ist dabei so weit möglich auf das Material zu übertragen.

Der entstehende Abrieb besitzt eine große spezifische Oberfläche oder chemische Affinität aufgrund dessen er in der Lage Schadstoffe zu adsorbieren. Der Vorgang ist durch eine Umlagerung von Schadstoffen auf suspendierte Bodenteilchen mit speziellen Adsorptionseigenschaften geprägt. Das bei der Attrition vorhandene Wasser soll eine Suspension der kontaminierten Partikel ermöglichen. Schadstoffe mit nur geringer Wasserlöslichkeit können an Bestandteile wie Tonminerale mit hoher spezifischer Oberfläche adsorptiv gebunden und durch eine nachgeschaltete Entwässerung vom Sand getrennt werden. [HANKEL/ROSENSTOCK/BIEHLER, 1992]

Der notwendige Energieeintrag wird im Vorfeld an Hand von Erfahrungen abgeschätzt. Jedoch werden in konkreten Fällen auf den Einsatzfall abgestimmte Vorversuche vorgenommen und dabei die eingetragene Energie schrittweise gesteigert. Tritt eine wesentliche Änderung in der Kornverteilung des Materials nicht ein, bringt auch eine Steigerung der aufgebrachten Energie keinen weiteren Erfolg. In diesem Fall wird von einer selektiven Attrition gesprochen. [HANKEL/ROSENSTOCK/BIEHLER, 1992]

Neben den physikalischen Methoden werden chemische Vorgänge des Naßaufschlusses eingesetzt. Bei dieser Methode wird eine wässrige Phase als Lösungsmittel bevorzugt, wobei es in Abhängigkeit von den stofflichen Gegebenheiten folgende Möglichkeiten gibt:

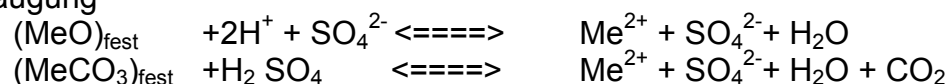
#### 1. Lösevorgänge in Wasser



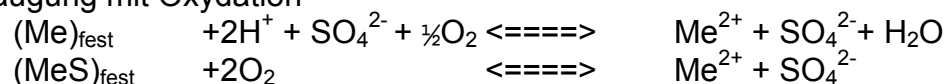
#### 2. Lösevorgänge in Wasser mit Tensiden als Hilfsstoffen

#### 3. Lösen durch saure oder basische Laugung

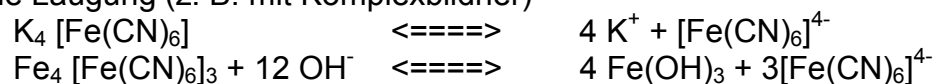
##### 3.1 Saure Laugung



##### 3.2 Saure Laugung mit Oxydation



##### 3.3 Alkalische Laugung (z. B. mit Komplexbildner)



#### 4. Einsatz organischer Lösungsmittel

[NEEßE/GROHS, 1990]

Bei Waschvorgängen mit reinem Wasser ist nur eine Wechselwirkung zwischen Kontamination und Lösungsmittel durch eine Hydratation möglich. Dabei können verschiedene wasserlösliche Stoffe mit Ionengitter, z. B. wasserlösliche Chloride und Sulfate, ausgewaschen werden [NEEßE/GROHS, 1990].

Eine Zugabe von wasserlöslichen Tensiden wird vor allem beim Auswaschen aller Arten von kohlenwasserstoffhaltigen Verunreinigungen eingesetzt. Der jeweilige Einsatz des Tensides sowie die Zugabedosis muß von Fall zu Fall unterschieden werden, wobei auf Erfahrungen der Herstellerfirmen zurückgegriffen wird.

Durch Zugabe von organischen Mitteln kann das Auflösen der z. B. schwer aufschließbaren PAKs wesentlich erleichtert werden. Gegen deren Einsatz sprechen jedoch die hohen Kosten sowie die Kontamination dieser Mittel an sich und deren rückstandsfreie Entsorgung.

Primär für schwermetallhaltige Verbindungen sind saure und alkalische Medien geeignet. Dabei entstehen leicht lösliche Verbindungen durch eine Wechselwirkung von Metalloxiden oder Salzen mit Säuren, Basen und gelösten Salzen. Lösevorgänge unter Komplexbildung sind vor allem bei cyanidhaltigen Materialien zu beobachten. Bei der sauren Laugung von quecksilberhaltigen Verunreinigungen bilden sich ebenfalls lösliche Chlorkomplexe. Die wichtigsten Aufschlußmittel sind  $H_2SO_4$ , HCL, NaOH,  $NH_3$ ,  $Na_2CO_3$ , NaCN, bzw. KCN.

[NEEßE/GROHS, 1990]

#### 2.4.4 Bindungsformen an Sande (Sedimente/Uferfiltrat) – Übertragbarkeit

In Kapitel 2.4.1 bis 2.4.2 werden detailliert verschiedene Bindungsmechanismen von chemischen und organischen Verbindungen an Sanden beschrieben. Darüber hinaus ist von großem Interesse, ob und in welcher Form die beschriebenen Substanzen in den Kornfraktionen vorliegen. Dafür eignen sich Studien mit ähnlichen Materialien, die im wesentlichen aus mineralischen und organischen Stoffen bestehen. Neben Sedimentgestein wird **Uferfiltrat** für eine Betrachtung der Bindungsmechanismen herangezogen und die Möglichkeit einer Übertragbarkeit diskutiert.

Wie Kläranlagensande können auch **Sedimente** oder **Uferfiltrate** mit Schadstoffen belastet sein. Dabei ist, neben der absoluten Kontamination des Schadstoffes für die Aufbereitung auch der vorherrschende Bindungstyp von Interesse. Bei umweltbelasteten Stoffgruppen ist die Herkunft für die "Verfügbarkeit" von entscheidender Rolle. Die Art des Bindungsmechanismus steht in direktem Zusammenhang mit der Verwendung des Schadstoffes. Aufgrund der vielen chemischen Substanzen und deren Einsatzbedingungen ist es unmöglich, diese Frage auch nur annähernd vollständig zu klären.

Jedoch können diverse Mechanismen für den Eliminierungsprozeß der Schwermetalle aus dem Grundwasser angeführt werden:

- Filtration
- Adsorptive Bindung an feinkörnige Komponenten
- Ausfällung als Einzelverbindungen
- Mitfällung mit Eisen- und Manganoxiden und -hydroxiden bzw. Karbonat-, Sulfid- und Phosphatminerale
- Bindung an organische Feststoffe
- Fixierung an detrische Partikel in chemisch inerten Bindungsformen
- Komplexbildung

[ARTHEN, 1992]

Für die Uferfiltration erachten FÖRSTNER und MÜLLER (in ARTHEN 1992) die Mitfällung der Schwermetalle an Eisen- und Mangan-Hydroxiden als den wichtigsten Prozeß. Ebenfalls gehen Sie davon aus, daß während der Filtrationsbedingungen Adsorption und Ionenaustausch in einem geringeren Maße stattfinden. KOPPE (in ARTHEN, 1992) spricht von einer Wirksamkeit (Uferfiltration) der Adsorption, des Ionenaustausches und der Ausfällung von 1 : 1 000 : 1 000 000

Zudem wird die Mobilität vor allem durch folgende Rahmenbedingungen beeinflusst:

- Ionenstärke
- pH-Wert
- Redoxverhältnis
- Komplexbildner
- mikrobielle Aktivität
- Sauerstoffgehalt

[WILLME in ARTHEN, 1992]

Ein Transport von Schwermetallen wird von Eigenschaften der flüssigen Phase ebenso wie von den Milieubedingungen beeinflusst. Dabei ist maßgebend, "ob der Transport als Ion, an Schwebstoff gebunden oder organisch komplexiert erfolgt" [ARTHEN, 1992].

Neben den beschriebenen Filtrationsprozessen, ist das chemische Verhalten für eine Charakterisierung der Schwermetalle hilfreich. Dabei spielt die Adsorption an Tonminerale (sedimentbildende Mineralien) sowie organische Substanzen eine entscheidende Rolle, da sie eine große Oberfläche besitzen. Ebenfalls zeichnen sie sich durch die Fähigkeit aus, Kationen aus wässriger Lösung zu sorbieren und gleiche Mengen an Kationen an die Lösung abzugeben. Jegliche Art von feinkörnigem Material mit großer Oberfläche ermöglicht es Schwermetall-Ionen, sich an der Grenzflächenschicht anzulagern (Adsorption). Dabei laufen Adsorptionsvorgänge oft wesentlich schneller und intensiver ab als Desorptionen.

Für Schwermetalle eine Reihenfolge der Haftfähigkeit aufzustellen ist nicht denkbar, da für jedes Gut von unterschiedlichen Bindungsmechanismen ausgegangen werden muß. [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974]

Nicht zu unterschätzen ist die Austauschkapazität (Summe austauschfähiger Kationen inkl.  $H^+$  in mval/100g Material) der organischen Substanzen. In folgender Tabelle sind die Austauschkapazitäten wichtiger sedimentbildender Mineralien sowie organische Substanzen und Huminsäuren angegeben:

Tab. 2.11: Austauschkapazität wichtiger sedimentbildender Materialien [FÖRSTNER/MÜLLER, 1974]

<b>Material</b>	<b>Austauschkapazität (mval/100 g)</b>
Kaolinit	3 – 15
Chlorit	10 – 40
Illit	20 – 50
Montmorillonit	80 – 120
Frisch gefällte Fe-Hydroxide	10 – 25
Amorphe Kieselsäure	11 – 34
Organische Substanz (aus Böden)	150 – 250
Huminsäuren (aus Böden)	170 – 590

Die hohe Austauschkapazität von organischen Substanzen (aus Böden) gegenüber Mineralien ist in obiger Tabelle deutlich gegenübergestellt. Dieser Sachverhalt erklärt den großen Einfluß sogar von geringen Anteilen organischen Materials auf die Austauschkapazität des Gesamtsediments.

## 3 Betrieb von Sandwaschanlagen auf Kläranlagen

### 3.1 Verfahrensbeschreibung

In Kapitel 2.4.3 ist die Entwicklung der ersten Sandwaschanlagen beschrieben, welche das Aufstromverfahren verwenden. Dieses Verfahren wird noch heute in der Kiesindustrie sowie bei der Aufbereitung von kontaminierten Böden eingesetzt. Seit den ersten Sandwaschanlagen hat eine Optimierung stattgefunden. Zusätzlich wurde dieses durch folgende Aggregate, die speziell für die Aufbereitung von Kläranlagensanden entwickelt wurden, ergänzt:

- Annahmestationen (Vibrationsrost)
- Vorlagebunker und Austragsschnecke
- Organikabtrennung aus dem Waschwasser

Zum Spektrum der Kläranlagensande (aus kommunalen Kläranlagen) gehören folgende Stoffgruppen, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden:

- Kanalspülsande
- Sandfangrückstände

Zur Beurteilung der Sandwaschanlagen konnten Referenzanlagen der Firmen HUBER und GEIGER herangezogen werden. Da kein gravierender Unterschied zu den anderen Herstellerfirmen (z. B. NOGGERATH, FRANKENBERGER, EGNER) festzustellen ist (HITZLER, 1998), werden keine weiteren herangezogen. Die Anlage der Firma HUBER wurde in den verschiedensten Konfigurationen bereits über 500 Mal weltweit verkauft, wobei sich die meisten Referenzanlagen in Deutschland befinden.

Als zweite Herstellerfirma fiel die Wahl auf die Firma GEIGER, da sich auf der Kläranlage der Großstadt A sich zur Zeit die größte Referenzanlage in Deutschland befindet. Diese Anlage ist für das Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Aufbereitung und Verwertung von Kläranlagen- und Kanalsand“ des Landes Nordrhein-Westfalen gebaut worden. Während der eineinhalbjährigen Test- und Inbetriebnahmephase konnten zahlreiche Untersuchungen durchgeführt werden. Das Forschungsvorhaben ist vom Institut Wasser und Boden (IWB) betreut und begutachtet worden.

Eine Zusammenstellung aller im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Anlagen ist Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Die verschiedenen Verfahrensschritte, die im Verlauf einer Aufbereitung durchlaufen werden, sind sowohl für die Firmen HUBER und GEIGER in Abbildung 3.1 dargestellt. Die verwendeten Peripheriegeräte, zu denen die Annahme, das Speichern des Materials sowie alle Arten von Förderaggregaten gehören, unterscheiden sich nicht wesentlich in ihrer konstruktiven Ausführung. In diesen Fällen wird nur die Lösung einer Herstellerfirma detailliert beschrieben:

Die aufzubereitenden Kanalsande können sowohl mit Kanalspülfahrzeugen als auch mit LKWs angeliefert werden. In beiden Fällen wird das Material auf einen Rost abgeworfen und von groben Störstoffen befreit.

Bei der Anlieferung durch ein Spülfahrzeug, ist dieses mit ca. 50 % Wasser gefüllt. Beim Öffnen der Heckklappe tritt zuerst das Wasser aus und gelangt in den Bunker. Anschließend werden die Kanalsande abgeworfen. Mit einem Vibrationsrost können die Störstoffe durch eine Rüttelbewegung aus dem Aufgabegut entfernt werden. Der Bunker wird in der Regel mit einer Schnecke entleert und das Material einer weiteren Grobstoffabscheidung zugeführt. Bei dem Fördervorgang kann das im Bunker vorhandene Wasser zu Beeinträchtigungen der Förderleistung führen. Dabei ist es unerlässlich in die Seitenwände des Bunkers eine Entwässerung zu integrieren. In Abhängigkeit des Faserstoffanteils im Kanalsand ist eine Reinigung des Siebgewebes (Grobstoffabscheidung) in regelmäßigen Abständen durchzuführen.

Wird der Kanalsand sowie das Sandfanggut vorher entwässert, eventuell zwischengelagert und anschließend abgeworfen, ist der Vibrationsrost den Erfordernissen speziell anzupassen. Das vorentwässerte Material kann auf dem Rost liegen bleiben und passiert trotz rütteln nicht die Stäbe. Für diesen schwierigen Einsatzfall sollte nicht übermäßig mit Wasser gespült werden, da sonst die oben beschriebenen Probleme auftreten. Es ist empfehlenswert den Vibrationsmotor ein oder zwei Nummern größer auszulegen, um die zusammengeklebten Bestandteile etwas aufzulockern, so daß sie in den Bunker gelangen können.

Falls es die räumlichen Gegebenheiten nicht erlauben eine Schnecke zur Förderung der Sande einzusetzen, können diese auch gepumpt werden. Dabei ist die Annahmestation (Rost) so auszubilden, daß nur pumpfähiges Material die Stäbe passiert.



Fließbild

Sandwäsche



Annahmestation inkl. Rost mit Vibrationsmotor



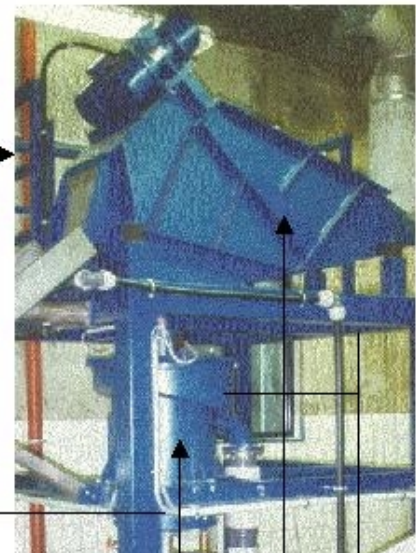
Transportschnecke

Firma HUBER

Firma GEIGER



Waschtrommel



Aufstromsortierer

Siebmaschine

Waschwasser

Grobstoffabtrennung

OPTION  
Zusatzmodul Attrition



Rührbetrieb/Attrition

**GEWASCHENER SAND**

OPTION  
Organikabtrennung



Wasser

Organik



Sandwaschanlage

Waschwasser



Wasser

Organik

Abb. 3.1: Verfahrensfliessbild Sandwaschanlage HUBER/ GEIGER

Der erste große Unterschied der beiden betrachteten Aufbereitungsverfahren besteht in der Grobstoffabtrennung:

In der ROTAMAT-Waschtrommel der Firma HUBER wird das zugeführte Material homogenisiert, aufgeweicht und unter Verwendung von Kreislaufwaschwasser erfolgt eine Auswaschung von Bestandteilen  $< 10$  mm. Grobstoffe  $> 10$  mm werden in einen bereitgestellten Container abgeworfen.

Die Firma GEIGER hingegen verwendet zur Grobstoffabtrennung eine standardmäßige Siebmaschine aus der Kiesaufbereitung. Diese wird zur Aufweichung des Materials mit zusätzlichen Reihen von Bebrausungsdüsen ausgerüstet. Die Abtrennung der Grobstoffe erfolgt durch die Vibration des Siebgewebes. Aufgrund des Organikanteils wird mit Hilfe von Fächerdüsen das Aufgabegut bebraust und dadurch erreicht, daß ebenfalls ein größerer Prozentsatz den Siebelag passiert. Das Überkorn ( $> 10$  mm) wird in einen Container abgeworfen.

Die weitergehende Aufbereitung der Sand/Kiesfraktion  $< 10$  mm erfolgt unabhängig beider Herstellerfirmen nach dem in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Verfahren der Aufstromwäsche.

Bei der Lösung der Firma HUBER wird mittels einer Pumpe das Sand-Wasser-Organik-Gemisch aus dem unterhalb der ROTAMAT-Waschtrommel angeordneten Pumpensumpf der Coanda-Sandwaschanlage zugeführt (oder direkt aus dem Sandfang). Unter Nutzung des Coanda-Effekts entsteht eine rotationsbehaftete Strömung, daß sich im Behälter eine definierte Strömung einstellen kann. Diese schafft nun optimale Bedingungen für eine Abscheidung der mineralischen Bestandteile. Der Sand im unteren Bereich der Coanda-Sandwaschanlage wird durch eine definierte Zuführung von Brauchwasser im Aufstrom fluidisiert, so daß durch dieses Sandwirbelbett die Abtrennung der organischen Bestandteile nach dem Prinzip der Dichtesortierung erfolgt. Diese Aufstromsortierung des Sand/Organik-Gemisches wird gleichzeitig durch ein mit niedriger Drehzahl betriebenes Krählwerk unterstützt.

Die von den organischen Bestandteilen gereinigte mineralische Fraktion (Sand und Kies, Korngrößen bis 10 mm, Glühverlust  $< 2\%$  -  $3\%$ ) wird automatisch mit Hilfe einer Sandaustragsschnecke gefördert, gleichzeitig statisch entwässert und in einen Container abgeworfen.

Hingegen gelangt bei der Firma GEIGER der Siebdurchgang durch Schwerkraft in den Aufstromsortierer. Das Waschwasser wird durch den Aufstromboden gleichmäßig über die Behältergrundfläche verteilt, strömt durch den Sand nach oben und läuft über den Behälterrand in die Überlaufrinne ab. Der verunreinigte Sand gelangt als Feststoff-Wassergemisch auf die Prallplatte und wird gleichmäßig horizontal verteilt. Mit dem Überlaufwasser wird das spezifisch leichtere Material, der organische Anteil, über die Überlaufrinne abgeführt.

Der Unterlauf des Aufstromsortierers, im wesentlichen der mineralische Anteil, gelangt über ein pneumatisch betätigtes Ablaßventil auf eine Förderschnecke. Der Sand wird dort entwässert und in einen Sandcontainer abgeworfen.

Der wesentliche Unterschied dieser beiden Wascheinheiten liegt in deren Beschickung. Die Aggregate der Firma GEIGER sind in turmbauweise übereinander angeordnet, so daß das Material die Anlage von selbst durchläuft. Bei der Firma HUBER hingegen erfolgt ein Umpumpen von der Waschtrommel zur Coanda-Sandwaschanlage. Ebenfalls kann die Anlage auch unterhalb eines Schneckenklassierers platziert werden, der bereits vorentwässertes (trockenes) Material in die Sandwaschanlage abwirft.

Der gewaschene Sand kann optional einer weiteren Reinigungsstufe zugeführt werden. Für diesen Verfahrensschritt werden, wie in Kapitel 2.4.3 für die Bodenaufbereitung beschrieben, Attritionszellen (Abb. 2.21) im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht. Durch mechanische Beanspruchung können mittels Rührwerke anhaftende Schadstoffe von der Oberfläche des Sandkorns gelöst werden. Durch eine anschließende statische Entwässerung wird der Schadstoff mit dem Wasser vom Sand abgetrennt.

Ebenfalls besteht die Möglichkeit, die im Waschwasser enthaltenen organischen Bestandteile abzutrennen.

Die Firma HUBER leitet das Waschwasser in die Siebanlage Ro 2. Hier kann die organische Fraktion abgeseibt und in entwässerter Form in einen bereitgestellten Container abgeworfen werden. Die Firma GEIGER setzt dazu ein bogenförmiges Schwerkraftsieb ein, welches mit dem Waschwasser beschickt wird. Durch den Spalt gelangt zwar das Wasser, jedoch kann die Organik das Gewebe nicht passieren und wird in einen bereitgestellten Container abgeworfen.

Der gravierendste Unterschied beider Herstellerfirmen macht sich bemerkbar, wenn nur Sandfanggut aufbereitet wird. Meistens wird, wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, das Sand-Wasser-Gemisch in freiem Gefälle zum Aufbereitungsort geleitet. Die maximale Korngröße darf nach Herstellerangabe 2,5 cm nicht überschreiten.

In diesem Fall kann die Coanda Sandwaschanlage direkt beschickt werden, jedoch gestattet der Aufstromsortierer der Firma GEIGER diese Beschickungsart nicht. Vielmehr muß das Gemisch gesammelt und mit einem Druck von mindestens 0,7 bar zur Anlage gepumpt werden. Oberhalb des Aufstromsortierers kann außerdem auf den Einsatz eines Hydrozyklons (detaillierte Funktionsweise siehe Kap. 5.2.1.2) zum Eindicken des Gemisches nicht verzichtet werden. Ebenfalls darf der Durchmesser des zu verarbeitenden Materials maximal 10 mm betragen. Die Stärke der Firma GEIGER liegt jedoch in den erzielten Durchsatzleistungen (bis zu 7 t/h je Anlage), wie in Großstadt A realisiert.

### 3.2 Einheit Sandfang–Sandwaschanlage

In einer Kläranlage werden dem Abwasserstrom während der mechanischen Reinigung Rechen- und Sandfanggut sowie meistens auch Fette entnommen, um, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, die Betriebssicherheit der folgenden Behandlungsstufen sicherzustellen bzw. zu optimieren. Das Rechengut wird durch maschinelle Einrichtungen dem Abwasserstrom entnommen und anschließend entwässert. Das Sandfanggut sowie die Fette werden im Sandfang mit unterschiedlichen Räumtechniken ebenfalls aus dem Abwasserstrom entfernt. Die Maschinentchnik für den überwiegend zum Einsatz kommenden belüfteten Sandfang (Kapitel 2.2.3) wird hier nochmals zusammengefaßt:

- Belüfteter Sandfang mit Sandfangräumer als Saugräumer
- Belüfteter Sandfang mit Sandfangräumer als Schildräumer

Die Randbedingungen während des Räumvorganges beeinflussen die Zusammensetzung des Sandes, den Organikgehalt oder die Kornverteilung. Beim Einsatz eines Sandräumers sind Turbulenzen, die den Absetzvorgang der Sande behindern, während der Fahrt möglichst zu vermeiden. Dies kann sowohl durch geringe Fahrgeschwindigkeiten der Räumerbrücke als auch durch häufigere Entnahmezyklen erreicht werden. Durch eine regelmäßige Räumung wird außerdem eine übermäßige Ansammlung von Sand verhindert, welche sich auf den Absetzvorgang negativ auswirken kann. Treten dennoch Spitzen bei der Entnahme auf, besteht die Gefahr einer kurzzeitigen Überlastung der Sandwaschanlage.

Kanalsande können entweder, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, einer Sandwaschanlage zugeführt, oder auch dem Abwasserstrom im Zulauf einer Kläranlage beigegeben werden. In der Rechanlage erfolgt eine erste Entfernung der Grobstoffe des Kanalspülgutes. Sande und Kiese, die die Recheneinheit passieren, werden mit dem Abwasserstrom weitertransportiert und gelangen zum Sandfang, wo sie, wie oben beschrieben, als Sandfanggut entnommen, einer Aufbereitung zugeführt werden.

Das so geförderte Sand-Wasser-Gemisch kann entweder direkt (siehe Einschränkung Kap. 3.1 Fa. GEIGER) einer Sandaufbereitung zugeführt, oder zuerst mit Hilfe eines Sandklassierers entwässert werden. Während des Waschvorganges wird der organische Anteil aus dem Sandfanggut eliminiert und gelangt schließlich ins Washwasser, das nach Gebrauch der Kläranlage wieder zugeführt wird. Dabei wird zwischen einer Einleitung vor oder nach dem Sandfang unterschieden.

Die mechanische Entfernung der Reststoffe aus dem Abwasser sowie verschiedene Varianten bzgl. der Washwasserrückführung können der folgenden Abbildung entnommen werden:

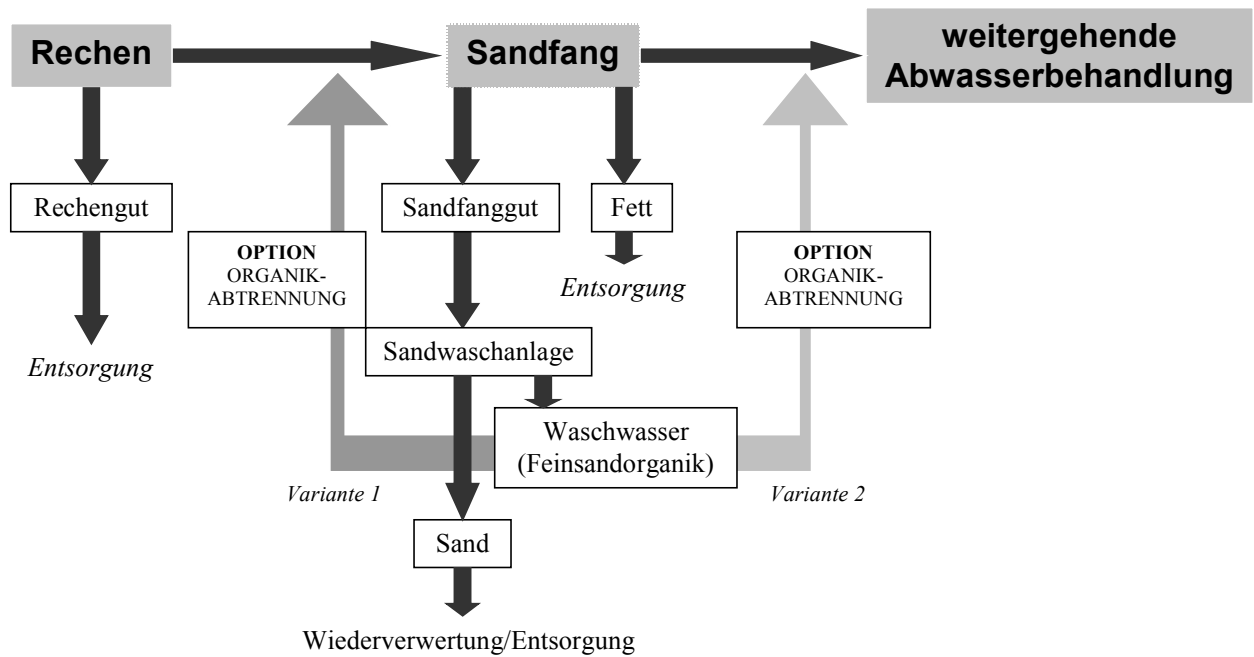


Abb. 3.2: Reststoffentnahme aus dem Abwasser einer Kläranlage

### 3.2.1 Waschwasserrückführung vor den Sandfang

Aus Abbildung 3.2 können die verschiedenen Möglichkeiten der Rückführung des anfallendes Waschwassers beim Einsatz von Sandrecyclinganlagen entnommen werden.

Bei einer Einleitung gemäß Variante 1 werden die organischen und ebenfalls alle mineralischen Bestandteile des Waschwassers wieder in den Sandfang eingeleitet. Dies zeigt, daß alle Bestandteile, die bereits als Sandfanggut abgetrennt wurden und sich nach Durchlaufen der Sandwaschanlage im Waschwasser wiederfinden, zurück an ihren Ausgangspunkt gelangen. In Abhängigkeit der Abscheiderate, Trennkorngröße im Sandfang und der nachfolgenden Sandwäsche, ist eine Kreislaufführung und daraus resultierende Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe des Waschwassers unvermeidbar. Diese Partikel können den Sandfang nur während eines Regenereignisses passieren, da dieser kurzzeitig hydraulisch überbelastet wird.

Eventuelle Betriebsstörungen oder hydraulische Überlastungen der Wäsche haben bei dieser Verfahrensführung auf die folgenden Behandlungsstufen keinen Einfluß, da der Sandfang als Schutz vorgeschaltet ist.

### 3.2.2 Waschwasserrückführung nach den Sandfang

Im Gegensatz dazu wird bei Variante 2 das Waschwasser direkt in den Ablauf des Sandfanges eingeleitet. Alle im Waschwasser enthaltenen Feststoffe gelangen bei dieser Verfahrensführung in die folgenden Stufen der Abwasserbehandlung.

Dadurch ist eine Schutzfunktion des Sandfanges bei Betriebsstörungen oder hydraulischen Überlastungen nicht mehr gewährleistet. Speziell Feinsande, die bei Sandwaschanlagen nur bedingt abgetrennt werden, sind im Abwasserstrom enthalten.

### 3.2.3 Rückführung mit Organikabtrennung

Eine Aufkonzentrierung oder Betriebsstörungen durch Rückführung des Waschwassers in den Abwasserstrom können durch den Einsatz eines Siebes teilweise vermieden werden. Beim Einsatz eines Schwerkraftsiebes (siehe Abb. 3.1) oder einer Siebschnecke werden alle Feststoffe  $< 0,15$  mm (gewählt) eliminiert und z. B. mit dem Rechengut entsorgt. Dies hat zur Folge, daß mit geringen Investitionskosten eine Entlastung des Sandfanges bei Variante 1 und eine Betriebsstörung, wie bei Variante 2 erläutert, ausgeschlossen werden kann.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Allgemeines – Untersuchte Anlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden neben Siebanalysen auch Untersuchungen im Hinblick auf die Anforderungen der LAGA und teilweise der in der TASI geforderten Parameter vorgenommen.

#### Siebanalysen:

Normsiebung nach DIN 4188

Material getrocknet bei 30, 60 und 105°C

Korngrößenverteilung in acht Fraktionen

Fraktion 1:	$x < 63$	$\mu\text{m}$
Fraktion 2:	$63 < x < 125$	$\mu\text{m}$
Fraktion 3:	$125 < x < 250$	$\mu\text{m}$
Fraktion 4:	$250 < x < 500$	$\mu\text{m}$
Fraktion 5:	$500 < x < 1000$	$\mu\text{m}$
Fraktion 6:	$1000 < x < 2000$	$\mu\text{m}$
Fraktion 7:	$2000 < x < 4000$	$\mu\text{m}$
Fraktion 8:	$x > 4000$	$\mu\text{m}$

Bei den durchgeführten Siebanalysen werden zwei Gruppen unterschieden:

- **Siebung zur Beurteilung des Massenflusses**

Beim Erstellen eines Massenflusses von Sanden unterschiedlicher Korngröße von beteiligten Prozeßprodukten können sich durch organische Bestandteile Fehler ergeben. Um nur den Weg der Sande darzustellen, werden alle Proben vor einer Siebung geglüht. Mit dieser Methode kann in Abhängigkeit der Korngröße für den untersuchten Sand ein Massenfluß erstellt werden.

- **Siebung zur Bestimmung der Kontamination je Korngröße für LAGA-Parameter**

Für den Aufbereitungsprozeß ist nicht nur die Reduktion von Input respektive Output für jede Gesamtprobe von Interesse, sondern auch die Abhängigkeit von der Korngröße. Das Material wird vor der Siebung nicht geglüht, da dieser Vorgang die Analyseergebnisse verfälschen würde.

Aus diesem Grund wird das Material zuerst getrocknet und anschließend einer Trockensiebung unterzogen. Um Analyseergebnisse, die organische Inhaltsstoffe (z. B. LHKW) erfassen, nicht durch die Trocknung zu verfälschen, werden Temperaturen deutlich unter den üblichen 105 °C gewählt. Auf eine Naßsiebung wird in dem hier vorliegenden Fall ebenfalls verzichtet, da durch eine Wasserzugabe während des

Siebvorganges eine Verschiebung der nachzuweisenden Stoffe in kleinere Kornfraktionen stattfindet.

Die Analyse der verschiedenen Materialien erfolgte unter Verwendung folgender Normen:

Tab. 4.1: Angewandte Normen für die Untersuchung nach LAGA/TASI

Nr.		Dimension	angewandte Norm
	<b>Feststoff</b>		
	Glühverlust (TASI)	%	DIN 38414 S 3
1	pH-Wert		DIN 19684 S 1
2	EOX	mg/kg	DIN 38414 S 17
3	Kohlenwasserstoffe	mg/kg	DIN 39409 H 18
4	BTEX	mg/kg	DIN 38407 F 9
5	LHKW	mg/kg	DIN 38407 F 5
6	PAK (EPA)	mg/kg	DIN 38407 S 21
7	PCB (DIN)	mg/kg	DIN 38414 S 20
8	Arsen	mg/kg	Aufschluß mit Königswasser (DIN 38414 – Teil 7) zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen nach den unter „Eluat“ angegebenen Verfahren
9	Blei	mg/kg	
10	Cadmium	mg/kg	
11	Chrom (ges.)	mg/kg	
12	Kupfer	mg/kg	
13	Nickel	mg/kg	
14	Quecksilber	mg/kg	
15	Thallium	mg/kg	
16	Zink	mg/kg	
17	Cyanide(ges.)	mg/kg	
	<b>Eluat</b>		
18	pH-Wert		DIN 38404 C 5
19	el. Leitfähigkeit	µS/cm	DIN EN 27888
20	Chlorid	mg/l	DIN 38405 D 19/20
21	Sulfat	mg/l	DIN 38405 D 19/20
22	Cyanid	µg/l	DIN 38405 D 14-2
23	Phenolindex	µg/l	DIN 38409 H 16
24	Arsen	µg/l	DIN 38405 D 18
25	Blei	µg/l	DIN 38406 E 6-3
26	Cadmium	µg/l	DIN V38406 E 19-2
27	Chrom (ges.)	µg/l	DIN 38406 E 22
28	Kupfer	µg/l	DIN 38406 E 22
29	Nickel	µg/l	DIN 38406 E 11-2
30	Quecksilber	µg/l	DIN 38406 E 22
31	Thallium	µg/l	DIN 38406 E 16
32	Zink	µg/l	DIN 38406 E 22



### Fehlerbetrachtung:

Bei jeder Analyse stellt sich die Frage, mit welcher Genauigkeit der Ergebnisse zu rechnen ist. Im Speziellen bestand bei den Ausgangsmaterialien, Sandfanggut und Kanalsand, das Problem, eine homogene Probe herzustellen. In einigen Fällen wurde aus Rückstellproben eine erneute Untersuchung vorgenommen, die Abweichungen von 10 % - 20 % ergab. Ebenfalls könnten Verfälschungen durch Meßungenauigkeiten der Apparaturen sowie Verschmutzungen der Probenahmegefäße zu Fehlern führen. Diesbezüglich kann auf umfangreiche Erfahrungen von Herrn GROßMANN (2000) zurückgegriffen werden, wonach diese Abweichungen im Vergleich zu einer repräsentativen Probenahme nicht ins Gewicht fallen. Ebenfalls können durch Siebungen Ungenauigkeiten entstehen, die aber nur eine kleine Abweichung hervorrufen.

### Untersuchte Anlagen:

In folgender Tabelle werden die untersuchten Sandfänge der verschiedenen Kläranlagen aufgeführt. Ob eine Analyse des Kanalsandes stattfand, ist ebenfalls Tabelle 4.2 zu entnehmen. Die Auswahl der Kläranlagen wurde durch die Höhe der Sandfanggutbelastung entschieden, um für gering, mittel, stark und sehr stark belastetes Material Referenzanlagen zu untersuchen. In dieser Tabelle ist auch die Ausbaugröße je Kläranlage dargestellt:

Tab. 4.2: Untersuchte Kläranlagen

Kläranlage	EW+EWG	Herkunft	Kanalspülgut	Sandfang	Fettfang
Großstadt A	1,45 Mio.	H + I	ja	belüftet	ja
Stadt A	≈ 300 000	I + (H)	nein	belüftet	nein
Stadt B	240 000	H + I	ja	belüftet	ja
Stadt C	675 000	H + I	ja	belüftet	ja
Stadt D	150 000	H + (I)	ja	belüftet	nein
Stadt E	120 000	H	nein	belüftet	ja
Stadt F	330 000	H + I	ja	belüftet	ja
Stadt G (Teil)	3-400 000	H + (I)	nein	unbelüftet	nein
Stadt H	70 000	H	nein	belüftet	ja

H: überwiegend häusliches Abwasser  
I: überwiegend industrielles Abwasser

### **Versuchsdurchführung:**

Für alle untersuchten Kläranlagen erfolgten Analysen des aufzubereitenden Materials, des gewaschenen Sandes sowie teilweise der Organik. Die Probenahmen erfolgten an verschiedenen Tagen und zu unterschiedlichen Betriebszuständen.

Für die Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen der Sandfanggutbelastung, des Klärschlammes sowie des Rohabwassers (24 h Mischprobe) ist ein Zeitraum von einem halben Jahr gewählt worden. Die Meßwerte basieren in den meisten Fällen auf Untersuchungen der Kläranlagenbetreiber.

Die Schwermetalluntersuchungen wurden von der Firma DR. WEßLING LABORATORIEN GMBH vorgenommen.

Die CSB-Analysen des Waschwassers sind am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt worden.

### *4.2 Versuchsbeschreibung Attrition*

Bei den hier durchgeführten Rührversuchen wurde immer mit einer konstanten Drehzahl des Rührers gearbeitet. Der Einfluß der Rührdauer auf den Schadstoffabtrag wird bei einem konstanten Wasser/Feststoffverhältnis von 1:x betrachtet. Nach der Attrition wird das Material gespült, um die abgeriebenen Kontaminationen zu eliminieren.

Um diese Ergebnisse mit weiteren Daten vergleichen zu können, werden Siebanalysen des Sandes vor und nach der Attrition durchgeführt. Die **Feinsandzunahme von Körnern < 0,125 mm wird als Bezugsgröße** definiert, wobei diese zur Beschreibung und zum Vergleich von Einflußgrößen wie Trockensubstanzgehalt, Rührdauer und aggregatsbezogene Faktoren verwendet wird. Aus diesem Grund wird hier bewußt auf eine schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus verzichtet, jedoch auf Abbildung 2.21 verwiesen.

## 5 Experimentelle Untersuchungen - Vorgehensweise

### 5.1 Ermittlung der Reinigungsleistung von Kanalsand und Sandfanggut

#### 5.1.1 Grundlagen

Die verschiedenen Entsorgungs- und Behandlungsmöglichkeiten für Kläranlagensande sind Kapitel 2.3.1 zu entnehmen. Da das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz primär eine Verwertung der Reststoffe fordern, werden Ausgangsbelastungen von verschiedenen Quellen eigenen Meßwerten gegenübergestellt. Die gemessenen Daten sind darüber hinaus den in der LAGA definierten Zuordnungswerten (Z 0 – Z 2) in Tabelle 5.1 gegenübergestellt.

Für die **Großstadt A** sind 35 Messungen zur Ausgangsbelastung vom IWB durchgeführt worden, welche den dargestellten Mittelwerten in Tabelle 5.1 zugrunde liegen. Darüber hinaus wird auf einen ATV-DVWK Arbeitsbericht des Fachausschusses 3.11 (ATV-DVWK, 1996) verwiesen, dem 10 verschiedene Sandfanggutproben zur Ermittlung der Ausgangsbelastung vorlagen. Im Rahmen dieser Arbeit sind außerdem Sande von 8 Kläranlagen beprobt worden, wobei in Tabelle 5.1 nur Ergebnisse mit den höchsten Belastungen exemplarisch für die **Stadt A** dargestellt sind.

In nachstehender Tabelle sind die gemessenen Belastungen für die oben beschriebenen Fälle respektive der Zuordnungswerte nach LAGA aufgetragen:

Tab. 5.1: Belastung von Kanalsand und Sandfanggut respektive Zuordnungswerte nach LAGA

	Dim.	LAGA	LAGA	LAGA	LAGA	Großstadt A		Arbeitsbericht		Stadt A
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	Mittelwert		Mittelwert	Höchstwert	Höchstwert
						Sandfang	Kanalsand			
<b>Feststoff</b>										
pH-Wert		5,5 - 8	5,5-8	5-9	--	6,00	7,20	6,80	7,80	
EOX	mg/kg	1,00	3,00	10,00	15,00	13,00	11,00	4,10	25,50	13,00
Kohlenwasserst.	mg/kg	100,00	300,00	500,00	1000,00	188,00	105,00	405,00	<b>1100,00</b>	817,00
BTEX	mg/kg	<1	1,00	3,00	5,00	0,80	0,80	2,00	4,00	2,90
LHKW	mg/kg	<1	1,00	3,00	5,00	0,02	0,02	1,00	2,71	1,80
PAK (EPA)	mg/kg	1,00	5,00	15,00	20,00	19,10	0,02	4,00	<b>15,29</b>	<b>35,20</b>
PCB (DIN)	mg/kg	0,02	0,10	0,50	1,00	0,80	0,30	0,08	0,30	0,33
Arsen	mg/kg	20,00	30,00	50,00	150,00	3,28	5,93	2,00	6,00	4,00
Blei	mg/kg	100,00	200,00	300,00	1000,00	<b>511,00</b>	360,00	61,00	256,00	124,00
Cadmium	mg/kg	0,60	1,00	3,00	10,00	1,20	1,20	1,00	15,10	1,44
Chrom (ges.)	mg/kg	50,00	100,00	200,00	600,00	45,00	39,00	38,00	212,00	55,30
Kupfer	mg/kg	40,00	100,00	200,00	600,00	<b>489,00</b>	389,00	98,00	311,00	<b>462,00</b>
Nickel	mg/kg	40,00	100,00	200,00	600,00	28,00	23,00	19,00	57,00	35,20
Quecksilber	mg/kg	0,30	1,00	3,00	10,00	2,15	4,40	1,10	5,80	0,43
Thallium	mg/kg	0,50	1,00	3,00	10,00	0,40	0,20	1,40	2,00	0,00
Zink	mg/kg	120,00	300,00	500,00	1500,00	<b>800,00</b>	<b>724,00</b>	558,00	<b>1250,00</b>	<b>1450,00</b>
Cyanide(ges.)	mg/kg	1,00	10,00	30,00	100,00	0,08	0,11	0,50	2,00	0,00

	Dim.	LAGA	LAGA	LAGA	LAGA	Großstadt A		Arbeitsbericht		Stadt A
		Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2	Mittelwert		Mittelwert	Höchstwert	Höchstwert
						Sandfang	Kanalsand			
<b>Eluat</b>										
pH-Wert		6,5-9	6,5-9	6-12	5,5-12	6,30	7,50	6,80	8,50	7,50
el-Leitfähigkeit	µS/cm	500,00	500,00	1000,00	1500,00	2,05	0,98	3580	12900	305,00
Chlorid	mg/l	10,00	10,00	20,00	30,00	7,50	6,90	13,10	20,00	4,50
Sulfat	mg/l	50,00	50,00	100,00	150,00	17,10	19,00	114,30	312,00	19,30
Cyanid	µg/l	<10	10,00	50,00	100,00	0,2	0,61	10,00	50,00	0,00
Phenolindex	µg/l	<10	10,00	50,00	100,00	3,00	12,00	<b>500,00</b>	<b>1700,00</b>	28,00
Arsen	µg/l	10,00	10,00	40,00	60,00	4,11	3,10	10,00	50,00	0,00
Blei	µg/l	20,00	40,00	100,00	200,00	27,20	3,20	40,00	170,00	0,00
Cadmium	µg/l	2,00	2,00	5,00	10,00	0,60	0,30	10,00	20,00	0,00
Chrom (ges.)	µg/l	15,00	30,00	75,00	150,00	6,60	3,00	20,00	50,00	3,00
Kupfer	µg/l	50,00	50,00	150,00	300,00	55,00	6,40	60,00	2456,00	280,00
Nickel	µg/l	40,00	50,00	150,00	200,00	40,00	22,00	40,00	100,00	8,00
Quecksilber	µg/l	0,20	0,20	1,00	2,00	0,30	0,10	0,05	1,00	0,00
Thallium	µg/l	<1	1,00	3,00	5,00	1,00	1,00	<b>50,00</b>	<b>100,00</b>	0,00
Zink	µg/l	100,00	100,00	300,00	600,00	390,00	85,00	70,00	240,00	30,00

Der Tabelle 5.1 kann für Sandfanggut bzw. Kanalsand entnommen werden, daß bestimmte Parameter öfter als andere gerade noch dem Zuordnungswert Z 2 zuzuordnen sind oder diesen sogar überschreiten. Diese Erkenntnis ist unabhängig von den einzelnen Kläranlagen und läßt sich vielmehr bezüglich der Untersuchungsparameter aufrechterhalten.

Dabei fällt insbesondere auf, daß bedenkliche Meßwerte vor allem im Feststoff auftraten. Die kritischen Parameter des Ausgangsmaterials im Feststoff sind bei den organischen Verbindungen Kohlenwasserstoffe und PAKs, sowie Kupfer, Zink und Blei bei den Schwermetallen.

Unabhängig von den in Tabelle 5.1 dargestellten Zusammenhängen, führt die Firma HUBER ebenfalls Blei, Kupfer und Zink als die schwerwiegendsten Problemstoffe an.  
[BRANNER, 2001]

Bei Betrachtung der Eluatwerte fällt auf, daß nur Meßwerte des ATV-DVWK Arbeitsberichtes die Zuordnungswerte Z 2 nach LAGA überschreiten. Die Parameter mit Überschreitungen sind der Phenolindex, die elektrische Leitfähigkeit sowie Thallium.

Anhand von Tabelle 5.1 kann nur ein Absolutwert für die Belastung eines Untersuchungsparameters abgelesen werden. Jedoch ist darüber hinaus von Interesse, ob eine unterschiedliche prozentuale Verteilung in Abhängigkeit der Korngröße festzustellen ist. Kleinere Fraktionen könnten aufgrund der höheren spezifischen Oberfläche größere Schadstoffbelastungen an der Kornoberfläche adsorbieren. Diesbezüglich wurden verschiedene Sande auf unterschiedliche Belastungen hin untersucht.

Exemplarisch dafür ist in folgender Tabelle die Belastung von PAK sowie Kupfer in Abhängigkeit der Korngröße dargestellt:

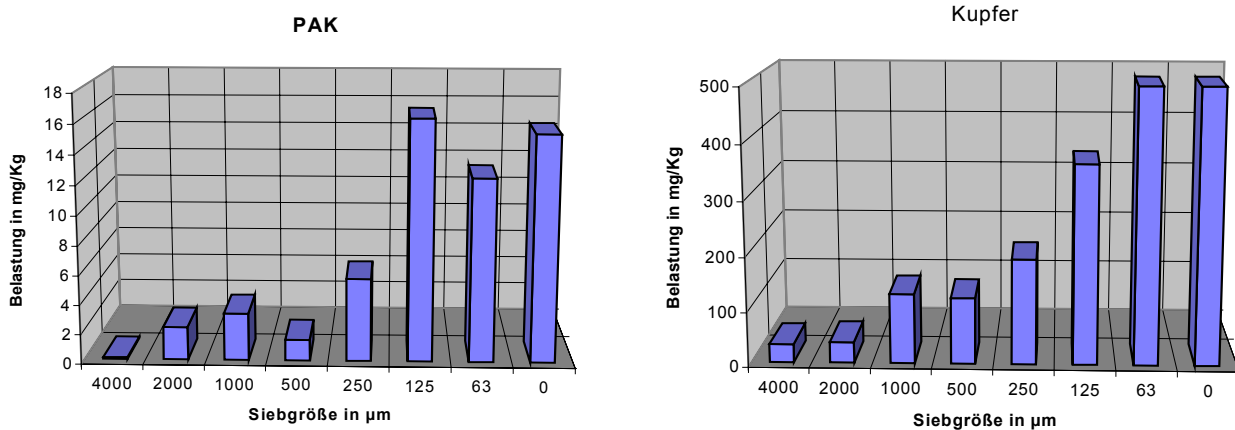


Abb. 5.1: Belastung von Einzelfractionen verschiedener Parameter

Aufgrund der ähnlichen Zusammensetzung von Boden, Sedimenten oder Uferfiltrat und Sand aus Abwasseranlagen, konnte eine erhöhte Belastung der Feinanteile nur vermutet werden (vgl. Kapitel 2.4.4).

Diese aufgestellte Vermutung, wird durch Abbildung 5.1 weiter untermauert, zumal die dargestellten PAKs und Kupfer nur exemplarisch für weitere Parameter stehen. Folglich kann davon ausgegangen werden, daß auch bei Kläranlagensanden aufgrund der größeren spezifischen Oberfläche im Feinkornbereich erhöhte Kontaminationen vorliegen.

Unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse der Firma HANS HUBER zeigen ebenfalls erhöhte Belastungen im Feinkornbereich. Dabei stützen sich diese Ergebnisse auf eine Reihe durchgeführter Versuche. [BRANNER, 2001]

### 5.1.2 Massenfluß der Prozeßprodukte und Untersuchungsparameter

Für den im Abwasser enthaltenen Sand wird für eine Kläranlage ein Massenfluß (Rechen ausgenommen) aufgestellt. Da im Kläranlagenablauf der Sandanteil vernachlässigbar gering ist, kann nur in den Reststoffen, Sandfanggut und Klärschlamm, Sand enthalten sein. Der überwiegende Teil wird bereits im Sandfang aus dem Abwasserstrom abgetrennt, wobei Feinsande, die diesen passieren, auch als Summe in den verschiedenen Klärschlämmen enthalten sind.

Darüber hinaus wird für die Einheit Sandfang-Sandwäsche ein Massenfluß erstellt. Die untersuchten Sandwäschen bereiten das Material auf, wie in Kapitel 3.1 beschreiben. Dabei erfolgt erst eine Abtrennung der Grob- und Störstoffe des Aufgabegutes. Anschließend wird das verbleibende Material in einer Sandwaschanlage in seine zwei Bestandteile, den gewaschenen Sand und die Organik, aufgespalten. Der gewaschene Sand besteht in der Regel nur noch aus anorganischen Bestandteilen (Glühverlust < 3 Massen (M) -%). Die "Organik" setzt sich aus einem geringen Teil Feinsande kleiner ca. 0,2 mm sowie organischen Bestandteilen des Ausgangsmaterials zusammen. Der Glühverlust bewegt sich im Bereich von 30 M.-% - 60 M.-%, je nach Zusammensetzung des ursprünglichen Materials. Im Output einer Sandwaschanlage ist ein höherer Trockensubstanzgehalt als im Ausgangsmaterials festzustellen. Aus diesem Grund fällt zusätzlich Wasser während der Aufbereitung an.

Die untersuchten Prozeßprodukte sind in folgenden Abbildung dargestellt:

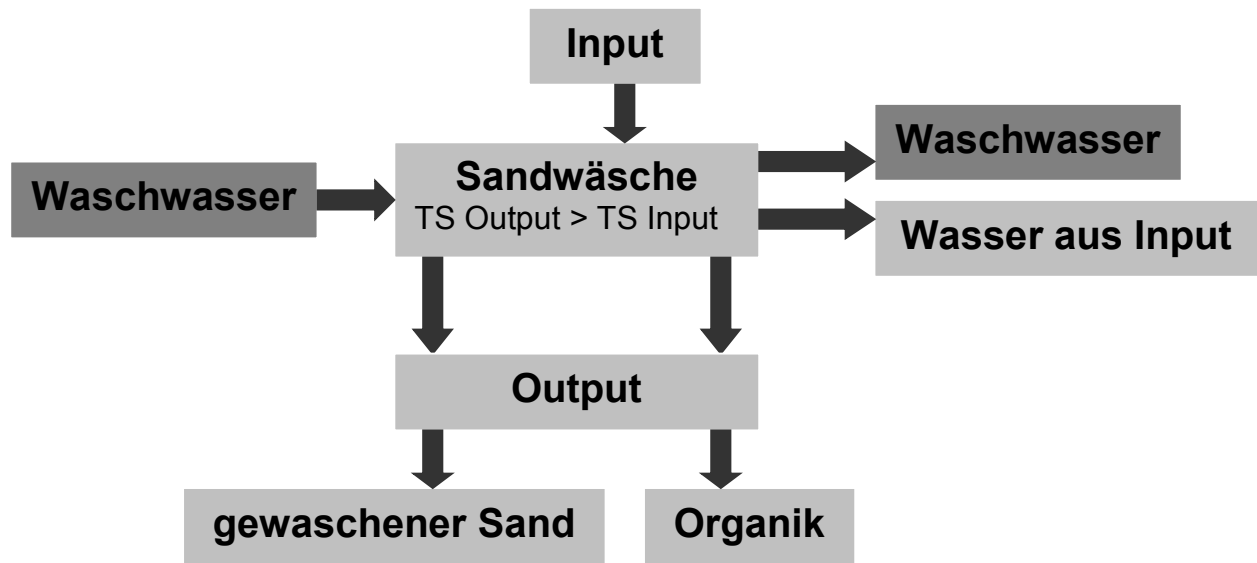


Abb. 5.2: Prozeßprodukte einer Sandwaschanlage

### 5.1.2.1 Sieblinien

Erkenntnisse über die Zusammensetzung (Korngrößenverteilung) der in Abbildung 5.2 dargestellten Prozeßprodukte werden durch eine Siebung erreicht. Die erzielten Fraktionen werden gemäß folgender Abbildung als Summenlinie über den Korndurchmesser aufgetragen:

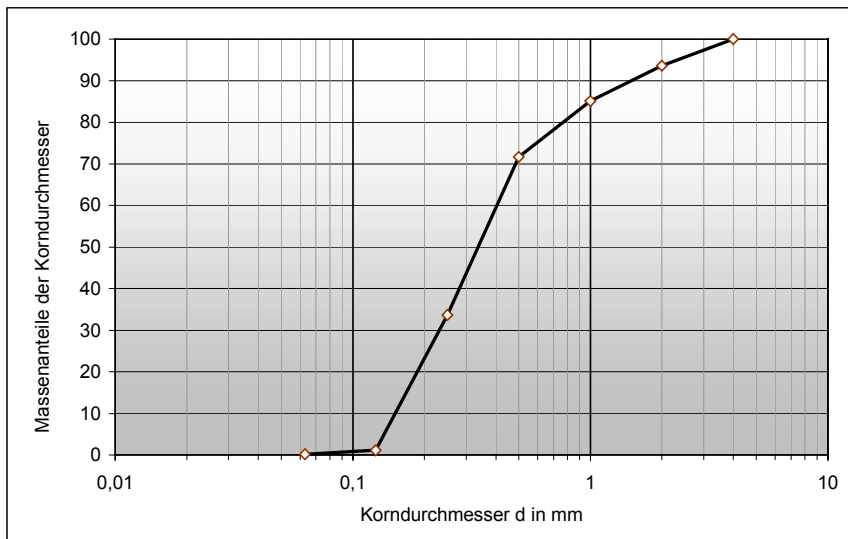


Abb. 5.3: Typische Sieblinie von ungewaschenem Sandfanggut

Gravierende Unterschiede zwischen Trocken- und Regenwetter einer Sieblinie von ungewaschenem Sandfanggut sind nicht festzustellen, jedoch fallen bei Trockenwetter etwas höhere Feinsandanteile als bei Regenwetter an. Im Regenwetterfall fällt zu Beginn eine große Sandmenge an, deren organischer Anteil im Vergleich zu

Trockenwetter wesentlich geringer ist. Vielmehr unterscheiden sich die Sieblinien verschiedener Kläranlagen in der Lage des ersten Tiefpunktes (hier: ca. 0,15 mm) bezüglich der Abszisse, da dieser die Trenngrenze eines Sandfänge widerspiegelt.

Die Fraktionierung der verschiedenen Prozeßprodukte wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, durchgeführt. Daraus werden die unterschiedlichen Sieblinien erstellt, um den Weg einzelner Kornklassen nachvollziehen zu können.

#### *5.1.2.2 Untersuchungsparameter*

Die Aufgabe einer Sandwaschanlage ist neben der Entfernung der organischen Inhaltsstoffe eine Reduktion (Wirkungsgrad) der Schadstoffe zu erreichen, um eine Verwertung zu ermöglichen. Die Schadstoffreduktion wird wie folgt definiert:

$$\text{Reduktion [\%]} = \frac{(\text{Anfangsbelastung} - \text{Endbelastung})}{\text{Anfangsbelastung}} \times 100$$

**(Gleichung 5.1)**

Die in Abbildung 5.2 aufgeführten Prozeßprodukte werden gemäß LAGA-Liste untersucht. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen werden sowohl Messungen des Gesamtmaterials als auch Einzelmessungen der gewonnen Siebfractionen durchgeführt. Anhand dieser Daten werden Summenproben in Abhängigkeit der verschiedenen Untersuchungsparameter für die Gesamtfraction sowie als Summe der einzelnen Fractionen durchgeführt.

## 5.2 Untersuchungen zur Optimierung der Wirkungsweise

### 5.2.1 Attrition

Werden mit einer Sandwaschanlage die für eine Verwertung einzuhaltenden Zuordnungswerte (LAGA) nicht erreicht, kann im Anschluß an die Aufstrombehandlung mit Wasser eine Attrition nachgeschaltet werden. In Kapitel 2.4.3 werden Attritionszellen bereits als fester Bestandteil von Bodenwaschanlagen beschrieben.

Beim Einsatz der Attrition sind im vor Ort Betrieb folgende Parameter variabel und in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen anzupassen:

- Rührdauer
- Wasser/ Feststoffverhältnis
- Drehzahl

Da es schwierig ist, diese und weitere anlagenspezifische Parameter einzeln darzustellen wird die **absolute Feinsandzunahme von Körnern < 0,125 mm als Bezugsgröße** für den Wirkungsgrad definiert. Die Feingutzunahme beschreibt u. a. Einflußgrößen wie Trockensubstanzgehalt, Rührdauer, Drehzahl und weitere aggregatbezogene Faktoren. Damit ist es möglich, unterschiedliche Einsatzfälle anhand dieser Bezugsgröße miteinander zu vergleichen.

### 5.2.2 Verbesserung der Abscheideleistung - Hydrozyklontechnik

Das anfallende Waschwasser einer Sandrecyclinganlage enthält neben Organik auch vermehrt Sande unterhalb der Trenngrenze (kleinste Korngröße die gewaschen werden kann). Diese liegt bei der Verwendung des Aufstromverfahrens mit Hilfe von Waschwasser bei einem Korndurchmesser von ca. 0,2 mm - 0,3 mm.

Da Sandwaschanlagen vermehrt extern Kanalsande sowie Sandfanggut aus anderen Kläranlagen annehmen, kann eine Rückführung des Waschwassers mit den enthaltenen Feinsanden zu Störungen in Belebungsbecken und der Schlammfäulung führen. Ein weiteres Problem in diesem Zusammenhang könnte höherer Verschleiß der Maschinenteknik sein.



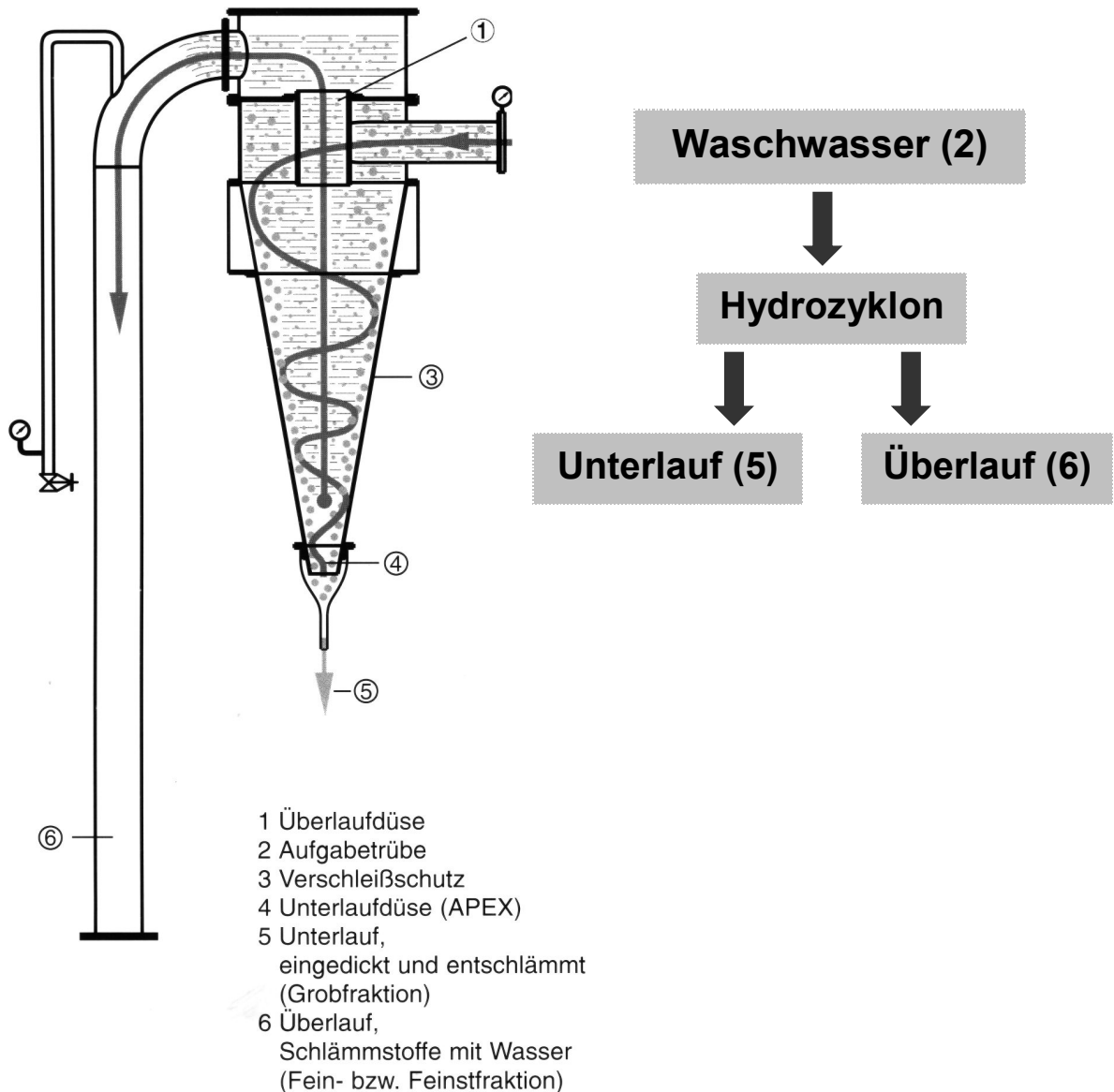


Abb. 5.4: Hydrozyklon [Firmenprospekt Fa. SCHAUBURG, 2000]

Es besteht die Möglichkeit, das anfallende Washwasser mit einer Pumpe einem Hydrozyklon zuzuführen. Das „Schema 5.4“ stellt einen Hydrozyklon dar. Jeder Zyklon besitzt eine charakteristische Trennkorngröße (z. B. 30 - 100  $\mu\text{m}$ ), unterhalb derer es nicht möglich ist, Sande aus dem flüssigen Input (Washwasser 2) abzutrennen. Diese Sandkörner verbleiben im flüssigen Anteil des Überlaufs (6), wobei alle Sande die größer als die Trennkorngröße sind, sich im Unterlauf (5) wiederfinden. Neben dem gewonnen Feinsand enthält der Unterlauf eines Hochdruckzyklons (Betriebsdruck ca. 1,5 bar) auch ungefähr 40 % Wasser. Dieses sollte durch eine geeignete Entwässerungseinheit abgetrennt werden.

Im Rahmen der Inbetriebnahme der in Kapitel 3.1 beschriebenen Sandwaschanlage (Fa. GEIGER) wurden Sieblinien für den Einsatz von Hochdruckzyklonen erstellt. Anhand dieser ist es möglich, den zusätzlichen Rückhalt beim Einsatz eines Hydrozyklons zu beschreiben.

### 5.3 Kritische Parameter bei einer Verwertung

Wie bereits in Kapitel 5.1 angesprochen, entscheiden unabhängig vom untersuchten Material die gleichen Parameter darüber, ob eine Entsorgung oder Verwertung möglich ist. Die kritischen Parameter, die über die Einbauklasse nach LAGA entscheiden, sind in der Regel Blei, Kupfer und Zink. Unter Umständen können dies ebenfalls PAKs sowie Kohlenwasserstoffe sein.

Deshalb werden für diese und weitere Parameter von verschiedenen Meßstellen (Rohabwasser, Sandfanggut, Klärschlamm) einer Kläranlage die Schadstoffkonzentrationen ermittelt. Es erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nur eine Betrachtung von Städten mit Mischkanalisation. Da bei einer Trennkanalisation weniger Sand anfällt, kommt dieser Fall hier nicht in Betracht:

Tab. 5.2: Meßwerte für Abwasser (Zulauf), Sandfanggut (ungew.) und Klärschlamm für diverse Schadstoffe.

	Parameter	Rohabwasser [µg/l]	Faktor RS [1 000 l/kg]	Sandfanggut [mg/kg]	Faktor SK [ ]	Klärschlamm [mg/kg]
Stadt XY	A	$x_1$	$x_1/x_2=X_1$	$x_2$	$x_2/x_3=X_2$	$x_3$
	B	$y_1$	$y_1/y_2=Y_1$	$y_2$	$y_2/y_3=Y_2$	$y_3$
		<b>Mittelwert</b>	<b><math>(X_1+Y_1)/2</math></b>	<b>Mittelwert</b>	<b><math>(X_2+Y_2)/2</math></b>	

In Tabelle 5.2 sind für die untersuchten Prozeßprodukte die Belastungen ( $x_i$ ,  $y_i$  als Mittelwerte) in allgemeingültiger Form dargestellt. Anhand der Faktoren RS und SK wird versucht, einen Zusammenhang zwischen Rohabwasser, Sandfanggut und Klärschlamm herzuleiten.

Zwischen Abwasser und Sandfanggut wird der Faktor RS mit der Einheit [1 000 l/kg] eingeführt. Für Sandfanggut und Klärschlamm wird der Faktor SK festgelegt. Für die beiden definierten Faktoren wird außerdem unabhängig vom Untersuchungsparameter ein Mittelwert errechnet.

Wie in Kapitel 2.3.1.1 angeführt, wird in Deutschland der überwiegende Teil des Sandfanggutes nicht verwertet, sondern deponiert. Doch sind gerade in den letzten Jahren zahlreiche Sandwaschanlagen auf Kläranlagen installiert worden. Da das gewaschene Material einer Verwertung zuzuführen ist, stellt sich immer die Frage nach der zu erwartenden Restbelastung. Zum einen kann mit Hilfe von Versuchen am Originalmaterial ein Wert ermittelt werden. Diese Feststellung ist in der Regel sehr genau, jedoch auch kostspielig, da mehrere Proben auf alle Parameter der LAGA-Liste zu untersuchen sind.

Zum anderen sollte es möglich sein, eine Abschätzung mit einer reduzierten Anzahl ausgewählter Parameter durchzuführen. Diesbezüglich ist zu prüfen, ob sich die Untersuchungen auf kritische Werte beschränken können und/oder ob durch vorhandene Meßwerte von korrelierenden Prozeßprodukten (Rohabwasser, Klärschlamm) bereits Tendenzen sichtbar werden.

## 6 Auswertung/Ergebnisse

### 6.1 Arbeitsweise von Sandwaschanlagen

#### 6.1.1 Untersuchungsparameter

Bei der Sandaufbereitung erfolgt nach Abtrennung der Grobstoffe eine Behandlung im Aufstromverfahren (vgl. Kap. 3). Dabei werden organische Bestandteile durch eine Dichtesortierung mit Waschwasser vom Sand abgetrennt. Feinsande < ca. 0,10 mm gelangen bedingt durch den Aufstrom ebenfalls ins Waschwasser.

Wie bereits ausführlich für verwandte Stoffgruppen (siehe Kapitel 5.1.1) beschrieben, sind in Feinsanden und Organika prozentual mehr Schadstoffe gebunden als in größeren Fraktionen. Diese werden im Zuge der Sandaufbereitung vorrangig entfernt, die Folge ist eine Schadstoffreduktion.

Durch eine Auswertung von gewaschenem Material von 8 Kläranlagen wird die Restbelastung des gewaschenen Sandes ermittelt.

Um eine repräsentative Aussage zu treffen, wurden im Rahmen dieser Arbeit neben der bereits vorgestellten Stadt A, 7 weitere ausgewählt. Darunter fiel die Auswahl auf Sandwaschanlagen der Herstellerfirmen HUBER und GEIGER.

Tabelle 6.1 enthält für die gewaschenen Sande den errechneten Mittelwert aus allen 8 Aufbereitungsanlagen. Der jeweils höchste Meßwert je Untersuchungsparameter ist ebenfalls Tabelle 6.1 zu entnehmen.

Um diese Ergebnisse besser interpretieren zu können, werden sie mit denen einer umfassenden Studie der Großstadt A verglichen. Den aufgeführten Mittelwerten liegen 35 Einzeluntersuchungen je Parameter zu Grunde, wobei der jeweils gemessene Höchstwert darüber hinaus angegeben ist.

In Tabelle 6.1 sind außerdem die Zuordnungswerte je Einbauklasse den oben beschriebenen Meßwerten gegenübergestellt. Fett gedruckte Werte zeigen jeweils eine Überschreitung des Zuordnungswertes Z 2 an.

Für die in Tabelle 5.1 aufgeführten Ausgangsbelastungen des ATV-DVWK Arbeitsberichtes des Fachausschusses 3.11 (ATV-DVWK, 1996) lagen 10 verschiedene Sandproben 1996 vor. Da auf den betrachteten Kläranlagen damals noch keine Sandwäsche installiert war, liegen hier keine Meßwerte über gewaschenes Material vor. Auf diese Meßwerte wird wegen einer höheren Aussagekraft von Tabelle 5.1 trotzdem nicht verzichtet.

Tab. 6.1: Belastung von gewaschenem Material respektive Einbauklassen (LAGA)

		LAGA Z 0	LAGA Z 1.1	LAGA Z 1.2	LAGA Z 2	8 Kläranlagen nach HITZLER		Großstadt A nach IWB	
						Mittelwert	Höchstwert	Mittelwert	Höchstwert
	<b>Dim.</b>								
Glühverlust	%					2,6	4,3	1,8	3,5
<b>Feststoff</b>									
pH-Wert		5,5 - 8	5,5-8	5-9	--	7,2	7,3	7,5	8,10
EOX	mg/kg	1,00	3,00	10,00	15,00	10,80	12,60	1,60	3,80
Kohlenwasserst	mg/kg	100,00	300,00	500,00	1000,00	154,40	270,00	58,60	136,00
BTEX	mg/kg	<1	1,00	3,00	5,00	< 1	< 1	0,60	1,50
LHKW	mg/kg	<1	1,00	3,00	5,00	3,4	6,70	0,01	0,02
PAK (EPA)	mg/kg	1,00	5,00	15,00	20,00	1,90	<b>24,90</b>	5,50	<b>23,10</b>
PCB (DIN)	mg/kg	0,02	0,10	0,50	1,00	0,10	0,21	0,30	0,81
Arsen	mg/kg	20,00	30,00	50,00	150,00	2,40	7,00	5,20	14,00
Blei	mg/kg	100,00	200,00	300,00	1000,00	161,00	324,00	268,80	750,00
Cadmium	mg/kg	0,60	1,00	3,00	10,00	0,40	3,30	0,90	2,00
Chrom (ges.)	mg/kg	50,00	100,00	200,00	600,00	24,40	43,00	45,80	76,00
Kupfer	mg/kg	40,00	100,00	200,00	600,00	68,60	233,00	173,00	240,00
Nickel	mg/kg	40,00	100,00	200,00	600,00	27,30	50,40	30,50	41,00
Quecksilber	mg/kg	0,30	1,00	3,00	10,00	3,40	5,80	5,70	<b>35,00</b>
Thallium	mg/kg	0,50	1,00	3,00	10,00	0,00	0,20	0,40	0,89
Zink	mg/kg	120,00	300,00	500,00	1500,00	213,60	<b>1642,00</b>	718,70	1100,00
Cyanide(ges.)	mg/kg	1,00	10,00	30,00	100,00	0,50	1,50	0,1	2,20
<b>Eluat</b>									
pH-Wert		6,5-9	6,5-9	6-12	5,5-12	7,4	7,8	7,4	7,7
el-Leitfähigkeit	µS/cm	500,00	500,00	1000,00	1500,00	299,30	648,00	500,00	840,00
Chlorid	mg/l	10,00	10,00	20,00	30,00	2,70	5,00	5,50	13,00
Sulfat	mg/l	50,00	50,00	100,00	150,00	37,70	76,00	119,90	278,00
Cyanid	µg/l	<10	10,00	50,00	100,00	12,00	14,30	10,00	20,00
Phenolindex	µg/l	<10	10,00	50,00	100,00	5,30	16,00	6,10	24,00
Arsen	µg/l	10,00	10,00	40,00	60,00	3,80	5,20	3,30	5,80
Blei	µg/l	20,00	40,00	100,00	200,00	3,30	15,40	5,20	20,00
Cadmium	µg/l	2,00	2,00	5,00	10,00	2,90	3,50	0,60	7,00
Chrom (ges.)	µg/l	15,00	30,00	75,00	150,00	10,00	26,60	3,00	50,00
Kupfer	µg/l	50,00	50,00	150,00	300,00	21,20	23,30	6,50	16,00
Nickel	µg/l	40,00	50,00	150,00	200,00	56,00	200,00	24,60	59,00
Quecksilber	µg/l	0,20	0,20	1,00	2,00	0,10	0,60	0,10	0,24
Thallium	µg/l	<1	1,00	3,00	5,00	0,90	1,40	1,00	1,00
Zink	µg/l	100,00	100,00	300,00	600,00	253,8	400,00	87,80	190,00

### 6.1.1.1 Glühverlust

Hinsichtlich der Verwertung des gewaschenen Materials stellt der Glühverlust kein Ausschlusskriterium dar. Unter Kläranlagenbetreibern wird diesem Parameter jedoch eine besondere Beachtung eingeräumt, da er bei einer Deponierung < 3 % bzw. 5 % betragen muß. Allerdings garantieren die verschiedenen Herstellerfirmen, abgesehen vom Parameter Glühverlust, keinen weiteren Parameter der LAGA Liste.

Im Rahmen von Ortsbesichtigungen wurde festgestellt, daß bei Sandwäschen ein hoher Anfall von Samenkörnern und Blättern zu Problemen führt. Bei diesen meist nur temporär auftretenden Stoffgruppen wird während eines kurzen Zeitraums der Glühverlust von 3 % nicht eingehalten. Die spezifische Dichte dieser Stoffe unterscheidet sich kaum von organischen Bestandteilen des Sandfanggutes. Allerdings wird diesen Stoffen in der Aufbereitungstechnik eine Sonderrolle zugewiesen. Sie verhalten sich wie Sande mit einer Korngröße von 1 mm. Diese werden im Zuge der Aufbereitung mit dem gewaschenen Sand ausgetragen. Eine Überschreitung des Glühverlustes von 3 % ist nach Untersuchungen des Autors oft damit zu begründen.

[SCHUBERT, 1989]

#### 6.1.1.2 Feststoff

Die Charakterisierung des Ausgangsmaterials ergibt für die Parameter PAK und Zink eine Überschreitung der Zuordnungswerte Z 2. Im Zuge der Sandaufbereitung kann anhand von Tabelle 6.1 festgestellt werden, daß kein Parameter (bezogen auf den Mittelwert) bei einer der betrachteten Anlagen die Zuordnungswerte Z 2 übersteigt. Die hervorgehobenen Meßwerte (Höchstwert) überschreiten zwar die Zuordnungswerte Z 2, sind jedoch nur auf einer einzigen Kläranlage aufgetreten. Bei der Großstadt A sind die Überschreitungen (Höchstwert) nur betriebsbedingte Ausnahmen.

#### 6.1.1.3 Eluat

Bei der Beschreibung des aufzubereitenden Materials zeigen nur Meßwerte im Rahmen der ATV-DVWK Untersuchung Überschreitungen der Zuordnungswerte Z 2. Sogar die ermittelten Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit zeigen für das aufzubereitende Material keine Überschreitungen der Zuordnungswerte Z 2.

Die Meßwerte des gewaschenen Materials bestätigten die Vermutung, daß durch die Ergebnisse der Eluatuntersuchungen keine Einschränkungen bzgl. einer Verwertung in der höchsten Einbauklasse bestehen. Eine Überschreitung des ungewaschenen Materials ist nur in dem beschriebenen Arbeitsbericht vorhanden. Deshalb werden zur Aufstellung eines Massenflusses (Kap. 6.2) für die Aufbereitung nur Feststoffparameter herangezogen.

### 6.1.2 Reinigungsleistung

Um die Reinigungsleistung von Sandwaschanlagen zu ermitteln, wird der Wirkungsgrad herangezogen (Gleichung 5.1). Die Auswertung der Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Untersuchungsparameter wird für 9 verschiedene Anlagen durchgeführt. Ebenfalls beinhaltet die Zusammenstellung Meßwerte der Großstadt A, die in Stichproben Untersuchungen von Input und Output während eines Jahres zusammenfaßt.

Tab. 6.2: Wirkungsgrad (Mittelwerte) verschiedener Sandaufbereitungsanlagen (8+1 Stück) in Abhängigkeit des Untersuchungsparameters

Nr.	Parameter	Dim.	9 Kläranlagen Wirkungsgrad
	<b>Feststoff</b>		
1	pH-Wert		+0,7
2	EOX	mg/kg	64,9%
<b>3</b>	<b>Kohlenwasserstoff</b>	<b>mg/kg</b>	<b>34,7%</b>
4	BTEX	mg/kg	72,0%
5	LHKW	mg/kg	38,8%
<b>6</b>	<b>PAK (EPA)</b>	<b>mg/kg</b>	<b>78,1%</b>
7	PCB (DIN)	mg/kg	78,9%
8	Arsen	mg/kg	14,3%
<b>9</b>	<b>Blei</b>	<b>mg/kg</b>	<b>21,2%</b>
10	Cadmium	mg/kg	29,6%
11	Chrom (ges.)	mg/kg	21,0%
<b>12</b>	<b>Kupfer</b>	<b>mg/kg</b>	<b>38,7%</b>
13	Nickel	mg/kg	13,8%
14	Quecksilber	mg/kg	33,8%
15	Thallium	mg/kg	0,0%
<b>16</b>	<b>Zink</b>	<b>mg/kg</b>	<b>25,6%</b>
17	Cyanide(ges.)	mg/kg	57,4%
	<b>Eluat</b>		
18	pH-Wert		+0,5
19	el. Leitfähigkeit	µS/cm	48,9%
20	Chlorid	mg/l	70,7%
21	Sulfat	mg/l	-23,1%
22	Cyanid	µg/l	50,0%
<b>23</b>	<b>Phenolindex</b>	<b>µg/l</b>	<b>46,3%</b>
24	Arsen	µg/l	19,7%
25	Blei	µg/l	66,9%
26	Cadmium	µg/l	3,3%
27	Chrom (ges.)	µg/l	37,0%
28	Kupfer	µg/l	34,0%
29	Nickel	µg/l	18,9%
30	Quecksilber	µg/l	63,3%
<b>31</b>	<b>Thallium</b>	<b>µg/l</b>	<b>0,0%</b>
32	Zink	µg/l	37,6%

Die Wirkungsgrade wurden aus Meßwerten der 9 Anlagen von Input und Output errechnet und sind Anhang I zu entnehmen.

Es fällt auf, daß sich die Wirkungsgrade für die Aufbereitung in einem sehr breiten Rahmen bewegen. Eine Bewertung diesbezüglich bleibt der nachfolgenden Diskussion vorbehalten. Die hervorgehobenen Parameter sind wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, für eine Verwertung nach LAGA maßgebend.

Für bestimmte Parameter sind die Nachweisgrenzen für Input wie auch Output unterschritten. Folglich sind in Tabelle 6.2 Wirkungsgrade mit Null (0,0) vorhanden.

### 6.1.3 Zwischenergebnisse

Anhand der in Kapitel 2.4 betrachteten Bindungsmechanismen sowie Reaktionsverhalten wird versucht, die beschriebenen Erkenntnisse auf Kläranlagensande zu übertragen. Ebenso sollte eine Erklärung der verschiedenen Wirkungsgrade im Zuge der Sandaufbereitung in Abhängigkeit der Parameter erarbeitet werden.

Durch eine Auswaschung von Feinanteilen sowie Organikas läßt sich aufgrund einer erhöhten Kontamination dieser Fraktion (Erläuterung siehe Kapitel 5.1.1) eine Reduktion während des Aufbereitungsprozesses leicht begründen. Schwierig ist es jedoch, eine plausible Erklärung für die unterschiedlichen Prozentzahlen je Parameter von Tabelle 6.2 zu finden.

In dieser Arbeit kann aus verschiedenen Gründen keine fundierte Ursache für die unterschiedlichen Reduktionen gegeben werden, jedoch wird versucht, einzelne Beobachtungen zu erläutern. Da die Kontaminationen der einzelnen Parameter eine unterschiedliche Größenordnung aufweisen, läßt sich ein Einfluß auf den Wirkungsgrad nur vermuten. Bei hohen Konzentrationen zeigen sich in der Regel größere Wirkungsgrade (unabhängig vom Parameter) als bei kleineren.

Sind im aufzubereitenden Material viel Feinanteile enthalten, lassen sich in der Regel auch höhere Wirkungsgrade als im Durchschnitt feststellen. Eine genaue Betrachtung der Reduktion in Abhängigkeit der Korngröße und des Glühverlustes bleibt Kapitel 6.2.2 vorbehalten.

Ebenfalls sind die chemischen Verbindungen, welche den gemessenen Parametern zugrunde liegen, nicht explizit bekannt. Daraus läßt sich ableiten, daß nicht jede Verbindung bei sonst identischen Rahmenbedingungen die gleichen Wirkungsgrade während der Aufbereitung erfährt.

Aus diesem Grund wird hier nicht weiter versucht, einen Zusammenhang zwischen dem Platz im Periodensystem der Elemente und dem Wirkungsgrad herzustellen. Alle diesbezüglich geäußerten Behauptungen wären nur spekulativ und könnten später eventuell nicht aufrechterhalten bleiben.

Jedoch bestünde hier die Möglichkeit, anhand von zusätzlichen Untersuchungen weitere Erkenntnisse während des Waschprozesses zu erlangen.

Bei einer Verwertung des aufbereiteten Materials nach LAGA ist ebenfalls der Arbeitsschutz in Betracht zu ziehen. Diesbezüglich weist eine Studie auf den Schutz des Arbeitnehmers vor bakterieller, viraler und parasitärer Belastung sowie vor Hefen- und Pilzbefall hin. Im Rahmen einer Untersuchungsreihe wurden E.coli und Salmonellen als Indikatoren für eine hygienische Belastung definiert. [BERGER, 2000]

Wird das Material vor der Aufbereitung zwischengelagert, ist es viel wahrscheinlicher, daß sich relevante Kulturen übermäßig vermehren. In dem zitierten Fall wird vor allem das Kanalgut, wie auch zeitweise Sandfanggut, mehrere Wochen zwischengelagert. Im Gegensatz dazu wurden alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Sande sofort aufbereitet. Bei den durchgeführten Analysen konnten keine Salmonellen an den gewaschenen Sanden nachgewiesen werden. Dieser Aspekt ist

bemerkenswert und auf keinen Fall zu vernachlässigen. In Zukunft sollte für jeden Einsatzfall, schon alleine wegen einer unterschiedlichen Zusammensetzung des Ausgangsmaterials, diesbezüglich eine Untersuchung stattfinden.

Beim Einsatz von Sandwaschanlagen wird durch das anfallende Waschwasser die Kläranlage rückbelastet. Eine Diskussion diesbezüglich findet in Kapitel 6.2.3 statt.

In Kapitel 6.1 wird die Reinigungsleistung in Abhängigkeit der Untersuchungsparameter nach LAGA diskutiert. Mit Hilfe von Tabelle 6.1 können die gemessenen Restbelastungen der 8 + 1 Anlagen des gewaschenen Materials entnommen werden, jedoch nicht die Anzahl der überschrittenen Parameter je Einbauklasse der LAGA (eine erlaubte Abweichung ist nicht berücksichtigt). In folgender Tabelle ist die Anzahl an Überschreitungen in Abhängigkeit der Zuordnungswerte dargestellt:

Tab. 6.3: Anzahl überschrittener Parameter (ohne erlaubte Abweichung) für Mittelwerte aus Anhang 1 für 9 untersuchte Anlagen

	Gruppe	Anzahl Parameter	Zuordnungswerte nach LAGA			
			Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Input Anhang 1	Feststoff	17	11	9	2	1
	Eluat	15	8	7	1	0
Output Anhang 1	Feststoff	17	7	3	1	<b>0</b>
	Eluat	15	4	4	0	<b>0</b>

Obige Tabelle basiert auf Mittelwerten der Auswertung von Tabelle 6.1 bzw. Anhang 1. Die fettgedruckten Meßwerte (Höchstwerte; Tabelle 6.1) der Parameter PAK und Zink im Feststoff wurden nur bei einer einzelnen Messung erreicht und sind deshalb nicht ausschlaggebend. Vielmehr zeigt obige Tabelle, daß in der Regel davon ausgegangen werden kann, daß gewaschenes Sandfanggut in Deutschland gemäß Zuordnungswerte Z 2 verwertbar ist. Zudem sei allerdings angemerkt, daß es trotzdem Sande geben kann, welche Z 2 nicht erfüllen.

Für Einbauklassen mit Zuordnungswerten < Z 2 ist der Tabelle zu entnehmen, daß nach erfolgter Aufbereitung weniger Überschreitungen auftreten. Dies gilt sowohl für die Untersuchung am Feststoff als auch am Eluat. Für die schärfer definierten Einbauklassen ist es nicht möglich, eine allgemeingültige Aussage zu treffen. Es sollte deshalb für die jeweiligen Gegebenheiten einer Kläranlage eine separate Beurteilung stattfinden.



## 6.2 Massenfluß

### 6.2.1 Prozeßprodukte - Sieblinien

#### 6.2.1.1 Abscheideleistung im Sandfang

Im folgenden wird auf das Verhalten der einzelnen Kornfraktionen der Einheit Sandfang-Sandwäsche näher eingegangen.

Die in Kapitel 2.2.2.6 dargestellten Messungen zum Rückhalt von Sanden unterschiedlicher Korngröße im Sandfang sollen anhand von weiteren Untersuchungen näher diskutiert werden. Die dazu untersuchten Prozeßprodukte sind Sandfanggut sowie Klärschlamm. Um alle Einflüsse von organischen Bestandteilen auf den Siebprozeß auszuschließen, sind die Proben vorher einer thermischen Behandlung unterzogen worden.

Die Auslegung des belüfteten Sandfanges der Kläranlage B ist nach Kapitel 2.2.2.5 ausgeführt. Bei der Bemessung wurde eine Abscheiderate von 95 % der Sande mit einem Korndurchmesser von 0,20 mm angenommen.

In der folgenden Abbildung sind Sieblinien von Sandfanggut sowie der Sandanteil des Klärschlammes als Mittelwert verschiedener Proben dargestellt:

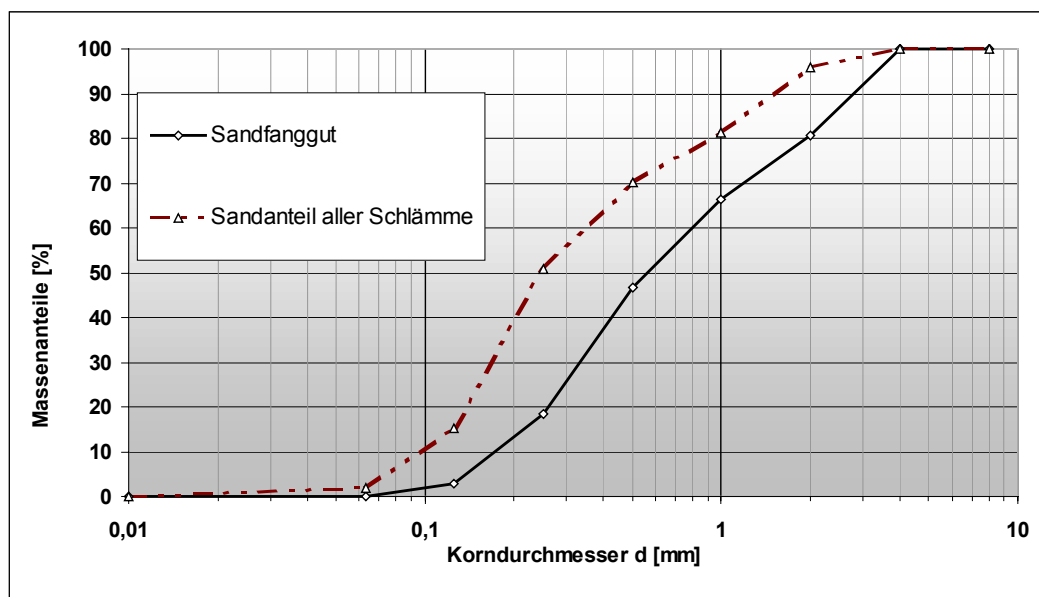


Abb. 6.1: Sieblinie von Sandfanggut und Sandanteil des Klärschlammes der Kläranlage B

Auf der Kläranlage B fallen jährlich als Summe aller Schlämme (Primär- und Sekundärschlamm) 325 t Sand sowie 514 t Sandfanggut an. Die Kornverteilung der Sande ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

Sowohl die Sieblinie von Abbildung 6.1 wie auch auf die im folgenden verwiesenen Mengenangaben von Sandfanggut und Klärschlamm wurden im Rahmen dieser Arbeit ermittelt.

Der gesamte Sandanfall der Kläranlage B wird als Summe von Sandfanggut und im Klärschlamm enthaltene Sande zu 839 t angenommen. Für den Sandfang der Kläranlage B wird in nachstehender Tabelle die **prozentuale Verteilung** für die Korndurchmesser > 0,2 mm und > 0,3 mm in **Anlehnung an Tabelle 2.4** (PATT/STEIN, 1996) aufgeführt:

Tab. 6.4: Prozentuale Verteilung in Abhängigkeit von Korngröße und Anfallort

Prozeßprodukte	Sande > 0,20 mm		Sande > 0,30 mm	
	Prozentualer Anteil > 0,20 mm	Absolutwert > 0,20 mm	Prozentualer Anteil > 0,30 mm	Absolutwert > 0,30 mm
<b>Klärschlamm</b> (325 t TS)	61 % (von 325 t)	198 t TS <b>31,2 %</b>	45 % (von 325 t)	146 t TS <b>27,7 %</b>
<b>Sandfanggut</b> (514 t TS)	85 % (von 514 t)	437 t TS <b>68,8 %</b>	74 % (von 325 t)	380 t TS <b>72,3 %</b>
	<b>Summe</b>	<b>635 t TS</b>	<b>Summe</b>	<b>526 t TS</b>

Die Sieblinien des Klärschlammes sowie Sandfanggutes sind Abbildung 6.1 zu entnehmen. Daraus ist abzulesen, daß 61 % (45 %) der im Klärschlamm enthaltenen Sande > 0,20 mm (> 0,30 mm) sind. Analog sind dies für Sandfanggut 85 % (74 %). Die aus den Prozentzahlen resultierenden Absolutwerte (Tonnen Sand) der Prozeßprodukte werden in Relation zum Gesamtsandanteil von > 0,20 mm gebracht.

Daraus ergibt sich für den Sandfang der Kläranlage B eine Abscheideleistung von nur 68,8 % (für Korngröße > 0,20 mm) und 72,3 % (für Korngröße > 0,30 mm) für die im Abwasser enthaltenen Sande.

Die für die Kläranlage B aufgestellte Betrachtung ist kein Einzelfall, sondern war auch bei zwei weiteren Anlagen im Rahmen dieser Arbeit zu beobachten. Dort liegen die Abscheideraten der Sandfänge jedoch im Schnitt ca. 5 Prozentpunkte über denen der Kläranlage B. Werden diese Werte mit Tabelle 2.4 verglichen, wird die Aussage bekräftigt, daß eine Abscheideleistung von 95 % aller Sande > 0,20 mm nicht, wie bei der Auslegung belüfteter Sandfänge zugrundegelegt, erreichbar ist.

### 6.2.1.2 Abscheideleistung von Sandwaschanlagen

In einer Sandwaschanlage werden die organischen Bestandteile vom zugeführten Material entfernt. Wie bei Sandfängen beschrieben, werden für Sandwaschanlagen ebenfalls Abscheideleistungen definiert. Dabei kann sowohl für jede Kornfraktion wie auch für die gesamte Waschanlage eine Abscheideleistung für Sande wie folgt definiert werden:

**Abscheideleistung =  $\Sigma$  Sand (Output) /  $\Sigma$  Sand (Input) x 100 [%] (Gleichung 6.1)**

Um den Anteil einzelner Fraktionen für das Aufgabegut, den gewaschenen Sand sowie den Ablauf der Wäsche darzustellen, wird nachstehende Abbildung verwendet:

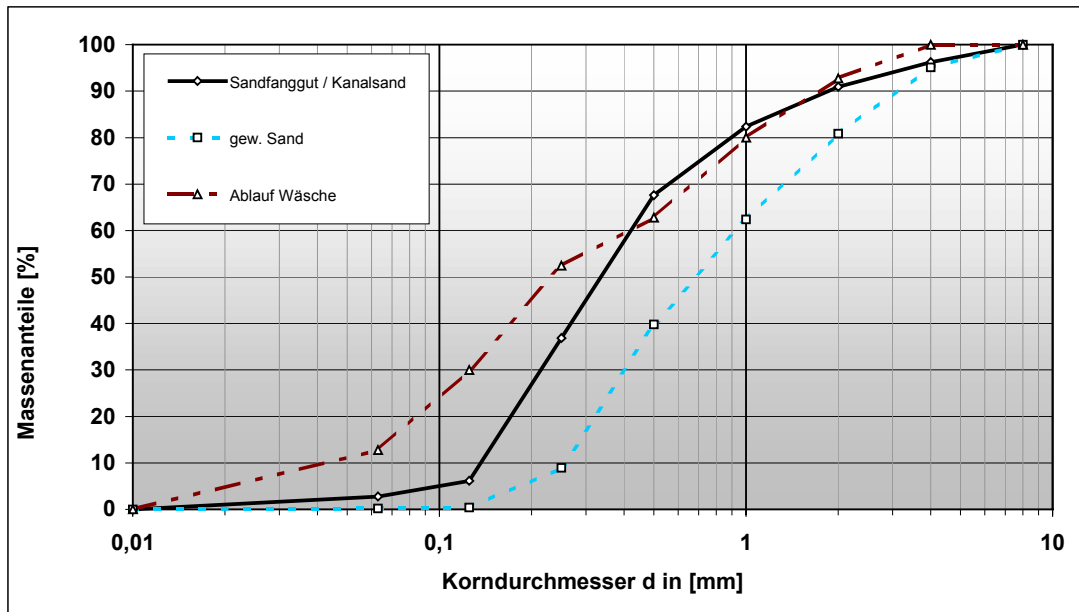


Abb. 6.2: Sieblinie von Prozeßprodukten einer Sandwaschanlage

Den Sieblinien ist zu entnehmen, daß im Aufgabegut nur ein geringer Anteil (ca. 8 %) < 0,125 mm enthalten ist, ein deutlicher Anstieg allerdings bei Körnern > 0,125 mm eintritt. Der gewaschene Sand enthält ebenfalls wenig (ca. 1 %) Feinanteile, wobei die Kurve erst im Bereich größer 0,25 mm ansteigt. Im Ablauf der Sandwaschanlage sind viel Feinsande enthalten, zudem sind auch Partikel > 1 mm nachweisbar.

Anhand des unterschiedlichen Verlaufs vom Aufgabegut zum Endprodukt im Bereich von 0,125 mm und 0,25 mm kann der Leser erkennen, daß ein Verlust des Materials stattgefunden hat. Der Verlust bedeutet ein Auswaschen von Sanden dieser Korngrößen, die sich im Ablauf der Anlage wiederfinden. Im Bereich > 0,25 mm verlaufen die Sieblinien annähernd parallel, was zeigt, daß kaum Material in diesem Kornbereich verloren geht.

Wie in obiger Abbildung exemplarisch dargestellt, wird für verschiedene Proben eine Sieblinie erstellt. Daraus wird nach Gleichung 6.1 in Anhang II die Abscheideleistung in Abhängigkeit der Kornfraktion für eine Sandaufbereitung berechnet und ist Grundlage folgender Tabelle:

Tab. 6.5: Abscheiderate von Sandwaschanlagen

Korngröße	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Durchschnitt [%]
[µm]	Abscheideleistung für Kornklasse [%]					
0-<63	1,0	4,3	4,8	1,4	1,4	2,6
63-<125	2,2	35,6	18,3	24,9	42,9	24,8
125-<250	66,3	68,6	74,6	64,8	80,2	70,9
250-<500	96,2	95,4	98,3	91,6	90,2	94,3
500-<1000	98,0	99,2	99,4	98,6	99,6	98,9
1000-<2000	100,0	100,0	99,8	100,0	100,0	99,9
> 2000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
<b>Gesamtabscheidegrad</b>	<b>89,6</b>	<b>87,9</b>	<b>93,7</b>	<b>90,8</b>	<b>96,8</b>	<b>91,8</b>

Aus der Tabelle geht deutlich hervor, daß mit zunehmender Korngröße (unabhängig von der Probe) auch eine höhere Abscheideleistung festzustellen ist. Alle Sande, die nicht abgeschieden werden sind im Waschwasser enthalten.

Zusätzlich ist in Tabelle 6.5 je Probe die Gesamtabscheideleistung für den Aufbereitungsprozeß abzulesen, welcher sich aus der Abscheideleistung je Korngröße und dem zugehörigen Massenanteil (gewichtet) errechnet.

Um den errechneten durchschnittlichen Abscheidegrad graphisch besser darzustellen, wird folgende Abbildung verwendet:

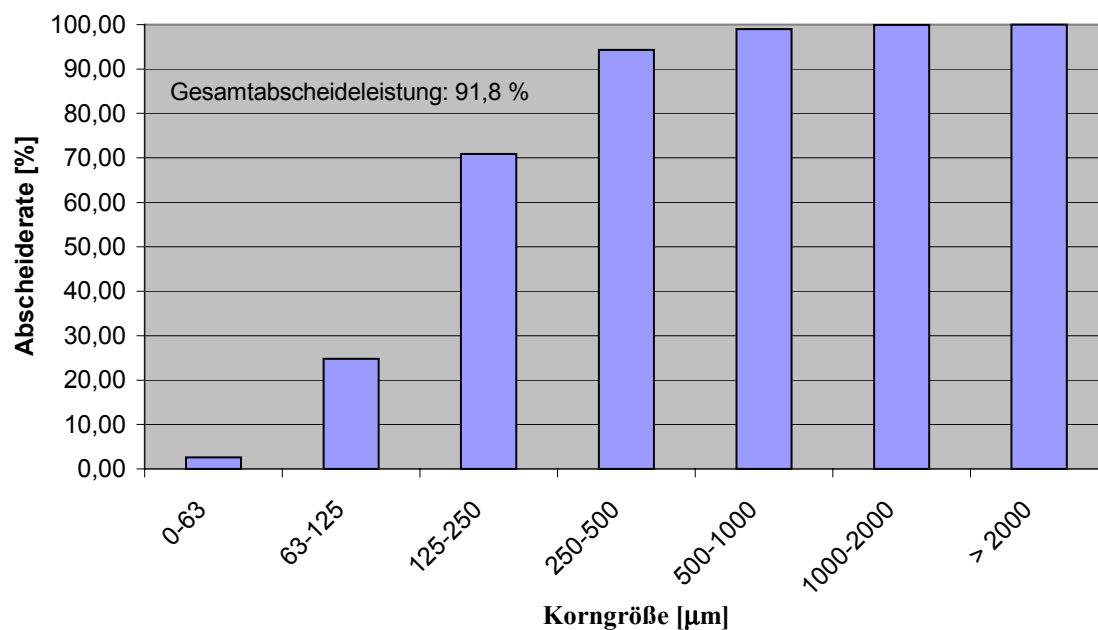


Abb. 6.3: Abscheiderate einer Sandwaschanlage in Abhängigkeit der Korngröße

Für die betrachtete Sandwaschanlage ergibt sich eine durchschnittliche Abscheideleistung aller Probetage von 91,8 %. Folglich werden ca. 8 % der aufgegebenen "Sande" ausgespült und sind im Waschwasser enthalten.

Einheitlich kann in Ergänzung zum oben betrachteten Fall für alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Anlagen festgestellt werden, daß im Zuge der Aufbereitung ein Auswaschen von Sanden eintritt. Zum einen werden Feinsande aus dem System ausgetragen und finden sich im Waschwasser wieder. Zum anderen ist Abbildung 6.2 ebenfalls zu entnehmen, daß im Waschwasser Sande > 0,5 mm enthalten sind. Folglich müßte sowohl die Wirkungsweise optimiert werden wie auch die in Kapitel 3.2 diskutierten Verfahrensmöglichkeiten bezüglich des anfallenden Waschwassers einer Sandaufbereitungsanlage Beachtung finden.

### 6.2.1.3 Anforderungen an Sandwaschanlagen auf Kläranlagen

Bei der Sandaufbereitung ist eine größtmögliche Rückgewinnung des aufzubereitenden Sandes anzustreben. Dabei müssen allerdings auch die geforderten Grenzwerte eingehalten werden. Wie bereits in Kapitel 6.2.1.2 erläutert, geht ein Teil der Sande des Aufgabegutes durch den Waschvorgang verloren, und wird mit dem Waschwasser ausgetragen.

Dabei handelt es sich um Sande, die bereits im Sandfang aus dem Abwasserstrom abgetrennt wurden und in den Sandwaschanlagen im Nebenstrom behandelt werden. Da Sandfänge die bei der Auslegung angenommenen Abscheideleistungen oft nicht erreichen (Kap. 6.2.1.1), wird die mechanische Abwasserreinigung durch Waschwässer von Sandwaschanlagen zusätzlich belastet.

Bei einem Abscheidegrad einer Sandwaschanlage von ca. 90 % - 95 % gelangen 5 % - 10 % der bereits im Sandfang abgeschiedenen Sande wieder ins Waschwasser. Hierbei werden ausschließlich Sande betrachtet, da nur geglähte Proben betrachtet werden, um eine Verfälschung durch organische Bestandteile auszuschließen. Die im Waschwasser enthaltenen Sandmengen sind nicht zu vernachlässigen, weshalb die in Kapitel 3.2 vorgestellten Möglichkeiten der Waschwasserbehandlung näher diskutiert werden.

Bei einer Waschwasserrückführung in den Zulauf des Sandfanges ist eine Aufkonzentrierung unvermeidbar. Zwar wird ein geringer Feinsandanteil in einer Sandwaschanlage abgeschieden (siehe Abbildung 6.3), jedoch ist ein mehrmaliges Durchlaufen zur Gewinnung feiner Sande notwendig. Dieser geschilderte Prozeß hat nicht nur einen erhöhten Verschleiß aller beteiligter maschinellen Einrichtungen zur Folge, sondern kann in Regenfällen unter Umständen den Sandfang überlasten. Der einzige Vorteil liegt in der größtmöglichen Gewinnung von Feinsanden des aufzubereitenden Materials.

Ebenfalls wird auf einigen Kläranlagen das Waschwasser der Sandwaschanlage direkt in den Ablauf des Sandfanges geleitet. Die oben angeführten Zahlen zeigen unmißverständlich, daß dies zu einem verstärkten Sandeintrag in die nachfolgenden Behandlungsstufen führt. Die daraus resultierenden Folgen sind, wie bereits in Kapitel 2.1 für alle an der Abwasserreinigung beteiligten Aggregate, nicht unerheblich. Diese Verfahrensvariante bietet bei ihrer Anwendung viele Risiken und sollte vor einer Realisierung genau überprüft werden.

Sollen aus dem Waschwasser alle Sande und Organikas entfernt werden, kann eine "Organikabtrennung" vor der Rückführung des Waschwassers in den Abwasserstrom Verwendung finden. Ein Trommel- oder Schwerkraftsieb eliminiert dabei alle Inhaltsstoffe  $\geq 0,1$  mm des Waschwassers. Das verbleibende Waschwasser enthält nur noch eine geringe Feststoffkonzentration, was eine Rückführung sowohl in den Zu- oder Ablauf eines Sandfanges offen läßt.

Speziell in den letzten Jahren ist auf kommunalen Kläranlagen zu beobachten, daß vermehrt Kanalsand aus dem Einzugsgebiet aufbereitet wird. Entweder werden zu den vorhandenen Wascheinheiten für Sandfanggut nachträglich Annahmestationen für Kanalsand installiert oder im Zuge einer Neuaustrüstung diese eingeplant.

Die Kanalspülgutmenge ist von vielen Faktoren abhängig, wobei für folgende Überlegung von ca. 50 % des Sandfanggutes ausgegangen wird. Durch die zusätzliche Aufbereitung von Kanalspülgut fällt wie bei der Sandwäsche ebenfalls Washwasser mit den bekannten Inhaltsstoffen an.

Folglich wird auf einer Kläranlage mit Kanalgutaufbereitung ungefähr 50 Prozent mehr Washwasser produziert. Aufgrund dessen bekommt die Washwasserbehandlung einen noch größeren Stellenwert. Der Autor schlägt aus diesem Grund vor, den Ablauf der Aufbereitungsanlage auf keinen Fall unbehandelt in den Ablauf des Sandfanges zu geben. Die Auswirkungen einer Einleitung in den Zulauf des Sandfanges und eine daraus vermehrte Kreislaufführung ist mit dem Nutzen der zusätzlichen Sandgewinnung kritisch abzuwägen. Der zur Zeit sicherste Weg stellt der Einsatz einer Organikabtrennung und einer anschließenden Rückführung in den Zulauf des Sandfanges dar.

## 6.2.2 Untersuchungsparameter

In Kapitel 6.1 wird detailliert die Schadstoffreduktion der Untersuchungsparameter beschrieben. In Ergänzung dazu wird in diesem Kapitel explizit auf Vorgänge in Abhängigkeit der Korngröße eingegangen.

Zu diesem Punkt wird eine Siebung durchgeführt und die Schadstoffbelastung für Input sowie Output respektive der verschiedenen Korngrößen ermittelt. Die Berechnung der Reduktion je Fraktion erfolgt nach Gleichung 5.1. Um eventuell einen Zusammenhang zwischen der Schadstoffreduktion und des Glühverlustes des Ausgangsmaterials herzustellen, wird dieser zusätzlich über die Korngröße in Abbildung 6.4 aufgetragen.

Da Zink einer der kritischeren Parameter bei der Verwertung anzusehen ist, wird dieses als Grundlage für Abbildung 6.4 herangezogen:

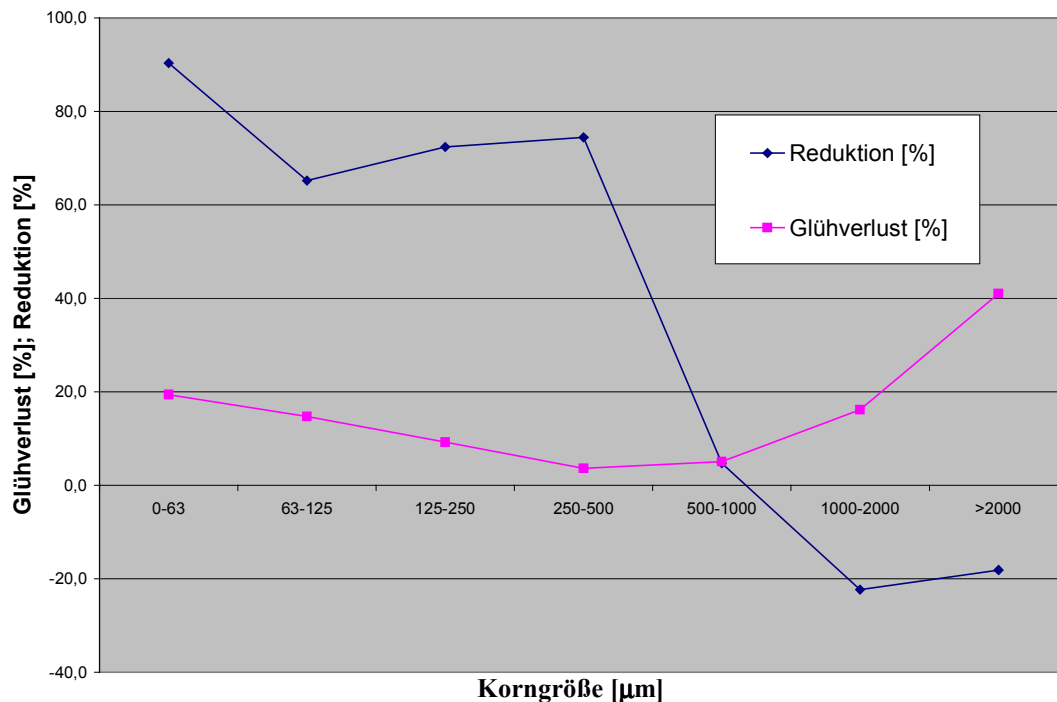


Abb. 6.4: Reduktion von Zink in Abhängigkeit der Korngröße und des Glühverlustes (Ausgangsmaterial)

Obige Abbildung zeigt auf der Abszisse die Kornklasse, auf der Ordinate ist die Reduktion aufgetragen. Ebenfalls stellt sie den gemessenen Glühverlust des Ausgangsmaterials in Abhängigkeit der Korngröße dar.

Der Glühverlust beträgt bei einer Korngröße < 63 µm 20 %, nimmt bis auf 3,6 % ab und steigt wieder bis auf 40 % bei einer Korngröße von > 2 mm an.

Aus der Abbildung soll hervorgehen, daß vor allem im Kornbereich < 0,5 mm eine erhebliche Schadstoffabreicherung von 70 % - 90 % stattgefunden hat. Der Glühverlust betrug in jeder Fraktion des gewaschenen Sandes < 3 %. Die erhebliche Abnahme der Zinkbelastung läßt sich durch zwei Hauptursachen begründen. Da im

Feinkornbereich eine wesentlich geringere Abscheideleistung nachgewiesen wurde (siehe hierzu auch Abbildung 6.3), erfolgt ein Austrag der Feinsande mit dem Waschwasser. Ebenfalls wirkt sich der höhere Glühverlust der Feinsande positiv auf die Schadstoffreduktion aus. Wie bereits mehrmals angesprochen, sind sowohl organische wie auch anorganische Schadstoffe vermehrt an organischen Partikeln gebunden.

Im Bereich  $> 0,5$  mm kann für alle Sandwaschanlagen eine Abscheideleistung von  $> 95$  % zugrunde gelegt werden. Folglich ist hierbei eine geringere Reduktion festzustellen. Der niedrige Glühverlust im Aufgabegut unterstützt ebenfalls die Beobachtung.

Schwieriger ist jedoch die negative Reduktion (= Zunahme) zu erklären. Bei Sanden  $> 1$  mm ist eine höhere massenbezogene Beladung als im Aufgabegut festzustellen. Da ein Einfluß von organischen Bestandteilen im Aufgabegut betrachtet wird, erfolgt die Siebung unter Zugabe von Wasser. Folglich kann eine Verklumpung im Aufgabegut bis zu einer Partikelgröße von 1 mm vermieden werden. Bei Körnern mit einem größeren Durchmesser ist dies nicht mehr möglich. Die beschriebenen Probleme treten bei der Siebung des gewaschenen Sandes nicht auf. Durch eine nicht exakte Sieblinie des Ausgangsmaterials (Klumpen) läßt sich die geringe Schadstoffzunahme in diesem Bereich erklären.

Nicht nur für Zink, sondern auch für organische und anorganische Untersuchungsparameter kann eine höhere Schadstoffreduktion bei kleinen Korngrößen festgestellt werden. Folglich wird davon ausgegangen, daß neben der Feinsandelimitation auch die Reduzierung des organischen Anteils zum oben beschriebenen Sachverhalt beiträgt.

Aus Abbildung 6.4 kann die Schadstoffreduktion entnommen werden, jedoch ist es nicht möglich für die dargestellten Werte einen Plausibilitätscheck durchzuführen. Aus diesem Grund wird versucht, einen gemessenen Wert durch verschiedene Einzelmessungen nachzurechnen.

Die gemessene Gesamtkontamination einer Probe muß mit der Summe der Einzelaktionen übereinstimmen:

$$\text{Gesamtprobe [mg/Kg]} = \Sigma (\text{Fraktion } i \text{ [%]}/100 \times \text{Belastung } i \text{ [mg/Kg]}) \quad \text{Gleichung 6.2)}$$

Ebenfalls ist es möglich, die Belastung des Aufgabegutes aus folgenden Größen herzuleiten:

$$\begin{aligned} \text{Au} &= \text{Aufgabegut} \\ \text{gS} &= \text{gewaschener Sand} = \Sigma (\text{Fraktion } i \text{ [%]}/100 \times \text{Belastung } i \text{ [mg/Kg]}) \\ \text{O} &= \text{Organik} = \Sigma (\text{Fraktion } i \text{ [%]}/100 \times \text{Belastung } i \text{ [mg/Kg]}) \\ \text{GV}_A &= \text{Glühverlust Aufgabegut [%]}/100 \end{aligned}$$

$$\text{Au} = (1 - \text{GV}_A) \text{gS} + \text{GV}_A \times \text{O} \quad \text{(Gleichung 6.3)}$$

Wird aus dem Waschwasser die Organik abgetrennt, zeigen Untersuchungen, daß die Restbelastung des Trübwassers im Vergleich zur abgetrennten Organik ver-



nachlässigbar ist. Ist keine Organikabtrennung vorhanden, wird die Belastung des Waschwassers repräsentativ für die Organik ermittelt.

Die Auswertung nach Gleichung 6.2 und 6.3 ergibt für Kläranlagensande der Städte G und H folgende Tabelle:

Tab. 6.6: Auswertung nach Gleichung 6.2/ 6.3; Anhang III & IV

Klär-anlage	Parameter	Au aus Einzelwert [mg/kg]	Au aus Summenwert [mg/kg]	$Au = (1-GV_A) gS + GV_{AxO}$ [mg/kg]
Stadt G	Zn	537	537	464
	Pb	154	166	186
	PAK	14,3	13,1	17,5
Stadt H	Zn	423	482	409
	Cu	212	226	186

In Tabelle 6.6 sind für die Kontaminationen des Ausgangsmaterials drei verschiedene Bestimmungsarten dargestellt. Spalte drei (Au aus Einzelwert) ist die gemessene Belastung (eine Messung) des Aufgabegutes für die aufgeführten Parameter zu entnehmen. In Spalte vier (Au aus Summenwert) sind die nach Gleichung 6.2 errechneten Belastungen aufgeführt. Ein Vergleich beider Spalten zeigt, daß die Gesamtbelastung aus den Teilbelastungen je Fraktion errechnet werden kann.

Die errechnete Ausgangsbelastung der rechten Spalte ( $Au = (1-GV_A) gS + GV_{AxO}$ ) erfolgte anhand Gleichung 6.3. Grundlage dafür sind der Glühverlust im Aufgabegut, sowie die Kontaminationen der Teilfraktionen des gewaschenen Sandes und der im Waschwasser enthaltenen Organik.

Werden die Werte aller drei beschriebenen Spalten miteinander verglichen, fällt schnell auf, daß alle Ergebnissabweichungen in einem Bereich von 10 % - 20 % liegen. Zudem ist es möglich, anhand von Meßwerten des Outputs die Kontamination des Aufgabegutes zu bestimmen. Aufgrund der immer vorhandenen Schwierigkeiten ein homogenes Gemisch herzustellen sowie eine repräsentative Sieblinie zu erhalten, ist es um so überraschender, eine Abweichung von 20 % nicht zu überschreiten.

### 6.2.3 Ergebnisse

Die Abscheiderate für Sandfänge wird mit 95 % bei einem Korndurchmesser von 0,20 mm für Maximalbelastung definiert (siehe hierzu auch Kapitel 2.2.2). Im Gegensatz zum Auslegungswert zeigten von PATT und STEIN (1996) durchgeführte Versuche im Rahmen von Optimierungsmaßnahmen von belüfteten Sandfängen bereits wesentlich geringere Abscheideleistungen.

In folgender Tabelle sind die für eine Auslegung einzuhaltenden Abscheidegrade den Ergebnissen von PATT/STEIN (1996) sowie HITZLER (2000) gegenübergestellt:

Tab. 6.7: Abscheideraten für Sandfänge

	Abscheiderate im belüfteten Sandfang für	
	0,20 mm	> 0,30 mm
Korngröße	0,20 mm	> 0,30 mm
Auslegungsgröße	95,0 %	> 95,0 %
PATT/STEIN	85,0 %	> 95,0 %
HITZLER	74,3 %	> 77,8 %

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß der tatsächliche Rückhalt in Sandfängen, durch vor Ort Untersuchungen ermittelt, bei weitem nicht den Auslegungswerten entspricht. Die Ergebnisse von PATT/STEIN wurden anhand von Stichproben an unterschiedlichen Sandfängen ermittelt. Basis für die Abscheideleistungen nach HITZLER waren die auf verschiedenen Kläranlagen ermittelten Sandmengen im Sandfanggut sowie Klärschlamm. Daraus konnten die oben dargestellten Werte berechnet werden. Die nochmals geringeren Abscheideleistungen im Vergleich zu PATT/STEIN sind dadurch erklärbar.

Die aufgestellte Behauptung, daß ein erheblicher Teil des im Abwasser enthaltenen Sandes nicht in der mechanischen Abwasserreinigung zurückgehalten wird, kann auch aus Abbildung 6.1 deutlich abgelesen werden. Diese zeigt im Klärschlamm einen erheblichen Sandanteil im Kornbereich > 0,30 mm. Da, nach Erfahrungen des Autors, in Klärschlämmen ein Sandanteil von bis zu 20 % - 30 % neben der Organik enthalten ist, sind die dort anfallenden Massen auf keinen Fall vernachlässigbar.

Aus den oben angeführten Gründen kann zusammenfassend festgestellt werden, daß

- im Feinkornbereich von ca. 0,10 mm bis 0,25 mm Sandwaschanlagen Material mit dem Waschwasser austragen;
- erst > 0,25 mm von Input respektive Output kaum Verluste auftreten;
- im anfallenden Klärschlamm Sande bis zu einer Korngröße von 2 mm enthalten sind.

Anhand der in diesem Kapitel geschilderten Funktionsweisen der Einheit Sandfang-Sandwäsche, werden folgende Verbesserungen für deren Einsatz vorgeschlagen:

- Reduzierung der Verluste im Feinkornbereich bei Sandwäschen bzw. Austrag mit dem gewaschenen Sand,
- Verbesserung des Wirkungsgrades von Sandfängen,
- bei externer Annahme von Kanalsanden und deren Aufbereitung ist Vorsicht geboten, da eine Eintragung von Feinsanden in die folgenden Stufen der Abwasserbehandlung möglich ist (Kap. 6.2.1.3).

Die zur Zeit eingesetzten Verfahren der Sandaufbereitung weisen noch hohe mineralische Anteile im Waschwasser auf. Neben den in Kapitel 6.2.1.3 diskutierten Möglichkeiten der Waschwasserrückführung, bietet der Einsatz einer Siebtrommel eine einfache Möglichkeit die organischen und mineralischen Bestandteile aus dem Waschwasser zu entfernen. Dazu wird das anfallende Waschwasser dieser zugeführt und alle enthaltenen Bestandteile > 0,10 mm werden eliminiert. Eine solche Anordnung kann Abbildung 3.1 entnommen werden. Ebenfalls ist der Einsatz eines Schwerkraftsiebes denkbar.

Die ebenfalls abgetrennten organischen Bestandteile können unter diesen Umständen nicht mehr in der Biologie als Nährstoff herangezogen werden. Ein Schutz der Folgestufen einer Kläranlage ist jedoch aus der Sicht des Autors höher einzustufen. Möglichkeiten sowohl die Organik als Nährstoff zu nutzen und trotzdem die Feinsande aus dem Waschwasser zu eliminieren wird durch den Einsatz von Hydrozyklonen in Kapitel 6.3.2 näher erläutert.

Für die oben beschriebenen Varianten der Waschwasserrückführung (ohne Organikabtrennung) wird im folgenden für die Parameter Blei, Kupfer und Zink eine genauere Betrachtung durchgeführt. Die in Tabelle 6.8 aufgeführten Rückbelastungen werden wie folgt definiert:

$$R = S/A \times 100 \text{ [\%]} \quad \text{(Gleichung 6.4)}$$

mit R = Rückbelastung [%]

mit S = im Waschwasser enthaltene Tagesfracht bei Waschbetrieb

mit A = im Rohabwasser enthaltene Tagesfracht (Zulauf Sandfang)

In folgender Tabelle wird die im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Rückbelastung mit Angaben von SCHÄFER/HOFFMANN (1998) bei verschiedenen Betriebszuständen miteinander verglichen:

Tab. 6.8: Rückbelastung der Kläranlage durch eingeleitetes Waschwasser (jeweils ohne Kanalsand)

Parameter	Waschwasser inkl. Organik		
	Pb	Cu	Zn
Großstadt A	2,6 %	1,1 %	2,1 %
Stadt H	2,3 %	1,4 %	1,9 %
SCHÄFER/ HOFFMANN STADT E	6,1 %	3,3 %	-

Obige Tabelle zeigt die Rückbelastung der betrachteten Kläranlagen durch das während der Aufbereitung anfallende Waschwasser (= Trübwasser bei Klassierern), welches im Vergleich zu herkömmlichen Klassierern die bei der Aufbereitung abgetrennte Organik enthält. Die Prozentwerte (Gleichung 6.4) beziehen sich jeweils auf mittlere Tagesfrachten, sowohl für den Zulauf, wie auch für das Waschwasser.

Durch eine Waschwasserrückführung in den Abwasserstrom ergeben sich die in Tabelle 6.8 aufgeführten Rückbelastungen. Die relativ hohen Prozentsätze von SCHÄFER/HOFFMANN (1998) für Kupfer und Blei können für die Großstadt A sowie Stadt H nicht bestätigt werden, jedoch zeigt sich die gleiche Tendenz, daß durch Blei eine höhere Rückbelastung als durch Kupfer stattfindet.

Eine Erklärung für die hohen Werte von SCHÄFER/HOFFMANN kann nur in der Waschwasserrückführung gesucht werden. Der Ablauf der Sandwäsche von Stadt H wird ohne Organikabtrennung in den Zulauf des Sandfanges gegeben. Vor einer Rückführung des Waschwassers in den Abwasserstrom wird bei der Aufbereitungsanlage der Großstadt A und Stadt H die Organik entfernt. Folglich kann davon ausgegangen werden, daß eine Aufkonzentrierung der organischen Bestandteile im Sandfang der Stadt E stattfindet. Für die beiden anderen Städte ist dies nicht der Fall. Deshalb ist auch im Waschwasser von einem erhöhten Organikgehalt auszugehen, welcher die Werte von SCHÄFER/ HOFFMANN erklären würde.

Neben den in Tabelle 6.8 dargestellten Rückbelastungen durch Schwermetalle ist die CSB-Konzentration des anfallenden Waschwassers für die Großstadt A sowie Stadt H untersucht worden. Die gemessenen Konzentrationen bewegen sich im Bereich von 5 000 bis 7 000 mg O<sub>2</sub>/l. Im Waschwasser sind ca. 5 % - 10 % Feststoff enthalten, der einen CSB-Gehalt von 600 - 900 mg O<sub>2</sub>/g TS aufweist. Wird die CSB-Fracht wiederum mit dem Zulauf verglichen, ergibt sich eine Rückbelastung von ca. 1,5 %- 2 %.

## 6.3 Optimierung von Sandwaschanlagen

### 6.3.1 Attrition

In einigen Einsatzfällen können durch den alleinigen Einsatz von Sandwaschanlagen die von der LAGA geforderten Grenzwerte nicht eingehalten werden. Wie bereits in Kapitel 2.4.3 sowie 5.2.1.1 beschrieben, kann an die Aufstrombehandlung eine Attrition nachgeschaltet werden.

Den Herstellerfirmen liegen Erfahrungswerte für den Einsatz von Attritionszellen vor, wobei diese als grobe Richtwerte anzusehen sind. Je nach Einsatzfall und Randbedingungen sind diese zusätzlich nach Erfahrungen des auslegenden Ingenieurs zu modifizieren. Gegebenenfalls sind zusätzlich Laborversuche durchzuführen, um die Auslegungsdaten an die neuen Bedingungen anzupassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt, sowie diese Daten mit Ergebnissen der HANS HUBER AG (BRANNER, 2001) verglichen. In folgendem Diagramm sind diese Werte zusammengefaßt dargestellt:

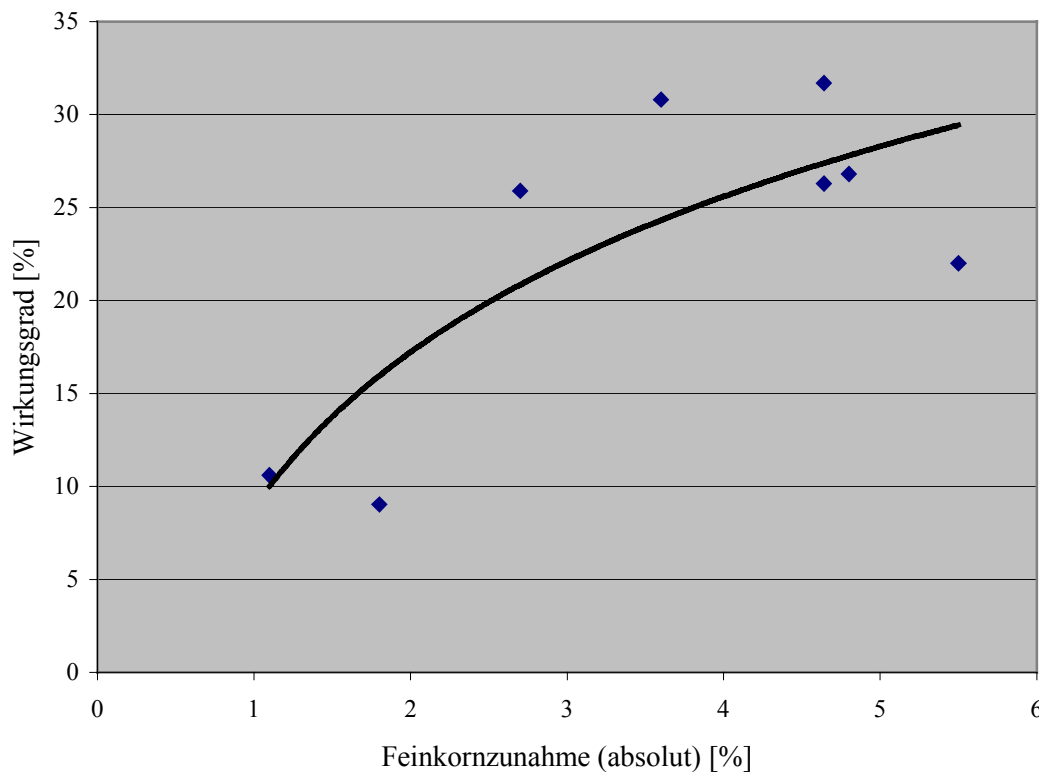


Abb. 6.5: Schadstoffreduktion (Zn, Cu, Pb, KW) bei Attrition [BRANNER, HITZLER, u. a., 2001]

In obiger Abbildung sind die resultierenden Wirkungsgrade, infolge einer Attrition der Feinkornzunahme gegenübergestellt. Die Wirkungsgrade sind für Zink, Kupfer, Blei und Kohlenwasserstoffe ermittelt worden. Dabei waren keine Unterschiede in Abhängigkeit des Parameters festzustellen. Als Bezugsgröße wird, wie in Kapitel 5.2.1.1 definiert, die absolute Zunahme aller Feinsande mit einer Korngröße von  $< 0,125$  mm herangezogen. Damit ist es möglich, für verschiedene Faktoren, die den Wirkungsgrad beeinflussen, eine Bezugsgröße zu definieren (vgl. 5.2.2.1).

Als Grundlage für die einzelnen Wertepaare werden die Parameter Blei, Kupfer, Zink, KWs und PAKs im Feststoff herangezogen, die, wie für die Sandaufbereitung bereits beschrieben, als Indikatoren verwendbar sind. Die Kontamination vor der Aufbereitung beträgt zwischen 100 und 1 000 mg/kg TS.

Aus Abbildung 6.5 ist eine Streuung der Wertepaare zu erkennen, obwohl die Faktoren, welche den Wirkungsgrad beeinflussen, sich gemäß Definition auf die Feinkornzunahme beschränken. Daraus wird bereits ersichtlich, wie schwierig es ist, einen exakten Wirkungsgrad für eine Attrition vorab zu bestimmen. Aus diesem Grund ist in Abbildung 6.5 zusätzlich eine logarithmische Trendkurve dargestellt, um eine gewisse Tendenz darzustellen.

Diese Trendkurve ist bewußt nicht bis zum Nullpunkt verlängert, da es nicht sinnvoll erscheint, für diesen Bereich eine Attrition zu betreiben.

Soll für einen konkreten Einsatzfall eine Attrition ausgelegt werden, schlägt der Autor folgende Rahmenbedingungen vor:

- Aufenthaltszeit Attritionszelle: ca. 20 Minuten
- Trockensubstanzgehalt (Zelle): ca. 70 % – 75 %
- Drehzahl Rührwerke: ca. 1 000 Umdrehungen/ Minute
- Anzahl Rührkaskaden: z. B. 2

Aus diesem Betriebszustand resultieren die meisten Wertepaare von Abbildung 6.5, wovon die meisten eine absolute Feinkornzunahme von 4,5 % bis 5 % zur Folge haben.

Liegt im Ausgangsmaterial (vor Attrition) eine höhere Belastung als für obiges Material beschrieben vor, kann von einem gesteigerten Wirkungsgrad ausgegangen werden. In diesem Fall ist es sinnvoll, einen Laborversuch durchzuführen und die Ergebnisse mit denen von Tabelle 6.5 zu vergleichen. Gleiches wird ebenfalls empfohlen, wenn für neue oder unbekannte Einsatzfälle Garantiewerte abzugeben sind.

### 6.3.2 Hydrozyklontechnik

Das bei der Sandwäsche anfallende Waschwasser enthält neben allen abgetrennten organischen Bestandteilen auch Feinsande, die mit einem Hydrozyklon zurückgewonnen werden können (Kapitel 5.2.1.2; Verfahrensfliessbild siehe Abb.5.4).

Die Kornverteilung des Zyklon Unterlaufs in Relation zum gewaschenem Sand gibt Aufschluß über die Kornverteilung der abgetrennten Sande.

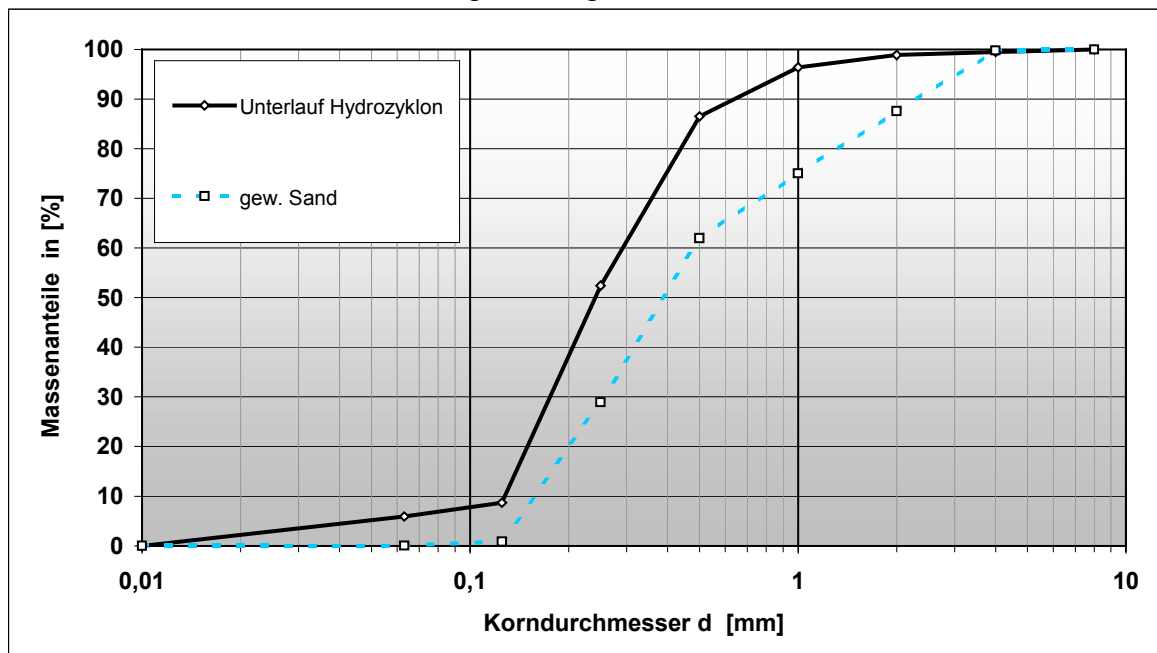


Abb. 6.6: Sieblinie von gewaschenem Sand und Zyklon Unterlauf

Der hier verwendete Zyklon wird mit einem Druck von 1,5 - 2,0 bar anstelle von 0,5 – 0,7 bar beschickt. Bei der Verwendung dieser Hochdruckzyklone können Feinsande bis zu 30  $\mu\text{m}$  abgeschieden werden, jedoch wird im Unterlauf nur ein Feststoffanteil von ca. 40 % (normaler Hydrozyklon 60 - 70 %) erreicht. Wird diese Technik eingesetzt, sollte eine ausreichende Entwässerung sichergestellt sein. Der Glühverlust im Überlauf beträgt ca. 95 %, wobei im Unterlauf ca. 6 % erreicht werden. Der geringe mineralische Anteil im Überlauf zeigt zudem die Wirksamkeit dieser Methode.

Aus Tabelle 6.5 ist eine durchschnittliche Abscheideleistung der Sandaufbereitungsanlagen von ca. 92 % ablesbar. Folglich gehen ca. 8 % des Ausgangsmaterial zuerst verloren und sind im Waschwasser enthalten, können jedoch mit Hilfe eines Hydrozyklons später noch zurückgewonnen werden.

Folgende Tabelle stellt in Abhängigkeit der Korngröße die Wirkungsweise eines Hydrozyklons dar. Dabei wird die im Waschwasser enthaltene Sandmenge zu 100 % angenommen (Daten & Rechenweg: Anhang V):

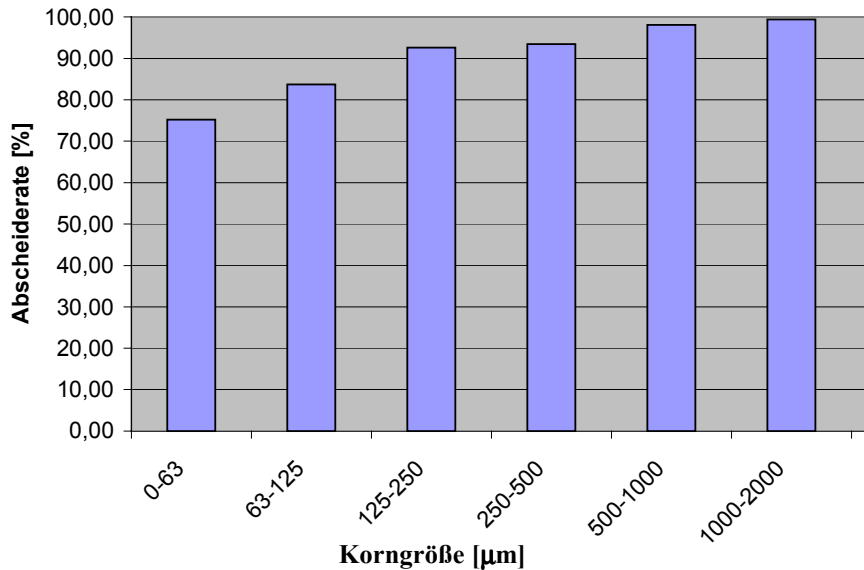


Abb. 6.7: Abscheiderate eines Hydrozyklons zur Feinsandrückgewinnung aus Waschwässern

Obige Abbildung zeigt, welchen Stellenwert die zusätzliche Rückgewinnung einnehmen kann. Vor allem ist es dadurch möglich, die Abscheiderate von Sandwaschanlagen zu erhöhen, wobei für obiges Beispiel der Gesamtabscheidegrad einer Sandwaschanlage erheblich (> ca. 97 %) gesteigert werden konnte.

Ein Problem kann sich durch den Glühverlust im Unterlauf des Zyklons ergeben. Der zusätzlich gewonnene Feinsand erreicht für sich alleine betrachtet nicht einen Glühverlust von <3 %. Im vorliegenden Fall beträgt der gemessene Glühverlust im Unterlauf 6 %, wobei im Überlauf ca. 95 % erreicht werden.

Der organische Anteil des aufzubereitenden Materials beträgt häufig ca. 30 % und findet sich nach dem Waschprozess in der Organikfraktion wieder. Davon beträgt der mineralische Anteil, welcher zurückgewonnen werden kann, in der Regel 20 - 40 %. Folglich werden durch den Einsatz eines Hydrozyklons ca. 5 - 8 % Feinsande zusätzlich vom Aufgabegut aufbereitet.

Der Anteil des in der ersten Waschstufe anfallenden Sandes (gewaschen) beträgt ungefähr 50 % des Ausgangsmaterials, bei einem Glühverlust von ca. 2 %. Obwohl der gewonnene Feinsand einen organischen Anteil von ca. 6 % enthält, ist es in der Regel möglich, einen Gesamtglühverlust ( $GV_{\text{gesamt}}$ ) von 3 % einzuhalten.

$$GV_{\text{gesamt}} = (GV_{\text{gew. Sand}} * \text{Masse} + GV_{\text{Feinsand}} * \text{Masse}) / (\Sigma \text{Masse}) = 2,7\%$$

Der Verlauf der beiden Sieblinien (Abb. 6.6) zeigt vor allem den Gewinn an Feinsandanteilen < 0,125 mm, der ohne den Einsatz dieser Methode bei der Sandwäsche verloren geht. Darüber hinaus werden auch Sande > 0,125 mm zurückgewonnen, die im Zuge der Aufbereitung sonst mit dem Waschwasser ausgetragen werden.

Der Überlauf des Hydrozyklons kann ohne Bedenken in den Ablauf des Sandfanges eingeleitet werden, um die Organik in Zuge der folgenden Abwasserbehandlung als Nährstoff zu nutzen.



## 6.4 Vorhersage der Restbelastung infolge Sandaufbereitung

### 6.4.1 Ausgangssituation

Vor der Investition einer neuen Sandwaschanlage wird in den letzten Jahren vermehrt auf die Verwertung des aufzubereitenden Sandes geachtet. Dafür können die in Kapitel 6.1 und 6.2 erarbeiteten Grundlagen herangezogen werden.

Es fällt auf, daß sich Kläranlagenbetreiber vor einer Investition über Verwertungsmöglichkeiten in ihrer Region informieren. Um den Transportweg für das aufbereitete Material zu minimieren, empfiehlt sich die Verwertung im näheren Umkreis. Eine Verwertungsmöglichkeit stellt die Verwendung in der Betonindustrie oder im Landschaftsbau dar, welche in vielen Städten gegeben ist. Sind die Einsatzgebiete definiert, können die einzuhaltenden Grenzwerte anhand der Einbauklassen (LAGA) ermittelt werden.

Vor diesem Hintergrund verlangen die Betreiber (Entsorger und Kommunen) von derartigen Sandwaschanlagen seit kurzem von den Herstellerfirmen Garantiewerte über die Maximalbelastung des gewaschenen Sandes, um eine Verwertung über einen langfristigen Zeitraum sicherzustellen. Den Firmen werden für die Ermittlung von Garantiewerten in der Regel Analysewerte von unbehandeltem Sandfanggut zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus können auf Verlangen auch Untersuchungsergebnisse von Klärschlamm und Rohabwasser eingesehen werden.

Zusätzlich wird den Firmen in den meisten Fällen gestattet, eine Versuchsanlage zu betreiben, was jedoch aus zeitlichen Gründen oft nicht möglich ist. Vielmehr versucht jeder Hersteller die zu erwartenden Restbelastungen aus den bekannten Informationen abzuschätzen.

### 6.4.2 Wirkungsgrade - Leitparameter

Die einfachste und genaueste Möglichkeit die Restbelastung des aufbereiteten Materials zu bestimmen, stellt die Verwendung der in Tabelle 6.2 aufgeführten Wirkungsgrade dar. Die errechneten Restbelastungen auf Grundlage der Ausgangsbelastung und den Wirkungsgraden (Tabelle 6.2) einer Sandaufbereitung, sind eine gute Möglichkeit, um Garantiewerte abzugeben. Je nach Risikobereitschaft ist die Höhe eines Sicherheitszuschlages zu bemessen.

Ergänzend ist es jeder Herstellerfirma freigestellt, zusätzliche Referenzwäschen im Labor durchzuführen, um eine größere Aussagekraft zu erreichen.

In einigen Fällen sind nicht für alle Untersuchungsparameter der LAGA die Ausgangsbelastungen des Sandfanggutes bekannt. Folglich können nur schwer Garantiewerte für jeden einzelnen Parameter abgegeben werden. Nachfolgend wird eine Möglichkeit beschrieben, trotzdem für das aufbereitete Material die Einbauklasse zu bestimmen.

Diesbezüglich werden wiederum die Erkenntnisse von Kapitel 6.1 herangezogen. Darin zeigt sich, daß für eine Verwertung nach LAGA Blei, Kupfer, Zink, PAKs und KWs im Feststoff als kritische Parameter beschrieben wurden. Anhand dieser Gruppe von Parametern (**Leitparameter**) soll es möglich sein, repräsentativ für das Gesamtmaterial die Einbauklasse festzulegen.

Wird eine Abschätzung der Restbelastung mit Hilfe der "Leitparameter" vorgenommen, wird für diese (Blei, Kupfer, Zink, PAKs) ebenfalls die Endbelastung, wie oben bereits beschrieben, bestimmt. Mit diesen Werten kann somit die Einbauklasse festgelegt werden. Bei dieser Methode ist allerdings zu beachten, daß die Ergebnisse gegebenenfalls durch eine Referenzwäsche im Labor zu überprüfen sind.

### **6.4.3 Rohabwasser – Sandfanggut - Klärschlamm**

#### *6.4.3.1 Abhängigkeiten*

Das in Kapitel 6.4.2 vorgestellten Verfahren ermöglicht recht genaue Vorhersagen, um die Restkontamination für einen neuen Einsatzfall vorab zu ermitteln. Die auf diese Weise gewonnenen Daten können durchaus als Garantiewerte herangezogen werden.

Sind Analysewerte des Sandfanggutes nicht vorhanden, wird im folgenden eine weitere Möglichkeit vorgestellt.

Dabei wird die im Rahmen dieser Arbeit ermittelte Abhängigkeit zwischen der Belastung des Rohabwassers, des Sandfanggutes sowie des Klärschlammes herangezogen. In folgender Tabelle werden vor allem für die Gruppe der Leitparameter diese Zusammenhänge dargestellt:

Tab. 6.9: Meßwerte für Rohabwasser (Zulauf), Sandfanggut (ungew.) und Klärschlamm für diverse Schadstoffe verschiedener Kläranlagen

	Parameter	Rohabwasser[ $\mu\text{g/l}$ ]	Faktor RS [1000 l/kg]	Sandfanggut [mg/kg]	Faktor SK [ ]	Klärschlamm [mg/kg]
Stadt E	Zn	285	1,5	429	1,3	548
	Cu	138	2,4	333	1,1	351
		<b>Mittelwert</b>	<b>2,0</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>1,2</b>	
Stadt C	Cu	62	2,3	145	1,7	244
	Ni	8	1,4	11	1,9	20,4
	Zn	388	2,2	858	1,3	1140
		<b>Mittelwert</b>	<b>2,0</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>1,6</b>	
Groß-Stadt A	Cd	0,41	2,9	1,2	2,0	2,4
	Cu	60,8	2,9	175,7	1,9	342,2
	Ni	7,4	3,8	28,0	1,3	35,7
	Zn	276,3	2,9	803,8	2,2	1777,0
	AOX	146,0	0,6	94,4	2,3	214,4
		<b>Mittelwert</b>	<b>2,6</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>1,9</b>	
Stadt F	Cd	0,25	4,0	1,0	1,3	1,3
	Cr	14,8	4,4	66	1,9	125
	Cu	26	3,5	91	2,7	248
	Ni	10,5	3,2	33	0,9	30
	Pb	2,5	(22,1)	56	1,4	79
	Zn	163,1	2,5	400	2,5	1011
		<b>Mittelwert</b>	<b>3,5</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>1,7</b>	

Aus obiger Tabelle kann abgelesen werden, daß für verschiedene Untersuchungsparameter eine Abhängigkeit zwischen dem auf einer Kläranlage ankommenden Rohabwasser, dem anfallenden Sandfanggut und dem Klärschlamm besteht. Der Faktor RS stellt die Abhängigkeit von Rohabwasser zum Sandfanggut her und bewegt sich in einem Bereich von 0,6 bis 4,4 [1 000 l/kg]. Die Belastung von Sandfanggut respektive des Klärschlammes wird mit Hilfe des Faktors SK dargestellt, der zwischen 1,1 und 2,3 schwankt.

Teilweise sind in Tabelle 6.9 erhebliche Abweichungen vom Mittelwert (je Kläranlage) vorhanden. Dies zeigt, daß vor allem bei der Messung von Rohabwasser und dem daraus resultierenden Faktor SK Differenzen auftreten können. Für Sandfanggut sowie Klärschlamm ist, im Vergleich zu Rohabwasser, eine homogenere Probe vorhanden. Folglich sind die Unterschiede des Faktors SK nicht so gravierend wie bei Faktor RS.

#### 6.4.3.2 Vorgehensweise

Da für jede Kläranlage eine Klärschlamm- sowie teilweise eine Rohabwasseranalyse vorliegt, kann unter Zuhilfenahme von Tabelle 6.10 mit den Faktoren RS und SK die Sandfanggutbelastung bestimmt werden.

Für die definierte Gruppe der Leitparameter wird zuerst die Ausgangsbelastung für Sandfanggut ermittelt. Dies wird durch die Faktoren RS und SK sowie unter Einbeziehung von vorhandenen Bezugsgrößen von Rohabwasser und Klärschlamm erreicht. Falls für beide Bezugsgrößen Daten vorliegen, wird die errechnete Ausgangsbelastung gemittelt. Fällt anhand der Klärschlammuntersuchung auf, daß weitere Parameter hohe Konzentrationen aufweisen, ist für diese ebenfalls eine Ausgangskonzentration für Sandfanggut zu ermitteln. Ist für einen Parameter kein Faktor in folgender Tabelle enthalten, sollte als Näherung der aufgeführte Mittelwert verwendet werden.

Tab. 6.10: Mittelwerte je Parameter sowie Gesamt für Faktor RS und SK

Parameter	Rohabwasser [µg/l]	Faktor RS [1000 l/kg]	Sandfang- gut [mg/kg]	Faktor SK [ ]	Klärschlamm [mg/kg]
AOX	146,0	0,6	94,4	2,3	214,4
Cd	0,25-0,41	3,5	1,0-1,1	1,6	1,3-2,4
Cr	14,8	4,4	66	1,9	125
Cu	26-138	2,9	2,8	1,9	248-351
Ni	7,4-10,5	2,8	11-33	1,4	20,4-35,7
Pb	2,5	(22,1)	56	1,4	79
Zn	163,1-388	2,3	400-858	1,8	548-1777
	<b>Mittelwert</b>	<b>2,8</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>1,8</b>	

Anschließend wird wie bei bekannter Sandfanggutbelastung vorgegangen (Wirkungsgrade von Tabelle 6.2) und die Restbelastung des gewaschenen Sandes bestimmt.

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte nochmals aufgeführt:

1. Für Gruppe Leitparameter Klärschlammparameter ermitteln;
2. durch Faktor SK teilen;
3. falls vorhanden, für "Gruppe von Leitparameter" Abwasseranalysen mit Faktor RS multiplizieren;
4. aus den Ergebnissen von 2. und 3. den Mittelwert bilden;
5. Wirkungsgrade aus Tabelle 6.2 auf die Untersuchungsparameter anwenden;
6. Vergleich der in 5. erzielten Werte mit den einzuhaltenden Zuordnungswerten.

Die unter Punkt 6 errechneten Werte dienen lediglich als grobe Richtwerte. Anhand dieser Größenordnung soll es möglich sein, eine erste Aussage über die zu erwartende Einbauklasse nach LAGA vorherzusagen und diese Erkenntnisse für erste Sondierungsgespräche zu verwenden.

## 7 Diskussion und Weiterführung

Bei der Ermittlung der Abscheideleistung des Sandfanges sowie der Sandwaschanlage werden Siebanalysen benötigt. Wird Kanalsand oder Sandfanggut mit seinen organischen Bestandteilen einer Siebung unterzogen, sind Fehlerquellen nicht auszuschließen. Zum einen wird in diesem Fall nicht zwischen Organik und Sanden unterschieden, zum anderen können sich organische Bestandteile mit Feinsanden verklumpen. Aus diesem Grund werden alle Siebanalysen (siehe Kapitel 4) zur Bestimmung der Abscheideleistung mit geglühtem Material herangezogen. Anhand des Glühverlustes und der jeweils beteiligten Massen kann, wie in Kapitel 6.2.1 beschrieben, die Trennleistung bestimmt werden.

Die Abscheideleistung dieser Bauwerke erreicht im Vergleich zur Auslegung einen deutlich geringeren Wert. Bei Sandfängen wird in der Regel eine Abscheideleistung von 95 % der Sande mit einem Korndurchmesser von 0,20 mm bei Maximalbelastung zugrundegelegt, wobei für die beprobten Sandfänge im Jahresmittel nur ein Wert von ca. 74 % festgestellt wurde.

PATT/STEIN (1996) stellen ebenfalls im vor Ort Betrieb eine geringere Trennleistung, als bei der Auslegung angenommen, fest. Sie definieren für die Abscheideleistung des Sandfanges den Rückhalt, welcher im Mittel für „zahlreiche Untersuchungen“ einen Wert von nur 85 % bei einem Korndurchmesser von 0,20 mm erreicht (vgl. Kapitel 6.2.1.1).

Die Trennleistung der Sandwaschanlagen sollte nach DIN 19569 größer als die des Sandfanges sein. Die Auswertung der eingesetzten Sandrecyclinganlagen ergab, daß eine Abscheideleistung von nur ca. 92 % erreicht wurden. Die ausgeschwemmten Feinsande sind folglich im Waschwasser enthalten.

Da sowohl die Trennleistung der Sandfänge wie auch der Sandwaschanlagen nicht, wie in DIN 19569 beschrieben, erreicht werden, fordert der Autor, den Betrieb der Einheit Sandfang/Sandwäsche neu zu definieren.

Ist auf einer Kläranlage bereits eine Sandwäsche installiert, verliert die Trennung von organischen und mineralischen Bestandteilen bereits im Sandfang an Bedeutung, da dies in einer Wäsche erfolgen kann. Daher sollte im Sandfang in erster Linie die geforderte Elimination der Sande aus dem Abwasserstrom erreicht und anschließend eine Trennung organisch/mineralisch mit Hilfe einer Sandwaschanlage im Nebenstrom praktiziert werden. Aus diesem Grund wird für die beiden Verfahrensschritte zukünftig eine zweistufige Lösung postuliert:

1. Zuerst sollte die Entfernung der Sande aus dem Abwasser erfolgen; ein hoher organischer Anteil stört nicht; der Wirkungsgrad sollte nach Möglichkeit die Auslegungswerte erreichen.
2. Elimination des organischen Anteils aus dem Sandfanggut durch eine nachgeschaltete Wäsche im Nebenstrom (der mineralische Anteil im Waschwasser ist so gering wie möglich zu halten).

Eine erhöhte Abscheideleistung im Sandfang kann vor allem durch eine verminderte Umwälzströmung (Reduzierung der Luftzufuhr) erreicht werden. Dies hat zur Folge, daß zukünftig eine höhere Sandmenge mit einem größeren Organikgehalt anfällt. Diesen gesteigerten Sandanfall in Abhängigkeit geeigneter Parameter, wie z. B. eingetragenes Luftvolumen, darzustellen, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgreich realisiert werden. Vielmehr bietet speziell dieser Sachverhalt Potential für weitere Forschungsvorhaben.

Bei einer zweistufigen Lösung der Sandabtrennung wird von einem höheren Organikgehalt des Sandfanggutes ausgegangen. Es erscheint sinnvoll den Sandfang unter diesen Umständen als Stapelraum anzusehen, da die handelsüblichen Sandwaschanlagen nur eine reduzierte Durchsatzleistung erreichen. Hierdurch besteht keine Gefahr für die Betriebssicherheit einer Kläranlage, da im Normalfall diese Aggregate oft nur wenige Stunden am Tag in Betrieb sind. Unter diesen Voraussetzungen sind lediglich die täglichen Betriebsstunden zu erhöhen. Probleme könnten theoretisch nur bei einem Regenereignis auftreten. Da in diesem Fall das Sandfanggut kaum organische Bestandteile enthält, erreichen die Waschanlagen eine deutlich höhere Durchsatzleistung als bei Trockenwetter. Ebenfalls kann der Sandfang als zusätzlicher Speicher genutzt und anschließend das Material sukzessive aufbereitet werden.

Die bei der Aufbereitung anfallenden Waschwässer, welche Organik und Feinsande enthalten, werden in den Abwasserstrom eingeleitet. Die sicherste Möglichkeit, um Betriebsstörungen durch Feinsande auszuschließen, besteht in der Elimination aller Inhaltsstoffe des Waschwassers (Partikel > 0,10 mm) mit Hilfe einer Siebtrommel oder eines Schwerkraftsiebes. Abgetrennt können sie gesondert entsorgt werden. Ziel von Zusatzaggregaten sollte es jedoch sein, die Abscheideleistung der Sandwaschanlagen zu erhöhen.

In diesem Zusammenhang bieten u. a. die Firmen HUBER und Geiger innovative Lösungen an. Das Waschwasser kann einem Hydrozyklon zugeführt werden, um die mineralischen Bestandteile zurückzugewinnen. Jedoch ist die anschließende Entwässerung oft schwierig zu realisieren, da im Unterlauf von Hydrozyklonen neben den Feinsanden noch erhebliche Wassermengen enthalten sind. Entweder können teure Entwässerungssiebmaschinen aus der Bodenaufbereitung eingesetzt werden oder es wird der Zyklon-Unterlauf wieder der Wascheinheit zugegeben. Für den letztgenannten Fall sind jedoch einige Durchläufe (Wascheinheit-Hydrozyklon) notwendig, was eine deutliche Verbesserung der Abscheideleistung zur Folge hat.

Werden auf einer Kläranlage auch Kanalsande aufbereitet, ist eine Betrachtung der Rückbelastung durch die Einleitung der Waschwässer in den Abwasserstrom besonders sinnvoll. Bei Schwermetallen liegt diese in der Größenordnung von 1 % - 3 %, bei CSB beträgt sie ca. 1,5 % - 2 % des durchschnittlichen Zulaufs der Fracht (Kap. 6.3.3). Die angegebenen Prozentsätze können bei einer zusätzlichen Kanalgutauflbereitung um 50 % erhöht werden, da die Menge des Kanalspülgutes in etwa dem halben Sandfanggut anfall entspricht. Dieser Sachverhalt sollte ebenfalls in die A 131 zur Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5 000 Einwohnern aufgenommen werden.

Die Rückbelastung der Kläranlage beim Einsatz einer Sandwaschanlage im Vergleich zu herkömmlichen Klassieren sollte nicht vernachlässigt werden. Während

bisher die belastete Organik mit dem Sandfanggut entsorgt wurde, wird sie zukünftig in den Abwasserstrom eingeleitet. Dies hat zur Folge, daß die Organik in die weiteren Behandlungsstufen gelangen kann und schließlich im Klärschlamm enthalten ist.

Neben der Ermittlung der Abscheideleistung der Einheit Sandfang/Sandwäsche wird die Reinigungsleistung von Sandwaschanlagen untersucht. Diese wird als Mittelwert von 9 untersuchten Anlagen ermittelt und ist in Abhängigkeit der Untersuchungsparameter nach LAGA Tabelle 6.2 zu entnehmen. Die Auswertungen der untersuchten Materialien zeigen, daß die Zuordnungswerte Z 2 in allen Fällen erfüllt sind (Tab. 6.3). Die noch strenger definierten Kriterien der Zuordnungswerte Z 0 bis Z 1.2 können jedoch nicht immer eingehalten werden. Unterschiedliche Ausgangskonzentrationen, eine oft unterschiedliche Zusammensetzung des Materials sowie nicht bekannte kläranlagenspezifische Einflüsse, machen eine wissenschaftliche Erklärung der physikalischen und vor allem chemischen Abläufe unmöglich. Eine Übertragung von Zusammenhängen aus verwandten Bereichen (z. B. Bodenaufbereitung) auf Sandwaschanlagen konnte nur zum Teil erfolgen.

Jedoch konnte für die Untersuchungsparameter der LAGA eine Tabelle erstellt werden, die die erreichbaren Wirkungsgrade für eine Sandaufbereitung beinhalten. Damit ist es erstmals möglich, die Schadstoffreduktion zu quantifizieren und für zukünftige Auslegungen zu berücksichtigen.

Werden die geforderten Grenzwerte trotz einer Aufbereitung nicht erreicht, besteht die Chance, durch Zusatzaggregate die Wirkungsweise zu optimieren. Neben der Verwendung von Attritionszellen, die Wirkungsgrade von ca. 20 % für bereits gewaschenen Sand erreichen (siehe Kapitel 6.3.1 + Abbildung 6.5), ist die Möglichkeit durch den Einsatz von hochprozentigen Säuren gegeben, die Restbelastung ebenfalls zu reduzieren. Dabei wird der pH-Wert durch eine kontinuierliche Zugabe für etwa 10 bis 20 Minuten bei konstant 3 – 4 gehalten. Auf diese Weise können durch Laborversuche ermittelte Wirkungsgrade von ca. 20 % erreicht werden. Bei der sauren Laugung laufen chemische Reaktionen ab, wie sie bereits in Kapitel 2.4.3 für Bodenwaschanlagen beschrieben sind. Jedoch sind beim Umgang mit hochprozentigen Säuren diverse Vorschriften zu beachten. Da Fragen bezüglich Lagerhaltung und Waschwasserrückführung (pH-Wert: 3 – 4) in den Abwasserstrom nicht ohne längere Praxiserfahrung geklärt werden können, erfolgt hier keine weitere Diskussion.

In den letzten Jahren sind zahlreiche Kläranlagen mit Sandwaschanlagen ausgerüstet worden. Es ist erkennbar, daß für Kläranlagen mit mehr als 500 000 Einwohnerwerten nur zögernd in die neue Technologie investiert wird. Speziell für diese Betreiber ist es wichtig, einen gesicherten Verwertungsweg für die großen aufzubereitenden Mengen sicherzustellen. Da Herstellerfirmen von Sandwaschanlagen oft keine Einbauklasse der LAGA in Verbindung mit Grenzwerten aller Untersuchungsparameter garantieren, muß jeder Betreiber das Risiko selbst übernehmen.

Unter diesen Umständen erscheint es besonders wichtig, die zu erwartende Restbelastung für eine Sandaufbereitung vorab zu ermitteln. Mit diesen Informationen ist es im Vorfeld möglich, eine langfristige Verwertung zu garantieren und die hohe Investitionssumme zu begründen. Jedoch ist eine Verwertung nur dann sinnvoll, wenn daraus ein ökonomischer und ökologischer Nutzen entsteht. Die vom KrW-/AbfG aufgestellte Forderung wird u. a. in dem vom Gemeinnützigen Institut Wasser und

Boden (IWB) bearbeiteten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (2000) eindeutig erläutert. Das aufbereitete Material wird für die Großstadt A in der Betonindustrie als Zuschlagsstoff verwendet und somit bewiesen, daß ein positiver Markt vorhanden ist. Weitere Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. im Landschaftsbau oder beim Verfüllen während Kanalbauarbeiten, sind dem Autor bekannt.

Zur Abschätzung der Restbelastung des aufbereiteten Materials eignet sich das in Kapitel 6.4 entwickelte Verfahren. Dazu werden kritische Parameter als Indikatoren für das Gesamtmaterial herangezogen, anhand derer es möglich ist, unter Einbeziehung von erstellten Zusammenhängen, die unbekannte Größe – Restbelastung – zu errechnen.

Ebenfalls sind die mit einer Aufbereitung verbundenen Kosten von Interesse. Die Investitions- und Betriebskosten einer Sandwaschanlage sind nur von der gewählten Größe abhängig, wobei Transport-, Verwertungs- und Entsorgungskosten regionalen Schwankungen unterliegen können. Aus diesem Grund wird hier eine vom IWB aufgestellte Kostenrechnung angeführt, welche Abschreibung, Reparatur, Wartung, Unterhalt sowie Betriebskosten beinhaltet. Für die Großstadt A belaufen sich bei einer Kläranlagengröße von ca. 1,45 Mio. (EW) die Kosten auf Euro 30,-/t Ausgangsmaterial bzw. auf Euro 0,25/(EW\*a). [BERGER, 2000].

Für Kläranlagen mit 200 000 – 500 000 Einwohnerequivalente (EW) können für eine Aufbereitung nach Erfahrungen des Autors auch Kosten von Euro 50,- bis 70,-/t Ausgangsmaterial bzw. Euro 0,4 – 0,6/(EW\*a) entstehen.

Abschließend wird für eine Stadt mit 200 000 Einwohnerequivalenten ein charakteristisches Stoff- und Materialflußdiagramm aller Prozeßprodukte erstellt. Es wird eine Menge von 9 g/(EW\*d) für Kanalsand sowie 15 g/(EW\*d) für Sandfanggut angenommen. Daraus ergibt sich eine jährlich aufzubereitende Menge von ca. 1 750 Tonnen, die Grundlage für folgende Abbildung darstellt:

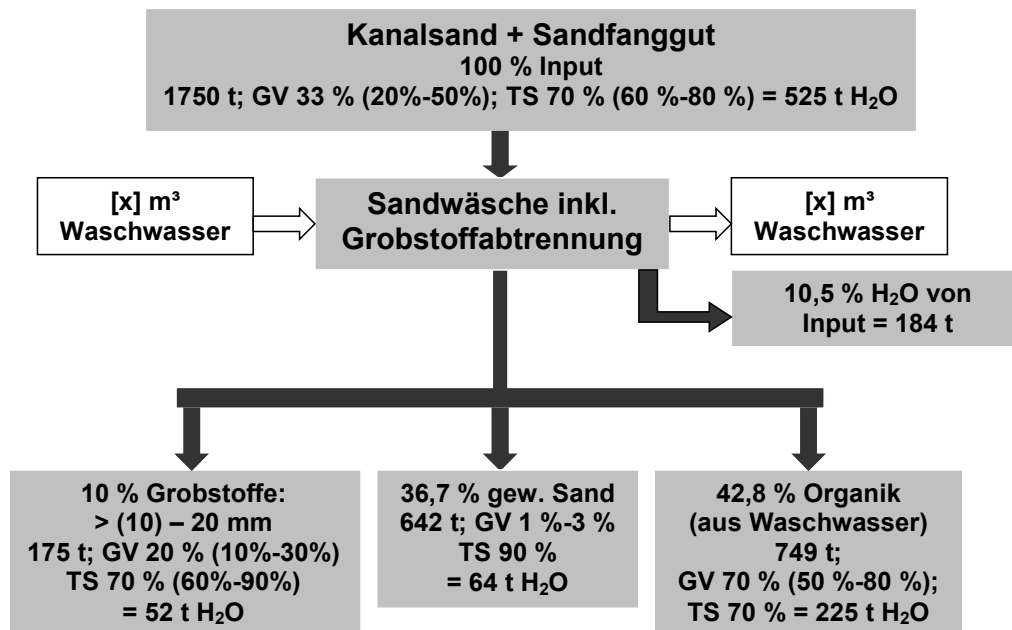


Abb. 7.1: Charakteristisches Stoff- und Materialflußdiagramm

Es werden für den Glühverlust sowie Trockensubstanzgehalt für alle Prozeßprodukte Erfahrungswerte angenommen, wobei Klammerwerte eine mögliche Streuung wiedergeben. Es fällt auf, daß durch den höheren TS-Gehalt des gewaschenen Sandes gegenüber dem Input, überschüssiges Wasser dem Washwasser zugeführt wird.



## 8 Zusammenfassung

Bei der Abwasserableitung- und -behandlung fallen in der Regel die Reststoffe Kanalspülgut, Rengengut, Sandfanggut und verschiedene Arten von Klärschlämmen an. Im Rahmen dieser Arbeit wird für Kläranlagensande die Abtrennung aus dem Abwasser bis hin zu einer Verwertung behandelt. Um sowohl Kanalspülgut wie auch Sandfanggut unter Beachtung der gesetzlichen Vorschriften zu verwerten, ist der Einsatz einer Sandwaschanlage notwendig. Werden relevante Grenzwerte nicht eingehalten, besteht die Möglichkeit, durch zusätzliche Maschinenteknik die Schadstoffbelastung nochmals zu reduzieren. Zur Zeit werden geeignete Aggregate in neue und sogar bestehende Anlagen integriert.

Abgelagertes Kanalspülgut wird mit Spülsaugern aus den Abwasserkanälen abgesaugt. Die im Abwasser verbliebenen mineralischen Bestandteile werden zu Kläranlagen transportiert. Dort erfolgt mit Flach-, Rund- oder belüfteten Sandfängen eine Abtrennung, um die nachfolgenden Behandlungsstufen zu schützen. In Kapitel 2.1 wird sowohl die Zusammensetzung wie auch die anfallende Menge beider Reststoffarten näher erläutert.

Zahlreiche Untersuchungen zeigen (PATT/STEIN, 1999; HITZLER, 2001), daß die eingesetzten Sandfänge nicht die geforderten Abscheideleistungen (wie bei einer Bemessung zugrundegelegt) erreichen. Ist bereits eine Sandwaschanlage auf einer Kläranlage installiert, kann eine Sandabtrennung aus dem Abwasser und eine Entfernung der Organik wie folgt realisiert werden:

1. Abtrennung der Sande aus dem Abwasser (gemäß Auslegung) ohne Rücksicht auf den sich einstellenden Organikgehalt
2. Anschließende Elimination aller organischen Bestandteile des Sandfanggutes in einer Sandwaschanlage im Nebenstrom

Durch eine Entkoppelung der beiden Verfahrensschritte soll die Abscheideleistung im Sandfang erhöht werden, um nachfolgende Stufen der Abwasserbehandlung mehr als bisher zu schützen. Bei der Auslegung einer Aufbereitungsanlage ist ein erhöhter Organikgehalt im Aufgabegut zu berücksichtigen. Die Verbesserung der Abscheideleistung der Sandwaschanlage konnte durch den Einsatz von Hydrozyklonen oder durch eine Kreislaufführung des Waschwassers erreicht werden.

Eine Erklärung der physikalischen und chemischen Abläufe bei der Sandaufbereitung stellt ein weiteres zentrales Thema dar. In diesem Zusammenhang wird für alle an der Sandwäsche beteiligten Prozeßprodukte ein Massenfluß erstellt. Ferner werden für ausgewählte Anlagen die Reinigungsleistungen im vor Ort Betrieb untersucht und die ermittelten Daten durch Summenbilanzen verifiziert. Zur Interpretation der Vorgänge werden verwandte Stoffgruppen aufgrund einer ähnlichen Zusammensetzung herangezogen, für die ein breitgestreutes Wissen vorliegt.

Aufgrund der vielfältigen Zusammensetzung der Kläranlagensande können die Abläufe nur zum Teil aufgezeigt werden. Die Beurteilung der Arbeitsweise von Sandwaschanlagen erfolgt unter Berücksichtigung folgender Punkte:

- Ermittlung der Reinigungsleistung (Wirkungsgrade) einer Sandaufbereitung für Untersuchungsparameter der LAGA; Verifikation durch Summenproben (Kap. 6.1)
- Erstellung von Massenbilanzen für die Einheit Sandfang-Sandwäsche (Kap. 6.2)
- Erklärung (teilweise) der physikalischen und chemischen Abläufe (Kap. 6.1/6.2)

In erster Linie wird im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) zwar eine Vermeidung verlangt. Dieses Ansinnen ist jedoch nicht realisierbar, folglich soll eine Verwertung der betrachteten Reststoffe angestrebt werden. Da die Empfehlungen der Ländergemeinschaft Abfall (LAGA) bereits als länderübergreifende Größe für eine Verwertung Anerkennung finden und die einzuhaltenden Grenzwerte sehr scharf definiert sind, wird damit die Einstufung des aufbereiteten Materials vorgenommen.

Werden die von der LAGA geforderten Grenzwerte nicht eingehalten, sind die Anforderungen der TA Siedlungsabfall (Deponierung) zu erfüllen. Für diesen Fall ist eine Sandwäsche keine unnötige Investition, da die Entsorgungskosten auf einer Bauschuttdeponie (Deponieklasse I) in der Regel nur ca. Euro 20,- im Vergleich zu Euro > 80,- für eine unbehandelte Deponierung (Deponieklasse II) betragen. Die Forderung des KrW-/AbfG, das Material zu verwerten, sollte jedoch einer Deponierung unbedingt vorgezogen werden.

Das aufbereitete Material aller im Rahmen dieser Arbeit untersuchten 9 Aufbereitungsanlagen erfüllt alle Anforderungen für einen eingeschränkten Einbau nach LAGA, für den die Zuordnungswerte Z 2 einzuhalten sind. Die Grenzwerte für einen uneingeschränkten Einbau (LAGA) wurden nicht oder nur in seltenen Fällen erreicht. Weitere länderspezifische Vorschriften sowie gesetzliche Rahmenbedingungen einzelner Wirtschaftszweige sind in Kapitel 2.3.1.5 dargestellt.

Obwohl in den meisten Fällen die gesetzlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden, sind im Zusammenhang mit einer Verwertung folgende Schwierigkeiten zu beobachten:

- Akzeptanzproblem der Bevölkerung mit Rückständen aus Abwasserbehandlungsanlagen
- Fehlende Bereitschaft der Betreiber aufgrund des zusätzlichen Logistikaufwandes

Aufgrund der geschilderten Sachlage wird in einigen Fällen das aufbereitete Material deponiert (Bauschuttdeponie), obwohl die gesetzlichen Rahmenbedingungen für eine Verwertung erfüllt sind. Manchmal wird der geplante Kauf einer Sandwaschanlage aufgrund dieser Akzeptanzprobleme sogar ausgesetzt oder nicht realisiert.

Zahlreiche in situ Untersuchungen sowie die durchgeführten Auswertungen zeigen, daß die zur Zeit eingesetzte Maschinenteknik in zwei Punkten entscheidend optimiert werden kann:

1. Verbesserung der Trennwirkung;
2. Erhöhung der Reinigungsleistung durch Attrition.

Für den Betrieb von Sandwaschanlagen ist festzustellen, daß durch den Aufbereitungsprozeß Feinsande ins Waschwasser gelangen. Entweder erfolgt eine Abtrennung mit einer Siebtrommel oder sie werden mit dem Waschwasser in den Abwasserstrom zurückgeführt. Keine der zur Zeit gebräuchlichen Varianten stellt eine befriedigende Lösung dar, jedoch erscheint eine Entfernung der mineralischen Bestandteile aus dem Waschwasser als die sinnvollste.

Zukünftig kann hierzu das Waschwasser einem Hydrozyklon zugeführt werden, um dadurch eine Abtrennung der mineralischen Bestandteile zu erreichen. In diesem Fall können die gewonnenen Feinsande verwertet und die Organik den weiteren Behandlungsstufen einer Kläranlage zugeführt werden.

In manchen Einsatzfälle ist trotz gut funktionierender Sandwaschanlage eine weitere Schadstoffreduktion notwendig, um z. B. einen bestimmten Verwertungsweg langfristig sicherzustellen. Dies kann durch eine Attrition erreicht werden, die durch mechanischen Abrieb die Schadstoffe von der Sandoberfläche ablöst und anschließend ausschwemmt. Darüber hinaus besteht die Überlegung Säuren, wie bei der Bodenaufbereitung verwendet, einzusetzen, jedoch wird diese Alternative vor allem vor dem Hintergrund der Umweltverträglichkeit nicht näher verfolgt.

Werden auf einer Kläranlage Sandwaschanlagen nachgerüstet, entstehen nicht unerhebliche Kosten. Als grober Richtwert kann ca. 0,5 – 1,0 (Euro/EW) angegeben werden, abhängig von der Anlagengröße bzw. dem Vorhandensein eines Gebäudes. Aus diesem Grund ist es für einen Betreiber um so wichtiger, vor dem Kauf die Verwertung der gewaschenen Sande bzw. die Entsorgung der Reststoffe sicherzustellen. Dazu ist es notwendig, vorab die zu erwartende Restbelastung zu ermitteln. Anstatt aufwendige Untersuchungen im Rahmen von Testanlagen durchzuführen, ist eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode anwendbar. Dabei wird mit Hilfe von ermittelten Wirkungsgraden (Tabelle 6.2), unter der Annahme, daß die Ausgangsbelastungen für alle Untersuchungsparameter bekannt sind, die Restkontamination bestimmt.

Ist es ebenfalls möglich, anhand von kritischen Parametern (Indikatoren; Pb, Cu, Zn, PAK, KW), die für eine Verwertung maßgebende Einbauklasse der LAGA zu bestimmen. Dazu werden die Werte der regelmäßig durchgeführten Klärschlammuntersuchungen (Eigenüberwachung, i. d. R. monatlich) sowie gegebenenfalls vorhandene Rohabwasseranalysen herangezogen. Mit dem entwickelten Verfahren kann aus vorhandenen Daten die zu erwartende Restkontamination für einen unbekanntem Einsatzfall ermittelt werden.

Sind die Restbelastungen der aufbereiteten Sande durch Anwendung der aufgestellten Methode bereits bekannt, kann sich jeder Betreiber bereits im Vorfeld einen geeigneten Verwertungsweg für einen längeren Zeitraum sicherstellen und somit die Investitionssumme sinnvoll nutzen.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse und nicht zuletzt auch wegen langjähriger Zusammenarbeit mit Kläranlagenbetreibern sowie Entsorgerfirmen ist festzuhalten, daß vielfältige Verwertungsmöglichkeiten bestehen. Der aufbereitete Sand ist im Landschafts- und Straßenbau oder im Rahmen von Kanalbauarbeiten in Dränschichten verwertbar. Eine Studie vom IWB (2000) zeigt darüber hinaus für den Raum von Großstadt A, daß eine Verwertung in der Betonindustrie erfolgreich praktiziert wird.

## 9 Literaturverzeichnis

**Abfallgesetz** 1986; Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen (Abfallgesetz, AbfG), Bundesanzeiger

**Alloway, B., Ayres D.**

1993; Schadstoffe in der Umwelt; Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford

**Arthen, A.** 1992; Untersuchungen zum Verhalten der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer und Zink unter wechselnden Ex- und Infiltrationsbedingungen der Uferfiltration; Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Band 20

**Artières, O.** 1988; Bildung und Remobilisierung von Ablagerungen in Mischkanalisationen, Korrespondenz Abwasser 35, Heft 10, S. 1026 - 1033

**ATV-A 147** 1993; Betriebsaufwand für die Kanalisation, Teil 1: Betriebsaufgaben und Intervalle, Regelwerk der Abwassertechnischen Vereinigung e. V., Hennef

**ATV-A 115** 1992; Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef

**ATV-A 128** 1992; Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef

**ATV-A 131** 1991; Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5 000 Einwohnern, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef

**ATV FA 2.5** 1998; Sandabscheideanlagen (Sandfänge und Sandfanggutaufbereitungsanlagen), Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.5.1 „Sandfänge“ Korrespondenz Abwasser, 45. Jhrg., Heft 3, S. 535 - 549.

**ATV FA 3.11** 1996; Abfälle aus Abwasseranlagen, Arbeitsbericht der ATV/VKS-Arbeitsgruppe 3.11.2 „Abfälle aus Kläranlagen - Rechengut, Sandfanggut“ (1. Teilbericht) Korrespondenz Abwasser, 43. Jhrg., Heft 11, S. 2003 - 2013.

**ATV-Handbuch**

1995; Bau und Betrieb der Kanalisation, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

**ATV-Handbuch**

1997; Mechanische Abwasserreinigung, 4. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

**ATV-Handbuch**

1987; Instandhaltung von Kanalisationen, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

**Bank, M.** 1993; Basiswissen Umwelttechnik, S. 613/636, Vogel Buchverlag, Würzburg

**Bauer, H.** 1987; Sandaufbereitung – Herstellung von Sanden höchster Reinheit Teil 1, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 28, Heft 5, S. 271 - 277, AT Verlag, Wiesbaden

**Bauer, H.** 1987; Sandaufbereitung – Herstellung von Sanden höchster Reinheit Teil 2, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 28, Heft 6, S. 336 - 339, AT Verlag, Wiesbaden

**Baur, R., Hörold, S.**

2001; Verbesserte Inspektionsplanung durch Alterungsprognose für Kanaltypen, Korrespondenz Abwasser 48, Heft 7, S. 937-943

**Bauer, S.** 1996; Bilanzierung von Schwermetallen in der mechanischen Reinigungsstufe von Kläranlagen ; Vertieferarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)

**Beier, E.** 1994; Umweltlexikon für Ingenieure und Techniker; VCH-Verlag, Weinheim

**Berger, C., Koy, A.**

2000; Aufbereitung und Verwertung von Kläranlagen- und Kanalsanden; Gemeinnütziges Institut Wasser und Boden e. V. (IWB), St. Augustin

**Berndt, J.** 1991; Umweltbiochemie; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Bierl, R.** 1988; Verfügbarkeit umweltrelevanter Stoffkomponenten: Probenvorbereitung-Analytik-Bewertung; GWA, Band 105; Herausgeber B. Böhnke; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

**Bielecki, R.** 1995; Bauliche und konstruktive Auslegung der Kanalisationsanlagen-Werkstoffe, ATV-Handbuch, Bau und Betrieb der Kanalisation, 4. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

**Blasberg, G.**

1999; Untersuchung einer Sandaufbereitungsanlage im Hinblick auf deren Abtrennleistung und die für eine Wiederverwendung des Sandes maßgeblichen Parameter; Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)

**Blitz, E., Czysz, W.**

1984; Abwassertechnologie: Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwässer, herausgegeben im Auftrag der GTZ; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Boes, M.** 1990; Anordnung der Luftzufuhr von belüfteten Sandfängen, Korrespondenz Abwasser 37, Nr. 7, S. 785

**Bohle, B.** 1987; Wirtschaftliche Feinsandrückgewinnungsverfahren, Aufbereitungs Technik, Heft 4, S. 181 - 187, AT Verlag, Wiesbaden

**Bohle, B.** 1993; Einsatz und Anwendung von Sortierspiralen im europäischen Umweltschutz, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 34, Heft 11, S. 579 - 590, AT Verlag, Wiesbaden

**Böhnke, B. et al**

1980; Analytik der Schadstoffparameter des Abwasserabgabengesetzes CSB – Hg – Cd – Absetzbare Stoffe – Fischtest, GWA, Band 44, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

**Botsch, B.** 1974; Bemerkungen zur Sandfangauslegung, Sonderdruck aus Korrespondenz Abwasser, 21. Jahrgang, Ausgabe 75, Fa. Geiger, Karlsruhe

**Branner, H.** 2001; persönliche Mitteilungen, Fa. Hans Huber GmbH, Berching

**Bütow, E. et al**

1991; Ableitung von Sanierungswerten für kontaminierte Böden, IWS-Schriftenreihe, Band 13, Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin, Erich Schmidt Verlag, Berlin

**DIN** 1989; DIN 19569, Teil 2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen

**Doedens, H.; Schüßler, H.**

1984; Möglichkeiten der wirtschaftlichen Entsorgung von Rechen- und Siebgut, Wasserwirtschaft, 74. Jahrgang, Heft 9, S. 62 – 65

**Dohmann, M., Dimovsky, A.**

1993; Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Sandklassiereinrichtungen auf Kläranlagen, Schlußbericht des Forschungsvorhabens (Oswald-Schulze-Stiftung, Förderkennzeichen: AZ 326/86) Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen

**Dohmann, M., Haußmann, R.**

1996; Belastung von Boden und Grundwasser durch undichte Kanäle, gwf Abwasser-Special II, Nr. 15, S. 2 - 6

**Dorgeloh, E.** 1994; Gewässerbelastungen durch Wasch- und Reinigungsmittel;

GWA, Band 142; Herausgeber M. Dohmann; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

**Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall)**

Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14.05.1993, Bundesanzeiger Jahrgang 45, Nummer 99 a

**Düreth-Joneck, S.**

1993; Entwicklung eines naturnahen, praxisorientierten Mobilitätstests für Schwermetalle und Arsen in kontaminierten Böden; Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH) - Band 66

**Emmrich, M.** 1987; Vorkommen und Verhalten Polychlorierter Biphenyle (PCB) in einer Modellanlage in der Kläranlage Berlin-Ruhleben; Fortschrittsberichte VDI, Umwelttechnik Band 50, VDI-Verlag, Düsseldorf

**Einsatzmöglichkeiten hochwertiger Recyclingmaterialien**

Ministerialblatt der Landesregierung von Rheinland-Pfalz, Ministerium für Umwelt, Januar 1993

**Erler, U., Rose, D.**

2000; Verfestigung von Suspensionen mit Hilfe organischer Verdickungsmittel, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 41, Heft 3, S. 110 - 116, AT Verlag, Wiesbaden

**Esch, B., Krüger, G.**

1999; „Entsorgung von Kläranlagenrückständen in Deutschland“, Korrespondenz Abwasser 46, Heft 6, S. 943 – 952



- Essler, H.** 1996; Untersuchung von Sandklassierern auf ihre Abtrennleistung bezüglich der Trenngrenze, Organikgehalt und Schwermetallbelastung des anfallenden Waschwassers; Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)
- Fecker, E., Reik, G.**  
1987; Baugeologie; Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Fellenberg, G.**  
1992; Chemie der Umweltbelastung; Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart, Leipzig
- Fent, K.** 1998; Ökotoxikologie; Thieme Verlag, Stuttgart
- Firmenprospekt der Fa. AKW**  
Apparte + Verfahren GmbH & Co. KG, 1998, Hirschau
- Firmenprospekt der Fa. Egnor GmbH & Co.**  
1998, Adelsheim
- Firmenprospekt der Fa. Noggerath GmbH & Co. Abwassertechnik KG**  
1998-2001, Ahnsen
- Firmenprospekt der Fa. Schauenburg Maschinen- und Anlagen-Bau GmbH**  
1998-2000, Mülheim an der Ruhr
- Firmenprospekt der Fa. Steinmüller Rompf Wassertechnik GmbH & Co.**  
1998, Driedorf
- Flamme, S., Regener, D., Wahl, G.**  
1999; „Zuordnung von Abfallarten zu den Deponieklassen der TASI“, Korrespondenz Abwasser 46, Heft 5, S. 704 - 803
- Förstner, U.** 1992; Umweltschutztechnik; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Förstner, U., Müller, G.**  
1974; Schwermetalle in Flüssen und Seen; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Förstner, U., Wittmann, G.**  
1979; Metal pollution in the aquatic environment; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Geiger GmbH & Co. KG**  
1998-2001, Firmenprospekte, Karlsruhe

**Gerhard, C. et al.**

2000; Prozesssimulation in der mineralischen Aufbereitung, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 41, Heft 4, S. 160 - 169, AT Verlag, Wiesbaden

**Gesetz über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen**

(Abfallgesetz AbfG) vom 27.08.1986, BGBl. I 1986, S. 1410

**Godehardt,** 1996: „Stoffliche Verwertung der Reststoffe aus Abwasser- und Straßenanlagen“, Korrespondenz Abwasser, Heft 10, S. 1800

**Großmann, A.**

2000; persönliche Mitteilungen, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH)

**Hahn, H. H.,** 1996; Bemessung von Anlagen in der Siedlungswasserwirtschaft, Skript, Institut für Siedlungswasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH)

**Hans Huber Maschinen- u. Anlagenbau GmbH**

1998-2001, Firmenprospekte, Berching  
[www.huber.de/erfahrungsberichte](http://www.huber.de/erfahrungsberichte)

**Hankel, D., Rosenstock, R., Biehler, G.**

1992; Die Wirkung der Attrition im LURGI-DECONTERRA-Bodenaufbereitungsverfahren, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 33, Heft 5, S. 257 - 266, AT Verlag, Wiesbaden

**Haritopoulou, T.**

1996; Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle in urbanen Entwässerungssystemen - Aufkommen, Transport und Verbleib; Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH) - Band 77

**Haußmann, R.**

1997; Strategien für die Kanalreinigung; GWA, Band 158; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen

**Hinz, J.** 1995, Betrieb und Unterhaltung des Entwässerungsnetzes, ATV-Handbuch, Bau und Betrieb der Kanalisation, 4. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin

- Hitzler, A.** 1998; Sandfanggut und Sandrecyclingsverfahren - Untersuchung der Anfallmengen, der Qualität und der Aufbereitungsmöglichkeiten von Sandfanggut; Diplomarbeit am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)
- Holler, S., Schäfers, C., Sonnenberg, J.**  
1996; Umweltanalytik und Ökotoxologie; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Hosang, W., Bischof, W.**  
1998; Abwassertechnik; Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig
- Hulpke, H., Koch, H.**  
1993; Rompp Lexikon Umwelt; Thieme Verlag, Stuttgart
- Jander, G., Spandau, H.**  
1987; Kurzes Lehrbuch der anorganischen und allgemeinen Chemie, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Kalbskopf, K. H.**  
1966; „Über den Absetzvorgang in Sandfängen“, Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft der TH Hannover, Heft 24
- Kalbskopf, K. H.**  
1997; Sandfänge, ATV-Handbuch, Mechanische Abwasserreinigung, 4. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin
- Kauffmann, M., Holthausen, E.**  
2000; „Numerische Strömungssimulation in Kläranlagen: Belüfteter Sandfang“, Korrespondenz Abwasser 47, Heft 3, S. 357 - 365
- Koppe, P., Stozek, A.**  
1993; Kommunales Abwasser, „Seine Inhaltsstoffe nach Herkunft, Zusammensetzung und Reaktion im Reinigungsprozeß einschließlich Klärschlämme“, 3. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen
- Koß, V.** 1997; Umweltchemie Einführung für Studium und Praxis; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz**  
1994; Gesetz zur Förderung einer rückstandsarmen Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Entsorgung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, KrW-/AbfG), Bundesanzeiger

**Klinger, H., Barth, H.**

1994; Entwicklung einer Sandrecyclinganlage für Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser 41, Heft 1, S. 48 - 53

**von Koller, H.**

1996; Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz Textausgabe mit Erläuterungen, Erich Schmidt Verlag, Berlin

**Koß, K-D., Gebhard, K.**

1999; Materialien Nr. 49 Vollzugshilfe zum Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

**Kühn, W., Diering, A.**

2000; „Optimierung der maschinentechnischen Ausrüstung von Sandfängen“, Korrespondenz Abwasser 47, Heft 1, S. 70 – 73

**LAGA**

(Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen, Technische Regeln, September 1995, Erich Schmidt Verlag, Neuburg

**Langen, M., Hoberg, H., Hamacher, B.**

1994; Möglichkeiten zur Abtrennung von Schwermetallkontaminationen aus Böden, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 35, Heft 1, S. 1 - 12, AT Verlag, Wiesbaden

**Londong, J.** 1990; Sandfanggut in kommunalen Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser 12, S. 1473/1475

**Londong, J.** 1987; Beitrag zur Bemessung belüfteter Sandfänge unter besonderer Berücksichtigung der gleichzeitigen Nutzung als Adsorptionsstufe, GWA, Band 94, Dissertation an der RWTH Aachen

**Manz, M.** 1995; Umweltbelastungen durch Arsen und Schwermetalle in Böden, Halden, Pflanzen und Schlacken ehemaliger Bergbaugebiete des Mittleren- und Südlichen Schwarzwaldes; Karlsruhe Geochemische Hefte, Band 7; Institut für Petrographie und Geochemie der Universität Karlsruhe (TH)

**Matschullat, J., Tobschall, H., Voigt H.**

1997; Geochemie und Umwelt; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Meierling, L., Morper, M., Hegemann, W.**

1999; Biologische Reinigung eines organisch stark belasteten Grundwassers im Wirbelschichtreaktor; gwf – Wasser/Abwasser140; Heft 2, S. 98 - 103

**Neeße, Th.; Dallmann, W., Espig, D.**

1986; Einfluß der Turbulenz auf das Trennergebnis von Hydrozyklonen bei hohen Aufgabefeststoffgehalten, Aufbereitungs Technik, Heft 1, S. 6 - 14, AT Verlag, Wiesbaden

**Neeße, Th.; Grohs, H.**

1990; Naßmechanische Aufbereitung kontaminierter Böden, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 31, Heft 10, S. 563-569, AT Verlag, Wiesbaden

**Neeße, Th.; Grohs, H.**

1990; Die Aufbereitungstechnik des Bodenwaschens, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 31, Heft 12, S. 656/662, AT Verlag, Wiesbaden

**Neeße, Th.; Grohs, H.**

1991; Waschen und Klassieren kontaminierter Böden, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 32, Heft 2, S. 72 - 77, AT Verlag, Wiesbaden

**Neeße, Th.; Grohs, H.**

1991; Fest/Flüssig-Trennung für die Entsorgung in Bodenwaschanlagen, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 31, Heft 6, S. 294 - 302, AT Verlag, Wiesbaden

**Ochmann, R.**

1985; Oxidation von Cyanid in wässriger Lösung mittels anodisch polarisierter Aktivkohle- und Graphitpulversuspension; Dissertation des Fachbereichs Chemie der Universität Hamburg

**van Ommen, R.**

2000; Krebs gMAX Hydrozyklone – größere Durchmesser auch für feine Trennung, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 41, Heft 9, S. 416 - 420, AT Verlag, Wiesbaden

**Ottow, J.C.G., Bidlingmaier, W.**

1997; Umweltbiotechnologie, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena

**Paramanathan, B. K., Bridgwater, J.**

1983; Attrition of Solids, I/II, Chemical of Engineering Science, Vol. 38, No. 2, pp. 197-206, pp. 207 - 224, Great Britain

**Patt, H., Stein, A.**

1996; Einsatz belüfteter Sandfänge auf Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser 43, Nr. 9, S. 1544

**Pfaff-Schley, H.**

1996; Bodenschutz und Umgang mit kontaminierten Böden; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Phillip, B.** 1995; Einführung in die Umwelttechnik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Richter, A.** 1991; Untersuchungen zur Optimierung der Separationsleistung des belüfteten Sandfanges der Karlsruher Kläranlage, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe (TH)

**Rodi, W.** 1980; Turbulence models and their applications in hydraulics: A state of the art review, IAHR Delft

**Rölle, R., Huber, M.**

1997; Neue Anordnung belüfteter Sandfänge zur konsequenten Trennung kommunaler Reststoffe, Korrespondenz Abwasser 44, Heft 71, S. 1221 – 1225

**Roos, H.-J.** 1995; Recycling von Rückständen aus Sandfängen, 3. Saarländische Abwassertage, 1995

**Roos, H.-J.** 1996; Entsorgung von Sandfanggut aus kommunalen Kläranlagen, Wasser Abwasser Praxis 5, Heft 2, April 1996, S. 54 - 60

**Rose, D., Moczurad, J.**

2000; Aufstromsortierung und –klassierung in Hydrosort-Apparaten, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 41, Heft 9, S. 421 - 428, AT Verlag, Wiesbaden

**Schäfer, M.** 1999; Regionalisierte Stoffstrombilanzen in städtischen Einzugsgebieten – Möglichkeiten, Probleme und Schlußfolgerungen, Dissertation am Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Universität Karlsruhe (TH)

**Schäfer, M., Hoffmann, E.**

1998; Reststoffmanagement auf kommunalen Kläranlagen Teil 1: Stoffbilanzen, gwf, Nr. 9, S. 586 - 591

**Schäfer, M., Hoffmann, E.**

1998; Reststoffmanagement auf kommunalen Kläranlagen Teil 2: Integrales Nähr-/Schadstoffmanagement, gwf, Nr. 10, S. 642 - 645

**Scheibe, M., Held, R.**

1976; ABC Umweltschutz; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

**Schimmelpfeng, L., Gessenich, S.**

1997; Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg

**Schubert, H.** 1989, Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe – Band I-III, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig

**Schüßler, H.** 1995; Rechengut und Sandfangrückstände - Abfall oder Wirtschaftsgut?, Korrespondenz Abwasser 42, Heft 2, S. 218 – 225

**Schütz, M.** 1996; Beitrag zur Bemessung steiler Abwasserkanäle mit Lufteintrag, Korrespondenz Abwasser 43, Heft 8, S. 1372 - 1379

**Seyfried, C. F., et. al.,**

1985; „Vergleich der Reinigungsleistung von Rechen, Sieben und Siebrechen sowie deren Einfluß auf die weiteren Reinigungsstufen“, Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Hannover, Bd. 58

**Seyfried, C. F.**

1994; „Rechen, Siebe und Sandfänge - Betriebserfahrungen und Entwicklungen“, Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen, Schriftenreihe WAR 75, Darmstadt 1994

**Sigg, L. Stumm, W.**

1990; Aquatische Chemie; Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart

**Stahl, H.** 1996; Aufbereitung von Sandfanggut, Straßenkehricht und Kanalsand, Kommunalwirtschaft 9, S. 454/458

**Stahl, H.** 1995; Untersuchungen zur Wiederverwertbarkeit von Sandfanggut und Kanalsand, Bericht über Versuche im Klärwerk Frankfurt-Griesheim. Druckschrift der H. Geiger GmbH & Co. KG, Karlsruhe

**Stahl, H.** 1997; Naßmechanische Aufbereitung von Klärsanden, Aufbereitungs Technik, Jahrgang 38, Heft 5, S. 245 - 253, AT Verlag, Wiesbaden

- Stahl, H.** 1997-2000, persönliche Mitteilungen, Fa. H. Geiger GmbH & Co. KG, Karlsruhe
- Stein, A.** 1989; „Sandrückhalt in als Höchstlastbelegung genutzten Sandfängen“, Korrespondenz Abwasser 37, Heft 10, S. 1159
- TA Abfall** 1991; Gesamtfassung der zweiten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) vom 1. April 1991, Bundesanzeiger
- TA Siedlungsabfall**  
1993; 3. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall) vom 14. Mai 1993, Bundesanzeiger
- Taylor, T.** 1989; Zum Transportverhalten der Schwermetalle Cadmium, Chrom, Kupfer und Zink in ausgewählten Böden und Sanden; Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel
- Teichgräber, B.; Stein, A.**  
1997; Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 52. Darmstädter Seminar - Abwassertechnik -, Schriftenreihe WAR 102, Darmstadt
- Trawinski H., Völkl O.**  
1976; Vorentwässerung und Rückgewinnung von Industriesanden in Hydrozyklonen und deren Fraktionierung in Aufstromklassierern, Aufbereitungs Technik, Heft 4, S. 196 - 205, AT Verlag, Wiesbaden
- Trüssel, B.** 1991; Entwicklung eines Passivsammlers zur Erfassung von Benzol, Toluol und Xylol in der Außenluft; Dissertation an der ETH Zürich
- Dr. Weßling** 1999 - 2000, persönliche Mitteilungen
- Wilhelmi, M.** 1994; Laborversuche zur Anreicherung von Schwermetallen und Polycyclischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Sedimenten und Organismen in einem Modellgerinne; Diplomarbeit an der Fakultät Chemie der Universität Karlsruhe (TH)
- Winkler, M.** 1995; Das Transportverhalten von Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen in der gesättigten Zone von Altlasten und Deponien; GWA, Band 153; Herausgeber M. Dohmann; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen



## 10 Anhang

Parameter	Dim.	Mittelwert von 9 (8)		relative Änderung		Großstadt A		14 Proben		relative Änderung		8 Kläranlagen Hitzler		relative Änderung [%]	
		Original	gewaschen	außer pH	Änderung	Sandfanggut	Original	gewaschenn	Äußerer pH	Sandfanggut	Original	gewaschen	Änderung außer pH		
<b>Feststoff</b>															
1 pH-Wert		6,5	7,2	0,7		6,0	7,5	+1,5		6,6	7,2				+0,6
2 EOX	mg/Kg	27,9	9,8	64,9		26,0	1,6	93,8		28,1	10,8				61,6
3 Kohlenwasserstoff	mg/Kg	220,1	143,8	34,7		188,1	58,6	68,8		224,2	154,4				31,1
4 BTEX	mg/Kg	1,8	0,5	72,0 x2		0,8	0,6	25,0		<1	<1				0,0
5 LHKW	mg/Kg	4,9	3,0	38,8		0,02	0,01	50,0		5,6	3,40				38,8
6 PAK (EPA)	mg/Kg	10,5	2,3	78,1		18,4	5,5	70,1		9,5	1,9				80,0
7 PCB (DIN)	mg/Kg	0,6	0,1	78,9		2,6	0,3	90,0		0,3	0,1				67,0
8 Arsen	mg/Kg	2,8	2,4	14,3		3,3	5,2	-57,6 x1		2,8	2,4				14,3
9 Blei	mg/Kg	204,3	161,0	21,2		214,3	268,8	-25,4 x1		204,3	161,0				21,2
10 Cadmium	mg/Kg	0,6	0,5	29,6		1,2	0,9	25,0		0,6	0,4				30,8
11 Chrom (ges)	mg/Kg	33,9	26,8	21,0		45,4	45,8	-0,9		32,5	24,4				24,8
12 Kupfer	mg/Kg	130,8	80,2	38,7		175,7	173,0	1,5		125,2	68,6				45,2
13 Nickel	mg/Kg	32,1	27,7	13,8		28,0	30,5	-8,9		32,6	27,3				16,2
14 Quecksilber	mg/Kg	5,1	3,4	33,8		2,2	5,7	-165,1 x1		5,1	3,4				33,8
15 Thallium	mg/Kg	0,0	0,0	0,0		0,4	0,4	0,0		0,0	0,0				0,0
16 Zink	mg/Kg	362,5	269,7	25,6		803,8	718,7	10,6		307,4	213,6				30,5
17 Cyanide(ges)	mg/Kg	1,1	0,5	57,4		0,1	0,1	-50,0 x1		1,1	0,5				53,5
Eluat															
18 pH-Wert		6,9	7,4	+0,5		6,3	7,4	+1,1		7,0	7,4				+0,4
19 el-Leitfähigkeit	µS/cm	629,4	321,6	48,9		2050,0	500,0	75,6 x1		629,4	299,3				52,4
20 Chlorid	mg/l	10,3	3,0	70,7		74,7	5,5	92,6		2,2	2,7				-21,4
21 Sulfat	mg/l	38,0	46,8	-23,1		17,1	119,9	-601,2 x1		38,0	37,7				0,9
22 Cyanid	µg/l	23,6	11,8	50,0		20,0	10,0	50,0		24,0	12,0				50,0
23 Phenolindex	µg/l	10,0	5,4	46,3		5,0	6,1	-22,0		10,7	5,3				50,3
24 Arsen	µg/l	4,8	3,7	22,7		4,1	3,3	19,7		4,9	3,8				23,0
25 Blei	µg/l	10,6	3,5	66,9		27,2	5,2	80,9		8,5	3,3				61,3
26 Cadmium	µg/l	2,7	2,6	3,3		0,6	0,6	3,3		3,0	2,9				3,3
27 Chrom (ges)	µg/l	14,6	9,2	37,0		6,6	3,0	54,5		15,6	10,0				36,1
28 Kupfer	µg/l	29,7	19,6	34,2		55,3	6,5	88,2		26,5	21,2				20,1
29 Nickel	µg/l	64,4	52,5	18,4		40,3	24,6	39,0		67,4	56,0				16,9
30 Quecksilber	µg/l	0,3	0,1	63,3		0,3	0,1	60,3		0,3	0,1				63,3
31 Thallium	µg/l	0,9	0,9	0,0		1,0	1,0	0,0		0,9	0,9				0,0
32 Zink	µg/l	377,2	235,4	37,6		393,0	87,8	77,7		375,2	253,8				32,4
		x1 nicht für Mittelwert verwendet													
		x2 Mittelwert aus 4 Kläranlagen													



Auswertung nach Gleichung 6.2 und 6.3 für Tabelle 6.6 (Stadt G)

Kornfraktionen [mm]	<0,064	<0,125	<0,25	<0,5	<1	<2	<4	>4	Summe	
<b>Aufgabegut</b>	3,0	6,8	27,3	65,0	75,9	232,4	123,7	82,2	<b>616</b>	
<b>Aufgabegut</b>	0,5	1,1	4,4	10,5	12,3	37,7	20,1	13,3	<b>100</b>	
<b>Organik</b>	0,3	14,3	27,3	15,7	19,2	24,4	34,4	5,5	<b>141</b>	
<b>Organik</b>	0,2	10,1	19,4	11,1	13,6	17,3	24,4	3,9	<b>100</b>	
<b>gew. Sand</b>	1,6	1,8	68,8	250,7	183,8	150,2	115,2	115,4	<b>888</b>	
<b>gew. Sand</b>	0,2	0,2	7,8	28,2	20,7	16,9	13,0	13,1	<b>100</b>	
										<b>zum Vergleich</b>
										<b>errechnet mit Gl. 6.2</b>
<b>Aufgabegut</b>	333	496	455	646	654	520	449	619	<b>545</b>	<b>537</b>
<b>Aufgabegut</b>	169	187	158	140	127	147	212	152	<b>159</b>	<b>154</b>
<b>Aufgabegut</b>	21,3	19,7	15,7	16,1	16,2	12,0	12,4	10,6	<b>13,1</b>	<b>14,3</b>
<b>Organik</b>	1450	1252	1146	651	942	591	1155	641	<b>961</b>	<b>1016</b>
<b>Organik</b>	436	429	308	327	245	214	267	294	<b>287</b>	<b>305</b>
<b>Organik</b>	52,0	55,6	59,3	50,9	31,2	19,1	21,3	22,6	<b>36,5</b>	<b>33,5</b>
<b>gew. Sand</b>	159	282	229	202	290	455	345	305	<b>297</b>	<b>306</b>
<b>gew. Sand</b>	32	69	230	128	125	147	114	109	<b>134</b>	<b>125</b>
<b>gew. Sand</b>	4,3	3,9	4,2	4,0	4,2	3,1	2,4	2,9	<b>3,6</b>	<b>2,9</b>
	<b>Au = (1-GVA) gS + GVA x O</b>									<b>GVA = 29,7 %</b>
	<b>Au (Zn) = 494</b>									
	<b>Au (Pb) = 179</b>									
	<b>Au (PAK) = 13,3</b>									

### Auswertung nach Gleichung 6.2 und 6.3 für Tabelle 6.6 (Stadt H)

Kornfraktionen [mm]		<0,064	<0,125	<0,25	<0,5	<1	<2	<4	>4	Summe		
<b>Aufgabegut</b>	Fraktion (g)	12,3	29,4	93,5	65,7	25,1	18,0	1,2	1,3	<b>247</b>		
<b>Aufgabegut</b>	Fraktion [%]	5,0	11,9	37,9	26,7	10,2	7,3	0,5	0,5	<b>100</b>		
<b>Organik</b>	Fraktion [g]	2,2	118,9	7,0	59,5	33,7	151,4	42,8	2,9	<b>418</b>		
<b>Organik</b>	Fraktion [%]	0,5	28,4	1,7	14,2	8,1	36,2	10,2	0,7	<b>100</b>		
<b>gew. Sand</b>	Fraktion [g]	0,8	1,5	35,0	233,9	187,7	157,8	106,7	33,8	<b>757</b>		
<b>gew. Sand</b>	Fraktion [%]	0,1	0,2	4,6	30,9	24,8	20,8	14,1	4,5	<b>100</b>		
											<b>zum Vergleich</b>	
											<b>Errechnet mit Gl. 6.2</b>	
<b>Aufgabegut</b>	Cu [mg/kg TS]	324	267	226	191	236	214	182	248	<b>226</b>	<b>212</b>	
<b>Aufgabegut</b>	Zn [mg/kg TS]	608	492	469	499	462	426	396	384	<b>482</b>	<b>423</b>	
<b>Organik</b>	Cu [mg/kg TS]	419	376	261	184	236	209	182	248	<b>255</b>	<b>284</b>	
<b>Organik</b>	Zn [mg/kg TS]	879	749	874	607	678	489	367	217	<b>589</b>	<b>567</b>	
<b>gew. Sand</b>	Cu [mg/kg TS]	109	156	230	166	93	146	168	145	<b>146</b>	<b>166</b>	
<b>gew. Sand</b>	Zn [mg/kg TS]	159	282	229	202	290	445	345	369	<b>303</b>	<b>320</b>	
		<b>Au = (1-GVA) gS + GVA x O</b>										
		<b>Au (Zn) =409</b>										
		<b>Au (Cu) =186</b>										
		<b>GVA =36,8 %</b>										

## Berechnung der Abscheideleistung des Hochdruckzyklons

Korngrößeklasse [mm]	Maschenweite		Unterlauf Zyklon		Überlauf Zyklon		1.) Erstellung des Prozentanteils je Korn- klasse des Zyklon-Unterlaufs 2.) Erstellung des Prozentanteils je Korn- klasse des Zyklon-Überlaufs 3.) Ermittlung des Inputs Zyklon aus Abso- lutmassen (Überlauf, Unterlauf) von Ver- such 4.) Verteilen der Absolutmassen auf Korn- klassen 5.) Ermittlung von Input als Kornverteilung (absolut) 6.) Abscheiderate Zyklon als Quotient (Un- terlauf/Input)	
	[mm]	[g]	[g]	[%]	[g]	[%]		
0-63	0	1,16	3,12	1,67	15,16	11,05		
63-125	0,125	18,3	18,3	4,48	36,50	17,55		
125-250	0,25	11,25	11,25	26,29	19,52	42,24		
250-500	0,5	7,84	7,84	16,16	3,79	22,59		
500-1000	1	12,51	12,51	11,26	1,88	4,39		
1000-2000	2	13,1	13,1	17,97	0,00	2,18		
> 2000	4	2,32	2,32	18,82	0,00	0,00		
Summe Sandprobe [g]			69,6 g		86,4 g			
				100,00 %		100,00 %		
Korngrößeklasse [mm]	Unterlauf Zyklon		Überlauf Zyklon		Input Zyklon		Abscheiderate Zyklon [%]	
	[%]	[kG]	[%]	[kG]	[kG]	Unterlauf/Inputx100		
0-63	1,67	1,56	11,05	0,52	2,08		75,20	
63-125	4,48	4,21	17,55	0,82	5,03		83,70	
125-250	26,29	24,68	42,24	1,97	26,65		92,60	
250-500	16,16	15,17	22,59	1,05	16,22		93,50	
500-1000	11,26	10,57	4,39	0,20	10,78		98,10	
1000-2000	17,97	16,87	2,18	0,10	16,97		99,40	
> 2000	22,16	20,80	0,00	0,00	20,80		100,00	
Summe Sand Betriebszustand [kG]	100,00 %	93,85 kG	100,00 %	4,67 kG	98,52 kG			