

*Versuchsauswertung Umweltverfahrenstechnik*  
**BODENWASCHEN**

Florian Enzenberger (2033971)  
Daniel Ludwig (2033774)  
David Perez (-1)  
Sebastian Werner (2033878)

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. E. Endres-Beckhäuser

Versuch durchgeführt am 29.6.05

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>1</b>
2.1	Bilanzierung . . . . .	1
2.1.1	Bilanz um den Einlauf . . . . .	2
2.1.2	Bilanz um den Unterlauf . . . . .	2
2.1.3	Bilanz um den Oberlauf . . . . .	3
2.1.4	Masseausbringen, Flüssigkeitsausbringen und Volumensplit . . . . .	3
2.2	Ermittlung der Trennfunktion . . . . .	4
2.3	Erstellung einer Dekontaminationscharakteristik . . . . .	5
2.4	Sanierungsergebnis eines kontaminierten Bodens . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Diskussion</b>	<b>7</b>
3.1	Bilanzierung . . . . .	7
3.2	Trennfunktionen . . . . .	8
3.3	Erreichbarkeit des Sanierungsergebnisses . . . . .	8
	<b>Anhang</b>	<b>I</b>
A	Abbildungsverzeichnis . . . . .	I
B	Tabellenverzeichnis . . . . .	I
C	Literatur . . . . .	I

## 1 Versuchsbeschreibung

Die physikalische Bodenwäsche ist für die Reinigung von kontaminierten Böden von enormer Bedeutung. Gerade im Bereich der Altlastensanierung ist durch ein gestiegenes Umweltbewusstsein Bedarf vorhanden.

Da die Kontamination an der Partikeloberfläche durch Adsorption vorliegt, erreicht man durch die Abtrennung der feineren Korngrößenfraktion mit einer großer spezifischen Oberfläche ein gutes Sanierungsergebnis. Die Klassierung findet in der Praxis, wie auch im durchzuführenden Versuch in einem Hydrozyklon statt. Als bodenähnliche Modellsubstanz findet Quarz mit einer Partikelgröße  $< 100 \mu m$  Verwendung. Es sind, wie in Tabelle 1 angegeben, drei Trennversuche mit unterschiedlichen Hydrozyklonen durchzuführen.

	Versuch 1 Hydrozyklon II	Versuch 2	Versuch 3 Hydrozyklon I
Durchmesser	25 mm		50 mm
Einlaufdüse	3 x 7 mm		7 x 7 mm
Oberlaufdüse	8 mm		8 mm
Unterlaufdüse	3,0 mm	3,5 mm	3,0 mm

Tabelle 1: Versuchsbedingungen

Es werden die Volumenströme in Ober- und Unterlauf, der Feststoffgehalt im Unterlauf sowie die Korngrößenverteilungen in Ober- und Unterlauf gemessen. Anschließend soll die Bilanzierung für jede Hydrozyklonanlage vervollständigt, die Trennfunktion ermittelt und eine Dekontaminationscharakteristik erstellt werden.

Folgende Daten sind bekannt:

Feststoffdichte $\rho_s$	2650 kg/m <sup>3</sup>
Feststoffgehalt der Aufgabetrübe $c_{s,e}$	100 g/l
Ansatzmenge	10 l
Aufgabedruck	2 bar

Tabelle 2: Versuchsdaten

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Bilanzierung

In den drei Versuchen werden Unterlaufvolumen  $V_u$ , Oberlaufvolumen  $V_o$ , Unterlaufmasse  $m_u$  sowie die für den Trennvorgang benötigte Zeit  $t$  gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 3 aufgelistet. Nun können sämtliche Stoffströme  $i$  bilanziert werden, wobei im folgenden für den

	Unterlauf- volumen $V_u$ ml	Oberlauf- volumen $V_o$ ml	Unterlauf- masse $m_u$ g	Trenn- dauer $t$ s
Versuch I	89,0	935	94,0	4,2
Versuch II	130,0	840	139,6	6,4
Versuch III	179,0	935	185,2	3,3

Tabelle 3: Messwerte für die Bilanzierung

Einlauf  $i = e$ , für den Unterlauf  $i = u$  und für den Oberlauf  $i = o$  gilt. Die verwendeten Stoffdaten sind in Tabelle 2 wiedergegeben. Der Suspensionsvolumenstrom  $\dot{V}_i$  ergibt sich zu

$$\dot{V}_i = \frac{V_i}{t} \quad (1)$$

wobei gilt

$$V_e = V_u + V_o \quad (2)$$

### 2.1.1 Bilanz um den Einlauf

Der Feststoffmassenstrom im Einlauf  $\dot{m}_e$  ergibt sich mit der bekannten Feststoffkonzentration  $c_{s,e}$  zu

$$\dot{m}_e = \dot{V}_e \cdot c_{s,e} \quad (3)$$

Der Feststoffvolumenanteil  $\Phi_{s,e}$  ergibt sich aus bekannter Feststoffkonzentration  $c_{s,e}$  und Feststoffdichte  $\rho_s$  zu

$$\Phi_{s,e} = \frac{c_{s,e}}{\rho_s} \quad (4)$$

Mit dem Flüssigkeitsvolumenanteil

$$\Phi_{f,e} = 1 - \Phi_{s,e} \quad (5)$$

und der bekannten Fluidsdichte  $\rho_f$  ergibt sich die Trübedichte

$$\rho_{Tr,e} = \Phi_{f,e}\rho_f + \Phi_{s,e}\rho_s \quad (6)$$

Die Ergebnisse für den Einlauf sind in Tabelle 4 wiedergegeben.

Ver- such Nr.	Suspensionsvo- lumenstrom $\dot{V}_e$ $m^3/h$	Feststoffmas- senstrom $\dot{m}_e$ $kg/h$	Feststoffkon- zentration $c_{s,e}$ $g/l$	Trübe- dichte $\rho_{Tr,e}$ $kg/m^3$	Feststoffvolu- menanteil $\Phi_{s,e}$
I	0,88	87,8	100,0	1062	0,038
II	0,54	54,5	100,0	1062	0,038
III	1,21	121,2	100,0	1062	0,038

Tabelle 4: Bilanzierung für den Einlauf

### 2.1.2 Bilanz um den Unterlauf

Die Trübedichte im Unterlauf  $\rho_{Tr,u}$  ist definiert als

$$\rho_{Tr,u} = \frac{m_u}{V_u} \quad (7)$$

und ergibt mit Fluid- und Feststoffdichte  $\rho_f$  und  $\rho_s$  den Feststoffvolumenanteil

$$\Phi_{s,u} = \frac{\rho_{tr} - \rho_f}{\rho_s - \rho_f} \quad (8)$$

Die Feststoffkonzentration ergibt sich zu

$$c_{s,u} = \Phi_{s,u} \cdot \rho_s \quad (9)$$

und der Massenstrom entsprechend zu

$$m_u = c_{s,u} \cdot \dot{V}_u \quad (10)$$

Die Ergebnisse für den Unterlauf sind in Tabelle 5 auf der nächsten Seite wiedergegeben.

Ver- such Nr.	Suspensionsvo- lumenstrom $\dot{V}_o$ $m^3/h$	Feststoffmas- senstrom $\dot{m}_o$ $kg/h$	Feststoffkon- zentration $c_{s,o}$ $g/l$	Trübe- dichte $\rho_{Tr,o}$ $kg/m^3$	Feststoffvolu- menanteil $\Phi_{s,o}$
I	0,0763	6,9	90,2	1056	0,034
II	0,0730	8,7	118,6	1074	0,045
III	0,1947	10,8	55,6	1035	0,021

Tabelle 5: Bilanzierung für den Unterlauf

### 2.1.3 Bilanz um den Oberlauf

Der Feststoffmassenstrom im Oberlauf ergibt sich aus

$$\dot{m}_o = \dot{m}_e - \dot{m}_u \quad (11)$$

Die Feststoffkonzentration ist definiert als

$$c_{s,o} = \frac{\dot{m}_o}{\dot{V}_o} \quad (12)$$

Der Feststoffvolumenanteil  $\Phi_{s,o}$  wird nun analog Gleichung 4, die Trübedichte  $\rho_{Tr,o}$  analog Gleichung 6 berechnet. Die Ergebnisse für den Oberlauf sind in Tabelle 6 wiedergegeben.

Ver- such Nr.	Suspensionsvo- lumenstrom $\dot{V}_u$ $m^3/h$	Feststoffmas- senstrom $\dot{m}_u$ $kg/h$	Feststoffkon- zentration $c_{s,u}$ $g/l$	Trübe- dichte $\rho_{Tr,u}$ $kg/m^3$	Feststoffvolu- menanteil $\Phi_{s,u}$
I	0,80	80,9	100,9	1063	0,038
II	0,47	45,8	97,1	1060	0,037
III	1,02	110,3	108,5	1068	0,041

Tabelle 6: Bilanzierung für den Oberlauf

### 2.1.4 Masseausbringen, Flüssigkeitsausbringen und Volumensplit

Aus den errechneten Daten können nun das Masseausbringen

$$R_{mG} = \frac{\dot{m}_u}{\dot{m}_e} \quad (13)$$

das Fluidausbringen

$$R_f = \frac{\dot{V}_u (1 - \Phi_{s,u})}{\dot{V}_e (1 - \Phi_{s,e})} \quad (14)$$

und der Volumensplit

$$S = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_u} \quad (15)$$

berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 auf der nächsten Seite wiedergegeben.

Versuch	Masseausbringen $R_{mG}$	Flüssigkeitsausbringen $R_f$	Volumensplit $S$
I	7,8%	8,7%	0,91
II	15,9%	13,3%	0,87
III	8,9%	16,3%	0,84

Tabelle 7: Masseausbringen, Flüssigkeitsausbringen und Volumensplit

## 2.2 Ermittlung der Trennfunktion

Der Wert der Trennfunktion ergibt sich analog [1, Formel (6)]

$$f_A(d) = R_{mF}f_f(d) + R_{mG}f_g(d) = R_{mG}f_g(d) + (1 - R_{mG})f_f(d) \quad (16)$$

und [1, Formel (7)]

$$T_g(d) = \frac{R_{mG}f_g(d)}{f_A(d)} \quad (17)$$

dann

$$T(d) = \frac{R_{mG} \cdot f_g(d)}{R_{mG}f_g(d) + (1 - R_{mG})f_f(d)} \quad (18)$$

Die Werte für  $f_f(d)$  (Oberlauf) und  $f_g(d)$  (Unterlauf) sind aus den Messungen der Partikelgrößenverteilung mit dem MASTERSIZER bekannt. Hiermit ergibt sich folgendes Diagramm:

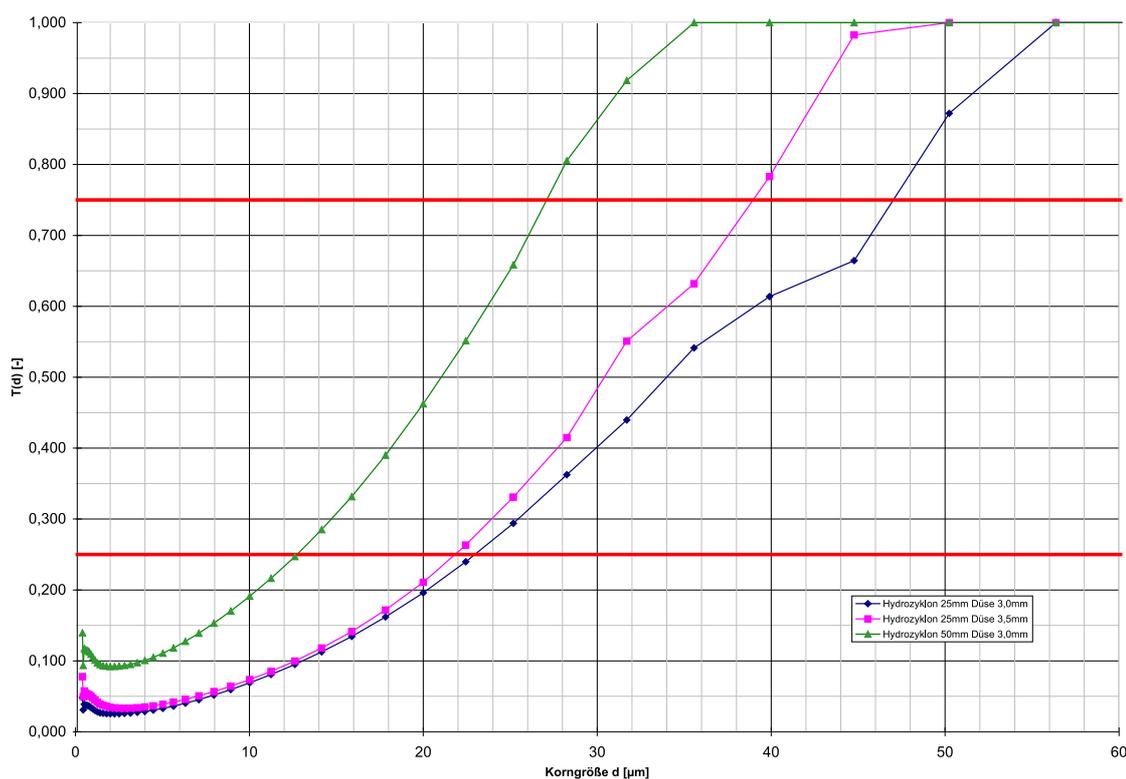


Abbildung 1: Trennfunktionen der drei untersuchten Hydrozyklone

Durch Ablesen aus Abbildung 1 ergeben sich die Werte für die Trennschärfe

$$\kappa = \frac{d_{75}}{d_{25}} \quad (19)$$

sowie die Trennkorngröße  $d_{50}$ .

Versuch	$d_{75}$ $\mu m$	$d_{50}$ $\mu m$	$d_{25}$ $\mu m$	$\kappa$
I	47	34	23	2,04
II	39	30	22	1,77
III	27	21	13	2,08

Tabelle 8: Trennschärfe und Trennkorngröße

### 2.3 Erstellung einer Dekontaminationscharakteristik

Zur Erstellung der Dekontaminationscharakteristik wird auf die Tabelle [1, Seite 8] zurückgegriffen, welche in vervollständigter Form in Anhang 2 zu finden ist.

Hierzu wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Schadstoffmenge:  $c_i \mu_i = c_i \cdot \mu_i$
- Massenausbringen:  $\sum \mu_i$
- Schadstoffinhalt:  $\sum c_i \mu_i$
- Schadstoffgehalt:  $\frac{\sum c_i \mu_i}{\sum \mu_i}$

Mit diesen Daten lässt sich nun ein Schaubild analog [1, Bild 7] erstellen, welches in Abbildung 2 auf der nächsten Seite wiedergegeben ist.

Laut Aufgabenstellung sollen die Grenzwerte der Sanierung  $100 \text{ mg/kg}$  bzw.  $300 \text{ mg/kg}$  MKW sein. Mit Hilfe der Dekontaminations-Charakteristik lässt sich nun ein Sanierungsziel der jeweiligen Grenzwerte aufstellen. Dabei ist zu beachten, dass es sich um nicht ideale Trennungen handelt und somit ein Faktor von 1.3 bei der Trennkorngröße mit einbezogen wird.

Die Sanierung für den Grenzwert von  $100 \text{ mg/kg}$  MKW lässt sich nun wie folgt beschreiben:

Mit  $100 \text{ mg/kg}$  erhält man aus dem Schnittpunkt mit der D-Kurve ein  $R_{mG} = 0.82$  mit einer idealen Trennkorngröße von ca.  $16 \mu m$ , d.h. reale Trennkorngröße von ca.  $20,8 \mu m$ . Mit dieser realen Trennkorngröße erhält man logischerweise eine neue Masseausbringung  $R_{mG,real} = 0,78$ . Der Schnittpunkt mit der R-Kurve mit der Ausbringenslinie  $R_{mG,real} = 0,78$  ergibt einen Schadstoffgehalt des hochkontaminierten Reststoffes von  $13000 \text{ mg/kg}$  MKW.

Fasst man dies in Worten noch einmal zusammen, so ergibt sich für einen Grenzwert von  $< 100 \text{ mg/kg}$  MKW eine Trennkorngröße von  $20,8 \mu m$  mit einer Bodenausbringung von 78 % und einer Reststoffausbringung von 22 %. In dem aufkonzentrierten Reststoff hat man einen Schadstoffgehalt von  $13000 \text{ mg/kg}$ .

Für einen Grenzwert von  $< 300 \text{ mg/kg}$  MKW erhält man analog eine ideale Trennkorngröße von  $5,2 \mu m$  (real  $6,8 \mu m$ ) mit einer Bodenausbringung von 92 % und einer Reststoffausbringung von 8 %. Somit wird der Reststoff auf ca.  $30000 \text{ mg/kg}$  aufkonzentriert.

### 2.4 Sanierungsergebnis eines kontaminierten Bodens

Mit Hilfe der erhaltenen Korngrößenverteilungen des Unterlaufs und der vorgegebenen Schadstoffverteilung kann man den Schadstoffgehalt des ausgebrachten Materials mit den Tabellen 9 bis 11 berechnen [1, Seite 5]. Dabei soll angenommen werden das eine vorausgeschaltete Klassierstufe bereits 60 Massen-% des zu reinigenden Materials mit einem Schadstoffgehalt von  $30 \text{ mg/kg}$  MKW ausgebracht wurden. Dies hat zur Folge, dass sich der gesamte Schadstoffgehalt aus den

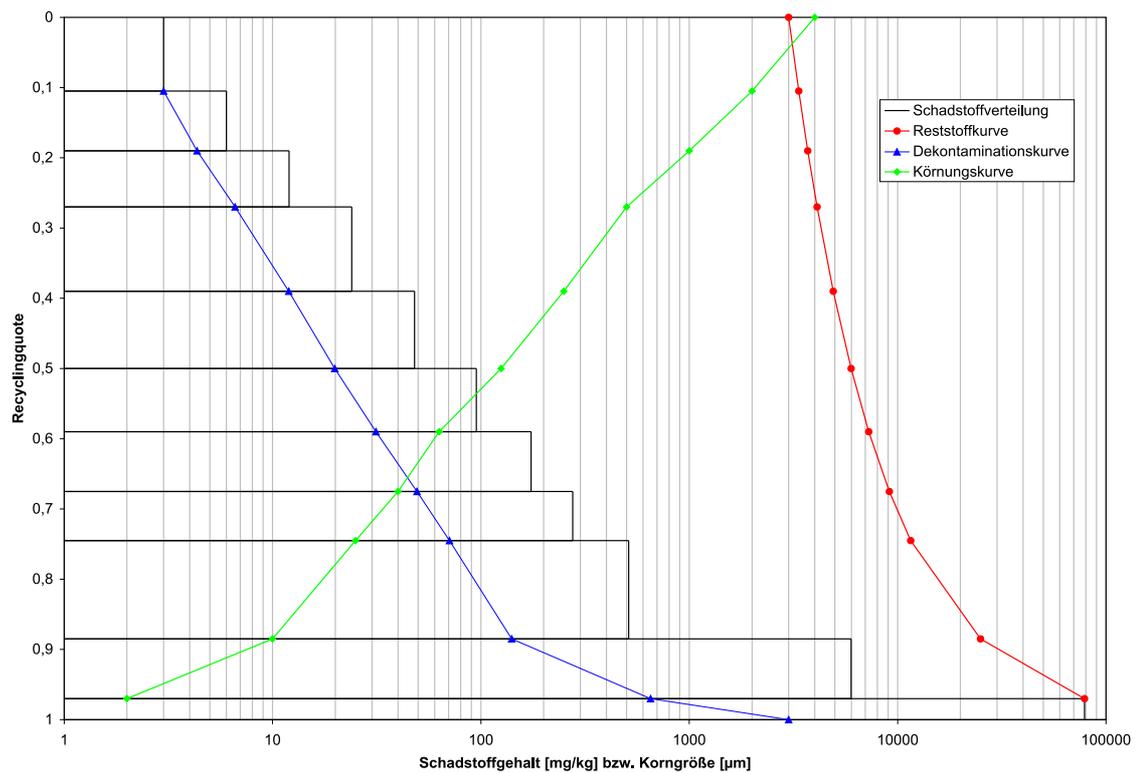


Abbildung 2: Dekontaminationscharakteristik

jeweiligen Anteilen der Trennschritte (Kassierung 60 % und Hydrozyklon 40 %) zusammensetzt. Der Restschadstoffgehalt im aufbereiteten Boden berechnet sich durch Multiplikation des Gesamtschadstoffgehaltes mit dem Masseausbringen  $R_{mG}$ .

Fraktion $i$	Korngrößen- klasse $d_i$ $\mu m$	Schadstoff- konzentration $c_i$ $mg/kg$	Massenanteil $\mu_i$	Schadstoffinhalt $\mu_i c_i$ $mg/kg$
	123,6 – 223,5	48	0,002	0,072
1	56,1 – 123,6	95	0,006	0,613
2	37,8 – 56,1	174	0,037	6,447
3	20,9 – 37,8	276	0,162	44,681
4	9,48 – 20,9	512	0,386	197,696
5	1,95 – 9,48	5978	0,364	2177,983
6	0,5 – 1,95	78916	0,039	3151,367
<b>Schadstoffgehalt:</b>				5578,861
<b>gesamter Schadstoffgehalt:</b>				2249,544
<b>Restschadstoffgehalt:</b>				144,4

Tabelle 9: Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch I

Fraktion $i$	Korngrößen- klasse $d_i$ $\mu m$	Schadstoff- konzentration $c_i$ $mg/kg$	Massenanteil $\mu_i$	Schadstoffinhalt $\mu_i c_i$ $mg/kg$
	123,6 – 223,5	48	0,008	0,373
1	56,1 – 123,6	95	0,036	3,392
2	37,8 – 56,1	174	0,042	7,281
3	20,9 – 37,8	276	0,153	42,172
4	9,48 – 20,9	512	0,347	177,660
5	1,95 – 9,48	5978	0,367	2194,200
6	0,5 – 1,95	78916	0,051	4055,401
<b>Schadstoffgehalt:</b>				6480,042
<b>gesamter Schadstoffgehalt:</b>				2610,017
<b>Restschadstoffgehalt:</b>				194,4

Tabelle 10: Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch II

Fraktion $i$	Korngrößen- klasse $d_i$ $\mu m$	Schadstoff- konzentration $c_i$ $mg/kg$	Massenanteil $\mu_i$	Schadstoffinhalt $\mu_i c_i$ $mg/kg$
	123,6 – 223,5	48	0	0
1	56,1 – 123,6	95	0,002	0,179
2	37,8 – 56,1	174	0,021	3,645
3	20,9 – 37,8	276	0,115	31,613
4	9,48 – 20,9	512	0,353	180,914
5	1,95 – 9,48	5978	0,458	2740,585
6	0,5 – 1,95	78916	0,049	3884,852
<b>Schadstoffgehalt:</b>				6841,789
<b>gesamter Schadstoffgehalt:</b>				2754,715
<b>Restschadstoffgehalt:</b>				468,3

Tabelle 11: Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch III

### 3 Diskussion

#### 3.1 Bilanzierung

Die Bilanzierung der Hydrozyklone in Kapitel 2.1 liefert für den zweiten Versuch das größte Massenausbringen und für Versuch III ein, gegenüber Versuch I geringfügig erhöhtes Massenausbringen. Dies liegt darin begründet, dass im zweiten Versuch eine größere Unterlaufdüse verwendet wird.

Das Fluidausbringen nimmt hingegen mit den Versuchen gleichmäßig zu. Bei Versuch II lässt sich das gestiegene Fluidausbringen wiederum mit der größeren Unterlaufdüse erklären. Das Verhalten bei Versuch III mit dem größten Fluidausbringen, ist wahrscheinlich auf den größeren Zyklonquerschnitt und die daraus resultierenden veränderten Volumenstromverhältnisse zurückzuführen.

Der Volumensplit, d.h. der Anteil des Volumenstroms am Oberlauf nimmt mit den Versuchen kontinuierlich ab. Dieses Verhalten ist bei Versuch II wiederum auf die größere Unterlaufdüse und bei Versuch III auf den veränderten Gesamt volumenstrom zurückzuführen.

### 3.2 Trennfunktionen

Die in Kapitel 2.2 ermittelten Trennfunktionen weisen für die Versuche I bis III Trennschärfen  $\kappa$  von 2,04, 1,77 und 2,08 auf. Das heißt, das Einsetzen einer größeren Unterlaufdüse führt zu einer besseren Trennschärfe.

### 3.3 Erreichbarkeit des Sanierungsergebnisses

Als Sanierungsziel für die Behandlung eines fiktiven mineralölkontaminierten Bodens werden 100 bzw. 300  $mg/kg$  zulässige Restschadstoffbelastung angenommen. In Kapitel 2.4 werden als Restbelastung für die jeweiligen Versuche 144,4, 194,4 und 468,3  $mg/kg$  ermittelt.

Dies bedeutet, dass für einen Grenzwert von 100  $mg/kg$  das Sanierungsziel mit keiner Trennung erreicht wird. Liegt der Grenzwert bei 300  $mg/kg$  liefern Trennung I und II gute Ergebnisse, Trennung III überschreitet den Grenzwert jedoch immer noch um mehr als die Hälfte.

## Anhang

### A Abbildungsverzeichnis

1	Trennfunktionen der drei untersuchten Hydrozyklone . . . . .	4
2	Dekontaminationscharakteristik . . . . .	6

### B Tabellenverzeichnis

1	Versuchsbedingungen . . . . .	1
2	Versuchsdaten . . . . .	1
3	Messwerte für die Bilanzierung . . . . .	1
4	Bilanzierung für den Einlauf . . . . .	2
5	Bilanzierung für den Unterlauf . . . . .	3
6	Bilanzierung für den Oberlauf . . . . .	3
7	Masseausbringen, Flüssigkeitsausbringen und Volumensplit . . . . .	4
8	Trennschärfe und Trennkorngröße . . . . .	5
9	Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch I . . . . .	6
10	Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch II . . . . .	7
11	Schadstoffgehalt im Unterlauf - Versuch III . . . . .	7

### C Literatur

[1] THAUVELDER, Thomas ; SCHNEIDER, Martin: *Versuchsbeschreibung Bodenwaschen*. Erlangen: Lehrstuhl fuer Umweltverfahrenstechnik und Recycling, Apr 2000