



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

Masterarbeit



Hydraulischer Transport von Kunststoffabfällen

Andreas Okorn, BSc

Februar 2023



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.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 05.02.2023

Unterschrift Verfasser/in
Andreas Okorn

Vorwort, Widmung, Danksagung

Ich möchte mich an erster Stelle bei all Jenen bedanken, die diese Masterarbeit möglich gemacht haben und mich während meines Studiums unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Prenner für die Betreuung bei dieser Arbeit und die Vermittlung dieses interessanten Themas.

Außerdem möchte ich mich bei meinen Eltern Silvia und Egon Okorn für die ununterbrochene Unterstützung während meines Studiums bedanken.

Ich danke auch Frau Judith Schrinz - Altendorfer für das Korrekturlesen.

Kurzfassung

Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung des Transports von Kunststoffabfällen, in Form von Flakes, mittels eines hydraulischen Förderers. Auch die Einspeisung und Ausspeisung der Flakes, in den hydraulischen Förderer, wird untersucht, da die Flakes hier Probleme bereiten können.

Zunächst werden die Grundlance der hydraulischen Förderung, der Aufbau eines hydraulischen Förderers, und dessen Vor- und Nachteile erläutert.

Weiters werden die Faktoren, die Einfluss auf den hydraulischen Transport haben, untersucht. Zusätzlich wird das Fördergut, inklusive aller Aufbereitungsvarianten und deren Vor- und Nachteile, analysiert.

Nach der Untersuchung der Einflussfaktoren und dem Fördergut wird der hydraulische Förderer für Kunststoffabfälle ausgelegt. Hierbei werden der Standort und das Hydraulikmedium festgelegt und die Berechnung der optimalen Transportkonzentration durchgeführt.

Anschließend werden die Einspeisungsvarianten inklusive der Vor- und Nachteile untersucht, und eine Empfehlung für eine optimalen Variante abgegeben. Analog dazu werden die Vor- und Nachteile der Ausspeisungsvarianten untersucht und auch hierbei eine Empfehlung angeführt.

Abschließend wird eine ökonomische und ökologische Betrachtung der hydraulischen Förderanlage durchgeführt, um die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit der Anlage zu untersuchen.

Abstract

The aim of this Master thesis is to investigate the transportation of plastic waste, in the form of flakes, with the help of a hydraulic transportation system. The feeding of the flakes into, as well as the unloading of the flakes out of, the hydraulic transportation system will also be considered.

First, the fundamentals, the set up, and the pros and cons of hydraulic transportation is discussed.

Furthermore, the factors that influence the hydraulic transportation system are studied. Additionally, the conveyed goods, which consist of the plastic flakes, and their different preparation variants, are examined.

After this examination, the hydraulic transportation system is designed. This includes determining the exact location of the system and deciding on the transportation liquid. Following this, the optimal transportation concentration of plastic flakes via a hydraulic transportation system is calculated.

Next, the different variants of feeding systems for a hydraulic transportation system are analyzed, and the optimal variant, under the consideration of the plastic flakes, is suggested. Similarly, the unloading mechanisms are examined, and a suggestion for the optimal variant is given.

Finally, an economic and ecological analysis of the hydraulic conveying system is carried out to investigate the economic viability and environmental impact of the system.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Ehrenwörtliche Erklärung | II |
| Vorwort, Widmung, Danksagung..... | III |
| Kurzfassung | IV |
| Abstract..... | V |
| Inhaltsverzeichnis..... | VI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Hydraulische Förderung..... | 3 |
| 2.1 Fördertechnik Grundlagen..... | 3 |
| 2.2 Grundlagen der hydraulischen Förderung..... | 5 |
| 2.2.1 Aufbau eines hydraulischen Förderers..... | 6 |
| 2.3 Nachteile eines hydraulischen Förderers | 8 |
| 2.4 Vorteile eines hydraulischen Förderers | 9 |
| 3 Einflussfaktoren..... | 10 |
| 3.1 Förderstrecke | 10 |
| 3.2 Umgebungsbedingungen | 12 |
| 3.3 Fördergut..... | 13 |
| 3.3.1 Weiche POS Flakes | 14 |
| 3.3.2 Harte POS Flakes | 15 |
| 3.3.3 Feines Agglomerat | 16 |
| 3.3.4 Grobes Agglomerat | 17 |
| 3.3.5 Kunststoffagglomerat mit hohem Aufschmelzungsgrad | 18 |
| 4 Auslegung der hydraulischen Förderanlage..... | 19 |
| 4.1 Einsatzort und -bedingungen | 20 |
| 4.2 Hydraulikmedium..... | 23 |
| 4.2.1 Nachteile Wasser als Hydraulikmedium..... | 24 |
| 4.2.2 Vorteile Wasser als Hydraulikmedium..... | 26 |
| 4.3 Analyse des Fördergutes | 28 |
| 4.3.1 Dichte der POS Flakes..... | 29 |
| 4.3.2 Dimensionen des Förderguts | 30 |
| 4.3.3 Vor- und Nachteil des Fördergutes..... | 31 |
| 4.4 Parameter | 33 |
| 4.4.1 Strömungsart..... | 33 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4.2 | Kritische Geschwindigkeit | 34 |
| 4.4.3 | Fördermenge | 35 |
| 4.5 | Berechnung der optimalen Transportkonzentration..... | 36 |
| 4.5.1 | Energiebedarf des Förderwegs | 36 |
| 4.5.2 | Leistungsbedarf der Rohrbögen, Einbauteile, und Höhenunterschied | 45 |
| 4.5.3 | Energiebedarf der Rückförderung | 49 |
| 4.5.4 | Gesamtförderung und Rohrauswahl..... | 56 |
| 5 | Ein- und Ausspeisung | 59 |
| 5.1 | Relevanten Eigenschaften des Förderguts | 59 |
| 5.2 | Einspeisung..... | 61 |
| 5.2.1 | Schleusen | 62 |
| 5.2.2 | Hydraulische Einspeisung | 66 |
| 5.2.3 | Fazit Einspeisung | 67 |
| 5.3 | Ausspeisung..... | 68 |
| 5.3.1 | Siebe | 69 |
| 5.3.2 | Hydrozyklone..... | 71 |
| 5.3.3 | Zentrifugen | 73 |
| 5.3.4 | Fazit Ausspeisung | 76 |
| 6 | Ökologische und Ökonomische Betrachtung | 77 |
| 6.1 | Ökonomie | 77 |
| 6.2 | Ökologie | 82 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 85 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 88 |
| 9 | Abbildungsverzeichnis | 93 |
| 10 | Tabellenverzeichnis | 94 |
| 11 | Gleichungsverzeichnis | 95 |
| 12 | Abkürzungsverzeichnis | 97 |

1 Einleitung

Kunststoffe sind in der modernen Welt allgegenwärtig und kommen in fast jedem Bereich des menschlichen Alltags vor. Unterschiedliche Kunststoffe dienen unterschiedlichen Zwecken – manche werden in Elektrogeräten verbaut, andere Kunststoffe eignen sich hervorragend für den Einsatz in der Medizinindustrie, und auch die Verpackungsindustrie setzt ebenfalls sehr stark auf Kunststoffe. Durch den großen Einsatz von Kunststoffen wird auch sehr viel Kunststoffabfall erzeugt - so gab es 2015 in Österreich 916.360 Tonnen Kunststoffabfall. Diese Kunststoffabfälle werden entweder stofflich oder energetisch verwertet oder deponiert. Die stoffliche Verwertungsindustrie wächst aufgrund von finanziellen Vorteilen, aber auch aufgrund von gesetzlichen Vorgaben stark. Um die Kunststoffabfälle für die weitere Verwertung nutzen zu können, müssen diese aufbereitet werden und anschließend zu der Verwertungsanlage transportiert werden (Bernhardt et al. 2017).

Der Kunststoffabfall kann zu Flakes verarbeitet werden, um den Transport zu vereinfachen und ein möglichst homogenes Rohmaterial für die weitere Verwertung bereit zu stellen. Die Distanz zwischen der Produktionsstelle der Flaks und der Verwertungsanlage kann mehrere Kilometer lang sein. Aufgrund der großen Masse des vorhandenen Kunststoffabfalls die weiterverarbeitet werden soll, ist die Notwendigkeit für eine Transportmöglichkeit, die einen großen Massenstrom bewältigen kann, groß. Die größten Massenströme werden von stetig Förderanlagen bereitgestellt, da diese kontinuierliches Fördern ermöglichen. Durch die geringe Masse der Kunststoff Flakes ist eine Förderung, die der Witterung ausgesetzt ist, wie beispielsweise ein Gurtförderer, nur bedingt geeignet, da die Flakes z.B. vom Wind verweht werden könnten. Aufgrund dieser Einschränkung muss der Stetigförderer geschlossen sein, damit der Transport witterungsunabhängig ist.

Strömungsförderer wie pneumatische oder hydraulische Förderer, fördern das Fördergut innerhalb eines Rohrleitungssystems und sind somit witterungsunabhängig. Pneumatische Förderer benötigen sehr viel Energie und sind somit für große Distanzen unwirtschaftlich. Hydraulische Förderer benutzen ein flüssiges Transportmedium und benötigen dadurch deutlich weniger Energie für den Förderprozess. Sie werden bereits in der Bergbau-, Kunststoff-, und Kraftwerkindustrie eingesetzt und können Massenströme bis zu 500 t/h über 400 Kilometer befördern. In dieser Masterarbeit wird untersucht, ob sich ein hydraulischer Förderer für die Förderung von Kunststoffabfall in Form von Flakes über mehrere Kilometer eignet. Auch die Ein- und Ausspeisung der Flakes in den hydraulischen Förderer wird untersucht. Schlussendlich werden die ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkte einer hydraulischen Förderung von Kunststoffabfällen betrachtet (Griemert und Römisch 2018).

2 Hydraulische Förderung

Hydraulische Förderer fallen unter die Kategorie der Strömungsförderer. Diese eignen sich optimal für gewisse Fördergute, jedoch nicht für alle. Hydraulische Förderer haben spezifische Einsatzbereiche in der Bergbauindustrie, Landwirtschaft, Bauindustrie, sowie in der Kunststoffindustrie. Die Grundlagen der allgemeinen Fördertechnik, der hydraulischen Förderung, sowie die Vor- und Nachteile eines hydraulischen Förderers werden in diesem Kapitel erläutert.

2.1 Fördertechnik Grundlagen

Die Fördertechnik ist ein Teilgebiet des Maschinenbaus und befasst sich mit der Fortbewegung von Gütern, sowie Personen, durch technische Hilfsmittel, um den Arbeitsaufwand des Fördervorganges zu reduzieren. Güter können in beliebige Richtungen transportiert werden, jedoch nur über eine begrenzte Entfernung. Die Fördertechnik inkludiert ebenfalls die Planung, Auslegung, Konzeption und Ausführung der Förderanlagen. In der modernen Industrie hat die Fördertechnik eine stetig wachsende wirtschaftliche Bedeutung, da die Fortschritte in der Steuer- und Regeltechnik die Automatisierung sowie Optimierung von Förderanlagen immer einfacher macht (Saloodo! 2020; Meynerts 2021).

Die Fördertechnik wird in zwei Spalten aufgeteilt, die unstetige Fördertechnik und die stetige Fördertechnik. Unstetige Fördersysteme fördern nicht dauerhaft, sondern nur, wenn ein Transportbedarf besteht. Typische unstetige Fördersysteme sind Krane, Aufzüge, LKWs, Bagger, oder Gabelstapler. Im Gegensatz zu unstetigen Fördersystemen fördern stetige Fördersysteme im Dauerbetrieb. Dazu zählen Fördersysteme wie Becherwerke, Gurtförderanlagen, Kratzerförderer, pneumatische Förderer, und hydraulische Förderer. Unstetige sowie stetige Förderanlagen haben Vor- und Nachteile. So sind zum Beispiel unstetige Fördersysteme flexibel einsetzbar und leicht zu bewegen, sie sind aber äußerst schwer zu automatisieren und sie können auch nicht die gleichen Fördermengen wie stetig Förderer erreichen. Durch den konstanten und gleichmäßigen Betrieb sind stetige Fördersysteme leicht zu automatisieren und steigern daher die Wirtschaftlichkeit des Transportprozesses, aber gleichzeitig besitzen diese Anlagen eine sehr geringe Flexibilität (Prenner 2019; Meynerts 2021).

Die moderne Industrie nutzt diverse Formen der Fördertechniken in unterschiedlichen Bereichen, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Die Bergbauindustrie, beispielsweise, nutzt die Vorteile von Bandförderer um Schüttgüter von der Abbaustelle zu der Verarbeitungs- oder Verladungsstelle schnell, kontinuierlich und sicher zu transportieren. Dies ist deutlich effizienter, als dieselbe Menge mit LKWs zu transportieren. Auch die Recycling- und Abfallindustrie nutzt Transportbänder, um den Transport, die Trennung und die Aussortierung von Abfall zu vereinfachen und zu beschleunigen. Der Tourismus, der Handel, die Automobilindustrie, sowie die Logistik benutzen ebenfalls die Fördertechnik, um Güter oder Personen zu transportieren und den Arbeitsaufwand für den Menschen zu reduzieren (ROS RollenTechnik 2022; Meynerts 2021; Prenner 2019).

Branchen wie zum Beispiel die Kunststoff-, Nahrungsmittel- und chemische Industrie nutzen die Vorteile von hydraulischen Förderanlagen, um ihre hochwertigen Produkte schonend und schnell zu transportieren. Das stetige Fördermittel ermöglicht einen einfachen und effizienten Transport des Schüttguts und reduziert den innerbetrieblichen Arbeitsaufwand (Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007).

2.2 Grundlagen der hydraulischen Förderung

Die hydraulische Förderung fällt innerhalb der Fördertechnik unter die Kategorie der Strömungsförderung, die einen Teil der stetigen Förderung darstellt. Strömungsförderer zeichnen sich dadurch aus, dass ein Gas- oder Flüssigkeitsstrom das Fördergut innerhalb einer Rinne oder Rohrleitung befördert. Zusätzlich zu der hydraulischen Förderung gibt es die pneumatische Förderung, die auch unter die Kategorie Strömungsförderung fällt. Hydraulische und pneumatische Förderung unterscheidet sich dadurch, dass bei pneumatischer Förderung ein Gas als Fördermedium verwendet wird und bei der hydraulischen Förderung eine Flüssigkeit als Fördermedium verwendet wird. Abgesehen von dem Fördermedium ist der Aufbau von pneumatischen und hydraulischen Förderanlagen sehr ähnlich. Diese Arbeit wird sich ausschließlich mit der hydraulischen Förderung befassen und nicht weiter auf die pneumatische Förderung eingehen (Krause und Katterfeld 2014).

Hydraulische Förderer werden primär für den Schüttguttransport eingesetzt. Bei den transportierten Gütern handelt es sich meist um klein stückige oder körnige Schüttgüter, wobei auch staubförmiges oder zähflüssiges Material transportiert werden kann. Es kann auch Stückgut, in Form von Kapseln, von hydraulischen Förderern bewegt werden, diese Anwendung ist jedoch selten. Die hydraulische Förderung findet verbreiteten Einsatz in der Bergbauindustrie, um beispielsweise Kohle, Sand und Erdreich zu transportieren. Auch die Chemie- und Kunststoffindustrie, sowie die Landwirtschaft, nutzen die Vorteile der hydraulischen Förderung, um ihr Schüttgut, wie zum Beispiel Pulver oder Granulat, zu transportieren (Universal-Lexikon 2012; Krause und Katterfeld 2014).

2.2.1 Aufbau eines hydraulischen Förderers

Es gibt zwei unterschiedliche Aufbauvarianten von hydraulischen Förderern, den offenen und den geschlossenen Kreislauf. Bei dem offenen Kreislauf wird das Hydraulikmedium nicht wieder verwendet, sondern entsorgt oder an die Umwelt abgegeben. Diese Variante kann benutzt werden, wenn das Fördergut das Hydraulikmedium nicht verunreinigt und der Rücktransport des Mediums aufwendiger ist, als das Medium frisch einzuspeisen. Bei dem geschlossenen Kreislauf wird das Hydraulikmedium wieder in den Kreislauf eingefügt, nachdem das Fördergut abgegeben wurde. Ein geschlossener Kreislauf kommt dann zum Einsatz, wenn das Fördergut das Hydraulikmedium verunreinigt, und ein Austreten des verunreinigten Mediums zu ökologischen Problemen führen würde. Ebenfalls kann ein geschlossener Kreislauf eingesetzt werden, wenn nur eine begrenzte Menge des Hydraulikmediums vorhanden ist (Prenner 2019).

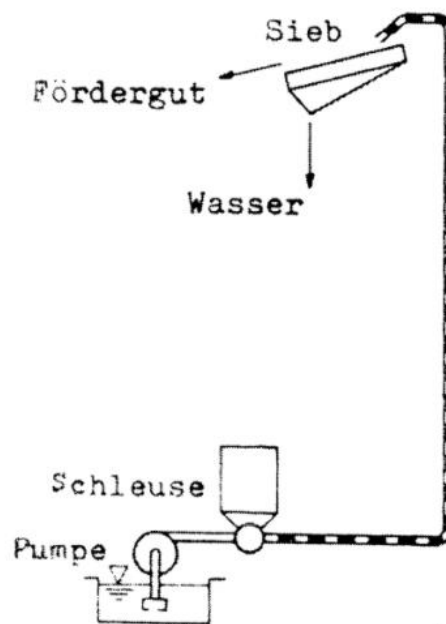


Abbildung 1: Offener Kreislauf (Prenner 2019)

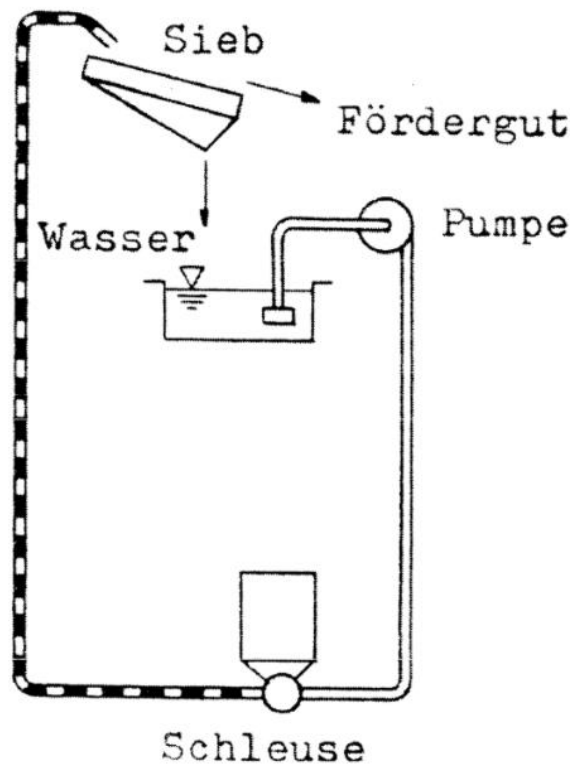


Abbildung 2: Geschlossener Kreislauf (Prenner 2019)

Unabhängig von der Kreislaufkonfiguration benötigt jeder hydraulische Förderer vier Hauptkomponenten: eine Einschleusvorrichtung, eine Trennvorrichtung, Rohre oder Rinnen und einen Antrieb. Die Einschleusvorrichtung dient der Gutaufgabe und wird in Abbildung 1 und Abbildung 2 als Schleuse bezeichnet. In der Einschleusvorrichtung wird das Fördergut mit dem Hydraulikmedium vermischt. Die Entmischung des Fördergutes und des Hydraulikmediums erfolgt durch die Trennvorrichtung, die in Abbildung 1 und Abbildung 2 als Sieb dargestellt wird. Der eigentliche Förderweg wird durch die Rohrleitungen oder Rinnen, die die Einschleusvorrichtung und die Trennvorrichtung verbinden, vorgegeben. Durch diese Leitungen wird das Gemisch unter Druck befördert. Die Beförderungsenergie bzw. der Druck in einem hydraulischen Förderer wird durch den Antrieb in das System eingespeist. In Abbildung 1 und Abbildung 2 wird der Antrieb als Pumpe dargestellt (Krause und Katterfeld 2014).

2.3 Nachteile eines hydraulischen Förderers

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, ist ein wesentlicher Nachteil eines Stetigförderers die geringe Einsatzflexibilität. Daher muss der Einsatz eines hydraulischen Förderers gut überlegt sein, da Transportwegänderungen nach Fertigstellung der Anlage äußerst aufwendig sind. Gegenüber mechanischen Stetigförderern haben Strömungsförderer einen deutlich höheren spezifischen Energiebedarf. Das bedeutet, dass für das gleiche Fördergut und die gleiche Distanz, Strömungsförderer mehr Energie benötigen als beispielsweise ein Gurtförderer. Dies gilt besonders für pneumatische Förderer, aber auch hydraulische Förderer haben einen hohen Energiebedarf, wenn man sie mit mechanischen Stetigförderern vergleicht. Der Energiebedarf eines hydraulischen Förderers wird stark durch die Eigenschaften des Fördergutes beeinflusst (Krause und Katterfeld 2014; Prenner 2019; Berger 2014).

Nicht alle Fördergüter eignen sich für den Transport mit einem hydraulischen Förderer, da die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Gutes durch den Kontakt mit dem Transportmedium geändert werden können. Auch das Trennen des Fördergutes von dem Transportmedium stellt eine Herausforderung dar. Desweiteren ist der Transport nicht verschleißfrei, dies gilt besonders bei abrasiven Fördergut. Abhilfen müssen in die Auslegung inkludiert werden. Ein weiterer Nachteil ist die Gefahr des Gefrierens des Fördermediums bei dem Einsatz eines hydraulischen Förderers in Regionen mit tiefen Temperaturen. Weiters entsteht eine hohe Luftfeuchtigkeit, die sich negativ auf das Fördergut, aber auch auf die Anlage selbst und die Umgebung auswirken kann. Die Werkstoffwahl der Anlage und die Wahl des Fördermediums ist daher bei der Planung des Förderers wichtig, um Korrosion zu vermeiden (Krause und Katterfeld 2014; Berger 2014; Griemert und Römisch 2018).

2.4 Vorteile eines hydraulischen Förderers

Den Nachteilen die in Kapitel 2.3 erläutert wurden, stehen einige Vorteile gegenüber, die für den Einsatz eines hydraulischen Förderers sprechen. Einer der größten Vorteile der hydraulischen Förderung ist die sehr gute Anpassungsmöglichkeit an die örtlichen Gegebenheiten. Die Rohrleitungen des Förderers können sehr einfach aufgebaut und somit gut in das Umfeld integriert werden, beispielsweise können sie auch unterirdisch verbaut werden. Durch die geschlossenen Rohrleitungen ist die Förderung witterungsunabhängig. Zusätzlich zu dem flexiblen Aufbau, haben die Leitungen eines hydraulischen Förderers einen geringen Raumbedarf, was sie besonders bei Platzmangel zu einer guten Alternative machen. Auch die Arbeitssicherheit wird durch den Einsatz von hydraulischen Förderern verbessert. Da es wenige zugängliche, bewegliche Komponenten gibt, ist die Verletzungsgefahr von Menschen gering. Durch die steige Förderung ist eine Automatisierung des Prozesses einfach realisierbar, was ein deutlicher Vorteil gegenüber un stetigen Förderern ist (Berger 2014; Krause und Katterfeld 2014).

In einem direkten Vergleich mit der anderen Variante von Strömungsförderern, dem pneumatischen Förderer, hat der hydraulische Förderer ebenfalls einige Vorteile. Durch die Inkompressibilität des Trägermediums herrscht nur ein sehr geringer Druckverlust innerhalb der Anlage, was Förderlängen bis zu 450 Kilometern ermöglicht. Neben den großen Transportdistanzen können hydraulische Förderer Förderleistungen von bis zu 100 t/h erreichen. Die Staubbildung bei hydraulischen Förderern ist deutlich geringer als bei pneumatischen Anlagen, was ökologische Vorteile mit sich bringt. Durch die Eigenschaften des Trägermediums, besonders bei geringem Dichteunterschied zu dem Fördergut, herrscht eine deutlich kleinere Fallgeschwindigkeit innerhalb der Transportleitungen als in pneumatischen Förderern. Dies ermöglicht eine geringere Strömungsgeschwindigkeit und in Folge dessen weniger Energiebedarf sowie geringeren Verschleiß (Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007; Krause und Katterfeld 2014; Berger 2014).

3 Einflussfaktoren

Die Art, Größe und Leistung einer Förderanlage werden durch drei wesentliche Faktoren bestimmt. Fördergut, Förderstrecke und die Umgebungsbedingungen beeinflussen die Auslegung des hydraulischen Förderers stark und werden in diesem Kapitel untersucht.

3.1 Förderstrecke

Anders als in der Verkehrstechnik ist in der Fördertechnik die Entfernung der Förderstrecke immer begrenzt, da die Förderanlagen nicht unendlich lang gestaltet werden können. Somit fällt die Fördertechnik in die Kategorie Nahtransport. Die Bedeutung der Förderstrecke in der Bergmannsprache lautet „*Strecke, auf der das gewonnene Mineral bis zum Füllort transportiert wird*“ (DWDS 2022). Die Förderstrecke wird beeinflusst durch die Position der Aufgabestelle und der Abgabestelle, der Höhendifferenz zwischen Auf- und Abgabestelle, sowie etwaigen Hindernisse zwischen Auf- und Abgabestelle. Die Aufgabestelle ist der Ort, wo die Förderanlage die Last aufnimmt, und kann frei gewählt werden, wobei es sich empfiehlt die Position so zu wählen, dass ein einfaches Beladen des Förderers möglich ist. Die Abgabestelle ist das Ende der Förderstrecke, wo das Fördergut abgesetzt wird. Die Position der Abgabestelle kann ebenfalls frei gewählt werden, wobei eine Position in der Nähe des gewünschten Ziel- oder Weiterverarbeitungsort vorteilhaft ist (Saloodo! 2020; Meynerts 2021; Prenner 2019).

Der Höhenunterschied zwischen der Aufgabestelle und der Abgabestelle definiert den geodätischen Höhenunterschied. Dieser Höhenunterschied kann von wenigen Metern, zum Beispiel bei einem horizontalen Gurtförderer auf einem ebenen Gelände, bis zu mehreren tausenden Metern, zum Beispiel bei Seilbahnanlagen in Bergregionen, betragen. Je nach Art der Förderanlage hat der geodätische Höhenunterschied mehr oder weniger Einfluss auf die Auslegung der Förderanlage. Bei einem mechanischen Förderer, wie einer Seilbahnanlage, hat der Höhenunterschied wenig Einfluss auf die Auslegung. Der Höhenunterschied hat jedoch einen deutlichen Einfluss bei hydraulischen Förderern, da ein wesentlicher Druckverlust oder Druckgewinn durch den Höhenunterschied erzeugt wird. Diese Druckveränderung muss bei der Planung der Anlage berücksichtigt werden (Wossog 2014).

Der Streckenverlauf einer Förderanlage wird oft durch Hindernisse beeinflusst und die Förderanlage muss so angepasst werden, dass die Hindernisse überwunden werden können. Hindernisse können von Menschen erbaut sein, wie beispielsweise Häuser oder ganze Städte die umgangen werden müssen. Es können aber auch natürliche Hindernisse wie Berge, Flüsse oder Wälder sein. Brücken, Tunneln und Kurven sind unterschiedliche Möglichkeiten, wie Behinderungen überwunden werden können. Überbrückungen oder Untertunnelungen von Hindernissen sind im Gegensatz zu Kurven sehr kostenintensiv. Manche Arten von stetigen Förderanlagen, zum Beispiel Strömungsförderer, eignen sich besser zur Anpassung an Hindernisse mittels Kurven als andere Arten von Förderanlagen, wie zum Beispiel Gurtförderer. In Strömungsförderanlagen sind enge Kurvenradien mittels Rohrbögen realisierbar, jedoch müssen diese Kurven bei der Auslegung des Förderers berücksichtigt werden. Durch das Verlangsamen der Feststoffteile innerhalb des Trägermediums infolge der Fliehkraft, die bei dem Transport durch einen Rohrbogen herrscht und der anschließenden Beschleunigung der Feststoffteile, wird ein Druckverlust erzeugt, der bei der Auslegung einer hydraulischen Förderanlage betrachtet werden muss (Wossog 2014; Grote und Feldhusen 2014).

3.2 Umgebungsbedingungen

Nachdem der Verlauf der Förderstreck definiert wurde, müssen die Umgebungsbedingungen am Standort der Förderanlage untersucht werden. Die Umgebungsbedingungen sind Faktoren, die an und in der Nähe des Standortes herrschen, die einen Einfluss auf die Anlage haben können. Typische Umgebungsbedingungen, die betrachtet werden müssen, sind Wetter, Klima, und Wind, aber auch geologische Faktoren wie seismische Aktivitäten. Eine sorgfältige Untersuchung der Umgebungsbedingungen ist wichtig, da diese die Art der Förderanlage beeinflussen können (Law Insider Inc. 2022).

Je nach Wetter in der Region, wo die Förderanlage aufgestellt wird, sind manche Förderanlagen besser geeignet als andere. In tropischen Gebieten zum Beispiel, wo viel Luftfeuchtigkeit herrscht, sollte sensibles Fördergut nicht offen auf einem Gurtförderer bewegt werden, da es so der Feuchtigkeit oder dem Regen ausgesetzt ist. Ähnliches gilt für das Klima. So ist ein hydraulischer Förderer nicht die optimale Anlage an einem Standort mit sehr geringen Temperaturen, da das Transportmedium des Förderers einfrieren kann. Die Windkräfte, die am Standort herrschen, beeinflussen die Auswahl der Förderanlage auf zwei Arten. Der Wind kann ungeschütztes oder nicht ordentlich abgedecktes Fördergut direkt angreifen und von dem Förderer herunter blasen. Außerdem erzeugt der Wind Sog-, Druck-, und Reibungskräfte, die auf die Anlage wirken, und die, bei inkorrekt konstruierter Anlage, zu Schäden führen können. Schäden an der Förderanlage können ebenfalls von Erdbeben verursacht werden, die durch seismische Aktivitäten am oder in der Nähe des Aufstellungsortes erzeugt werden. Diverse Umgebungsbedingungen können unterschiedlich Einflüsse auf eine Förderanlage haben, daher gilt es in der Planungsphase eine sorgfältige Untersuchung dieser Faktoren durchzuführen (Heinze GmbH NL Berlin BauNetz 2022a; Berger 2014; Cerana 2022).

3.3 Fördergut

Die Art und Menge des Fördergutes hat einen großen Einfluss auf die Auswahl der Förderanlage, da nicht jedes Fördergut für jede Art der Förderung geeignet ist. Für ein sehr leichtes Fördergut eignet sich ein geschlossener Transport, beispielsweise mittels Schlauchgurtförderern, da so das Gut nicht von Windkräften verweht werden kann. Ebenso ist ein Kettenförderer für den Transporteinsatz von großen Kohlestücken wie sie bei Long Wall Mining vorkommen, auf Grund seiner robusten Betriebsart und Überlastbarkeit optimal geeignet (Prenner 2019).

Mittels hydraulischer Förderer, die für diese Arbeit von Interesse sind, wird, wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, primär körniges und kleinstückiges Schüttgut transportiert. In dieser Arbeit wird der Transport von Kunststoffabfällen untersucht, die hauptsächlich aus Polyolefin und Polystyrol Kunststofffraktionen, auch POS Flakes genannt, bestehen. Diese Flakes werden aus Kunststoffmüll in einer Aufbereitungsanlage gewonnen und können zu unterschiedlichen Transportformen aufbereitet werden. Die für den hydraulischen Transport relevanten Transportformen sowie die Aufbereitung dieser, werden in diesem Unterkapitel erläutert.

3.3.1 Weiche POS Flakes

Die Basisform des Kunststoffföderungsgutes sind die weichen POS Flakes. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Kunststoffreste von Kunststoffsäcken oder anderen folienähnlichen Gegenständen. Die weichen POS Flakes weisen einen hohen Verschmutzungsgrad auf, sind leicht biegsam und können bis zu 60 mm lang und 60 mm breit sein. Die Stärke der Flakes variiert signifikant zwischen 20 µm und 200 µm. Eine genaue Verteilung der tatsächlichen Größen und unterschiedlichen Stärken ist nicht bekannt.



Abbildung 3: Weiche POS Flakes

Die weichen POS Flakes werden in keiner Art weiter aufbereitet und sind somit die preislich günstigste Fördergutvariante. Die Flakes sind in der in Abbildung 3 dargestellten Form für den Transport vorgesehen, dabei liegt die lose Schüttdichte bei ca. 50 kg/m³. Durch die geringe Dichte der einzelnen Flakes und die, verhältnismäßig, große Angriffsfläche sind die weichen POS Flakes sensibel gegenüber Verwehungen, was eine Verladung problematisch macht.

3.3.2 Harte POS Flakes

Die harten POS Flakes unterscheiden sich zu den weichen POS Flakes in dem sie eine Stärke von deutlich mehr als 200 μm aufweisen. Dadurch erhöht sich auch die Steifigkeit der einzelnen Flakes, sowie die Masse, was die Flakes etwas unsensibler betreffend Verwehungen macht und somit die Handhabung, bei einer möglichen Verladung, leicht vereinfacht. Ebenso unterscheiden sich die harten POS Flakes von den weichen Flakes im Verschmutzungsgrad, der bei den harten Flakes geringer ist. Die Länge und Breite beträgt jeweils bis zu 60 mm, und ist somit vergleichbar mit den weichen POS Flakes. Die lose Schüttdichte ist deutlich höher und liegt bei den harten POS Flakes bei ca. 130 kg/m^3 . Die harten POS Flakes werden, wie auch die weichen Flakes, aus Kunststoffabfällen aufbereitet, wobei die weichen Kunststoffreste aussortiert werden.



Abbildung 4: Harte POS Flakes

3.3.3 Feines Agglomerat

Die POS Flakes können, wie in Kapitel 3.3.1 direkt für den Transport verwendet oder sie können weiter zu Agglomerat aufbereitet werden. Die Aufbereitungsvariante mit der geringsten Energiezufuhr ist das feine Agglomerat. Das feine Agglomerat besteht aus verpressten POS Flakes deren Randschicht aufgeschmolzen wird. Dadurch wird ein Zusammenhalt erzeugt. Durch dieses verpressen wird die Dichte der Pellets, im Vergleich zu den POS Flakes, erhöht, was das Verladen vereinfacht, da die Pellets unsensibler gegenüber Verwehungen sind. Bei der Aufbereitung des Agglomerates wird jedoch nur sehr wenig Energie eingebracht, was zu Folge hat, dass der Zusammenhalt der einzelnen Agglomeratpellets mit sehr geringem Kraftaufwand zerstört werden kann. Der Durchmesser der Kunststoffpellets liegt bei ca. 4 mm und einer Länge von bis zu ca. 10 mm, wobei eine genaue Verteilung der Längen nicht bekannt ist. Die Schüttdichte des feinen Agglomerats liegt bei ca. 380 kg/m³.



Abbildung 5: Feines Agglomerat

3.3.4 Grobes Agglomerat

Neben dem feinen Agglomerat können POS Flakes auch zu grobem Agglomerat aufbereitet werden. Wie das feine Agglomerat aus Kapitel 3.3.3, besteht das grobe Agglomerat ebenfalls aus verpressten POS Flakes. Der Herstellungsprozess ist mit dem des feinen Agglomerats weitestgehend ident, jedoch wird bei dem Aufschmelzen der Randschicht mehr Energie eingebracht und somit ist der Zusammenhalt der groben Pellets höher als der bei dem feinen Agglomerat. Durch den stärkeren Zusammenhalt benötigt das Zerstören der einzelnen Pellets einen höheren Kraftaufwand, aber erleichtert auch den Transport, da die Dichte der Pellets abermals erhöht wird und sie somit bei der Verladung einfacher zu handhaben sind. Die Schüttdichte des losen, groben Agglomerats liegt bei 480 kg/m^3 , und der Durchmesser der einzelnen Pellets bei ca. 8 mm mit einer Länge von ca. 15 mm, wobei eine genaue Verteilung der Längen nicht bekannt ist.



Abbildung 6: Grobes Agglomerat

3.3.5 Kunststoffagglomerat mit hohem Aufschmelzungsgrad

Die Fördergutform mit der meisten Aufbereitung, und somit auch die teuerste Variante, ist das Agglomerat mit hohem Aufschmelzungsgrad. Für diese Variante des Agglomerats wird eine deutlich höhere Energieeinbringung benötigt, als bei den Formen aus den Kapiteln 3.3.3 und 3.3.4, um den hohen Aufschmelzungsgrad zu erreichen. Der Vorteil, der durch den hohen Aufschmelzungsgrad erzeugt wird, ist, der sehr große Zusammenhalt der einzelnen Stücke, was die Dichte erhöht, und eine Verladung vereinfacht. Der Nachteil dieser Transportgutform ist die große Menge an sehr kleinen Agglomeratstücken, die durch elektrostatische Kräfte sehr einfach an Oberflächen haften. Wie in Abbildung 7 ersichtlich, sind diese Bruchstücke deutlich kleiner als die restlichen Agglomeratstücke, wodurch sie noch einfacher als die weichen POS Flakes verweht werden können. Diese Eigenschaft führt zu einer Verschmutzungsgefahr der umliegenden Anlagenkomponenten. Die einzelnen Agglomeratstücke können Größen bis zu 15 mm x 15 mm mit einer Stärke von ca. 2 mm erreichen, wobei eine genau Größenverteilung des Agglomerats nicht bekannt ist. Die lose Schüttdichte liegt bei ca. 350 kg/m³ und ist somit geringer als die des groben Agglomerats, da die unregelmäßige Form zu mehr Leerräumen im Haufen führt.



Abbildung 7: Agglomerat mit hohem Aufschmelzungsgrad

4 Auslegung der hydraulischen Förderanlage

Bei der Auslegung eines hydraulischen Strömungsförderers muss die optimale Transportkonzentration, sowie die dazugehörige Nennweite der Rohrleitungen bestimmt werden. Um dieses Optimum zu bestimmen, müssen Randbedingungen oder Optimierungskriterien gesetzt werden. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, ist das Ziel der Fördertechnik, und somit auch das der Auslegung eines hydraulischen Förderers, die Arbeit eines Transportvorgangs zu minimieren. Um eine korrekte Auslegung einer hydraulischen Förderanlage für den Transport von Kunststoffabfällen durchzuführen, werden in diesem Kapitel die Umgebungsbedingungen untersucht, das Hydraulikmedium ausgewählt, das Fördergut analysiert, wichtige Parameter festgelegt und schlussendlich eine Berechnung für die optimale Transportkonzentration durchgeführt, mit dem Ziel die Transportarbeit zu minimieren (Wossog 2014).

4.1 Einsatzort und -bedingungen

Der angenommenen Einsatzort der Förderanlage, die in dieser Masterarbeit behandelt werden soll, liegt im Osten Österreichs, in der Nähe von Wien. Die Länge der Förderstrecke wird mit 6,3 km angenommen, und die Höhendifferenz zwischen Aufgabe- und Abgabestelle liegt bei 5 m. Durch das sehr flache Gelände am Standort wird angenommen, dass die Höhendifferenz zwischen dem Startpunkt bei der Aufgabestelle und dem Ende bei der Abgabestelle nicht überschritten wird. Die Abgabestelle soll höher als die Aufgabestelle liegen, dadurch wird eine Aufwärtsförderung für das Fördergut benötigt. Um diverse Hindernisse zwischen Start- und Endpunkt zu simulieren, wird angenommen, dass sich auf der Förderstrecke fünf Kurven befinden, drei 90° Kurven und zwei 30° Kurven.

Der angenommene Einsatzort befindet sich in einer Region, wo ein Übergangsklima herrscht und die Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Niederschlag und Wind stark schwanken. Die Temperaturen am Einsatzort variieren im Durchschnitt zwischen -12°C in den Wintermonaten und 33°C in den Sommermonaten, wobei ein deutlicher Trend zu höheren Temperaturen in den letzten Jahren erkennbar ist. Besonders relevant für die Auslegung der hydraulischen Förderanlage sind die tiefen Temperaturen, die in Extremfällen bis zu -26°C erreichen können und die Anzahl an Frosttage (Tage mit Temperaturen unter 0°C), die im Durchschnitt 70 mal im Jahr vorkommen (Stadt Wien 2019).

Die durchschnittliche Niederschlagsmenge in der Region des Einsatzortes liegt bei 643 mm pro Jahr und die durchschnittliche Neuschneemenge liegt bei 70 cm pro Jahr. Sehr hohe Windspitzen am Einsatzort sind nicht unüblich, denn die durchschnittlichen Windspitzen liegen bei 106 km/h. Für die Auslegung einer Förderanlage sind die Anzahl der Sturmtage (Tage mit Windböen über 80 km/h) besonders relevant - diese kommen am Einsatzort ca. 40 mal pro Jahr vor. Ebenso sollten die Windgeschwindigkeiten in Extremsituation, die bis zu 139 km/h erreichen, bei der Planung berücksichtigt werden. Letztlich müssen bei der Auslegung der Förderanlage auch noch die Gefahren durch Erdbeben betrachtet werden. Wie in Abbildung 8 ersichtlich, ist die nordöstliche Zone von und rund um Wien als Zone 2 (vereinzelt größerer Gebäudeschäden) und die südwestliche Zone als Zone 3 (größere Gebäudeschäden) eingestuft. Basierend auf den exakten Einsatzort ist somit mit unterschiedlichen Erdbebenstärken zu rechnen und entsprechende Sicherungsmaßnahmen sind bei der Auslegung einzuplanen (Stadt Wien 2019; Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2022).

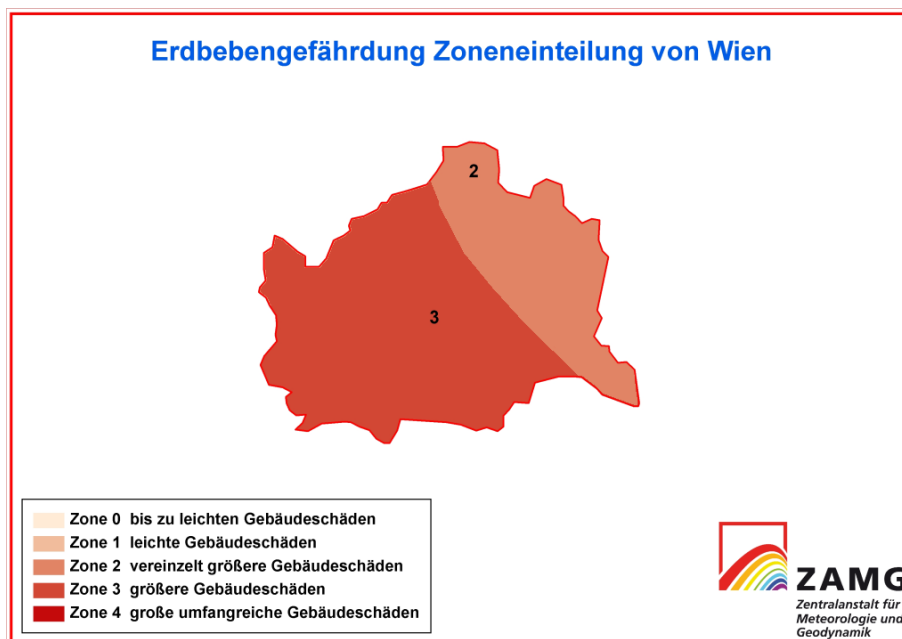


Abbildung 8: Erdbebengefährdung Zoneneinteilung Wien (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2022)

Nachdem der Einsatzort und die Umgebungsbedingungen analysiert wurden und das Fördergut bekannt ist, muss ein entsprechender Förderprozess gewählt werden. Eine hydraulische Förderanlage ist für den Einsatz an der oben beschriebenen Förderstrecke geeignet, da die fünf Kurven mit Rohrbögen einfach realisierbar sind und auch die Distanz von 6,3 Kilometern für hydraulische Förderer möglich ist. Die geringe Höhendifferenz muss bei der Berechnung der Anlage beachtet werden, kann aber mit einer stärkeren Pumpenleistung ausgeglichen werden. Wie in Kapitel 2.2.1 erwähnt, wird das Transportgut während des Transportvorgangs innerhalb von Rohren befördert, und ist somit von den Umgebungsbedingungen wie Wind und Regen geschützt. Eine Erdbebengefahr muss bei der Statikauslegung des Trägergerüsts für den Strömungsförderer miteinbezogen werden. Hierzu gibt es genaue Richtlinien und Normen, die eingehalten werden müssen und diese Auslegung wird nicht weiter in dieser Masterarbeit berücksichtigt. Die tiefen Temperaturen und die hohe Anzahl an Frosttagen können, wie in Kapitel 2.3 erwähnt, zu Problemen durch Gefrieren des Transportmediums führen. Neben der korrekten Wahl der Transportflüssigkeit gibt es zusätzliche Abhilfemaßnahmen, um dem Gefrieren entgegenzuwirken, wie beispielsweise die Beheizung oder Isolation der Rohrleitungen. Außerdem könnte man Zusätze in das Transportmedium einfügen. Ein hydraulischer Förderer ist somit eine gute Wahl für das Fördern des Kunststoffabfalls, da er an den Einsatzort und die Umgebungsbedingungen angepasst werden kann.

4.2 Hydraulikmedium

Bei einem hydraulischen Transportvorgang wird das Fördergut mit einer Flüssigkeit vermischt und dann, wie bereits in Kapitel 2.2 erklärt, das Gemisch durch die Rohrleitungen des hydraulischen Förderers befördert. Als Transportflüssigkeit, auch Hydraulikmedium genannt, wird meist Wasser verwendet, aber auch andere Flüssigkeiten wie Salzlösungen oder Öle können als Hydraulikmedium eingesetzt werden. Gewisse Fördergüter, die eine breiige Zusammensetzung aufweisen, wie beispielsweise Beton, benötigen kein zusätzliches Hydraulikmedium. Die Auswahl des Hydraulikmedium ist für die Auslegung eines hydraulischen Förderers ein wesentlicher Punkt, da eine gute Verträglichkeit zwischen Fördergut und Hydraulikmedium äußerst wichtig ist, um das Gut in der gewünschten Qualität an die Abgabestation zu transportieren. Da die POS Flakes aus Polyolefine und Polystyrol bestehen, und beide dieser Kunststoffe mit Wasser verträglich sind, wird als Hydraulikmedium für diese Masterarbeit Wasser gewählt. Die Vor- und Nachteile von Wasser als Transportflüssigkeit werden in diesem Kapitel dargestellt (Kunststoffe.de 2022; Arnold 2013; Griemert und Römisch 2018).

4.2.1 Nachteile Wasser als Hydraulikmedium

Obwohl Wasser bei den meisten hydraulischen Förderern als Hydraulikmedium verwendet wird, bringt es dennoch ein paar Nachteile mit sich. Die POS Flakes werden, wie in Kapitel 3.3 erwähnt, von Kunststoffabfällen aufbereitet, somit kann nicht ausgeschlossen werden, dass Verunreinigungen oder andere Kunststoffarten, die nicht mit Wasser verträglich sind, in dem Fördergut auftreten. Wenn das Fördergut mit Wasser in Kontakt kommt, werden diese Verunreinigungen von den POS Flakes abgespült und gelangen in das Hydraulikmedium. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Verunreinigungen sind Mikroplastikpartikel, welche äußerst schwer von Wasser zu trennen sind. Solange der hydraulische Förderer ein geschlossener Kreislauf ist, ist das nicht problematisch. Jedoch, wenn das Wasser in der Förderanlage für Wartungszwecke abgelassen werden muss, muss es aufbereitet werden, bevor es in das Abwassersystem geleitet werden darf. Falls eine unerwartete Leckage auftritt, wird es sehr schwer, das Wasser aufzufangen und zu reinigen, bevor es in die Umwelt gelangt. Umweltverschmutzung durch Mikroplastik ist weltweit ein sehr großes Problem und hat massive ökologische Auswirkungen (Wasser 3.0 gGmbH 2022).

Ein weiterer Nachteil, den Wasser als Hydraulikmedium mit sich bringt, ist die Korrosion, die entsteht, wenn Wasser mit Eisen oder niedriglegierten Stählen in Kontakt kommt. Viele Industrieanlagen werden aus niedriglegierten Stählen gebaut, da diese kostengünstiger sind als hochlegierte Stähle. Die niedriglegierten Metalle reagieren mit dem Wasser, in dem sie Elektronen an das Wasser abgeben und zu Metall-Ionen oxidieren. Diese werden dann von dem Wasser aufgelöst, wodurch das Metall abgetragen wird. Abhilfen wie Zusätze im Stahl, Beschichtungen oder Inhibitoren können die Korrosion des Metalls verlangsamen oder verhindern. Die Kosten, die durch Korrosionsschäden in einem Industriestaat entstehen, liegen bei 4% des Bruttoinlandprodukts, wobei ein Viertel davon vermeidbar wäre. Ein guter Korrosionsschutz der hydraulischen Förderanlage ist somit nicht nur technisch, sondern auch finanziell sehr wichtig (Mori 2016).

In Kapitel 4.1 wurde erwähnt, dass die Temperaturen im Winter am Einsatzort deutlich in die Minusgrade sinken - und das 70 mal im Jahr. Wasser hat den Gefrierpunkt bei 0°C, was bedeutet, dass eine Gefahr des Gefrierens bei der hydraulischen Förderanlage besteht. Eis in oder auf der Förderanlage kann zu Beschädigungen diverser Rohrleitungen, Anbauten, Komponenten oder Armaturen führen. Um ein Gefrieren zu verhindern, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, wie beispielsweise das Isolieren und Beheizen der kompletten Rohrleitungen und Wasserspeicher des hydraulischen Förderers. Diese Variante würde die Investitionskosten für einen hydraulischen Förderer, über die angenommene Förderstrecke, erhöhen, sowie den laufenden Energiebedarf deutlich steigern. Alternativ dazu können Zusätze wie Salz, Glycerin oder Alkohole in das Hydraulikmedium gemischt werden, um den Gefrierpunkt zu senken. Hierbei muss beachtet werden, dass die Zusätze keine unerwünschten Reaktionen mit dem Fördergut herbeirufen. Die Gefahr des Gefrierens ist bei Wasser als Hydraulikmedium ein deutlicher Nachteil, der bei der Auslegung des hydraulischen Förderers berücksichtigt werden muss (Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen 2019; Nadja Podbregar 2012).

4.2.2 Vorteile Wasser als Hydraulikmedium

Den Nachteilen, die Wasser als Hydraulikmedium hat, stehen einige Vorteile wie beispielsweise der Reinigungseffekt gegenüber, der es erlaubt den hydraulischen Förderer weiter in den verfahrenstechnischen Prozess einzubinden. Wie bereits erwähnt sind die weichen POS Flakes verunreinigt und diese Verschmutzungen werden durch das Wasser entfernt. Dadurch ist eine zusätzliche Reinigung der POS Flakes für die Weiterverarbeitung nicht notwendig oder kann deutlich geringer gestaltet werden. Des Weiteren ist Wasser gut verträglich mit den aus Polyolefine und Polystyrole bestehenden POS Flakes, da diese nur eine sehr geringe Wasseraufnahme aufweisen und nicht mit dem Wasser reagieren. Die Verträglichkeit zwischen dem Hydraulikmedium und dem Fördergut ist eine der wichtigsten Auslegungspunkte eines hydraulischen Förderers und Wasser hat den Vorteil, dass es mit vielen Stoffen nicht unerwünscht reagiert (Berger 2014; Arnold 2013; Kunststoffe.de 2022; Griemert und Römisch 2018).

Wasser ist weltweit sehr verbreitet, was zur Folge hat, dass es sehr gut erforscht ist. Das bedeutet, dass sämtliche Kennwerte wie die Dichte oder Viskosität, die für die Auslegung von einem hydraulischen Förderer notwendig sind, zur Verfügung stehen. Auch die chemischen so wie thermodynamischen Eigenschaften, wie die Wärmeleitfähigkeit, die für das Abkühlen oder Beheizen des Förderers benötigt werden, sind bekannt. Durch die extensive Untersuchung von Wasser wurde auch deutlich gemacht, welche Zusätze oder physikalisch Bedingungen benötigt werden, um ein gewünschtes Ergebnis zu erzielen. Es ist offenkundig, dass durch den Zusatz von Salz in Wasser der Gefrierpunkt auf bis zu -21°C sinkt oder dass eine Erhitzung auf mindestens 60°C notwendig ist, um Keime wie Legionellen töten zu können. Alternativ zu der Erhitzung können auch Chemikalien wie Chlor oder Natrium als Desinfektionsmittel für Wasser eingesetzt werden. Das immense Wissen, das über Wasser besteht, erleichtert die Auslegung eines hydraulischen Förderers, der Wasser als Hydraulikmedium verwendet (Lumitos AG 2022; Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen 2019; Heinze GmbH NL Berlin BauNetz 2022b).

Der größte Vorteil, den Wasser mit sich bringt, ist die Verfügbarkeit und die damit verbundenen geringen Kosten. Wasser ist in Österreich, wo sich auch der geplante Standort befindet, häufig, und eine sehr gute Infrastruktur zu dessen Beförderung ist gegeben. In Österreich stehen jährlich, durch Niederschlag, Schnee- und Eisschmelze und Grundwasser ca. 86 Mrd. m³ zur Verfügung. Der jährliche Wasserbedarf liegt bei 3% des Dargebotenen, also 2,5 Mrd. m³ und davon verwendet die österreichische Industrie ca. 1,5 Mrd. m³. Es ist ersichtlich, dass genügend Wasser zur Befüllung der hydraulischen Anlage zur Verfügung steht. Zusätzlich dazu hat das österreichische Wasser einen sehr hohen Reinheitsgrad und muss somit keiner aufwendigen Aufbereitung unterzogen werden. Durch das hohe Angebot von Wasser und den niedrigen Aufbereitungsgebühren ist der Wasserpreis gering. Der Durchschnittspreis liegt bei 2,02 €/m³, was immense finanzielle Vorteile bei der Befüllung der Anlage mit sich bringt. Obwohl die Verfügbarkeit von Wasser hoch und der Preis gering ist, sollte eine unnötige Verschwendung vermieden werden, um die ökologischen Auswirkungen zu minimieren (ÖVGW Wasser 2018).

4.3 Analyse des Fördergutes

Bevor eine Berechnung zu der optimalen Transportkonzentration durchgeführt werden kann, muss das Fördergut ausgewählt und diverse Faktoren analysiert werden. Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, besteht das Fördergut, das für diese Masterarbeit relevant ist, aus Kunststoffabfällen und kann in diversen Formen für den Transport aufbereitet werden. Da das Ziel der Auslegung ist, den Energiebedarf des Prozesses zu minimieren und somit auch die Kosten gering zu halten, wird als Transportform des Förderguts die weichen POS Flakes aus Kapitel 3.3.1 angenommen. Diese Fördergutform hat den geringsten Aufbereitungsaufwand und die geringste Energiezufuhr und ist somit die günstigste Variante. Durch das Hydraulikmedium werden die weichen POS Flakes gereinigt, wodurch ein separater Reinigungsschritt im Gesamtprozess nicht benötigt wird, was die Kosten weiter senken kann. Ein Nachteil dieser Fördergutform ist die geringe Schüttdichte, die einen enormen Platzbedarf zur Folge hat, der bei der Be- und Entladung des hydraulischen Förderers berücksichtigt werden muss. Die Schüttdichte des Förderguts hat, unter Annahme eines gleichbleibenden Massenstroms, direkten Einfluss auf den Volumenstrom. Ein Fördergut mit geringer Schüttdichte hat einen größeren Volumenstrom als ein Fördergut mit hoher Schüttdichte. Durch einen größeren Volumenstrom des Förderguts wird auch der benötigte Volumenstrom des Transportmediums erhöht, um den gleichbleibenden Massenstrom des Förderguts zu erreichen. Das bedeutet, dass bei einem Fördergut mit geringer Schüttdichte in der gleichen Zeit die gleiche Masse befördert werden kann, wie bei einem Fördergut mit größerer Schüttdichte, jedoch wird hierfür mehr Wasser benötigt. Durch den größeren Volumenstrom muss der hydraulische Förderer größer dimensioniert werden und der Energiebedarf der Anlage steigt. Ein kurzer Vergleich des Einflusses der Schüttdichte wird in Kapitel 4.5.1 dargestellt (Griemert und Römisch 2018).

4.3.1 Dichte der POS Flakes

Für diese Arbeit wird angenommen, dass die POS Flakes zu gleichen Anteilen aus Polystyrol (PS) und Polyolefine bestehen und dass keine anderen Kunststoffe in den Flakes inkludiert sind. Während Polystyrol ein Homopolymer ist, sind Polyolefine teilkristalline Polymere die aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polymethylpenten (PMP) zusammengesetzt sind. Die Dichten der vier Kunststoffe sind in der Tabelle 1 aufgelistet (Kunststoffe.de 2022; Arnold 2013).

| Kunststoff | Dichte kg/m³ |
|-------------------|--------------------------------|
| Polystyrol | 1050 |
| Polyethylen | 963 |
| Polypropylen | 903 |
| Polymethylpenten | 830 |

Tabelle 1: Dichte Hauptbestandteile POS Flakes (Kunststoffe.de 2022; Arnold 2013)

Eine genau Zusammensetzung der POS Flakes ist nicht bekannt und daher kann, wie in Gleichung 1 berechnet, der Mittelwert von 936,5 kg/m³ als Dichte für die POS Flakes angenommen werden.

$$\frac{1050 + 963 + 903 + 830}{4} = 936,5$$

Gleichung 1: Dichte der weichen POS Flakes

Für die Berechnung der optimalen Transportkonzentration wird die höchste Dichte von 1050 kg/m³ angenommen, da diese die größte Leistung für den Transport benötigt und somit die Optimierung der Transportkonzentration am stärksten vorantreibt. Ähnlich wie bei der Schüttdichte führt auch die geringe Dichte der POS Flakes zu einem erhöhten Volumenstrom bei gleichem Massenstrom. Der erhöhte Volumenstrom des Förderguts führt auch hier zu einem erhöhten Volumenstrom des Transportmediums, was einen größeren Gesamtenergiebedarf zu Folge hat. Die Dichte der POS Flakes fließt direkt in die Berechnung des Feststoff Volumenstroms ein, wie in Gleichung 8 dargestellt.

4.3.2 Dimensionen des Förderguts

In Kapitel 3.3.1 wurde erwähnt, dass eine genaue Verteilung der tatsächlichen Größen und unterschiedlichen Stärken der POS Flakes nicht bekannt ist. Aus diesem Grund wurde für alle Berechnungen für diese Arbeit eine Flake - Dimension von 60 mm x 60 mm und eine Stärke von 100 µm zur Vereinfachung angenommen. Die angenommenen Dimensionen lassen auf eine dünne quadratische Form der Flakes schließen. Dies ist aber nicht der Fall, wie in Abbildung 3 ersichtlich ist und somit muss von einem unregelmäßigen Volumen ausgegangen werden. Für die Berechnung der optimalen Transportkonzentration eines hydraulischen Förderers schreibt die Literatur ein kugelähnliches kornförmiges Volumen vor und somit muss mittels der Formel in Gleichung 2 das unregelmäßige Volumen des Fördergutes V zu einem Korndurchmesser d_F umgerechnet werden (Wossog 2014).

$$\sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = d_F$$

Gleichung 2: Korndurchmesser für volumengleiches Feststoffteil (Wossog 2014)

Nach der Ermittlung des Volumens eines POS Flakes basierend auf die angenommene Dimension, kann der Korndurchmesser für die weiter Auslegung mittels Gleichung 2 berechnet werden.

$$V = 0,06 \times 0,06 \times 0,0001 = 3,6 \times 10^{-7} m^3$$

Gleichung 3: Berechnung des Volumens eines POS Flakes

$$d_F = \sqrt[3]{\frac{6 \times 3,6 \times 10^{-7}}{\pi}} = 0,0088 m$$

Gleichung 4: Berechnung Korndurchmesser für POS Flakes

Aus dem Ergebnis von Gleichung 4 ergibt sich ein Korndurchmesser der POS Flakes von 0,0088 m.

4.3.3 Vor- und Nachteil des Fördergutes

Je nach Art des Fördergutes, das mit einem hydraulischen Förderer transportiert werden soll, müssen gewisse Vorkehrungen getroffen werden, um eventuell auftretenden Problemen vorzubeugen. Die weichen POS Flakes sind wegen ihrer Eigenschaften sehr sensibel gegenüber Verwehungen, und aus diesem Grund müssen Windschutzmaßnahmen am Aufgabe- sowie Abgabeort angebracht werden. Dies ist besonders wichtig an der Stelle, wo die Flakes von dem anliefernden Transportmittel (Zug, LKW) in die Aufgabestation des hydraulischen Förderers verladen werden, um einen Verlust des Fördergutes zu vermeiden. Ein weiterer Nachteil, der berücksichtigt werden muss, ist die Verstopfungsgefahr, die die POS Flakes mit sich bringen. Durch die kleinen Abmessungen der POS Flakes und ihrer weichen Eigenschaft, ist damit zu rechnen, dass diese in Spalten, Fugen und Zwischenräumen eindringen und zu Verschmutzungen und Verstopfungen führen können. Dies ist besonders an Stellen mit geringen Fördergeschwindigkeiten, wie bei der Auf- und Abgabestelle, zu beachten, da sich hier die Flakes ansammeln und ablagern, und Probleme bereiten können. Die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Rohrleitungen des hydraulischen Förderers sind hoch genug, um eine Verstopfung zu vermeiden, jedoch sollten auch hier regelmäßige Kontrollen durchgeführt werden.

Den oben genannten Nachteilen stehen aber auch Vorteile gegenüber, wie beispielsweise die geringe Reibung der weichen POS Flakes. Abrieb des Fördergutes sowie Verschleiß der Anlagenkomponenten sind Probleme, die bei Strömungsförderern, besonders beim Transport von abrasivem Fördergut, häufig auftreten. Durch die weichen Eigenschaften der POS Flakes muss nur mit einem sehr geringen Verschleiß der Rohrleitungen gerechnet werden, und zusätzliche Schutzmaßnahmen, wie die Auskleidung der Rohre mit Gummi oder Asphalt, können vermieden werden. Ein weiterer Vorteil, den die POS Flakes als Fördergut mit sich bringen, ist die geringe Sinkgeschwindigkeit, die sie in Kombination mit Wasser als Hydraulikmedium aufweisen. Die Sinkgeschwindigkeit beschreibt die Eigenbewegung des Fördergutes in der Flüssigkeit, und wird von den Gravitations-, Auftriebs- und Beschleunigungskräften, die auf das einzelne Förderkorn wirken, beeinflusst. Durch die ähnliche Dichte zwischen Hydraulikmedium und Fördergut wird eine hohe Auftriebskraft herbeigerufen, die zur Folge hat, dass die POS Flakes nur sehr langsam im Hydraulikmedium sinken werden. Die geringe Sinkgeschwindigkeit ermöglicht eine kleine spezifische Druckdifferenz, sowie eine kleine Strömungsgeschwindigkeit, was den Energiekonsum und die damit verbundenen Kosten des hydraulischen Förderers senkt. (Berger 2014; Griemert und Römisch 2018; Krause und Katterfeld 2014; Buhrke et al. 1989).

4.4 Parameter

Der letzte Schritt, bevor eine Berechnung zur optimalen Transportkonzentration durchgeführt werden kann, ist es, die wichtigsten Transportparameter festzulegen und zu charakterisieren.

4.4.1 Strömungsart

Für diese Arbeit wird angenommen, dass das Fördergut mit dem Hydraulikmedium ein heterogenes Gemisch aus weichen POS Flakes und Wasser bildet. Zur Vereinfachung der Berechnung wird angenommen, dass das heterogene Gemisch keinen Feinstoffeffekt ($f = 0$) aufweist und somit die Dichte des Hydraulikmedium nicht durch einen Feststoffanteil des Fördergutes erhöht wird. Des weiteren wird von einer gleichmäßigen Verteilung des Feststoffes im Hydraulikmedium ausgegangen, was eine springende bzw. schwebende Strömung ohne Ablagerungen zufolge hat, wie in der rechten Spalte von Abbildung 9 dargestellt (Wossog 2014; Buhrke et al. 1989).

| | | | | | |
|---------------------------------------|---|---|-------------------------|--------------------------|-------------------|
| | | | | | |
| vollst. Ablagerung | teilw. Ablagerung mit gleiten rollen springen | gleitendes Festst. bett mit rollen springen | gleiten rollen springen | rollen springen schweben | springen schweben |
| station. Feststoffbett Verstopfung | Ungleichverteilung | | | Gleichvert. | |
| | heterogener Transport | | | | |

Abbildung 9: Feststoffverteilung und -bewegung (Buhrke et al. 1989)

4.4.2 Kritische Geschwindigkeit

Ein weiterer, wichtiger Parameter für die Auslegung des hydraulischen Förderers ist die kritische Geschwindigkeit (w_{kr}). Für den horizontalen Transport mittels hydraulischen Förderers ist es wichtig, dass die Transportgeschwindigkeit (w_T) des Gemisches in allen Bereichen über der kritischen Geschwindigkeit liegt, da eine Unterschreitung dieser zu Ablagerungen des Fördergutes in der Rohrleitung führt. Obwohl die Förderstrecke, die in dieser Arbeit betrachtet wird, eine Steigung beinhaltet, ist diese auf die Distanz so gering, dass eine rein horizontale Förderung für die Berechnung angenommen wurde. In der modernen Industrie ist es üblich, dass die Transportgeschwindigkeit ca. 20% größer als die kritische Geschwindigkeit ist, um eine Sicherheit gegen Verstopfungen zu erzeugen (Wossog 2014).

Die folgende Gleichung zeigt den Zusammenhang zwischen der kritischen Geschwindigkeit w_{KR} , dem Korrekturfaktor K_o , dem Korndurchmesser d_F , dem Innendurchmesser der Rohrleitung d_i , der Erdbeschleunigung g , der Dichte des Feststoffes bzw. Fördergutes ρ_F und der Dichte des Transport- bzw. Hydraulikmediums ρ_T .

$$w_{KR} = K_o \times \left(\frac{d_F}{d_i}\right)^{\frac{1}{6}} \times \sqrt{2gd_i \frac{(\rho_F - \rho_T)}{\rho_T}}$$

Gleichung 5: kritische Geschwindigkeit für hydraulischen Transport (Wossog 2014)

Gleichung 6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Korrekturfaktor K_o und der Transportkonzentration C_T .

$$K_o = 2,9C_T^{0,18}$$

Gleichung 6: Korrekturfaktor für den hydraulischen Transport (Wossog 2014)

4.4.3 Fördermenge

Der letzte wichtige Parameter, der in diesem Unterkapitel betrachtet wird, ist die Fördermenge, die mittels des hydraulischen Förderers transportiert werden soll. Die gesamte Berechnung der optimalen Transportkonzentration basiert auf der Größe des Feststoffmassenstroms $m_{F,F}$. Das angenommene Fördervolumen der weichen POS Flakes beträgt $500 \text{ m}^3/\text{h}$, da mit diesem Fördervolumen ein Zug mit ca. 2000 m^3 Transportvolumen, wie in der Industrie üblich, innerhalb von vier Stunden entladen werden kann und ein Fördergutspeicher an der Aufgabestelle nicht benötigt wird. In Kapitel 3.3.1 wurde erwähnt, dass die lose Schüttdichte der weichen POS Flakes $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ beträgt. Durch einfaches Multiplizieren der Schüttdichte mit dem Fördervolumen lässt sich der Massenstrom wie folgt errechnen.

$$50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 25000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 25 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 6,9 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gleichung 7: Berechnung des Feststoff Massenstrom

Wie aus Gleichung 7 ersichtlich beträgt der Feststoffmassenstrom 25 t/h , was für einen hydraulischen Fördervorgang, der Massenströme bis zu 500 t/h bewältigen kann, gering ist. Die hohen Massenströme, die in der Literatur erwähnt werden, treten in der Bergbau- oder Kraftwerksindustrie auf. Hier haben die Fördergüter deutlich höhere Schüttdichten als in der Kunststoffabfallindustrie (Griemert und Römisch 2018).

4.5 Berechnung der optimalen Transportkonzentration

Die Auslegung des hydraulischen Förderers für den Transport von Kunststoffabfällen in Form von POS Flakes basiert auf der Berechnung der optimalen Transportkonzentration. Neben der Transportkonzentration wird auch die Rohrnennweite ermittelt. Mit dem Ziel, den Energiebedarf der Förderanlage so gering wie möglich zu halten und den Parametern aus Kapitel 4.1, 4.2, 4.3 und 4.4 kann die Berechnung vollzogen werden. Um den gesamten Energiebedarf der Förderanlage zu ermitteln, wird der Bedarf der Förderung vom Start zum Ziel, der zusätzliche Bedarf, der durch Bögen und Höhendifferenz benötigt wird und der Bedarf der Rückförderung berechnet.

4.5.1 Energiebedarf des Förderwegs

Der erste Schritt ist die Berechnung des Volumenstroms des Feststoffes bzw. des Fördergutes. Der Zusammenhang (sowie dessen Berechnung) zwischen dem Feststoff-Volumenstrom $V_{F,F}$, dem Massenstrom des Feststoffes $m_{F,F}$ und der Dichte des Feststoffes ρ_F , ist wie folgt:

$$V_{F,F} = \frac{m_{F,F}}{\rho_F}$$
$$V_{F,F} = \frac{6,9}{1050} = 0,00657 \frac{m^3}{s}$$

Gleichung 8: Berechnung Feststoff Volumenstrom (Wossog 2014)

Wie bereits in Kapitel 4.4.2 erwähnt, sollte die Transportgeschwindigkeit mindestens 1,2-mal so groß wie die kritische Geschwindigkeit angesetzt sein. Jedoch ist aus Gleichung 5 und Gleichung 6 ersichtlich, dass die kritische Geschwindigkeit w_{KR} von dem gesuchten Innendurchmesser d_i der Rohrleitung, sowie dem Korrekturfaktor K_o , und in weiterer Folge der noch unbekanntem Transportkonzentration C_T , abhängig ist, was die Rechnung unlösbar macht. Mit Hilfe der Gemischgeschwindigkeit w_G , die mit der Transportgeschwindigkeit gleichgestellt werden kann ($w_G = w_T$), dem Verhältnis $w_T = w_G = 1,2 w_{KR}$, und der Gleichung 5 und Gleichung 6, kann jedoch eine Gleichung zur Ermittlung des maximalen Rohrinneendurchmessers aufgestellt werden (Wossog 2014).

$$w_T = w_G = \frac{V_{F,G}}{\frac{d_i^2 \pi}{4}}$$

Gleichung 9: Gemisch Geschwindigkeit (Wossog 2014)

$$w_G \geq 1,2 w_{kr} = 1,2 K_o \left(\frac{d_F}{d_i}\right)^{\frac{1}{6}} \sqrt{2g d_i \frac{(\rho_F - \rho_T)}{\rho_T}}$$

$$d_i \leq \sqrt[7]{\frac{V_{F,G}}{0,3\pi K_o d_F^{\frac{1}{6}} \sqrt{2g \frac{(\rho_F - \rho_T)}{\rho_T}}}}$$

Gleichung 10: Innendurchmesser (basierend auf der Gleichung der kritischen Geschwindigkeit) (Wossog 2014)

Gleichung 10 für den Innendurchmesser ist nun nur noch von der Transportkonzentration abhängig, da der Korrekturfaktor K_o sowie der Volumenstrom des Gemisches $V_{F,G}$ nur von der Konzentration C_T abhängig sind. Das Verhältnis zwischen dem Volumenstrom des Gemisches $V_{F,G}$, dem Feststoff Volumenstrom $V_{F,F}$, und der Transportkonzentration C_T wird in Gleichung 11 beschrieben.

$$V_{F,G} = \frac{V_{F,F}}{C_T}$$

Gleichung 11: Volumenstrom des Gemisches (Wossog 2014)

Um die Transportkonzentration mit dem geringsten Energiebedarf zu ermitteln, wurde die weitere Berechnung mit unterschiedlichen Transportkonzentrationen durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst, und werden hier anhand der Transportkonzentration von $C_T=0,36$ berechnet. In der folgenden Tabelle werden die Werte aller Variablen, die für die Berechnung des Rohrrinnendurchmessers bei $C_T=0,36$ benötigt werden, aufgelistet.

| Bezeichnung | Variabel | Wert |
|------------------------|-----------|--------------------------|
| Volumenstrom Gemisch | $V_{F,G}$ | 0,0183 m ³ /s |
| Korrekturfaktor | K_o | 2,41 |
| Feststoffdurchmesser | d_F | 0,0088 m |
| Dichte Feststoff | ρ_F | 1050 kg/m ³ |
| Dichte Hydraulikmedium | ρ_T | 1000 kg/m ³ |

Tabelle 2: Werte zur Berechnung des Innendurchmessers bei $C_T = 0,36$

Mit den Kennwerten aus Tabelle 2, Gleichung 10 und $C_T = 0,36$ lässt sich der Innendurchmesser der Rohrleitung ermitteln.

$$d_i \leq \sqrt[3]{\frac{0,0183}{0,3\pi \cdot 2,41 \cdot (0,0088)^{\frac{1}{6}} \sqrt{2g \frac{(1050 - 1000)}{1000}}} = 0,179 \text{ m}$$

Gleichung 12: Berechnung Innendurchmesser bei $C_T = 0,36$

Aus Gleichung 12 ist ersichtlich, dass der Rohrinne Durchmesser nicht größer als 179 mm sein darf, da sonst die kritische Geschwindigkeit unterschritten wird. Unter der Berücksichtigung von Verschleiß, sollte eine Wandstärke der Rohrleitung von mindestens 8 mm gewählt werden. Um die Investitionskosten möglichst gering zu halten, werden die Rohrleitungen für hydraulische Förderer in der Industrie nach Norm, z.B. EN 10217, ausgewählt. Für diese Arbeit wurde ein Rohr mit Außendurchmesser 193,7 mm und einer Wandstärke von 8 mm aus DIN EN 10217 ausgewählt, daraus folgt für die weitere Berechnung ein gewählter Rohrinne Durchmesser d_i von 177,7 mm (Wossog 2014; DIN EN 10217).

Durch Einsetzen des gewählten Innendurchmessers in Gleichung 9 ergibt sich nun die Gemisch Geschwindigkeit w_G , wie in Gleichung 13 dargestellt.

$$w_G = \frac{0,0183}{\frac{0,1777^2 \pi}{4}} = 0,736 \frac{m}{s}$$

Gleichung 13: Berechnung Gemisch Geschwindigkeit

Der nächste Schritt in der Berechnung ist es, die Reynolds-Zahl des Transportgemisches Re_G festzulegen. Hierfür wird die kinematische Viskosität des Hydraulikmediums ν_T benötigt. Für diese Arbeit ist das Hydraulikmedium Wasser, das eine kinematische Viskosität von $1,002 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweist (Wossog 2014).

$$Re_G = \frac{w_G d_i}{\nu_T} = \frac{0,736 \times 0,1777}{1,002 \times 10^{-6}} = 1,31 \times 10^5$$

Gleichung 14: Reynolds-Zahl des Transportgemisches (Wossog 2014)

Der letzte Wert, der berechnet werden muss, bevor der Energiebedarf der Förderung ermittelt werden kann, ist der Druckverlust pro Meter $\Delta P_G/L$, der in der Anlage vorherrscht. Bevor diese Rechnung durchgeführt werden kann, müssen die folgenden Werte ermittelt werden:

- Rohrreibungsbeiwert $\lambda_{R,G}$
- Die Reynolds-Zahl des Feststoffs Re_F
- Widerstandsbeiwert C_w
- Kenngröße für den Feststoffanteil f
- Dichte des Hydraulikmediums erhöht durch einen Feststoffanteil ρ_{TS}
- Korrektorexponent für den Kornverteilungseinfluss n
- Korrekturfaktor für die Rohrtoleranz K_T

Die Rohrreibungszahl hängt von der Rauheit des Rohres und der Reynolds-Zahl des Gemisches Re_G ab, und ist ein wichtiger Faktor in der Strömungsmechanik. Für diese Arbeit wurde eine Strömung im Übergangsgebiet sowie eine relative Rauheit $d_i/k = 10000$ angenommen. Daraus folgt eine Rohrreibungszahl von $\lambda_{R,G} = 0,0177$ die aus dem Diagramm in Abbildung 10 herausgelesen wird (Wossog 2014).

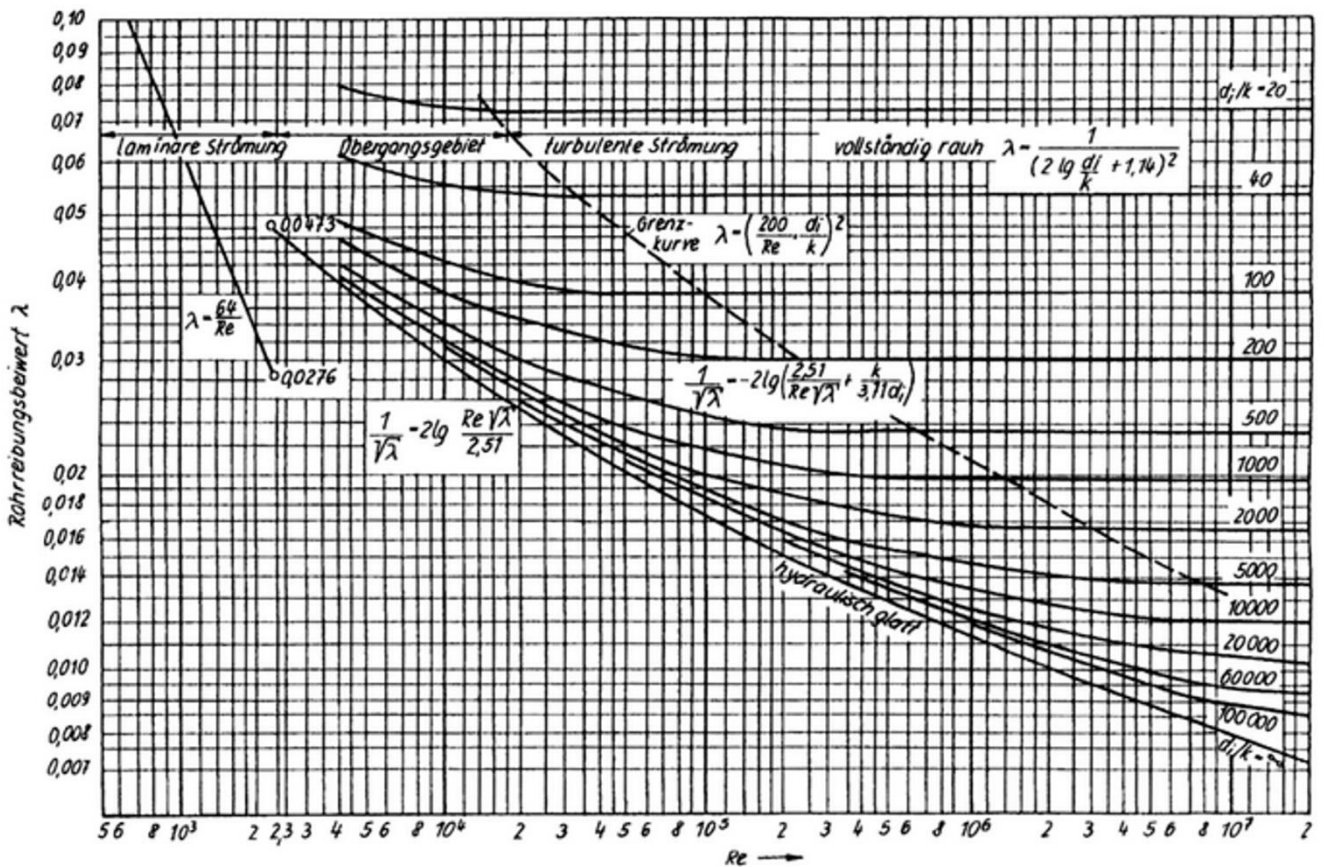


Abbildung 10: Rohrreibungszahl $\lambda_{R,G}$ (Wossog 2003)

Die Reynolds-Zahl des Feststoffes ist abhängig von der Dichte des Feststoffes $\rho_F = 1050 \text{ kg/m}^3$ und dem Feststoffdurchmesser $d_F = 0,0088 \text{ m}$ und kann aus dem Diagramm in Abbildung 11 herausgelesen werden. Die Reynolds-Zahl des Feststoffes wird für diese Arbeit wie folgt angenommen: $Re_F = 1000$ (Wossog 2014).

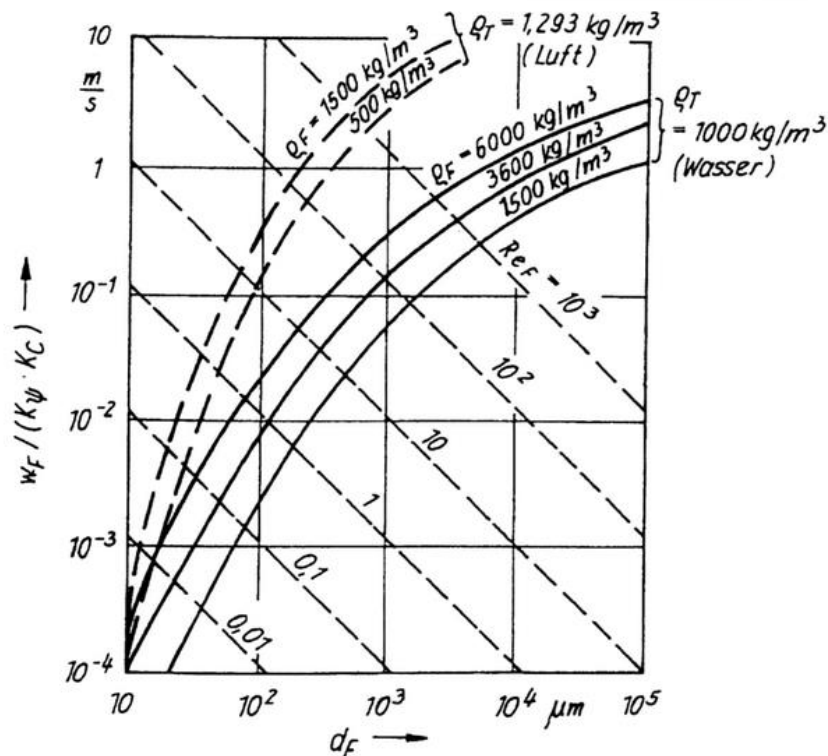


Abbildung 11: Reynold-Zahl des Feststoffes (Wossog 2003)

Der Widerstandsbeiwert einer Feststoffkugel C_w ist ausschließlich von der Reynolds-Zahl des Feststoffes Re_F abhängig und ist wie folgt berechenbar.

$$c_w = \frac{24}{Re_F} + \frac{4}{\sqrt{Re_F}} + 0,4 = \frac{24}{100} + \frac{4}{\sqrt{100}} + 0,4 = 0,55$$

Gleichung 15: Widerstandsbeiwert einer Feststoffkugel (Wossog 2014)

Wie in Kapitel 4.4.1 angesprochen, wird davon ausgegangen, dass das Hydraulikmedium keinen Massenanteil des Feststoffes enthält und ein rein heterogenes Gemisch besteht. Auf Basis dieser Annahme ist die Kenngröße, laut Literatur, für den Feststoffanteil $f = 0$. Aus diesem Grund wird die Dichte des Hydraulikmediums nicht erhöht, somit wird $\rho_{TS} = \rho_T$ für die weiteren Berechnungen in dieser Arbeit verwendet (Wossog 2014).

Der Korrektorexponent für den Kornverteilungseinfluss ist abhängig von der Verteilung der Korngrößen innerhalb des Förderguts. Wenn eine gleichmäßige Korngröße durch das gesamte Fördergut verteilt ist, dann ist der Korrektorexponent $n = 1$. Für die weichen POS Flakes sind keine Daten über die Korngrößenverteilung vorhanden, weshalb eine gleichmäßige Korngrößenverteilung angenommen wird, und der Korrektorexponent somit $n = 1$ ist (Wossog 2014).

Der letzte Korrekturfaktor, der für die Berechnung des Druckverlustes pro Meter benötigt wird, ist der Korrekturfaktor für Rohrtoleranz K_T . Dieser Faktor ist ein Tabellenwert und ist von dem Durchmesser Verhältnis, zwischen Außendurchmesser D_o und Innendurchmesser d_i , sowie der Wanddickentoleranz laut Norm abhängig. Die Wanddickentoleranz aus DIN EN 10217-1 liegt bei der gewählten Wanddicke von 8 mm bei 8%. Die Berechnung des Durchmesser Verhältnisses wird in Gleichung 16 durchgeführt und die Tabelle des Korrekturfaktors ist in Abbildung 12 dargestellt (DIN EN 10217).

$$\frac{D_o}{d_i} = \frac{193,7}{177,7} = 1,1$$

Gleichung 16: Durchmesser Verhältnis Rohraußendurchmesser und Rohrinwenddurchmesser

| Durchmesser Verhältnis d_o/d_i | Faktor K_T in Abhängigkeit von der Wanddickentoleranz der Rohre ¹⁾ | | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | + 8 % | + 9 % | + 10 % | + 12,5 % | + 15 % | + 17,5 % | + 20 % |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1,1 | 1,04 | 1,05 | 1,05 | 1,07 | 1,08 | 1,09 | 1,11 |
| 1,2 | 1,08 | 1,10 | 1,11 | 1,14 | 1,16 | 1,20 | 1,23 |
| 1,3 | 1,13 | 1,15 | 1,16 | 1,21 | 1,26 | 1,31 | 1,36 |
| 1,4 | 1,18 | 1,20 | 1,23 | 1,29 | 1,36 | 1,44 | 1,52 |
| 1,5 | 1,23 | 1,26 | 1,29 | 1,38 | 1,48 | 1,58 | 1,69 |

¹⁾ Die einzuplanende Plus toleranz ist den Maßnormen der Rohre zu entnehmen, z.B. DIN EN 10216-1 bis DIN EN 10216-5 (nahtlose Rohre) und DIN EN 10217-1 bis DIN EN 10217-7 (geschweißte Rohre).

Abbildung 12: Korrekturfaktor K_T für Rohrtoleranz (Wossog 2003)

Mit dem Ergebnis aus Gleichung 16 und der Wanddickentoleranz aus der Norm kann aus Abbildung 12 ein Korrekturfaktor für die Rohrtoleranz $K_T = 1,04$ gewählt werden. Um genügend Sicherheit für die Auslegung zu berücksichtigen, wurde die Weiterberechnung in dieser Arbeit mit einem Korrekturfaktor von $K_T = 1,11$ durchgeführt. Dieser entspricht dem Korrekturfaktor bei der maximalen Wanddickentoleranz von 20% und dem errechneten Durchmesser Verhältnis von 1,1.

Nachdem alle Werte bestimmt wurden, ist es nun möglich den längenbezogenen Druckverlust $\Delta P_G/L$ der Förderstrecke des hydraulischen Förderers zu berechnen. Der längenbezogene Druckverlust wird durch den Druckverlustanteil des Hydraulikmediums und den des Fördergutes bestimmt, und wird wie folgt berechnet:

$$\frac{\Delta P_G}{L} = \frac{\rho_T w_G^2 \lambda_{R,G} K_T}{2d_i} \left[1 + 83^{1/n} \left(\frac{g d_i (\rho_F - \rho_{TS})}{w_G^2 \rho_{TS} \sqrt{c_W}} \right)^{1/n^3} c_T (1 - f) \right]$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_G}{L} &= \frac{1000 * 0,736^2 * 0,0177 * 1,11}{2 * 0,1777} \\ &* \left[1 + 83 \left(\frac{9,81 * 0,1777(1050 - 1000)}{0,736^2 * 1000 \sqrt{0,55}} \right) 0,36(1 - 0) \right] = 223,99 \frac{Pa}{m} \end{aligned}$$

Gleichung 17: Längenbezogener Druckverlust (Wossog 2014)

Das Ergebnis aus Gleichung 17 bedeutet, dass pro Meter Förderweg ein Druckverlust von 221,64 Pa durch die Eigenschaften des Fördergemisches auftritt. Um den Druckverlust pro Meter in Transportarbeit pro Meter umzuwandeln muss der längenbezogene Druckverlust mit dem Volumenstrom des Gemisches $V_{F,G}$ multipliziert werden. Anschließend muss die Transportarbeit pro Meter mit der Förderlänge L multipliziert werden, um die benötigte Leistung für die Kompensation des Druckverlustes zu berechnen (Wossog 2014).

$$\frac{\Delta P_G}{L} * V_{F,G} = \frac{W}{m}$$

$$223,99 * 0,0183 = 4,09 \frac{W}{m}$$

Gleichung 18: Transportarbeit pro Meter (Wossog 2014)

$$P_F = 4,09 * 6300 = 25767 W$$

Gleichung 19: Transportarbeit für die Förderstrecke

Aus dem Ergebnis von Gleichung 19 wird ersichtlich, dass eine Leistung von 25,7 kW benötigt wird, um den Transport über die Förderstrecke zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass 103 kWh notwendig sind, um einen geladenen Zug mit 2000 m³, bzw. 100000 t, weichen POS Flakes innerhalb von vier Stunden zu entladen. Im Vergleich dazu, würde ein Fördergut mit einer Schüttdichte von 480 kg/m³, wie das grobe Agglomerat, nur 0,42 Stunden und 76 kWh benötigen, um die 100000 t zu entladen. Die Reduktion des Energiebedarfs für die Förderung durch die höhere Schüttdichte gleicht jedoch nicht den deutlich höheren Energiebedarf der Aufbereitung des groben Agglomerates aus. Wenn der Energiebedarf der gesamten Förderung betrachtet wird, sind die weichen POS Flake am besten geeignet, da diese keine Energie für die Aufbereitung benötigen.

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Berechnung für diverse Transportkonzentrationen der weichen POS Flakes. Hier ist deutlich zu sehen, dass $c_T=0,36$ die optimale Transportkonzentration für die Förderung von weichen POS Flakes mit einem Volumenstrom von 500 m³/h ist, da hier die geringste Leistung für den Fördervorgang benötigt wird.

| c_T 1 | d_i (max) m | d_i (gewählt) m | ΔP_G/L Pa/m | V_{F,G} m³/s | P_F kW |
|----------------------------------|------------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------------------|
| 0,1 | 0,36 | 0,23 | 147,53 | 0,066 | 64,58 |
| 0,2 | 0,25 | 0,20 | 147,12 | 0,033 | 32,13 |
| 0,28 | 0,21 | 0,18 | 194,24 | 0,023 | 29,92 |
| 0,3 | 0,21 | 0,18 | 206,83 | 0,022 | 29,66 |
| 0,32 | 0,20 | 0,18 | 209,43 | 0,021 | 28,14 |
| 0,34 | 0,19 | 0,18 | 213,99 | 0,019 | 27,04 |
| 0,36 | 0,18 | 0,17 | 223,99 | 0,018 | 25,76 |
| 0,38 | 0,18 | 0,16 | 257,96 | 0,017 | 28,99 |
| 0,4 | 0,18 | 0,14 | 314,08 | 0,016 | 33,36 |

Tabelle 3: Resultate diverser Transportkonzentrationen

Bei der errechneten Leistung P_F handelt es sich rein um die benötigte Leistung, um den Druckverlust, der durch die Eigenschaften des heterogenen Fördergemisches während dem Transport herbeigerufen wird, auszugleichen. Der Druckverlust, und die damit verbundene benötigte Leistung, die durch den Höhenunterschied zwischen Start- und Endpunkt sowie durch die Rohrbögen erzeugt wird, ist in der Berechnung nicht berücksichtigt und wird in den folgenden Kapiteln für die optimale Transportkonzentration $c_T=0,36$ behandelt.

4.5.2 Leistungsbedarf der Rohrbögen, Einbauteile, und Höhenunterschied

In Kapitel 4.5.1 wurde der Druckverlust über die gesamte Förderlänge, der durch die Wandreibung zwischen dem Heterogengemisch und den Rohrwänden erzeugt wird, berechnet und die benötigte Kompensationsleistung ermittelt. In dem Fall, dass Einbauteile wie T-Stücke, Verzweigungen oder Rohrverbindungen eingebaut werden, müssen die zusätzlichen Druckverluste, die durch Querschnittsänderungen oder Umlenkungen erzeugt werden, berücksichtigt werden. Die zusätzlichen Verluste durch Einbauteile können in der Literatur nachgeschlagen werden, da diese Tabellenwerte sind. Für die Auslegung des hydraulischen Förderers für diese Arbeit sind keine Einbauteile, außer Rohrbögen, vorgesehen, somit werden keine zusätzlichen Druckverluste berücksichtigt (Wossog 2014).

Um diverse Hindernisse zu umgehen, wird für die Auslegung angenommen, dass der hydraulische Förderer fünf Rohrbögen enthält, drei 90° Rohrbögen und zwei 30° Rohrbögen. Es wird angenommen, dass die Rohrbögen aus dem gleichen Werkstoff wie die restlichen Rohrleitungen gefertigt werden, und dass sie den gleichen Innendurchmesser d_i haben. Der Druckverlust pro Bogen ΔP_{Bogen} ist abhängig von der Dichte des Fördergutes ρ_F und der Geschwindigkeit des Fördergutes w_F . Da das Fördergut zusammen mit dem Transportmedium das Transportgemisch bildet, ist die Geschwindigkeit des Fördergutes sehr ähnlich der Gemischgeschwindigkeit w_G (Wossog 2014).

$$w_G \approx w_F \approx 0,736 \frac{m}{s}$$

Gleichung 20: Geschwindigkeit des Fördergutes (Wossog 2014)

Für die weitere Berechnung wird für $w_F = 0,736$ m/s angenommen. Der Druckverlust pro Bogen wird, wie in Gleichung 21 abgebildet und berechnet. Der Umlenkungswinkel kann in der Berechnung vernachlässigt werden (Wossog 2014).

$$\Delta P_{Bogen} = 0,6 * \frac{\rho_F w_F^2}{2} = 0,6 * \frac{1050 * 0,736^2}{2} = 170,64 Pa$$

Gleichung 21: Druckverlust pro Bogen (Wossog 2014)

Um den Gesamtdruckverlust aller Bögen $\Delta P_{BogenGesamt}$ zu berechnen, muss das Ergebnis aus Gleichung 21, wie in Gleichung 22 dargestellt, mit der Anzahl an Rohrbögen multipliziert werden.

$$\Delta P_{BogenGesamt} = 170,64 * 5 = 853,2 Pa$$

Gleichung 22: Gesamtdruckverlust aller Bögen

Um die Gesamtleistung für den Förderprozess zu berechnen, muss noch der Druckunterschied, der durch den Höhenunterschied Δh zwischen Start- und Endpunkt entsteht, ermittelt werden. Wie in Kapitel 4.1 erwähnt, beträgt der Höhenunterschied fünf Meter, und die Abgabestelle liegt höher als die Aufgabestelle. Da die Abgabestelle höher liegt als die Aufgabestelle ist hier von einem Druckverlust auszugehen, der mittels der Pumpe bzw. einer Zusatzleistung kompensiert werden muss. Der Druckverlust ΔP_h der durch einen geodätischen Höhenunterschied erzeugt wird, ist von der Erdbeschleunigung g , dem Höhenunterschied Δh und der Dichte des Gemisches ρ_G abhängig und wird in der folgenden Gleichung dargestellt.

$$\Delta P_h = g \rho_G \Delta h$$

Gleichung 23: Druckunterschied durch Geodätische Höhenunterschiede (Wossog 2014)

Um die Gleichung in Gleichung 23 zu lösen muss zuerst die Dichte des Gemisches ρ_G ermittelt werden. Hierzu müssen folgende Werte noch festgelegt werden:

- Volumenstrom Transportmedium $V_{F,T}$
- Massenstrom Transportmedium $m_{F,T}$
- Massenstrom Gemisch $m_{F,G}$

Der Volumenstrom des Transportmediums lässt sich wie folgt aus dem Volumenstrom des Gemisches und dem Volumenstrom des Feststoffes bestimmen.

$$V_{F,T} = V_{F,G} - V_{F,F} = 0,0183 - 0,00657 = 0,0117 \frac{m^3}{s}$$

Gleichung 24: Volumenstrom Transportmedium

Mit dem in Gleichung 24 errechneten Volumenstrom sowie der Dichte des Transportmediums kann der Massenstrom des Transportmediums wie folgt berechnet werden.

$$m_{F,T} = V_{F,T} * \rho_T = 0,0117 * 1000 = 11,7 \frac{kg}{s}$$

Gleichung 25: Massenstrom Transportmedium

Der Massenstrom des Gemischs ergibt sich aus der Summe des Massenstroms des Feststoffes und dem des Transportmediums, wie in Gleichung 26 dargestellt.

$$m_{F,G} = m_{F,T} + m_{F,F} = 11,7 + 6,9 = 18,6 \frac{kg}{s}$$

Gleichung 26: Massenstrom Gemisch

Mit Hilfe des Massenstroms des Gemisches und dem Volumenstrom des Gemisches kann nun, wie folgt, die Gemischdichte berechnet werden.

$$\rho_G = \frac{m_{F,G}}{V_{F,G}} = \frac{18,6}{0,0183} = 1018 \frac{kg}{m^3}$$

Gleichung 27: Gemischdichte

Da nun alle Faktoren für die Berechnung bekannt sind, können diese in Gleichung 23 eingesetzt werden und der Druckverlust durch geodätischen Höhenunterschied kann bestimmt werden.

$$\Delta P_h = 9,81 * 1018 * 5 = 49932,9 \text{ Pa}$$

Gleichung 28: Berechnung des Druckverlusts durch Höhenunterschied

Der letzte Schritt in diesem Kapitel ist die Berechnung der Leistung, die benötigt wird, um den durch Rohrbögen und Höhenunterschied entstanden Druckverlust zu kompensieren. Hierfür müssen die Druckverluste summiert werden, wie in Gleichung 29 ersichtlich.

$$\Delta P_{B+H} = \Delta P_h + \Delta P_{BogenGesamt} = 49932,9 + 853,2 = 50786,1 \text{ Pa}$$

Gleichung 29: Summe Druckverlust Bögen und Höhenunterschied

Die Leistung der Bögen und des Höhenunterschieds P_{B+H} kann nun mithilfe der Dichte ρ_G und dem Massenstrom $m_{F,G}$ des Gemisches wie folgt berechnet werden.

$$P_{B+H} = \frac{\Delta P_{B+H} * m_{F,G}}{\rho_G} = \frac{50786,1 * 18,58}{1018} = 927,05 \text{ W}$$

Gleichung 30: Leistung der Bögen und dem Höhenunterschied

Das Ergebnis aus Gleichung 30 zeigt, dass eine Leistung von 927 W benötigt wird, um den Höhenunterschied zwischen Start und Ziel und den fünf Rohrbögen zu kompensieren. Die erforderliche Zusatzleistung aufgrund der Bögen und des Höhenunterschieds P_{B+H} wird zusätzlich zu der Förderleistung P_F aus Kapitel 4.5.1 benötigt und fließt in die Gesamtleistung, die am Ende dieses Kapitel zusammengefasst wird, ein.

4.5.3 Energiebedarf der Rückförderung

Um den hydraulischen Förderer ökologisch und ökonomisch effizient zu gestalten, wird für diese Arbeit eine Rückförderung des Hydraulikmediums angenommen. Das bedeutet, dass das Wasser nach dem Fördervorgang wieder zum Aufgabepunkt zurück gepumpt wird und für einen weiteren Fördervorgang verwendet wird. Durch diese Rückförderung entsteht ein geschlossener Kreislauf wie in Abbildung 2 dargestellt. Die benötigte Rückförderleistung wird in diesem Kapitel berechnet und auf die Ökologie und die Ökonomie wird in Kapitel 6 näher eingegangen.

Bei der Berechnung der Rückförderung ist es wichtig zu beachten, dass der Massenstrom des Transportmediums $m_{F,T}$, der für die Förderung notwendig ist, aufrecht erhalten wird. Ähnlich wie bei der Berechnung des Energiebedarfs für den Förderweg müssen auch bei der Berechnung der Rückförderung Druckverluste durch Rohrreibung und Rohrbögen, sowie die Druckdifferenz durch den geodätischen Höhenunterschied betrachtet werden. Da kein Fördergut in der Rückförderung vorhanden ist, erzeugt dies auch keine Verluste. Es wird angenommen, dass die Rückförderung die idente Strecke wie die Förderung zurücklegt, und somit die gleiche Länge, den gleichen Höhenunterschied, und die gleiche Anzahl an Rohrbögen aufweist.

Der Druckverlust, der durch Rohrreibung in der Rückförderung auftritt ΔP_R , ist abhängig von der Dichte des Hydraulikmediums ρ_T , der Geschwindigkeit des Hydraulikmediums während der Rückförderung w_A , dem Rohrreibungsbeiwert während der Rückförderung λ_R , der Länge der Förderstrecke L und dem Rohrinne Durchmesser d_i . Gleichung 31 zeigt den Zusammenhang dieser Faktoren.

$$\Delta P_R = \frac{\rho_T w_A^2 \lambda_R L_S}{2 d_i}$$

Gleichung 31: Druckverlust durch Rohrreibung (Wossog 2014)

Bevor der Druckverlust in der Rückförderung bestimmt werden kann, müssen noch die Geschwindigkeit des Hydraulikmediums w_A und der Rohrreibungsbeiwert λ_R ermittelt werden. Die Geschwindigkeit des Hydraulikmediums w_A kann durch den Massenstrom des Hydraulikmediums $m_{F,T}$ und den Rohrinne Durchmesser d_i wie folgt berechnet werden.

$$w_A = \frac{m_{F,T}}{\frac{d_i^2 \pi}{4} \rho_T} = \frac{11,7}{\frac{0,1777^2 \pi}{4} (1000)} = 0,476 \frac{m}{s}$$

Gleichung 32: Geschwindigkeit des Hydraulikmediums (Wossog 2014)

Um den Rohrreibungsbeiwert λ_R aus dem Diagramm von Abbildung 10 zu lesen wird die Reynolds-Zahl für den Rücktransport Re_R sowie die Rohrreibungszahl k_i/d_i benötigt. Die Reynolds-Zahl kann mit der Geschwindigkeit des Hydraulikmediums w_A , dem Rohrinne Durchmesser d_i , und der Viskosität des Hydraulikmediums ν_T bestimmt werden. Die Berechnung der Reynolds-Zahl wird in Gleichung 33 dargestellt (Wossog 2014).

$$Re_R = \frac{w_A d_i}{\nu_T} = \frac{0,476 * 0,1777}{1,002 \times 10^{-6}} = 84416$$

Gleichung 33: Reynolds-Zahl der Rückförderung (Wossog 2014)

Um die Rohrreibungszahl k_i/d_i zu berechnen, muss die betriebliche Rohrrauheit k_i bestimmt werden. Diese ist ein Maß für das hydraulische Verhalten innerhalb der Rohrleitung, und kein Kennzeichen für die messbare Höhe der Rauheitserhebungen des Rohres. Die Rohrrauheit ist ein Tabellenwert, und kann aus Abbildung 13 ausgelesen werden. Für den hydraulischen Förderer, der in dieser Berechnung behandelt wird, wird $k_i=0,4$ angenommen, da die Rohre für die Rückführung des Hydraulikmediums nicht ausgekleidet werden (Wossog 2014).

| Leistungsart / Zustand / Einschränkungen | integrale Rohrrauheit k_i [mm] |
|---|----------------------------------|
| Fernleitungen und Zubringerleitungen mit gestreckter Leitungsführung aus Stahl- oder Gussrohren mit ZM- oder Bitumenauskleidung sowie aus Spannbeton- oder Faserzementrohren | 0,1 |
| Hauptleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung aus denselben Rohren, aber auch aus Gussrohren ohne Auskleidung, sofern Wassergüte und Betriebsweise nicht zu Ablagerungen führen | 0,4 |
| Netze: durch den Übergang von $k_i = 0,4$ mm auf $k_i = 1,0$ mm wird der Einfluss starker Vermaschung näherungsweise berücksichtigt | 1,0 |

Abbildung 13: Betriebliche Rohrrauheit (Wossog 2003)

Durch die Bestimmung der betrieblichen Rohrrauheit kann nun die Rohrreibungszahl wie folgt berechnet werden.

$$\frac{k_i}{d_i} = \frac{0,4}{0,1777} = 0,00225$$

Gleichung 34: Rohrreibungszahl (Wossog 2014)

Mithilfe der Ergebnisse aus Gleichung 33 und Gleichung 34, kann nun der Rohrreibungsbeiwert λ_R aus Abbildung 10 ausgelesen werden. Für die Werte der Rohrreibungszahl = 0,00225 und der Reynolds-Zahl = 84416 ergibt sich ein Rohrreibungsbeiwert von $\lambda_R = 0,026$ (Wossog 2014).

Durch die Festlegung des Rohrreibungsbeiwerts und der Geschwindigkeit des Hydraulikmediums sind nun alle Variablen für die Berechnung des Druckverlusts der Rückförderung bestimmt. Mit Hilfe der Gleichung 31 kann dieser wie folgt berechnet werden.

$$\Delta P_R = \frac{\rho_T w_A^2 \lambda_R L_S}{2 d_i} = \frac{1000 * 0,476^2 * 0,026 * 6300}{2 * 0,1777} = 104839 \text{ Pa}$$

Gleichung 35: Berechnung des Druckverlust durch Rohrreibung (Wossog 2014)

Da die Rückförderung entlang derselben Strecke wie die Förderung verläuft, müssen auch die Rohrbögen entlang der Strecke berücksichtigt werden. Um den Einfluss, den die Rohrbögen auf den Druckverlust haben, zu ermitteln, muss Gleichung 31 wie folgt erweitert werden.

$$\Delta P_R = \frac{\rho_T w_A^2}{2} \left(\frac{\lambda_R L_S}{d_i} + \sum \zeta_S \right) K_T$$

Gleichung 36: Druckverlust Rohrleitung inkl. Rohrbögen (Wossog 2014)

Die Summe der Einzelwiderstände ζ beschreiben den zusätzlichen Druckverlust durch die Umlenkung der Flüssigkeit in den Rohrbögen und ist ein Tabellenwert der aus Abbildung 14 ausgelesen werden muss. Es wird ein Stahlrohr, sowie ein Verhältnis zwischen dem Kurvenradius und dem Außendurchmesser des Rohres $R/D_o = 1,5$, angenommen.

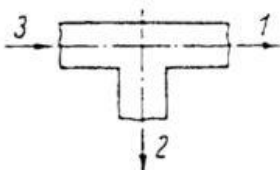
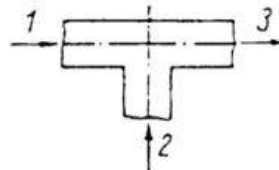
| | Glattrohrbogen 90° bei R_B/d_a | | | | | | | Segmentkrümmer | | |
|---|----------------------------------|-------------------------------|------|-----------|--|---------------------|--|----------------|------|------|
| | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 1 | 1,5 | |
| Stahl | 0,35 | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,16 | 0,11 | 0,46 | 0,35 | |
| Messing, Plaste, | 0,28 | 0,22 | 0,18 | 0,15 | 0,13 | 0,12 | 0,11 | 0,34 | 0,26 | |
| Guss | 0,54 | 0,45 | 0,40 | 0,31 | 0,25 | 0,20 | 0,20 | – | – | |
| Bogen $\neq 90^\circ$ in % von 90°-Bogen | 15° | 30° | 45° | 60° | 180° | auch für Krümmer | Faltenrohrbogen =2 x Glattrohrbogen | | | |
| | 25 | 45 | 65 | 80 | 120 | | | | | |
| 90°-Bogen hintereinander geschaltet | | | | | Z-förmig (eben) | | 1,8 x 90°-Bogen | | | |
| U-förmig | | | | | U-Ausgleicher | | 3,2 x 90°-Bogen | | | |
| Z-förmig (räumlich) | | | | | Lyra-Ausgleicher | | 4 x 90°-Bogen | | | |
| Metallschläuche nach Bild 1.1 | | | | | Dehnungsstopfbuchse, nicht entlastet | | 0,20 | | | |
| | | | | | Gleitrohrausgleicher, entlastet | | 0,60 | | | |
| LDA, WDA | | 0,2 x Wellen- bzw. Linsenzahl | | | | | | | | |
| Axial-WDA, entlastet | | DN | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 500 | 600 |
| | | ζ | 0,82 | 0,51 | 0,30 | 0,24 | 0,46 | 0,29 | 0,24 | 0,28 |
| Trennung ($d_1 = d_3$) | | | | | Vereinigung ($d_1 = d_3$) | | | | | |
|  | | | | |  | | | | | |
| \dot{m}_2 / \dot{m}_3 | ζ_2 bei $(d_2/d_3)^2$ | | | ζ_1 | ζ_2 bei $(d_2/d_3)^2$ | | | ζ_1 | | |
| | 0,2 | 0,6 | 1,0 | | 0,2 | 0,6 | 1,0 | | | |
| 0,2 | 1,21 | 4,06 | 9,50 | 0,03 | 0,72 | -0,12 | -0,14 | 0,27 | | |
| 0,4 | 0,98 | 1,77 | 3,13 | 0,18 | 4,28 | 0,51 | 0,26 | 0,46 | | |
| 0,6 | 0,93 | 1,21 | 1,94 | 0,90 | 9,68 | 1,18 | 0,62 | 0,57 | | |
| 0,8 | 0,92 | 1,07 | 1,38 | 6,40 | 19,92 | 1,89 | 0,94 | 0,60 | | |
| 1,0 | 0,91 | 1,01 | 1,21 | – | 26,00 | 2,64 | 1,20 | – | | |

Abbildung 14: Tabelle der Einzelwiderstände (Wossog 2003)

Für die drei 90° und die zwei 30° Rohrbögen, die für diese Berechnung angenommen werden, ergibt sich eine Summe der Einzelwiderstände von:

$$\sum \zeta_S = 3 * 0,3 + 2 * 0,45 * 0,3 = 1,17$$

Gleichung 37: Summe der Einzelwiderstände (Wossog 2014)

Mit Hilfe des Resultates aus Gleichung 37 und dem Korrekturfaktor K_T kann der Druckverlust durch Rohrreibung, inklusive den Rohrbögen, berechnet werden, indem man sie in Gleichung 36 einsetzt.

$$\Delta P_R = \frac{1000 * 0,476^2}{2} \left(\frac{0,026 * 6300}{0,1777} + \sum 1,17 \right) 1,11 = 116052 \text{ Pa}$$

Gleichung 38: Berechnung des Druckverlusts durch Rohrreibung inkl. Rohrbögen

Die 116052 Pa, die in Gleichung 38 berechnet wurden, repräsentieren den gesamten Druckverlust, der während der Rückförderung erzeugt wird. Da der Startpunkt der Rückförderung höher liegt als das Ziel der Rückförderung, wird durch den geodätischen Höhenunterschied ein zusätzlicher Druck erzeugt, der gegen den soeben errechneten Druckverlust wirkt. Der Druck der durch den geodätischen Höhenunterschied bei der Rückförderung ΔP_{hR} entsteht, wird ähnlich wie in Gleichung 23 berechnet - jedoch wird mit der Dichte des Hydraulikmediums gerechnet, wie in Gleichung 39 dargestellt.

$$\Delta P_{hR} = g \rho_T \Delta h = 9,81 * 1000 * 5 = 49050 \text{ Pa}$$

Gleichung 39: Druck durch geodätischen Höhenunterschied am Rückweg

Um den Gesamtdruckverlust der Rückförderung ΔP_{RG} zu bestimmen, muss das Ergebnis von Gleichung 39 von dem Ergebnis aus Gleichung 38 subtrahiert werden. Das Ergebnis ergibt sich aus Gleichung 40.

$$\Delta P_{RG} = \Delta P_R - \Delta P_{hR} = 116052 - 49050 = 67002 \text{ Pa}$$

Gleichung 40: Berechnung des Gesamtdruckverlust der Rückförderung

Um das Ergebnis aus Gleichung 40 in die Leistung für die Rückförderung P_R umzuwandeln, müssen die Werte, die für die Rückförderung relevant sind, in Gleichung 30 eingesetzt werden.

$$P_R = \frac{\Delta P_{RG} * m_T}{\rho_T} = \frac{67002 * 11,7}{1000} = 783,9 \text{ W}$$

Gleichung 41: Leistung für die Rückförderung

Das Ergebnis aus Gleichung 41 bedeutet, dass für die Rückförderung des Hydraulikmediums zu dem Startpunkt eine Leistung von 783,9 W benötigt wird. Diese Leistung inkludiert den durch Rohrreibung und Rohrbögen verursachten Druckverlust, sowie den Druck, der durch den geodätischen Höhenunterschied erzeugt wird. Diese Leistung wird in dem folgenden Kapitel, zusammen mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.5.1 und 4.5.2, die Gesamtleistung des hydraulischen Förderers bilden.

4.5.4 Gesamtförderung und Rohrauswahl

In dem Kapitel 4.5.1 wurde die optimale Transportkonzentration sowie die benötigte Leistung der Förderung mit dieser Konzentration festgelegt. Anschließend wurden in den Kapiteln 4.5.2 und 4.5.3 die Leistungen, die für die Rückförderung und die Kompensation der Rohrbögen und dem Höhenunterschied benötigt wird, ermittelt. Im Fall des hydraulischen Förderers, der in dieser Arbeit betrachtet wird, muss die Gesamtleistung von einer entsprechenden Pumpe bereitgestellt werden. Um die benötigte Gesamtleistung P_G zu berechnen, müssen die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln addiert werden.

$$P_G = P_F + P_{B+H} + P_R = 25767 + 927,05 + 783,9 = 27477,95 [W] = 27,4 kW$$

Gleichung 42: Gesamtleistung des Fördervorgangs

Das Ergebnis aus Gleichung 42 zeigt, dass eine Pumpe mit einer Leistung von mindestens 27,4 kW benötigt wird, um den gewünschten Feststoffvolumenstrom von 500 m³/h der weichen POS Flakes bei einer optimalen Transportkonzentration von $c_T=0,36$ zu ermöglichen. Die Einspeisung der weichen POS Flakes in den hydraulischen Förderer wird hinter der Pumpe angereicht. Somit muss durch die Pumpe nur das Hydraulikmedium strömen und nicht das Transportgemisch. Durch diese Anordnung von Pumpe und Einspeisung kann die Energieeinbringung mit einer Kreiselpumpe vollzogen werden, wie es bei den meisten hydraulischen Förderern der Fall ist. Kreiselpumpen die eine Leistung von ca. 30 kW und einen Volumenstrom von $V_{F,T}=0,012$ m³/s liefern, sind in der Industrie ausreichend vorhanden und werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt. Die gesamte Rohrlänge des hydraulischen Förderers ergibt sich aus der Förder- und der Rückförderdistanz und beträgt somit 12,6 km (Buhrke et al. 1989).

Wie in Kapitel 4.5.1 erwähnt, werden in der Industrie die Rohre, die die Förderstrecke für den hydraulischen Förderer vorgeben, nach Norm gefertigt. Eine Fertigung nach Norm hat einige Vorteile, wie beispielsweise den geringeren Preis, da keine Sonderanfertigung gefordert ist, die Rechtssicherheit beim Zukauf, sowie die einfachere Arbeit und Zusammenfügung mit anderen genormten Bauteilen. In dieser Masterarbeit wurde die Berechnung mit der Rohrdimension 193,7x8 laut EN 10217 durchgeführt. Diese Dimension bedeutet, dass der Außendurchmesser des Rohres 193,7 mm beträgt und das Rohr eine Wandstärke von 8 mm besitzt, was zu dem für die Berechnung relevanten gewählten Innendurchmesser $d_i=177,7$ mm führt. Die Dimensionsauswahl des Rohres basiert auf den Berechnungen aus Kapitel 4.5.1 und der zu erwartenden Korrosion der Rohre. Um die Anlage zusätzlich vor Korrosion zu schützen, sollten die Rohre mit einem Korrosionsschutz versehen werden. Eine zusätzliche Auskleidung der Rohre mit Gummi oder Asphalt, um von Verschleiß zu schützen ist nicht notwendig, da die weichen POS Flakes vergleichsweise sehr geringe Abrasivität aufweisen. Um den Aufbau, die Wartungen oder die Austauscharbeiten zu vereinfachen, wird die gleiche Rohrdimension für die Förderstrecke sowie die Rückförderstrecke eingesetzt (Lenz 2019; DIN EN 10217; Berger 2014; Wossog 2014).

Die EN 10217 beschreibt geschweißte Stahlrohre aus unlegierten Stählen. Für die Rohre eines hydraulischen Förderers bietet sich ein passiver Korrosionsschutz an, wie beispielsweise eine Verzinkung. Der Korrosionsschutz sollte an der Innenseite sowie der Außenseite angebracht werden, da nicht nur das Transportmedium, sondern auch die Atmosphäre zu einer Korrosion der unlegierten Stähle führen kann. Der Korrosionsschutz muss auf der Gesamtlänge von 12,6 km gewährleistet sein. Zusätzlich zu dem passiven Korrosionsschutz empfiehlt sich auch eine Drehung der Rohre um 90° während planmäßigen Wartungsarbeiten, da die Erfahrungswerte aus der Industrie sonst auf stärkeren Verschleiß im unteren Bereich des Rohrquerschnitts hinweisen. Durch eine Rotation kann ein zu hoher Verschleiß vermieden werden. Außerdem sollten einzelnen Rohre, die für den hydraulischen Förderer eingesetzt werden, möglichst lang gestaltet werden, um die Anzahl an Verbindungen zwischen Rohrenden zu minimieren. Jede Verbindung, üblicherweise Flanschverbindung, ist eine Schwachstelle in der Förderstrecke, wo sich Korrosion einfach absetzen kann oder eine Leckage möglich ist (Buhrke et al. 1989; Mori 2016).

5 Ein- und Ausspeisung

Neben der Berechnung des Fördervorganges ist auch die Einspeisung, sowie die Ausspeisung des Förderguts in- bzw. aus dem Förderstrom ein wichtiger Bestandteil der Auslegung eines hydraulischen Förderers. Die Ein- und Ausspeisung muss auf das Fördergut abgestimmt sein, da jedes Schüttgut andere Schüttcharakteristiken mit sich bringt und nicht für jedes Verfahren geeignet ist. In dem folgenden Kapitel werden die für die Ein- und Ausspeisung relevanten Eigenschaften der POS Flakes, diverse Einspeiseverfahren und unterschiedliche Ausspeisevarianten behandelt und anschließend eine Empfehlung ausgesprochen.

5.1 Relevanten Eigenschaften des Förderguts

Wenn hydraulische Förderer in der Bergbauindustrie oder für die Entaschung von Kraftwerken eingesetzt werden, ist das Fördergut üblicherweise grobkörnig, hart, und abrasiv, wie beispielsweise Kohle, Erz oder Abraum. Durch diese Eigenschaften muss bei der Ein- und Ausspeisung besonders auf den Abrieb und Verschleiß der mechanischen Komponenten geachtet werden. Zugleich besitzt diese Art von Fördergut in der Regel eine deutlich höhere Dichte als das Transportmedium, wodurch keine Gefahr des Schwimmens des Förderguts in der Einspeisungsanlage herrscht. Durch die höhere Dichte ist das Fördergut, das in der Bergbauindustrie vorkommt, auch einfacher von dem Transportmedium zu trennen, beispielsweise durch Abscheider oder Siebe und teure und aufwendige Trennungsanlagen, wie Zentrifugalabscheider, können vermieden werden. Weist das Fördergut eine besonders kleine Körnung auf, kann das Fördergut mittels Saugkopf auch vor der Pumpe in den Förderstrom aufgenommen werden, so dass das komplette Gemisch durch die Förderpumpe fließt. Fördergüter mit großer Körnung werden nach der Pumpe in den hydraulischen Förderer eingespeist, da ansonsten die spezifische Nutzarbeit der Gemischpumpe sinkt (Griemert und Römisch 2018; Krause und Katterfeld 2014; Buhrke et al. 1989).

Im Gegensatz zu dem Fördergut, das in der Bergbauindustrie präsent ist, sind die weichen POS Flakes, die für diese Masterarbeit betrachtet werden, weder abrasiv noch besitzen sie eine deutlich höhere Dichte als das Transportmedium. Durch die leicht biegsame Eigenschaft ist das Fördergut weich, was bedeutet, dass der Abrieb und der dadurch verursachte Verschleiß gering sein wird. Dieser Vorteil ist gleichzeitig auch ein Nachteil der POS Flakes, da diese so weich sind, dass sie zu einer Verstopfungsgefahr werden können, wie in Kapitel 4.3.3 bereits angesprochen. Durch die geringe Dicke der weichen POS Flakes, so wie den teils langen, fadenähnlichen Formen, ist anzunehmen, dass sie sich in Spalten, Fugen, oder anderen mechanischen Bauteilen verfangen werden und dadurch Verstopfungen oder Schäden verursachen. Das bedeutet, dass eine Ein- oder Ausspeisung in oder aus dem Förderstrom des hydraulischen Förderers nicht gegen Abrieb geschützt werden muss, jedoch sollten die Einheiten möglichst wenige Spalten und mechanische Bauteile besitzen, um ein Hängenbleiben der POS Flakes und eine Verstopfung zu vermeiden. Ebenfalls sollte aufgrund der Verstopfungsgefahr vermieden werden, dass die POS Flakes vor der Pumpe in den Förderstrom eingespeist werden, und somit als Gemisch durch die Pumpe fließen.

Die geringe Dichte der POS Flakes ist zwar für den Fördervorgang ein Vorteil, da dadurch die Sinkgeschwindigkeit der Flakes gering ist und somit die Fördergeschwindigkeit reduziert werden kann, aber für den Aus- und vor allem den Einspeisevorgang ein Nachteil. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, besitzen drei der vier Kunststoffe, die in den weichen POS Flakes vorkommen, eine Dichte, die geringer als die des Transportmediums ist. Lediglich ein Kunststoff besitzt eine Dichte die höher ist. Da es sich bei dem Fördergut um Kunststoffabfall handelt, ist es unmöglich eine genau Zusammensetzung der Anteile der diversen Kunststoffe in den POS Flakes festzulegen und man muss davon ausgehen, dass sich die Dichte der individuellen Flakes zwischen 830 kg/m^3 und 1050 kg/m^3 bewegt. Da diese Dichte sehr ähnlich zu der Dichte von Wasser 1000 kg/m^3 ist, bedeutet dies, dass Teile der Flakes in Wasser sinken, Teile an der Oberfläche schwimmen und Teile in der Mitte des Wassers suspendiert sind. Diese Charakteristik des Förderguts muss unbedingt bei der Einspeisung und der Ausspeisung berücksichtigt werden, um sicher zu stellen, dass alle POS Flakes ordnungsgemäß gefördert werden.

5.2 Einspeisung

Bei der Einspeisung wird das Fördergut in den Förderstrom des hydraulischen Förderers mittels einer Schleuse oder anderen Mechanismen eingebracht. Das Hauptproblem, das hier besteht, ist die zuverlässige Abdichtung des Systemdrucks, der innerhalb des Förderers wirkt. Hierfür sind bereits einige konstruktive Lösungen vorhanden und diese werden in diesem Kapitel behandelt. Aufgrund der baulichen Eigenschaften der Schleusen sind nicht alle Schleusen für jede Art von Fördergut geeignet. Eine Einspeisung kann vor oder nach der Pumpe geschehen, aber basierend auf den Eigenschaften die in Kapitel 5.2 erläutert wurden, empfiehlt es sich, die Einspeisung des Fördergutes für diese Masterarbeit nach der Pumpe vorzunehmen. Obwohl die Korngröße und die weichen Eigenschaften der POS Flakes es möglich machen sie durch die Kreiselpumpe zu fördern, ist es auch exakt diese Eigenschaft, die zu einem sehr hohem Verstopfungsrisiko führen und weswegen eine Förderung durch die Pumpe vermieden werden sollte (Buhrke et al. 1989).

5.2.1 Schleusen

Wie bereits erwähnt, muss die Einspeisungsvariante auf das Fördergut abgestimmt werden, weswegen zahlreiche unterschiedliche Einspeiseschleusen entwickelt wurden und in der Industrie zum Einsatz kommen. Bei den Schleusen wird zwischen zwei Bauarten und Funktionsprinzipien unterschieden. Schleusen, die eine kontinuierliche Feststoffeinbringung in die Rohrleitung ermöglichen, werden als Eintragschleusen bezeichnet. Die kontinuierliche Feststoffeinbringung erlaubt eine gleichmäßige Befüllung des Förderstroms mit dem Fördergut, was von Vorteil ist, da Druckunterschiede im Förderstrom vermieden werden. Ein weiterer Vorteil der Eintragschleusen ist der geringe Ausrüstungsaufwand, da die Schleusen klein und kompakt gebaut werden können. Obwohl es unterschiedliche Varianten gibt, folgen alle Eintragschleusen dem gleichen Prinzip: der Feststoff wird mittels eines beweglichen Bauteiles direkt in den Förderstrom eingeschleust. Typische Beispiele von Eintragschleusen sind in Abbildung 15 dargestellt (Buhrke et al. 1989).

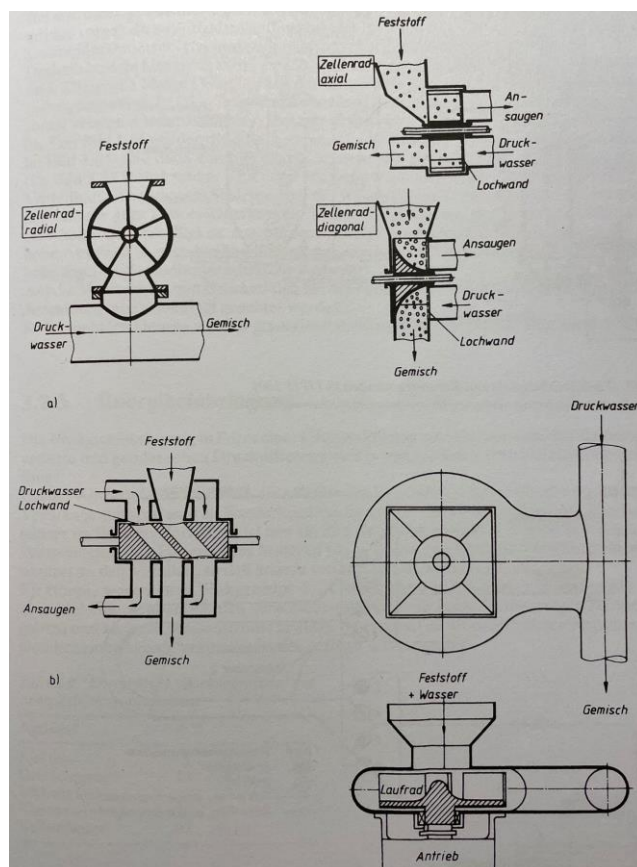


Abbildung 15: Eintragschleusen (Buhrke et al. 1989)

Den Vorteilen der Eintragschleusen stehen zwei wesentliche Nachteile gegenüber. Der bewegliche Bauteil, meist ein Lauf- oder Zellenrad, sorgt, neben der Einbringung des Feststoffes in den Förderstrom auch gleichzeitig für die Abdichtung des Förderstroms gegenüber der Atmosphäre. Weil keine separate Abdichtung vorhanden ist, können Eintragschleusen nur für geringen Förderdruck effizient genutzt werden. Der zweite Nachteil dieser Einschleusungsvariante ist der Verschleiß, der entsteht, wenn hartes und abrasives Gut befördert wird. Da das Fördergut durch ein Lauf- oder Zellenrad gefördert wird, entsteht Verschleiß durch Reibung mit den mechanischen Bauteilen, wodurch Abnutzungen bei den Eintragschleusen sowie dem Fördergut auftreten. Zugleich kann diese Eigenschaft auch zu Verstopfungen führen, wenn das Fördergut sehr weich ist, wie beispielsweise die POS Flakes für diese Masterarbeit (Buhrke et al. 1989).

Alternative zu den Eintragschleusen stehen Kammerschleusen zur Verfügung, um Fördergüter in den hydraulischen Förderstrom einzubringen. Bei Kammerschleusen wird das Fördergut oder das Fördergemisch durch eine Öffnung in eine Schleusenkammer gefüllt, welche unten geschlossen ist und somit als Zwischenraum für das Fördergut dient. Als Nächstes wird die Öffnung zwischen dem Fülltrichter und der Schleusenkammer geschlossen und ein Druckausgleich oder Drucküberschuss zwischen Schleusenkammer und Vorratsbehälter durchgeführt. Anschließend wird die Öffnung zwischen Vorratsbehälter und Schleusenkammer geöffnet und das Fördergut fließt in den Vorratsbehälter und wird dort von dem Förderstrom aufgenommen. Bei Rohrkammerschleusen werden die Schleusenkammern durch handelsübliche horizontale Rohre ersetzt, welche mittels Armaturen alternative befüllt werden, bevor das Fördergut durch Hochdruck in den Förderstrom gespült wird. Durch die Schleusenkammern besitzen Kammerschleusen sehr gute Abdichtungseigenschaften, was von Vorteil ist, da dies einen hohen Betriebsdruck des hydraulischen Förderers ermöglicht. Durch die alternierende Befüllung der Schleusenkammern, ist keine konstante Einspeisung in den Förderstrom möglich, was zu Druckschwankungen führen kann und somit ein Nachteil ist. Weiters ist durch die Schleusenkammern der Ausrüstungsaufwand, sowie die Baugröße von Kammerschleusen, deutlich größer als jene von Eintragschleusen. Der Ausrüstungsaufwand von Rohrkammerschleusen ist zwar geringer als der von Kammerschleusen, aber dennoch größer als der von Eintragschleusen. Die Steuerung von Kammerschleusen und Rohrkammerschleusen benötigt einen hohen Grad an Automatisierung, um die Einspeisung effizient zu gestalten. Beispiele von Kammerschleusen sind in Abbildung 16 dargestellt und ein Beispiel einer Rohrkammerschleuse zeigt Abbildung 17 (Buhrke et al. 1989).

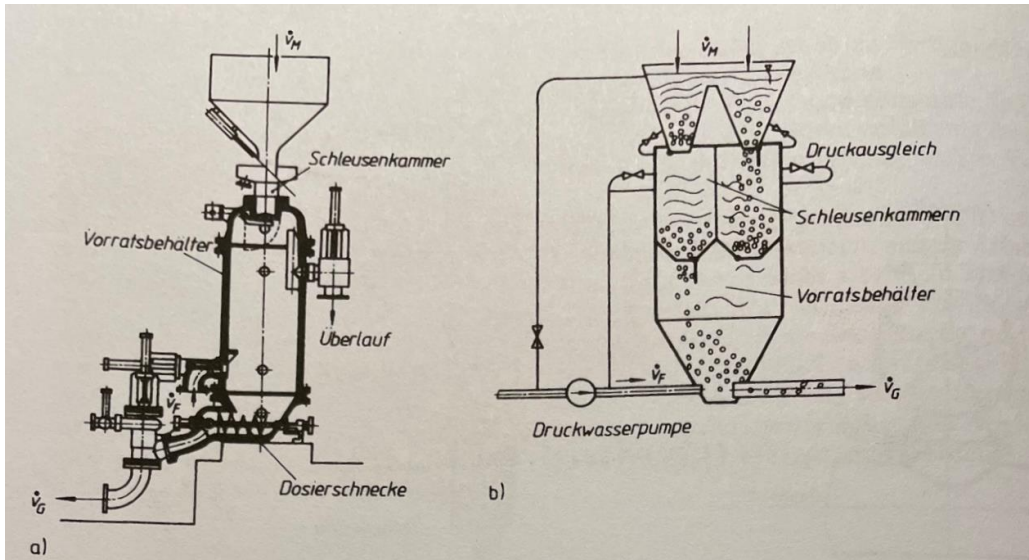


Abbildung 16: Kammerschleusen (Buhrke et al. 1989)

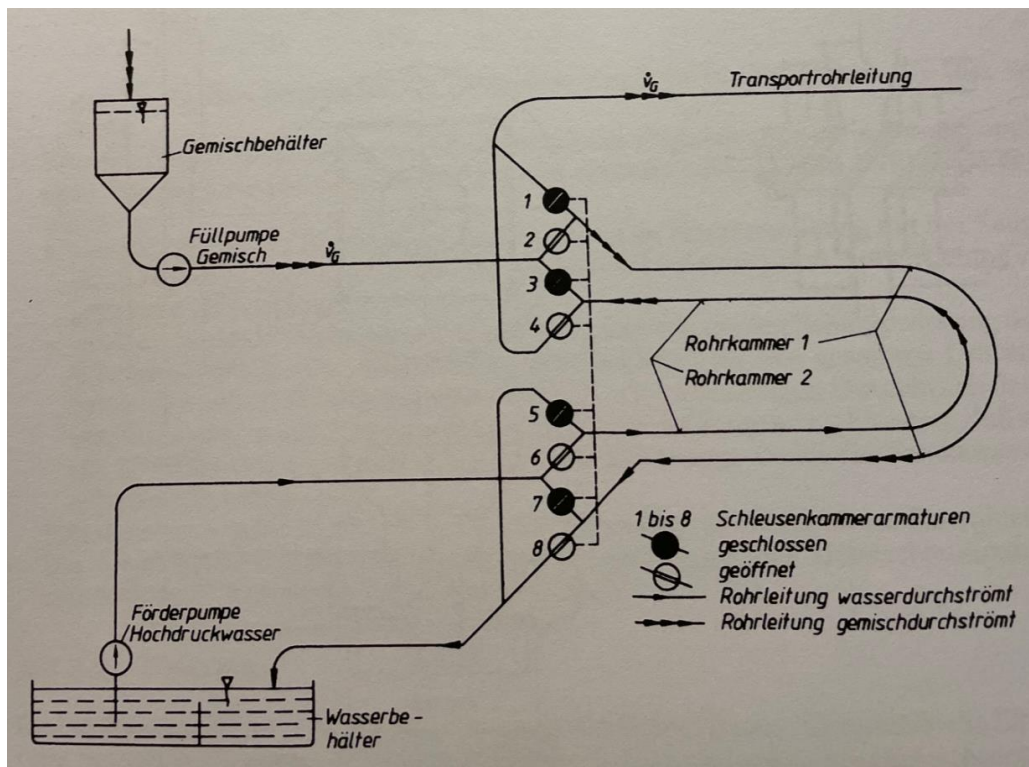


Abbildung 17: Rohrkammerschleuse (Buhrke et al. 1989)

5.2.2 Hydraulische Einspeisung

Die Schleusen aus Kapitel 5.2.1 sind Einspeisungsvarianten, die große mechanische Belastungen auf das Fördergut ausüben, da diese viel Kontakt, und somit auch Reibung mit mechanischen Bauteilen herbeirufen. Alternativ zu der mechanischen Einspeisung gibt es die hydraulische Einspeisung mittels Cyclo-Feeder. Der Cyclo-Feeder wurde speziell für die Kunststoffeinspeisung in einen hydraulischen Förderer entwickelt, mit dem Ziel, die mechanische Belastung auf das Fördergut zu minimieren. Der Feeder besteht aus einem Zylinder der auf einem, unten offenem, Konus befestigt ist. Der Zylinder und der Konus sind mit dem Hydraulikmedium befüllt, welches gleichzeitig tangential in der Mitte des Zylinders eingepumpt wird. Durch die tangentielle Einbringung des Hydraulikmediums in den Feeder, entsteht eine Drallströmung. Das Fördergut wird durch eine Öffnung am Deckel des Zylinders eingefügt und von der Strömung nach unten gespült. Die Masse des Hydraulikmediums in dem Cyclo-Feeder sorgt für die Abdichtung zwischen dem Förderdruck und der Atmosphäre. Das Arbeitsprinzip des Cyclo-Feeders ist in Abbildung 18 dargestellt (Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007).

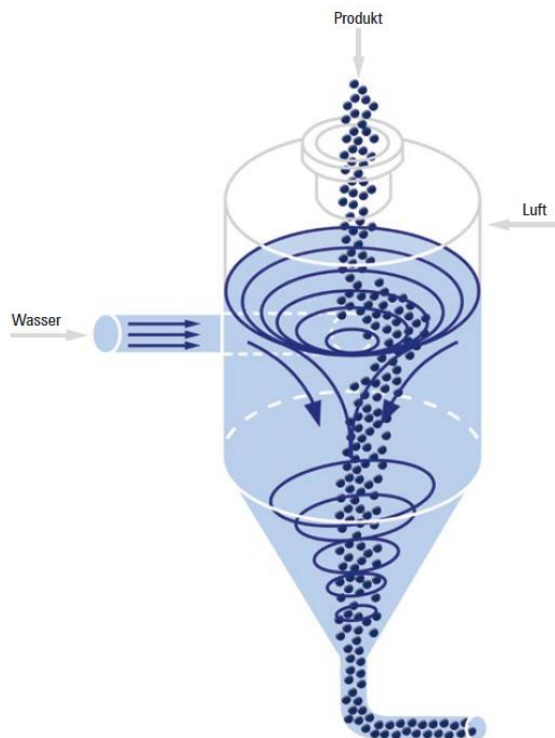


Abbildung 18: Cyclo-Feeder (Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007)

Da es sich bei dem Fördergut in dieser Arbeit um Kunststoffabfall handelt, ist der schonende Transport des Fördergutes zwar ein Vorteil, aber nicht die höchste Priorität. Viel mehr sind die weiteren Vorteile des Cyclo-Feeders für diese Arbeit von Bedeutung. Der größte Vorteil für die weichen POS Flakes ist, dass sie während der Einspeisung mittels Cyclo-Feeder keinen Kontakt mit mechanischen Bauteilen haben und somit eine Verstopfung durch Festhängen der Flakes an diversen Öffnungen, vermieden werden kann. Der zweite wesentliche Vorteil der hydraulischen Einspeisung ist, dass durch die erzeugte Drallströmung selbst sehr leichte Flakes, die normalerweise an der Wasseroberfläche schwimmen, in den Förderstrom eingeleitet werden. Ein weiterer Vorteil des Cyclo-Feeders ist, dass keine separate Abdichtung zwischen dem Förderstrom und der Atmosphäre notwendig ist. Der Druckausgleich wird durch die Masse des Hydraulikmediums im Feeder erzeugt. Der Nachteil der hydraulischen Einspeisung ist die große Baugröße, wenn man sie mit Eintragschleusen vergleicht (Schneider 2020; Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007).

5.2.3 Fazit Einspeisung

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln angesprochen, hängt die Auswahl der Einspeisung wesentlich von den Eigenschaften des Förderguts ab. Die weichen POS Flakes beschädigen mechanische Bauteile durch Abrieb kaum, jedoch weisen sie ein Verstopfungsrisiko auf. Umso mehr mechanische Bauteile vorhanden sind, desto höher ist das Verstopfungsrisiko. Die hydraulische Einspeisung verzichtet auf mechanische Bauteile und aus diesem Grund bietet sich der Cyclo-Feeder als optimale Einspeisung für einen hydraulischen Förderer für POS Flakes an.

5.3 Ausspeisung

Am Ende des hydraulischen Förderers muss das Fördergut wieder von dem Transportmedium getrennt werden und das Transportmedium anschließend wieder an den Start zurückgefördert werden. Die Weiterverwendung des Förderguts gibt vor, wie trocken das Gut für den nächsten Verfahrensschritt sein muss. Basierend auf dieser Vorgabe muss ein oder eine Kombination aus mehreren, Abscheidungsapparaten ausgewählt werden. Ähnlich wie bei der Einspeisung eignet sich nicht jede Ausspeisungsvariante für jedes Fördergut und jede Trockenstufe. In diesem Kapitel werden die Funktionsweisen sowie Vor- und Nachteile der Ausspeisungsvarianten Sieb, Hydrozyklon und Zentrifugen erläutert.

5.3.1 Siebe

Eine einfache Möglichkeit das Fördergut von dem Transportgemisch zu trennen ist ein Sieb. Hierfür wird das Transportgemisch auf ein Gitter gespült, durch welches das Transportmedium durchtritt, während das Fördergut von dem Gitter zurückgehalten wird. Das Fördergut das von dem Gitter zurückgehalten wird, tritt über den Überlauf aus, während das Transportmedium und kleiner Körner durch den Unterlauf ausgeschieden werden. Die Öffnungen des Siebgitters können je nach Bedarf dimensioniert werden, um nur die gewünschten Korngröße aus dem Transportgemisch zu filtern. Durch Sonderformen wie Bogensiebe oder durch das Rütteln bei Rüttelsieben kann eine hohe Trennschärfe erzeugt werden und somit eine effiziente Filterung des Förderguts von dem Transportmedium erreicht werden. Durch die Überströmung des Siebgitters können Agglomerate noch zusätzlich zerkleinert werden, ohne einen separaten Zerkleinerungsvorgang zu benötigen. Siebe werden in der Industrie oft als Erste von mehreren Ausspeisungsanlagen genutzt, um die groben Körner aus dem Transportgemisch zu entfernen und die nachfolgenden Flüssigkeitsabtrenner zu entlasten. Wenn man die weichen POS Flakes als Fördergut betrachtet, ist ein Nachteil des Siebes das Anlegen der Flakes am Siebgitter und die daraus resultierende Verstopfung, da sich die Flakes sehr einfach am Gitter verfangen können. Außerdem weist das abgeseibte Fördergut einen sehr geringen Trockenheitsgrad auf. Dem gegenüber stehen Vorteile wie die günstige Anschaffung, die sehr geringen Wartungsarbeiten und die genaue Dimensionierung des Siebgitters. Siebe können effektiv für die Ausspeisung von Fördergut mit einem Korndurchmesser von 0,2 mm oder größer angewendet werden. Abbildung 19 zeigt den Aufbau eines Bogensiebes (Buhrke et al. 1989).

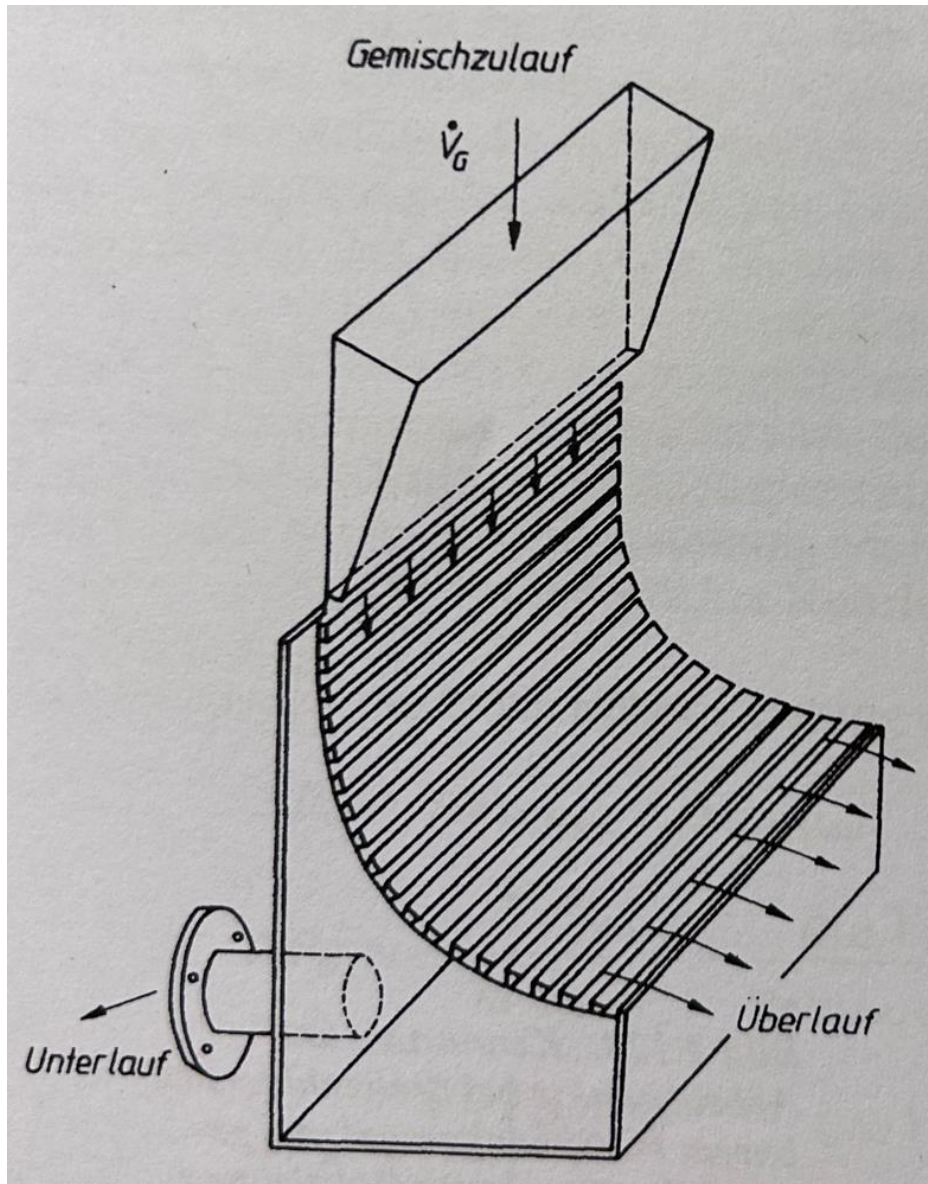


Abbildung 19: Bogensieb (Buhrke et al. 1989)

5.3.2 Hydrozyklone

Eine weitere Ausspeisungsmöglichkeit mit einfacher Bau- und Wirkungsweise ist der Hydrozyklon. Die Aufbauform eines Hydrozyklon ist ähnlich der des Cyclo-Feeders aus Kapitel 5.2.2, wo ein Zylinder auf einem Konus befestigt wird. Das Transportgemisch wird tangential mit hoher Geschwindigkeit in den Zylinder eingespeist, wodurch sich ein Wirbel in dem Hydrozyklone bildet. Durch die hohe Wirbelgeschwindigkeit wird eine Zentrifugalkraft erzeugt, die die großen und schweren Feststoffpartikel in dem Transportgemisch an die Wände des Zyklons drückt und mit Hilfe des Wirbels Richtung Unterlauf und aus dem Hydrozyklon heraus fördern. Gleichzeitig herrscht eine, nach innen gerichtete, Strömung innerhalb des Wirbels, die die kleinen und leichten Feststoffpartikel über den Überlauf ausspült. Die Bauform und Wirkungsweise wird in Abbildung 20 dargestellt (Buhrke et al. 1989).

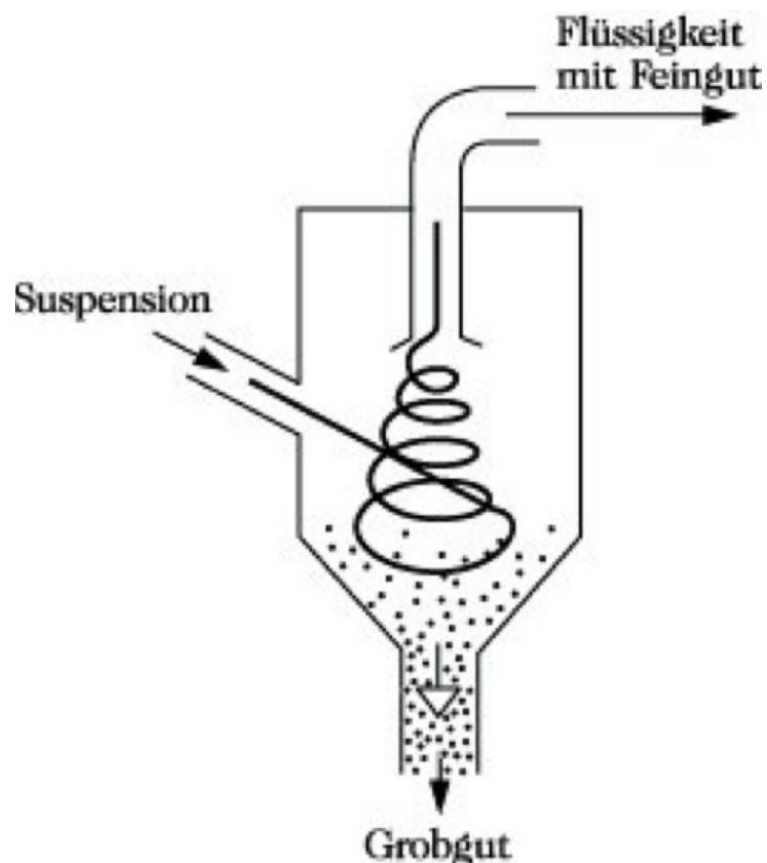


Abbildung 20: Hydrozyklon Wirkungsweise (Lingenhöhl und Müller 2014)

Wie bereits erwähnt, ist die Bauform eines Hydrozyklon und die Wirkungsweise relativ einfach. Dies ist ein Vorteil, da es zu einer günstigen Produktion und einer einfachen Inbetriebnahme führt. Es werden keine beweglichen Teile eingebaut, was die Abnutzung, Wartung, und Verstopfungsgefahr, besonders bei weichen Fördergut, verringert. Außerdem hat ein Hydrozyklon einen großen Einsatzbereich, so kann eine Trennung von Fördergütern, von dem Transportmedium, mit Korndurchmesser von 3×10^{-3} bis 500×10^{-3} mm erreicht werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass je kleiner der Korndurchmesser des zu trennenden Fördergut ist, umso kleiner muss der Hydrozyklone werden, was gleichzeitig den Durchsatz reduziert. Um hier Abhilfe zu schaffen müssen mehre Hydrozyklone parallel geschaltet werden, um den gewünschten Durchsatz zu erreichen, was wiederum die Kosten der Gesamtanlage negativ beeinflusst. Wenn ein sehr hoher Reinheitsgrad des Transportmediums gewünscht ist, kann man Hydrozyklone in Reihe schalten, um auch die kleinsten Partikeln aus dem Transportmedium auszuspeisen (Buhrke et al. 1989; Lingenhöhl und Müller 2014).

5.3.3 Zentrifugen

Im Gegensatz zu den Sieben und dem Hydrozyklon, die in den vorangegangenen Kapiteln behandelt wurden, sind Zentrifugen eine Ausspeisvariante, die einen großen maschinellen Aufwand benötigen. Für die Ausspeisung mittels Zentrifugen wird das Transportgemisch in eine Siebtrommel gespült, welche sich mit Hilfe eines Antriebes dreht. Durch diese Drehbewegung der Trommel wird eine hohe Zentrifugalkraft erzeugt, welche das Transportgemisch an die Wände der Trommel presst. Die Siebtrommel hält den Feststoff zurück, während das Transportmedium durch die Zentrifugalkraft hinausgeschleudert wird und von dem Gehäuse der Zentrifuge aufgefangen wird. Anschließend wird der Feststoff, der einen sehr hohen Trockenheitsgrad aufweist, aus der Trommel entleert. Die Entleerung kann diskontinuierlich, pulsierend oder kontinuierlich stattfinden und unterscheidet die diversen Zentrifugenvarianten. Beispiel der unterschiedlichen Zentrifugenvarianten sind in Abbildung 21, Abbildung 22, und Abbildung 23 dargestellt (Buhrke et al. 1989).

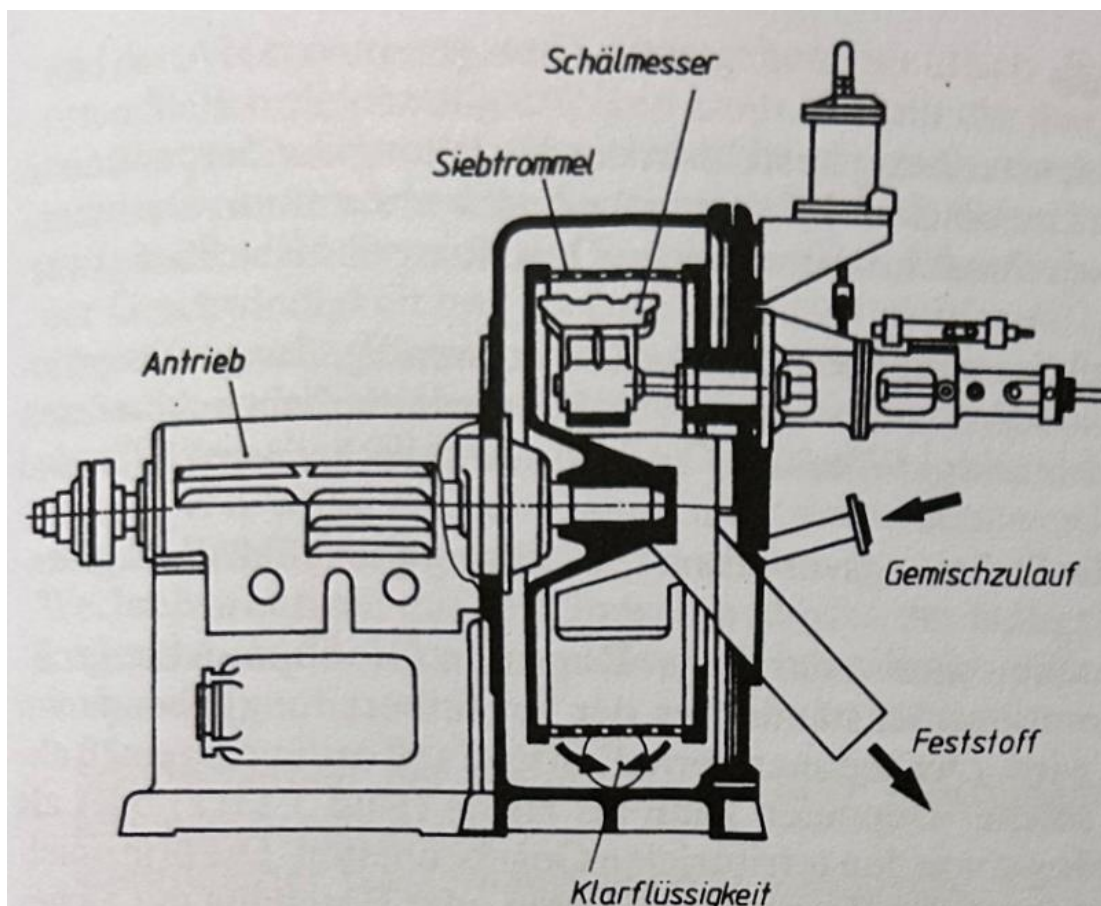


Abbildung 21: Schälzentrifuge (Buhrke et al. 1989)

Bei der Schälzentrifuge aus Abbildung 21 wird das Transportgemisch bei einer langsamen Trommeldrehzahl eingefügt. Anschließend wird die Trommel beschleunigt, um das Fördergut von dem Transportmedium zu befreien. Nachdem der gewünschte Trockenheitsgrad erreicht ist, wird die Trommel wieder verlangsamt und das Fördergut ausgeschieden. Durch die ständige Änderung der Drehgeschwindigkeit für die Befüllung und die Entleerung ist der Ablauf dieser Variante diskontinuierlich, welche den Durchsatz stark reduziert und von Nachteil ist (Buhrke et al. 1989).

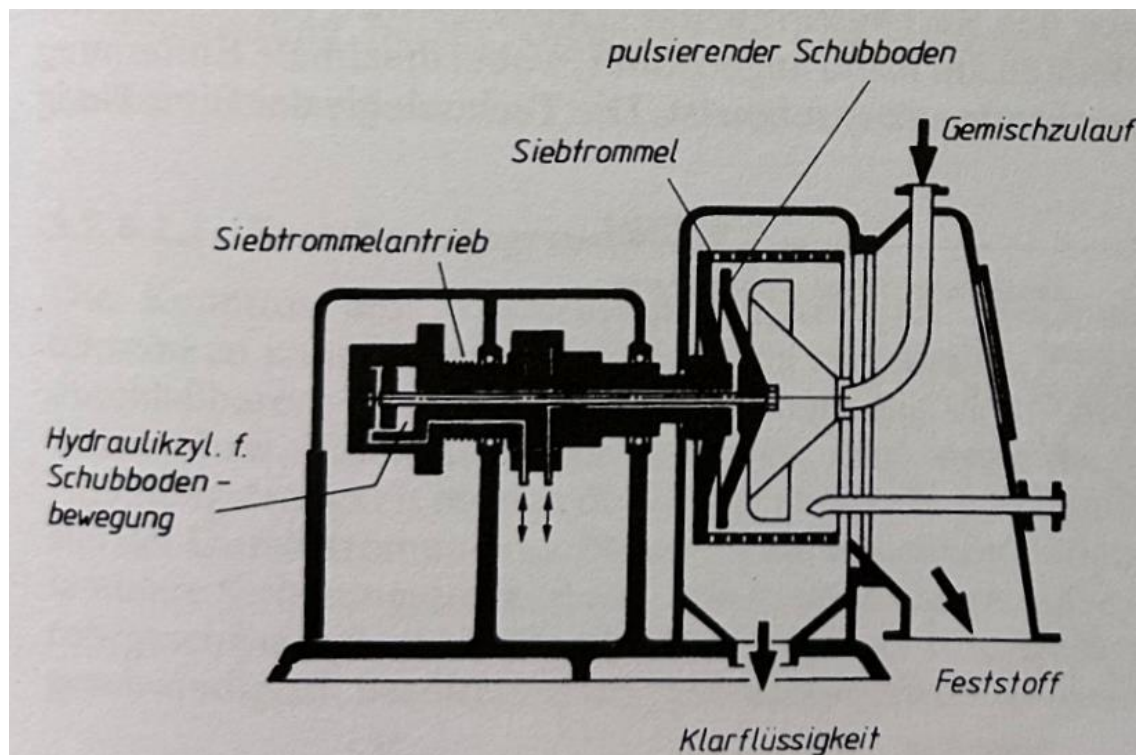


Abbildung 22: Schubzentrifuge (Buhrke et al. 1989)

Die Schubzentrifuge aus Abbildung 22 dreht sich kontinuierlich mit der gleichen Drehzahl. Das Transportgemisch wird in die drehende Trommel eingespeist, wo die Zentrifugalkraft das Gemisch sofort an die Wand der Siebtrommel presst und sich das Transportmedium von dem Fördergut trennt. Sobald sich genug Fördergut in der Trommel befindet, schiebt der Schubboden das Fördergut aus der Trommel, während sich die Siebtrommel weiterhin konstant dreht. Durch diese Bewegung des Schubbodens ist eine pulsierende Arbeitsweise vorhanden. Der Nachteil dieser Zentrifugenvariante ist die Gefahr der Quetschung des Förderguts hinter dem Schubboden, wenn dieser wieder eingezogen wird (Buhrke et al. 1989).

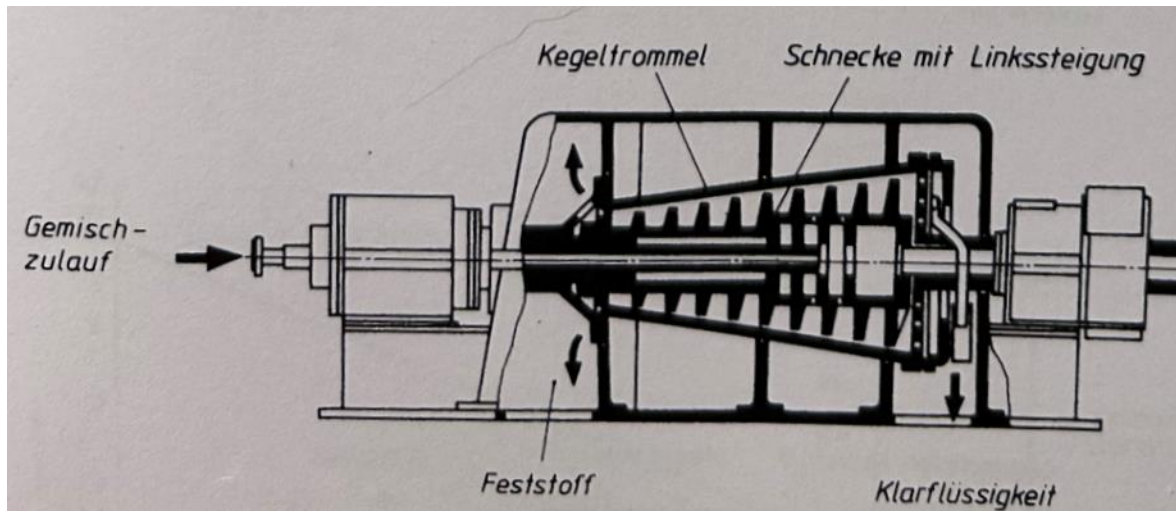


Abbildung 23: Dekantierzentrifuge (Buhrke et al. 1989)

Ein Beispiel für eine kontinuierliche Zentrifuge ist die Dekantierzentrifuge, die in Abbildung 23 ersichtlich ist. Hier ist die Siebtrommel konisch gestaltet und dreht sich kontinuierlich. Innerhalb dieser rotiert eine Schneckentrommel konstant mit der gleichen Drehrichtung, aber mit geringerer Drehgeschwindigkeit und Linkssteigung. Wie bei den Zentrifugen üblich, sammelt sich auch hier der Feststoff an der Trommelwand, während das Transportmedium durch die Öffnungen in der Trommel in das Gehäuse der Zentrifuge geschleudert wird. Durch die Steigung der Schnecke und deren geringeren Drehgeschwindigkeit wird das Fördergut entlang der Trommelwand zu der Öffnung an der Konusspitze gefördert. Hier scheidet das stark entwässerte Fördergut aus der Zentrifuge aus. Bei dieser Zentrifugenvariante kann ein Mahlen des Förderguts zwischen der Siebtrommel und der Schnecke auftreten, dies kann je nach Bedarf ein Vor- oder Nachteil sein. Die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu den Varianten aus den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 hoch, da eine Zentrifuge eine Maschine mit mehreren Komponenten ist. Außerdem herrscht durch die vielen Öffnungen, die zwischen den Komponenten entstehen, ein Verstopfungsrisiko, wenn man Fördergut, wie die weiche POS Flakes betrachtet. Ein Vorteil dieser Variante ist die kontinuierliche Trennung von Fördergut und Transportmedium, sowie der hohe Trocknungsgrad des Förderguts. Die Dekantierzentrifuge kann für Fördergüter mit Korndurchmesser von 3×10^{-3} bis 50 mm eingesetzt werden und Transportkonzentrationen von 2 bis 40% bewältigen (Buhrke et al. 1989).

5.3.4 Fazit Ausspeisung

Durch die Besonderheiten des Fördergutes, insbesondere der hohen Neigung zur Verstopfung jeglicher Gerätschaften, ist es schwer, eine einzige Ausspeisungsvariante für einen hydraulischen Förderer zu bestimmen. Da das Fördergut zusätzlich sehr inhomogen in den Förderer gelangt, ist es schwer einen Trennkorndurchmesser festzulegen, und die Ausspeisung darauf abzustimmen. Für diese Arbeit ist eine mehrstufige Ausspeisung notwendig. Die Primäre Ausspeisung wird über eine Dekantierzentrifuge durchgeführt, da diese einen kontinuierlichen Ablauf erlaubt, dadurch einen hohen Durchsatz besitzt, und einen großen Trennkorndurchmesser Einsatzbereich hat. Da sich der Hydrozyklon für sehr kleine Korndurchmesser eignet, eine kostengünstige Bauweise besitzt, und ein geringes Verstopfungsrisiko aufweist, wäre dieser als Sekundärausspeisung für den hydraulischen Förderer dieser Arbeit von Interesse.

6 Ökologische und Ökonomische Betrachtung

Bei der Planung von Neuinvestitionen, wie beispielsweise hydraulischen Förderern, muss die Ökonomie der Anlage untersucht werden, um sicherzustellen, dass diese auch finanziell rentabel ist. Weiters fordern Regierungen, die Zivilbevölkerung, sowie Kunden eine ökologische Untersuchung, um die Auswirkungen auf die Umwelt und näherer Umgebung der Anlage zu minimieren. Die Ökologie und die Ökonomie einer Anlage sind eng miteinander verbunden. So ist es beispielsweise möglich, durch kleine Steuerungsänderungen den Stromverbrauch im Deutschen Schienenverkehr zu reduzieren, was bedeutet dass weniger Strom produziert werden muss, was die Umwelt weniger belastet. Gleichzeitig bedeutet ein geringerer Stromverbrauch auch das Sinken der Energiekosten für den Schienenverkehr. In diesem Kapitel wird die Ökologie sowie die Ökonomie eines hydraulischen Förderers für den Transport von weichen POS Flakes betrachtet (Buhrke et al. 1989; Thomas Röll 2020).

6.1 Ökonomie

Bei der Betrachtung der Ökonomie des hydraulischen Förderers wird die Wirtschaftlichkeit des Prozesses untersucht. Der Transport mittels hydraulischen Förderers ist wirtschaftlich sehr rentabel bei Förderdistanzen von über 100 km und großen Transportmassen von über 10 t/h. Die Transportkosten für einen hydraulischen Förderer bleiben nahezu konstant über die Förderdistanz, unabhängig des zu fördernden Massenstroms. Abbildung 24 zeigt die Transportkosten unterschiedlicher Transportvarianten für den Transport von feingemahlenen Fördergut über eine Transportstrecke von über 100 km. Hier ist deutlich zu erkennen, dass je höher der Massenstrom ist, desto wirtschaftlicher ist der hydraulische Transport (Buhrke et al. 1989).

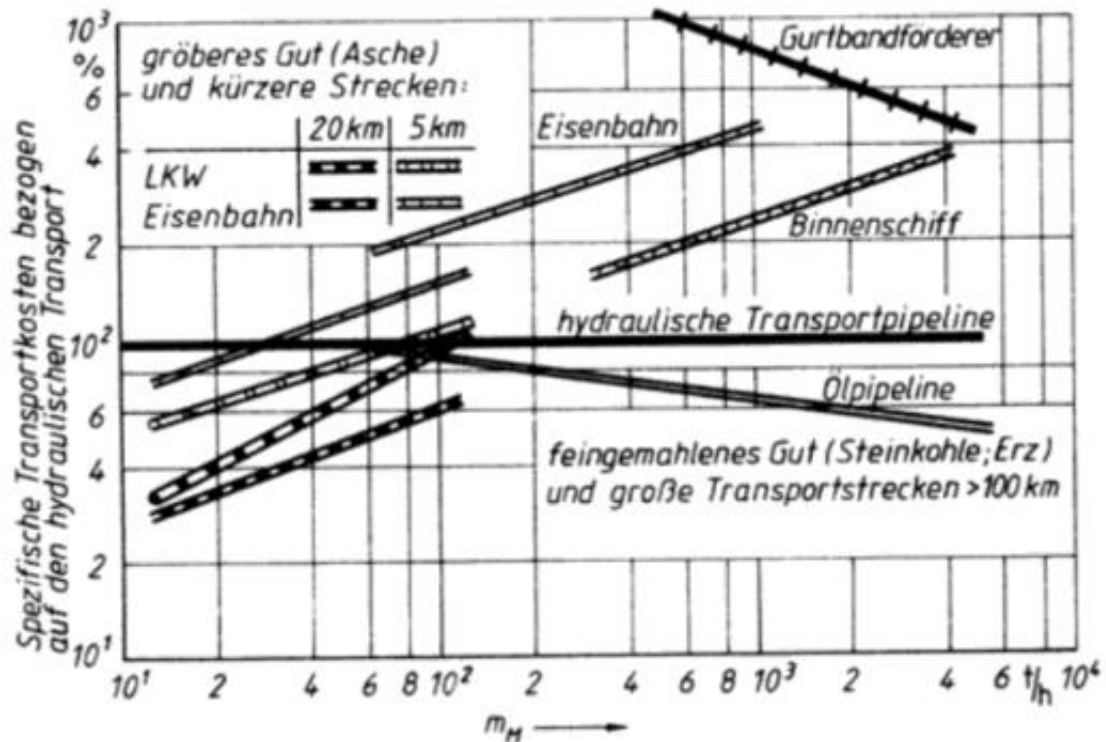


Abbildung 24: Transportkostenvergleich (Buhrke et al. 1989)

Es muss beachtet werden, dass die geringen Kosten für große Massenströme und lange Förderstrecken nur erreicht werden können, wenn es sich um feinkörniges Fördergut handelt. Wenn das Fördergut schwer ist, steigt die Sinkgeschwindigkeit der einzelnen Fördergüttekörner und die Fördergeschwindigkeit muss erhöht werden. Außerdem führt grobkörniges und abrasives Fördergut zu deutlich mehr Verschleiß, was entweder die Wartungs- und Reparaturkosten oder die Investitionskosten deutlich erhöht. Falls eine Aufbereitung des Förderguts notwendig ist, muss diese auch in die Wirtschaftsanalyse miteinbezogen werden, was zu höheren Kosten führt. Bei kleineren Förderleistungen und kürzeren Förderdistanzen müssen die Kosten für einen hydraulischen Transport genau untersucht werden und anderen Varianten gegenübergestellt werden (Buhrke et al. 1989).

Die Förderung der weichen POS Flakes, die in dieser Arbeit betrachtet wird, muss zwar einen großen Massenstrom bewältigen, jedoch ist die Förderdistanz von 6,3 km für einen hydraulischen Förderer kurz. Aus diesem Grund sollten die Kosten der Anlage etwas genauer untersucht werden. Die größten Kosten der hydraulischen Transportanlage entstehen durch die Investitionskosten, die Wasserkosten, sowie die Energiekosten.

Investitionskosten: Die Investitionskosten, die für diese Arbeit betrachtet werden, sind die Kosten der Rohre, die für den Transport des Gemisches gebraucht werden, die Anschaffungskosten der Einspeisung, die Kosten einer Kreiselpumpe, sowie die Anschaffungskosten der Ausspeisung. Wie in Kapitel 4.5.4 erwähnt, wird für den hydraulischen Förderer die Rohrdimension 193,7x8 laut EN 10217 verwendet, was eine Masse von 36,6 kg/m aufweist. Da die gleichen Rohre für Hin- und Rückförderung verwendet werden, beträgt die benötigte Gesamtlänge 12,6 km. Der Kilopreis von Stahl ist aktuell, aufgrund der derzeit vorherrschenden globalen politischen und wirtschaftlichen Probleme, sehr stark variierenden. Zum Zeitpunkt der Recherche für diese Arbeit lag der Preis für Rohre bei ca. 3,33 €/kg (Franz Huisgen GmbH & Co. KG 2023). Die Kosten für die Rohrbögen werden vernachlässigt. Basierend auf diese Preisannahme betragen die Investitionskosten für die Rohre 1,5 Millionen Euro wie in Gleichung 43 berechnet wird (DIN EN 10217).

$$12600 \text{ m} \times 36,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 3,33 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 1.535.662\text{€}$$

Gleichung 43: Investitionskosten Rohre

Die Investitionskosten der Ausspeisung sind im Vergleich zu den Kosten für die Rohre gering. Die Kosten für Dekantierzentrifugen, die für diesen Fördervorgang geeignet sind, liegen aktuell am Markt zwischen 30.000€ und 70.000€. Die Kosten für einen Hydrozyklon sind, aufgrund der simplen Bauweise, noch geringer und liegen zwischen 2.000€ und 10.000€. Die Investitionskosten der Ausspeisung sollten somit maximal 90.000€ betragen.

Wie bereits in Kapitel 4.5.4 angesprochen sind Pumpen, die die geforderte Leistung bringen, in der Industrie ausreichend vorhanden. Die Preise dieser Pumpen bewegen sich, je nach Ausführung, zwischen 12.000€ und 20.000€. Für die Einspeisung der POS Flakes mittels Cyclo-Feeder ist kein exakter Preis bekannt, da dieser ein Patent der Firma Zeppelin ist. Da die Aufbauweise jedoch ähnlich der eines Hydrozyklons ist, wird angenommen, dass die Investitionskosten für die Einspeisung etwas höher sind als die des Hydrozyklons und bei ungefähr 20.000€ liegen.

Die einmaligen Investitionskosten der Gesamtanlage liegen somit bei 1,66 Millionen Euro. Die Steuerung, der Aufbau, diverse Einzelteile, sowie die Kosten für Genehmigungen wurden in diese Rechnung nicht inkludiert.

Wasserkosten: Um die Wasserkosten zu bestimmen, muss das Gesamtwasservolumen für den Transportvorgang berechnet werden und anschließend mit dem aktuellen österreichischen Wasserpreis von 2,02 €/m³ multipliziert werden. Für die Berechnung des Volumens wird angenommen, dass der komplette hydraulische Förderer zu 100% mit Wasser gefüllt ist und kein Fördergut oder Leerstellen in der Anlage vorhanden sind. Da der hydraulische Förderer ein geschlossenes System ist, sollte kein Wasserschwind vorherrschen, da aber ein perfektes System unrealistisch ist, wird ein Sicherheitsspeicher in die Rechnung mit einbezogen (Stadt Wien 2022).

$$\pi \frac{d_i^2}{4} \times L_{Gesamt} = \pi \frac{0,1777^2}{4} \times 12600 = 312,5 \text{ m}^3$$

Gleichung 44: Gesamtvolumen Wasser

Aus Gleichung 44 ist ersichtlich, dass das Gesamtvolumen des Transportmediums Wasser 312,5 m³ beträgt. Um den angesprochenen Schwund durch Leckage zu kompensieren, wird eine Reserve mit einberechnet und ein Gesamtwasservolumen von 500 m³ angenommen. Daraus resultieren für den hydraulischen Förderer Wasserkosten pro Anlagenfüllung von 1010€. Der Wasserstand sollte während des Betriebes beobachtet und bei Bedarf nachgefüllt werden.

Energiekosten: Die Energiekosten des hydraulischen Förderers entstehen durch den Strom, der für den Betrieb des Förderers benötigt wird. Der Energiekonsum wird auf Jahresbasis berechnet und es wird angenommen, dass der hydraulische Förderer 24 Stunden 7 Tage die Woche betrieben wird. Die Stromverbraucher, die für die Energiekostenberechnung betrachtet werden, sind die Pumpe für das Transportmedium und die Dekantierzentrifuge. Zusätzlich wird noch ein elektrischer Verbrauch angenommen, der diverse Anbauten simulieren soll, wie beispielsweise die Steuerung der Anlage. Der Hydrozyklon sowie der Cyclo-Feeder benötigen keine separaten Antriebe und verbrauchen somit auch keinen Strom. Nachdem der gesamte Jahresstromverbrauch ermittelt wurde, muss dieser mit den aktuellen Kosten für Strom multipliziert werden. Dieser liegt in Österreich aktuell bei 0,7288 €/kWh (E-Control 2022).

Die Pumpe, die für den hydraulischen Förderer für diese Arbeit benötigt wird, muss mindestens 27.4 kW leisten. Um diverse Verluste und eine Sicherheit mit einzubeziehen, wird eine Pumpe mit einem Verbrauch von 40 kW angenommen. Am Markt erhältliche Dekantierzentrifugen, die den nötigen Durchsatz für diesen hydraulischen Förderer bieten, benötigen eine Leistung von 30 bis 45 kW. Die zusätzliche Leistung, die für diverse Anbauten benötigt wird, wird mit 10% der Gesamtleistung angenommen. Die benötigten Kilowattstunden pro Jahr der kompletten Anlage werden somit wie folgt berechnet:

$$40 [kW] + 45 [kW] = 85 [kW] \times 1,1 = 93,5 [kW] \times 24 [h] \times 365 [t] = 819060 kWh$$

Gleichung 45: Jahresgesamtleistung der Förderanlage

Wenn nun der in Gleichung 45 errechnete Energiebedarf von 819060 kWh mit dem Preis von 0,7288 €/kWh multipliziert wird, ergeben sich jährliche Energiekosten für den hydraulischen Förderer von 596.931€.

6.2 Ökologie

Die Ökologie bzw. die Umweltverträglichkeit einer Anlage ist in der modernen Industrie ein sehr großer Einflussfaktor. Regierungen, Zivilbevölkerungen und Kunden haben große Anforderungen an Neubauten, damit der Lebensstandard in der Nähe der Anlage nicht negativ beeinflusst und die Umwelt nicht unnötig belastet wird. Aus diesem Grund muss ein Projekt vor dem Start ökologisch betrachtet werden, was für den hydraulischen Förderer der POS Flakes in diesem Kapitel durchgeführt wird. Einige Vorteile des hydraulischen Förderers die in Kapitel 2.4 erwähnt wurden, bringen auch ökologische Vorzüge mit sich. Durch die einfache Förderweggestaltung kann der hydraulische Förderer geschützten oder sensiblen Naturbereichen ausweichen. Somit kann der Lebensraum von Menschen oder Wildtieren, die in diesen Gebieten leben, erhalten werden. Die Umwelt wird von einem hydraulischen Förderer auch nicht durch Lärm belästigt, da der Förderer im Förderbetrieb lärmarm ist. Außerdem besteht die Möglichkeit einen hydraulischen Förderer zu vergraben, womit dieser komplett aus dem Erscheinungsbild verschwindet. Eine Vergrabung würde aber auch deutliche ökonomische Folgen mit sich ziehen. Hier müsste für jede Anlage eine genaue Untersuchung veranlasst werden. Mit Hilfe dieser Eigenschaften ist deutlich zu erkennen, dass durch eine überlegte Platzierung eines hydraulischen Förderers eine gute Symbiose zwischen der Umwelt und der Industrieanlage entstehen kann (Griemert und Römisch 2018).

Ein weiterer Faktor, der bei einer ökologischen Untersuchung des hydraulischen Förderers für POS Flakes betrachtet werden muss, ist das Wasser, das als Transportmedium dient. Wie in Kapitel 6.1 berechnet wurde, benötigt der hydraulische Förderer 500 m³ Wasser und selbst diese Menge muss stets kontrolliert und bei Bedarf nachgefüllt werden. Der Standort Österreich, wo dieser Förderer aufgestellt werden soll, ist ein wasserreiches Land, das nur drei Prozent des verfügbaren Wassers tatsächlich nutzt. Zwei Drittel davon werden von der Industrie benötigt, dennoch sollte man mit Wasser, aus ökologischer Sicht, sorgfältig umgehen. Das Wasser für die Anlage kann von einer Quelle, einem Gewässer oder aus der Trinkwasserversorgung genommen werden, wobei bei den ersten zwei Optionen darauf zu achten ist, dass bei der Anzapfung die Umwelt nicht beschädigt wird. Neben der benötigten Menge an Wasser, muss auch der Mikroplastikanteil im Wasser beobachtet werden, besonders wenn das Transportmedium abgelassen wird. Solange der hydraulische Fördervorgang geschlossen ist, ist das Thema Mikroplastik nicht relevant, da das Wasser nicht in die Umwelt gelangt. Wenn das Transportmedium für Wartungszwecke abgelassen werden muss und entschieden wird, dass das Wasser zu entfernen ist, ist es äußerst wichtig es von Mikroplastiken zu befreien, bevor es in die Umwelt abgegeben wird. Mikroplastik ist bereits sehr weit verbreitet und wird in Pflanzen, Tieren und Menschen nachgewiesen, mit teils schweren gesundheitlichen Folgen. Aus diesen Gründen ist es aus ökologischer Sicht äußerst wichtig mit dem Wasser sparsam umzugehen, und es von Mikroplastik zu befreien bevor es an die Umwelt abgegeben wird (ÖVGW Wasser 2023; Wasser 3.0 gGmbH 2022).

Außerdem sollte der Energiekonsum des hydraulischen Förderers auch aus ökologischer Sicht betrachtet werden. Hierbei liegt der Fokus nicht auf den Stromkosten der Anlage, sondern viel mehr darauf, wie der Strom bzw. die Energie erzeugt wird. Aus ökologischer Sicht ist Strom, der mit erneuerbarer Energie produziert wird, deutlich besser, als der, der mit fossilen Brennstoffen erzeugt wird, da diese klimaschädlich sind. Der Anlagenbetreiber kann hier wenig beeinflussen, da er abhängig vom Stromlieferanten ist. Es ist möglich beim Stromanbieter anzusuchen, dass er nur Strom aus erneuerbarer Energie liefert, wobei es hier schwer nachweisbar ist, ob das tatsächlich passiert. In Österreich wird Dreiviertel des Stroms durch erneuerbare Energien erzeugt, was bedeutet, dass der Standort Österreich aus ökologischer Sicht gut ist. Alternativ dazu kann der Betreiber des hydraulischen Förderers seine eigene Energie mittels Fotovoltaik oder Windrädern erzeugen, was aber erhebliche ökonomische Auswirkungen auf den Anlagenbau bewirken würde. Was der Anlagenbetreiber beeinflussen kann, ist der Energieverbrauch der Anlage. So können beispielsweise moderne, effiziente Antriebe für Pumpen und Zentrifuge eingebaut werden, die die gleiche Leistung bei weniger Energiebedarf bringen. Ebenso kann der Anlagenbetreiber auf eine aktive Heizung des hydraulischen Förderers verzichten und den Frostschutz durch Isolierung oder Zusätze sicherstellen. Eine Erhitzung auf 60°C, um die Legionellen zu bekämpfen, ist nicht notwendig, da die POS Flakes sowie das Transportmedium nicht für den Konsum vorgesehen ist. Eine Erhitzung würde die ökologische, sowie die ökonomische, Bilanz des hydraulischen Förderers deutlich verschlechtern. Wenn der Energiebedarf der Anlage so gering wie möglich gehalten wird und die elektrische Energie zusätzlich aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, kann der hydraulische Förderer eine positive ökologische Bilanz erreichen (Heinze GmbH NL Berlin BauNetz 2022b; Österreichs E-Wirtschaft 2023).

7 Zusammenfassung

Aufgabe dieser Masterarbeit ist, das Potential der hydraulischen Förderung von Kunststoffabfällen zu untersuchen. Es wurden die Vor- und Nachteile dieser Förderung betrachtet, sowie die Leistung eines hydraulischen Förderers für weiche POS Flakes über 6,3 km berechnet. Es wurde festgelegt, dass ein geschlossener hydraulischer Förderer mit fünf Rohrbögen und einem Höhenunterschied von fünf Metern zwischen Start- und Zielpunkt berechnet wird. Als Fördergut wurde Kunststoffabfall in Form von weichen POS Flakes festgelegt, da diese die geringsten Aufbereitungskosten aufweisen. Nach einer Untersuchung des Fördergutes, so wie der Ermittlung der Vorteile, wie die durch die geringe Dichte entstehende kleine Sinkgeschwindigkeit, und den Nachteilen, wie der Neigung zu Verstopfung der Anlage, konnte die Berechnung des Fördervorgangs durchgeführt werden. Die Berechnung der benötigten Förderleistung wurde für diverse Transportkonzentrationen durchgeführt, bis sich eine optimal Transportkonzentration von 36% ergab. Die geringste Gesamtleistung des Fördervorgangs wird in Gleichung 42 dargestellt und beträgt 27,4 kW. Die errechnete Gesamtleistung des Fördervorgangs inkludiert die Förderung des Gemisches von Aufgabepunkt bis zum Abgabepunkt, die Bögen und den Höhenunterschied, sowie die Rückförderung des Transportmediums.

Anschließend wurden die Möglichkeiten zur Ein- und Ausspeisung des Förderguts in und aus dem Förderstrom untersucht. Die Vor- und Nachteile der Einspeisung mittels Eintragschleusen, Kammerschleusen und hydraulischer Einspeisung wurden untersucht. Basierend auf den Resultaten der Untersuchung wurde festgestellt, dass sich eine hydraulische Einspeisung mittels Cyclo-Feeder am besten für weiche POS Flakes eignet, da dieser das Verstopfungsrisiko minimiert und keinen zusätzlichen Antrieb benötigt. Für die Ausspeisung wurden Varianten mit Sieben, Hydrozyklone und diverse Zentrifugen untersucht. Aufgrund des hohen Massenstrom von POS Flakes und ihren Eigenschaften wurde eine mehrstufige Ausspeisung festgelegt. Als erste Ausspeisungsstufe wurde eine Dekantierzentrifuge ausgesucht, aufgrund der kontinuierlichen Arbeitsweise und der daraus resultierenden hohen Durchflussrate. Die zweite Ausspeisungsstufe wurde mittels Hydrozyklon festgelegt, da dieser sehr kleine Partikel ausfiltern kann und keinen zusätzlichen Antrieb benötigt.

Nach der Berechnung des hydraulischen Förderers und der Festlegung der Ein- und Ausspeisung, wurde die Anlage aus ökonomischer und ökologischer Sicht betrachtet. Für die ökonomische Betrachtung wurden die Investitionskosten, die Wasserkosten, sowie die Energiekosten ermittelt. Für die einmaligen Investitionskosten wurden die Kosten der Rohre, der Pumpe, der Einspeisung und der Ausspeisung evaluiert. Bei den Wasserkosten wurde ein Reservespeicher mit einbezogen. Die jährlichen Energiekosten wurden für die Gesamtanlage berechnet, diese inkludieren die Kosten für die Energie, die die Pumpe benötigt sowie die Energie, die die Zentrifuge für die Ausspeisung benötigt. Während der ökologischen Untersuchung wurde die Umweltverträglichkeit der gesamten Fördereranlage betrachtet. Durch die Eigenschaften des hydraulischen Förderers, wie beispielsweise der geringen Lärmemission, hat die Anlage wenig Auswirkung auf die näher Umgebung. Der ökologische Nachteil der hydraulischen Förderanlage ist der hohe Wasserverbrauch und der hohe Stromverbrauch. Diese Nachteile können jedoch durch entsprechende Planung und Auslegung entschärft werden, wie beispielsweise, wenn das Wasser nach Wartungsarbeiten wieder verwendet wird. Der Stromverbrauch der Anlage sollte mittels Investitionen in moderne Technik so gering wie möglich gehalten werden und der Anlagenbetreiber sollte sich für Strom aus erneuerbarer Energie einsetzen, um die Umweltverträglichkeit weiter zu verbessern.

Die Förderung der weichen POS Flakes mittels eines hydraulischen Förderers ist möglich und benötigt im Vergleich zu anderen Fördergütern wenig Energie. Die Ein- und Ausspeisung ist ebenfalls mit den am Markt erhältlichen Anlagen realisierbar. Der Energiebedarf der Kompletanlage ist hoch, was auch ökonomische Auswirkungen mit sich bringt. Durch die Untersuchung in dieser Masterarbeit wurde eruiert, dass ein hydraulischer Transport für Kunststoffabfälle möglich ist.

8 Literaturverzeichnis

Arnold, Bozena (2013): Polyolefine. Hg. v. Material Magazin. Online verfügbar unter <https://www.materialmagazin.com/index.php/kunststoffe/polyolefine-pe-pp-und-pmp>, zuletzt aktualisiert am 01.11.2022, zuletzt geprüft am 01.11.2022.

Berger, Katrin (2014): Stetigförderer. Eine terminologische Untersuchung im Deutschen und Französischen. Masterarbeit. Universität Leipzig, Leipzig. Angewandte Linguistik und Translatologie. Online verfügbar unter <https://ul.qucosa.de/api/qucosa%3A12098/attachment/ATT-0/>, zuletzt geprüft am 02.04.2022.

Bernhardt, Antonia; Karigl, Brigitte; Lampert, Christoph; Neubauer, Milla; Thaler, Peter (2017): Kunststoffabfälle in Österreich. Aufkommen & Behandlung : Materialien zum Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2017. Unter Mitarbeit von Barbara Stoifl. Wien: Umweltbundesamt (Perspektiven für Umwelt & Gesellschaft, [Neue Folge], 0650). Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/AC15055084>.

Buhrke, Herbert; Kecke, Hans Joachim; Richter, Hansjürgen (1989): Strömungsförderer. Hydraulischer und pneumatischer Transport in Rohrleitungen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg (Grundlagen und Anwendungen der Ingenieurwissenschaften).

Cerana, Lars (2022): BGR - Erdbebenüberwachung. Seismologie. Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe. Hannover. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/Seismologie/Seismologie/seismologie_node.html, zuletzt aktualisiert am 24.10.2022, zuletzt geprüft am 24.10.2022.

DWDS (2022): DWDS – Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache. Förderstrecke. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.dwds.de/wb/F%C3%B6rderstrecke>, zuletzt aktualisiert am 20.10.2022, zuletzt geprüft am 22.10.2022.

E-Control (Hg.) (2022): Was kostet eine Kilowattstunde Strom? - E-Control. E-Control. Online verfügbar unter <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2023, zuletzt geprüft am 09.01.2023.

Franz Huisgen GmbH & Co. KG (Hg.) (2023): Siederohr 193,7 x 8,0. geschweisste Siederohre S235JRH EN 10220. Stahlshop.de. Online verfügbar unter <https://stahlshop.de/siederohr-193,7x8,0>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2023, zuletzt geprüft am 06.02.2023.

Griemert, Rudolf; Römisch, Peter (2018): Fördertechnik. Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. 12., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Grote, Karl-Heinrich; Feldhusen, Jörg (Hg.) (2014): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, mit ...Tabellen. 24., aktualisierte u. erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg.

Heinze GmbH NL Berlin BauNetz (Hg.) (2022a): Wind: Windlasten, Winddruck, Windsog | Flachdach | Windlast | Baunetz_Wissen. Unter Mitarbeit von Sven Hohmann und Stephan Westermann. BauNetz. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/windlast/wind-windlasten-winddruck-windsog-1284381>, zuletzt aktualisiert am 15.10.2022, zuletzt geprüft am 23.10.2022.

Heinze GmbH NL Berlin BauNetz (Hg.) (2022b): Legionellen in Wasserleitungen von Wohnhäusern. MASSNAHMEN UND TECHNOLOGIEN ZUR VERMEIDUNG UND BEKÄMPFUNG. BauNetz. Online verfügbar unter <https://www.baunetzwissen.de/bad-und-sanitaer/fachwissen/trinkwasser/legionellen-in-wasserleitungen-von-wohnhaeusern-3398713>, zuletzt aktualisiert am 04.11.2022, zuletzt geprüft am 05.11.2022.

Krause, Friedrich; Katterfeld, Andre (2014): U6.6 Strömungsförderer. In: Karl-Heinrich Grote und Jörg Feldhusen (Hg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, mit ...Tabellen. 24., aktualisierte u. erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg, U86-U88.

Kunststoffe.de (Hg.) (2022): Polystyrol (PS). Grundwissen | Basics Kunststoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polystyrol-ps-264382>, zuletzt aktualisiert am 01.11.2022, zuletzt geprüft am 01.11.2022.

Law Insider Inc. (Hg.) (2022): Site Conditions Definition | Law Insider. Online verfügbar unter <https://www.lawinsider.com/dictionary/site-conditions>, zuletzt aktualisiert am 23.10.2022, zuletzt geprüft am 23.10.2022.

Lenz, D. (Hg.) (2019): Welchen Sinn und Zweck haben Normen? Forschung und Wissen. Online verfügbar unter <https://www.forschung-und-wissen.de/magazin/welchen-sinn-und-zweck-haben-normen-13372829>, zuletzt aktualisiert am 12.04.2019, zuletzt geprüft am 04.12.2022.

Lingenhöhl, Daniel; Müller, Andreas (2014): Hydrozyklon. Hg. v. Markus Bossle. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Heidelberg. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/hydrozyklon/4309>, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 01.01.2023.

Lumitos AG (Hg.) (2022): Eigenschaften des Wassers. Chemie.de. Online verfügbar unter https://www.chemie.de/lexikon/Eigenschaften_des_Wassers.html, zuletzt aktualisiert am 05.11.2022, zuletzt geprüft am 05.11.2022.

Meynerts, Peter (2021): Bedeutung der Fördertechnik | Lehre | Professur Förder- und Materialflusstechnik | Institut | Fakultät | TU Chemnitz. Bedeutung der Fördertechnik. Hg. v. Technische Universität Chemnitz. Chemnitz. Online verfügbar unter <https://www.tu-chemnitz.de/mb/FoerdTech/bedeutung.php>, zuletzt aktualisiert am 15.03.2022, zuletzt geprüft am 15.03.2022.

Mori, Gregor (2016): Korrosionskunde. Montanuniversität Leoben. Lehrstuhl für Allgemeine und Analytische Chemie. Leoben, 2016, zuletzt geprüft am 15.02.2022.

Nadja Podbregar (2012): Frostschutz & Co. Von Kristallisationskernen, Supercooling und Frostschutzmitteln. Hg. v. MMCD NEW MEDIA GmbH. scinexx. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://www.scinexx.de/dossierartikel/frostschutz-co/>, zuletzt aktualisiert am 06.11.2018, zuletzt geprüft am 04.11.2022.

Österreichs E-Wirtschaft (2023): Erneuerbares Österreich: so funktioniert unser Stromsystem. Wien. Online verfügbar unter <https://oesterreichsenergie.at/unser-strom/erneuerbares-oesterreich>, zuletzt aktualisiert am 13.01.2023, zuletzt geprüft am 13.01.2023.

ÖVGW Wasser (Hg.) (2018): Wasser. das Lebensmittel Nr. 1. Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach. Online verfügbar unter <https://www.ovgw.at/wasser/ressource/>, zuletzt aktualisiert am 04.06.2020, zuletzt geprüft am 05.11.2022.

ÖVGW Wasser (Hg.) (2023): Wasserressource / Österreich. ÖVGW. Online verfügbar unter <http://www.wasserwerk.at/home/alles-ueber-wasser/wasserressource/16>, zuletzt aktualisiert am 12.01.2023, zuletzt geprüft am 12.01.2023.

Prenner, Michael (2019): Stetige Fördersysteme. Montanuniversität Leoben. Lehrstuhl für Bergbaukunde. Leoben, 21.11.2019, zuletzt geprüft am 21.11.2019.

DIN EN 10217, 01.08.2019: Rohre aus unlegierten Stahl mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur. Online verfügbar unter https://www.rff.de/_uploads/files/produkte/Datenblaetter/rff_rohre_DIN-EN-10217-1.pdf, zuletzt geprüft am 11.11.2022.

ROS RollenTechnik (2022): Fördertechnik für die Recycling- und Abfallindustrie. ROS RollenTechnik GmbH. Gescher. Online verfügbar unter <https://www.ros.eu/branchen/recycling-und-abfallindustrie>, zuletzt aktualisiert am 18.03.2022, zuletzt geprüft am 18.03.2022.

Saloodo! (2020): Was ist Fördertechnik? Definitionen & Erklärungen. Hg. v. Saloodo! Köln. Online verfügbar unter <https://www.saloodo.com/de/logistik-lexikon/foerdertechnik/>, zuletzt aktualisiert am 17.04.2020, zuletzt geprüft am 11.11.2020.

Schneider, Hans (2020): Hydraulische Förderung als schonende Alternative. Über 80% Energieersparnis beim Transport. Hg. v. Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH. Leinfelden-Echterdingen. Online verfügbar unter <https://prozesstechnik.industrie.de/chemie/verfahren-chemie/hydraulische-foerderung-als-schonende-alternative/#slider-intro-5>, zuletzt aktualisiert am 03.01.2020, zuletzt geprüft am 30.12.2022.

Stadt Wien (2019): Wetter - Offizielle Statistik der Stadt Wien. Wetter - Statistiken. Wien. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/statistik/wetter/>, zuletzt aktualisiert am 31.10.2022, zuletzt geprüft am 31.10.2022.

Stadt Wien (2022): Wasserbezugs- und Wasserzählergebühr - Meldung. Kosten und Zahlung. Online verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/amtshelfer/umwelt/wasser/wasseranschluss/wassergebuehr.html>, zuletzt aktualisiert am 08.01.2023, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Stiftung für Technologie, Innovation und Forschung Thüringen (Hg.) (2019): Kältemischung – Eine Mischung aus Wasser und Eis wird kälter durch Salz - Jungforscher Thüringen. Jungforscher Thüringen. Online verfügbar unter <https://jungforscher-thueringen.de/kaeltemischung-eine-mischung-aus-wasser-und-eis-wird-kaelter-durch-salz/>, zuletzt aktualisiert am 19.02.2019, zuletzt geprüft am 04.11.2022.

Thomas Röll (2020): In nur drei Sekunden Hunderttausende Euro sparen. In: *Fraunhofer-Magazin 1/2020* 2020, S. 30–31. Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/wie-nachhaltigkeit-heute-oekologie-und-oekonomie-verbindet.html>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Universal-Lexikon (2012): hydraulische Förderung. Academic dictionaries and encyclopedias. Online verfügbar unter https://universal_lexikon.de-academic.com/251891/hydraulische_F%C3%B6rderung, zuletzt aktualisiert am 30.04.2015, zuletzt geprüft am 31.03.2022.

Wasser 3.0 gGmbH (Hg.) (2022): Wasser 3.0. Online verfügbar unter <https://wasserdreinull.de/>, zuletzt aktualisiert am 04.11.2022, zuletzt geprüft am 04.11.2022.

Wossog, Günter (Hg.) (2003): Handbuch Rohrleitungsbau. Band II: Berechnung. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verl.

Wossog, Günter (Hg.) (2014): Handbuch Rohrleitungsbau. 3. Aufl. Essen: Vulkan-Verl.

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Hg.) (2022): Erdbeben in Österreich. Online verfügbar unter <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/erdbeben/erdbeben-in-oesterreich>, zuletzt aktualisiert am 01.11.2022, zuletzt geprüft am 01.11.2022.

Zeppelin Silos & Systems GmbH (2007): Hydraulische Fördersysteme von Zeppelin. Innovative Technologien - schonender Schüttguttransport. Friedrichshafen. Online verfügbar unter <https://www.zeppelin-systems.com/media/zeppelin-systems-7-hydraulische-foerdersysteme.pdf>.

9 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Offener Kreislauf (Prenner 2019)..... | 6 |
| Abbildung 2: Geschlossener Kreislauf (Prenner 2019)..... | 7 |
| Abbildung 3: Weiche POS Flakes | 14 |
| Abbildung 4: Harte POS Flakes..... | 15 |
| Abbildung 5: Feines Agglomerat | 16 |
| Abbildung 6: Grobes Agglomerat | 17 |
| Abbildung 7: Agglomerat mit hohem Aufschmelzungsgrad | 18 |
| Abbildung 8: Erdbebengefährdung Zoneneinteilung Wien (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 2022) | 21 |
| Abbildung 9: Feststoffverteilung und -bewegung (Buhrke et al. 1989) | 33 |
| Abbildung 10: Rohrreibungszahl $\lambda_{R,G}$ (Wossog 2003) | 40 |
| Abbildung 11: Reynold-Zahl des Feststoffes (Wossog 2003)..... | 41 |
| Abbildung 12: Korrekturfaktor K_T für Rohrtoleranz (Wossog 2003) | 42 |
| Abbildung 13: Betriebliche Rohrrauheit (Wossog 2003)..... | 51 |
| Abbildung 14: Tabelle der Einzelwiderstände (Wossog 2003) | 53 |
| Abbildung 15: Eintragschleusen (Buhrke et al. 1989)..... | 62 |
| Abbildung 16: Kammerschleusen (Buhrke et al. 1989) | 65 |
| Abbildung 17: Rohrkammerschleuse (Buhrke et al. 1989) | 65 |
| Abbildung 18: Cyclo-Feeder (Zeppelin Silos & Systems GmbH 2007)..... | 66 |
| Abbildung 19: Bogensieb (Buhrke et al. 1989) | 70 |
| Abbildung 20: Hydrozyklon Wirkungsweise (Lingenhöhl und Müller 2014) | 71 |
| Abbildung 21: Schälzentrifuge (Buhrke et al. 1989) | 73 |
| Abbildung 22: Schubzentrifuge (Buhrke et al. 1989) | 74 |
| Abbildung 23: Dekantierzentrifuge (Buhrke et al. 1989)..... | 75 |
| Abbildung 24: Transportkostenvergleich (Buhrke et al. 1989)..... | 78 |

10 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Dichte Hauptbestandteile POS Flakes (Kunststoffe.de 2022; Arnold 2013) | 29 |
| Tabelle 2: Werte zur Berechnung des Innendurchmessers bei $C_T = 0,36$ | 38 |
| Tabelle 3: Resultate diverser Transportkonzentrationen | 44 |

11 Gleichungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Gleichung 1: Dichte der weichen POS Flakes..... | 29 |
| Gleichung 2: Korndurchmesser für volumengleiches Feststoffteil (Wossog 2014) | 30 |
| Gleichung 3: Berechnung des Volumens eines POS Flakes..... | 30 |
| Gleichung 4: Berechnung Korndurchmesser für POS Flakes..... | 30 |
| Gleichung 5: kritische Geschwindigkeit für hydraulischen Transport (Wossog 2014) | 34 |
| Gleichung 6: Korrekturfaktor für den hydraulischen Transport (Wossog 2014).... | 34 |
| Gleichung 7: Berechnung des Feststoff Massenstrom | 35 |
| Gleichung 8: Berechnung Feststoff Volumenstrom (Wossog 2014) | 36 |
| Gleichung 9: Gemisch Geschwindigkeit (Wossog 2014)..... | 37 |
| Gleichung 10: Innendurchmesser (basierend auf der Gleichung der kritischen Geschwindigkeit) (Wossog 2014)..... | 37 |
| Gleichung 11: Volumenstrom des Gemisches (Wossog 2014) | 37 |
| Gleichung 12: Berechnung Innendurchmesser bei $C_T = 0,36$ | 38 |
| Gleichung 13: Berechnung Gemisch Geschwindigkeit..... | 39 |
| Gleichung 14: Reynolds-Zahl des Transportgemisches (Wossog 2014)..... | 39 |
| Gleichung 15: Widerstandsbeiwert einer Feststoffkugel (Wossog 2014) | 41 |
| Gleichung 16: Durchmesser Verhältnis Rohraußendurchmesser und Rohrinnendurchmesser | 42 |
| Gleichung 17: Längenbezogener Druckverlust (Wossog 2014) | 43 |
| Gleichung 18: Transportarbeit pro Meter (Wossog 2014) | 43 |
| Gleichung 19: Transportarbeit für die Förderstrecke | 43 |
| Gleichung 20: Geschwindigkeit des Fördergutes (Wossog 2014) | 45 |
| Gleichung 21: Druckverlust pro Bogen (Wossog 2014)..... | 46 |
| Gleichung 22: Gesamtdruckverlust aller Bögen | 46 |
| Gleichung 23: Druckunterschied durch Geodätische Höhenunterschiede (Wossog 2014) | 46 |
| Gleichung 24: Volumenstrom Transportmedium | 47 |
| Gleichung 25: Massenstrom Transportmedium | 47 |
| Gleichung 26: Massenstrom Gemisch..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Gleichung 27: Gemischdichte..... | 47 |
| Gleichung 28: Berechnung des Druckverlusts durch Höhenunterschied..... | 48 |
| Gleichung 29: Summe Druckverlust Bögen und Höhenunterschied..... | 48 |
| Gleichung 30: Leistung der Bögen und dem Höhenunterschied | 48 |
| Gleichung 31: Druckverlust durch Rohrreibung (Wossog 2014)..... | 49 |
| Gleichung 32: Geschwindigkeit des Hydraulikmediums (Wossog 2014)..... | 50 |
| Gleichung 33: Reynolds-Zahl der Rückförderung (Wossog 2014) | 50 |
| Gleichung 34: Rohrreibungszahl (Wossog 2014)..... | 51 |
| Gleichung 35: Berechnung des Druckverlust durch Rohrreibung (Wossog 2014) | 52 |
| Gleichung 36: Druckverlust Rohrleitung inkl. Rohrbögen (Wossog 2014)..... | 52 |
| Gleichung 37: Summe der Einzelwiderstände (Wossog 2014)..... | 54 |
| Gleichung 38: Berechnung des Druckverlusts durch Rohrreibung inkl. Rohrbögen | 54 |
| Gleichung 39: Druck durch geodätischen Höhenunterschied am Rückweg | 54 |
| Gleichung 40: Berechnung des Gesamtdruckverlust der Rückförderung | 54 |
| Gleichung 41: Leistung für die Rückförderung | 55 |
| Gleichung 42: Gesamtleistung des Fördervorgangs | 56 |
| Gleichung 43: Investitionskosten Rohre | 79 |
| Gleichung 44: Gesamtvolumen Wasser | 80 |
| Gleichung 45: Jahresgesamtleistung der Förderanlage | 81 |

12 Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|---|
| POS Flakes | Polyolefin und Polystyrole Kunststofffraktionen |
| PS | Polystyrol |
| PE | Polyethylen |
| PP | Polypropylen |
| PMP | Polymethylpenten |
| f | Kenngröße für den Feststoffanteil |
| w_{kr} | Kritische Geschwindigkeit m/s |
| w_T | Transportgeschwindigkeit m/s |
| d_F | Korndurchmesser m |
| K_o | Korrekturfaktor hydraulischen Transport |
| d_i | Innendurchmesser der Rohrleitung m |
| g | Erdbeschleunigung m/s^2 |
| ρ_F | Dichte Feststoff bzw. Fördergut kg/m^3 |
| ρ_T | Dichte Transportmedium kg/m^3 |
| $m_{F,F}$ | Feststoff Massenstrom kg/s. |
| $V_{F,F}$ | Feststoff Volumenstrom m^3/s , |
| w_G | Gemisch Geschwindigkeit m/s |
| $V_{F,G}$ | Volumenstrom des Gemisches m^3/s |
| C_T | Transportkonzentration |
| ν_T | Kinematische Viskosität des Hydraulikmediums m^2/s |
| Re_G | Reynolds-Zahl des Transportgemisches |

| | |
|---------------------------|---|
| $\Delta P_{G/L}$ | Druckverlust pro Meter Pa/m |
| L | Förderlänge m |
| $\lambda_{R,G}$ | Rohrreibungsbeiwert |
| C_w | Widerstandsbeiwert |
| Re_F | Reynolds-Zahl des Feststoffs |
| ρ_{TS} | Dichte des Hydraulikmedium erhöht durch einen Feststoffanteil kg/m ³ |
| n | Korrektorexponent für den Kornverteilungseinfluss |
| K_T | Korrektorexponent für Rohrtoleranz |
| D_o | Rohr Außendurchmesser mm |
| Pa | Pascal |
| W | Watt |
| kW | Kilowatt |
| w_F | Geschwindigkeit des Fördergutes m/s |
| ΔP_{Bogen} | Druckverlust pro Bogen Pa |
| Δh | Höhenunterschied zwischen Aufgabe- und Abgabepunkt m |
| ΔP_h | Druckverlust durch Geodätischen Höhenunterschied m |
| $V_{F,T}$ | Volumenstrom Transportmedium m ³ /s |
| $m_{F,T}$ | Massenstrom Transportmedium kg/s |
| $m_{F,G}$ | Massenstrom Gemisch kg/s |
| ΔP_{B+H} | Druckverlust Summe durch Bögen und Höhenunterschied |
| P_{B+H} | Benötigte Leistung durch Bögen und Höhenunterschied P_{B+H} |

| | |
|-----------------|--|
| ΔP_R | Druckverlust durch Rohrreibung bei Rückförderung Pa |
| w_A | Geschwindigkeit des Hydraulikmediums während der Rückförderung m/s |
| λ_R | Rohrreibungsbeiwert während der Rückförderung |
| k_i | betriebliche Rohrrauheit |
| k_i/d_i | Rohrreibungszahl |
| ΔP_{hR} | Druck des geodätischen Höhenunterschiedes bei der Rückförderung Pa |
| ζ_s | Einzelwiderstand |
| ΔP_{RG} | Gesamtdruckverlust der Rückförderung Pa |
| P_R | Leistung für die Rückförderung W |
| P_G | Gesamtleistung des Fördervorgangs W |

