

# Schwertrübezyklonierung am Steirischen Erzberg

**Masterarbeit von  
Christoph Blasch, BSc**



**Masterstudium Rohstoffverarbeitung  
an der Montanuniversität Leoben**

**Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung**

Betreut durch:

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Böhm  
Dipl.-Ing. Armin Kogelbauer, VA Erzberg GmbH

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## **Affidavit**

I declare in lieu of oath that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

14.04.2010

## **Danksagung**

Bedanken möchte ich mich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Andreas Böhm für die Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung meiner Master-Arbeit. Weiters möchte ich Dipl.-Ing. Armin Kogelbauer und den Mitarbeitern der VA Erzberg GmbH für die Möglichkeit der Erstellung dieser Arbeit und die Unterstützung dabei danken.

## Kurzfassung

Zur Spateisensteinanreicherung im Feinkorn (2,5/ 0,1 mm) am Steirischen Erzberg sollen die Grenzen der Aufbereitbarkeit mittels Dichtesortierung im Fliehkraftfeld versuchstechnisch ermittelt werden. Erfahrungswerte, auf die eine Computersimulation aufbauen könnte, fehlen, Versuchsanlagen zur Schwertrübezyklonierung sind im näheren Umkreis nicht verfügbar. In dieser Arbeit wird ein Versuchsstand zur Dichtesortierung mit einem Schwertrübezyklon für Pilotversuche mit dem kleinsten handelsüblichen Schwertrübezyklon geplant, ausgelegt und maschinenbaulich umgesetzt. Die auslegungsrelevanten Grundlagen der einzelnen Bauteile (Pumpe, Zyklon, Pumpensumpf, Leitungen) sowie die prozesstechnische Umsetzung für eine im Kreislauf geführte Pilotanlage werden im ersten Teil diskutiert. Im zweiten Teil der Arbeit wird das Trennverhalten eines Schraubenklassierers analysiert und das Grobgut > 0,1 mm, welches bisher verhaldet wurde, auf die Verwachsungsverhältnisse von Spateisenstein hin untersucht. Die Ergebnisse der Schwimm-Sink-Analyse und der Analyse am Frantz-Isodynamik Scheider weisen einen Spateisensteinanteil in der Kornklasse 2,5/0,5 mm von durchschnittlich 71,6 % und in der Kornklasse 0,5/0,1 mm von 70,9 % auf, bei einem Aufschlussgrad von 72 %. Bei gleichem bergtechnischem Aufwand kann bei analysenscharfer Trennung bei einer Trenndichte von 3,1 g/cm<sup>3</sup> das Konzentratausbringen um etwa 100.000 t/a gesteigert werden. Der in dieser Arbeit entwickelte Versuchsstand wird zurzeit im Rahmen einer vom FFG genehmigten Projektstudie maschinenbaulich umgesetzt.

## **Abstract**

Mineral processing test work at the “Steirischer Erzberg” shall show whether enrichment of sideroplesite by means of gravity separation using centrifugal force is possible in a size range  $-2,5 +0,1$  mm. Necessary experimental data which computer simulations could be based on are not available and suitable pilot plants are out of reach. The objective of the thesis thus focuses on the development, design and implementation of a pilot plant for dense media separation in a cyclone of the smallest size available. In its first part this paper considers the design relevant function and interaction of all the components needed for this test rig (centrifugal pump, dense media cyclone, pump box, pipes) as well as its technical design for a looped application. The second part investigates the separation by a spiral classifier and the intergrowth characteristics of sideroplesite in its coarse fraction ( $>0.1$  mm), which has been dumped so far. The float-and-sink analysis and an analysis on a Frantz Magnetic Separator show a sideroplesite content of 71.6 % in the fraction of 2.5/0.5 mm and 70.9 % in the fraction of 0.5/0.1 mm, with a liberation based on susceptibility analysis of 72 %. The concentrate output at the same mining effort can be increased by about 100,000 t/a, assuming a perfect separation at a density of  $3.1 \text{ g/cm}^3$ . The pilot plant developed in this paper is presently being implemented within an FFG project.

**Inhaltsverzeichnis**

1 Aufgabenstellung.....	7
2 Zusammenfassung.....	8
3 Theoretische Aspekte.....	10
3.1 Eigenschaften einer Schwertrübe .....	10
3.2 Dichtesortierung im Schwertrübezyklon .....	14
3.3 Vergleich von Kreiselpumpen für Wasser und Trüben.....	18
3.4 Sumpfauslegung und Installationen .....	31
4 Verwachsungsanalyse am Schraubenklassierer .....	33
4.1 Mineralogie .....	33
4.2 Gutstrom- und Aggregatbeschreibung .....	35
4.3 Probenahme.....	37
4.4 Probenverarbeitung und Untersuchungen .....	39
4.4.1 Bestimmung des Feststoffgehalts.....	39
4.4.2 Siebanalyse .....	40
4.4.3 Untersuchungen am Frantz-Isodynamik-Scheider.....	41
4.4.4 Schwimm-Sink-Analyse .....	41
4.4.5 Stoffdichtebestimmung .....	42
4.4.6 Chemische Analyse .....	42

4.5 Auswertung und Interpretation .....	44
4.5.1 Feststoffgehalte .....	44
4.5.2 Korngrößenverteilung und Trenncharakteristik .....	44
4.5.3 Feststoffinhaltsausbringen .....	45
4.5.4 Bilanzierung von Feststoff und Wasser.....	46
4.5.5 Teilungskurve .....	46
4.5.6 Eisen- und Mineralverteilung .....	47
4.5.7 Merkmalsklassenanalyse .....	50
4.6 Schlussfolgerung.....	62
5 Versuchsstand zur Dichtesortierung im Schwertrübezyklon.....	65
5.1 Generelles Layout und Auslegungsparameter .....	65
5.2 Komponenten.....	67
5.2.1 Die Trübe .....	67
5.2.2 Der Zyklon .....	68
5.2.3 Die Trübepumpe .....	71
5.2.4 Der Pumpensumpf.....	76
5.2.5 Das Rührwerk .....	78
5.2.6 Verrohrung und Armaturen .....	79
5.2.7 Mögliche Arbeitsabläufe für das Hoch- und Niederfahren der Anlage ..	80
6 Quellen.....	82
7 Anhang.....	83

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Endgültiges Layout für die Fertigung des Schwertrübezyklonstandes	9
Abbildung 2: Verlauf typischer Fließkurven von zeitunabhängigen nicht-Newton'schen Medien (1 Newton'sches Medium; 2 plastisches (Bingham) Medium; 3 strukturviskoses Medium; 4 dilatantes Medium) [1].....	10
Abbildung 3: Typischer Verlauf von vielfach an Schwertrüben ermittelten Fließkurven [1].....	11
Abbildung 4: Zentrifugalkraft ( $F_Z$ ), Auftriebskraft ( $F_A$ ) und Widerstandskraft ( $F_R$ ) auf ein Korn im Schwertrübezyklon .....	16
Abbildung 5: Dichtentrennung im Schwertrübezyklon [1] .....	16
Abbildung 6: Konstruktion von Trübe-Kreiselpumpen mit und ohne Verschleißteile [4] .....	19
Abbildung 7: Laufräder für Trüben und hoch effiziente Wasseranwendungen [4]	20
Abbildung 8: Laufradauswahl anhand der spezifischen Geschwindigkeit [4] .....	21
Abbildung 9: Berechnung des NPSHA-Werts zur Kavitationskontrolle [4].....	22
Abbildung 10: Hydrozyklonstand am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Erstellung des Kennlinienfelds für die eingebaute Pumpe .....	23
Abbildung 11: Kennlinienfeld der Laborpumpe des Hydrozyklonstandes mit Systemkurve und Betriebspunkten.....	25
Abbildung 12: Diagramm zur Berechnung des HR- und ER-Werts [4] .....	26
Abbildung 13: Diagramm zur Berechnung des HR- und ER-Werts anhand der modifizierten Reynolds-Zahl [4].....	28
Abbildung 14: Beurteilung des hydraulischen Gradienten und der damit verbundenen Sedimentationsneigung [4] .....	29
Abbildung 15: Sedimentationsparameter nach Durand für weite Korngrößenverteilungen [4].....	30
Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung der chemischen Zusammensetzung der karbonatischen Eisenträger Spateisenstein und Ankerit [8] .....	34
Abbildung 17: Skizze und Abmessungen des Schraubenklassierers .....	37
Abbildung 18: Probenahmestelle des Feinguts, Überlauf.....	38

Abbildung 19: Probenahmestelle des Grobguts, Abwurfschurre des Überlaufs ...	38
Abbildung 20: Probenahmestelle der Aufgabe, Zulauf .....	39
Abbildung 21: Schraubenklassierer 136C: Darstellung der Korngrößenverteilung der Feststoffinhalte von Aufgabe und Produkten im GGS-Netz .....	45
Abbildung 22: Schraubenklassierer 136C: Grobgutbezogene Teilungskurve. Verstetigung durch Flächenausgleich .....	47
Abbildung 23: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-40 $\mu\text{m}$ , Darstellung der Summen-Massenanteile über dem Erregerstrom.....	51
Abbildung 24: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 $\mu\text{m}$ , Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe .....	53
Abbildung 25: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 $\mu\text{m}$ , Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe .....	53
Abbildung 26: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 $\mu\text{m}$ , Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein.....	55
Abbildung 27: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 40 $\mu\text{m}$ , Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe .....	56
Abbildung 28: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 40 $\mu\text{m}$ , Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein.....	56
Abbildung 29: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung der Dichtekurve .....	57
Abbildung 30: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe .....	59
Abbildung 31: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein .....	59
Abbildung 32: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für das spezifische Volumen .....	61

Abbildung 33: Layout des Versuchstands für Schwertrübezyklonierung .....	66
Abbildung 34: Hydrozyklon, Modell D6B-12°-839 der Firma FL Smith Krebs Europe GmbH .....	69
Abbildung 35: Kennlinienfeld des verwendeten Hydrozyklons, Modell D6B-12°-839 der Firma FL Smith Krebs Europe GmbH [11].....	70
Abbildung 36: Kennlinienfeld der Trübepumpe des Typs millMAX 3x4-9 von FL Smith Krebs Europe GmbH [11].....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung des Pumpenkennlinienfelds der Laborpumpe des Hydrozyklonstandes .....	24
Tabelle 2: Zusammensetzung der Wertminerale Ankerit und Spateisenstein [8] .	33
Tabelle 3: Schraubenklassierer 136C: Ergebnisse der Siebanalyse .....	44
Tabelle 4: Schraubenklassierer 136C: Berechnung und Ergebnis des Gaußausgleichs über die Fraktionen der Siebanalyse .....	45
Tabelle 5: Schraubenklassierer 136C: Bilanztafel; Betrachtung der Phasenverhältnisse .....	46
Tabelle 6: Schraubenklassierer 136C: Gesamtbilanz der chemischen Analyse in den Kornfraktionen .....	48
Tabelle 7: Schraubenklassierer 136C: Gesamtbilanz der Mineralinhalte in den Kornfraktionen .....	49
Tabelle 8: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-40 µm, Ergebnis der am Frantz-Isodynamik-Scheider ermittelten Merkmalsklassen .....	50
Tabelle 9: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-40 µm, Chemische Analyse und Mineralgehalte der auf dem Frantz-Isodynamik Scheider ermittelten Merkmalsklassen.....	52
Tabelle 10: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-125 µm, Berechnung des Aufschlussgrads von Spateisenstein.....	54
Tabelle 11: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Ergebnis der Schwimm-Sink Analyse.....	57

Tabelle 12: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Chemische Analyse und Mineralgehalte der in der Schwimm-Sink Analyse ermittelten Merkmalsklassen .....	58
Tabelle 13: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Berechnung des Aufschlussgrads von Spateisenstein .....	58
Tabelle 14: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Ergebnisse der Stoffdichtebestimmung mit spezifischen Volumina .....	60
Tabelle 15: Prognose einer bestmöglichen Trennung mit einem Schwertrübezyklon bei einer Trenndichte von 3,1 g/cm <sup>3</sup> .....	63
Tabelle 16: Übersicht über die geplante maximale Zusammensetzung der Schwertrübe mit und ohne Probe .....	68
Tabelle 17: Massenaufstellung der Versuchsanlage .....	77
Tabelle 18: Berechnung der statischen Sicherheit für die ausgewählten Profile ..	78

## 1 Aufgabenstellung

Zur Erhöhung des Erzkonzentratausbringens am Steirischen Erzberg soll auch der Kornanteil  $<2,5$  mm der Fertigerzaufgabe auf die Aufbereitungsanlage genutzt werden. Der Feingutunterlauf der Waschsiebung läuft einem Schraubenklassierer vor, dessen Grobgutaustrag verhaldet und dessen Feingutaustrag in Schlammteichen gestapelt wird. Im Grobgutanteil  $2,5/0,1$  mm mit einer Masse von etwa 150.000 t/a soll durch Dichtesortierung ein Konzentrat mit der erforderlichen Qualität (Fe, SiO<sub>2</sub>, Alkalien) angereichert werden. Es soll erarbeitet werden, ob Schwertrübescheidung im Fliehkraftfeld in diesem extremen Körnungsbereich noch einen Sortiereffekt erzielt. Aufgrund mangelnder Erfahrungswerte fallen Computersimulationsprogramme, die auf Trennergebnissen basieren, aus. Folgerichtig ist ein Schwertrübezyklonstand zu planen und umzusetzen. Das Rohgut muss auf seine Eignung geprüft werden.

## 2 Zusammenfassung

Die Untersuchung des Schraubenklassierers ergab bei einem Feststoffausbringen im Grobgut von 67,8 % einen Trennschnitt bei 100 µm. Die Untersuchungen am Grobgut des Schraubenklassierers (2,5/0,1 mm) ergaben einen Eisengehalt von 31,77 %, einen Spateisensteinanteil von 70,96 % und einen SiO<sub>2</sub>-gehalt von 10,27 %. Merkmalsklassenanalysen nach der Dichte und der Suszeptibilität lassen auf einen großen Anteil an Spateisenstein und eine sehr enge Verwachsung zwischen Spateisenstein und silikatreichen Mineralen bis unter eine Korngröße von 100 µm schließen. So konnte in der Fraktion 100/40 µm des Grobgutes in einer Merkmalsklasse des Frantz-Isodynamik-Scheiders <0,15 A noch 3,29 % SiO<sub>2</sub> festgestellt werden. In gröberen Kornklassen steigt der Quarzgehalt im Spateisensteinkonzentrat einer Merkmalsklassenanalyse auf bis zu 6,75 % an. Eine bestmögliche Trennung der Grobgutfraktion 2,5/0,5 mm in einem Schwertrübezyklon bei einer Trenndichte von 3,1 g/cm<sup>3</sup> könnte den Eisengehalt auf 34,5 % steigern und den mittleren Quarzgehalt auf 7,0 % senken (Tabelle 15). Um einen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von 5 % zu erreichen, muss entweder mit SiO<sub>2</sub> ärmeren Partien gemischt oder bei höherer Dichte getrennt werden. Bei einer Dichtesortierung bei der Trenndichte von über 3,3 g/cm<sup>3</sup>, was in einem Schwertrübezyklon mit einer mittleren Trübedichte von ca. 3,1 g/cm<sup>3</sup> unter Verwendung von FeSi möglich ist, könnte der Anteil an SiO<sub>2</sub> auf 5 % fallen.

Fraktionen mm	Aufgabe					Schwergut				
	Masse %	Fe %	Spateisenstein %	Ankerit %	Quarz %	Masse %	Fe %	Spateisenstein %	Ankerit %	Quarz %
> 2	12,25	32,26	72,70	11,51	9,14	88,5	34,0	78,0	6,1	7,3
2/1	24,57	31,89	71,39	12,48	10,36	86,0	34,5	79,0	6,6	7,4
1/0,5	24,18	31,93	71,24	13,09	10,29	84,5	35,0	80,0	6,5	6,4
Summe	60,99	31,98	71,59	12,53	10,08	85,9	34,5	79,0	6,4	7,0

**Tabelle 15: Prognose einer bestmöglichen Trennung mit einem Schwertrübezyklon bei einer Trenndichte von 3,1 g/cm<sup>3</sup>**

Für weiterführende Versuche zur Dichtesortierung im Fliehkraftfeld wurde ein Zyklonstand geplant, ausgelegt und der Fertigung übergeben. Der Versuchsstand, bestehend aus einem Pumpensumpf mit höhenverstellbarem Rührwerk, einer Trübepumpe, einem Schwertrübezyklon mit einem Innendurchmesser von 190 mm und einem Bogensieb zur Probeabscheidung, fasst bis zu 0,45 m<sup>3</sup> Trübe und soll bei einem Durchsatz von bis zu 30 m<sup>3</sup>/h betrieben werden (Abbildung 1). Die Auslegung und Berechnung erfolgte auf Basis von zugänglicher Literatur zur Schwertrübetrennung und Pumpenauslegung sowie ergänzenden Messungen an Trübeumpen am Lehrstuhl für Aufbereitung. Die Endausführung erfolgte in Zusammenarbeit mit der MSE- Erzberg.

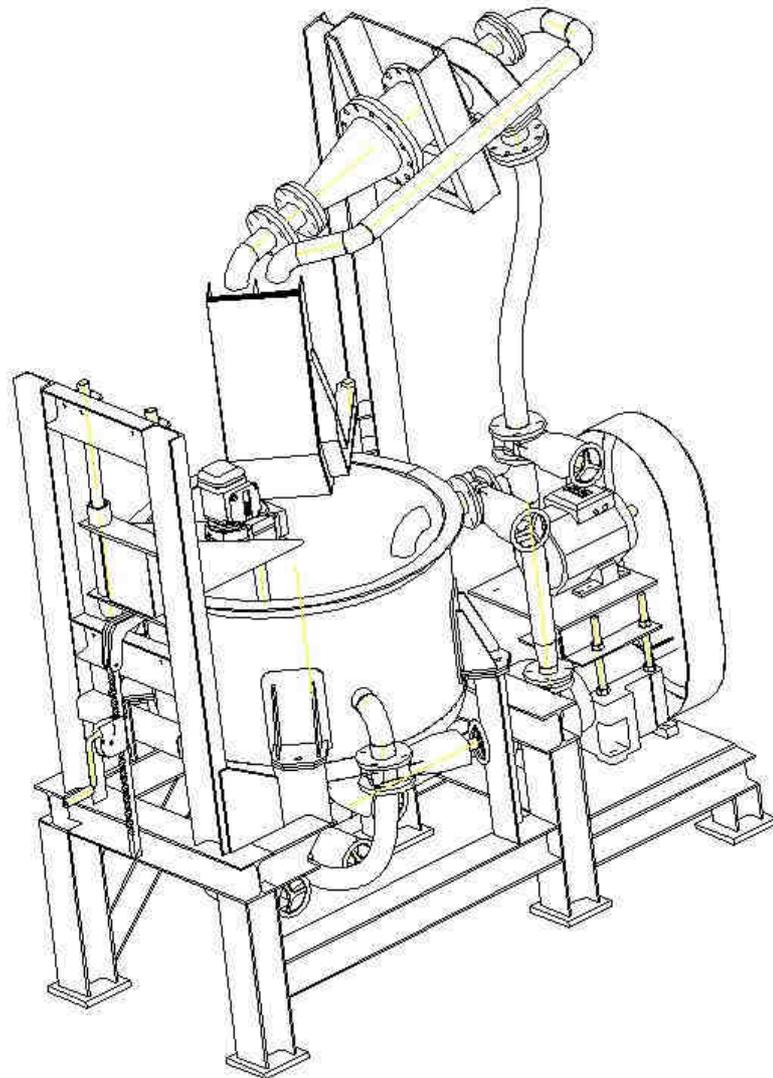


Abbildung 1: Endgültiges Layout für die Fertigung des Schwertrübezyklonstandes

### 3 Theoretische Aspekte

#### 3.1 Eigenschaften einer Schwertrübe

Die Schwertrübe ist eine wässrige Suspension von Schwerstoff, einem Feststoff mit typischerweise geringer Korngröße und hoher Dichte. Die Trübe wirkt als Trennmedium in der Schwimm-Sink-Sortierung und besitzt eine spezifische Dichte, die zwischen jenen der zu trennenden Minerale liegt. Für die Charakterisierung einer Schwertrübe sind folgende Eigenschaften ausschlaggebend: Fließverhalten, Stabilität und Dichte. [1]

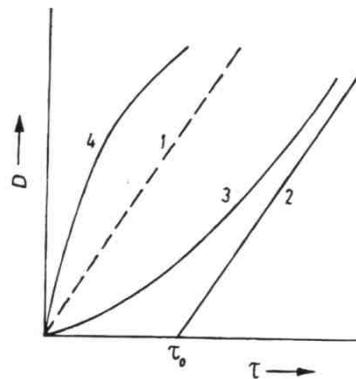
Die Fließeigenschaften einer Trübe entsprechen im Normalfall nicht denen eines Newtonschen Fluids. Damit ist der lineare Zusammenhang von Schergeschwindigkeit und Scherspannung über die Viskosität nicht gegeben (Glg. 1).

Glg. 1:  $\tau = \eta * D$

$\eta$  = dynamische Viskosität [Pa\*s]

$\tau$  = Schubspannung [Pa]

$D$  = Schergeschwindigkeit [1/s]



**Abbildung 2: Verlauf typischer Fließkurven von zeitunabhängigen nicht-Newtonschen Medien (1 Newtonsches Medium; 2 plastisches (Bingham) Medium; 3 strukturviskoses Medium; 4 dilatantes Medium) [1]**

Nicht-Newtonsche Fluide können entweder plastische, strukturviskose oder dilatante Medien sein. In Abbildung 2 sind die Fließkurven dieser Medien eingezeichnet. Das Fließverhalten einer Suspension ist oft eine Überlagerung von strukturviskosem und plastischem Verhalten und kann mit Glg. 2 beschrieben werden.

Glg. 2:  $\tau = K * D^n + \tau_0$

K, n = rheologische Faktoren

$\tau_0$  = Fließgrenze [Pa]

D = Schergeschwindigkeit [1/s]

$\eta$  = dynamische Viskosität [Pa\*s]

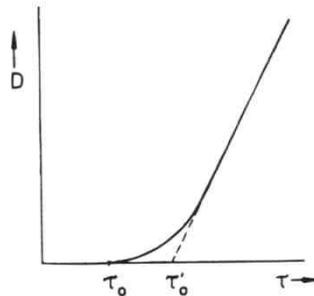


Abbildung 3: Typischer Verlauf von vielfach an Schwertrüben ermittelten Fließkurven [1]

Fließkurven von Schwertrüben mit einem Feststoffvolumenanteil von über 20 % zeigen typischer Weise einen Verlauf wie in Abbildung 3. Versuche mit FeSi-Schwertrüben in einem Kapillarviskosimeter ergaben bei einer Trübedichte von  $3,0 \text{ g/cm}^3$  eine Größenordnung von 35 mPas [2]. Bei Feststoffvolumenkonzentrationen von über 30 % steigen die rheologischen Parameter stark an und werden durch die Alterung der Schwertrübe weiter negativ beeinflusst, da sich Hydrathüllen um die Schwerstoffpartikel bilden, die die zuvor günstige hydrophobe Eigenschaft des Ferrosiliziums (FeSi) aufheben. Eine weitere Einflussgröße ist die Korngrößenverteilung des Schwerstoffs, da sich das Fließverhalten mit der Feinheit verschlechtert. Eine Vergrößerung des Feststoffs wirkt sich jedoch negativ auf die Stabilität der Trübe aus, weshalb hier ein Kompromiss gefunden werden muss. Einen Vorteil für die Fließeigenschaften bringt jedoch die Verwendung von verdüstem statt gemahlenem FeSi auf Grund der runden, glatten Kornform. Mit diesem Schwerstoff ist es möglich, Schwertrüben mit Feststoffvolumenkonzentrationen über 35 % zu verwenden, jedoch ist dies in der industriellen Anwendung nicht empfohlen. Verunreinigungen der Trübe durch Abrieb oder Feinstkorn der Mineralaufgabe verschlechtern die rheologischen Eigenschaften, indem sie die Feststoffvolumenkonzentration anheben oder im schlechtesten Falle quellfähige Komponenten enthalten. Die regelmäßige

Abtrennung dieser Verunreinigungen ist damit unerlässlich und erfordert eine Trüberegeneration. In dieser Regeneration wird im Falle der gängigsten Schwerstoffe Magnetit oder Ferrosilizium deren ferromagnetische Eigenschaft genutzt und mit einer Schwachfeldmagnetscheidung der Schwerstoff aus der verunreinigten Trübe entfernt. Die daraus entstehende Dicktrübe des Schwerstoffs wird in Folge mit frischem Wasser vermengt und auf die gewünschte Feststoffvolumenkonzentration eingestellt. Neben der Trüberegeneration kann die Zugabe von Reagenzien zur Dispergierung und zum Entfernen von Hydrathüllen die rheologischen Eigenschaften verbessern. [1]

Um eine gleichmäßige Trübedichte und gleichmäßige rheologische Eigenschaften für einen Schwimm-Sink-Prozess zu sichern, muss eine homogene Suspension gewährleistet sein. Diese Homogenisierung kommt einerseits durch die Prozesscharakteristik (Aufstrom, Durchmischung) und andererseits durch die Trübestabilität zustande. Die Stabilität von Schwertrüben ist eine Funktion der Feststoffdichte des Schwerstoffs, der Korngröße und der Feststoffvolumenkonzentration. Während die Dichte und die Korngröße direkt in die Endfallgeschwindigkeit ( $v_e$ ) eines Korns einfließen (Glg. 3), erhöht die Feststoffvolumenkonzentration die Schwarmbehinderung und damit die Stabilität.

Glg. 3: 
$$v_e = \frac{k^2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_l)}{18 \cdot \eta}$$

k = Korndurchmesser [m]

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

$\rho_s$  = Feststoffdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_l$  = Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  = dynamische Viskosität [Pa\*s, N\*s/m<sup>2</sup>]

Der Stabilität einer Trübe kann kein konkretes physikalisches Maß zugeordnet werden. Verschiedene Versuche ermöglichen die Ermittlung eines Stabilitätsindex, der für Vergleichszwecke ausreicht. [1]

Die Trübedichte, die im Schwimm-Sink-Prozess ausschlaggebend ist, setzt sich aus der Dichte des Feststoffs und der Flüssigkeit zusammen und berechnet sich laut Glg. 4:

$$\text{Glg. 4: } \rho_{\text{Trübe}} = c_{v,s} * \rho_s + c_{v,l} * \rho_l$$

$c_v$  = Volumenkonzentration [%]

$\rho_s$  = Feststoffdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_l$  = Dichte des Fluids [kg/m<sup>3</sup>]

Da die Trübedichte abhängig von der Schwerstoffdichte mittels der Feststoffvolumenkonzentration einzustellen ist, verwendet man Glg. 5:

$$\text{Glg. 5: } c_{v,s} = \frac{\rho_{\text{Trübe}} - \rho_l}{\rho_s - \rho_l}$$

Die Suspension von Schwerstoff und Wasser wird in den Sortierprozessen als Medium einer höheren Dichte interpretiert. Mit verdüstem Ferrosilizium können Trübedichten bis zu 3,8 g/cm<sup>3</sup> erreicht werden. [3]

Zusammenfassend kann man feststellen: Eine relativ stabile Trübe, die sich unter dem Einfluss eines Kraftfeldes möglichst langsam entmischt, besitzt idealer Weise eine hohe Feststoffvolumenkonzentration mit einem Feststoff von geringer Dichte und hoher Feinheit. Um auch den rheologischen Eigenschaften gerecht zu werden, muss ein Optimum in der Feinheit und der Feststoffvolumenkonzentration gefunden werden. Die Feststoffdichte ist determiniert durch den verwendeten Schwerstoff, muss jedoch aufgrund des Einflusses auf die Feststoffvolumenkonzentration zur Einstellung der Trübedichte ebenfalls mit einbezogen werden. [1]

### 3.2 Dichtesortierung im Schwertrübezyklon

Die Schwimm-Sink-Sortierung ist eine Form der Dichtesortierung und übertrifft Prozesse wie die Setzarbeit, die Rinnen- und Herdarbeit sowie die Aufstromsortierung deutlich in ihrer Trennschärfe. Das Prinzip beruht auf einem Medium mit einer spezifischen Dichte, die zwischen denen der zu trennenden Minerale liegt. Diese sinken im Medium ab oder schwimmen auf und werden vom Medium getrennt. Die verwendeten Medien sind entweder „schwere Flüssigkeiten“, die fast ausschließlich für Laborarbeit verwendet werden, oder Schwertrüben, die bereits oben besprochen wurden. Beide weisen bei höherer Dichte höhere Viskositäten bzw. Scherwiderstände auf. Die Endfallgeschwindigkeit der Körner im Medium wird durch diese Umstände vermindert, muss jedoch ausreichen, um das Absinken oder Aufschwimmen in der Verweilzeit im Trennapparat zu gewährleisten. Die Endfallgeschwindigkeit eines Kornes in einer Suspension kann vereinfacht durch Glg. 9 angenähert werden und resultiert aus den Einflusskräften in Glg. 6 – Glg. 8, wobei  $c_{w,s}$  eine Funktion der Reynolds-Zahl, der Feststoffvolumenkonzentration und der Korngrößenverteilung des Schwerstoffs in der Schwertrübe ist.

Glg. 6:  $F_A = V * \rho_l * a$  Auftriebskraft

Glg. 7:  $F_T = V * \rho_s * a$  Feldkraft ( $a = g$  oder  $r * \omega^2$ )

Glg. 8:  $F_W = c_w * A_K * \rho_l * \frac{v_e^2}{2}$  Widerstandskraft (turbulent nach Newton)

Glg. 9:  $v_{e,s} = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{a * k * (\rho_s - \rho_l)}{c_{w,s} * \rho_l}}$  Endfallgeschwindigkeit

$V$  = Kornvolumen [ $m^3$ ]

$a$  = Wirkende Feldbeschleunigung (Gravitation, Zentrifugalbeschleunigung) [ $m/s^2$ ]

$c_w$  = Widerstandsbeiwert [1]

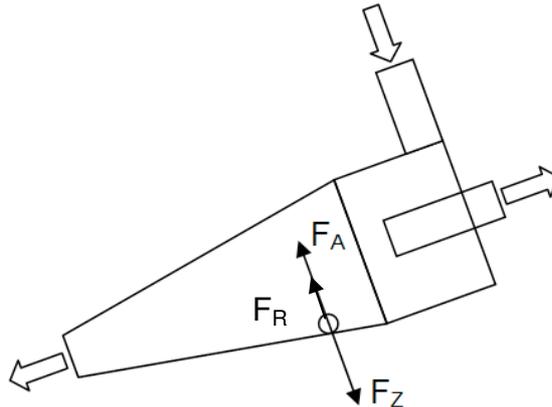
$A_k$  = Angeströmte Fläche des Kornes [ $m^2$ ]

Da Schwertrüben laut ihrer rheologischen Eigenschaften eine Fließgrenze  $\tau_0$  besitzen, kann es dazu kommen, dass kleinere Körner oder solche mit nicht gedrungenen Kornformen, getrieben durch eine Feldkraft und die Auftriebskraft im Medium, diese nicht überschreiten und damit keine Fallbewegung erreichen. Oder

dass, wie aus Glg. 9 ersichtlich, die Endfallgeschwindigkeit signifikant absinkt. Darum wird die Dichtesortierung im Feinkornbereich nicht im Schwerkraft- sondern in einem Zentrifugalfeld durchgeführt, welches eine höhere Beschleunigung auf das Korn ausübt. Der hierzu verwendete Trennapparat ist der Schwertrübezyklon. [1]

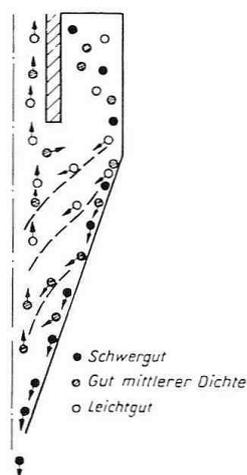
Die Bauart des Schwertrübezyklons ähnelt der eines Hydrozyklons, der in der Klassierung und Eindickung eingesetzt wird. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau. Die Durchmesser von Schwertrübezyklonen variieren in der industriellen Anwendung zwischen 50 und 700 mm, und der Konuswinkel liegt typischerweise um  $20^\circ$  [1][3]. Entscheidend beim Betrieb eines Zyklons ist die Ausbildung einer stabilen Wirbelströmung, die eine konstante Trübeverteilung und ein gleichmäßiges Dichteprofil mit sich bringt. Diese Bedingungen lassen sich über den Aufgabedruck, erfahrungsgemäß zwischen 100kPa und 200kPa, und den Volumenstrom regeln. Der Aufgabedruck wird entweder durch die beschickende Pumpe oder durch ein Fallrohr mit einem Mischbehälter in entsprechender statische Höhe erzeugt. Bei geringerem Aufgabedruck kann sich bei einem aufrecht montierten Zyklon ein Luftkern bilden, der das Risiko eines Fehlaustrags steigert. Darum werden Schwertrübezyklone, anders als Hydrozyklone, nicht vertikal montiert, sondern in einem liegenden Winkel von etwa  $20^\circ$ . [1]

Im Inneren bildet sich während des Betriebs eine der tangentialen Aufgabeströmung folgende, drehende Strömung aus. Diese Strömungsverhältnisse rufen Zentrifugalkräfte hervor, die radial nach außen wirken (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Zentrifugalkraft ( $F_Z$ ), Auftriebskraft ( $F_A$ ) und Widerstandskraft ( $F_R$ ) auf ein Korn im Schwertrübezyklon**

In diesem Kraftfeld sinken Partikel höherer Dichte ab, sammeln sich an der Außenwand und wandern in Richtung des schmalen Endes des Konus, wo sich der Unterlauf befindet. Spezifisch leichtere Partikel schwimmen auf und sammeln sich im Zentrum des Zyklons. Ausschlaggebend für das Trennverhalten ist das Verhältnis zwischen den Durchmessern von Über- und Unterlauf. Durch die Variation der Unterlaufdüse kann außerdem der Trennschnitt verändert werden. Grenzen sind lediglich durch einen Mindestdurchmesser des dreifachen des Größtkorns gesetzt, um eine Brückenbildung und damit ein Verstopfen des Unterlaufs zu verhindern. Das im Zentrum angesammelte Leichtgut wird durch ein Tauchrohr abgefördert, das den Zyklon an der zylindrischen Seite verlässt. Der Durchmesser dieses Rohrs muss die Austragskapazität fassen können, trägt jedoch nichts zum Trennschnitt bei. [1]



**Abbildung 5: Dichtentrennung im Schwertrübezyklon [1]**

Die Zentrifugalkraft wirkt auch auf den Schwerstoff. Die Suspension wird aufgrund stationärer Strömungsverhältnisse im Inneren des Zyklons wie in der Erdgravitation entmischt, sodass sich von der Zyklonachse hin zur Unterlaufdüse ein Konzentrationsprofil ausbildet. Die Entmischung wird durch größer werdenden Schwerstoff und geringere Feststoffkonzentrationen verstärkt. Diese Sedimentation hat den positiven Aspekt, dass die Trenndichte des Zyklons höher liegt als die mittlere Trübedichte, was in Folge den Bedarf an Schwerstoff verringert und die Trübeeigenschaften hinsichtlich Viskosität und Pumpbarkeit begünstigt. [1]

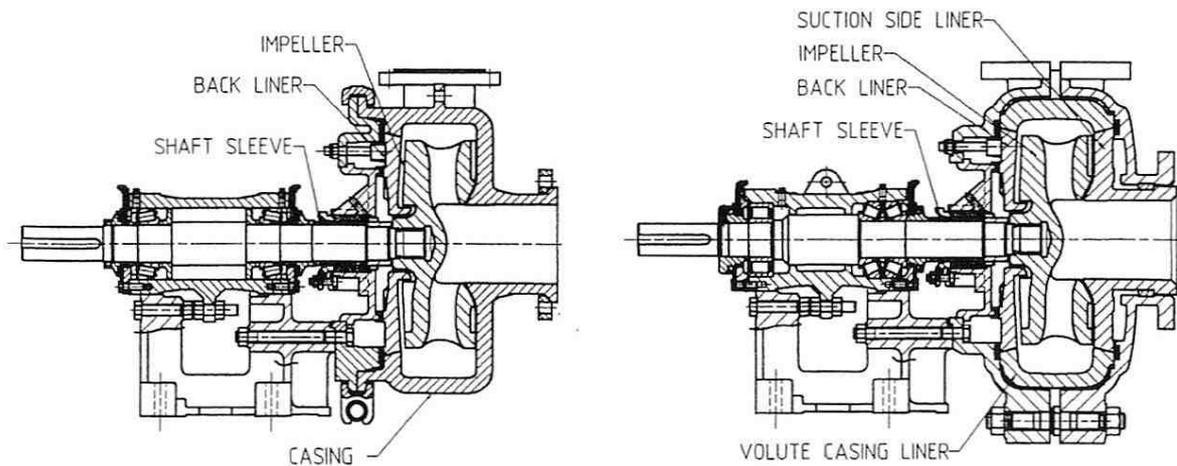
Bei der aufgegebenen Trübe muss auf eine ausreichende Fließfähigkeit geachtet werden, weshalb der Wasseranteil in der Trübe zusammen mit dem Aufgabegut nicht unter 50 Vol-% sinken darf. Typische Gutaufgaberraten sind Volumenanteile zwischen 15 und 25 Vol-%, wobei auf erhöhten Schwergutanfall mit geringer werdendem Volumenanteil reagiert werden muss, um die Kapazität des Unterlaufs nicht zu überschreiten. Typische verarbeitete Korngrößen bewegen sich im Bereich von 25 bis 0,5 mm, wobei auch feinere Anwendungen bis 0,1 mm möglich sind. Die Schwertrübezyklonierung wird in der Steinkohleaufbereitung sowie in der Aufbereitung von Buntmetall-, Baryt-, Fluorit-, Magnesit-, Diamant-Erzen und Rohsalzen angewandt. Auch Anwendungen aus der Sekundär-Rohstoff-Aufbereitung sind bekannt. [1]

### 3.3 Vergleich von Kreiselpumpen für Wasser und Trüben

Kreiselpumpen sind eine Möglichkeiten des Fluidtransports, wobei ihre Anwendungsgebiete von kleinen Durchsätzen wie 1 m<sup>3</sup>/h bis zu erheblichen Transportvolumina von 20000 m<sup>3</sup>/h reichen. Auslegung und Wartung ist stark vom zu pumpenden Fluid abhängig. 98 % aller in der Industrie vorhandenen Anwendungen fördern Wasser als flüssige Phase. Doch in vielen Fällen enthält das Medium auch eine feste Phase und ist somit als Trübe zu bezeichnen, die für Bauart und Betriebsweise eine weitaus größere Herausforderung als reine Flüssigkeiten darstellt. Die zu bewältigenden Aufgaben sind:

- Verschleißkontrolle bei dichten und stark abrasiven Trüben
- Fördern großer Korngrößen
- Leistungskontrolle bei hoch viskosen und/oder schlecht entgasten Medien

Der Verschleiß durch Trüben ist stark abhängig vom Feststoff, der die Abrasion verursacht. Einflussgrößen sind die Korngrößenverteilung, die Dichte, die Kornform und die Härte des Feststoffs. Es gibt zwei Maßnahmen zur Erhöhung der Lebenszeit von Kreiselpumpen: Einerseits können härtere und widerstandsfähigere Materialien wie hochchromige Stähle für die Pumpenbauteile verwendet werden sowie eine Auslegung mit dickeren Wandstärken und robusterer Bauweise erfolgen. Andererseits können zusätzlich zur Grundkonstruktion der Pumpe Verschleißteile eingebaut werden, mit denen beispielsweise der Innenraum der Pumpe ausgekleidet wird. Somit müssen bei einer Wartung nicht die gesamte Pumpe, sondern nur die entsprechenden Auskleidungen getauscht werden (Abbildung 6). Materialien für die Verschleißteile sind zunehmend Elastomere, die den Metallen aufgrund ihrer Fähigkeit, Energie zu absorbieren, einen Schritt voraus sind. Probleme mit Elastomeren entstehen erst bei größeren Korngrößen, die das Risiko erhöhen, dass Bruchstücke aus der Beschichtung herausgerissen werden. [4]

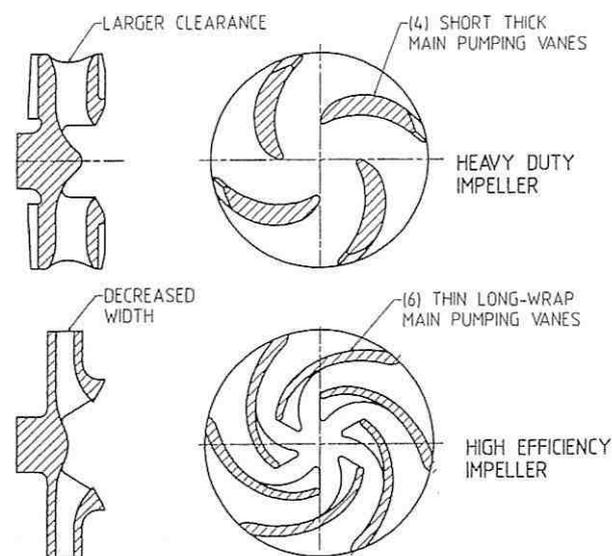


**Abbildung 6: Konstruktion von Trübe-Kreiselpumpen mit und ohne Verschleißteile [4]**

Die erhöhte Dichte von Trüben und der Feststoffinhalt erfordern außerdem eine verstärkte Auslegung der Laufradlagerung. Bis zu einer Leistung von 300 kW werden Kreiselpumpen mit einem Riementrieb angetrieben. Erst bei höherem Leistungsbedarf werden andere Getriebearten eingesetzt. Die Zugkraft des Riemens wird nach der erforderlichen Pumpenleistung bemessen und mit 9kN Zugkraft pro 100kW Antriebsleistung veranschlagt. Mit steigender Pumpenleistung im Bereich von Trübe-pumpen steigt somit auch die radiale Belastung auf die Antriebswelle antriebsseitig. Darum werden auf dieser Seite vermehrt Kugellager verwendet, die lange Betriebszeiten bei hohen Radialkräften aufweisen. Auf Seite des Laufrads herrschen hauptsächlich axiale Kräfte durch die Saugwirkung der Pumpe. Die Flüssigkeit, aber wichtiger noch die Feststoffteilchen prallen beim Eintreten in die Pumpe auf das Laufrad und erzeugen so axiale Impulse. Diese müssen durch die Welle und schließlich durch die Lager abgefangen werden. Häufig werden Kegelrollenlager verwendet, die besonders gut Axialbeanspruchungen aufnehmen können (Abbildung 6). [4]

Das Laufrad besitzt zwei Arten von Flügeln. Die internen Flügel sind verantwortlich für den eigentlichen Pumpeffekt. Während Wasserpumpen fünf bis neun Flügel besitzen, um den Wirkungsgrad zu steigern, verwendet man bei Trübe-pumpen nur zwei bis fünf Flügel, welche dafür aber robuster ausgeführt sind und damit das Fördern von größeren Korngrößen und eine höhere Verschleißfestigkeit ermöglichen. Wenn es die Größe der Feststoffbestandteile erlaubt, so sind Trübe- und Wasserpumpen mit einem geschlossenen Laufradsystem ausgestattet. Für den

Durchgang großer Partikel ist jedoch die Ausführung als semi-offenes oder Vortex-Laufrad unumgänglich. Die sogenannten externen Flügel werden auch als „Expeller“ bezeichnet und sind an der Rückseite des Laufrads montiert. Sie verhindern, dass Feststoffpartikel in den Raum zwischen Laufrad und Gehäuse geraten, dort verklemmen und Schäden anrichten können. Außerdem können diese Flügel der Abdichtung zur Achse hin dienen. Diese Expeller-Dichtungen sowie die robustere Bauart der Innenflügel fordern einen einige Prozentpunkte geringeren Wirkungsgrad. [4]



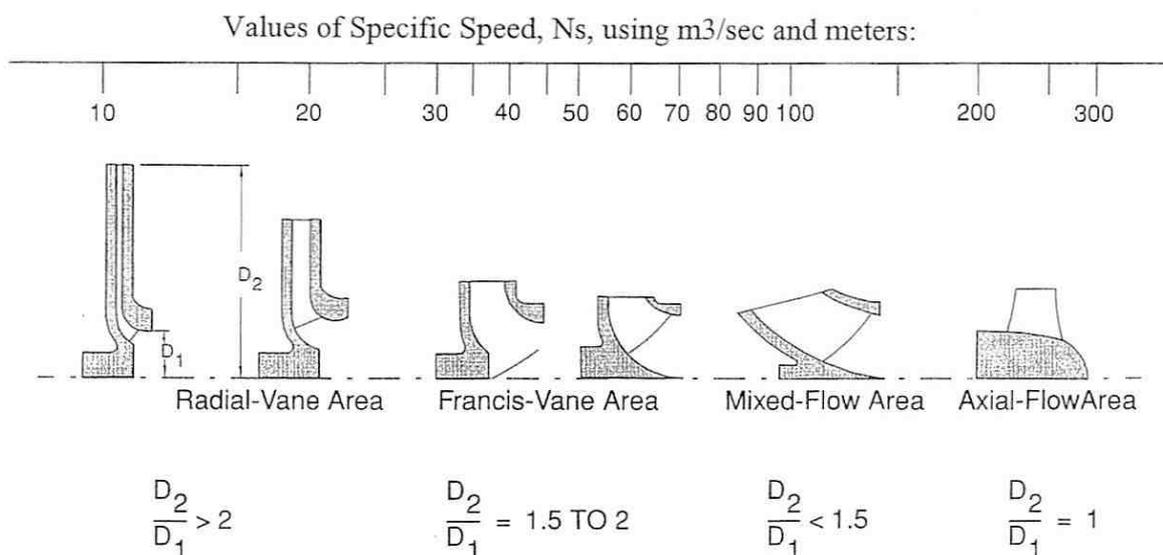
**Abbildung 7: Laufräder für Trüben und hoch effiziente Wasseranwendungen [4]**

Ein für die Laufradgeometrie ausschlaggebender Kennwert ist die spezifische Geschwindigkeit. Dieser Wert setzt die Pumpendrehzahl mit dem Volumenstrom und der Förderhöhe in Korrelation. Die spezifische Geschwindigkeit ist eine dimensionsbehaftete Größe die der Radformkennzahl entspricht.

$$\text{Glg. 10: } N_s = \frac{N \cdot \sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

$N_s$  = spezifische Geschwindigkeit  
 $N$  = Laufradgeschwindigkeit [U/min]  
 $Q$  = Volumenstrom [m<sup>3</sup>/sec]  
 $H$  = Förderhöhe [m]

Nach diesem Kennwert kann in Abbildung 8 eine Vorauswahl für die Laufradgeometrie getroffen werden.



**Abbildung 8: Laufradauswahl anhand der spezifischen Geschwindigkeit [4]**

Während Wasserpumpen einen sehr engen Spalt zwischen Laufrad und Gehäuse neben dem Pumpenausstrag aufweisen, muss dieser bei Trübe-pumpen größer gewählt werden. Die Verengung verhindert im Normalfall die Rezirkulation der Flüssigkeit oder Trübe, ist jedoch aufgrund der engen Spaltöffnung anfällig für Abnützung und kann im Extremfall zum Verklemmen von Feststoffkörnern führen. Ein positiver Aspekt ist, dass mit der Einsparung dieser Verengung das Laufrad nur eine geringe Steigerung der radialen Belastung im Falle eines Betriebs abseits des idealen Betriebspunkts (BEP, engl.: best efficiency point) erfährt.

Kavitation betrifft alle Kreiselpumpen. Dabei wird durch das Ansaugen ein Unterdruck erzeugt, der zusammen mit der herrschenden Temperatur zur Unterschreitung des Dampfdrucks der jeweiligen Flüssigkeit führen kann. Die in solch einem Fall entstehenden Gasblasen implodieren bei der Druckerhöhung in der Pumpe, was zu übermäßiger Beanspruchung und zum Leistungsabfall der Pumpe führen kann. Um dem entgegen zu wirken, darf der größtmögliche Saugdruck (NPSHA), der von der Position und den Spezifikationen des Pumpensumpfes abhängt, den benötigten Saugdruck (NPSHR), einem vom Hersteller angegebenen Pumpenkennwert, maximal 15-30 % überschreiten. [4]

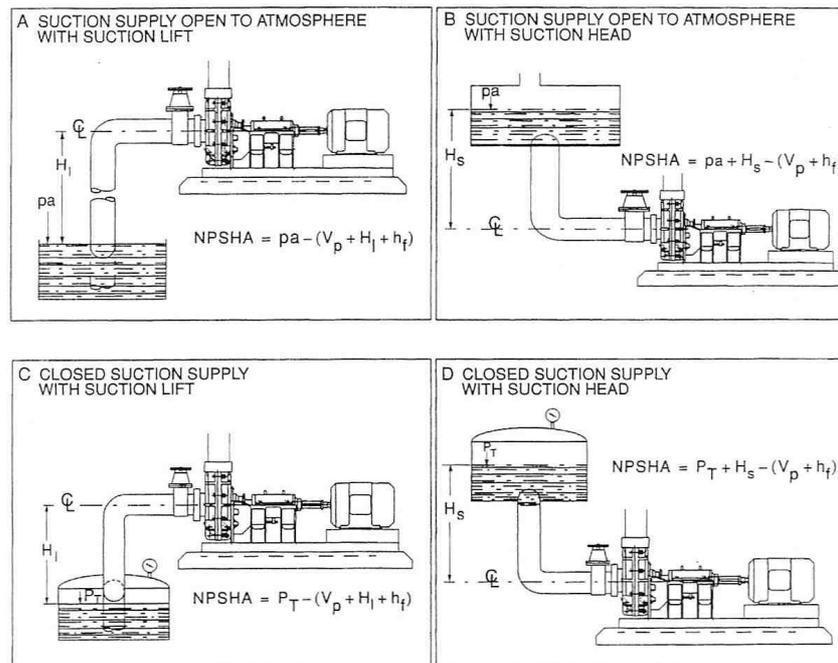


Abbildung 9: Berechnung des NPSHA-Werts zur Kavitationskontrolle [4]

Die Beziehung zwischen einer Pumpe und dem System, das sie beschickt, kann mittels Kennlinien beschrieben werden. Jede Kurve im Kennlinienfeld einer Kreiselpumpe stellt den Volumenstrom bei einer bestimmten Förderhöhe und konstanten Pumpendrehzahl dar. Das Kennlinienfeld wird daher durch Kurven bei verschiedensten Drehzahlen aufgebaut. Im Gegenzug dazu kann von einem System eine Kurve im gleichen Diagramm erstellt werden, die die Förderhöhe in Abhängigkeit vom Volumenstrom darstellt. Die Förderhöhe beinhaltet in dem Fall der Systemkurve aber nicht nur den tatsächlich zu überwindenden Höhenunterschied, sondern auch die Reibungsverluste in den Leitungen und Armaturen des Systems. Der Schnittpunkt der beiden Kurven, eingetragen in dasselbe Diagramm, wird als Betriebspunkt bezeichnet. Durch die Variation der Laufradgeschwindigkeit kann somit der Betriebspunkt entlang der Systemkurve eingestellt werden. Abhängig von der Bauweise und Auslegung der Pumpe gibt es einen Betriebspunkt mit einem maximalen Wirkungsgrad, welcher vom Hersteller in den Kennlinienfeldern ausgewiesen wird. [4]



**Abbildung 10: Hydrozyklonstand am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Erstellung des Kennlinienfelds für die eingebaute Pumpe**

Im Rahmen dieser Überlegungen wurde eine Pumpe des Lehrstuhls für Aufbereitung und Veredlung auf ihre Leistung hin untersucht und dazu ein Kennlinienfeld aufgenommen. Die Pumpe eines kleinen Hydrozyklonstandes wurde in einer Kreislaufschaltung mit dem vorhandenen Pumpensumpf unter Verwendung von reinem Wasser betrieben. Der verwendete 3-Phasenmotor ist getriebelos mit der Pumpe gekoppelt und leistet maximal 2,2 kW. Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz kommt eine Rotation von 2825 U/min zustande. Während der Versuche wurden mittels eines Frequenzumformers die Betriebsfrequenzen von 50, 45, 40 und 35 Hz eingestellt, was Umdrehungszahlen von 2825, 2543, 2260 und 1978 U/min entspricht. Für die Versuche wurde zusätzlich zum Widerstand des Systems eine Schlauchklemme eingesetzt, mit der ein Staudruck erzeugt werden konnte. Zusätzlich zu der Frequenz wurde auch der mit der Schlauchklemme erzeugte Staudruck variiert. Abbildung 10 zeigt den Versuchstand. Im Versuch wurde bei den genannten Betriebsfrequenzen und Staudrücken der jeweilige Volumenstrom mittels dreimaligem Ablitern bestimmt und gemittelt. Die so ermittelte Förderleistung des Systems entspricht jedoch erst nach Abzug der Reibungsverluste des Systems dem eigentlichen Kennlinienfeld der Pumpe. Um die Reibungsverluste des Systems abzuschätzen, wurde auf die empirische Formel von Williams und Hazen zurückgegriffen (Glg. 11). Diese errechnet den Verlust an Förderhöhe abhängig vom Volumenstrom, dem Rohrdurchmesser und einem Beiwert C, welcher die Rauigkeit der Rohrwand beurteilt [5].

$$\text{Glg. 11: } S = \frac{10,67 \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot d^{4,87}}$$

S = Förderhöhenverlust pro Laufmeter Rohrleitung [m/m]

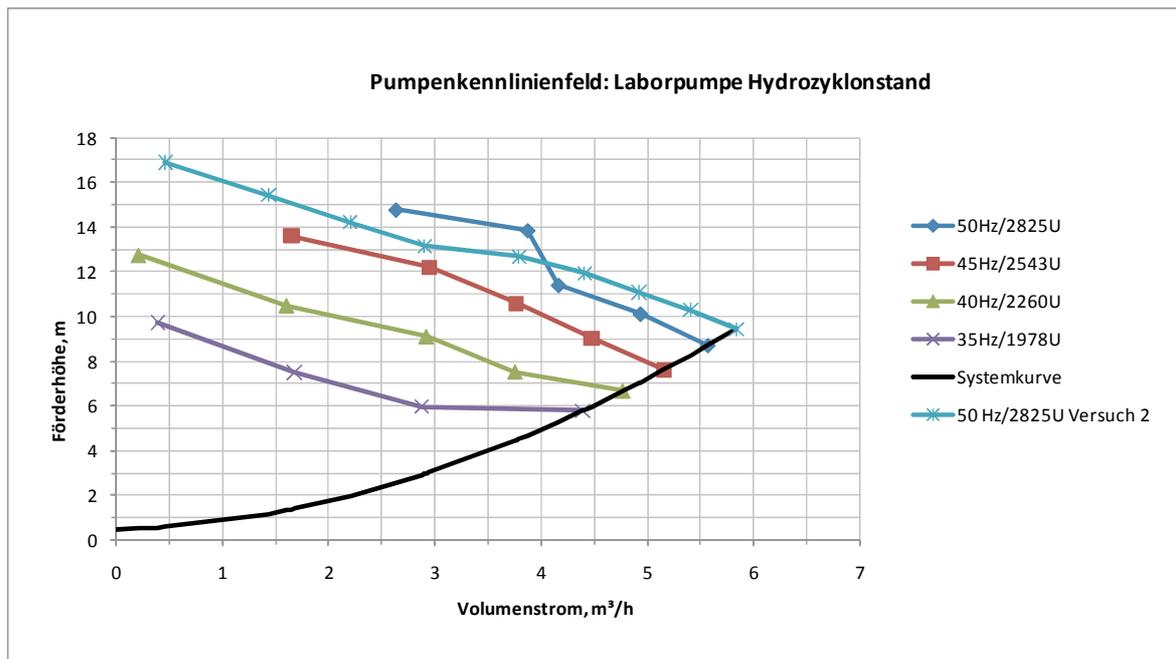
Q = Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

d = Rohrinne Durchmesser [m]

Zur Beurteilung der Reibungsverluste wurde das System in drei Abschnitte unterteilt, welche unterschiedliche Rohrdurchmesser aufweisen und damit separat zu rechnen sind. Rohrkrümmungen, T-Stücke sowie Ventile werden mit einer äquivalenten geraden Rohrlänge in die Berechnung mit einbezogen [6]. Der nach Glg. 11 errechnete Förderhöhenverlust wird im Anschluss mit der gesamten äquivalenten Rohrlänge, welche auch die geraden Rohrabschnitte beinhaltet, multipliziert. [6] Für die korrekte Erstellung des Kennlinienfelds wurde schließlich der gesamte Förderhöhenverlust zu der errechneten Förderhöhe aus Höhenunterschied und Staudruck addiert und dargestellt. Die Systemkurve ergibt sich aus dem Systemwiderstand in Form dieses Förderhöhenverlusts und dem Höhenunterschied des Systems in Abhängigkeit vom Volumenstrom (Tabelle 1). Das gesamte Kennlinienfeld ist in Abbildung 11 dargestellt.

Frequenz Hz	dp Staudruck bar	dH			Volumenstr.		Förderhöhenverlust				Pumpe Kennlinie m	System Kennlinie m
		Staudruck m	System m	gesamt m	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s	Abschnitt 1 m	Abschnitt 2 m	Abschnitt 3 m	1+2+3 m		
50	0	0,00	0,5	0,50	5,57	0,0015	0,02	0,80	7,38	8,20	8,70	8,70
	0,3	3,06	0,5	3,56	4,94	0,0014	0,01	0,64	5,90	6,56	10,12	7,06
	0,6	6,12	0,5	6,62	4,17	0,0012	0,01	0,47	4,31	4,79	11,41	5,29
	0,9	9,17	0,5	9,67	3,88	0,0011	0,01	0,41	3,77	4,19	13,87	4,69
	1,2	12,23	0,5	12,73	2,64	0,0007	0,00	0,20	1,85	2,06	14,79	2,56
45	0	0,00	0,5	0,50	5,16	0,0014	0,01	0,69	6,40	7,11	7,61	7,61
	0,3	3,06	0,5	3,56	4,48	0,0012	0,01	0,53	4,92	5,47	9,03	5,97
	0,6	6,12	0,5	6,62	3,77	0,0010	0,01	0,39	3,58	3,98	10,60	4,48
	0,9	9,17	0,5	9,67	2,95	0,0008	0,00	0,25	2,27	2,53	12,20	3,03
	1,2	12,23	0,5	12,73	1,65	0,0005	0,00	0,08	0,78	0,86	13,60	1,36
40	0	0,00	0,5	0,50	4,77	0,0013	0,01	0,60	5,54	6,16	6,66	6,66
	0,3	3,06	0,5	3,56	3,76	0,0010	0,01	0,39	3,56	3,96	7,52	4,46
	0,6	6,12	0,5	6,62	2,92	0,0008	0,00	0,24	2,24	2,49	9,10	2,99
	0,9	9,17	0,5	9,67	1,61	0,0004	0,00	0,08	0,74	0,82	10,50	1,32
	1,2	12,23	0,5	12,73	0,21	0,0001	0,00	0,00	0,02	0,02	12,75	0,52
35	0	0,00	0,5	0,50	4,39	0,0012	0,01	0,52	4,75	5,28	5,78	5,78
	0,3	3,06	0,5	3,56	2,88	0,0008	0,00	0,24	2,18	2,42	5,98	2,92
	0,6	6,12	0,5	6,62	1,68	0,0005	0,00	0,09	0,80	0,89	7,51	1,39
	0,9	9,17	0,5	9,67	0,39	0,0001	0,00	0,01	0,05	0,06	9,74	0,56
50	0	0,00	0,5	0,50	5,84	0,0016	0,02	0,87	8,05	8,94	9,44	9,44
	0,2	2,04	0,5	2,54	5,41	0,0015	0,02	0,76	6,99	7,76	10,30	8,26
	0,4	4,08	0,5	4,58	4,92	0,0014	0,01	0,64	5,86	6,51	11,09	7,01
	0,6	6,12	0,5	6,62	4,41	0,0012	0,01	0,52	4,79	5,32	11,94	5,82
	0,8	8,15	0,5	8,65	3,79	0,0011	0,01	0,39	3,62	4,03	12,68	4,53
	1	10,19	0,5	10,69	2,90	0,0008	0,00	0,24	2,21	2,45	13,15	2,95
	1,2	12,23	0,5	12,73	2,20	0,0006	0,00	0,14	1,33	1,48	14,21	1,98
	1,4	14,27	0,5	14,77	1,43	0,0004	0,00	0,07	0,60	0,67	15,44	1,17
	1,6	16,31	0,5	16,81	0,46	0,0001	0,00	0,01	0,07	0,08	16,89	0,58

Tabelle 1: Berechnung des Pumpenkennlinienfelds der Laborpumpe des Hydrozyklonstandes



**Abbildung 11: Kennlinienfeld der Laborpumpe des Hydrozyklonstandes mit Systemkurve und Betriebspunkten**

Die vom Hersteller angegebenen Kennlinienfelder für Pumpen sind im Normalfall für die Förderung von Wasser bemessen. Wird die Pumpe jedoch für Trübe verwendet, so gilt es, eine Korrektur der Pumpenkennlinie durchzuführen. Diese Korrektur ist primär von den Eigenschaften der Trübe abhängig. Im einfachsten Fall geht man von sedimentierendem Feststoff aus. Die Grenzen für diese Betrachtung sind in der Literatur unterschiedlich angegeben. Metso Minerals [6] spricht ab einer Korngröße von weniger als 50µm von nicht sedimentierenden Trüben, während Michael J. Bootle [4] diese Grenze bei 100µm ansetzt. Generell gilt allerdings, dass trotz des Feststoffinhalts die rheologischen Eigenschaften der Trübe weiter denen von Wasser annähernd entsprechen müssen. Aus Abbildung 12 können abhängig von der Feststoffvolumenkonzentration, dem  $D_{50}$ -Wert, dem Laufraddurchmesser und der Feststoffdichte der HR-Wert (engl.: head ratio) und der ER-Wert (engl.: efficiency ratio) für sedimentierende Feststofftrüben abgelesen werden.

Glg. 12:  $HR = \frac{\text{Förderhöhe}_{\text{Trübe}}}{\text{Förderhöhe}_{\text{Wasser}}}$

Glg. 13:  $ER = \frac{\text{Wirkungsgrad}_{\text{Trübe}}}{\text{Wirkungsgrad}_{\text{Wasser}}}$

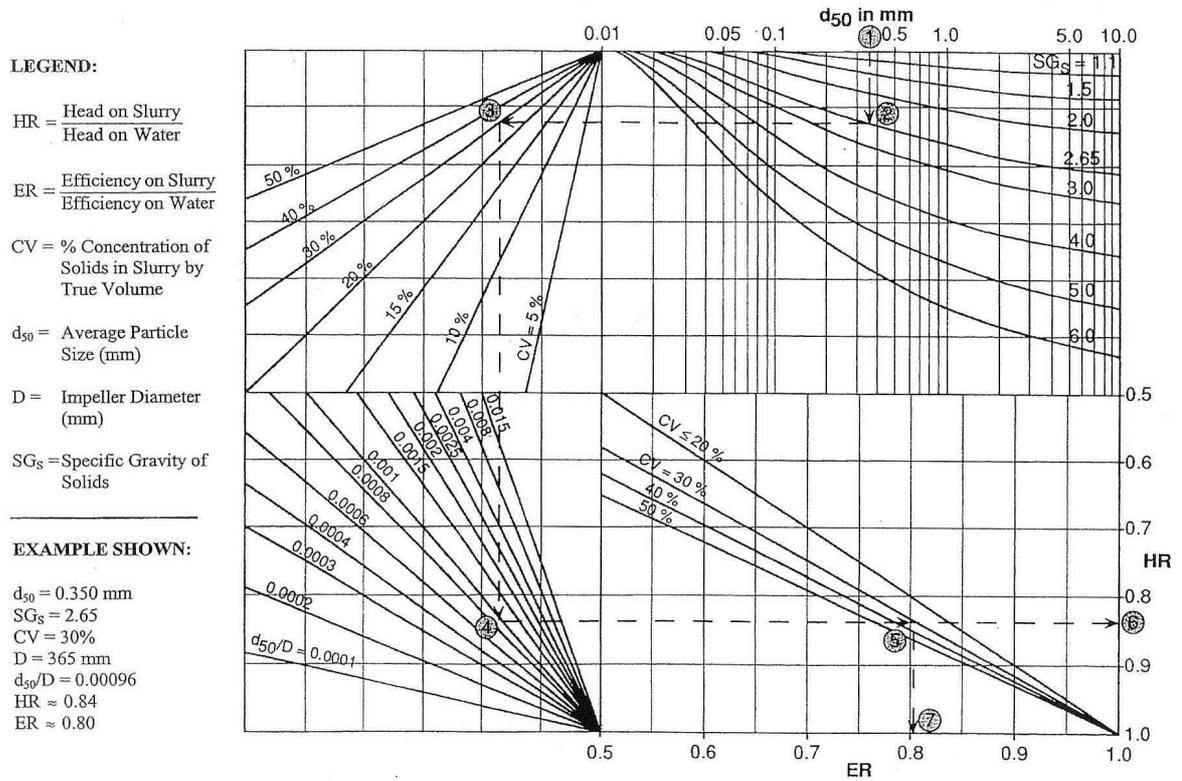


Abbildung 12: Diagramm zur Berechnung des HR- und ER-Werts [4]

Für die Berechnung des ER- und HR-Werts werden in der Literatur auch noch andere Formeln angeführt, die sich mit dem Feststofftransport befassen (Glg. 14). [7]

$$\text{Glg. 14:} \quad ER = HR = 1 - \frac{x}{26} * \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) * \left( 1 + 4 * \frac{\rho}{\rho_s} \right) * \ln \frac{d_s}{d_{ref}} * \left( \frac{25}{n_q} \right)^{0,34}$$

x = Massenkonzentration Feststoff [1]

$\rho_s$  = Feststoffdichte [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$  = Dichte der Trägerflüssigkeit [kg/m<sup>3</sup>]

$d_s$  = mittlere Korngröße [mm]

$d_{ref}$  = 0,023 mm

$n_q$  = spezifische Drehzahl

In vielen Fällen kann von keiner sedimentierenden Trübe ausgegangen werden. In diesen Fällen wird die Viskosität der Trübe für Berechnungen herangezogen. Das Viskositätsverhalten von Trüben ist in Kapitel 3.1 erläutert. Für Abschätzungen in der Pumpenauslegung wird die Scherkurve des Bingham-Fluids in zwei Kennwerte zerlegt: die scheinbare Viskosität  $\mu_a$  und die plastische Viskosität  $\eta$ . Mittels der Glg. 15 kann eine modifizierte Reynolds-Zahl errechnet werden, für welche passende Diagramme für HR- und ER-Koeffizienten existieren (Abbildung 13).

$$\text{Glg. 15:} \quad Re_p = \omega * D_i^2 * \frac{\rho_m}{\eta}$$

$\rho_m$  = Trübedichte [kg/m<sup>3</sup>]

$\eta$  = plastische Viskosität (oder scheinbare Viskosität für 10% des BEP) [Pa\*s]

$\omega$  = Laufradgeschwindigkeit [rad/s]

$D_i$  = Laufraddurchmesser [m]

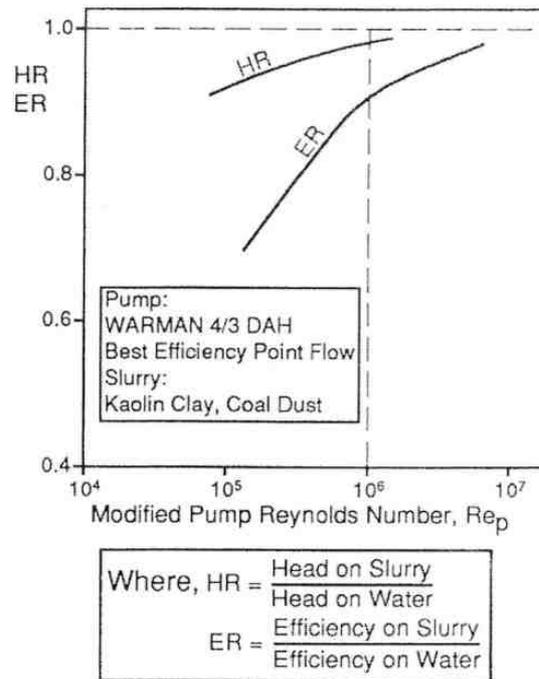
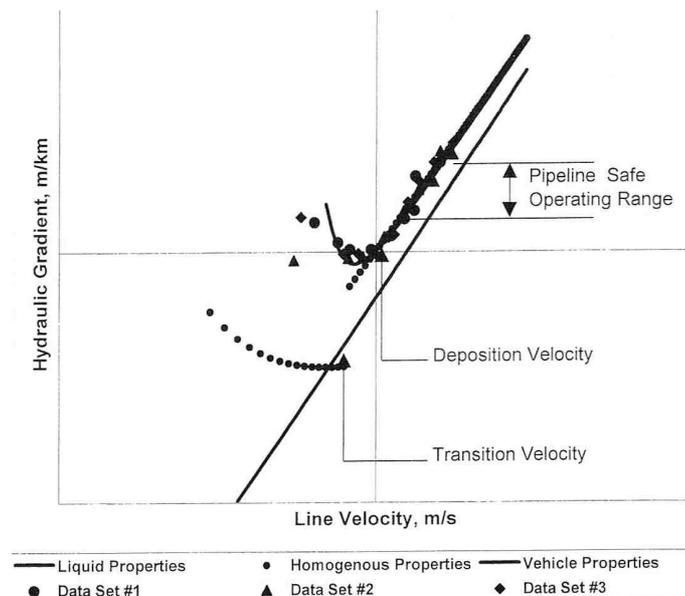


Abbildung 13: Diagramm zur Berechnung des HR- und ER-Werts anhand der modifizierten Reynolds-Zahl [4]

Mit dem Abschwächungs-Koeffizienten ER kann auch auf die benötigte Antriebsleistung geschlossen werden. Die Formel hierzu lautet wie folgt: [4]

$$\text{Glg. 16: } P_{\text{erf.}}(W) = \frac{\text{Volumenstrom} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * \text{Pumphöhe}(\text{m}) * \text{Trübedichte} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * g \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)}{ER}$$

Abgesehen vom Volumenstrom und der Förderhöhe (Druck) muss schließlich darauf geachtet werden, dass die Trübe nicht in den Rohrleitungen sedimentiert. Dazu werden die Reibungsverluste mit der Fluidgeschwindigkeit in der Leitung in Relation gesetzt. Diese Beziehung ist in Abbildung 14 dargestellt, wobei der hydraulische Gradient eine andere Bezeichnung für den Reibungsverlust ist. Die entstehende Kurve besitzt ein Minimum bei einer Fließgeschwindigkeit, unter der Sedimentation stattfindet. Für den sicheren Betrieb der Rohrleitung mit Trübe empfiehlt sich eine Fließgeschwindigkeit deutlich über diesem sogenannten kritischen Punkt.



**Abbildung 14: Beurteilung des hydraulischen Gradienten und der damit verbundenen Sedimentationsneigung [4]**

Natürlich sind die Entmischung und die Sedimentation für verschiedene Korngrößen und -dichten differenziert zu betrachten, doch Durand stellte 1952 eine vielverwendete Formel zur Abschätzung der Mindestgeschwindigkeit von Trüben auf (Glg. 17, Abbildung 15). [4]

$$\text{Glg. 17: } V_L = F_L \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot D \cdot (S_s - S_l)}{S_l}}$$

$V_L$  = geschätzte Sedimentationsgeschwindigkeit [m/s]

$F_L$  = Sedimentationsparameter abhängig von der Korngrößenverteilung und der Feststoffvolumenkonzentration [1]

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

$D$  = Rohrdurchmesser [m]

$S_s$  = spezifische Dichte des Feststoffs [g/cm<sup>3</sup>]

$S_l$  = spezifische Dichte des Fluids [g/cm<sup>3</sup>]

Angenommen es handle sich um eine horizontale Rohrleitung mit einem Innendurchmesser von 75 mm und eine Trübe mit einer Feststoffvolumenkonzentration von 10 %. Der Feststoff habe eine Stoffdichte von 3,2 g/cm<sup>3</sup>, einen  $d_{50}$ -Wert von 0,75 mm und die transportierende Flüssigkeit sei eine Schwertrübe mit einer durchschnittlichen spezifischen Dichte von 2,9 g/cm<sup>3</sup>. Demnach wäre die Mindestgeschwindigkeit 0,32 m/s, welche in der genannten Rohrleitung einem Volumenstrom von 5,15 m<sup>3</sup>/h entspräche. In der Auslegung von Rohrleitungen

kann daraus eine wichtige Abschätzung des Rohrinnendurchmessers bei gegebener Trübezusammensetzung vorgenommen werden.

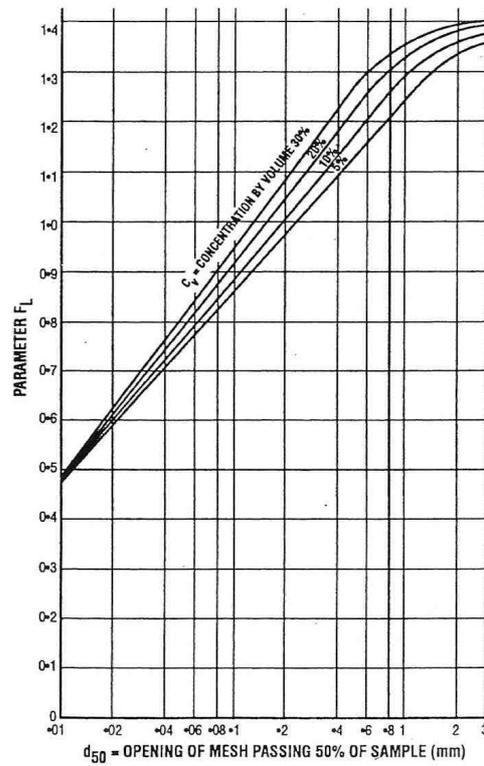


Abbildung 15: Sedimentationsparameter nach Durand für weite Korngrößenverteilungen [4]

### 3.4 Sumpfauslegung und Installationen

Der Pumpensumpf dient als Puffer vor der Pumpe, um diese gleichmäßig mit dem Fluid zu beschicken. Idealerweise ist der Sumpf so niedrig wie möglich und fasst trotzdem genug Volumen, um Schwankungen im Zufluss auszugleichen. Die Verweilzeit im Sumpf wird im Normalfall auf eine Minute angesetzt, um eingebrachter Luft genug Möglichkeit zum Entweichen zu bieten [4]. Der Boden des Sumpfes sollte idealerweise keine Sedimentationszonen erlauben. Eine ausreichende Neigung, die den Schüttwinkel des Feststoffes überschreitet, ist hierzu geeignet. Handelt es sich in der Trübe um einen schnell sedimentierenden Feststoff, so ist es von Vorteil, ein Rührwerk zu installieren, das stets für homogene Trübebedingungen sorgt. Passende Rührwerke erzeugen entweder eine Zirkulation mit aufsteigender Trübe an den Wänden oder im Zentrum. Die Geometrie des Sumpfes mit Rührwerk sollte idealerweise zylindrisch mit einem halbkugelförmigen Boden sein. Doch auch ein kegelförmiger Boden mit wiederum ausreichender Neigung ist geeignet. Ziel der Geometrie soll auch hier sein, dass keine Totzonen entstehen, in denen Feststoff sedimentiert. Um zu verhindern, dass die gesamte Trübe im Sumpf zu rotieren beginnt, werden mindestens zwei Strömungsbrecher installiert.

Für einen Trübekreislauf sind zudem die Verrohrung und die Ventilwahl ausschlaggebend. Enge Radien und T-Stücke werden so weit als möglich vermieden, da sie durch den Feststoffinhalt stark beansprucht und abgenutzt werden. Außerdem wird empfohlen, alle Rohrstrecken um zumindest  $2-3^\circ$  zu neigen, um beim Abstellen des Trübestroms einen Rückfluss zur Pumpe oder, noch günstiger, zu einem offenen Ende der Leitung zu ermöglichen. Es wird zwar nicht der gesamte Feststoff die Leitung verlassen, doch werden die geringen Mengen an Sediment beim Anfahren ohne Gefahr auf Verstopfung wieder losgerissen. Nahe an verstopfungsanfälligen Stellen hat es sich als günstig erwiesen, in das Leitungssystem Zugänge oder lösbare Verbindungen einzubauen. [4]

Die Ventilwahl bei Trübe-Applikationen sollte sich auf die folgenden fünf Ventilarten beschränken [4]:

- Plattenschieber werden zur on/off-Schaltung verwendet und eignen sich nicht zur Durchflussregulierung. Hartgummibeschichtungen haben die Anfälligkeit für Verklemmen und den hohen Verschleiß gegenüber der Hartmetallausführung deutlich reduziert. Ein Vorteil dieser Ventilart ist die kleine Baugröße.
- Quetschventile können zur on/off-Schaltung sowie zur Durchflussregulierung verwendet werden. Sie sind kostengünstig und ermöglichen eine präzise Steuerung. Ein Nachteil ist insbesondere bei pneumatischer Steuerung die sperrige Bauweise.
- Membranventile ähneln den Quetschventilen, bei Verwendung als Durchflussregulierung kann es allerdings zu hohem Wartungsaufwand kommen.
- Kugelrückschlagventile dienen der Zuschaltung einer zweiten Pumpe in einen bestehenden Pumpenkreislauf. Bei ausgeschalteter Zusatzpumpe wird die Ventilkugel vom Strom in Position gehalten. Diese Ventilart hat hinsichtlich Abrasion gegenüber seinen funktionsgleichen Konkurrenzprodukten einen großen Vorteil.
- Keramik-Kugelventile sind teuer in der Anschaffung und werden daher nur bei Hochdruckanwendungen eingesetzt.

## 4 Verwachsungsanalyse am Schraubenklassierer

### 4.1 Mineralogie

Die Mineralogie des anstehenden Erzes am Steirischen Erzberg ist zum überwiegenden Teil karbonatisch. Das Wertmineral Spateisenstein besitzt eine Dichte von 3,6-3,8 g/cm<sup>3</sup> und einen Fe-Gehalt von maximal 42 %. Des Weiteren kann der Spateisenstein als paramagnetisch eingestuft werden mit einer Suszeptibilität von  $(1-2) \cdot 10^{-6}$ . Das zweite eisenhaltige Mineral ist Ankerit mit einer Dichte von 3,15 g/cm<sup>3</sup> und geringfügig schwächer paramagnetischen Eigenschaften als Spateisenstein (Suszeptibilität:  $(5-9) \cdot 10^{-7}$ ). Auf dem Frantz-Isodynamik-Scheider wird Spateisenstein bei einer Erregerstromstärke von <0,2 A ausgetragen und Ankerit bei 0,2 – 0,3 A. Aufgrund des weitaus geringeren Fe-Gehalts von zirka 18 % ist das Ausbringen des Ankerits im Konzentrat nicht wünschenswert. [8]

Ankerit und Spateisenstein sind Karbonate, die in einem 3-Phasendiagramm zwischen FeCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> und MgCO<sub>3</sub> darstellbar sind (Abbildung 16). Ihre chemische Zusammensetzung ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Die Gangart ist vorwiegend karbonatisch mit den Mineralphasen Kalzit und Dolomit. Feinst verwachsen treten Quarz und Kalifeldspat auf. Die Dichte der Gangartminerale liegt stets deutlich unter der des Ankerits und des Spateisensteins und auch die Suszeptibilität ist geringer.

	Ankerit	Spateisenstein	Kalzit
FeO, %	22,70	53,50	0,00
CaO, %	26,80	1,00	56,03
MgO, %	6,00	3,70	0,00
MnO, %	2,05	3,30	0,00
CO <sub>2</sub> , %	42,45	38,50	43,97
Summe	100,00	100,00	100,00

Tabelle 2: Zusammensetzung der Wertminerale Ankerit und Spateisenstein [8]

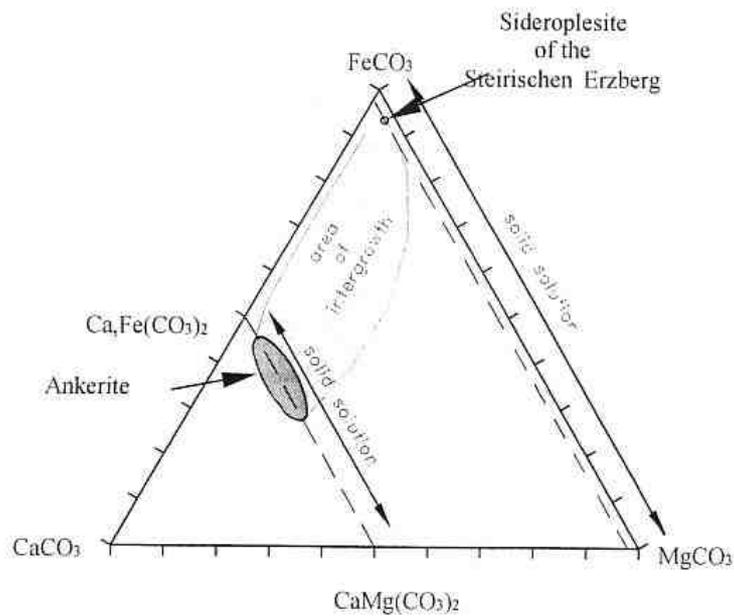


Abbildung 16: Vereinfachte Darstellung der chemischen Zusammensetzung der karbonatischen Eisenträger Spateisenstein und Ankerit [8]

Im 3-Phasendiagramm in Abbildung 16 sind die Zusammensetzungen der am Erzberg vorkommenden Minerale Ankerit (Ankerite) und Spateisenstein (Sideroplesite) eingezeichnet. Ankerit liegt auf einer Mischreihe zwischen  $\text{Ca,Fe}(\text{CO}_3)_2$  und Dolomit  $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ . Spateisenstein hingegen liegt auf einer Mischreihe zwischen Siderit  $\text{FeCO}_3$  und Magnesit  $\text{MgCO}_3$ . Mit „area of intergrowth“ ist jener Bereich gekennzeichnet, in welchem Verwachsungen zwischen Ankerit und Spateisenstein am Steirischen Erzberg auftreten.

## 4.2 Gutstrom- und Aggregatbeschreibung

Ein Teil der Aufbereitung des Spateisenstein-Erzes vom Steirischen Erzberg beschäftigt sich mit dem sogenannten Wascherz, welches der beste vorkommende Erztyp ist. Dieser Erztyp wird einer Aufbereitung unterzogen, um den Eisengehalt anzureichern und unerwünschte Begleiter wie Quarz und alkalienreiche Komponenten zu entfernen. Das Erz wird in einem Steilkegelbrecher auf <100 mm gebrochen und anschließend in Bunkern zwischengelagert. Das gebrochene Erz wird in zwei verschiedenen Arten weiter verarbeitet:

- Das so genannte Zwischengut mit Eisengehalten zwischen 22 und 28 % wird nach einer Nasssiebung bei 30, 8 und 1 mm auf weitere Sortiermaschinen aufgegeben. Die Grobfraction durchläuft eine Schwertrübetrommel in zwei Fraktionen (100/30 mm und 30/8 mm), während das Mittelgut in den Fraktionen 8/4 und 4/1 mm einer Starkfeldmagnetscheidung zugeführt wird. Das Feingut kleiner 1 mm wird in der Folge verhaldet.
- Das Fertigerz mit Fe-Gehalten von über 28 % wird mit einer Durchsatzleistung von 250 t/h einer Waschsiebung bei 2,5 mm Maschenweite unterzogen und anschließend in der Nachbrech- und Siebanlage zerkleinert. Das Feingut dieser Waschsiebung, das ca. 9 % der Siebaufgabe ausmacht, läuft dem Schraubenklassierer 136C vor und wird dort bei ca. 0,1 mm klassiert. Das Grobgut wird direkt verhaldet und das Feingut findet den Weg in die Rundeindicker, um in die Schlammteiche verpumpt werden zu können. Das in den Eindickern rückgewonnene Wasser wird als Prozesswasser wieder der Anlage zugeführt. In der Fraktion kleiner 2,5 mm des Fertigerzes, welche zur Gänze in einem Schlammteich verhaldet wird, werden erhöhte Anteile an Alkalien und Quarz vermutet, die sich im Feingut anreichern. In der bestehenden Anlage wird zurzeit weder Dichtesortierung noch Magnetscheidung mit dieser Fraktion betrieben.

Die in den Jahren 1970 bis 1989 betriebene Schwertrübezyklonierung des Zwischengutes 8/1 mm wurde aus Kostengründen durch eine günstigere Starkfeldmagnetscheidung ersetzt. Die Betriebsleitung möchte nun die Möglichkeit einer neuerlichen Implementierung einer Dichtesortierung im Zentrifugalfeld abwägen. Andere Dichtesortierverfahren wie die Trennung mittels Humphreys Spirale sind ungünstig wegen der maximalen Korngröße der Aufgabe und der Trennschärfe des eng verwachsenen Materials. Diese Anlage solle die Fraktionen 8/4 und 4/1 mm des Zwischengutes aber auch die Fraktion 2,5/0,1 des Fertigerzes aufbereiten. Die Aufbereitbarkeit des Zwischengutes mit Schwertrübezyklonierung wurde in einer Projektstudie bereits als günstiger erachtet. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Grobgut des Schraubenklassierers 136C und nimmt die Verwachsungsverhältnisse des Erzes dieser Fraktion in Augenschein.

Die Fraktion 2,5/0,1 mm macht, geht man von einem Grobgutanfall von 2/3 im Schraubenklassierer aus, bei einer Waschsiebaufgabe von 250t/h einen Massestrom von 15 t/h aus, was einer Jahresleistung von ca. 100.000 t entspricht. Die Reduktion des zu verhaldenden Materials von 150.000 t/a auf 50.000 t/a würde die Haldenkapazitäten schonen und der Produktionsanstieg um 100.000 t/a brächte zusätzlichen Erlös.

Der Schraubenklassierer hat eine Länge von 8 m und eine Breite von 1,3 m. Die Schraube hat einen Durchmesser von 1,2 m, eine Neigung von 15° und dreht sich mit ~5 U/min bei einer Windungszahl von 22. Die Überlaufwehre sind in einer Höhe von 1,78 m angebracht, woraus sich ein Volumen von ca. 7 m<sup>3</sup> an Trübe und eine Badfläche von 9,8 m<sup>2</sup> ergibt. Eine Skizze des Klassierers findet sich in Abbildung 17.

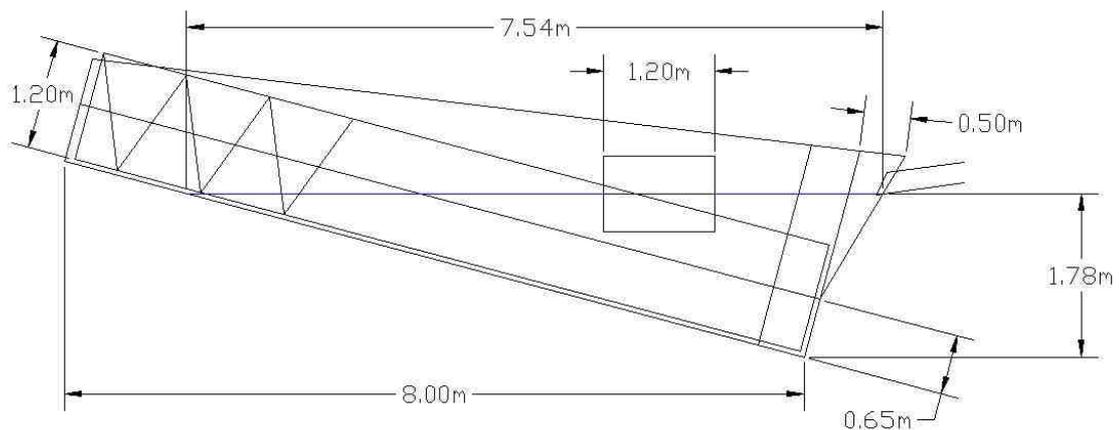


Abbildung 17: Skizze und Abmessungen des Schraubenklassierers

### 4.3 Probenahme

Die Probenahme fand am 22.10.2009 zwischen 14:45 und 15:45 statt. Um den Trennerfolg des Schraubenklassierers 136C und das Erz in seiner Zusammensetzung beurteilen zu können, war es nötig, alle drei Ströme (Aufgabe, Über- und Unterlauf) zu beproben. Jeder der drei Ströme wurde insgesamt 11mal beprobt, wobei der sechste Durchgang als Rückstellprobe luftdicht verschlossen wurde. Die anderen 10 Einzelproben wurden bereits vor Ort zu einer Sammelprobe je Strom vereint.

Die Probenahmestellen wurden soweit als möglich in fallende Gutströme gelegt. So wurden die Proben des Überlaufes des Schraubenklassierers mit einem zirka vier Liter fassenden Gefäß knapp unter der Überlaufkante genommen. Das Grobgut wurde aus der Abwurfschurre am oberen Ende des Klassierers mit einer Kelle entnommen. Es konnte beobachtet werden, dass dieser Abwurf von einer zusätzlichen Frischwasseraufgabe unterstützt wird, welche nicht aus dem Schraubenklassierer stammt. Folglich durfte der Wassergehalt nicht in die Ausbringensberechnungen einbezogen werden. Die Aufgabe wurde in der Zulaufrinne zum Schraubenklassierer beprobt. Die Beprobung wurde mit einem „Tauchrohr“ bewältigt, das gegen die Strömungsrichtung eingetaucht wurde. Durch den daran befestigten Schlauch gelangte die Probe in den Sammelbehälter.

Um den gesamten Querschnitt bestmöglich zu erfassen, wurde der Querschnitt mit den Tauchrohrpositionen abgerastert.



**Abbildung 18: Probenahmestelle des Feinguts, Überlauf**



**Abbildung 19: Probenahmestelle des Grobguts, Abwurfschurre des Überlaufs**

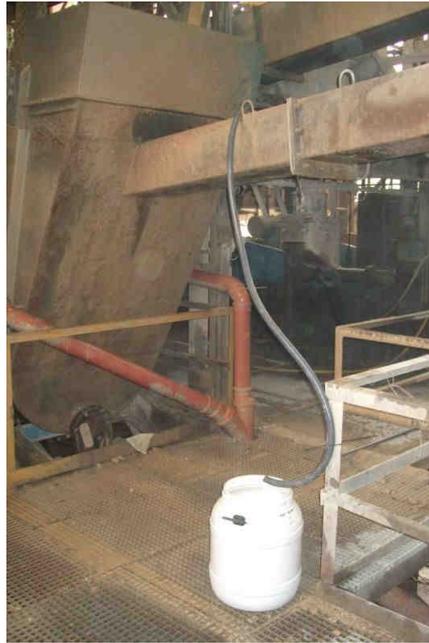


Abbildung 20: Probenahmestelle der Aufgabe, Zulauf

## 4.4 Probenverarbeitung und Untersuchungen

### 4.4.1 Bestimmung des Feststoffgehalts

Die Sammelproben wurden sofort nach den Probenahmen in nassem Zustand gewogen. Im Anschluss wurde das Grobgut getrocknet und die Trockenmasse ermittelt. Das trockene Material wurde dann auf einem Riffelteiler geachtelt. Je ein Achtel fand Eingang in die weiterführenden Untersuchungen. Alle Proben wurden einer nassen Schutzsiebung bei  $500\mu\text{m}$  sowie einer Entschlammung bei  $40\mu\text{m}$  unterzogen. Die daraus entstandenen Fraktionen  $>500\mu\text{m}$  und  $500/40\mu\text{m}$  wurden in Trockenschränken bis auf Massekonstanz getrocknet. Der verbleibende Schlamm  $<40\mu\text{m}$  wurde mittels mehrerer Dekantier-Schritte immer weiter eingedickt. Bei der so maximal erreichbaren Feststoffkonzentration wurde eine Teilprobe des Schlammes entnommen und gewogen. Nach der Trocknung auf Massekonstanz wurde wiederum die Trockenmasse ermittelt.

Aus den so ermittelten Feucht- und Trockenmassen kann unter Berücksichtigung der Probeteilungen der ursprüngliche Feststoffgehalt eines jeden Gutstroms errechnet werden.

#### 4.4.2 Siebanalyse

Die Definition der Korngrößenverteilungen über eine Siebanalyse ist entscheidend für die Beurteilung des Schraubenklassierers. Sie erlaubt eine Aussage über den Trennerfolg und die Trennschnittlage des Klassierers. Außerdem liefert diese Analyse eine wichtige Aussage über das im Grobgut verbleibende Haft- und Feinstkorn. Letzteres kann in der geplanten Schwertrübezyklonanlage zu Problemen führen, da die rheologischen Eigenschaften im System beeinflusst werden. Die Menge an Feianteilen bestimmt auch die notwendige Auslegung einer Trüberegeneration.

Die getrockneten Fraktionen  $>500\ \mu\text{m}$  und  $500/40\ \mu\text{m}$  wurden einer ausführlichen Siebanalyse bei den Maschenweiten  $2\ \text{mm}$ ,  $500\ \mu\text{m}$ ,  $315\ \mu\text{m}$ ,  $200\ \mu\text{m}$ ,  $160\ \mu\text{m}$ ,  $125\ \mu\text{m}$  und  $100\ \mu\text{m}$  unterzogen. Die Siebung wurde mit Laborsieben von Hand durchgeführt, wobei einige Fraktionen mit einer Laborsiebmaschine vorgesiebt und mit der Hand wiederum kontrollgesiebt wurden. Die Masse der Kornfraktion  $<40\ \mu\text{m}$  wurde der Bestimmung des Feststoffgehalts (siehe oben) entnommen und die Fraktion keinen weiteren Siebanalysen mehr unterzogen.

#### 4.4.3 Untersuchungen am Frantz-Isodynamik-Scheider

Die Analyse der Suszeptibilitätsverteilung mit dem Isodynamikscheider Bauart Frantz liefert zweierlei Ergebnisse:

1. Die Einteilung in Klassen aufsteigender Magnetisierbarkeit
2. Die erste Abschätzung des Aufschlusses von Spateisenstein in den Kornklassen

Erfahrungsgemäß reichert sich reiner Spateisenstein in der Erregerstromklasse  $<0,2$  A und reiner Ankerit in der Klasse  $0,2-0,3$  A an. Die Aussage ist für Spateisenstein einigermaßen vertrauenswürdig für Ankerit jedoch nicht, da auch andere Mineralkombinationen in dieser Suszeptibilitätsklasse auftreten können.

Eingang in die Analyse fanden die Fraktionen  $500/315$   $\mu\text{m}$ ,  $315/200$   $\mu\text{m}$ ,  $200/160$   $\mu\text{m}$ ,  $160/125$   $\mu\text{m}$ ,  $125/100$   $\mu\text{m}$  und  $100/40$   $\mu\text{m}$  des Grobgutes. Diese Proben wurden vorab mit einem Handmagneten Bauart Wilke von ferromagnetischen Körnern befreit. Diese Körner fließen später in die Auswertung mit einer definierten Erregerstromstärke von  $0,0$  A ein. Die am Scheider angelegten Stromstärken für die folgenden Trennungen waren  $0,15$  A,  $0,2$  A,  $0,3$  A,  $0,4$  A,  $0,6$  A,  $1$  A und  $1,4$  A. Auf eine vorhergehende Dichtefraktionierung wurde verzichtet.

#### 4.4.4 Schwimm-Sink-Analyse

Jene Kornanteile, die für die Suszeptibilitätsanalyse zu grob sind, wurden einer Schwimm-Sink-Analyse unterzogen. Auch aus der Körnerdichte kann eine Abschätzung der mineralischen Zusammensetzung unter der Annahme getroffen werden, dass sich die Komponenten auf die üblichen zu erwartenden Mineralien beschränken. Beim vorliegenden karbonatischen Eisenerz sind die bedeutenden Mineralphasen Spateisenstein mit einer spezifischen Dichte von ca.  $3,7$   $\text{g}/\text{cm}^3$ , der Ankerit mit einer Dichte von  $3,15$   $\text{g}/\text{cm}^3$  und weitere karbonatische Gangart wie Dolomit ( $2,85$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ), Kalzit ( $2,70$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ) oder auch Quarz ( $2,65$   $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Die Fraktionen >2 mm, 2/1 mm und 1/0,5 mm wurden bei den Dichten 3,31 g/cm<sup>3</sup>, 2,99 g/cm<sup>3</sup> und 2,71 g/cm<sup>3</sup> abgeschwommen. Als Schwereflüssigkeiten dienten Dijodmethan für die Trennung bei 3,31 g/cm<sup>3</sup> und eine verdünnte Natriumpolywolframatlösung bei den anderen Dichten. Die Analyse erfolgte in Bechergläsern, da die Korngrößen auch im viskoserem Dijodmethan eine ausreichende Sedimentationsgeschwindigkeit aufwiesen.

#### 4.4.5 Stoffdichtebestimmung

Die Produkte der Schwimm-Sink-Analyse wurden einer Bestimmung der mittleren Dichte mit dem He-Gaspyknometer Akku Pyk 1330 unterzogen. Zur Berechnung der Stoffdichte wird in diesem Verfahren die Masse auf das Kornvolumen bezogen, das oberflächengängige Poren ausschließt. Die Stoffdichte dient im Anschluss zur Abschätzung der Verwachsungsverhältnisse.

#### 4.4.6 Chemische Analyse

Die chemische Analyse wurde im chemischen Labor am Steirischen Erzberg durchgeführt. Es wurden alle oben besprochenen Kornklassen und Merkmalsklassen der drei Stoffströme analysiert, zusätzlich einige Aufgabeproben der Merkmalsklassenanalyse, zur Kontrolle der Rückrechnungen auf die Masseverteilung. Das gewählte Verfahren war die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), die mit Presslingen arbeitet. Durch sehr geringe Massen bei der zuvor durchgeführten Frantz-Scheidung mussten einige Suszeptibilitätsklassen zusammengefasst werden, um genügend Probe für einen Analysewert zu erhalten. Analysiert wurde nach einem standardisierten Schema, welches auf die folgenden Elemente und Verbindungen prüft: Fe, CaO, SiO<sub>2</sub>, S-Alk, MgO, Mn, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S, P (Die Probenliste ist dem Anhang zu entnehmen.)

Aus der chemischen Zusammensetzung kann mittels einiger Annahmen auf eine Mineralzusammensetzung geschlossen werden. Als günstigste Möglichkeit wurde die Berechnung über ein Gleichungssystem mit zwei Variablen und zwei

Unbekanntes gewählt, die sich die Gehalte an FeO und MgO zunutze macht. Es sollen die Gehalte an Spateisenstein und Ankerit ermittelt werden, deren chemische Zusammensetzung Tabelle 2 zu entnehmen ist. Bei diesem Rechengang kommt es in manchen Fraktionen vor, dass negative Ankeritgehalte auftreten, doch steht keine geeignetere Methode zur Verfügung. Der Quarzgehalt kann einfacher über den SiO<sub>2</sub> Anteil abgeleitet werden. Die Restmineralanteile der Fraktionen, welche alle anderen Minerale außer Spateisenstein Ankerit und Quarz enthalten, stimmen gut mit den Restgehalten der chemischen Analyse überein. Die Mineralzusammensetzung, die sich aus dieser Rechnung ergibt soll einen Anhaltspunkt geben, hat aber keinen Anspruch auf hohe Genauigkeit.

## 4.5 Auswertung und Interpretation

### 4.5.1 Feststoffgehalte

Die Bestimmung der Feststoffgehalte ergab für die Aufgabe 15,6 % und für den Überlauf 5,7 %. Der Wassergehalt des Grobgutes war wegen der zusätzlichen Wasseraufgabe am Austrag nicht vertrauenswürdig und wurde darum in einem späteren Schritt aus den anderen Feststoffgehalten und dem Feststoffausbringen errechnet.

### 4.5.2 Korngrößenverteilung und Trenncharakteristik

Die im Anschluss durchgeführte Siebanalyse brachte das in Tabelle 3 dargestellte Ergebnis. Die Korngrößenverteilungen des Grobguts, des Feinguts und der Aufgabe sind auch in Abbildung 21 ersichtlich.

Maschenweite mm	Fraktion, %			Durchgang, %		
	Aufgabe	Grobgut	Feingut	Aufgabe	Grobgut	Feingut
2,000	8,56	12,25	0,00	91,44	87,75	100,00
0,500	28,99	48,74	0,00	62,45	39,01	100,00
0,315	9,52	13,44	0,00	52,93	25,56	100,00
0,200	8,72	10,94	0,21	44,20	14,62	99,79
0,160	3,80	4,22	0,66	40,41	10,40	99,13
0,125	3,54	3,43	1,77	36,86	6,97	97,35
0,100	3,31	2,42	3,13	33,55	4,55	94,23
0,040	10,15	3,44	15,56	23,40	1,10	78,67
0,000	23,40	1,10	78,67	0,00	0,00	0,00
Summe	100,00	100,00	100,00			

Tabelle 3: Schraubenklassierer 136C: Ergebnisse der Siebanalyse

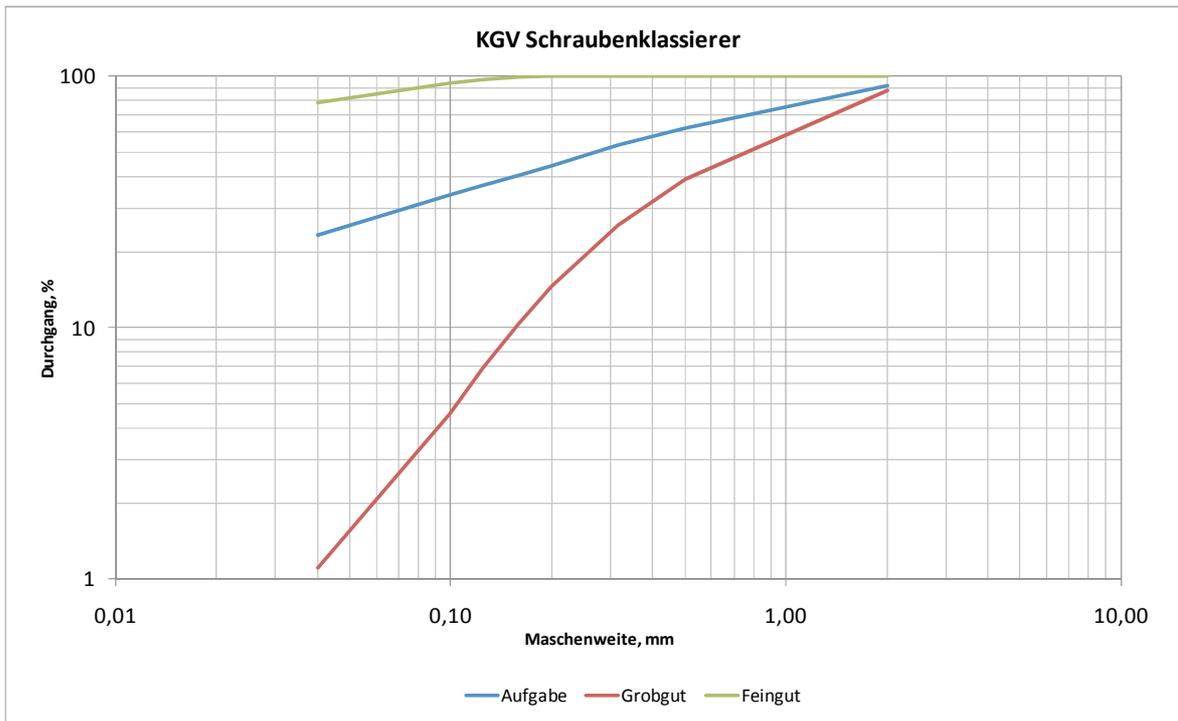


Abbildung 21: Schraubenklassierer 136C: Darstellung der Korngrößenverteilung der Feststoffinhalte von Aufgabe und Produkten im GGS-Netz

### 4.5.3 Feststoffinhaltsausbringen

Die Ergebnisse der Siebanalyse dienen als Ausgangspunkt für einen Gaußausgleich, der das Feststoffinhaltsausbringen in den Produkten ermittelt. Der Gaußausgleich erfolgt laut Glg. 18 und die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Korrektur gibt an, mit welchen Abweichungen durch den Gaußausgleich in den einzelnen Fraktionen zu rechnen ist.

$$\text{Glg. 18: } r_{m,b} = \frac{\sum(g_{i,a}-g_{i,c}) \cdot (g_{i,b}-g_{i,c})}{\sum(g_{i,b}-g_{i,c})^2} * 100$$

Maschenweite mm	Fraktionen			Gauß Berechnung				Korrekturen %
	Aufgabe %	Grobgut %	Feingut %	gA-gFG -	gGG-gFG -	(gA-gFG)(gGG-gFG) -	(gGG-gFG) -	
2,000	8,56	12,25	0,00	8,56	12,25	104,91	150,15	0,3
0,500	28,99	48,74	0,00	28,99	48,74	1412,97	2375,70	-4,1
0,315	9,52	13,44	0,00	9,52	13,44	128,01	180,74	0,4
0,200	8,72	10,94	0,21	8,51	10,73	91,29	115,06	1,2
0,160	3,80	4,22	0,66	3,14	3,56	11,17	12,68	0,7
0,125	3,54	3,43	1,77	1,77	1,66	2,94	2,75	0,6
0,100	3,31	2,42	3,13	0,18	-0,70	-0,13	0,50	0,7
0,040	10,15	3,44	15,56	-5,41	-12,12	65,59	146,91	2,8
0,000	23,40	1,10	78,67	-55,26	-77,56	4286,33	6015,79	-2,7
Summe	100,00	100,00	100,00			6103,08	9000,27	0,0
Inhaltsausbringen	100,0	67,8	32,2					

Tabelle 4: Schraubenklassierer 136C: Berechnung und Ergebnis des Gaußausgleichs über die Fraktionen der Siebanalyse

#### 4.5.4 Bilanzierung von Feststoff und Wasser

Die Auswertung begann mit der Berechnung des Inhaltsausbringens des Feststoffs und des Wassers. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Als sichere Werte aus der Probenahme und der Analyse wurde das Feststoffinhaltsausbringen angenommen. Dieses wurde aus dem überbestimmten System der Siebanalyse mittels eines Gaußausgleichs errechnet. Zudem können die Feststoffgehalte der Aufgabe und des Feinguts als vertrauenswürdig betrachtet werden. Die Bilanzrechnung erlaubt in der Folge den Rückschluss auf die übrigen Werte. Die Bilanz zeigt eine Trübeaufteilung von 88,2 % im Überlauf und 11,8 % im Unterlauf, während 2/3 der Feststoffmasse im Grobgut und nur 1/3 im Feingut ausgetragen wird. Ein spezifischer Wasserverbrauch von 5,4 m<sup>3</sup>/t bzw. ~17 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> Feststoff macht die Gebrauchtwasseraufbereitung erforderlich.

Produkt	Masseausbringen %	FS-Gehalt %	FS-Inhalt %%	FS-Inhaltsausbringen %	H <sub>2</sub> O-Inhaltsausbringen %
Grobgut	11,8	90,0	1057,8	67,8	1,4
Feingut	88,2	5,7	502,2	32,2	98,6
Aufgabe	100,0	15,6	1560,0	100,0	100,0

Tabelle 5: Schraubenklassierer 136C: Bilanztafel; Betrachtung der Phasenverhältnisse

#### 4.5.5 Teilungskurve

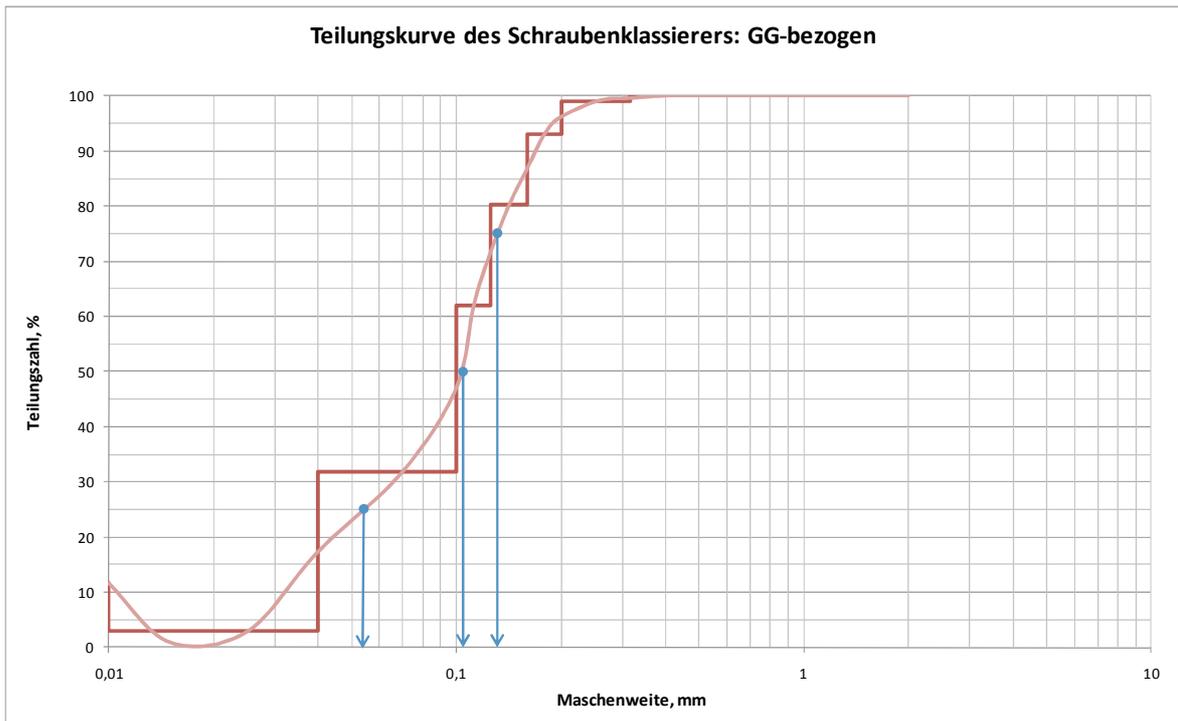
Die Werte der Siebanalyse liefern die Grundlage für die Berechnung der Trennschnittlage des Schraubenklassierers. Für die Trenncharakteristik des Schraubenklassierers wurden Teilungszahlen berechnet und in Abbildung 22 als Teilungskurve dargestellt. Die Berechnung der Teilungszahl erfolgte mit Glg. 19.

$$\text{Glg. 19: } T_{\mu j} = \frac{r_{mj} \cdot m_{\mu j}}{m_{\mu 0}}$$

$T_{\mu j}$  = Teilungszahl des Merkmals  $\mu$  im Gutstrom  $j$  [%]

$r_{mj}$  = Masseausbringen des Gutstroms  $j$  (berechnet mit Gaußausgleich) [%]

$m_{\mu j}$  = Anteil des Merkmals  $\mu$  in Gutstrom  $j$  (in diesem Falle der Gehalt einer Fraktion) [%]



**Abbildung 22: Schraubenklassierer 136C: Grobgutbezogene Teilungskurve. Verstetigung durch Flächenausgleich**

Die Teilungskurve in Abbildung 22 zeigt einen relativ steilen Verlauf mit einem Trennschnitt nach Tromp von  $T_{50} = 101 \mu\text{m}$ . Der Ecart probable beträgt  $25 \mu\text{m}$ , die Imperfektion beträgt 0,25 und die Kornstreuung 1,94. Erkennbar ist auch die Haftkornschleppe im Feinstkornbereich.

#### 4.5.6 Eisen- und Mineralverteilung

Die Analysenwerte der chemischen Analyse sind in Anhang B vollständig ersichtlich und in den Bilanzen in Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 6: Schraubenklassierer 136C: Gesamtbilanz der chemischen Analyse in den Kornfraktionen

Bilanztafel: Schraubenklassierer																			
Produkt Bez.	Masse %	Kornklassen Bez.	Masse %	Gehalte, %				Verteilung, %				Inhaltsausbringen, %				kornklassenbez. Inhaltsausbr., %			
				Fe	SiO2	CaO	MgO	Fe	SiO2	CaO	MgO	Fe	SiO2	CaO	MgO	Fe	SiO2	CaO	MgO
Grobgut	67,81	>2,000	12,25	32,26	9,14	4,66	3,38	12,45	10,90	11,85	12,21	9,72	4,73	8,62	8,81	100,00	100,00	100,00	100,00
		2,000/0,500	48,74	31,91	10,32	4,77	3,41	48,96	48,99	48,29	48,92	38,26	21,27	35,11	35,29	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,500/0,315	13,44	31,77	11,22	5,21	3,35	13,45	14,69	14,54	13,27	10,51	6,38	10,57	9,57	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,315/0,200	10,94	31,39	10,22	5,12	3,40	10,81	10,89	11,63	10,96	8,45	4,73	8,45	7,91	99,40	97,65	98,41	99,22
		0,200/0,160	4,22	31,88	9,60	4,88	3,42	4,24	3,95	4,28	4,25	3,31	1,71	3,11	3,07	95,14	84,20	88,66	93,89
		0,160/0,125	3,43	32,26	8,68	4,57	3,46	3,49	2,90	3,26	3,50	2,72	1,26	2,37	2,52	84,28	64,29	71,50	81,61
		0,125/0,100	2,42	32,14	6,94	4,36	3,52	2,45	1,64	2,19	2,51	1,92	0,71	1,59	1,81	66,69	39,56	51,36	63,94
		0,100/0,040	3,44	32,42	8,48	4,49	3,45	3,51	2,84	3,21	3,50	2,74	1,23	2,33	2,52	35,48	21,42	25,57	32,95
		<0,040	1,10	18,71	29,84	3,31	2,67	0,65	3,21	0,76	0,87	0,51	1,39	0,55	0,63	3,24	2,72	3,05	2,92
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>31,77</b>	<b>10,27</b>	<b>4,82</b>	<b>3,39</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>78,13</b>	<b>43,42</b>	<b>72,70</b>	<b>72,13</b>				
Feingut	32,19	>2,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		2,000/0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,500/0,315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,315/0,200	0,21	20,36	26,61	8,95	2,90	0,23	0,20	0,50	0,22	0,05	0,11	0,14	0,06	0,60	2,35	1,59	0,78
		0,200/0,160	0,66	21,96	24,27	8,41	3,00	0,77	0,57	1,46	0,72	0,17	0,32	0,40	0,20	4,86	15,80	11,34	6,11
		0,160/0,125	1,77	24,55	19,67	7,43	3,18	2,32	1,24	3,45	2,04	0,51	0,70	0,94	0,57	15,72	35,71	28,50	18,39
		0,125/0,100	3,13	26,20	17,31	6,74	3,24	4,37	1,92	5,53	3,67	0,96	1,09	1,51	1,02	33,31	60,44	48,64	36,06
		0,100/0,040	15,56	27,47	14,49	6,09	3,27	22,83	8,00	24,87	18,43	4,99	4,53	6,79	5,14	64,52	78,58	74,43	67,05
		<0,040	78,67	16,54	31,57	3,11	2,63	69,47	88,08	64,19	74,92	15,19	49,84	17,52	20,88	96,76	97,28	96,95	97,08
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>18,73</b>	<b>28,20</b>	<b>3,81</b>	<b>2,76</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>21,87</b>	<b>56,58</b>	<b>27,30</b>	<b>27,87</b>				
Aufgabe	100,00	>2,000	8,56	31,31	8,87	4,52	3,28	9,72	4,73	8,62	8,81	9,72	4,73	8,62	8,81	100,00	100,00	100,00	100,00
		2,000/0,500	28,99	36,38	11,77	5,44	3,88	38,26	21,27	35,11	35,29	38,26	21,27	35,11	35,29	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,500/0,315	9,52	30,42	10,74	4,99	3,21	10,51	6,38	10,57	9,57	10,51	6,38	10,57	9,57	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,315/0,200	8,72	26,85	8,90	4,42	2,91	8,50	4,84	8,59	7,97	8,50	4,84	8,59	7,97	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,200/0,160	3,80	25,26	8,60	4,15	2,75	3,48	2,03	3,51	3,27	3,48	2,03	3,51	3,27	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,160/0,125	3,54	25,15	8,87	4,20	2,79	3,23	1,96	3,31	3,09	3,23	1,96	3,31	3,09	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,125/0,100	3,31	23,91	8,71	4,21	2,73	2,87	1,80	3,10	2,84	2,87	1,80	3,10	2,84	100,00	100,00	100,00	100,00
		0,100/0,040	10,15	21,01	9,10	4,04	2,41	7,74	5,76	9,12	7,66	7,74	5,76	9,12	7,66	100,00	100,00	100,00	100,00
		<0,040	23,40	18,50	35,12	3,47	2,93	15,70	51,23	18,08	21,51	15,70	51,23	18,08	21,51	100,00	100,00	100,00	100,00
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>27,57</b>	<b>16,04</b>	<b>4,49</b>	<b>3,19</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>					

Tabelle 7: Schraubenklassierer 136C: Gesamtbilanz der Mineralinhalte in den Kornfraktionen

Bilanztafel: Schraubenklassierer															
Produkt Bez.	Masse %	Kornklassen Bez.	Masse %	Gehalte, %			Verteilung, %			Inhaltsausbringen, %			kornklassenbez. Inhaltsausbr., %		
				Spat	Ankerit	Quarz	Spat	Ankerit	Quarz	Spat	Ankerit	Quarz	Spat	Ankerit	Quarz
Grobgut	67,81	>2,000	12,25	72,70	11,51	9,14	12,55	11,03	10,90	10,20	5,75	4,73	100,00	100,00	100,00
		2,000/0,500	48,74	71,31	12,78	10,32	48,98	48,70	48,99	39,79	25,40	21,27	100,00	100,00	100,00
		0,500/0,315	13,44	71,38	11,81	11,22	13,52	12,42	14,69	10,99	6,48	6,38	100,00	100,00	100,00
		0,315/0,200	10,94	69,67	13,71	10,22	10,74	11,72	10,89	8,72	6,11	4,73	99,49	98,37	97,65
		0,200/0,160	4,22	71,07	13,17	9,60	4,23	4,35	3,95	3,43	2,27	1,71	95,72	88,26	84,20
		0,160/0,125	3,43	71,93	13,31	8,68	3,48	3,57	2,90	2,83	1,86	1,26	85,56	70,73	64,29
		0,125/0,100	2,42	70,96	14,91	6,94	2,42	2,82	1,64	1,97	1,47	0,71	68,09	54,26	39,56
		0,100/0,040	3,44	72,54	12,77	8,48	3,52	3,43	2,84	2,86	1,79	1,23	36,76	24,18	21,42
		<0,040	1,10	35,36	22,69	29,84	0,55	1,96	3,21	0,45	1,02	1,39	3,52	2,50	2,72
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>70,96</b>	<b>12,79</b>	<b>10,27</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>81,23</b>	<b>52,16</b>	<b>43,42</b>			
Feingut	32,19	>2,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		2,000/0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,500/0,315	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		0,315/0,200	0,21	38,53	24,57	26,61	0,24	0,21	0,20	0,04	0,10	0,11	0,51	1,63	2,35
		0,200/0,160	0,66	42,79	23,61	24,27	0,82	0,63	0,57	0,15	0,30	0,32	4,28	11,74	15,80
		0,160/0,125	1,77	49,50	22,48	19,67	2,54	1,61	1,24	0,48	0,77	0,70	14,44	29,27	35,71
		0,125/0,100	3,13	54,30	20,52	17,31	4,91	2,60	1,92	0,92	1,24	1,09	31,91	45,74	60,44
		0,100/0,040	15,56	58,15	18,64	14,49	26,19	11,74	8,00	4,92	5,62	4,53	63,24	75,82	78,58
		<0,040	78,67	28,68	26,15	31,57	65,30	83,21	88,08	12,26	39,81	49,84	96,48	97,50	97,28
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>34,55</b>	<b>24,72</b>	<b>28,20</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>18,77</b>	<b>47,84</b>	<b>56,58</b>			
Aufgabe	100,00	>2,000	8,56	70,55	11,17	8,87	10,20	5,75	4,73	10,20	5,75	4,73	100,00	100,00	100,00
		2,000/0,500	28,99	81,30	14,57	11,77	39,79	25,40	21,27	39,79	25,40	21,27	100,00	100,00	100,00
		0,500/0,315	9,52	68,35	11,31	10,74	10,99	6,48	6,38	10,99	6,48	6,38	100,00	100,00	100,00
		0,315/0,200	8,72	59,54	11,85	8,90	8,77	6,21	4,84	8,77	6,21	4,84	100,00	100,00	100,00
		0,200/0,160	3,80	55,98	11,25	8,60	3,59	2,57	2,03	3,59	2,57	2,03	100,00	100,00	100,00
		0,160/0,125	3,54	55,22	12,36	8,87	3,30	2,63	1,96	3,30	2,63	1,96	100,00	100,00	100,00
		0,125/0,100	3,31	51,71	13,63	8,71	2,89	2,71	1,80	2,89	2,71	1,80	100,00	100,00	100,00
		0,100/0,040	10,15	45,37	12,14	9,10	7,77	7,41	5,76	7,77	7,41	5,76	100,00	100,00	100,00
		<0,040	23,40	32,16	29,02	35,12	12,71	40,84	51,23	12,71	40,84	51,23	100,00	100,00	100,00
		<b>Summe</b>	<b>100,00</b>	<b>59,24</b>	<b>16,63</b>	<b>16,04</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

## 4.5.7 Merkmalsklassenanalyse

### 4.5.7.1 Kornklassen 500 - 40 $\mu\text{m}$ : Frantz-Isodynamik-Scheider

Als nächster Schritt wurde die Suszeptibilitätsanalyse auf dem Frantz-Isodynamik-Scheider durchgeführt. Die Einteilung in Erregerstromklassen ist Tabelle 8 zu entnehmen. Abbildung 23 stellt die Suszeptibilitätsverteilung der einzelnen Fraktionen grafisch dar. In diesem Diagramm ist zu erkennen, dass der Anteil der niedrigen Erregerstromklassen mit sinkender Korngröße steigt. Dies lässt sich auf die verbesserten Aufschlussverhältnisse zurückführen, da bei geringerer Korngröße ein höherer Aufschlussgrad vorliegt. Der große Anteil in der Erregerstromklasse 0 lässt auf einen großen Anteil an Spateisenstein schließen, wengleich die chemische Analyse auch in diesen Klassen einen Quarzgehalt von 3-5 % aufweist. Die Verwachsung zwischen Spateisenstein und Quarz ist folglich noch enger als ursprünglich vermutet. Die chemische Analyse zeigt außerdem, dass die Eisengehalte der Erregerstromklasse 0 zwischen 38 und 39 % liegen und bei Normierung auf den quarzfreien Anteil noch etwas höher. Spateisenstein am Steirischen Erzberg erreicht einen maximalen Eisengehalt von 41%, wovon die gemessenen Gehalte nur geringfügig abweichen. Folglich kann man davon ausgehen, dass der Spateisenstein nur mit Quarz verwachsen vorliegt und nicht mit eisenärmeren karbonatischen Mineralphasen. In der Folge werden Mineralphasen bis zu einem Eisengehalt von 36 % als frei vorliegender Spateisenstein interpretiert, da der Aufschluss zum Ankerit (maximal 18 % Fe) gegeben ist. Die feine Verwachsung mit Quarz wird zunächst vernachlässigt.

Korngröße, $\mu\text{m}$	500/315	315/200	200/160	160/125	125/100	100/40
Erregerstrom	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse	Masse
A	%	%	%	%	%	%
0	63,9	71,2	72,3	76,1	77,9	77,6
0,15	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0
0,2	5,3	1,7	1,7	0,4	0,1	0,3
0,3	14,9	11,2	10,1	6,5	6,1	8,6
0,4	7,1	6,3	5,7	6,8	5,6	3,3
0,6	2,3	2,0	1,5	1,8	1,6	1,1
1	3,0	3,6	4,3	4,0	4,1	4,0
1,4	0,9	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
>1,4	2,6	2,9	3,2	3,5	3,6	4,1
Summe	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

**Tabelle 8: Grobgut, Schraubensieb 136C: Kornklassen 500-40  $\mu\text{m}$ , Ergebnis der am Frantz-Isodynamik-Scheider ermittelten Merkmalsklassen**

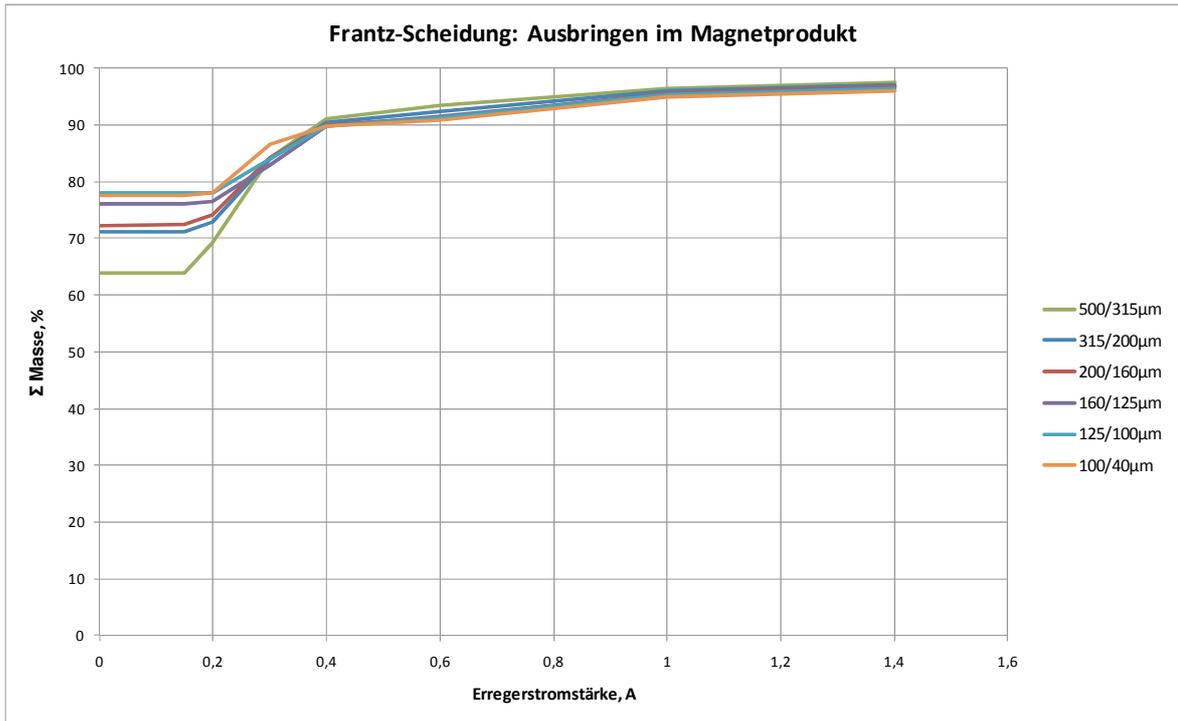


Abbildung 23: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-40 µm, Darstellung der Summen-Massenanteile über dem Erregerstrom

Fraktion mm	Klasse A	Masse %	Fe %	SiO <sub>2</sub> %	Spateisenstein %	Ankerit %
0,500/0,315	<0,15	63,85	39,04	4,26	95,2	0,0
	0,15-0,3	20,27	27,09	10,42	51,7	31,6
	0,3-0,6	9,35	12,93	20,05	1,6	69,5
	>1	6,52	2,20	55,35	0,0	12,5
	Summe	100,00	31,77	10,32	70,8	13,1
0,315/0,200	<0,15	71,16	39,00	4,80	94,9	0,0
	0,2-0,3	12,92	22,99	9,51	35,0	47,7
	0,4-0,6	8,33	12,28	19,04	0,0	69,6
	>1	7,59	2,37	50,49	0,0	13,4
	Summe	100,00	31,93	10,06	71,3	12,9
0,200/0,160	<0,15	72,42	38,95	4,53	94,6	0,0
	0,2-0,3	11,81	22,64	7,32	32,5	51,8
	0,4-0,6	7,15	12,73	20,25	1,5	68,6
	>1	8,62	2,41	51,04	0,0	13,7
	Summe	100,00	32,00	9,99	71,7	12,4
0,160/0,125	<0,15	76,14	38,76	3,63	93,3	0,0
	0,2-0,3	6,82	18,12	6,47	16,7	63,4
	0,4-0,6	8,52	12,76	17,40	0,0	72,3
	>1	8,52	2,45	51,37	0,0	13,9
	Summe	100,00	32,04	9,07	71,5	13,2
0,125/0,100	<0,15	77,94	38,92	4,12	93,9	0,0
	>0,2	22,06	9,32	29,45	0,3	52,2
	Summe	100,00	32,39	9,71	73,3	10,9
0,100/0,040	<0,15	77,61	39,52	3,29	95,9	0,0
	>0,2	22,39	10,05	28,82	3,3	49,1
	Summe	100,00	32,92	9,01	75,1	9,5

**Tabelle 9: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-40 µm, Chemische Analyse und Mineralgehalte der auf dem Frantz-Isodynamik Scheider ermittelten Merkmalsklassen**

Mit der chemischen Analyse (Tabelle 9) kombiniert lassen sich die Verwachsungsverhältnisse abschätzen. In einem Henry-Reinhardt-Schaubild werden die Ergebnisse der Merkmalsklassenanalyse kombiniert mit einem Gehalt in Abhängigkeit von der kumulativen Masse in einer Treppenfunktion dargestellt. Dies wurde zunächst mit dem Ergebnis der Frantz-Scheidung durchgeführt; Abbildung 24 zeigt das Henry-Reinhardt-Schaubild für Eisengehalte der untersuchten Fraktionen. In Abbildung 25 wurde jede Treppenfunktion durch eine stetige Näherung, ermittelt über den Flächenausgleich, ersetzt. Dies erleichtert die Interpretation der Kurven und wird in den folgenden Henry-Reinhardt-Schaubildern, sofern sie den Fe-Gehalt dokumentieren, die einzige Darstellungsform sein. Bei den Henry-Reinhardt-Schaubildern, welche sich auf den Spateisenstein-Gehalt beziehen, ist nur schwer ein passender Flächenausgleich zu finden, weshalb diese nur in der Treppenfunktion dargestellt und interpretiert werden. Die Treppenfunktionen aller Fe-bezogenen Diagramme sind im Anhang B zu finden.

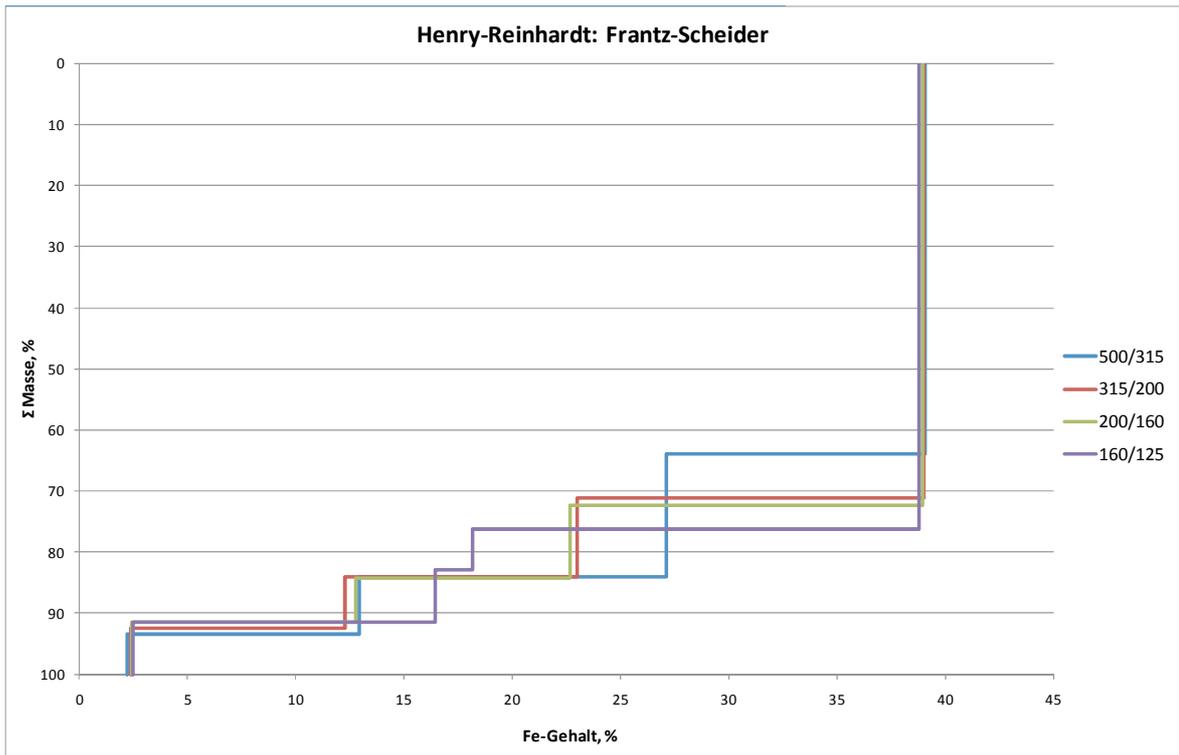


Abbildung 24: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 μm, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe

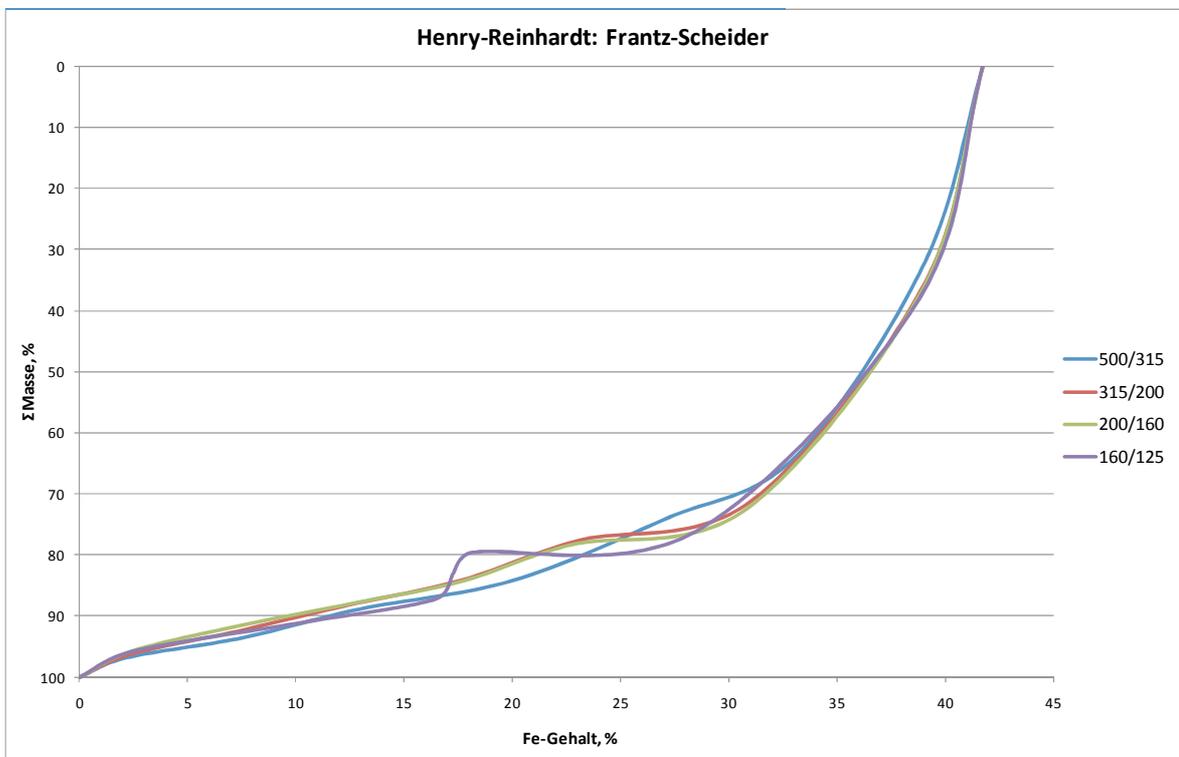


Abbildung 25: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 μm, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen das Henry-Reinhardt-Schaubild der Merkmalsklassenanalyse am Frantz-Scheider der Fraktionen 500/315  $\mu\text{m}$ , 315/200  $\mu\text{m}$ , 200/160  $\mu\text{m}$  und 160/125  $\mu\text{m}$ . Folgende Erregerstromklassen wurden analysiert:

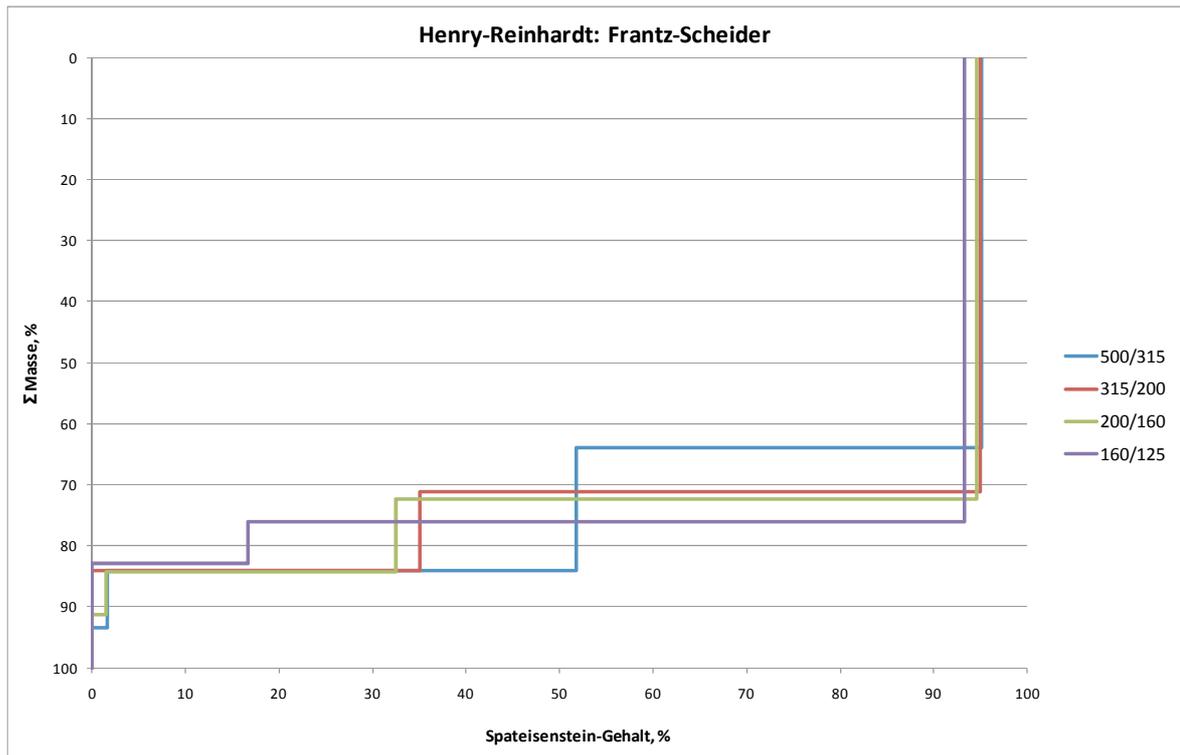
- 0-0,15 A
- 0,15-0,3 A
- 0,3-0,6 A
- >0,6 A

Folgt man der zuvor besprochenen Annahme, dass Körner mit einem Fe-Gehalt größer als 36 % als Spateisenstein zu betrachten sind, so können aus Abbildung 25 folgende Aufschlussgrade von Spateisenstein abgeschätzt werden (Tabelle 10). Es ist zu beachten, dass von dem Gehalt des freien Spateisensteins die aus der chemischen Analyse bekannten Quarzgehalte der niedrigsten Erregerstromklasse abgezogen wurden.

Fraktion mm	g		g		AG
	Spateisenstein frei mit Quarz %	Quarz 0-0,15 A %	Spateisenstein frei ohne Quarz %	Spateisenstein gesamt %	Spateisenstein %
500/315	54	4,26	49,7	71,4	69,7
315/200	56	4,80	51,2	69,7	73,5
200/160	56	4,53	51,5	71,1	72,4
160/125	55	3,63	51,4	71,9	71,4

**Tabelle 10: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500-125  $\mu\text{m}$ , Berechnung des Aufschlussgrads von Spateisenstein**

Zieht man den Bereich der Fe-Gehalte zwischen 32 und 15 % in Betracht, so zeigt sich, dass der zunehmende Aufschluss bei Erregerstromstärken zwischen 0,2 und 1 A stattfindet. Bei dieser Erregerstromstärke werden Ankerit und dessen Verwachsungen ausgetragen, was bereits zuvor auf einen guten Aufschluss von Spateisenstein schließen lässt. Die in Abbildung 26 dargestellte Verwachsung des Spateisensteins zeigt das gleiche Verhalten noch genauer, da erkennbar ist, dass in den Merkmalsklassen der hohen Erregerstromstärken praktisch kein Spateisenstein enthalten ist und bei einem Masseausbringen von 80 % die Verwachsungskurve deutlich abflacht.



**Abbildung 26: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 125 µm, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein**

In den Fraktionen zwischen 125/100 µm und 100/40 µm wurden nur sehr geringe Mengen in den Merkmalsklassen höherer Erregerstromstärke ausgebracht. Darum wurden nur folgende Erregerstromklassen analysiert:

- < 0,15 A
- > 0,15 A

Um jedoch einen Überblick über alle Kornklassen geben zu können, wurden die Fraktionen von 500 µm bis 125 µm rechnerisch in die gröbere Einteilung überführt und im gleichen Diagramm dargestellt. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die Henry-Reinhardt-Schaubilder für Eisen und Spateisenstein. Trotz der sehr groben Einteilung zeigt sich hier wiederum die Abflachung der Verwachsungskurven bei abnehmender Korngröße, insbesondere bei der Betrachtung des Spateisensteins. Die Errechnung eines Aufschlussgrads aus diesem Diagramm ist aufgrund der groben Einteilung nicht sinnvoll.

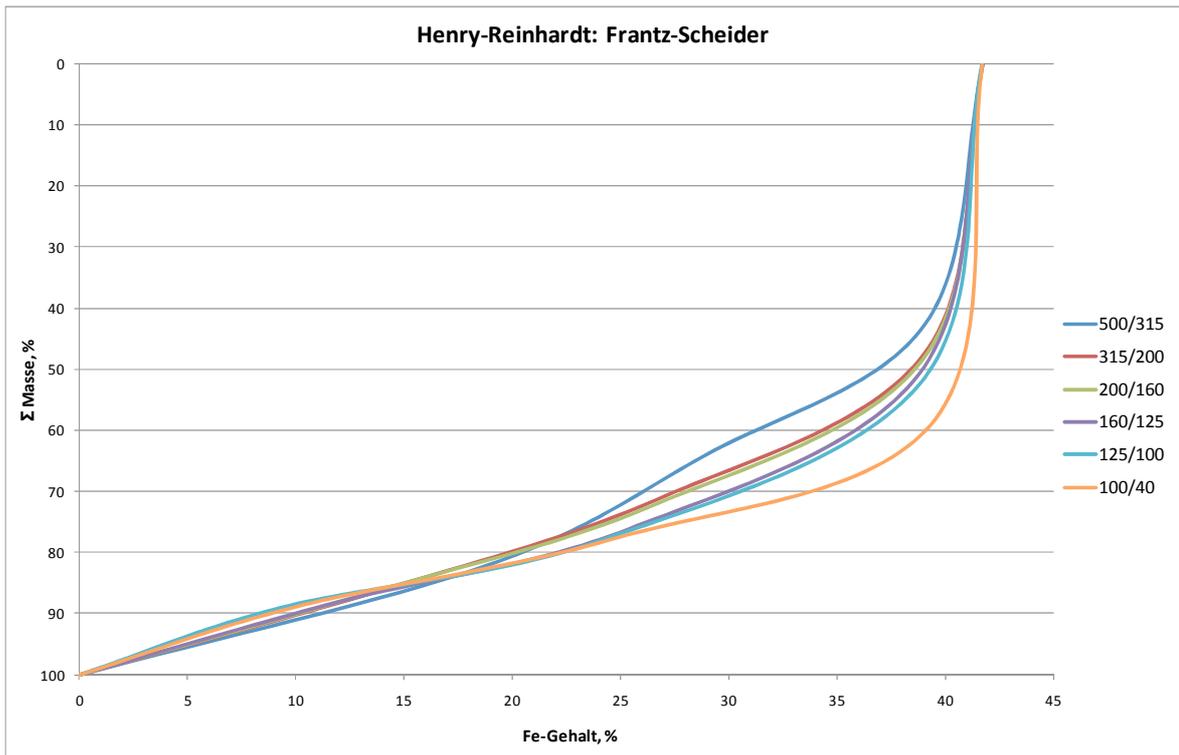


Abbildung 27: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 40  $\mu$ m, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe

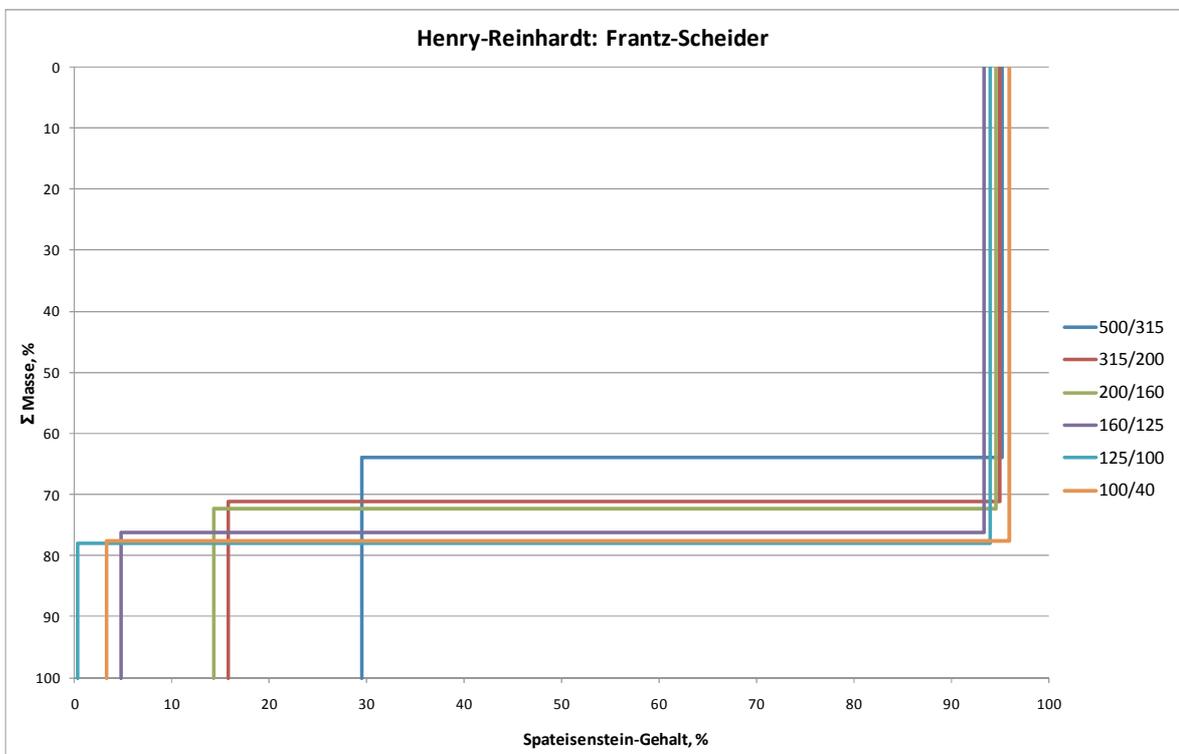


Abbildung 28: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 40  $\mu$ m, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein

#### 4.5.7.2 Kornklassen >0,5 mm: Dichtefraktionierung

Die Merkmalsklassenanalyse in den Fraktionen größer 500 µm wurde mit der Schwimm-Sink Analyse bei Trenndichten von 3,31 g/cm<sup>3</sup>, 2,99 g/cm<sup>3</sup> und 2,71 g/cm<sup>3</sup> durchgeführt. Tabelle 11 und Abbildung 29 stellen die Auswertung der Versuche dar. Die chemische und mineralogische Auswertung ist in Tabelle 12 zusammengefasst.

Korngröße Dichte g/cm <sup>3</sup>	>2 mm		2/1 mm		1/0,5 mm	
	Masse %	Σ Masse %	Masse %	Σ Masse %	Masse %	Σ Masse %
>3,31	81,12	81,12	78,84	78,84	77,05	77,05
3,31-2,99	14,49	95,61	15,50	94,34	15,12	92,17
2,99-2,71	4,14	99,75	4,87	99,21	6,38	98,55
<2,71	0,25	100,00	0,79	100,00	1,45	100,00
Summe	100,00		100,00		100,00	

Tabelle 11: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Ergebnis der Schwimm-Sink Analyse

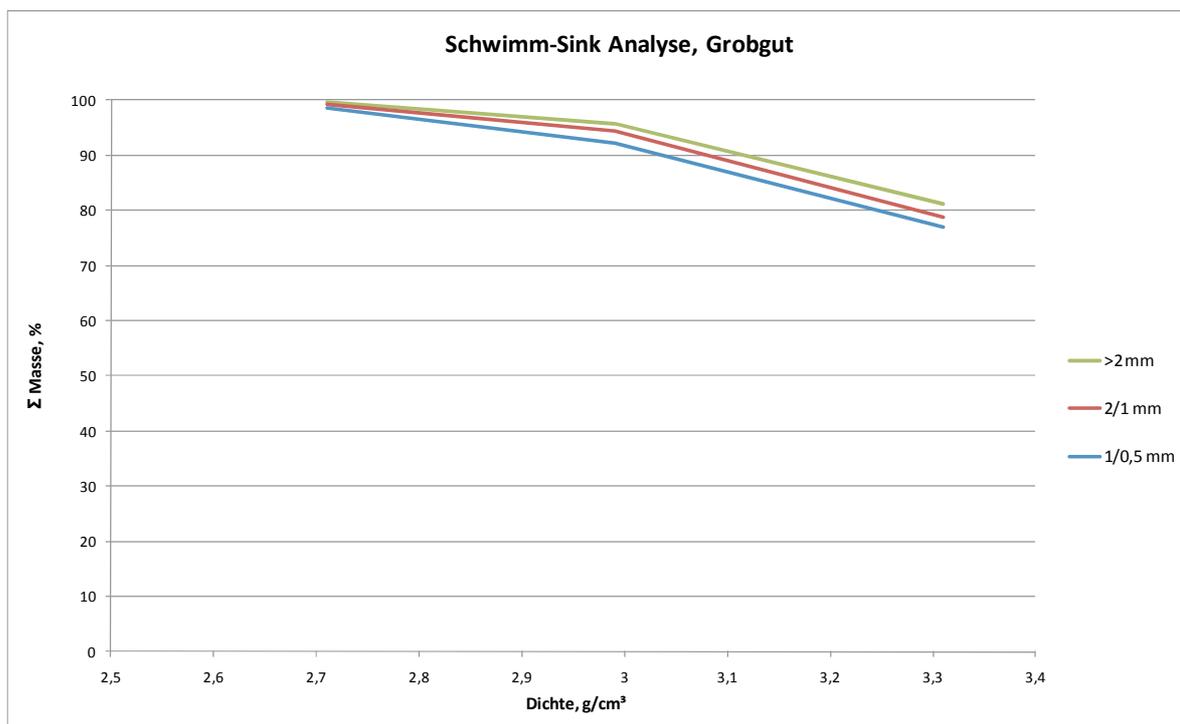


Abbildung 29: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung der Dichtekurve

Fraktion mm	Klasse g/cm <sup>3</sup>	Masse %	Fe %	SiO <sub>2</sub> %	Spateisenstein %	Ankerit %
>2	>3,31	81,12	35,98	6,68	85,9	1,6
	3,31-2,99	14,49	18,52	14,62	21,0	55,4
	2,99-2,71	4,14	7,59	38,02	0,0	43,0
	<2,71	0,25	-	-	-	-
	Summe	100,00	32,26	9,14	72,7	11,5
2/1	>3,31	78,84	36,34	6,75	86,5	2,2
	3,31-2,99	15,50	18,94	14,53	21,8	55,9
	2,99-2,71	4,87	6,11	42,32	0,0	34,6
	<2,71	0,79	0,62	91,57	0,0	3,5
	Summe	100,00	31,89	10,36	71,4	12,5
1/0,5	>3,31	77,05	37,36	5,78	89,3	1,3
	3,31-2,99	15,12	18,25	13,23	18,4	60,0
	2,99-2,71	6,38	5,92	40,98	0,0	33,6
	<2,71	1,45	0,72	84,06	0,0	4,1
	Summe	100,00	31,93	10,29	71,2	13,1

**Tabelle 12: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Chemische Analyse und Mineralgehalte der in der Schwimm-Sink Analyse ermittelten Merkmalsklassen**

Auch für diese Merkmalsklassenanalyse wurden Henry-Reinhardt-Schaubilder zur Darstellung der Verwachsungsverhältnisse erstellt. In diesen Fraktionen zeigt sich ebenfalls der verbesserte Aufschluss mit sinkender Korngröße. Der Aufschlussgrad des Spateisensteins lässt sich aus dem Anteil mit einem Eisengehalt größer 36%, nach Abzug des Quarzgehalts der Dichteklasse > 3,31 g/cm<sup>3</sup>, abschätzen. (Tabelle 13)

Fraktion mm	g		g		AG
	Spateisenstein frei mit Quarz %	Quarz > 3,31 g/cm <sup>3</sup> %	Spateisenstein frei ohne Quarz %	Spateisenstein gesamt %	Spateisenstein %
> 2	44	6,68	37,3	72,7	51,3
2/1	46	6,75	39,3	71,4	55,0
1/0,5	48,5	5,78	42,7	71,2	60,0

**Tabelle 13: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen >0,5 mm, Berechnung des Aufschlussgrads von Spateisenstein**

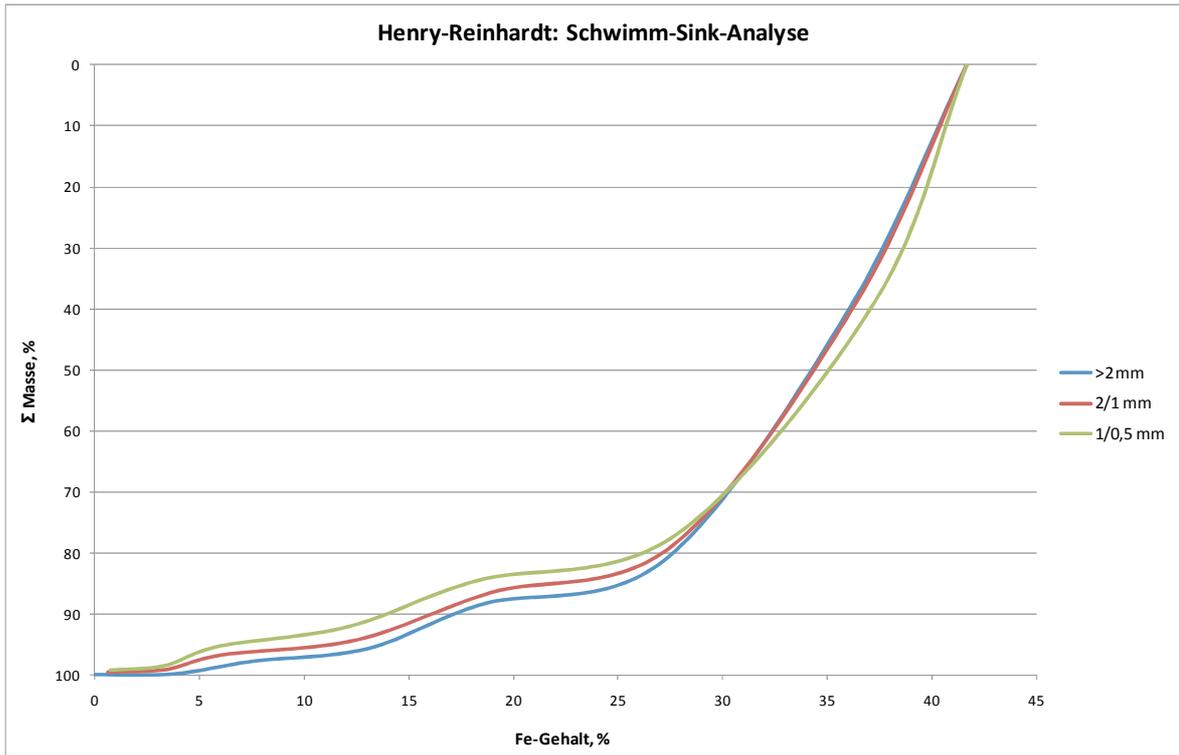


Abbildung 30: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe

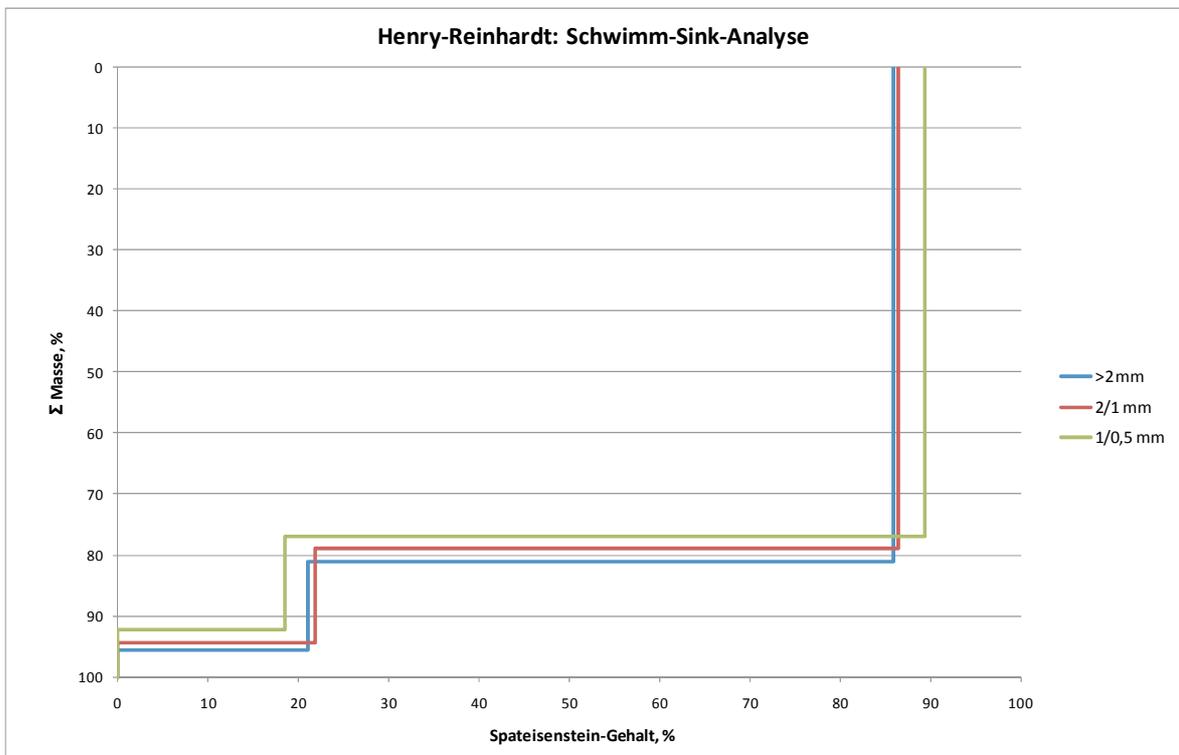


Abbildung 31: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Spateisenstein

#### 4.5.7.3 Dichtemessungen der Schwimm-Sink-Produkte

Die Produkte der Schwimm-Sink Analyse wurden außer auf ihre chemischen Bestandteile auch auf ihre Dichte hin untersucht. Dies erlaubt die Abschätzung der Verwachsungsverhältnisse über die Stoffdichte, da reiner Spateisenstein eine Dichte zwischen 3,6 und 3,8 g/cm<sup>3</sup> und reiner Ankerit eine Dichte von 3,15 g/cm<sup>3</sup> besitzt. Daraus ergeben sich spezifische Volumina von 0,27 cm<sup>3</sup>/g für Spateisenstein und 0,32 cm<sup>3</sup>/g für Ankerit. Die Ergebnisse der Messungen sind der Tabelle 14 zu entnehmen. Mit den spezifischen Volumina kann ein Henry-Reinhardt-Schaubild dargestellt werden (Abbildung 32). Auch in dieser Darstellung kann ein sehr steiler Kurvenverlauf im Bereich der Spateisensteininhalte festgestellt werden. Die Abflachung der Kurve zeigt sich erst bei einem Wert von 0,305 cm<sup>3</sup>/g, was einer Dichte von 3,27 g/cm<sup>3</sup> entspricht. Bei dieser Dichte findet man Verwachsungen zwischen Spateisenstein und größeren Anteilen Ankerit. Die Aussage dieser Betrachtung ist jedoch nicht eindeutig, da auch andere Minerale zur Verwachsung beitragen.

Korngröße Dichte g/cm <sup>3</sup>	>2 mm			2/1 mm			1/0,5 mm		
	Masse %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	1/Dichte cm <sup>3</sup> /g	Masse %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	1/Dichte cm <sup>3</sup> /g	Masse %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	1/Dichte cm <sup>3</sup> /g
>3,31	81,1	3,63	0,28	78,8	3,63	0,28	77,1	3,67	0,27
3,31-2,99	14,5	3,15	0,32	15,5	3,15	0,32	15,1	3,14	0,32
2,99-2,71	4,1	2,86	0,35	4,9	3,10	0,32	6,4	2,86	0,35
<2,71	0,2	2,58	0,39	0,8	2,65	0,38	1,5	2,70	0,37
Summe	100,0	3,52	0,28	100,0	3,52	0,28	100,0	3,53	0,28
Spateisenstein		3,70	0,27						
Ankerit		3,15	0,32						

**Tabelle 14: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Ergebnisse der Stoffdichtebestimmung mit spezifischen Volumina**

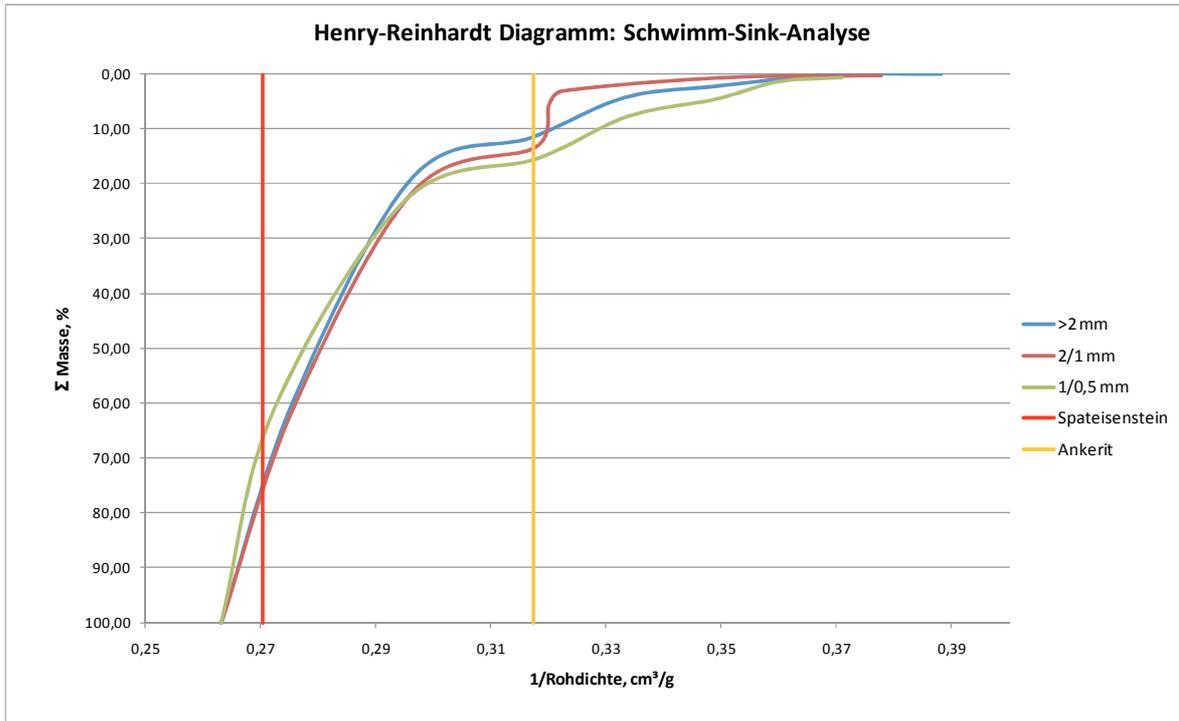


Abbildung 32: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für das spezifische Volumen

## 4.6 Schlussfolgerung

Der untersuchte Schraubenklassierer trennt bei einer Korngröße von 100  $\mu\text{m}$  und bringt 67,8 % des Feststoffs im Grobgut aus und 32,2 % im Feingut. Das Grobgut, dessen Aufbereitbarkeit zu untersuchen war, weist einen mittleren Eisengehalt von 31,77 %, einen Spateisensteingehalt von 70,98 %, einen Ankeritgehalt von 12,79 % und einen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von 10,27 % auf. Merkmalsklassenanalysen haben gezeigt, dass der Quarz in sehr feiner Form sehr eng mit den anderen Mineralen verwachsen ist. Selbst in der feinsten analysierten Fraktion 100/40  $\mu\text{m}$  konnte im Produkt der niedrigsten Erregerstromstärke  $<0,15 \text{ A}$  noch ein Anteil von über 3 % Quarz ermittelt werden. Somit ist in den analysierten Korngrößen kein Aufschluss zwischen Spateisenstein und Quarz feststellbar. Auch die Alkalieninhalte steigen analog zu den  $\text{SiO}_2$  Gehalten an. Der Aufschluss von Spateisenstein zu Ankerit liegt bei Korngrößen  $>2 \text{ mm}$  bei maximal 51 % und steigt bei Korngrößen unter 315  $\mu\text{m}$  auf mehr als 70 % an.

Der Aufgabestrom des Schraubenklassierers zeigt einen Quarzinhalt von 51,23 % in der Fraktion  $< 40 \mu\text{m}$ , welche bei der Klassierung durch den Schraubenklassierer fast vollständig vom Grobgut abgeschieden wird. In den kornklassenbezogenen Inhaltsausbringen kann festgestellt werden, dass Quarz und Ankerit mit einer geringeren Stoffdichte stärker im Feingut ausgetragen werden als der Spateisenstein (Tabelle 7). Dies zeigt den sortierenden Effekt des Schraubenklassierers und den Einfluss der Stoffdichte auf die Endfallgeschwindigkeit der Körner im Sinne der Gleichfälligkeit. Eine Nachauslegung des Schraubenklassierers zu einem gröberen Trennschnitt hin, beispielsweise durch Absenken des Überlaufwehrs könnte eine weitere Verbesserung der Mineralzusammensetzung des Grobgutes bringen, und den störenden Feingutanteil für weitere Sortierschritte reduzieren. [9]

Um die Frage zu klären, ob eine Schwertrübezyklonierung eine Verbesserung der Produktqualität erzielen kann, wurde ein bestmögliches Trennergebnis bei einer Trenndichte von  $3,1 \text{ g/cm}^3$  prognostiziert. Die Prognose wird anhand der Fraktionen  $> 2$ ,  $2/1$  und  $1/0,5 \text{ mm}$  durchgeführt, da für diese Körnungen Daten über die Stoffdichte und geeignete Henry-Reinhardt Schaubilder vorliegen. Das Ergebnis ist in Tabelle 15 zusammengefasst.

Fraktionen mm	Aufgabe					Schwergut				
	Masse %	Fe %	Spateisenstein %	Ankerit %	Quarz %	Masse %	Fe %	Spateisenstein %	Ankerit %	Quarz %
> 2	12,25	32,26	72,70	11,51	9,14	88,5	34,0	78,0	6,1	7,3
2/1	24,57	31,89	71,39	12,48	10,36	86,0	34,5	79,0	6,6	7,4
1/0,5	24,18	31,93	71,24	13,09	10,29	84,5	35,0	80,0	6,5	6,4
Summe	60,99	31,98	71,59	12,53	10,08	85,9	34,5	79,0	6,4	7,0

**Tabelle 15: Prognose einer bestmöglichen Trennung mit einem Schwertrübezyklon bei einer Trenndichte von 3,1 g/cm<sup>3</sup>**

Es zeigt sich, dass unter Annahme einer bestmöglichen Trennung ein Aufbereitungserfolg erzielt werden kann. Eisen und somit auch der Spateisenstein können angereichert und der Ankeritgehalt in etwa halbiert werden. Das fein verwachsene SiO<sub>2</sub> kann jedoch nicht bedeutend abgeschieden werden, sodass noch immer ein SiO<sub>2</sub>-Gehalt von 7 % im Schwergut und damit im Produkt verbleibt. Es ist zu beachten, dass diese Prognose 61 % des Grobgutes einbezieht und die anderen 39 %, welche die Fraktionen < 0,5 mm umfasst, ausschließt. In diesen feineren Fraktionen herrschen noch etwas günstigere Aufschlussverhältnisse, die das Prognoseergebnis geringfügig verbessern würden. Um einen SiO<sub>2</sub>-Gehalt von 5 % zu erreichen, muss entweder mit SiO<sub>2</sub> ärmeren Partien gemischt oder bei höherer Dichte getrennt werden. Bei einer Dichtesortierung bei der Trenndichte von über 3,3 g/cm<sup>3</sup>, was in einem Schwertrübezyklon mit einer mittleren Trübedichte von 3,1 g/cm<sup>3</sup> unter Verwendung von FeSi möglich ist, könnte der Anteil an SiO<sub>2</sub> auf 5 % fallen. Die Verwendung von feinerem Ferrosilizium oder Magnetit als Schwerstoff ist für die Aufbereitung dieser Fraktion 2,5/0,1 mm notwendig.

Mineralogisch wäre es von Interesse, in welcher Form der Quarz, selbst in feinen Fraktionen kleiner 500 µm, Eingang in Merkmalsklassen hoher Dichte und Suszeptibilität finden kann. Diese Verwachsungsverhältnisse sind in weiteren aufbereitungstechnischen Untersuchungen, durch Schliffbilder unter dem Mikroskop zu ermitteln, was aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Aufbereitung des Grobgutes des Schraubenklassierers mittels Schwertrübezyklonierung zwar eine Qualitätssteigerung bringt, SiO<sub>2</sub> jedoch nicht genug abscheiden kann, um die Qualitätsbestimmungen des Spateisensteinkonzentrates zu erfüllen. Dieser Gutstrom enthält allerdings noch große Mengen an Spateisenstein, die Eingang in

ein Fe-Konzentrat finden sollten. Die Beimengung des Grobgutes oder des Schwergutes einer Schwertrübezyklonierung zu anderen,  $\text{SiO}_2$  ärmeren Konzentraten des Steirischen Erzbergs könnte die Weiterverwendung der Spateisensteininhalte sichern. Schätzungen der Betriebsleitung erwarten sich bei einer Aufbereitung des besprochenen Materials ein zusätzliches Konzentrat ausbringen von 100.000 t/a, was die Menge an Abraum deutlich reduzieren würde. Nach einer überdachten Nachauslegung des Schraubenklassierers soll, nicht zuletzt unter Verwendung des geplanten Versuchsstands, eine weitere Aufbereitung mit einer Schwertrübezyklonierung überlegt werden.

## 5 Versuchsstand zur Dichtesortierung im Schwertrübezyklon

### 5.1 Generelles Layout und Auslegungsparameter

Im Vorfeld der Planung und Umsetzung dieser Anlage galt es, Überlegungen zur Funktionsweise einer derartigen Pilotanlage anzustellen. Ziel war es, eine möglichst kleine Anlage zu entwerfen, die ein vernünftiges Handling unter Laborbedingungen ermöglichen würde. Gleichzeitig darf jedoch das Funktionsprinzip der Schwertrübescheidung nicht leiden und auch die Anlagenparameter sollten vergleichbar mit einer Anlage im Produktionsmaßstab bleiben. Der beschränkende Faktor bei der gesamten Anlage war somit der Zyklon, in dem die Trennung vor sich geht. An ihm wurde anschließend die Versorgung mit Schwertrübe und die anderen nötigen Installationen bemessen.

Vorab gilt es zu klären, welche Einsatzstoffe im Betrieb der Anlage verwendet werden. Die flüssige Phase bedarf keiner besonderen Überlegungen, da sie aus reinem Wasser besteht. Als Schwerstoff wird verdüstes Ferrosilizium verwendet, das auch in der Anlage des Steirischen Erzbergs Verwendung findet. Dieses besitzt einen  $D_{50}$  von  $65\ \mu\text{m}$  und ist zu 90 % kleiner als  $100\ \mu\text{m}$ . Es wurde auch die Verwendung eines noch feineren Ferrosiliziums überlegt, um eine größere Differenz zu den Feinanteilen der Aufgabe zu erreichen. In der Auslegung wird jedoch von diesem Schwerstoff ausgegangen, um einen konkreten Anhaltspunkt zu haben.

Konzipiert wird die Anlage für die Aufgabe von karbonatischem Eisenerz, welches am Steirischen Erzberg gewonnen und aufbereitet wird. In engeren Betracht wurde ein Produktstrom der bestehenden Aufbereitungsanlage gezogen. Dabei handelt es sich um die Grobfraction des im vorhergehenden Kapitel behandelten Schraubenklassierers. Damit kann festgelegt werden, dass das Aufgabegut eine Korngrößenverteilung zwischen  $3\ \text{mm}$  und  $100\ \mu\text{m}$  besitzt. Die mittlere Dichte des Erzes wird mit  $3,2\ \text{g/cm}^3$  angesetzt und es kann bei einer Trenndichte von zirka  $3,2\ \text{g/cm}^3$  mit einem Schwergutanfall von etwa 80 % gerechnet werden.

Die möglichen Schaltungen des Versuchsstands wurden in einer Projektstudie besprochen, welche dieser Arbeit voraus ging. Nach reiflicher Überlegung fiel die Entscheidung schließlich zu Gunsten des Layouts, wie es in Abbildung 33 dargestellt ist, aus. Kernstück ist ein Pumpensumpf, der ein Rührwerk zur Homogenisierung der Trübe und der Probe besitzt. Aus diesem Sumpf wird an der tiefsten Stelle von einer Trübepumpe die Schwertrübe inklusive Probe abgezogen und in den Zyklon gepumpt, welcher über dem Sumpf montiert ist. Der Über- und Unterlauf des Zyklons werden anschließend über Bogensiebe geleitet, was eine grobe Abtrennung des Probematerials von der Schwertrübe ermöglichen soll. Die Trübe wird dann wieder zurück in den Sumpf geführt, womit sich der Kreislauf schließt.

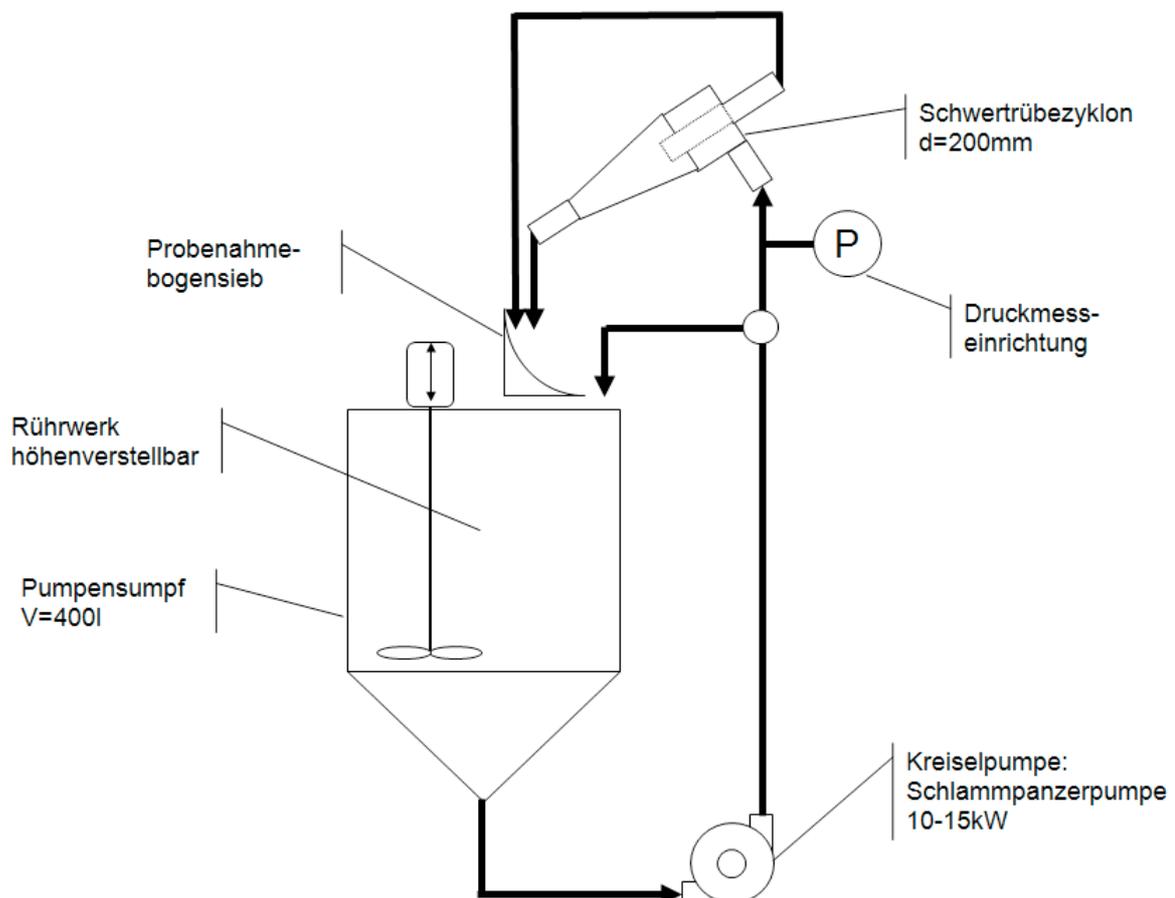


Abbildung 33: Layout des Versuchstands für Schwertrübezyklonierung

## 5.2 Komponenten

### 5.2.1 Die Trübe

Betrachtet man noch vor der Aufgabe von Probematerial zuerst die Schwertrübe selbst, so stellt man fest, dass für die gewünschten Anwendungen der Anlage die spezifische Dichte  $3,0 \text{ g/cm}^3$  nicht übersteigen wird. Es ist ein Trennschnitt im Zyklon von etwa  $3,1 \text{ g/cm}^3$  -  $3,3 \text{ g/cm}^3$  gewünscht, wofür man mit einer Trübedichte von unter  $3,0 \text{ g/cm}^3$  das Auslangen findet. Grund dafür ist die Entmischung der Schwertrübe im Fliehkraftfeld des Zyklons, die abhängig vom radialen Abstand zum Zentrum Zonen mit verschiedener Dichte entstehen lässt.

Um eine Schwertrübe mit einer Dichte von  $3,0 \text{ g/cm}^3$ , der angenommenen maximalen Dichte, herzustellen, wird der Schwerstoff in Wasser dispergiert. Das verdünte Ferrosilizium liegt mit einer Dichte von  $6,9 \text{ g/cm}^3$  vor und besitzt eine annähernd kugelförmige Kornform, was sich der Theorie zufolge positiv auf die rheologischen Eigenschaften auswirkt. Die mittlere Dichte errechnet sich nach Glg. 4 und liefert einen Anhaltspunkt für die mittlere Zusammensetzung der Schwertrübe. Nach Glg. 5 ist in einer Trübe mit einer Dichte von  $3,0 \text{ g/cm}^3$  die Feststoffvolumenkonzentration von Ferrosilizium 34 Vol-%.

Für die Auslegung der Komponenten des Versuchsstandes ist jedoch nicht nur das Trägermedium, die Schwertrübe, von Bedeutung, sondern die gesamte bewegte Masse, die die aufgegebene Probe einschließt. In Schwertrübezyklonanlagen ist eine Volumenkonzentration an Aufgabe von 15-25 Vol-% üblich. Je höher jedoch das Schwergutausbringen im Unterlauf zu erwarten ist, umso geringer sollte der Gutanteil ausfallen. Da es sich in diesem Fall um einen Versuchsstand handelt, in dem Massenströme zu minimieren sind, und da die Volumenkonzentration offenbar wenig Auswirkung auf die Trenncharakteristik zeigt, geht die Auslegung von einem maximalen Gutanteil von 15 Vol-% aus. Außerdem ist der Rohgutspezifikation zufolge ohnehin mit einem hohen Schwergutanfall zu rechnen. In den Versuchen, welche für diese Anlage geplant sind, werden jedoch noch geringere Anteile von Vorteil sein.

Komponente	ohne Probematerial		mit Probematerial		
	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Volumen %	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Volumen %	Masse %
Wasser	1,00	66,1	1,00	56,2	18,5
Schwerstoff	6,90	33,9	6,90	28,8	65,6
Gutaufgabe	3,20	0,0	3,20	15,0	15,8
Summe	3,00	100,0	3,03	100,0	100,0

Tabelle 16: Übersicht über die geplante maximale Zusammensetzung der Schwertrübe mit und ohne Probe

### 5.2.2 Der Zyklon

Als Trennaggregat ist der Zyklon der wichtigste Bauteil des Versuchsstandes, an dem der Rest der Anlage auszulegen ist. Es sollte der kleinstmögliche Zyklon, der serienmäßig hergestellt wird, zum Einsatz kommen, der die Trenncharakteristik gegenüber einer größeren Ausführung im industriellen Maßstab nicht verändert. Die kleinsten Ausführungen, die hierzu in Verwendung sind, bewegen sich im Bereich von 75 mm Durchmesser, wobei Experten zu einem Durchmesser von 250 mm raten [10], da hier die Vergleichbarkeit mit größerer Sicherheit erhalten bleibt. Die Geometrie von Schwertrübezyklonen ähnelt stark der von Hydrozyklonen, doch unterscheiden sie sich je nach Hersteller leicht in den Proportionen. Bei der Angebotsfindung stellte sich jedoch heraus, dass die Hersteller in diesem kleinen Maßstab nicht zwischen den Bauweisen unterscheiden. Die Verfügbarkeit von Zyklonen dieser Größenordnung ist allerdings stark eingeschränkt. Die Wahl fiel schließlich auf einen Hydrozyklon, Modell D6B-12°-839 der Firma FL Smith Krebs Europe GmbH. Dieser ist ein Zyklon mit einem Innendurchmesser von ca. 190 mm und einem Konuswinkel von 12°. Die Innenauskleidung ist mit Gummi ausgeführt. [11]



**Abbildung 34: Hydrozyklon, Modell D6B-12°-839 der Firma FL Smith Krebs Europe GmbH**

Die Entscheidung für dieses Produkt lieferte die Ausgangsbasis für die Auslegung der Trübe- und Schlammpumpe, die für die Beschickung des Zyklons dimensioniert werden muss. Aus dem Kennlinienfeld des Zyklons kann anhand des Aufgabedrucks und des Durchmessers des Unterlaufs (Vortex Finder) die Durchsatzleistung in  $\text{m}^3/\text{h}$  abgelesen werden. (Abbildung 35) Das Studium des Diagramms ergibt, dass bei einem Aufgabedruck von 1,5-2 bar (150-200 kPa) und einem kleinen Vortex Durchmesser von 1,25“ bis 1,75“ der Durchsatz zwischen 18 und 30  $\text{m}^3/\text{h}$  liegt. Für diese Durchsatzleistung in Verbindung mit dem angelegten Druck musste nun eine Pumpe gefunden werden.

2.20 SQ. IN. INLET ORIFICE

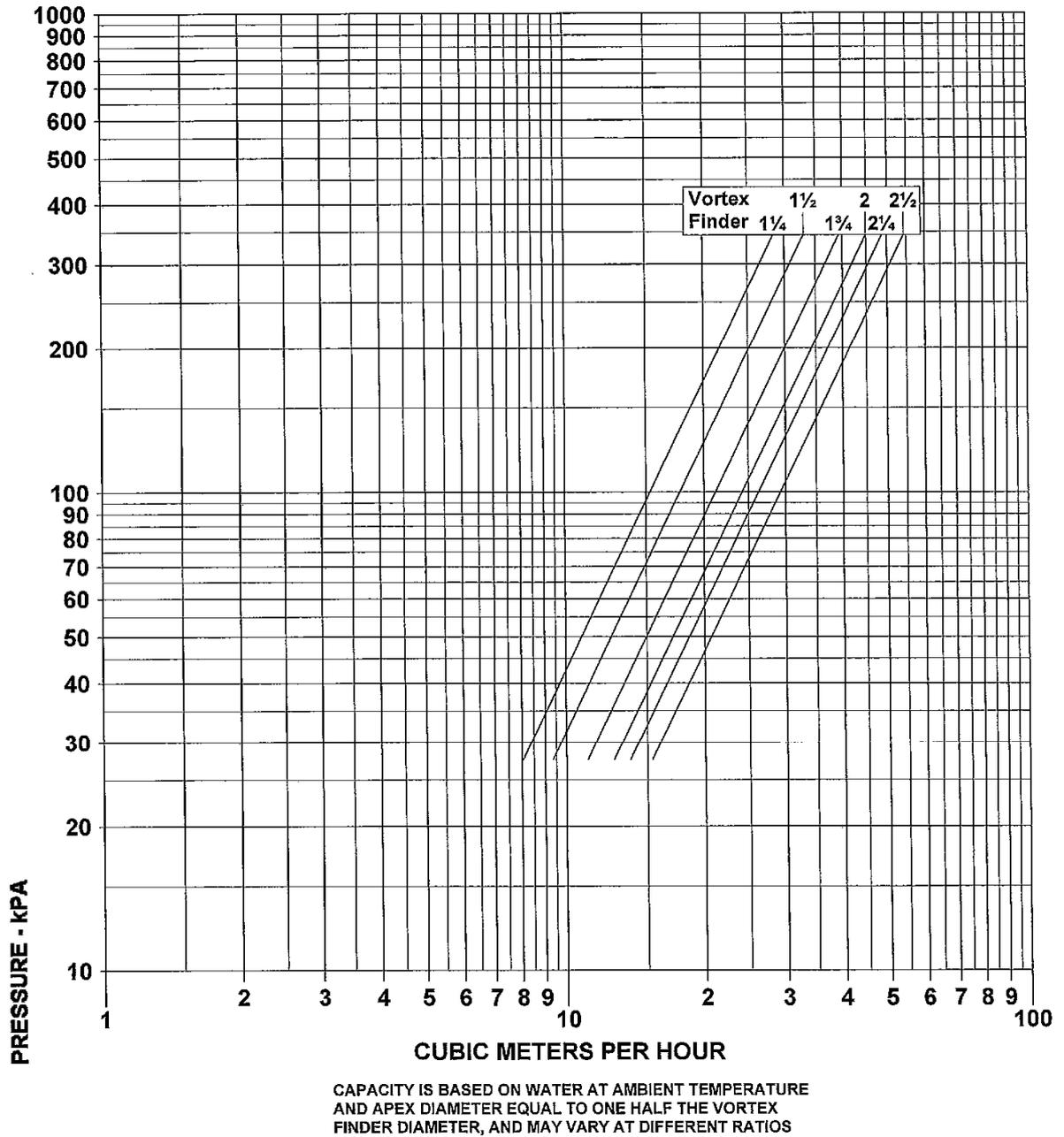


Abbildung 35: Kennlinienfeld des verwendeten Hydrozyklons, Modell D6B-12°-839 der Firma FL Smith Krebs Europe GmbH [11]

### 5.2.3 Die Trübepumpe

Auch bei der Auslegung der Pumpe wird von den maximalen Anforderungen ausgegangen. An geringere Anforderungen im Betrieb kann die Pumpendrehzahl mittels eines Frequenzumformers angepasst werden. Die statische Höhe, die es für die Pumpe zu überwinden gilt, beträgt maximal 2 m. Dazu kommt ein Aufgabedruck von maximal 2 bar, was umgerechnet eine Förderhöhe von 20,4 m ausmacht. Zusammen ergibt dies eine Förderhöhe von 22,4 m, bei der, laut dem Kennlinienfeld des Zyklons, ein Volumenstrom von bis zu 30 m<sup>3</sup>/h erforderlich ist.

An dieser Stelle sei vorweggenommen, dass die Auslegung der angeschafften Pumpe auf Berechnungen des Pumpenanbieters beruht. Als Anforderungen an die Pumpe wurden die folgenden Daten angegeben:

- Fördermedium: Schwerertrübe
- Korngröße: maximal 3 mm
- Fördervolumen: ca. 20 m<sup>3</sup>/h
- Zulaufhöhe: ca. 1,0 m
- Aufstellung der Pumpe: trocken
- Statische Höhe: 3 m
- Zyklondruck: unbekannt, angenommen mit ca. 1,5 bar

Die Wahl fiel auf die Trübepumpe des Typs millMAX 3x4-9 von FL Smith Krebs Europe GmbH. Da die angegebenen Anforderungen nicht exakt den maximalen Anforderungen des Systems entsprechen, wird in Folge die Auslegung in groben Zügen nachvollzogen und auf Eignung überprüft.

Es sei angemerkt, dass die bisher berechnete Förderhöhe für die Trübe angesetzt ist, während Kennlinienfelder der Pumpenhersteller mit reinem Wasser rechnen. Es ist daher notwendig, den passenden HR-Wert zu finden, mit dem schließlich die Trübe-Förderhöhe in die Wasser-Förderhöhe umgerechnet werden kann. Dazu muss man wiederum die Zusammensetzung der Trübe mit Ferrosilizium und Aufgabegut betrachten. Eine reine Schwertrübe verhält sich wie ein Bingham-Fluid, jedoch fehlen genaue Werte der plastischen Viskosität, um eine Berechnung nach dem oben erwähnten Verfahren anzustellen. Nach der Abschwächung durch

die Schwertrübe selbst müsste jedoch immer noch der Einfluss des aufgegebenen Gutes eingerechnet werden. Um trotzdem einen Anhaltspunkt für die Koeffizienten zu bekommen, betrachtet man den Schwerstoff als sedimentierenden Feststoff, was seiner hohen Dichte zufolge auch gewissermaßen zutrifft. Dazu wird auf das einfache Modell der sedimentierenden Trüben zurückgegriffen. Das hierzu vorhandene Diagramm (Abbildung 12) bezieht die Feststoffvolumenkonzentration der Trübe, den  $D_{50}$ -Wert, den Laufraddurchmesser und die spezifische Feststoffdichte mit ein. Nun gibt es allerdings zwei zu betrachtende Feststoffkomponenten: den Schwerstoff und das Aufgabegut. Aufgrund der unterschiedlichen Dichten von  $6,9 \text{ g/cm}^3$  und  $<3,8 \text{ g/cm}^3$  und der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen ist eine gemeinsame Betrachtung nicht ratsam. Um allerdings beide Komponenten der Trübe zu beachten, wird zuerst eine reine Schwertrübe nur mit Ferrosilizium und Wasser beurteilt und anschließend das Aufgabegut einberechnet.

Die Werte zur Berechnung des HR- und ER-Wertes der reinen FeSi-Trübe sind:

- $C_v = 34 \%$
- $D_{50} = 65 \mu\text{m}$
- $D = 228,6 \text{ mm}$
- $SG_s = 6,9 \text{ g/cm}^3$

$C_v$  = Feststoffvolumenkonzentration [%]

$D_{50}$  = Maschenweite mit Durchgang 50 % [ $\mu\text{m}$ ]

$D$  = Laufraddurchmesser [mm]

$SG_s$  = Feststoffdichte [ $\text{g/cm}^3$ ]

Mit den in das Diagramm eingetragenen Werten, unter Berücksichtigung einer groben Interpolation, ergeben sich ein HR-Wert von 0,79 und ein ER-Wert von 0,74.

Die Werte zur Berechnung des HR- und ER-Wertes für den Einfluss des Aufgabegutes sind:

- $C_V = 15 \%$
- $D_{50} = 750 \mu\text{m}$
- $D = 228,6 \text{ mm}$
- $SG_S = 3,2 \text{ g/cm}^3$

Mit den in das Diagramm eingetragenen Werten, unter Berücksichtigung einer groben Interpolation, ergeben sich ein HR-Wert von 0,73 und ein ER-Wert von 0,73.

Der gesamte Koeffizient zwischen Wasser und der Trübe kann folglich mit dem Produkt der Koeffizienten angenähert werden. Damit ist der resultierende HR-Wert ca. 0,57 und der resultierende ER-Wert 0,54. Dies ist als grobe Näherung zu verstehen, doch sollte diese für die weitere Auslegungsrechnung genügen.

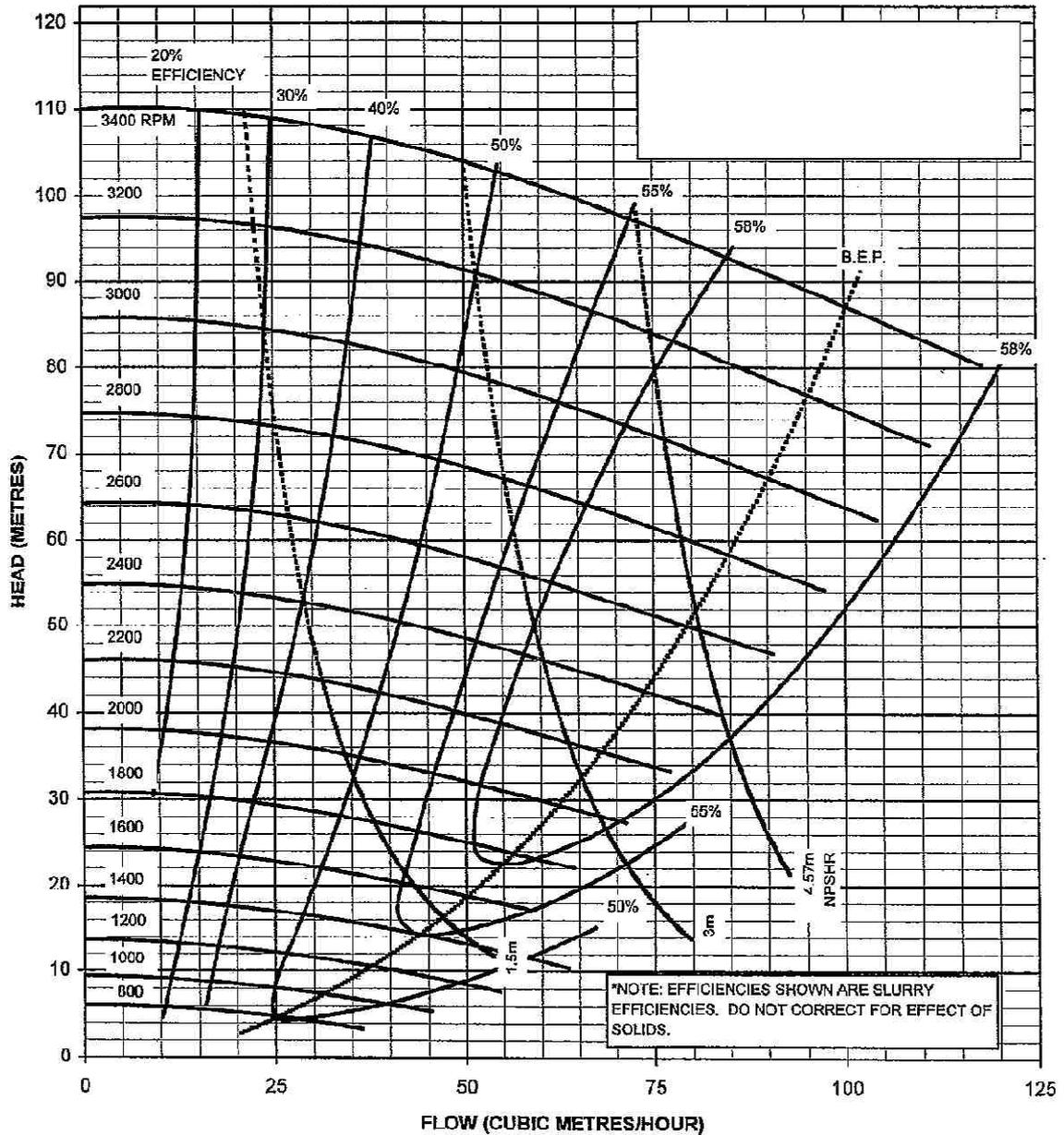


Abbildung 36: Kennlinienfeld der Trümpumpe des Typs millMAX 3x4-9 von FL Smith Krebs Europe GmbH [11]

Dividiert man nun die benötigte Förderhöhe von 22,4 m durch den HR-Koeffizienten, so erhält man eine äquivalente Förderhöhe von Wasser von 39,3 m. Mit der Förderhöhe (engl.: head) von 39,3 m und einem Durchsatz (engl.: flow) von 30 m³/h kann man nun das Kennlinienfeld der ausgewählten Pumpe in Augenschein nehmen. (Abbildung 36) Die genannten Betriebsparameter erfordern einen Betrieb der Pumpe bei 2100 U/min und der Wirkungsgrad der Pumpe kann

mit ca. 44 % abgelesen werde. Da das Kennlinienfeld bereits den Wirkungsgrad für Trübeanwendungen mit eingetragen hat, erübrigt sich die Korrektur mittels eines berechneten ER-Werts. Setzt man die angegebenen Parameter in Glg. 16 ein, so ergibt sich eine erforderliche Antriebsleistung von 12,5 kW bei einem ER-Wert von 0,44. Wählt man den zuvor berechneten ER-Wert von 0,54, so verringert sich die Leistung auf 10,2 kW. Im Sinne der Sicherheit sollte die Wahl beim Motor auf eine stärkere Variante fallen, um Leistungsreserven zu haben.

Von Interesse ist nun auch die spezifische Geschwindigkeit des Laufrads, die die Förderhöhe mit einbezieht. Am Betriebspunkt sind folgende Werte einzusetzen (Glg. 10):

- $N = 2100 \text{ U/min}$
- $Q = 0,0083 \text{ m}^3/\text{sec}$
- $H = 39,3 \text{ m}$

Die Rechnung (Glg. 10) ergibt eine spezifische Geschwindigkeit von 12,2, was in Abbildung 8 betrachtet ein sehr geringer Wert ist. Erklärung dafür ist, dass die Pumpe nicht in ihrem effizientesten Bereich betrieben wird. Entnimmt man dem Kennlinienfeld die Parameter der besten Effizienz, so muss die Berechnung der spezifischen Geschwindigkeit beispielsweise mit folgenden Werten angestellt werden:

- $N = 2800 \text{ U/min}$
- $Q = 0,236 \text{ m}^3/\text{sec}$
- $H = 58 \text{ m}$

Die spezifische Geschwindigkeit im BEP beträgt folglich 64,7. Die Laufrad-geometrie ist im gewählten Angebot nicht erwähnt, doch kann anhand dieser Berechnung auf eine Bauart mit einer „Francis-Vane“ geschlossen werden. Die Dichtung zu Welle hin übernimmt eine Expeller-Dichtung, wie bereits im Theorieteil der Arbeit besprochen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die ausgewählte Pumpe den Einsatzbereich leicht abdecken kann. Die Trübepumpe ist für höhere Durchsätze und Drücke ausgelegt, doch kann mit gedrosselter Drehzahl der Einsatzbereich

erreicht werden. Da die Anwendung in diesem Fall eine viel kleinere Anlage betrifft, als das bei Trübeapplikationen normal üblich ist, dürfte dies das kleinste Modell in der Palette von FL Smith Krebs Europe GmbH sein. Doch sieht man vom Wirkungsgrad ab, bietet die Pumpe eine ausreichende Leistung mit genug Spielraum nach oben.

#### 5.2.4 Der Pumpensumpf

Zuerst muss das Volumen des Pumpensumpfes geklärt werden. Die Theorie spricht von einer Verweilzeit von etwa einer Minute, um das Entgasen der Trübe zu ermöglichen. Bei einem Volumenstrom durch den Zyklon von maximal 30 m<sup>3</sup>/h ergibt sich ein Nennvolumen von 0,5 m<sup>3</sup>. Dazu kommt das Volumen an Trübe, welches sich im Kreislauf befindet, da im Falle des Anfahrens und des Herunterfahrens der Anlage auch dieses Volumen gefasst und gerührt werden muss. Hierfür wurden nach Schätzungen 0,04 m<sup>3</sup> veranschlagt. Um die Größe des Sumpfes, das benötigte Trübevolumen und damit auch die Anlagenmasse etwas zu reduzieren, wird die Auslegung auf einem Nennvolumen von 0,457 m<sup>3</sup> aufgebaut, was einer einminütigen Verweildauer bei einem Volumenstrom von 25 m<sup>3</sup>/h entspricht und die 0,04 m<sup>3</sup> des Kreislaufes bereits einschließt. Wird die Anlage dennoch bei einem Durchsatz von 30 m<sup>3</sup>/h betrieben, so verringert sich die Verweildauer auf 50 sec, was bei den gesetzten Homogenisierungsmaßnahmen ausreichen dürfte. Das Gesamtvolumen des Sumpfes wird anschließend noch um 0,09 m<sup>3</sup> erweitert, um eine angemessene freie Pegelhöhe zum oberen Rand zu erhalten. Ein Durchmesser des Sumpfes von einem Meter schien bei einer daraus resultierenden gesamten Gefäßhöhe von ca. 0,9 m geeignet.

Die Geometrie des Sumpfes soll wie bereits erwähnt zylindrisch sein und der Boden sollte möglichst wenige Totzonen aufweisen, in denen Sedimentation stattfinden kann. Daher wird ein Kegelförmiger Boden mit einem Neigungswinkel von mindestens 30° vorgeschlagen, da dies den Schüttwinkel von FeSi unter Wasser übersteigt. Als Alternative kann auch ein Klörperboden verwendet werden, der einer Halbkugel ähnelt. Bei einer Abschaltung der Anlage und der damit verbundenen Sedimentation ergibt dieses Layout zwar eine beträchtliche

Totzone, doch während des Betriebs mit einem Rührwerk unterstützt es dafür die gleichmäßige Strömungsbildung im gesamten Sumpf.

Die Aufstellung des Sumpfes soll mit Stützen erfolgen, welche den Abzug der Trübe aus dem Tiefsten erlauben. Die Höhe der Montage richtet sich nach den Installationen, die darunter angebracht werden. Zusätzlich ist es erwünscht, dass unterhalb der Installationen eine lichte Höhe von mindestens 30 cm verbleibt, damit ein Auffanggefäß, wie zum Beispiel ein Kübel, darunter passt. Die daraus resultierende Montagehöhe kann nun als Grundlage für die Dimensionierung der Steher dienen.

Für die Steherdimensionierung ist neben der Bauhöhe die Masse, die getragen werden muss, ausschlaggebend. Der Sumpf selbst wird mit einer Masse von 77 kg angenommen. Die darin maximal enthaltene Trübe wiegt 1384 kg und stellt damit den weitaus größten Teil der Masse. Alle weiteren eingerechneten Massen sind in Tabelle 17 dargestellt:

<b>Gesamtwicht Anlage</b>		<b>Gewichtskraft</b>	
Trübe	1383,7 kg	Trübe	13574,1 N
Sumpf	73,9 kg	Sumpf	724,7 N
Strömungsbrecher	2,7 kg	Strömungsbrecher	26,3 N
4 Steher (I 160) 2m	340,8 kg	Steher	3343,3 N
Streben	58,4 kg	Streben	572,6 N
Rührwerkshalterung	23,0 kg	Rührwerkshalterung	225,6 N
Rührwerk	71,0 kg	Rührwerk	696,5 N
Summe	1953,4 kg	Summe	19163,1 N
Last/m <sup>2</sup>	2411,6 kg/m <sup>2</sup>		
		Summe (Sumpf+Trübe)	14325,1 N
		Summe Steherbelastung	17491,4 N

**Tabelle 17: Massenaufstellung der Versuchsanlage**

Als Profil für die Steher wurde ein I-Träger des Typs I PB-Träger ON EN 10034-160-S235JR gewählt, der eine Abmessung von 160x160 mm hat. Um die Knicklänge, die nach Euler berechnet wird, zu reduzieren, wurden drei Verstrebungen eingeplant. Diese Verstrebungen werden mit Profilen des Typs U-Stahl ON EN 10024-80-S235JRG1 ausgeführt. Aufgabe der obersten Strebe soll es außerdem sein, als Auflage für den Behälter zu dienen und damit den Großteil des Gewichts des Sumpfes zu tragen. Tabelle 18 beinhaltet die Berechnung der Sicherheiten, die die Auswahl der genannten Profile begründen. [12]

Ein Vorschlag für den Zusammenbau des Sumpfes mit der genannten Steherkonstruktion befindet sich im Anhang C. Dieser Vorschlag soll als Grundlage für die endgültige Umsetzung in Zusammenarbeit mit der MSE-Erzberg dienen.

<b>Steher - Knicklänge</b>				
Flächenträgheitsmoment	I	889	mm <sup>4</sup>	
E-Modul Baustahl	E	210000	N/mm <sup>2</sup>	
Knicklänge 400mm Faktor 0,7	L <sub>k</sub>	280	mm	
Euler-Knickkraft	F <sub>k</sub>	23502	N	
aufgebrachte Last (statisch)	F <sub>erf</sub>	4373	N	
Sicherheit	v	5,4	soll:	4,0 ... 6,0

<b>Träger - Sumpfaufgabe</b>				
gesamte Trägerlänge	2.l	790	mm	
Hebelarm	l	395	mm	
gesamte Last	F <sub>ges</sub>	14325	N	
Hebellast	F	1791	N	
resultierendes Moment	M	707303	Nmm	
Widerstandsmoment	W	6,36	*10 <sup>3</sup> mm <sup>3</sup>	
resultierends Spannung	sigma	111,2	N/mm <sup>2</sup>	
Streckgrenze	Re	235	N/mm <sup>2</sup>	soll
Sicherheit	v	2,1	soll:	1,30 ... 2,0

**Tabelle 18: Berechnung der statischen Sicherheit für die ausgewählten Profile**

### 5.2.5 Das Rührwerk

Da Laborversuche mit einer kleineren Pumpe gezeigt haben, dass das Ferrosilizium aufgrund seiner hohen Dichte zu schnell sedimentiert, wurde beschlossen, ein zusätzliches Rührwerk zu installieren, das die Homogenisierung des Schwerstoffs und der Probe im Sumpf zur Aufgabe hat. Das Funktionsprinzip sieht ein oder zwei Röhrelemente vor, die zentral im Sumpf entweder einen aufwärts oder abwärts gerichteten Strom erzeugen und damit eine zirkulierende Bewegung der Trübe im Sumpf erreichen. Strömungsbrecher sollen verhindern, dass die gesamte Trübe zu rotieren beginnt. Generelles Ziel ist es, dass der aufwärts gerichtete Strom entweder im Zentrum oder an der Außenwand die Sedimentationsgeschwindigkeit des Feststoffs signifikant übersteigt und damit die Trübe homogenisiert. Ausgelegt wird anhand vieler Faktoren wie Trübedichte, Feststoffbestandteile, Viskosität, Temperatur uvm. Darum wurde die Dimensio-

nierung von Rührwerksherstellern übernommen und mit ihnen die Bauart auf die gewünschte Funktionalität angepasst.

Eine Bedingung, die durch die Rührwerkkonstruktion erfüllt sein muss, ist die Hebbbarkeit der Rührwerksaufhängung inklusive des Rührwerks. Dies wird für den Fall benötigt, dass die Versuchsanlage abgestellt wird, ohne sie zuvor vollständig zu entleeren. Das vollständige Füllen und Entleeren der Anlage stellt sich bei einem Trübevolumen von 450 Litern als aufwendig dar, weshalb der Betriebsplan zwischen den Versuchen nur die Abtrennung der Probe vorsieht. Das Ferrosilizium soll nach dem Abstellen des Rührwerks sedimentieren und so „gestapelt“ werden. Würde nach dem Abstellen jedoch das Rührorgan mit eingesedimentieren, so wäre es mit reiner Motorkraft nicht mehr loszubrechen und auch das Freilegen aus dem stark kompaktierten Ferrosilizium wäre wohl kaum möglich. Darum muss im Fall des Betriebsstillstandes das Rührorgan auf eine sichere Höhe angehoben werden, in der es nach dem Sedimentieren in Klarwasser zu liegen kommt. Von dort aus sollte es bei einem neuerlichen Anfahren auch möglich sein, das Ferrosilizium mit einem zusätzlichen, über einen By-Pass geführten Wasserstrahl aufzurühren. Mögliche genauere Ablaufschemata werden später behandelt.

### **5.2.6 Verrohrung und Armaturen**

Wegen Reibungsverlusten und Abrasion beim Transport von Trüben muss die Auswahl von Rohrleitungen und Armaturen der Verwendung angepasst werden. Für den 90° Bogen zwischen dem Abzug aus dem Sumpf und dem Pumpeneinlass wird eine runde Rohrführung anstatt eines T-Stücks empfohlen. Alle weiteren Verrohrungen werden mit flexiblen Schläuchen angedacht, da dies einerseits eine aufwendige Verrohrung erspart und andererseits verhältnismäßig flüssige Leitungsverläufe zulässt.

Die für die Anlage geeigneten Ventile wurden bereits oben besprochen, doch fällt die Empfehlung zugunsten des Plattenschiebers aus. Seine Vorteile liegen in der einfachen Konstruktion, was eine kleine Baugröße ermöglicht. Quetschventile hingegen beanspruchen viel Platz für den Einbau und ihre Fähigkeit der

Durchflussregulierung wird im gegenständlichen Fall nicht benötigt. Der Einbau einer kleinen Ventileinheit am Sumpfabzug an der Unterseite des Sumpfes würde folglich die Bauhöhe der Gesamtanlage verringern.

Für den Betrieb der Versuchsanlage sind noch weitere Einrichtungen zu überlegen. So wäre ein By-Pass von Vorteil, der den Zyklon umgeht und direkt wieder in den Sumpf mündet. Die schwenkbare Ausführung dieser Einrichtung kann schlussendlich auch zur Entleerung der Systems herangezogen werden. Außerdem würde für das Anfahren ein weiterer By-Pass von dem Klarwasser in den Pumpenzulauf benötigt werden.

Vor dem Zykloneinlauf muss außerdem eine Druckmesseinrichtung installiert werden. Diese ist für die geplanten Versuche auf dieser Anlage ausschlaggebend, da der Aufgabedruck für die Funktionsweise des Zyklons von großer Bedeutung ist. Zur Auswahl stehen beispielsweise das Rohrfedermanometer oder das Plattenfedermanometer.

### **5.2.7 Mögliche Arbeitsabläufe für das Hoch- und Niederfahren der Anlage**

Um die die Anordnung der Anschlüsse und Ventile zu planen, empfiehlt es sich, die Arbeitsabläufe bei den wichtigsten Phasen des Betriebs zu standardisieren. Im Folgenden wird versucht, mögliche Abläufe zu erstellen, anhand derer die Positionierung der Installationen vorgenommen werden können:

Anfahren:

1. Sumpf mit Wasser füllen
2. Pumpe fluten und anfahren über Bodenventil (Klarwasserventil oben geschlossen)
3. Starten des Rührwerks
4. Kontinuierliche Zugabe von Ferrosilizium
5. Zugabe von Probe

Herunterfahren ohne Entleerung:

1. Entfernen der Probe über Bogensieb
2. Öffnen des Klarwasserventils oben
3. Öffnen des Klarwasserventils unten
4. Schließen des Bodenventils
5. Abschalten des Rührwerks

6. Heben des Rührwerks auf eine sichere Höhe  
(kein Einsedimentieren)
7. Abschalten der Pumpe, wenn nur noch geringe Feststoffkonzentration im Umlauf ist
8. Schließen des Klarwasserventils oben
9. Schließen des Klarwasserventils unten
10. Demontage des Klarwasserschlauchs unten
11. Entleeren des Schlauchs
12. Öffnen des Klarwasserventils unten
13. Entleeren der Pumpe (optional Spülung)
14. Montage des Schlauchs

Anfahren des gestapelten Ferrosiliziums:

1. Montage des Klarwasserschlauchs
2. Öffnen des Klarwasserventils oben
3. Öffnen des Klarwasserventils unten
4. Pumpe fluten
5. Pumpe anfahren
6. Optional über By-Pass oberes Rührorgan freispülen
7. Anfahren des Rührwerks (optional mit FU)
8. Aufrühren des gestapelten FeSi
9. Senken des Rührwerks auf Betriebsniveau
10. Öffnen des Bodenventils
11. Schließen des Klarwasserventils oben
12. Schließen des Klarwasserventils unten
13. Demontage des Klarwasserschlauchs unten
14. Entleeren des Schlauchs
15. Anschließend Montage des Schlauchs

Entleeren des Sumpfes:

1. Entfernen der Probe über Bogensiebe
2. Über By-Pass ca. 4-5 Fässer (100l) befüllen
3. Bei sinkendem Pegel Rührwerk mittels FU drosseln
4. Rührwerk einstellen
5. Vor dem Trockenlaufen Pumpe einstellen
6. Demontage des Klarwasserschlauchs unten
7. Langsames Öffnen des Klarwasserventils unten
8. Entleeren des Trüberests über Klarwasserventil unten
9. Mit Frischwasser durchspülen
10. Anschließend Montage des Schlauchs

## 6 Quellen

- [1] Schubert, H.: Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse. ISBN 3-342-00555-6, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1996). Seite 4-31
- [2] Meissner, P.: Viskositäts- und Stabilitätsbeschreibung von Schwertrüben. Bakkalaureatarbeit (2008), Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben.
- [3] Hartmann, H.L.: SME mining engineering handbook, Band 2. ISBN 0-87335-100-2, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (1992). Seite 2241-2244
- [4] Mular, Andrew L.: Mineral processing plant design, practice and control: Band 2. ISBN 0-87335-223-8, published by Society of Mining Engineers of the American Institute of the Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers. Verlag SME (2002). Seite 1373-1445
- [5] AEI Software: <http://www.irricad.com/Irricad/Download/Help/HowTo/How%20To%20Find%20Hazen-Williams%20C%20Values.pdf>, 11.04.2010
- [6] Metso Minerals: Slurry Pumps Basic, Basic Guidelines in Slurry Pumping. published by Metso Minerals (Sala) AB, Sweden
- [7] Gülich, J. F.: Kreiselpumpen: ISBN 3-540-56987-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (1999), Seite 571ff
- [8] Böhm A.: Eisenerz. Skriptum zur Vorlesung: Erzaufbereitung und Kohlentechnologie (2008), Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben.
- [9] Schubert, H.: Aufbereitung fester Stoffe, Band I: Sortierprozesse. ISBN 3-342-00152-6, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1989).
- [10] Gespräch mit Herrn DI Vital Dittrich, Metso Minerals Wien
- [11] FL Smith Krebs Europe GmbH: diverse Produkt Beschreibungen und Datenblätter
- [12] Frischherz, A., u.a.: Tabellenbuch für Metalltechnik: ISBN 3-7002-0959-2, Bohmann Verlag (1998)

## 7 Anhang

- A. Probenahme
- B. Versuchsauswertung
- C. Auslegung

## 7 Anhang

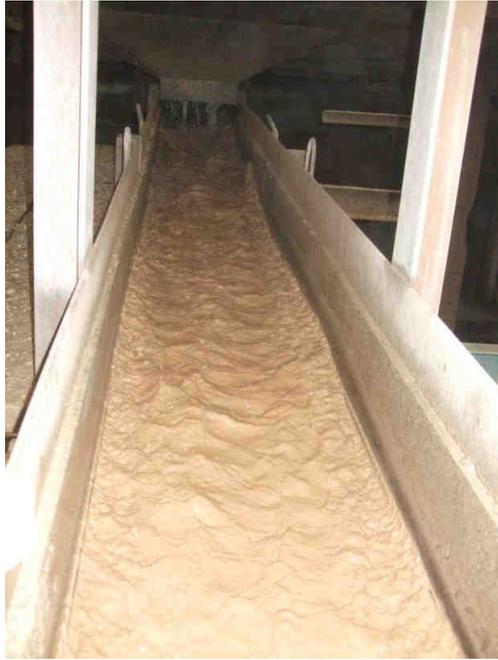
### A. Probenahme



Abbildung 1: Sammelprobe des Aufgabestroms



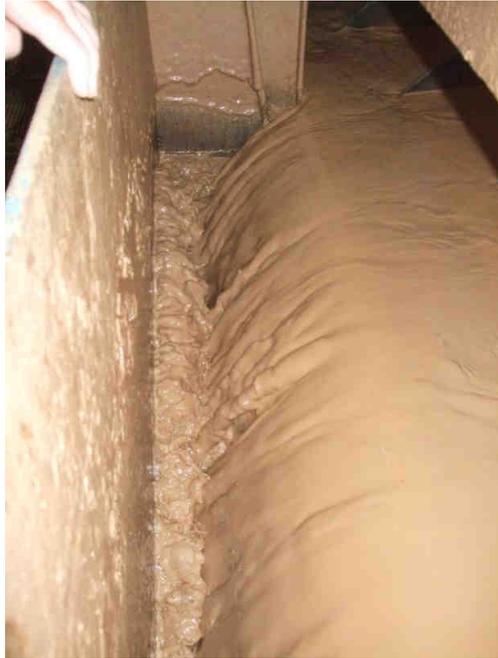
Abbildung 2: Tauchrohr für die Probenahme im Aufgabestrom



**Abbildung 3: Rinne des Aufgabestroms**



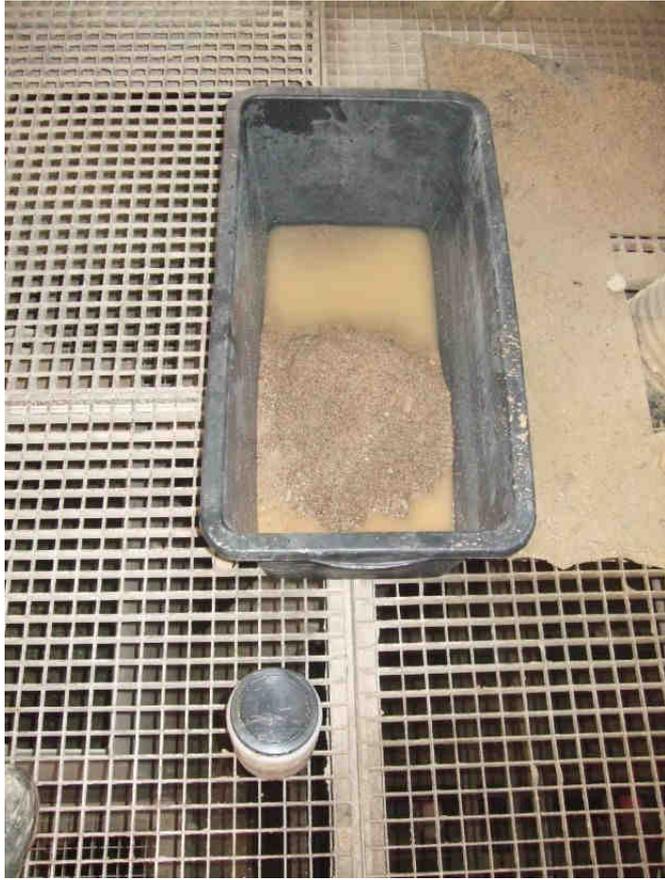
**Abbildung 4: Sammelprobe Feingut mit Probenahmegefäß**



**Abbildung 5: Überlauf und Probenahmestelle des Feinguts**



**Abbildung 6: Überlauf, Ansicht vom Inneren des Schraubenklassierers**



**Abbildung 7: Sammelprobe des Grobguts**

## B. Versuchsauswertung

Probe	Fraktion	Klasse	Masse, %	Fe	FeO	CaO	SiO2	S-Alk	MgO	Mn	Al2O3	S	P	Spateisenstein	Ankerit	Quarz	Rest	
Aufgabe	>2,000		8,56	31,29	40,25	4,99	10,64	0,929	3,34	1,81	2,36	0,026	0,018	69,9	12,6	10,6	6,9	
	2,000/0,500		28,99	30,96	39,83	5,33	9,90	0,896	3,33	1,80	2,19	0,030	0,019	68,9	13,0	9,9	8,2	
	0,500/0,315		9,52	30,95	39,82	5,17	10,30	0,994	3,35	1,80	2,50	0,035	0,020	68,7	13,5	10,3	7,5	
	0,315/0,200		8,72	31,09	40,00	5,08	10,05	1,012	3,37	1,81	2,57	0,050	0,021	69,0	13,6	10,1	7,3	
	0,200/0,160		3,80	30,96	39,83	5,14	10,66	1,060	3,40	1,80	2,73	0,055	0,022	68,3	14,6	10,7	6,5	
	0,160/0,125		3,54	30,83	39,66	5,17	11,05	1,096	3,41	1,79	2,88	0,058	0,022	67,7	15,1	11,1	6,1	
	0,125/0,100		3,31	30,32	39,01	5,21	11,30	1,130	3,35	1,76	2,98	0,064	0,023	66,7	14,7	11,3	7,3	
	0,100/0,040		10,15	29,06	37,39	5,50	12,27	1,243	3,39	1,69	3,30	0,059	0,032	62,2	18,2	12,3	7,4	
	<0,040		23,40	16,77	21,57	3,05	31,17	4,608	2,62	1,03	12,90	0,033	0,059	29,5	25,5	31,2	13,8	
		Summe		100,00	27,46	35,33	4,73	15,35	1,843	3,18	1,61	4,96	0,039	0,030	58,9	16,7	15,3	9,0
Feingut	0,315/0,200		0,21	20,36	26,19	8,95	26,61	2,028	2,90	1,20	5,73	0,028	0,035	38,5	24,6	26,6	10,3	
	0,200/0,160		0,66	21,96	28,25	8,41	24,27	2,186	3,00	1,31	6,49	0,024	0,037	42,8	23,6	24,3	9,3	
	0,160/0,125		1,77	24,55	31,58	7,43	19,67	1,720	3,18	1,44	4,72	0,029	0,032	49,5	22,5	19,7	8,4	
	0,125/0,100		3,13	26,20	33,71	6,74	17,31	1,594	3,24	1,53	4,37	0,031	0,031	54,3	20,5	17,3	7,9	
	0,100/0,040		15,56	27,47	35,34	6,09	14,49	1,393	3,27	1,61	3,74	0,048	0,034	58,1	18,6	14,5	8,7	
	<0,040		78,67	16,54	21,28	3,11	31,57	4,651	2,63	1,02	13,00	0,033	0,058	28,7	26,1	31,6	13,6	
	Summe		100,00	18,73	24,09	3,81	28,20	3,975	2,76	1,14	11,08	0,035	0,053	34,5	24,7	28,2	12,5	
Grobgut	>2,000	>3,31	81,12	35,98	46,29	1,78	6,68	0,620	3,27	2,07	1,51	0,017	0,014	85,9	1,6	6,7	5,9	
		3,31-2,99	14,49	18,52	23,83	16,31	14,62	1,257	4,10	1,25	3,38	0,027	0,026	21,0	55,4	14,6	9,0	
		2,99-2,71	4,14	7,59	9,76	20,32	38,02	1,777	3,03	0,52	5,24	0,031	0,037	0,0	43,0	38,0	19,0	
		<2,71	0,25															
		Summe		100,00	32,26	41,51	4,66	9,14	0,761	3,38	1,89	1,94	0,019	0,017	72,7	11,5	9,1	6,7
	2,000/1,000	>3,31	78,84	36,34	46,75	1,79	6,75	0,651	3,33	2,08	1,63	0,023	0,014	86,5	2,2	6,8	4,6	
		3,31-2,99	15,50	18,94	24,37	16,60	14,53	1,159	4,16	1,25	3,18	0,033	0,021	21,8	55,9	14,5	7,8	
		2,99-2,71	4,87	6,11	7,86	13,58	42,32	3,610	2,33	0,41	10,53	0,033	0,055	0,0	34,6	42,3	23,1	
		<2,71	0,79	0,62	0,80	7,33	91,57	1,392	0,82	0,08	5,47	0,014	0,030	0,0	3,5	91,6	4,9	
		Summe		100,00	31,89	41,02	4,70	10,36	0,880	3,39	1,85	2,33	0,025	0,017	71,4	12,5	10,4	5,8
	1,000/0,500	>3,31	77,05	37,36	48,06	1,52	5,78	0,588	3,38	2,12	1,50	0,033	0,012	89,3	1,3	5,8	3,7	
		3,31-2,99	15,12	18,25	23,48	17,95	13,23	1,072	4,28	1,25	2,94	0,025	0,022	18,4	60,0	13,2	8,4	
	2,99-2,71	6,38	5,92	7,62	12,10	40,98	4,072	2,47	0,42	11,80	0,026	0,053	0,0	33,6	41,0	25,5		
	<2,71	1,45	0,72	0,93	12,97	84,06	1,080	0,83	0,10	4,30	0,008	0,023	0,0	4,1	84,1	11,9		
	Summe		100,00	31,93	41,08	4,84	10,29	0,891	3,42	1,85	2,42	0,031	0,016	71,2	13,1	10,3	5,4	

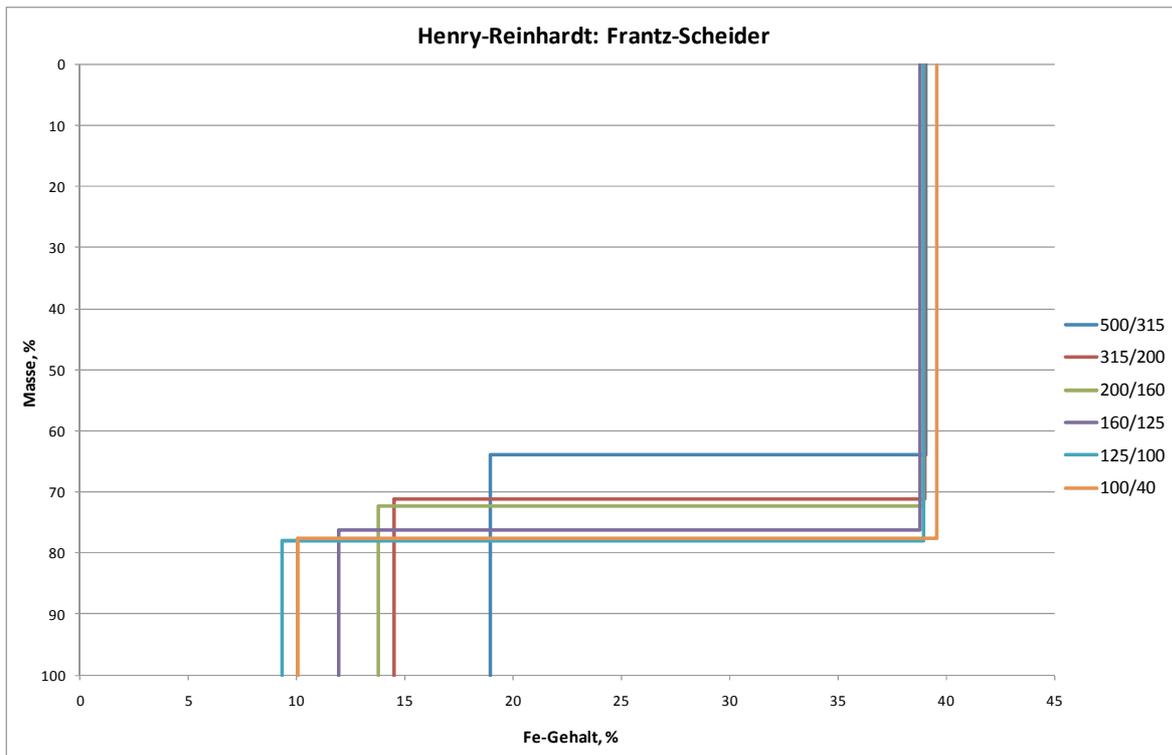
Tabelle 1: Probenliste der chemischen Analyse, Teil 1

Grobgut	0,500/0,315	<0,15	63,85	39,04	50,22	0,80	4,26	0,457	3,34	2,21	1,23	0,016	0,010	95,2	0,0	4,3	0,6
		0,2-0,3	20,27	27,09	34,85	10,48	10,42	0,776	3,81	1,61	2,00	0,031	0,018	51,7	31,6	10,4	6,2
		0,4-0,6	9,35	12,93	16,63	17,81	20,05	1,862	4,23	0,97	4,83	0,054	0,037	1,6	69,5	20,1	8,8
		>1	6,52	2,20	2,83	8,44	55,35	4,597	1,64	0,13	13,86	0,296	0,065	0,0	12,5	55,4	32,2
	Summe	100,00	31,77	40,88	4,85	10,32	0,923	3,41	1,84	2,55	0,041	0,018	70,8	13,1	10,3	5,7	
	0,315/0,200	<0,15	71,16	39,00	50,17	0,99	4,80	0,492	3,35	2,19	1,36	0,017	0,011	94,9	0,0	4,8	0,3
		0,2-0,3	12,92	22,99	29,58	15,96	9,51	0,715	4,16	1,47	2,01	0,031	0,018	35,0	47,7	9,5	7,7
		0,4-0,6	8,33	12,28	15,80	16,90	19,04	1,845	4,39	0,93	3,77	0,118	0,046	0,0	69,6	19,0	11,4
		>1	7,59	2,37	3,05	7,05	50,49	4,426	1,65	0,13	12,96	0,683	0,076	0,0	13,4	50,5	36,1
	Summe	100,00	31,93	41,07	4,71	10,06	0,932	3,41	1,84	2,53	0,078	0,020	71,3	12,9	10,1	5,7	
	0,200/0,160	<0,15	72,42	38,95	50,11	1,09	4,53	0,468	3,37	2,19	1,29	0,020	0,011	94,6	0,0	4,5	0,9
		0,2-0,3	11,81	22,64	29,13	17,42	7,32	0,575	4,31	1,48	1,57	0,028	0,016	32,5	51,8	7,3	8,4
0,4-0,6		7,15	12,73	16,38	18,51	20,25	1,878	4,17	0,97	5,20	0,065	0,048	1,5	68,6	20,3	9,7	
>1		8,62	2,41	3,10	7,00	51,04	4,897	1,71	0,13	14,84	0,455	0,069	0,0	13,7	51,0	35,3	
Summe	100,00	32,00	41,17	4,77	9,99	0,963	3,40	1,84	2,77	0,062	0,019	71,7	12,4	10,0	5,9		
Grobgut	0,160/0,125	<0,15	76,14	38,76	49,86	1,27	3,63	0,405	3,44	2,19	0,95	0,019	0,009	93,3	0,0	3,6	3,1
		0,2-0,3	6,82	18,12	23,31	20,51	6,47	0,476	4,42	1,30	1,21	0,031	0,014	16,7	63,4	6,5	13,5
		0,4-0,6	8,52	12,76	16,42	19,23	17,40	1,693	4,37	0,98	4,45	0,072	0,043	0,0	72,3	17,4	10,3
		>1	8,52	2,45	3,15	6,94	51,37	4,727	1,65	0,13	14,04	0,543	0,077	0,0	13,9	51,4	34,7
	Summe	100,00	32,04	41,22	4,60	9,07	0,888	3,43	1,85	2,38	0,069	0,018	71,5	13,2	9,1	6,3	
	0,125/0,100	<0,15	77,94	38,92	50,07	1,40	4,12	0,441	3,43	2,19	1,22	0,018	0,011	93,9	0,0	4,1	2,0
		>0,2	22,06	9,32	11,99	14,56	29,45	2,662	3,14	0,69	7,29	0,392	0,059	0,3	52,2	29,5	18,1
	Summe	100,00	32,39	41,67	4,30	9,71	0,931	3,37	1,86	2,56	0,100	0,022	73,3	10,9	9,7	6,1	
	0,100/0,040	<0,15	77,61	39,52	50,84	1,14	3,29	0,360	3,43	2,21	1,00	0,015	0,009	95,9	0,0	3,3	0,9
		>0,2	22,39	10,05	12,93	15,41	28,82	2,662	3,07	0,74	8,25	0,293	0,073	3,3	49,1	28,8	18,7
	Summe	100,00	32,92	42,35	4,34	9,01	0,875	3,35	1,88	2,62	0,077	0,023	75,1	9,5	9,0	6,4	

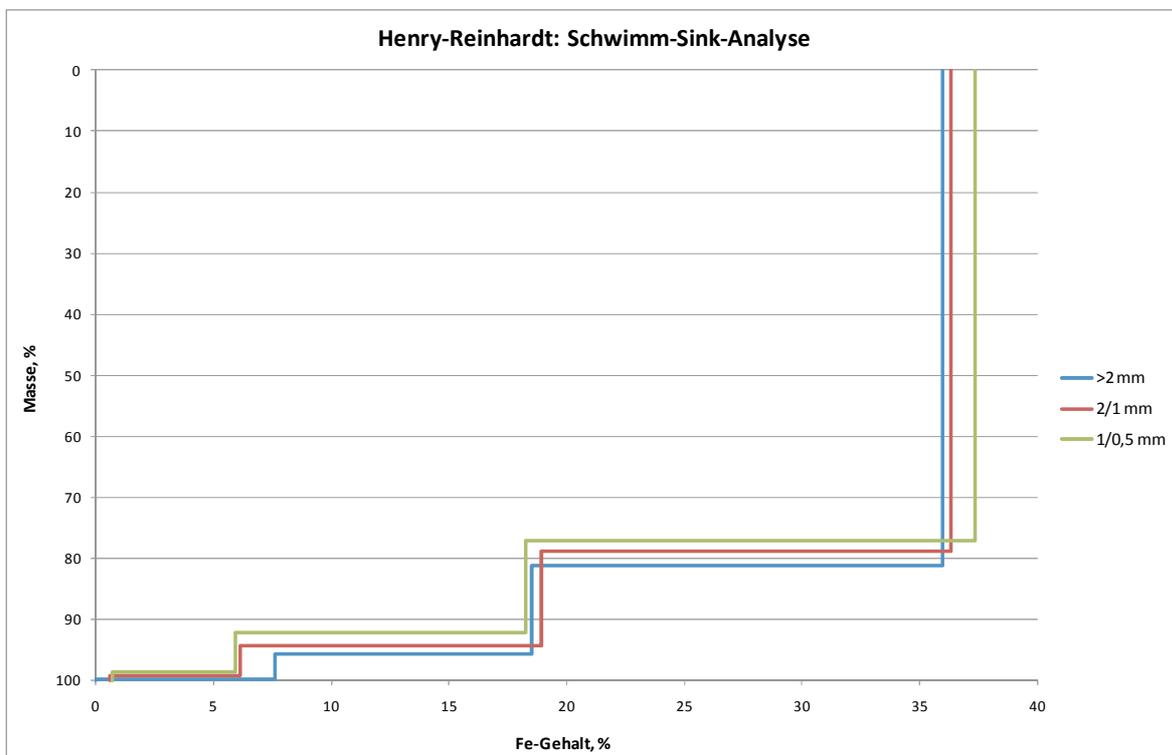
Tabelle 2: Probenliste des chemischen Analyse, Teil 2

Grobgut	0,500/0,315		31,77	40,87	5,21	11,22	1,036	3,35	1,83	2,89	0,035	0,021	71,4	11,8	11,2	5,6
	0,315/0,200		31,39	40,38	5,12	10,22	0,911	3,40	1,81	2,14	0,057	0,019	69,7	13,7	10,2	6,4
	0,200/0,160		31,88	41,01	4,88	9,60	0,862	3,42	1,83	1,93	0,089	0,019	71,1	13,2	9,6	6,2
	0,160/0,125		32,26	41,50	4,57	8,68	0,824	3,46	1,86	1,87	0,113	0,019	71,9	13,3	8,7	6,1
	0,125/0,100		32,14	41,35	4,36	6,94	0,773	3,52	1,87	1,54	0,127	0,019	71,0	14,9	6,9	7,2
	0,100/0,040		32,42	41,71	4,49	8,48	0,900	3,45	1,87	2,33	0,086	0,025	72,5	12,8	8,5	6,2
	<0,040		18,71	24,07	3,31	29,84	4,381	2,67	1,12	12,54	0,043	0,056	35,4	22,7	29,8	12,1
	>2,000	12,25	32,26	41,51	4,66	9,14	0,761	3,38	1,89	1,94	0,019	0,017	72,7	11,5	9,1	6,7
	2,000/1,000	24,57	31,89	41,02	4,70	10,36	0,880	3,39	1,85	2,33	0,025	0,017	71,4	12,5	10,4	5,8
	1,000/0,500	24,18	31,93	41,08	4,84	10,29	0,891	3,42	1,85	2,42	0,031	0,016	71,2	13,1	10,3	5,4
	0,500/0,315	13,44	31,77	40,88	4,85	10,32	0,923	3,41	1,84	2,55	0,041	0,018	70,8	13,1	10,3	5,7
	0,315/0,200	10,94	31,93	41,07	4,71	10,06	0,932	3,41	1,84	2,53	0,078	0,020	71,3	12,9	10,1	5,7
	0,200/0,160	4,22	32,00	41,17	4,77	9,99	0,963	3,40	1,84	2,77	0,062	0,019	71,7	12,4	10,0	5,9
	0,160/0,125	3,43	32,04	41,22	4,60	9,07	0,888	3,43	1,85	2,38	0,069	0,018	71,5	13,2	9,1	6,3
	0,125/0,100	2,42	32,39	41,67	4,30	9,71	0,931	3,37	1,86	2,56	0,100	0,022	73,3	10,9	9,7	6,1
	0,100/0,040	3,44	32,92	42,35	4,34	9,01	0,875	3,35	1,88	2,62	0,077	0,023	75,1	9,5	9,0	6,4
	<0,040	1,10	18,71	24,07	3,31	29,84	4,381	2,67	1,12	12,54	0,043	0,056	35,4	22,7	29,8	12,1
	Summe	100,00	31,85	40,97	4,71	10,25	0,92	3,39	1,85	2,50	0,04	0,02	71,2	12,6	10,2	5,9

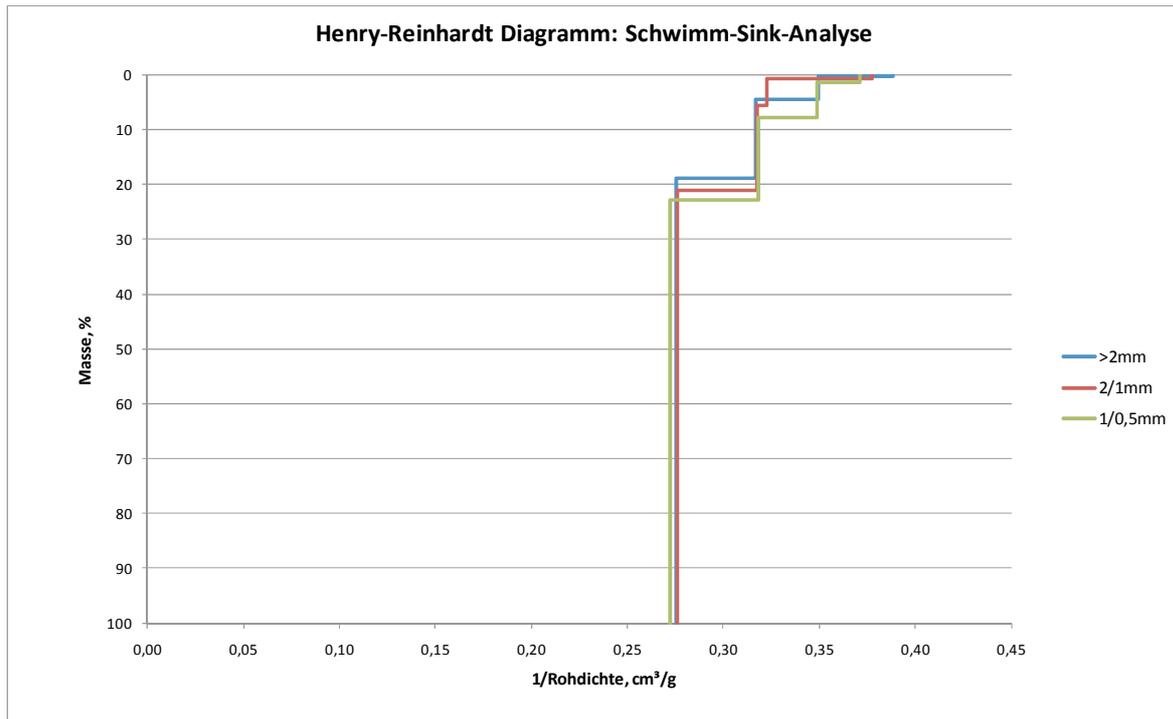
Tabelle 3: Probenliste der chemischen Analyse, Teil 3



**Abbildung 8: Grobputz, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen 500 - 40 µm, Fraktionierung am Frantz-Scheider, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe**



**Abbildung 9: Grobputz, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für Fe**



**Abbildung 10: Grobgut, Schraubenklassierer 136C: Kornklassen > 0,5 mm, Fraktionierung in der Schwimm-Sink-Analyse, Darstellung des Henry-Reinhardt-Schaubilds für das spezifische Volumen**

# C. Auslegung

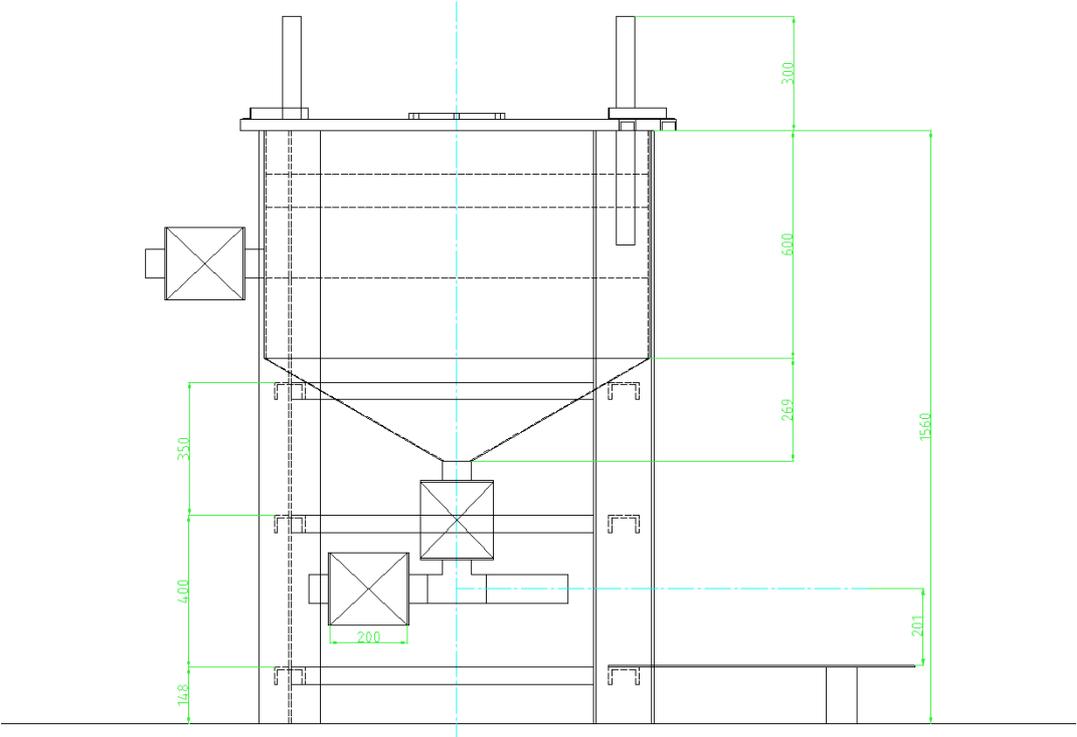


Abbildung 11: Konzept für den Zusammenbau des Pumpensumpfes, Aufriss

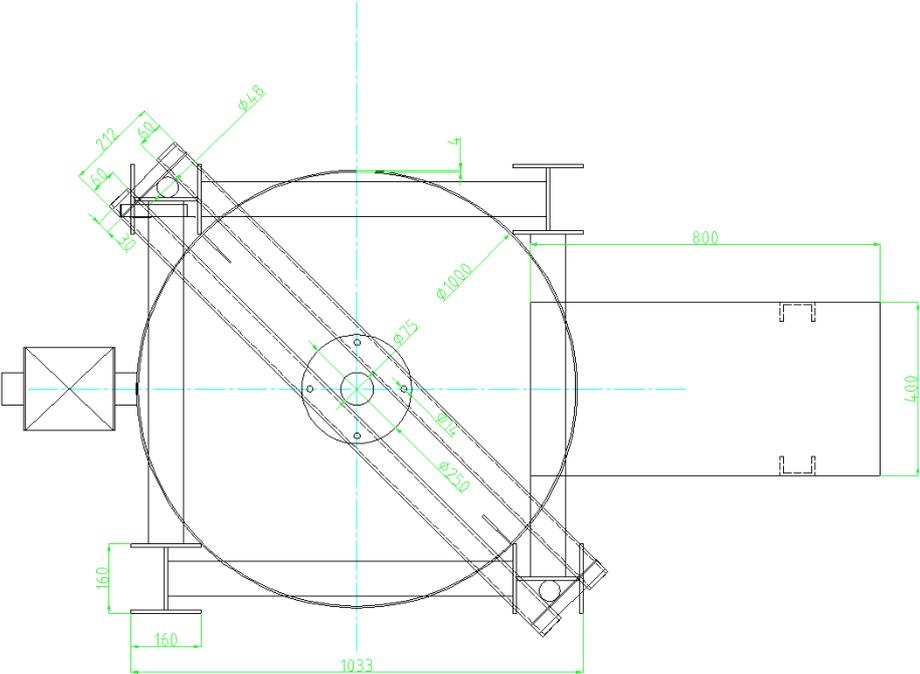
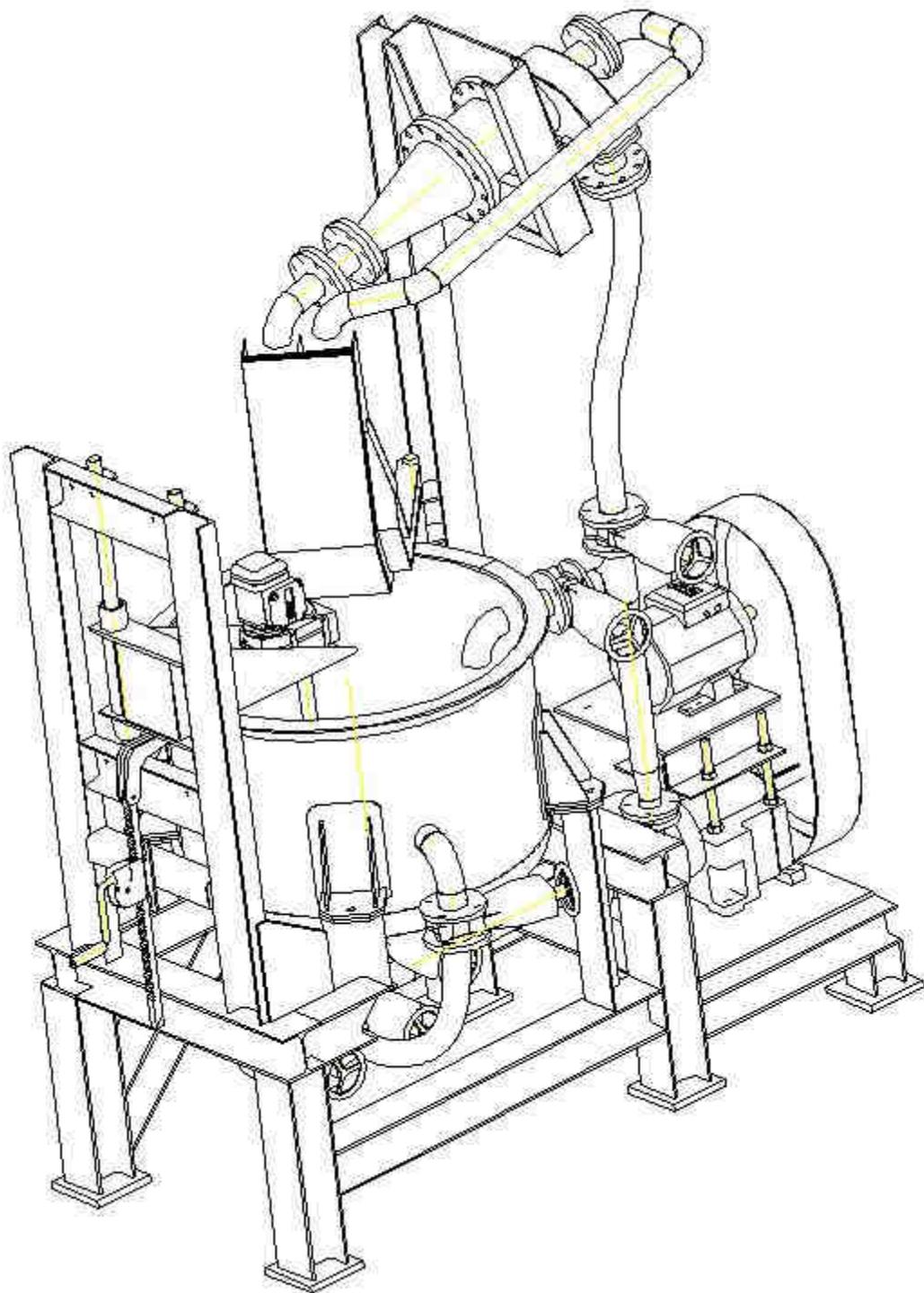


Abbildung 12: Konzept für den Zusammenbau des Pumpensumpfes, Grundriss



**Abbildung 13: Modell des Schwertrübezyklonstandes für die Fertigung**

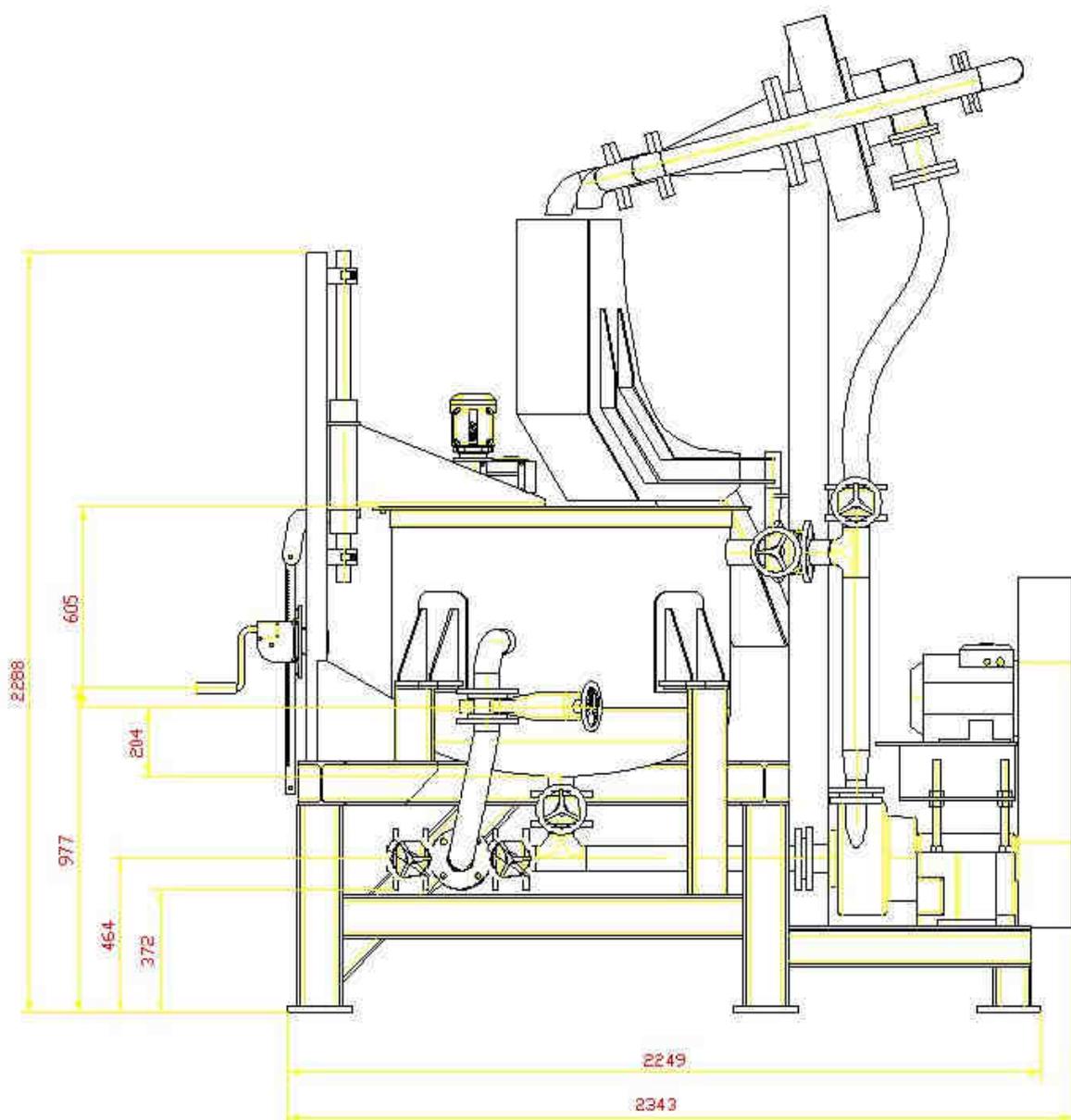


Abbildung 14: Aufriss des Schwertrübezyklonstandes für die Fertigung

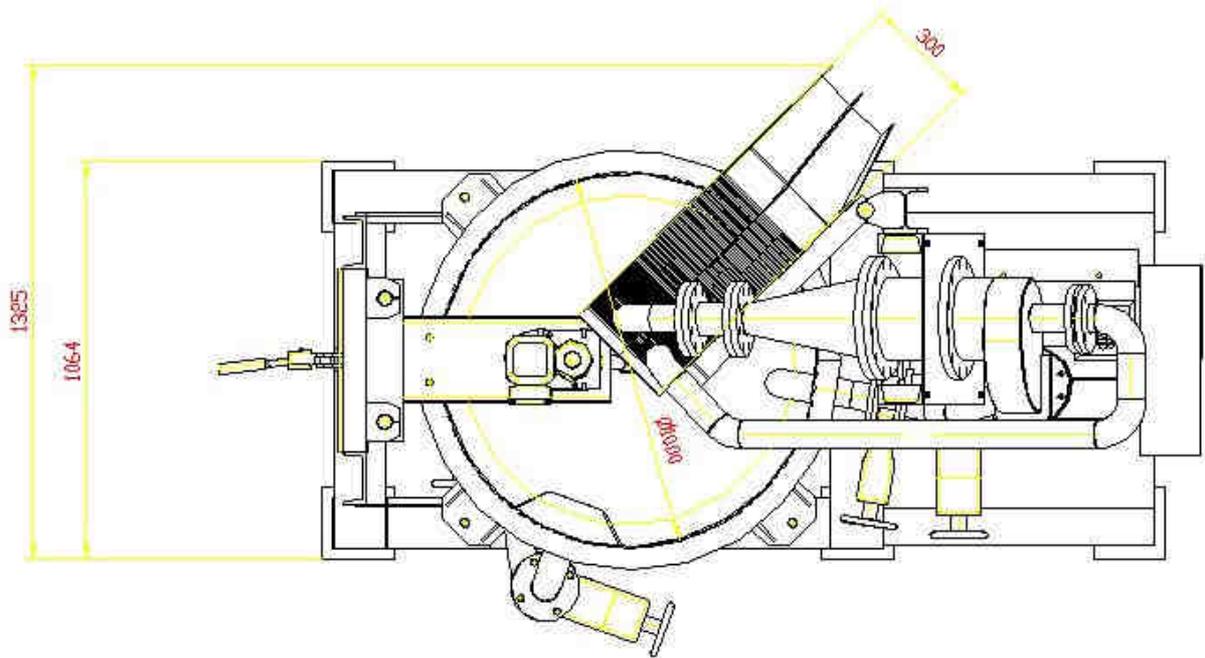


Abbildung 15: Grundriss des Schwertrübezyklonstandes für die Fertigung