



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

## Diplomarbeit

# Erstellung eines Programms zur Dimensionierung von Bunker und Abzugsband

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig  
E307

Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

Alfred Wondracek  
0325275  
Mahersdorferstraße 24, 2620 Ternitz

Wien, am 07.04.2010

.....

## Danksagung

Zuallererst gilt mein Dank Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Kartnig für die Betreuung meine Diplomarbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Ao.Univ.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Hoffmann für die hilfreichen Gespräche und Tipps für meine Arbeit bedanken. Stellvertretend für die Firma Doubrava Industrieanlagen möchte ich mich bei Herrn Ing. Christoph Pillichshammer bedanken, der mir die Möglichkeit bot, meine Diplomarbeit zu präsentieren.

Bei meinen Kollegen des Jahrganges 03 bedanke ich mich für das gemeinsame Hören, Lernen und Lachen.

Doris danke ich für ihr immerwährendes Dasein in jeder Situation und für ihre Motivation.

Der größte Dank geht aber an diejenigen Menschen, die es mir seit Beginn meiner Schulzeit ermöglicht haben meine Ausbildung zu absolvieren. Meine Eltern. Für ihre aufopfernde Unterstützung auf allen meinen Wegen und den heimatlichen Beistand möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

## **Zusammenfassung**

Schüttgut aus einem Bunker oder Silo auszutragen, kann über verschiedene Einrichtungen passieren. Eine Möglichkeit davon ist mit einem Bunkerabzugsband. Dieses System wird vor allem dort eingesetzt, wo einerseits der Bunker als Speicherstelle für einen stetigen Materialfluss sorgt und andererseits, wo ein leistungsfähiger Umschlag zwischen einem Unstetigförderer und einem Förderband gefordert ist.

Die Dimensionierung des Fördergurtes ist sehr komplex. Um die Belastungen auf den Fördergurt zu berechnen, müssen zuerst die Drücke berechnet werden, die im Bunker herrschen und somit auf den Förderer wirken. Ziel dieser Arbeit war, ein Software Programm zu erstellen, mit welchem eine Dimensionierung von Bunker und Abzugsband möglich ist. Damit ist es auf schnelle und einfache Art und Weise möglich, eine komplette Dimensionierung durchzuführen. Verschiedene Modelle, die sich durch ihre Geometrie oder durch das gespeicherte Schüttgut unterscheiden, können verglichen werden. Das Programm wurde in Visual Basic for Application geschrieben, welches in Microsoft Excel implementiert ist.

## **Abstract**

There are different methods to reclaim bulk material from hoppers and silos. One of these is the use of a conveyor belt. This system is commonly used when the hopper is used as storage in order to guarantee the steady flow of the material, or when powerful handling between non-continuous conveyors and a conveyor belt is required. The calculation of the internal pressures in a hopper and with that, the design of the feeder, is very complex. Aim of this work was to create a software program in order to dimension a hopper or silo and the belt feeder. With this calculation program the dimensioning can be done in a very fast way. Furthermore, it is possible to compare different models varying in geometry or in the stored bulk material very easily. The program was written in Visual Basic for Application which is integrated in Microsoft Excel. The calculation is based on valid standards, on standard literature and on own considerations.

# Inhaltsangabe

1. Einleitung .....	6
2. Theoretische Grundlagen .....	8
2.1. Begriffserklärung .....	8
2.2. Möglichkeiten zum Austrag aus einem Bunker .....	8
2.2.1. Translatorische Systeme .....	9
2.2.2. Rotatorische Systeme .....	10
2.3. Normensituation .....	11
2.3.1. DIN 1055-6, Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter .....	11
2.3.2. DIN 22101, Gurtförderer für Schüttgüter, Grundlagen für die Berechnung und Auslegung .....	12
2.3.3. Weitere Normen .....	12
3. Programmbeschreibung .....	14
3.1. Anwendungs- und Gültigkeitsbereich .....	14
3.1.1. Einschränkungen aufgrund der Verwendung der Norm DIN 1055-6 .....	16
3.1.2. Selbst definierte Einschränkungen .....	17
3.2. Programmablaufdiagramm .....	19
3.3. Eingabedaten .....	21
3.4. Ausgabewerte .....	23
4. Berechnung der Bunkerdrücke .....	25
4.1. Berechnung der Trichtergeometrie .....	25
4.2. Werte für Berechnung .....	27
4.3. Silolasten .....	27
4.4. Lasten im Trichter .....	31
4.5. Vergleich mit der Berechnung nach Schulze .....	33
4.5.1. Vergleich mit dem Berechnungs-Programm .....	34
5. Berechnung des Abzugbandes .....	35
5.1. Theoretischer Füllquerschnitt .....	35
5.2. Berechnung der Austragkenngrößen .....	36
5.3. Berechnung der Widerstände .....	37
5.4. Widerstand durch den Abzug .....	40
5.5. Schurrenwiderstände .....	40
5.6. Hauptwiderstände nach DIN 22101 .....	42
5.7. Leistungsbedarf des Förderers .....	44
5.8. Gurtzugkräfte .....	44
5.9. Erforderlicher Tragrollenabstand .....	45
5.10. Muldungsübergang und Gurtzugkraftverteilung .....	46
5.11. Auslegung des Fördergurtes .....	49
5.12. Mindestdurchmesser der Antriebstrommel .....	50
5.13. Berechnung nach Reisner .....	50
5.13.1. Vergleich mit dem Berechnungsprogramm .....	51
6. Programmaufbau .....	53
6.1. Wertekontrolle .....	53
6.2. Formulare .....	54

6.2.1. Formular 1: Einleitung .....	55
6.2.2. Formular 2: Geometriedaten und Schüttgutauswahl .....	55
6.2.3. Formular 3: Eingabe der Trichterdaten .....	56
6.2.4. Formular 4: Auswahl der Trichterform .....	57
6.2.5. Formular 5: Eingabe Abzugsband 1 .....	59
6.2.6. Formular 6: Eingabe der Schurrengeometrie .....	61
6.2.7. Formular 7: Eingabe Abzugsband 2 .....	62
6.2.8. Formular 8: Sicherheitsfaktoren zur Gurtauslegung .....	62
6.2.9. Formular 9: Ergebnisblatt 1 .....	63
6.2.10. Formular 10: Ergebnisblatt 2 .....	64
6.3. Module .....	65
6.3.1. Modul1 .....	65
6.3.2. Modul2 .....	66
6.4. Excel-Übersichtsblatt .....	66
7. Zusammenfassung und Ausblick .....	68
8. Verwendete Formelzeichen .....	70
9. Literatur .....	75
9.1 Allgemeine Literatur .....	75
9.2 Normen und Richtlinien .....	76

# 1. Einleitung

Bunker und Silos als Speicher von Schüttgütern sind weltweit im Einsatz. Vor allem bei industriellen Anwendungen treten sie in verschiedensten Größen und Formen auf. Dabei erfüllen sie unterschiedliche Aufgaben. Sie dienen als Puffer, um einen stetigen Materialfluss zu gewährleisten, zum Vergleichmäßigen von Massenströmen oder zum Bevorraten zwischen einer Gewinnungsstelle und einer Weiterbearbeitungsstelle [23]. Ist ein leistungsfähiger Umschlag eines Unstetigförderers auf einen Stetigförderer gefordert, so werden Bunker oder Silos oft als Koppellement zwischen diesen Förderern eingesetzt (Abbildung 1). Das bedeutet, dass unregelmäßig ankommendes Gut stetig weitergegeben werden kann [2]. Dies ist oft bei großen Be- und Entladeeinrichtungen der Fall, wo zum Beispiel mit einem Greifer ein Schiff entladen und das Schüttgut über den Bunker an ein Förderbandsystem weitergegeben werden kann [2]. Bunker werden auch häufig eingesetzt, weil sie die Möglichkeit einer einfachen Beschickung durch große Transportsysteme bieten, wie zum Beispiel beim Entleeren eines Eisenbahnwaggons während der Fahrt in einem unter den Gleisen befindlichen Bunker [7].



**Abbildung 1:** Anwendungsbeispiel eines Bunkers mit Abzugsband. Das un stetig ankommende Schüttgut wird vom Bunker stetig weitergeben. [13]

Zum Austragen des Schüttgutes aus einem Silo oder Bunker stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann gravimetrisch entleert werden. Will man jedoch einen kontrollierten Austrag erzielen, werden Austragorgane verwendet (siehe Kapitel 2.2.). Ihre richtige Auswahl und Funktion ist Voraussetzung für einen störungsfreien Schüttgutfluss [5]. Ein mögliches Austragorgan ist das Abzugsband.

Die Belastungen auf ein Abzugsband sind sehr groß und je nach Bunkergeometrie und Schüttgut sehr unterschiedlich. Dieser Umstand macht das Auslegen der Gurtförderanlage sehr schwierig. Aufgrund der ungenauen Kenntnis der Widerstände und des Druckes auf das Förderband, wird die Anlage oft sehr viel größer dimensioniert als es notwendig wäre.

Das Dimensionieren eines Silos oder Bunkers ist ebenfalls sehr aufwändig und die Vorgänge im jeweiligen Schüttgut beim Füllen und Entleeren sind sehr komplex. Der Druck in einem Silo kann sehr groß werden und bei unzureichender Auslegung zu schwerwiegenden Schäden führen. Des Weiteren müssen Probleme wie Brücken- oder Schachtbildung vermieden werden um einen gleichmäßigen Austrag zu gewährleisten. Durch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten ist aber heutzutage eine sehr genaue Berechnung der Lasten im Silo und innerhalb des Schüttgutes möglich und auch in einer Norm [14] festgehalten.

Ziel dieser Diplomarbeit war es, ein Software-Programm zu erstellen, mit welchem es möglich ist, auf übersichtlicher Weise eine vollständige Dimensionierung von Bunker und Abzugband durchzuführen.

Die Berechnung stützt sich dabei auf momentan gültigen Normen [14, 15] und Standardliteratur [8, 9, 10, 12]. Geschrieben wurde die Software in der in *Microsoft© Excel* enthaltenen Skriptsprache *Visual Basic for Application*. Damit wurden Formulare erzeugt um die Ein- und Ausgabe der für die Dimensionierung wichtigen Daten übersichtlich zu gestalten.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Begriffserklärung

Nach VDI 2694 [23] ist der Unterschied zwischen Silo und Bunker definiert durch das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser, oder bei rechteckigen Behältern Höhe zu Breite und Tiefe. Demnach wird ein Behälter, dessen Höhe größer als dessen Durchmesser bzw. Tiefe und Breite ist, als *Silo* bezeichnet, während die Höhe eines *Bunkers* kleiner ist, als der Durchmesser bzw. die Tiefe und Breite. In Folge wird nur mehr eine der beiden Bezeichnungen verwendet, obwohl immer beide gemeint werden.

Ein Abzugsband ist eine Austrageinrichtung bzw. Austragorgan, mit welcher Schüttgut aus dem Bunker ausgetragen werden kann. Es handelt sich dabei um eine Fördergurtanlage, die unter der Bunkeröffnung sitzt. Das Schüttgut böschet sich zwischen Trichterunterkante und Gurt auf. Bei stillstehendem Gurt verschließt sich der Bunker somit von selbst. Erst bei Inbetriebnahme des Abzugbandes beginnt der kontrollierte Austrag. Aufgrund der hohen Gefahr des Durchschießens, ist das Bunkerabzugsband ungeeignet für staubförmige Schüttgüter [23].

### 2.2. Möglichkeiten zum Austrag aus einem Bunker

Grundsätzlich muss man zwischen Austraghilfen und -einrichtungen unterscheiden. Nach VDI 2694 [23] sind *Austrageinrichtungen* nach dem Silo angeordnete Einrichtungen, die den Schüttgutfluss beeinflussen und somit für die Funktion des Silos verantwortlich sind. Oft dienen sie auch als Absperreinrichtung [23]. *Austraghilfen* sind vorwiegend Einbauten im Silo, die die Gutbewegung in Gang setzen und aufrechterhalten oder das Fließprofil verbessern [23]. Das heißt, sie fördern das gleichmäßige Austragen über den gesamten Siloquerschnitt und vermeiden dadurch auch Brücken- oder Schachtbildung. Passive Austraghilfen sind beispielsweise Verteil-Kegel im Trichter [7], während das Einblasen von Luft oder Vibrationseinrichtungen aktive Austraghilfen darstellen [5]. Des Weiteren können auch Förderbänder mit Hilfseinrichtungen, in Form von besonders ausgeführten Oberflächen, ausgestattet sein. Damit lassen sich größere Steigungen bewältigen oder größere Schüttgutquerschnitte erzielen [9]. Bei Bunkerabzugsbändern kann damit das Anfahren unter

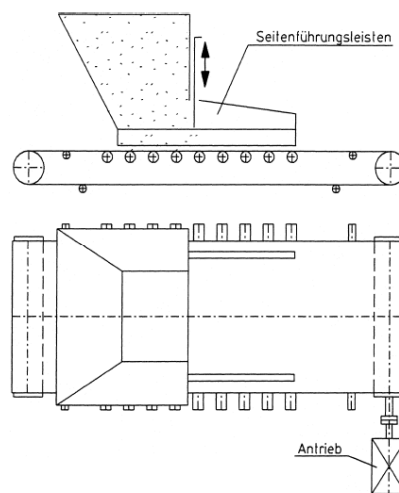


besonders schwierigen Bedingungen, wie zum Beispiel bei an den Bunkerwänden fest gefrorenem Schüttgut, erleichtert werden. Austraghilfen sollen nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit sein.

Es gibt viele Möglichkeiten aus einem Silo auszutragen. Einige Beispiele der üblichsten Bauformen sind in Tabelle 1 der VDI 2694 [23] aufgelistet, wobei zwischen translatorischen und rotatorischen Systemen unterschieden wird. Die wichtigsten Vertreter dieser beiden Systeme werden im Folgenden kurz beschrieben.

### 2.2.1. Translatorische Systeme

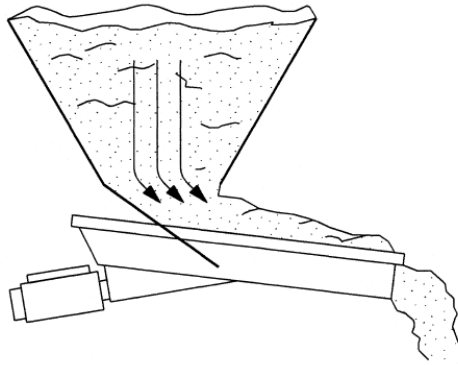
Der wichtigste Vertreter der translatorischen Systeme ist der Gurtförderer (Abbildung 2). Neben den in der Einführung erwähnten Einsatzgebieten sei hier noch bemerkt, dass der Austrag aus einem Bunker mit einem Abzugsband eine kontrollierte und effektive Methode darstellt. Aufgrund der geringen Anschaffungskosten, der hohen Lebensdauer und Beständigkeit können die Kosten der Anlage niedrig gehalten werden [7].



**Abbildung 2:** Gurtförderer als Beispiel eines translatorischen Systems von Austrageinrichtungen für Silos, aus [23].

Der Verschleiß des Gurtes ist jedoch nicht unerheblich [4]. Die Schüttgutführung erfolgt über Seitenführungsleisten oder durch Muldung des Gurtes.

Neben dem Gurtförderer sind die am meisten verwendeten translatorischen Systeme die Schwingrinne (Abbildung 3) und der Schneckenförderer. Erstere bietet den Vorteil der stufenlosen Regelung und der hohen Abzugsleistungen. Es ist damit auch möglich, schwieriges Schüttgut zu fördern. Als Schwingungserreger dienen Unwuchtantriebe oder Magnetvibratoren.

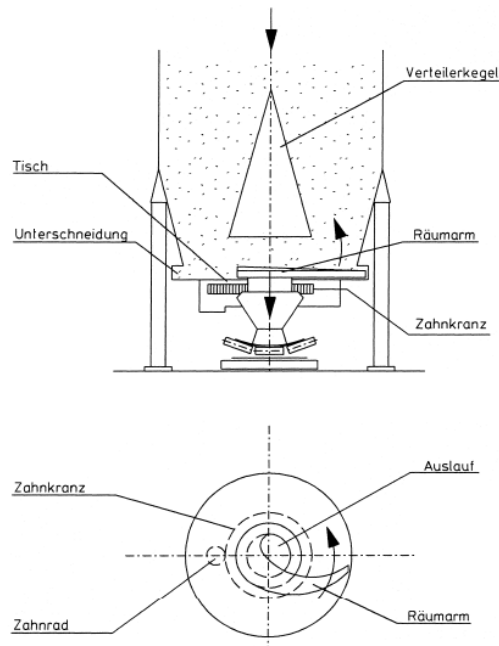


**Abbildung 3:** Schwingrinne als Beispiel einer weiteren translatorischen Austrageinrichtung mit hoher Abzugsleistung, aus [23].

Schneckenförderer eignen sich besonders für feine, staubförmige Güter, da auf Grund der geschlossenen Bauweise ein staubfreier Betrieb möglich ist. Bei einem Abzug über die gesamte Trichterlänge ist darauf zu achten, die Schneckensteigung progressiv auszuführen, damit ein gleichmäßiges Austragen erfolgen kann. Die eher geringe Austragleistung, der hohe Verschleiß und die Gefahr der Beschädigung der Schnecke bei zu grobem Gut oder durch Fremdkörper seien als Nachteil dieses Systems erwähnt. Ordnet man mehrere Schnecken nebeneinander parallel an, so erhält man einen Schneckenboden, der in Verbindung mit einem gemuldeten Boden eine restlose Entleerung ermöglicht. [4, 23]

### 2.2.2. Rotatorische Systeme

Der bekannteste Vertreter der rotatorischen Systeme ist der Drehkratzer (Abbildung 4). Das über einen Verteilkegel einem Tisch zugeführte Schüttgut wird mit einem umlaufenden Räumarm durch eine oder mehrere Öffnungen in der Grundfläche ausgetragen. Aufgrund dessen, dass der Räumarm den gesamten Abzugsquerschnitt erfasst, ergibt sich der Vorteil, dass keine Entmischung des Schüttgutes beim Austrag stattfindet. Dem gegenüber steht der Nachteil des hohen Verschleißes und des großen Energiebedarfes.



**Abbildung 4:** Prinzipskizze eines Drehkratzers für schwer austragbares Schüttgut, aus [23].

Der Telleraufgeber (oder Drehteller) stellt ein regelbares, staubfreies System für geringe Austragsförderströme dar. Dabei wird ein planer drehender Teller unter dem Siloauslauf angeordnet, auf welchem sich das Schüttgut aufböscht. Bei Drehung des Tellers wird das Schüttgut über einen Abstreifer über den Tellerrand abgeleitet.

Ein weiteres rotatorisches System ist die Räumschnecke, welche sich um die Siloachse dreht und das Schüttgut zur zentralen Auslauföffnung fördert. [23]

## 2.3. Normensituation

### 2.3.1. DIN 1055-6, Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter

Die erste Berechnung der Druckverteilung in einem Silo wurde bereits 1895 veröffentlicht. Janssen [1] führte Versuche über den Getreidedruck in Silozellen durch und erkannte, dass der Druck auf den Siloboden mit zunehmender Guthöhe einem Grenzwert zustrebt. Nach zahlreichen weiteren wissenschaftliche Arbeiten wurde schließlich eine Norm entworfen, mit deren Hilfe die „Einwirkungen auf Bauten“ berechnet werden konnte. Die momentan gültige Ausgabe der Norm DIN 1055-6 [14] ist der sechste Teil der Norm-Reihe DIN 1055 „Einwirkungen auf Tragwerke“ und beschäftigt sich mit den „Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“.

In dieser Norm werden die Berechnungsmethoden für die Lasten im vertikalen Siloschaft und im Trichter angegeben. Dabei wird zwischen schlanken Silos, Silos mittlerer Schlankheit,

niedrigen Silos, Stützwandsilos und Silos für Schüttgüter mit zwischen den Schüttgutpartikeln eingelagerter Luft unterschieden. Für jede dieser Varianten gibt es unterschiedliche Berechnungsansätze, was dazu führt, dass die Berechnung sehr genau ausgeführt werden kann. Des Weiteren können die Lasten auf Silotrichter und Siloböden und auf Flüssigkeitsbehälter berechnet werden.

Im Anhang der Norm DIN 1055-6 [14] befindet sich eine Tabelle mit Schüttgutkennwerten einiger üblicher Schüttgüter. Die Norm gibt auch Auskunft darüber, wie Schüttgutkennwerte ermittelt werden können, falls sie in keiner Literatur aufscheinen. Die Ermittlung der Kennwerte wird weiters in [5, 8] erklärt.

### **2.3.2. DIN 22101, Gurtförderer für Schüttgüter, Grundlagen für die Berechnung und Auslegung**

Die Norm DIN 22101 [15] enthält die Grundlagen für die Berechnung und Auslegung eines Gurtförderers. Bei der Berechnung der Bewegungswiderstände und des Leistungsbedarfs wird darauf hingewiesen, die Anlage in Teilabschnitte zu gliedern und die Berechnung abschnittsweise durchzuführen. Dadurch ist eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit der Berechnung möglich und die Resultate kommen den tatsächlichen Verhältnissen sehr nahe [15]. Die Berechnungsmethoden für Neben- und Sonderwiderstände ist vor allem für sehr lange Förderanlagen gedacht und nicht für kurze Abzugsbänder. Trotzdem können diese Formeln für die Berechnung eines Abzugbandes heran gezogen werden. Des Weiteren beinhaltet die Norm die Berechnung der Zugkraftverteilung über der Gurtbreite. Die Beanspruchungen auf einen Gurt bei Muldungsübergängen oder bei Kurven sind sehr hoch und ihre Kenntnis für die Auslegung unbedingt erforderlich [15].

### **2.3.3. Weitere Normen**

Die im Zusammenhang mit dieser Diplomarbeit ebenfalls wichtigen Normen werden im Folgenden kurz beschrieben.

Bei der Auslegung des Abzugsbandes sind auch die Anzahl und der Abstand der Tragrollen zu berechnen. Dazu müssen die Hauptmaße der Tragrollen bekannt sein. Es gibt hierfür zwei Normen, nämlich die DIN 22107 [16] und die DIN 15207-1 [17]. Die in der Berechnung verwendeten Werte der Gurtmuldwinkel, die Gurtbreiten und die dazugehörigen Rollenlängen werden aus [16] entnommen. Die DIN 15207-1 [17] unterscheidet sich von der

DIN 22107 [16] dadurch, dass die Längen der Tragrollen nicht in Abhängigkeit von der Gurtbreite sondern in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser der Tragrollen aufgelistet sind.

Im ersten Teil der DIN 22102 [18] sind die Maße, Anforderungen und die Kennzeichnung von Textil-Fördergurte festgehalten. Des Weiteren ist in dieser Norm die maximale Gurtdehnung unter Bezugskraft angegeben. Mithilfe dieser Werte lässt sich der auf die Breite bezogene Elastizitätsmodul errechnen, der für die Berechnung der Gurtzugkräfte erforderlich ist. Auch die Mindestwerte der Muldungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Muldungswinkel der seitlichen Tragrollen sind in der Norm angegeben.

DIN 22109-4 [19] beschäftigt sich ebenfalls mit Textil-Fördergurten, jedoch im Speziellen für den Steinkohlenbergbau über Tage. Die Anforderungen an Mindestbruchkraft oder Dehnung werden darin beschrieben. Über die richtige Kennzeichnung der Textil-Fördergurte gibt der fünfte Teil der DIN 22109 [20] Auskunft. Die Kennzeichnung von Stahlseil-Fördergurten wird im zweiten Teil der DIN 22131 [21] beschrieben.

Abschließend sei noch erwähnt, dass die Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern in der DIN ISO 3435 [22] festgehalten ist.

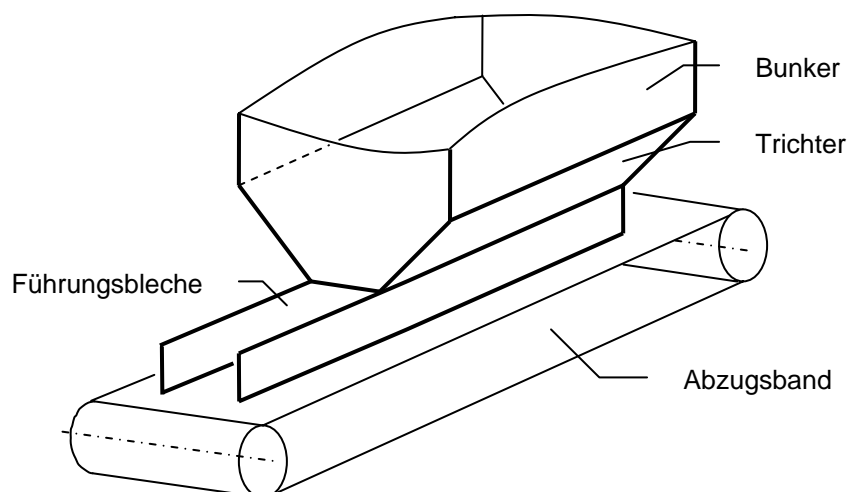
### 3. Programmbeschreibung

Das Programm soll einem Anwender dazu dienen, einen Bunker und das dazugehörige Abzugsband zu dimensionieren. Die Dimensionierung des Bunkers umfasst dabei die Berechnung der maximal auftretenden Drücke im Schaft und im Trichter. Die Ausführung des Bunkers, das heißt, ob der Bunker zum Beispiel als Stahlbeton-, Stahlblech- oder GFK-Konstruktion ausgeführt wird, ist für das Berechnungs-Programm irrelevant. Das bedeutet, dass der Anwender mit dem Ergebnis des Programms die Planung und Auslegung der Bunkerkonstruktion ausführen kann.

Die Dimensionierung des Abzugsbandes erfolgt hingegen vollständig. Die mindestens erforderliche Leistung des Antriebes, die Mindestbruchkraft des Gurtes, die Mindestanzahl und der Abstand der Tragrollen sowie der erforderliche Durchmesser der Antriebstrommel werden berechnet.

#### 3.1. Anwendungs- und Gültigkeitsbereich

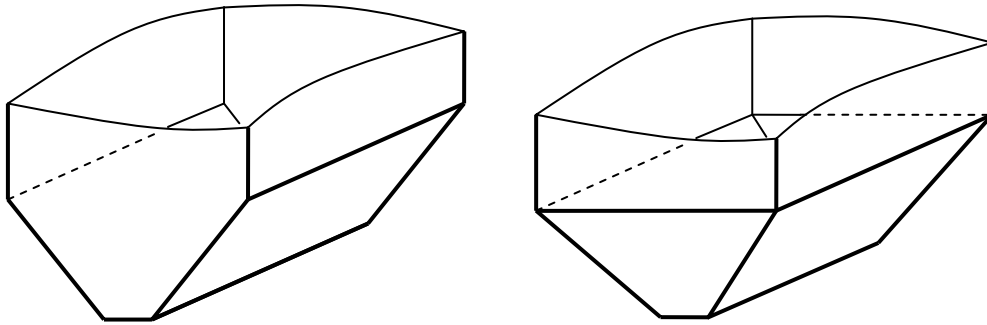
Das Programm kann angewendet werden für Bunkerabzugsanlagen, die dem folgenden Modell entsprechen (Abbildung 5).



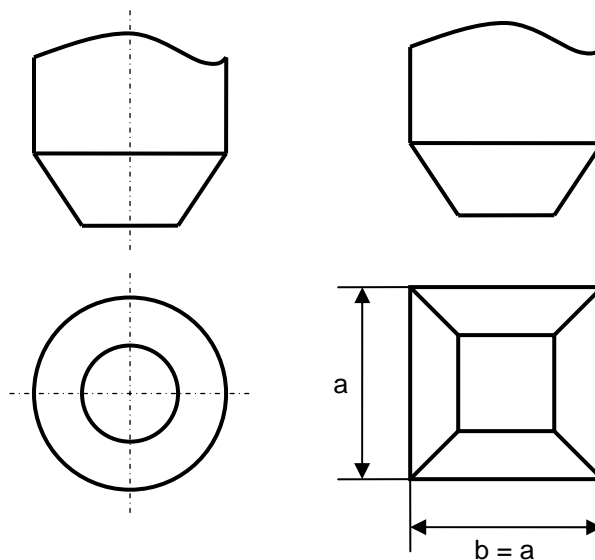
**Abbildung 5:** Das Berechnungs-Programm gilt für nur für Ablagen, welche diesem Modell entsprechen.

Der Bunker muss runden oder rechteckigen Querschnitt besitzen. Unter dem Bunker ist ein Trichter angeordnet. Die Trichterform kann keilförmig oder mit rechteckigem Grundriss sein.

Im Falle eines runden Bunkerquerschnitts kann der Trichter auch konisch sein. Ebenso kann der Trichter quadratischer, pyramidenförmiger Gestalt sein.



**Abbildung 6:** Darstellung eines keilförmigen (links) Trichters und eines Trichters mit rechteckigem Grundriss (rechts).



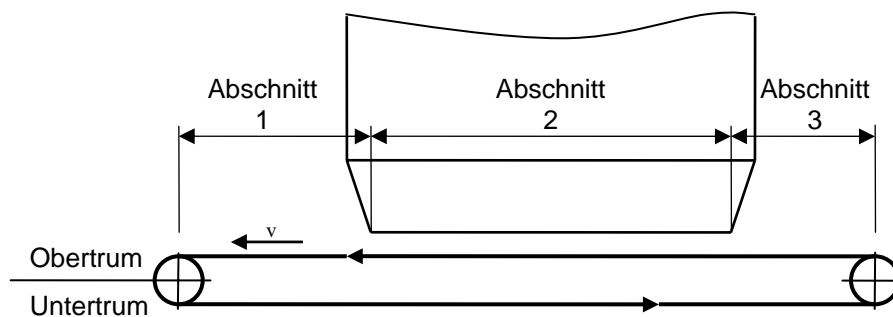
**Abbildung 7:** Darstellung eines konischen (links) und eines quadratisch, pyramidenförmigen Trichters (rechts).

Damit das Schüttgut nicht über den Gurtrand hinaus läuft, wird davon ausgegangen, dass sich unter dem Trichter Gleitbleche befinden. Dabei müssen in der Berechnung die Höhe und die Länge der Schurre eingegeben werden, die sich unter dem Trichter befindet. Falls in Förderrichtung nach dem Trichter die Schurre weitergeführt wird, so kann unter Eingabe der Länge der Schurre diese ebenfalls berücksichtigt werden.

Der Gurt kann flach oder gemuldet sein. Bei gemuldeter Führung, kann zwischen 2-teiliger oder 3-teiliger Rollenordnung unterschieden werden.

Um nach [15] die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen, wurde das Abzugsband in sechs Teilabschnitte unterteilt. Jeder Teilabschnitt ist dadurch gekennzeichnet, dass in ihm

Parameter, wie zum Beispiel die Streckenlast infolge des Gutgewichtes, unterschiedlich sind. Der erste Teilabschnitt ist der Teil des Abzugsbandes in Förderrichtung nach dem Trichter. Der zweite Abschnitt ist der, der sich unter dem Trichter befindet. Und der dritte Teil ist jener, der sich in Förderrichtung vor dem Bunker befindet. Teilt man das Abzugsband jetzt noch in Ober- und Untertrum auf, so erhält man die sechs Teilabschnitte. Da davon ausgegangen wird, dass im Untertrum kein Gut gefördert wird und andere Parameter im gesamten Untertrum gleich sind, können die drei Teilabschnitte im Untertrum zu einem zusammengefasst werden. Zusammenfassend bedeutet das, dass das Abzugsband unterteilt wird in Ober- und Untertrum, und das Obertrum noch einmal in 3 Teilabschnitte (siehe Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Bei der für die Berechnung relevanten Betrachtung des Abzugsbandes wird unterschieden in Ober- und Untertrum, wobei das Obertrum in drei Abschnitte gegliedert ist

Der Gültigkeitsbereich des Berechnungs-Programms ergibt sich einerseits aus dem Anwendungsbereich der für die Berechnung verwendeten Normen und andererseits aus selbst definierten Einschränkungen.

### 3.1.1. Einschränkungen aufgrund der Verwendung der Norm DIN 1055-6

Die Berechnung der Lasten im Bunker und im Trichter erfolgte nach DIN 1055-6 [14]. Für die Gültigkeit der Norm ist ein Anwendungsbereich definiert. Die für das Berechnungs-Programm wichtigsten Einschränkungen werden hier aufgelistet. Für alle anderen Einschränkungen sei auf [14] verwiesen.

- Für die geometrischen Abmessungen des Bunkers und des Trichters gelten folgende Einschränkungen (siehe Abbildung 12):
  - $h_b/d_c < 10$
  - $h_b < 100$  m
  - $d_c < 60$  m



- Einflüsse auf die Silodrücke infolge von Einbauten oder Austraghilfen werden nicht erfasst.
- Das Schüttgut ist frei fließend oder es kann sichergestellt werden, dass es sich wie ein frei fließendes Schüttgut verhält.
- Die maximale Korngröße soll nicht größer als  $0,03 \cdot d_c$  sein.
- Hinsichtlich der Betriebsbedingungen beim Füllen und Entleeren:
  - Beim Befüllen entstehen nur geringfügige, vernachlässigbare Einwirkungen von Trägheits- und Stoßkräften.
  - Bei Anwendung von Austrags- bzw. Entleerungshilfen ist der Schüttgutfluss gleichmäßig, ungestört und zentral.
- Die angegebenen Lastansätze auf Silotrichter gelten nur, wie zuvor erwähnt, für konisch (i. Allg. axialsymmetrisch geformte, oder pyramidenförmig mit quadratischen bzw. rechteckigen Querschnitten ausgebildete) und keilförmig (i. Allg. mit vertikalen Wänden an der Stirn- und Rückseite) ausgebildete Trichter. Davon abweichende Trichterformen oder Trichter mit Einbauten erfordern spezielle, weitergehende Überlegungen.
- Silos mit entlang der vertikalen Achse sich ändernden Symmetrieachsen der geometrischen Grundrissform sind nicht Gegenstand der Norm. Darunter fallen z. Bsp. Silos mit einem von einer Zylinderform in eine Keilform übergehenden Trichter.
- Die Bemessung des Silos gegen dynamische Beanspruchungen, die beim Entleeren auftreten können, wie z. Bsp. Silobeben, Stöße, Hupen oder Siloschlagen, ist außerhalb des Anwendungsbereiches von [14].

### 3.1.2. Selbst definierte Einschränkungen

Des Weiteren wurden folgende Einschränkungen für die Verwendung des Programms getroffen:

- Die Berechnung ist nur gültig bei der Verwendung von Silos oder Bunker welche nach [14] der Anforderungsklasse 1 entsprechen. Dies sind Silos mit einem Fassungsvermögen von weniger als 100 Tonnen. Das bedeutet, dass Silos oder Bunker, die nach [14] mit „Allgemeinem Schüttgut“ der Wichte  $22 \text{ kN/m}^3$  befüllt sind, maximal ein Volumen von  $44,59 \text{ m}^3$  aufweisen dürfen.

- Stützwandsilos und Silos mit fluidisiertem Schüttgut, sowie Temperaturunterschiede zwischen Schüttgut und Silokonstruktion [alle nach 14] werden nicht erfasst.
- Teilflächenlasten, welche nach [14] unplanmäßige, unsymmetrische Lasten infolge von Exzentrizitäten und Imperfektionen beim Befüllen der Silos berücksichtigen, werden nicht berücksichtigt. Nach [14] können Teilflächenlasten bei Silos der Anforderungsklasse 1 beim Lastfall Füllen und Entleeren vernachlässigt werden.
- Exzentrisches Entleeren, das heißt Bunker mit einem zur Symmetrieachse exzentrischen Trichter, wird nicht erfasst.
- Es wird ein Wandreibungskoeffizient im Bunkerschaft für eine Wandoberfläche der Kategorie D1 nach [14] angenommen. Das bedeutet sehr glatte Wände mit geringer Reibung.
- Bunker ohne Trichter können nicht eingegeben werden, da Lasten in Stützwandsilos nicht berechnet werden.
- Es wird horizontales Fördern vorausgesetzt. Das heißt, es wird  $\delta=0^\circ$  angenommen.
- Annahme, dass keine Last im Untertrum infolge des Gutes auftritt, d.h.  $m'_{L,u,i} = 0$  für  $i = 1, 2, 3$ .
- Annahme, dass keine Last im Obertrum vor der Gutaufnahme auftritt, d.h.  $m'_{L,o,3} = 0$ .
- Weiters wird angenommen, dass der fiktive Reibungsbeiwert  $f$  in allen Bereichen gleich groß ist, d.h.  $f = f_{i,o,u}$  für  $i = 1, 2, 3$ .  $f$  muss geschätzt werden, wenn keine Messwerte der Tragrollenwiderstände vorliegen. Verwendet man die Richtwerte für  $f$  aus Tabelle 4 der DIN 22101 [15], dann gelten nach dieser Norm folgende Randbedingungen:
  - 3-teilige, feststehende Tragrollensätze im Obertrum
  - Tragrollen mit Wälzlagerung und Labyrinthdichtung
  - Werte des relativen Durchhanges  $h_{rel} \leq 0,01$
  - Füllungsgrade  $\varphi$  im Bereich von 0,7 bis 1,1
- Die Hauptmaße der Tragrollen müssen aus DIN 22107 [16] entnommen werden, da diese Norm nach der Form der Gurtführung (flache, 2-teilig oder 3-teilig gemuldete Gurtführung) unterscheidet.
- Außerdem wird vorausgesetzt, dass die obere Mantellinie der Trommel in der Achse der Mantellinie der mittleren Rolle der Tragrollenstation liegt.

Abschließend sei noch erwähnt, dass bei der Verwendung von Stahlseil-Fördergurten gravierende Beanspruchungen des Gurtes auftreten können. Nach [15] ist daher die Kenntnis der Geometrie des Muldungsüberganges (wird im Programm berechnet), der Elastizitätsmodul, Aufbau und Schubmodul des Gummis notwendig. Des Weiteren gelten für die Berechnung der Gurtzugkraftverteilung nach [15] folgende Voraussetzungen:

- Gurte müssen nach DIN22129-1 oder DIN22131-1 konstruiert sein.
- Gurte besitzen elastische Eigenschaften, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechen.
- Die Längen des Muldungsüberganges müssen nach DIN 22101 [15] berechnet werden.

### **3.2. Programmablaufdiagramm**

In Abbildung 9 ist das Programmablaufdiagramm des Berechnungs-Programms abgebildet. Man sieht, dass nach sieben Eingabefeldern eine Überprüfung der eingegebenen Werte stattfindet. Bei korrekter Eingabe startet die Berechnung und die Ergebnisse werden in zwei folgenden Ausgabefeldern dargestellt. Befinden sich nach der Eingabe ein oder mehrere Werte außerhalb der dafür vorgesehenen Grenzen gibt es zwei Möglichkeiten: Befindet sich ein Wert oder ein Verhältnis außerhalb des in der Norm [14 oder 15] festgelegten Bereichs, so erfolgt ein entsprechender Hinweis. Der Anwender kann nun durch den Befehl „Abbrechen“ die Kalkulation verlassen und es erscheint das Eingabefeld, auf dem die entsprechenden Werte eingegeben wurden. Wählt jedoch der Anwender den Befehl „OK“ aus, so erklärt er sich damit einverstanden, die Berechnung mit Werten fortzusetzen, die nicht der Norm entsprechen.

Die zweite Möglichkeit ist jene, dass ein oder mehrere eingegebene Werte geometrisch nicht möglich sind, oder außerhalb von Schranken liegen, die im Programm vorgeschrieben sind. Es erfolgt ein Hinweis, das Programm wird abgebrochen und man kehrt mit der Aufforderung, die Werte zu ändern, zu dem relevanten Eingabefeld zurück (siehe auch Kapitel 6.1.).

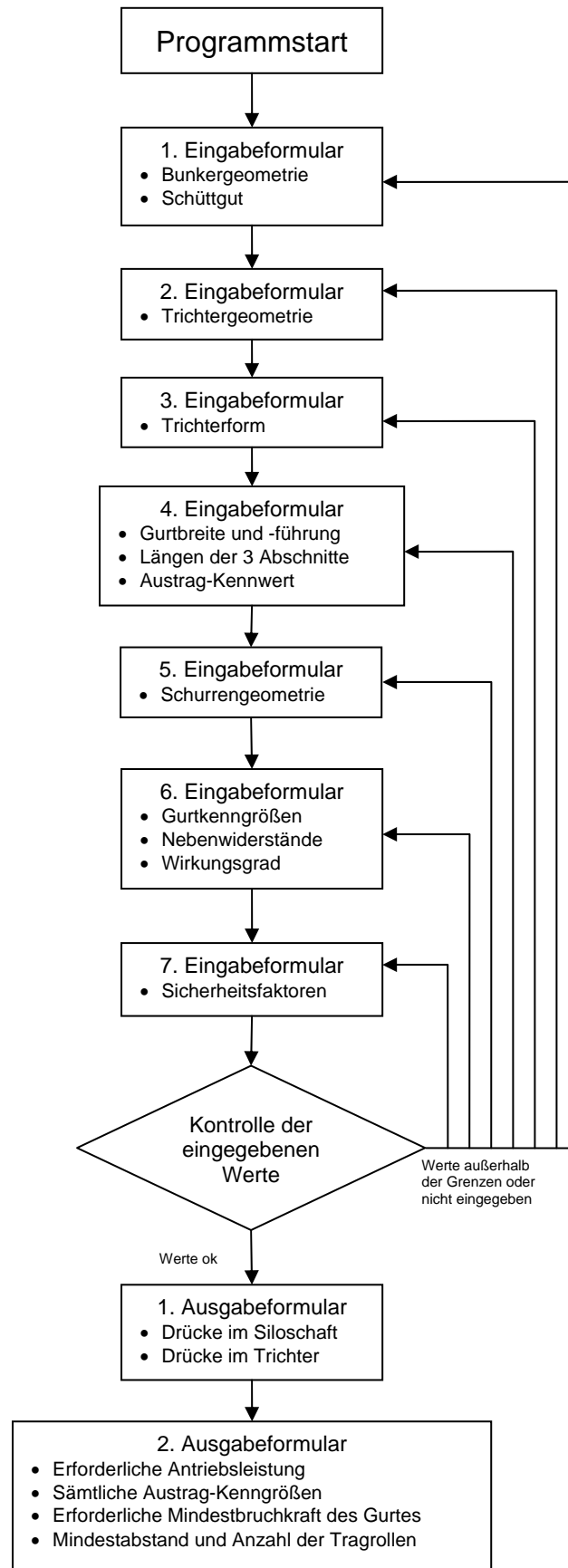


Abbildung 9: Programmablaufdiagramm.

### 3.3. Eingabedaten

Die für die Berechnung eingelesenen, notwendigen Eingabedaten können in folgende Kategorien unterteilt werden.

Schüttgut:

- Das Schüttgut kann aus einer Liste mit den meist verwendeten Schüttgütern ausgewählt werden. Die Liste entspricht dabei der in [14] enthaltenen Tabelle E.1. Bei Eingabe eines Schüttgutes, welches nicht in der Liste vorhanden ist (Benutzerdefiniert), müssen folgende Werte eingegeben werden:
  - Wichte  $\gamma$
  - Böschungswinkel  $\varphi_r$
  - Winkel der inneren Reibung  $\varphi_i$
  - Horizontallastverhältnis  $K_{Hor}$
  - Wandreibungskoeffizient  $\mu$
  - Kennwert für die Teilflächenlast  $C_{op}$

Geometrie des Bunkers oder des Silos:

- Die von der äquivalenten Schüttgutoberfläche bis zum Trichterübergang gemessene Höhe des vertikalen Silo- oder Bunkerschaftes,  $h_c$ .
- Die charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt,  $d_c$ . Entspricht bei rundem Querschnitt dem Innendurchmesser.
- Im Falle eines rechteckigen Bunkerquerschnittes, die Länge  $a$  und Breite  $b$  des Bunkers.

Geometrie und Form des Trichters:

Für die Berechnung notwendig sind die Höhe des Trichters  $h_h$ , gemessen vom gedachten Trichterscheitel bis zum Trichterübergang, sowie der Abstand der Trichteröffnung von der gedachten Spitze  $h_x$ . Die Eingabe erfordert daher wahlweise

- die Trichteröffnungsbreite  $b_{Trichter}$  und den Trichterneigungswinkel  $\beta$ ,
- oder die Trichteröffnungsbreite  $b_{Trichter}$  und die Höhe des Trichters  $h_{Trichter}$ ,
- oder direkt die Eingabe der Trichterhöhe von der gedachten Spitze bis zum Trichterübergang  $h_h$  und der vertikalen Höhe der Trichteröffnung mit Ursprung in der

Trichterspitze  $h_x$  und des Trichterneigungswinkels  $\beta$ , gemessen in Bezug auf die vertikale Achse (siehe Kapitel 4.1., Abbildung 10 und Abbildung 11).

Austrag-Kennwerte:

Die Austrag-Kennwerte sind die Fördergeschwindigkeit, der Volumenstrom und der Massenstrom. Nach Eingabe eines dieser drei Kennwerte, werden die anderen zwei berechnet. Wird zum Beispiel eine gewisse Fördergeschwindigkeit verlangt, so kann diese eingegeben werden. Der Volumen- und Massenstrom werden dann berechnet.

Gurtdaten:

- Eingabe der Gurtführung. Diese kann wahlweise flach, 2- oder 3teilig gemuldet sein.
- Die Gurtbreite  $b_{Gurt}$  kann aus Werten der Tabelle 1 der Norm DIN22107 [16] ausgewählt werden.
- Bei 2- oder 3-teiliger Gurtmuldung kann der Winkel der Muldung entsprechenden den genormten Muldungswinkeln nach Tabelle 3 der Norm DIN 22107 [16] ausgewählt werden.
- Die Längen der Teilabschnitte 1, 2 und 3. Handelt es sich um einen keilförmigen Trichter (d.h. die Stirnflächen sind vertikal), dann muss keine Länge des Teilabschnittes 2 ( $l_2$ ) eingegeben werden, da bereits im zweiten Eingabeformular die Länge des Bunkers eingegeben werden muss.
- Umschlingungswinkel  $\alpha$  des Gurtes an der Trommel.
- Reibungsbeiwert zwischen Gurt und Trommeloberfläche  $\mu_{Gurt-Trommel}$ .
- Anlauffaktor  $p_A$ , zur Begrenzung der Anlauf-Trommelumfangskraft.
- Art des Fördergurtes (Stahlseil- oder Textil-Fördergurt).
- Im Falle eines Textil-Fördergurtes: Anzahl der Einlagen und Werkstoff des Zugträgers.
- Dicke des Zugträgers  $d_{Gk}$ .
- Gewicht des Gurtes  $m_{Gurt}$  in  $\text{kg/m}^2$
- Auf die Breite bezogener Elastizitätsmodul des Gurtkerns  $E_{LGk}$  in  $\text{N/mm}$ .
- Fiktiver Reibungsbeiwert  $f$  zur Berechnung der Hauptwiderstände.
- Der zulässige Durchhang des Gurtes bezogen auf den Tragrollenabstand  $h_{rel,zul}$  kann aus einer Liste ausgewählt werden. Die zulässigen Werte wurden aus [12] entnommen.
- Der Durchmesser der Tragrollen muss eingegeben werden. Die genormten Werte findet man in Tabelle 1 der DIN 22107 [16].

- Gesamtwirkungsgrad aller Übertragungsglieder zwischen Motor- und Trommelwelle in %.
- Sicherheitsfaktor  $S_0$  zur Einstufung der Merkmale in Hinblick auf die Verbindungsherstellung laut Tabelle 8 aus [15], sowie der Sicherheitsfaktor  $S_I$  zur Einstufung der Merkmale im Hinblick auf die dynamische Tüchtigkeit von Gurt und Gurtverbindung laut Tabelle 9 aus [15].
- Optional können auch noch Werte für etwaige Neben- und Sonderwiderstände eingegeben werden. Dies können zum Beispiel Widerstände infolge von Gurtreiniger oder sonstigen Einrichtungen sein.

Geometriedaten der Schurre:

- Höhe der Schurre im Abschnitt 1 und 2  $h_{Sch}$ .
- Größte Höhe zwischen Trichterunterkante und Gurt  $h_{Trichter-Gurt}$ .
- Wandreibungskoeffizient in der Schurre  $\mu_{Sch}$ .
- Falls eine Schurre nach dem Bunker vorhanden ist, ist die Eingabe der Länge dieser Schurre notwendig,  $l_{Sch}$ .

### 3.4. Ausgabewerte

Nach der im Folgenden ausführlich beschriebenen Berechnung (siehe Kapitel 4. und 5.) erfolgt die Ausgabe von folgenden Werten.

Lasten auf vertikale Silowände:

- Horizontale Drücke im Lastfall Füllen  $p_{h,f}$  und im Lastfall Entleeren  $p_{h,e}$
- Wandreibungslasten im Lastfall Füllen  $p_{w,f}$  und im Lastfall Entleeren  $p_{w,e}$
- Vertikallast im Schüttgut nach dem Füllen  $p_v$

Lasten im Trichter:

- Mittlere Vertikallast am Trichterübergang  $p_{vft}$
- Vertikallast  $p_{v,f}$ , Normallast  $p_{n,f}$  und Tangentiallast  $p_{t,f}$  im Lastfall Füllen, sowie Vertikallast  $p_{v,e}$ , Normallast  $p_{n,e}$  und Tangentiallast  $p_{t,e}$  im Lastfall Entleeren

Antriebsdaten:

- Gesamte durch die Bewegungswiderstände im stationären Betriebszustand benötigte Leistung an der Antriebstrommel  $P_W$
- Erforderliche Gesamtnennleistung der Antriebsmotoren  $P_{M,erf}$

Austrag-Kennwerte:

- Je nach Eingabe (siehe Abschnitt 3.3.) werden Fördergeschwindigkeit, Volumenstrom oder Massenstrom ausgegeben.

Gurtdaten:

- Mindestens erforderliche Festigkeit aller Gurteinlagen  $k_{N,min}$
- Mindestens erforderlicher Antriebs-Trommeldurchmesser  $D_{Tr,min}$
- Bei gemuldeter Gurtführung: Mindestens erforderliche Länge des Muldungsüberganges  $l_{ü,min}$

Tragrollenabstände:

- Maximal erlaubter Abstand zwischen den Tragrollen im Untertrum und im jeweiligen Abschnitt des Obertrums
- Mindestens erforderliche Anzahl an Tragrollen im Untertrum und im jeweiligen Abschnitt des Obertrums

Gurtzugkräfte:

- Gurtzugkraft im auflaufenden Trum der Antriebstrommel  $F_{T1}$ , sowie im ablaufenden Trum  $F_{T2}$
- Mindestens erforderliche Spannkraft

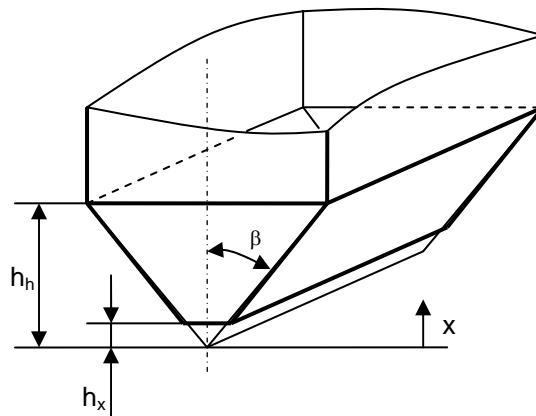


## 4. Berechnung der Bunkerdrücke

Nach Eingabe der im vorigen Kapitel beschriebenen Werte, erfolgt die Berechnung der Ausgabewerte.

### 4.1. Berechnung der Trichtergeometrie

Zur Berechnung der Lasten im Trichter wird nach [14] eine vertikale Koordinate  $x$  eingeführt. Diese entspringt aus dem gedachten Trichterscheitelpunkt, wie in der folgenden Abbildung 10 zu sehen ist.

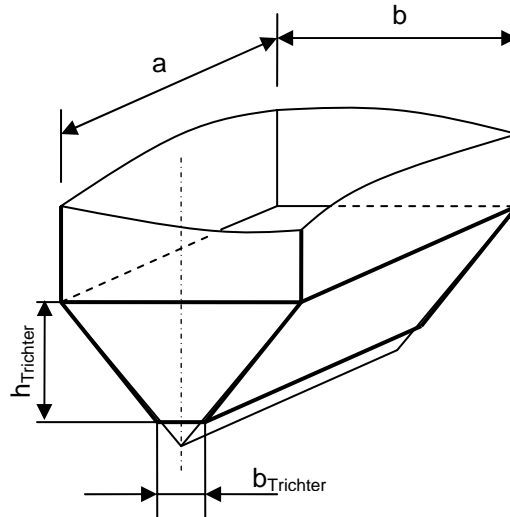


**Abbildung 10:** Trichtergeometrie.

Die Variable dient zur Berechnung der Drücke in der Höhe  $x$ . In dieser Berechnung wird für  $x$  die eingeführte Höhe  $h_x$  eingesetzt, da der größte vorkommende Druck am Trichterauslauf herrscht und dieser für die Auslegung des Trichters wichtig ist. Die Gesamthöhe vom Trichterscheitelpunkt bis zum Schaftübergang wird mit  $h_n$  bezeichnet.  $h_x$  beschreibt somit die Höhe des Trichterauslaufes, gemessen vom gedachten Trichterscheitel und muss für die Berechnung bekannt sein. Zur vollständigen Beschreibung der Trichtergeometrie zählen auch die Trichterauslaufbreite  $b_{Trichter}$  und die Höhe des Trichters  $h_{Trichter}$ .

Es ist eher unwahrscheinlich, dass ein Anwender des Berechnungs-Programms die Höhen vom gedachten Trichterscheitelpunkt aus kennt. Eine Umrechnung ist daher nötig. Im Programm kann der Anwender zwischen drei verschiedenen Eingabemöglichkeiten unterscheiden:

Der wahrscheinlichste Fall ist jener, dass die Trichterhöhe und –auslaufbreite bekannt sind.



**Abbildung 11:** Trichtergeometrie durch Angabe von Trichterhöhe und –auslaufbreite.

Das bedeutet, dass nach dem Einlesen von  $b_{Trichter}$  und  $h_{Trichter}$  der Winkel  $\beta$  wie folgt berechnet wird:

$$\beta = \arctan\left(\frac{d_c - b_{Trichter}}{2 \cdot h_{Trichter}}\right) \text{ bzw. } \beta = \arctan\left(\frac{b - b_{Trichter}}{2 \cdot h_{Trichter}}\right). \quad (1), (2)$$

Für die Höhen  $h_x$  und  $h_h$  folgt

$$h_h = \frac{d_c}{2 \cdot \tan \beta} \text{ bzw. } h_h = \frac{b}{2 \cdot \tan \beta} \text{ und} \quad (3), (4)$$

$$h_x = \frac{b_{Trichter}}{2 \cdot \tan \beta}. \quad (5)$$

Falls der Winkel der Trichterneigung und die Trichterauslaufbreite bekannt sind und eingegeben werden, werden die Höhen berechnet nach

$$h_h = \frac{d_c}{2 \cdot \tan \beta} \text{ bzw. } h_h = \frac{b}{2 \cdot \tan \beta}, \quad (6), (7)$$

$$h_x = \frac{b_{Trichter}}{2 \cdot \tan \beta} \text{ und} \quad (8)$$

$$h_{Trichter} = h_h - h_x. \quad (9)$$

Sollten dennoch die Höhe  $h_x$  und die Höhe  $h_h$  bekannt sein, so folgt unter der Voraussetzung der Kenntnis des Winkels  $\beta$ :

$$b_{Trichter} = 2 \cdot h_x \cdot \tan \beta \quad (10)$$

$$h_{Trichter} = h_h - h_x \quad (11)$$

## 4.2. Werte für Berechnung

Um zu kontrollieren ob die eingegebenen Werte im Gültigkeitsbereich liegen (siehe Kapitel 6.1.), muss die Gesamthöhe von Silo und Trichter berechnet werden:

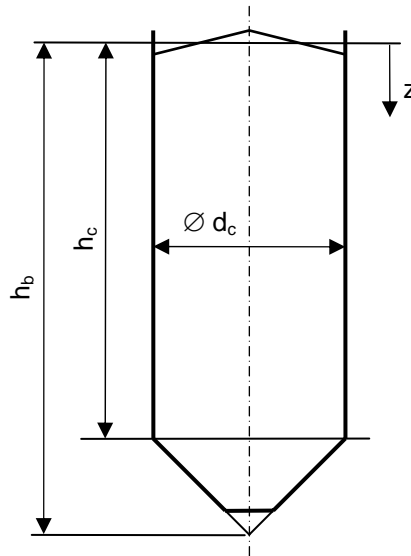
$$h_b = h_c + h_h \quad (12)$$

Des Weiteren wird für die folgende Berechnung der Radius des charakteristischen Durchmessers  $d_c$  benötigt:

$$r = \frac{d_c}{2} \quad (13)$$

## 4.3. Silolasten

Bei der Berechnung der Lasten im Siloschaft wird nach [14], ähnlich wie bei der Berechnung des Trichters, eine vertikale Koordinate  $z$  eingeführt.



**Abbildung 12:** Koordinate  $z$  zur Beschreibung der Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche.

Mit Hilfe dieser Koordinate ist es möglich, die Drücke im Silo in Abhängigkeit von  $z$  zu berechnen. Da in diesem Fall wieder nur die größtmöglichen Lasten interessant sind, wird vor Beginn der Berechnung für die Koordinate  $z$  die Höhe  $h_c$  des Siloschaftes eingesetzt,

$$z = h_c. \quad (14)$$

Zuerst werden die Fläche und der Umfang des Bunkerquerschnittes berechnet. Je nach Form des Querschnittes erfolgt die Berechnung für einen rechteckigen Bunker nach

$$A_{Silo} = a \cdot b, \quad (15)$$

$$U_{Silo} = 2 \cdot (a + b), \quad (16)$$

oder für einen kreisrunden Silo nach

$$A_{Silo} = \frac{d_c^2 \cdot \pi}{4}, \quad (17)$$

$$U_{Silo} = d_c \cdot \pi. \quad (18)$$

Da sowohl für die Berechnung von *schlanken Silos* als auch für *niedrige Silos und Silos mittlerer Schlankheit* die charakteristische Tiefe nach Janssen

$$z_o = \frac{1}{K_{Hor} \cdot \mu} \cdot \frac{A_{Silo}}{U_{Silo}} \quad (19)$$

und die asymptotischen Horizontallasten in großen Tiefen

$$p_{ho} = \gamma \cdot K_{Hor} \cdot z_o \quad (20)$$

benötigt werden, werden diese als erstes berechnet.

**Berechnung für schlanke Silos,  $\frac{h_c}{d_c} \geq 2,0$**

Zuerst werden die Fülllasten auf die vertikalen Wände berechnet. Die Tiefenvariationsfunktion nach Janssen lautet

$$Y_J(z) = 1 - e^{-\frac{z}{z_o}}. \quad (21)$$

Wie bereits zuvor erwähnt wurde, wird für die vertikale Koordinate  $z$  die Höhe  $h_c$  des Siloschaftes eingesetzt,

$$z = h_c. \quad (22)$$

Damit ergibt sich eine Horizontallast nach dem Füllen aus

$$p_{hf} = p_{ho} \cdot Y_J, \quad (23)$$

die Wandreibungslast nach dem Füllen aus

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{ho} \cdot Y_J \quad (24)$$

und die Vertikallast im Schüttgut nach dem Füllen aus

$$p_{vf} = \frac{p_{ho}}{K_{Hor}} \cdot Y_J. \quad (25)$$

Da bei Silos der Anforderungsklasse 1 die Teilflächenlasten vernachlässigt werden können (siehe 3.1.2.), werden als nächstes die symmetrischen Entleerungslasten auf vertikale Wände berechnet. Dazu müssen zunächst der Lastvergrößerungsfaktor der horizontalen Entleerungslasten  $C_h$  und der Entleerungsbeiwert für die Wandreibungslasten  $C_w$  berechnet werden. Diese lauten für den Fall schlanker Silos

$$C_h = 1,15 + 1,5 \cdot \left( 1 + 0,4 \cdot \frac{e}{d_c} \right) \cdot C_{op} \quad (26)$$

$$C_w = 1,4 \cdot \left( 1 + 0,4 \cdot \frac{e}{d_c} \right). \quad (27)$$

Aufgrund der Vernachlässigung der Exzentrizität des Aufschüttkegels ( $e=0$ ), vereinfachen sich die Faktoren zu

$$C_h = 1,15 + 1,5 \cdot C_{op} \quad (28)$$

$$C_w = 1,4. \quad (29)$$

Damit kann die Horizontallast beim Entleeren

$$P_{he} = C_h \cdot P_{hf} \quad (30)$$

und die Wandreibungslast beim Entleeren

$$P_{we} = C_w \cdot P_{wf} \quad (31)$$

berechnet werden.

### **Berechnung für niedrige Silos und Silos mittlerer Schlankheit, $\frac{h_c}{d_c} < 2,0$**

Zuerst muss der vertikale Abstand  $h_o$  zwischen der äquivalenten Schüttgutoberfläche und der höchstgelegenen Kontaktstelle des gespeicherten Schüttgutes mit der Silowand berechnet werden. Hier gilt zu unterscheiden, ob es sich um einen kreisförmigen oder rechteckigen Silo handelt. Bei einem rechteckigen Silo ist

$$h_o = \frac{d_c}{4} \cdot \tan \varphi_r, \quad (32)$$

bei einem kreisrunden Silo ist

$$h_o = \frac{r}{3} \cdot \tan \varphi_r. \quad (33)$$

Mit dem Exponenten

$$n = -(1 + \tan \varphi_r) \cdot \left(1 - \frac{h_o}{z_o}\right) \quad (34)$$

folgt die Tiefenvariationsfunktion für niedrige Silos

$$Y_R(z) = 1 - \left[ \left( \frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right]^n \quad (35)$$

und damit die Horizontallast nach dem Füllen

$$p_{hf} = p_{ho} \cdot Y_R, \quad (36)$$

beziehungsweise die Wandreibungslast nach dem Füllen

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf}. \quad (37)$$

Mit dem Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikallast in niedrigen Silos

$$z_v = h_o - \frac{1}{n+1} \cdot \left( z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2 \cdot h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right) \quad (38)$$

folgt die Vertikallast im Schüttgut nach dem Füllen

$$p_{vf} = \gamma \cdot z_v. \quad (39)$$

Für die Berechnung der Entleerungslasten benötigt man den Entleerungsfaktor für die horizontalen Lasten

$$C_h = 1,0 + \left[ 0,15 + 1,5 \cdot \left( 1 + 0,4 \cdot \frac{e}{d_c} \right) \cdot C_{op} \right] \cdot C_s \quad (40)$$

und den Entleerungsfaktor für die Wandreibungslasten

$$C_w = 1,0 + 0,4 \cdot \left( 1 + 1,4 \cdot \frac{e}{d_c} \right) \cdot C_s, \quad (41)$$

mit dem Schlankheitsbeiwert

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1,0. \quad (42)$$

Da wieder die Exzentrizität des Aufschüttkegels vernachlässigt wird ( $e=0$ ), vereinfachen sich die Faktoren zu

$$C_h = 1,0 + (0,15 + 1,5 \cdot C_{op}) \cdot C_s \quad \text{und} \quad C_w = 1,0 + 0,4 \cdot C_s. \quad (43), (44)$$

Damit kann die Horizontallast beim Entleeren

$$p_{he} = C_h \cdot p_{hf} \quad (45)$$

und die Wandreibungslast beim Entleeren

$$p_{we} = C_w \cdot p_{vf} \quad (46)$$

berechnet werden.

#### 4.4. Lasten im Trichter

Für beide Trichterarten, steiler oder flacher Trichter, wird zuerst die mittlere Vertikallast am Trichterübergang mit dem Bodenlastvergrößerungsfaktor  $C_b = 1,3$  für die Anforderungsklasse 1 berechnet,

$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf}, \quad (47)$$

wobei die vertikale Fülllast  $p_{vf}$  der vorigen Berechnung vorausgeht. Es ist nun ersichtlich, dass bei der Berechnung der vertikalen Silolasten  $z = h_c$  sein muss, da ja die Last am Trichterübergang berechnet werden soll.

**Berechnung für steile Trichter,  $\tan \beta < \frac{1 - K_{Hor}}{2 \cdot \mu_h}$**

- **Fülllasten:**

Zuerst wird der charakteristische Wert des Lastverhältnisses im Trichter

$$F_f = 1 - \frac{0,2}{1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h}} \quad (48)$$

und der Parameter

$$n_{Trichter} = S \cdot (1 - 0,2) \cdot \mu_h \cdot \frac{1}{\tan \beta} \quad (49)$$

berechnet. Dann wird die mittlere Vertikallast im Trichter berechnet. Diese ist laut Norm [14] in Abhängigkeit von der im gedachten Trichterscheitelpunkt startenden Koordinate  $x$  zu berechnen. Hier wird für  $x$  der Abstand  $h_x$  eingesetzt, da wieder die größte Last berechnet werden soll. Diese befindet sich am Trichterauslauf.

$$p_{v,füll} = \left( \frac{\gamma \cdot h_h}{n_{Trichter} - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{h_x}{h_h} \right) - \left( \frac{h_x}{h_h} \right)^{n_{Trichter}} \right] + p_{vft} \cdot \left( \frac{h_x}{h_h} \right) \quad (50)$$

Die Last senkrecht auf die Trichterwand im Lastfall Füllen ist

$$p_{nf} = F_f \cdot p_{v,füll}, \quad (51)$$

die Wandreibungslast im Trichter ist

$$p_{tf} = F_f \cdot \mu_h \cdot p_{v,fill} \quad (52)$$

- **Entleerungslasten:**

Mit

$$\varphi_{wh} = \arctan \mu_h \quad \text{und} \quad \varepsilon_{ent} = \varphi_{wh} + \arcsin \left( \frac{\sin \varphi_{wh}}{\sin \varphi_i} \right) \quad (53), (54)$$

und den Parametern

$$F_e = \frac{1 + \sin \varphi_i \cdot \cos \varepsilon_{ent}}{1 - \sin \varphi_i \cdot \cos(2 \cdot \beta + \varepsilon_{ent})} \quad \text{und} \quad (55)$$

$$n_{Trichter,Entleer} = S \cdot \left( F_e \cdot \mu_h \cdot \frac{1}{\tan \beta} + F_e \right) - 2 \quad (56)$$

berechnet sich die Vertikallast aus

$$p_{v,ent} = \left( \frac{\gamma \cdot h_h}{n_{Trichter,Entleer} - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{h_x}{h_h} \right) - \left( \frac{h_x}{h_h} \right)^{n_{Trichter,Entleer}} \right] + p_{vft} \cdot \left( \frac{h_x}{h_h} \right). \quad (57)$$

Die Last senkrecht auf die Trichterwand ergibt sich dann aus

$$p_{ne} = F_e \cdot p_{v,ent} \quad (58)$$

und die Trichterwandreibungslast aus

$$p_{te} = F_e \cdot \mu_h \cdot p_{v,ent} \quad (59)$$

### Berechnung für flache Trichter

Da in einem flachen Trichter die Wandreibung nicht voll wirksam wird [14], ist ein effektiver Wandreibungskoeffizient anzusetzen,

$$\mu_{h,eff} = \frac{1 - K_{Hor}}{2 \cdot \tan \beta} \quad (60)$$

- **Fülllasten:**

Wie auch bei steile Trichter, werden zuerst die Parameter berechnet:

$$F_f = 1 - \frac{0,2}{1 + \frac{\tan \beta}{\mu_{h,eff}}} \quad \text{und} \quad (61)$$

$$n_{Trichter} = S \cdot (1 - 0,2) \cdot \mu_{h,eff} \cdot \frac{1}{\tan \beta} \quad (62)$$

Danach wird wieder die mittlere Vertikallast im Trichter nach



$$p_{v, \text{füll}} = \left( \frac{\gamma \cdot h_h}{n_{\text{Trichter}} - 1} \right) \cdot \left[ \left( \frac{h_x}{h_h} \right) - \left( \frac{h_x}{h_h} \right)^{n_{\text{Trichter}}} \right] + p_{vft} \cdot \left( \frac{h_x}{h_h} \right) \quad (63)$$

berechnet. Für die Lasten senkrecht auf die Trichterwand folgt wieder

$$p_{nf} = F_f \cdot p_{v, \text{füll}}, \quad (64)$$

und für die Wandreibungslast im Trichter

$$p_{tf} = F_f \cdot \mu_{h, \text{eff}} \cdot p_{v, \text{füll}}. \quad (65)$$

- **Entleerungslasten:**

Da in flachen Trichtern die Entleerungslasten senkrecht auf die Trichterwände und die Wandreibungslasten wie im Lastfall Füllen berechnet werden [14], folgt für die Entleerungslasten

$$p_{v, \text{ent}} = p_{v, \text{füll}}, \quad (66)$$

$$p_{ne} = p_{nf}, \quad (67)$$

$$p_{te} = p_{tf}. \quad (68)$$

Zum Abschluss wird auch noch die Horizontallast im Trichter an der Stelle des Trichterauslaufes berechnet:

$$p_{\text{Trichter, hor}} = p_{v, \text{ent}} \cdot K_{\text{Hor}} \quad (69)$$

#### **4.5. Vergleich mit der Berechnung nach Schulze**

Dr.-Ing. Dietmar Schulze bietet auf seiner Homepage [www.dietmar-schulze.de](http://www.dietmar-schulze.de) (Stand März 2010) ein Programm zum kostenlosen Download an, mit dessen Hilfe die mittlere Vertikalspannung und die Wandnormalspannung berechnen werden können. Die Berechnung stützt sich dabei auf die zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten von Dietmar Schulze. Es wird darauf hingewiesen, dass sich das Programm aber nicht für die festigkeitsmäßige Auslegung von Silos eignet. Auch hier wird auf die Norm DIN 1055-6 [14] verwiesen.

Das Programm ist für Siloanlagen mit einfacher Geometrie ausgelegt. Nach Eingabe der Abmessungen des Siloschaftes und des Trichters und der Schüttgutkennwerte, wird der Spannungsverlauf berechnet. Dabei wird zwischen Füllzustand und Entleerungszustand unterschieden. Die Ausgabe erfolgt entweder als Diagramm oder in Tabellenform.

### 4.5.1. Vergleich mit dem Berechnungs-Programm

Als Beispiel wird für den Vergleich ein Bunker mittlerer Größe mit vertikalen Stirnflächen heran genommen. Der Bunkerschaft wird mit einer Höhe von  $1,5m$  und einer Breite von  $2m$  angenommen. Der Trichter soll  $1m$  hoch sein und die Auslaufbreite soll  $0,8m$  betragen. Der Bunker soll eine Länge von  $4m$  haben und als Schüttgut soll Betonkies angenommen werden.

**Tabelle 1:** Vergleich des Berechnungs-Programms mit den Ergebnissen der Berechnung nach Schulze. Verglichen werden die maximale Vertikalspannung und die maximale Wandnormalspannung beim Lastfall Füllen im Siloschaft.

	Berechnungs-Programm	Berechnung nach Schulze
Vertikalspannung [Pa]	22390	21657
Wandnormalspannung [Pa]	12188	11082

Vergleicht man die Ergebnisse in Tabelle 1, so erkennt man, dass die Werte annähernd gleich sind. Der Berechnung nach DIN 1055-6 liegt die Scheibenelementmethode nach Janssen zugrunde. Auch Schulze verwendet diese Berechnungsmethode bei der Berechnung der Spannungen im vertikalen Siloschaft. Allerdings unterscheidet Schulze nicht zwischen dem Lastfall Füllen und Entleeren.

**Tabelle 2:** Vergleich des Berechnungs-Programms mit den Ergebnissen der Berechnung nach Schulze. Verglichen werden die Vertikalspannung und die Wandnormalspannung beim Lastfall Füllen im Trichterauslauf.

	Berechnungs-Programm	Berechnung nach Schulze
Vertikalspannung [Pa]	25364	31974
Wandnormalspannung [Pa]	23335	23092

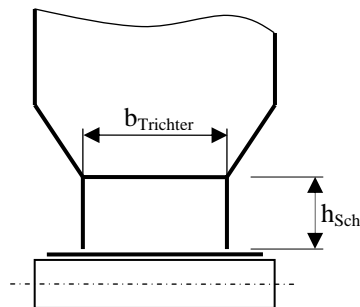
Beim Vergleich der Spannungen im Trichterauslauf fällt auf, dass die Wandnormalspannungen in etwa gleich groß sind. Die Vertikalspannungen unterscheiden sich etwas deutlicher. Der Grund dafür liegt darin, dass Schulze zur Berechnung der Spannungen im Trichter einen eigenen Berechnungsansatz verwendet.

## 5. Berechnung des Abzugbandes

### 5.1. Theoretischer Füllquerschnitt

Zur Berechnung des Austrages und der Last am Fördergurt, wird der Füllquerschnitt benötigt. Es wird angenommen, dass sich der Füllquerschnitt aus der Geometrie der Gurtmuldung und der Gleitblechbreite ergibt. Nachdem der reale, tatsächlich auftretende Füllquerschnitt vom hier angenommen unterschiedlich sein wird, wird der Querschnitt als „theoretisch“ bezeichnet und der Index *th* vergeben. Es können 3 Fälle unterschieden werden:

- Flache Gurtführung



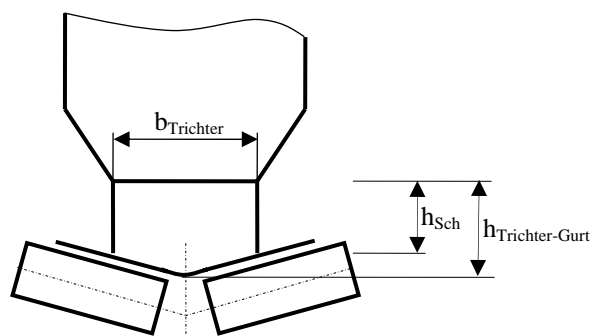
**Abbildung 13:** Schematische Darstellung des Füllquerschnittes bei flacher Gurtführung.

Der Querschnitt errechnet sich dann aus

$$A_{th} = b_{Trichter} \cdot h_{Sch}, \quad (70)$$

wobei  $h_{Sch}$  die Höhe der Schurre ist.

- 2-teilige Gurtmuldung

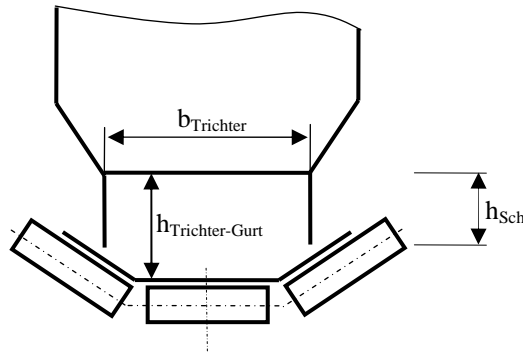


**Abbildung 14:** Schematische Darstellung des Füllquerschnittes bei 2-teiliger Gurtmuldung.

In diesem Fall erhält man den Querschnitt aus

$$A_{th} = (b_{Trichter} \cdot h_{Sch}) + \left[ \frac{1}{2} \cdot b_{Trichter} \cdot (h_{Trichter-Gurt} - h_{Sch}) \right]. \quad (71)$$

- 3-teilige Gurtmuldung



**Abbildung 15:** Schematische Darstellung des Füllquerschnittes bei 3-teiliger Gurtmuldung.

Die Formel für den Querschnitt lautet dann

$$A_{th} = (b_{Trichter} \cdot h_{Sch}) + [l_M \cdot (h_{Trichter-Gurt} - h_{Sch})] + \left( \frac{b_{Trichter} - l_M}{2} \right) \cdot (h_{Trichter-Gurt} - h_{Sch}), \quad (72)$$

wobei  $l_M$  die Mantellänge der mittleren Gurtrolle ist.

Anschließend wird noch die nutzbare Gurtbreite nach [14] bestimmt. Bei einer Gurtbreite  $b_{Gurt} \leq 2m$  folgt für die nutzbare Gurtbreite

$$b_{Gurt,nutz} = 0,9 \cdot (b_{Gurt} \cdot 1000) - 50. \quad (73)$$

Da die Breite des Gurtes in Metern eingegeben werden muss, wird  $b_{Gurt}$  mit 1000 multipliziert und somit die nutzbare Gurtbreite  $b_{Gurt,nutz}$  in Millimetern ausgegeben.

Bei  $b_{Gurt} > 2m$  folgt

$$b_{Gurt,nutz} = (b_{Gurt} \cdot 1000) - 250. \quad (74)$$

## 5.2. Berechnung der Austragkenngrößen

Dem Anwender stehen 3 Möglichkeiten zur Verfügung, um den Austrag zu bestimmen. Entweder über die gewünschte Fördergeschwindigkeit, den gewünschten Volumenstrom oder den Massenstrom. Die jeweils nicht eingegebenen Kenngrößen werden berechnet. Da für die

Berechnung der Ströme der theoretische Füllquerschnitt gebraucht wird, werden auch diese als „theoretische“ Ströme bezeichnet und mit dem Index  $th$  versehen.

- Bei Eingabe der Fördergeschwindigkeit  $v$  folgt für den theoretischen Volumenstrom

$$I_{V,th} = v \cdot A_{th}, \quad (75)$$

und für den theoretischen Massenstrom

$$I_{m,th} = \frac{I_{V,th} \cdot \gamma}{g}. \quad (76)$$

- Bei Eingabe eines gewünschten Volumenstroms  $I_{V,th}$  berechnet sich die Fördergeschwindigkeit aus

$$v = \frac{I_{V,th}}{A_{th}}, \quad (77)$$

und der theoretische Massenstrom wieder aus

$$I_{m,th} = \frac{I_{V,th} \cdot \gamma}{g}. \quad (78)$$

- Bei Eingabe eines gewünschten Massenstroms  $I_{m,th}$  folgt für den theoretischen Volumenstrom

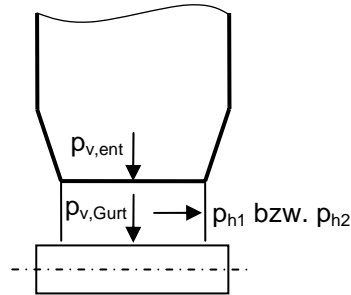
$$I_{V,th} = \frac{I_{m,th} \cdot g}{\gamma} \quad (79)$$

und für die Fördergeschwindigkeit

$$v = \frac{I_{V,th}}{A_{th}}. \quad (80)$$

### **5.3. Berechnung der Widerstände**

Bevor die Gurtwiderstände berechnet werden und damit das Abzugsband dimensioniert wird, müssen noch die dafür notwendigen Drücke ermittelt werden.



**Abbildung 16:** Drücke zur Berechnung der Gurtwiderstände.

Im Abschnitt 4.4. wurde die vertikale Last am Trichterausgang berechnet. Der Druck auf den Gurt muss daher noch um einen Anteil  $p_{v,Sch,2}$  erhöht werden. Dabei wird wieder nach [14] vorgegangen. Dazu wurde angenommen, dass unter dem Trichter wieder ein „Silo“ angeschlossen ist. Dieser hat die Abmessungen der Bunkerlänge und der Breite des Bunkerauslaufes. Die Höhe ist im Falle einer flachen Gurtführung die der Schurre, während im Fall der 2-teiligen oder 3-teiligen Gurtmuldung die Höhe zwischen Trichterunterkante und Gurt im Bereich der mittleren Tragrolle gewählt wird. Um diese Unterscheidung zu gewähren, wurde eine Variable  $y$  eingeführt. Diese ist im Fall der 2- oder 3-teiligen Gurtmuldung dementsprechend

$$y = h_{\text{Trichter-Gurt}}, \quad (81)$$

und bei flacher Gurtführung

$$y = h_{\text{Sch}}. \quad (82)$$

Dann erfolgt wieder die Unterscheidung in *schlanke Silos* und *niedrige Silos und Silos mittlerer Schlankheit*.

- **Niedrigen Silos und Silos mittlerer Schlankheit,  $2,0 > \frac{y}{b_{\text{Trichter}}} > 0,4$ :**

Der Druck in vertikaler Richtung berechnet sich nach

$$P_{v,Sch,2} = \gamma \cdot z_{v,Sch,v}. \quad (83)$$

Nach [14] ist  $z_v$  definiert als

$$z_v = h_o - \frac{1}{n+1} \cdot \left( z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2 \cdot h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right), \quad (84)$$

wobei  $h_o$  der vertikale Abstand zwischen der äquivalenten Schüttgutoberfläche und der höchstgelegenen Kontaktstelle vom Schüttgut mit der Wand ist. In diesem Fall

entspricht die äquivalente Schüttgutoberfläche der tatsächlichen und daher ist  $h_o = 0$ .

Die Gleichung (84) vereinfacht sich daher zu

$$z_{v,Sch,v} = -\frac{1}{n_{Sch,v}+1} \cdot \left( z_o - \frac{(y+z_o)^{n_{Sch,v}+1}}{(z_o)^{n_{Sch,v}}} \right), \quad (85)$$

und nach [14]

$$n = -(1 + \tan \varphi_r) \cdot \left( 1 - \frac{h_o}{z_o} \right) \quad (86)$$

vereinfacht sich zu

$$n_{Sch,v} = -(1 + \tan \varphi_r). \quad (87)$$

Mit

$$A_{Sch,v} = b_{Trichter} \cdot l_2 \quad \text{und} \quad U_{Sch,v} = 2 \cdot (b_{Trichter} + l_2) \quad (88), (89)$$

folgt

$$z_{o,Sch,v} = \frac{1}{K_{Hor} \cdot \mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,v}}{U_{Sch,v}}. \quad (90)$$

- **Schlanke Silos**,  $\frac{y}{b_{Trichter}} \geq 2,0$  :

Im Falle eines „schlanken Silos“ unter dem Trichter, folgt wieder mit

$$A_{Sch,v} = b_{Trichter} \cdot l_2 \quad \text{und} \quad U_{Sch,v} = 2 \cdot (b_{Trichter} + l_2) \quad (91), (92)$$

$$z_{o,Sch,v} = \frac{1}{K_{Hor} \cdot \mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,v}}{U_{Sch,v}}. \quad (93)$$

Mit der asymptotischen Horizontallast

$$p_{ho,Sch,v} = \frac{\gamma}{\mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,v}}{U_{Sch,v}} \quad (94)$$

und dem Tiefenvariationskoeffizienten nach Janssen

$$Y_{J,Sch,v} = 1 - e^{-\frac{y}{z_{o,Sch,v}}} \quad (95)$$

folgt schließlich für den Druck

$$p_{v,Sch,2} = \frac{p_{ho,Sch,v} \cdot Y_{J,Sch,v}}{K_{Hor}}. \quad (96)$$

Der vertikale Druck auf den Gurt ergibt sich schließlich aus

$$p_{v,Gurt} = p_{v,ent} + p_{v,Sch,2}. \quad (97)$$

### 5.4. Widerstand durch den Abzug

Beim Abzug des Schüttgutes entsteht der größte Widerstand für das Förderband. Es muss das Gut über die Fläche des Trichterausganges abgeschert werden. Die Widerstandskraft berechnet sich aus der Trichteröffnungsfläche, dem dort herrschenden vertikalen Druck und dem Reibungskoeffizienten im Inneren des Schüttgutes,

$$F_{\text{Abzug}} = b_{\text{Trichter}} \cdot l_2 \cdot p_{v,\text{ent}} \cdot \tan \varphi_i \quad (98)$$

### 5.5. Schurrenwiderstände

Zur Berechnung der Widerstände, hervorgerufen aufgrund der Reibung zwischen Schurrenblech und dem Schüttgut, wird unterschieden zwischen dem Widerstand aufgrund der Schurre unter dem Trichter (Bereich 2),  $F_{\text{Schurre},2}$ , und, falls dort eine Schurre vorhanden ist, dem Widerstand aufgrund der Schurre außerhalb des Trichters (Bereich 1),  $F_{\text{Schurre},1}$ .

Um diese Widerstände zu berechnen, müssen zuvor die horizontalen Drücke auf das Schurrenblech  $p_{h1}$  und  $p_{h2}$ , in der Höhe  $\frac{h_{\text{Sch}}}{2}$  bestimmt werden.

Dabei erfolgt die Berechnung wie schon zuvor nach [14] wieder unter der Modellannahme eines „Silos“ unter dem Trichter. Für beide Drücke wird für die Koordinate  $z$  die Mitte des Schurrenbleches gewählt, um den durchschnittlichen horizontalen Druck auf das Blech zu erhalten,

$$z_{\text{Sch}} = \frac{h_{\text{Sch}}}{2} \quad (99)$$

#### Schurre im Bereich 1

Die Berechnung erfolgt wie im Kapitel zuvor.

Niedrige Silos und Silos mittlerer Schlankheit,  $2,0 > \frac{h_{\text{Sch}}}{b_{\text{Trichter}}} > 0,4$ :

$$A_{\text{Sch},1} = b_{\text{Trichter}} \cdot l_{\text{Sch}} \quad \text{und} \quad U_{\text{Sch},1} = 2 \cdot (b_{\text{Trichter}} + l_{\text{Sch}}) \quad (100)$$

$$p_{ho,\text{Sch},1} = \frac{\gamma}{\mu_{\text{Sch}}} \cdot \frac{A_{\text{Sch},1}}{U_{\text{Sch},1}} \quad (101)$$

$$n_{\text{Sch},1} = -(1 + \tan \varphi_r) \quad (102)$$



$$z_{o,Sch,1} = \frac{1}{K_{Hor} \cdot \mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,1}}{U_{Sch,1}} \quad (103)$$

$$Y_{R,Sch,1} = 1 - \left[ \left( \frac{z_{Sch}}{z_{o,Sch,1}} \right) + 1 \right]^{n_{Sch,1}} \quad (104)$$

$$P_{h,Sch,1} = P_{ho,Sch,1} \cdot Y_{R,Sch,1} \quad (105)$$

Schlanke Silos,  $\frac{h_{Sch}}{b_{Trichter}} \geq 2,0$ :

$$Y_{J,Sch,1} = 1 - e^{-\frac{z_{Sch}}{z_{o,Sch,1}}} \quad (106)$$

$$P_{h,Sch,1} = P_{ho,Sch,1} \cdot Y_{J,Sch,1} \quad (107)$$

Daraus errechnet sich der Horizontale Druck in der Höhe  $\frac{h_{Sch}}{2}$  zu

$$P_{h1} = P_{h,Sch,1} \quad (108)$$

und der Widerstand ergibt sich zu

$$F_{Schurre,1} = 2 \cdot l_{Sch} \cdot h_{Sch} \cdot P_{h1} \cdot \mu_{Sch} \quad (109)$$

### Schurre im Bereich 2

Die Berechnung erfolgt wie für den Bereich 1.

Niedrige Silos und Silos mittlerer Schlankheit,  $2,0 > \frac{h_{Sch}}{b_{Trichter}} > 0,4$ :

$$A_{Sch,2} = b_{Trichter} \cdot l_2 \text{ und } U_{Sch,2} = 2 \cdot (b_{Trichter} + l_2) \quad (110)$$

$$P_{ho,Sch,2} = \frac{\gamma}{\mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,2}}{U_{Sch,2}} \quad (111)$$

$$n_{Sch,2} = -(1 + \tan \varphi_r) \quad (112)$$

$$z_{o,Sch,2} = \frac{1}{K_{Hor} \cdot \mu_{Sch}} \cdot \frac{A_{Sch,2}}{U_{Sch,2}} \quad (113)$$

$$Y_{R,Sch,2} = 1 - \left[ \left( \frac{z_{Sch}}{z_{o,Sch,2}} \right) + 1 \right]^{n_{Sch,2}} \quad (114)$$

$$P_{h,Sch,2} = P_{ho,Sch,2} \cdot Y_{R,Sch,2} \quad (115)$$

Schlanke Silos,  $\frac{h_{Sch}}{b_{Trichter}} \geq 2,0$  :

$$Y_{J,Sch,2} = 1 - e^{-\frac{z_{Sch}}{z_{o,Sch,2}}} \quad (116)$$

$$P_{h,Sch,2} = P_{ho,Sch,2} \cdot Y_{J,Sch,2} \quad (117)$$

Daraus errechnet sich der Horizontale Druck in der Höhe  $\frac{h_{Sch}}{2}$  zu

$$P_{h2} = P_{h,Sch,2} + P_{Trichter,hor} \quad (118)$$

und der Widerstand ergibt sich zu

$$F_{Schurre,2} = 2 \cdot l_2 \cdot h_{Sch} \cdot P_{h2} \cdot \mu_{Sch} \cdot \quad (119)$$

Schließlich folgt für den gesamten Schurrenwiderstand

$$F_{Schurre} = F_{Schurre,1} + F_{Schurre,2} \cdot \quad (120)$$

## 5.6. Hauptwiderstände nach DIN 22101

Nach DIN22101 [15] erfolgt die Berechnung des Hauptwiderstandes nach

$$F_{H,i} = l_i \cdot f_i \cdot g \cdot [m'_{R,i} + (m'_G + m'_{L,i}) \cdot \cos \delta] \cdot \quad (121)$$

Dabei werden die Teilabschnitte  $i=1,2,3$  unterschieden. Ebenso erfolgt eine Unterscheidung in Obertrum ( $o$ ) und Untertrum ( $u$ ).

Die Streckenlast  $m'_G$  infolge des Gurtes ist in allen Teilabschnitten gleich, aber wahrscheinlich für den Anwender unbekannt. Dafür ist das Gewicht des Gurtes pro  $m^2$  in den meisten Katalogen der Hersteller angegeben. Die Umrechnung erfolgt nach

$$m'_G \left[ \frac{kg}{m} \right] = m_G \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \cdot b_{Gurt} [m] \cdot \quad (122)$$

Die Streckenlast infolge drehender Tragrollenteile wird in der Berechnung vernachlässigt, also

$$m'_{R,u,i} = m'_{R,o,i} = m'_{R,i} = 0 \cdot \quad (123)$$

Die Streckenlasten infolge des Fördergutes lauten:

$$\text{Obertrum: } m'_{L,o,1} = \frac{A_{th} \cdot \gamma}{g} \quad (124)$$

$$m'_{L,o,2} = \frac{p_{v,Gurt} \cdot b_{Trichter}}{g} \quad (125)$$

$$m'_{L,o,3} = 0 \quad (126)$$

$$\text{Untertrum: } m'_{L,u,1} = m'_{L,u,2} = m'_{L,u,3} = m'_{L,u} = 0 \quad (127)$$

Des Weiteren wird in jedem Teilabschnitt der gleiche fiktive Reibungsbeiwert  $f=f_i$  angenommen und weiters, dass es sich ausschließlich um horizontale Förderung handelt,

$$\delta = 0 \text{ bzw. } \cos \delta = 1. \quad (128)$$

Daraus resultieren die Hauptwiderstände der Teilabschnitte zu

$$F_{H,o,1} = l_1 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,o,1}) \quad (129)$$

$$F_{H,o,2} = l_2 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,o,2}) \quad (130)$$

$$F_{H,o,3} = l_3 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,o,3}) \quad (131)$$

$$F_{H,u,1} = l_1 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,u}) \quad (132)$$

$$F_{H,u,2} = l_2 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,u}) \quad (133)$$

$$F_{H,u,3} = l_3 \cdot f \cdot g \cdot (m'_G + m'_{L,u}) \quad (134)$$

Der gesamte Hauptwiderstand resultiert dann aus der Summe der Hauptwiderstände der Teilabschnitte, nach

$$F_H = F_{H,o,1} + F_{H,o,2} + F_{H,o,3} + F_{H,u,1} + F_{H,u,2} + F_{H,u,3} + F_{Abzug} + F_{Schurre}. \quad (135)$$

Nach [15] können auch noch Sonder- und Nebenwiderstände berechnet werden. Dies wird hier vernachlässigt, da die größten Nebenwiderstände durch  $F_{Abzug}$  und  $F_{Schurre}$  berücksichtigt wurden. Dennoch besteht die Möglichkeit, im Berechnungs-Programm Werte für alle nicht berücksichtigten Widerstände einzugeben (z. Bsp. Widerstand durch einen Gurtreiniger oder durch zusätzliche Gleitbleche). Dann ergibt sich der gesamte Bewegungswiderstand zu

$$F_W = F_H + F_N + F_S. \quad (136)$$

### 5.7. Leistungsbedarf des Förderers

Der Leistungsbedarf des Förderers ergibt sich als Produkt sämtlicher Bewegungswiderstände und der Fördergeschwindigkeit [15],

$$P_W = \frac{F_W \cdot v}{1000} \quad [\text{kW}]. \quad (137)$$

Berücksichtigt man den Gesamtwirkungsgrad aller Übertragungsglieder zwischen Motor- und Trommelwelle, so errechnet sich die erforderliche Gesamtleistung an der Motorwelle nach [15] zu

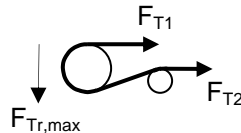
$$P_M = \frac{P_W}{\eta_{ges}}. \quad (138)$$

### 5.8. Gurtzugkräfte

Zur Berechnung der Gurtzugkräfte wird zuerst die maximal auftretende Anlauf-Trommelumfangskraft ermittelt. Diese ergibt sich nach [15] aus

$$F_{Tr,max} = p_A \cdot F_W, \quad (139)$$

wobei  $p_A$  der Anlauffaktor ist. Dieser Faktor dient als Begrenzung der Trommelumfangskraft beim Hochlaufvorgang eines Gurtförderers und liegt nach [12] zwischen 1,3 und 1,7.



**Abbildung 17:** Darstellung der ablaufenden und auflaufenden Trumkraft.

Aufgrund der nun vorliegenden Kenntnis der Trommelumfangskraft, kann über die umgeformte Eytelweinsche Gleichung die ablaufende Trumkraft  $F_{T2}$  ermittelt werden,

$$F_{T2} \geq F_{Tr,max} \cdot \frac{1}{e^{\mu_{Trommel} \cdot \alpha} - 1}. \quad (140)$$

Dann können die Trumkräfte an den einzelnen Teilabschnitten berechnet werden:

$$F_{T3} = F_{T2} + F_{H,u,1} + F_{H,u,2} + F_{H,u,3} \quad (141)$$

$$F_{T4} = F_{T3} \quad (142)$$

$$F_{T5} = F_{T4} + F_{H,o,3} \quad (143)$$

$$F_{T6} = F_{T6} + F_{H,o,2} + F_{Abzug} + F_{Schurre,2} \quad (144)$$

$$F_{T1} = F_{T6} + F_{H,o,1} + F_{Schurre,1} \quad (145)$$

Es muss sichergestellt sein, dass unter allen Betriebszuständen der Reibschluss an der Antriebstrommel erhalten bleibt [9]. Darum wird zur Kontrolle in die Eytelweinsche Gleichung eingesetzt,

$$\frac{F_{T1}}{F_{T2}} \leq e^{\mu_{Trommel} \cdot \alpha} \quad (146)$$

### 5.9. Erforderlicher Tragrollenabstand

In DIN22101 [15] ist die Vorgehensweise zur Bestimmung von Mindestgurtzugkräften zur Begrenzung des Durchhanges und zur einwandfreien Gurtführung beschrieben. Da im Berechnungs-Programm die Gurtzugkräfte berechnet werden, kann durch Umformung der Gleichungen aus [15] der erforderliche Tragrollenabstand berechnet werden. Dazu muss der größte zugelassene Durchhang des Gurtes  $f_{zul}$  bezogen auf den Tragrollenabstand  $l_{zul}$  eingegeben werden,

$$h_{rel,zul} = \left( \frac{f}{l} \right)_{zul} \quad (147)$$

Dieser liegt laut [12] im Bereich von 0,5% bis 1,5%. Der erforderliche Tragrollenabstand ergibt sich dann im Obertrum

$$\text{im Abschnitt 1 zu } l_{R,o,1} = \frac{8 \cdot h_{rel,zul} \cdot F_{T6}}{g \cdot (m'_G + m'_{L,o,1})}, \quad (148)$$

$$\text{im Abschnitt 2 zu } l_{R,o,2} = \frac{8 \cdot h_{rel,zul} \cdot F_{T5}}{g \cdot (m'_G + m'_{L,o,2})}, \quad (149)$$

$$\text{im Abschnitt 3 zu } l_{R,o,3} = \frac{8 \cdot h_{rel,zul} \cdot F_{T4}}{g \cdot (m'_G + m'_{L,o,3})} \quad (150)$$

$$\text{und im Untertrum zu } l_{R,u} = \frac{8 \cdot h_{rel,zul} \cdot F_{T2}}{g \cdot m'_G} \quad (151)$$

Sollte der mindest erforderliche Tragrollenabstand aufgrund der Durchmesser der Tragrollen  $d_R$  nicht realisierbar sein, d. h. ist

$$d_R + 10\text{mm} > l_{R,o/u,i}, \quad (152)$$

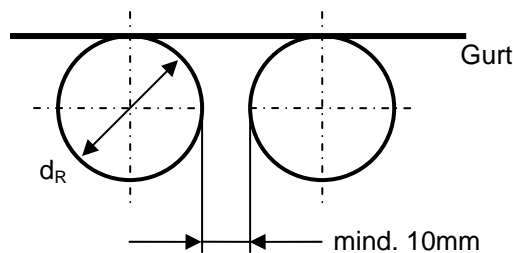
dann wird der vorhandene Durchhang  $f_{vorh}$ , der vorhandene relative Durchhang  $h_{rel,vorh}$  und die dafür mindestens erforderliche Gurtzugkraft  $F_{T,f,min}$  wie folgt berechnet,

$$f_{vorh} = \frac{g \cdot (m'_G + m'_{L,o/u,i}) \cdot d_R^2}{F_{T,7-i}} \quad (153)$$

$$h_{rel,vorh} = \frac{f_{vorh}}{d_R} \quad (154)$$

$$F_{T,f,min} = \frac{g \cdot (m'_G + m'_{L,o/u,i}) \cdot d_R}{8 \cdot h_{rel,zul}}. \quad (155)$$

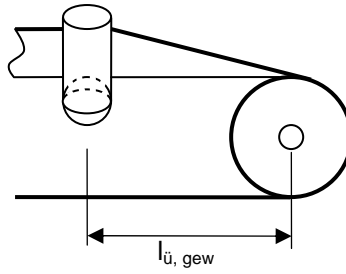
Die Bedingung dafür erhält man aus folgender Überlegung: Werden zwei Tragrollen so angeordnet, dass sie einander berühren, ist dies der minimal mögliche Abstand zwischen den Tragrollen. In der Praxis wird mit einem Mindestabstand von 10mm gerechnet.



**Abbildung 18:** Schematische Darstellung des angenommenen Mindestabstandes der Tragrollen von 10mm

## 5.10. Muldungsübergang und Gurtzugkraftverteilung

Liegt eine 2- oder 3-teilige Gurtmuldung vor, so muss laut [15] eine Mindestlänge des Muldungsüberganges berechnet werden.



**Abbildung 19:** Länge des Muldungsüberganges.

Unter der Voraussetzung, dass die obere Mantellinie der Trommel in der Achse der Mantellinie der mittleren Rolle der Tragrollenstation liegt ( $h_{Tr} = 0$ ), vereinfacht sich die Berechnung des Muldungsüberganges und der Gurtzugkraftverteilung nach [15] erheblich. Die Formeln für Textil-Fördergurte lauten:

$$h_{K,1} = h_{K,0} - 0 = h_{K,0} \quad (156)$$

$$l_{ü, \min} = c_{\ddot{u}} \cdot h_{K,0} \quad (157)$$

$$l_k = \sqrt{l_{\ddot{u}}^2 + 2 \cdot b_s^2 - 2 \cdot b_s \cdot (b_s \cdot \cos \lambda)} \quad (158)$$

Bei Stahlseil-Fördergurten lauten die Formeln mit  $h_{Tr} = 0$  und  $h_{K,1} = h_{K,0} - 0 = h_{K,0}$ :

$$l_{\ddot{u},c} = l_{\ddot{u}} + 60 \cdot h_{K,0} \cdot \left( 1 + \frac{h_{Tr, \max}}{2 \cdot h_{Tr, \max}} \right)$$

$$l_{\ddot{u},c} = l_{\ddot{u}} + 60 \cdot h_{K,0} \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \right)$$

$$l_{\ddot{u},c} = l_{\ddot{u}} + 60 \cdot h_{K,0} \cdot \left( \frac{3}{2} \right)$$

$$l_{\ddot{u},c} = l_{\ddot{u}} + 90 \cdot h_{K,0} \quad (159)$$

und

$$\Delta k = \frac{\sqrt{l_{\ddot{u}}^2 + 2 \cdot b_s^2 + 2 \cdot b_s \cdot (b_s \cdot \cos \lambda)} - l_{\ddot{u}}}{l_{\ddot{u},c}} \cdot E_{IGk} \quad (160)$$

Der Beiwert  $c_{\ddot{u}}$  zur Berechnung der Mindestlänge des Muldungsüberganges beträgt für Textil-Fördergurte  $c_{\ddot{u}}=8,5$  und für Stahlseil-Fördergurte  $c_{\ddot{u}}=14$ . Der Abstand der Gurtkante zum ebenen Gurtboden  $h_{K,0}$  errechnet sich für eine 3-teilige Gurtführung aus

$$h_{K,0} = \frac{b_{Gurt, nutz} - l_M}{2} \cdot \tan \lambda \quad (161)$$

und für eine 2-teilige Gurtführung aus

$$h_{K,0} = \frac{b_{Gurt,nutz}}{2} \cdot \tan \lambda . \quad (162)$$

Damit kann die Mindestlänge des Muldungsüberganges berechnet werden. Diese wird sehr genau berechnet und es ist unwahrscheinlich, dass das Ergebnis eine runde Zahl ist und dass diese errechnete Mindestlänge auch tatsächlich ausgeführt wird. Daher erfolgt eine Abfrage der gewählten Mindestlänge, wobei  $l_{ü,gew} > l_{ü,min}$  gelten muss.

Bei der Berechnung der Gurtzugkraftverteilung wurde die auf die Breite bezogene Gurtkraft  $k$  mit der größten vorkommenden Gurtzugkraft  $F_{T1}$  gebildet.

$$k = \frac{F_{T1}}{b_{Gurt}} \quad (163)$$

Der auf einer Seitenrolle aufliegender Teil des Gurtes  $b_s$  errechnet sich bei 3-teiliger Gurtführung zu

$$b_s = \frac{b_{Gurt} - l_M}{2} . \quad (164)$$

und bei 2-teiliger zu

$$b_s = \frac{b_{Gurt}}{2} . \quad (165)$$

Für Textil-Fördergurte kann mit der Länge der Gurtkante im Muldungsbereich

$$l_k = \sqrt{l_{ü}^2 + 2 \cdot b_s^2 - 2 \cdot b_s \cdot (b_s \cdot \cos \lambda)} \quad (166)$$

und der Differenz der breitenbezogenen Gurtzugkraft zwischen Gurtrand und Gurtmitte

$$\Delta k = \frac{l_k - l_{ü}}{l_{ü}} \cdot E_{LGk} \quad (167)$$

die breitenbezogene Gurtzugkraft im Mittenbereich des Gurtes

$$k_M = k - \frac{b_s}{b_{Gurt}} \cdot \Delta k \quad (168)$$

und weiters die breitenbezogene Gurtzugkraft im Randbereich des Gurtes

$$k_K = k_M + \Delta k \quad (169)$$

berechnet werden. [15]

Selbiges gilt auch für Stahlseilfördergurte, allerdings wird für die Differenz der breitenbezogenen Gurtzugkraft zwischen Gurtrand und Gurtmitte die Länge

$$l_{ü,c} = l_{ü} + 90 \cdot h_{K,0} \quad (170)$$



eingesetzt:

$$\Delta k = \frac{\sqrt{l_{ii}^2 + 2 \cdot b_s^2 + 2 \cdot b_s \cdot (b_s \cdot \cos \lambda)} - l_{ii}}{l_{ii,c}} \cdot E_{IGk} \cdot \quad (171)$$

Die breitenbezogene Gurtzugkraft im Mittenbereich des Gurtes und die breitenbezogene Gurtzugkraft im Randbereich des Gurtes errechnen sich dann aus

$$k_M = k - \frac{b_s}{b_{Gurt}} \cdot \Delta k \quad \text{und} \quad (172)$$

$$k_K = 1,25 \cdot (k_M + \Delta k). \quad (173)$$

Bei flacher Gurtführung gibt es keine erhöhten Kräfte aufgrund der Muldung und es kann mit

$$k = \frac{F_{T1}}{b_{Gurt}} \quad (174)$$

$$k = k_K \quad (175)$$

angenommen werden.

### 5.11. Auslegung des Fördergurtes

Mit den Sicherheitsfaktoren  $S_0$  und  $S_1$  laut Tabelle 8 in [15] und der relativen Referenz-Zeitfestigkeit  $k_{t,rel}$  laut Tabelle 10 [15] kann die Mindest-Referenz-Zeitfestigkeit des Gurtes und der Gurtverbindung nach [15] berechnet werden aus

$$k_{t,min} = k_K \cdot S_0 \cdot S_1. \quad (176)$$

Damit lässt sich nach [15] die Mindestbruchkraft des Gurtes wie folgt berechnen,

$$k_{N,min} = \frac{k_{t,min}}{k_{t,rel}}. \quad (177)$$

Der Wert für die relative Referenz-Zeitfestigkeit beträgt für Stahlseil-Fördergurte  $k_{t,rel} = 0,45$ , für Textil-Fördergurte mit einer Einlage  $k_{t,rel} = 0,35$  und für Textil-Fördergurte mit zwei oder mehr Einlagen  $k_{t,rel} = 0,3$ .

### 5.12. *Mindestdurchmesser der Antriebstrommel*

Die Berechnung des Mindestdurchmessers der Antriebstrommeln erfolgt ebenfalls nach [15]. Demnach ergibt sich der Trommeldurchmesser nach Eingabe der Dicke des tragenden Lastzugträgers  $d_{Gk}$  aus

$$D_{Tr} = c_{Tr} \cdot d_{Gk}, \quad (178)$$

wobei der Faktor  $c_{Tr}$  aus Tabelle 13 der Norm [15] entnommen wurde. Nach Bestimmung des Trommelbelastungsfaktors

$$TBF = \frac{k}{k_{N,\min}} \cdot 8 \cdot 100\% \quad (179)$$

wird aus der Tabelle 14 der Norm [15] für die Trommelgruppe A (Antriebstrommeln und alle anderen Trommeln im Bereich hoher Gurtzugkräfte eines Förderers) der Mindestdurchmesser der Trommel  $D_{Tr,\min}$  ausgewählt.

### 5.13. *Berechnung nach Reisner*

Die Ergebnisse des Berechnungs-Programms wurden auch mit Werten von real ausgeführten Anlagen verglichen. Diese Bunkeranlagen mit Abzugsband wurden nach der im Folgenden beschriebenen Berechnungsmethode nach Reisner [10] ausgelegt und haben sich in der Praxis sehr bewährt.

Nach [10] gilt folgende Faustformel zur Berechnung der effektiven Gurtzugkraft an der Antriebstrommel für den stationären Fließzustand. Der stationäre Fließzustand ist nach [10] bei kontinuierlichem Fördererbetrieb gegeben.

$$T_E = \mu \cdot P_V \cdot B \cdot L + \sum F_X \quad (180)$$

Dabei bedeuten

- $\mu$  ...Koeffizient der inneren Reibung in der Abscherfläche,
- $P_V$  ...Belastung des Förderers durch das auflagernde Schüttgut,
- $B$  ...Breite der Trichteröffnung,
- $L$  ...Länge der Trichteröffnung,
- $\sum F_X$  ...Summe aller Reibungswiderstände, die der Antrieb im Leerbetrieb zu überwinden hat.

Der Wert des Koeffizienten der inneren Reibung wird in [10] mit  $\mu = 0,4 \dots 0,45$  angegeben. Zur Berechnung der Belastung des Förderers durch das auflagernde Schüttgut  $P_V$  wird in [10] folgende Formel angegeben:

$$P_V = (c) \cdot \gamma \cdot B \quad (181)$$

wobei

$(c)$  ...Faktor zur Berücksichtigung der Trichterform und der Schüttguteigenschaften, im Bereich von 0,8 bis 1,0.

$\gamma$  ...Schüttgewicht

ist.

Die Summe der inneren Reibungswiderstände wird in [10] mit folgender Formel annähernd erfasst:

$$\sum F_x = 0,1 \cdot \gamma \cdot L_c \cdot W^2 + 0,125 \quad (182)$$

Dabei wird vorausgesetzt, dass die Schichthöhe des Schüttgutes auf dem Förderer etwa einem Drittel der Gurtbreite entspricht.

$L_c$  ...Länge des Förderers

$W$  ...Gurtbreite

Für den Leistungsbedarf des Förderers mit einem Schlitzaustrag gilt nach [10] folgende Formel:

$$N = 2 \cdot \gamma \cdot B^2 \cdot L \cdot S, \quad (183)$$

wobei  $S$  die Gurtgeschwindigkeit ist.

Im Falle eines quadratischen oder kreisrunden Auslaufes gilt für den Leistungsbedarf nach [10]:

$$N = 1,6 \cdot \gamma \cdot B^3 \cdot S \quad (184)$$

Die obigen Formeln sind sehr stark vereinfachte Näherungsformeln, die aber nach [10] für Rohprodukte des Bergbaus anwendbar sind, nicht aber für pulverförmige Schüttgüter.

### 5.13.1. Vergleich mit dem Berechnungsprogramm

Ausgegangen wird wieder vom gleichen numerischen Beispiel, welches auch Kapitel 4.5.1. zugrunde liegt. Der Bunkerschaft wird mit einer Höhe von 1,5m und einer Breite von 2m

angenommen. Der Trichter soll  $1m$  hoch sein und die Auslaufbreite soll  $0,8m$  betragen. Der Bunker soll eine Länge von  $4m$  haben und als Schüttgut soll Betonkies angenommen werden. Weiters wird mit einer Fördergeschwindigkeit von  $3m/s$  gerechnet.

**Tabelle 3:** Vergleich des Berechnungs-Programms mit den Ergebnissen der Berechnung nach Reisner. Verglichen werden die erforderliche Antriebsleistung und die Gurtzugkraft an der Antriebstrommel.

	Berechnungs-Programm	Berechnung nach Reisner
erforderliche Antriebsleistung [kW]	30,8	35,2
Gurtzugkraft [N]	146350	43032

Man erkennt, dass die Werte der Antriebsleistung annähernd gleich sind. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass das Berechnungs-Programm den Widerstand durch ein Gleitblech unter dem Trichter mit einrechnet. Der Wert der Leistung nach Reisner ist daher um einiges größer als der Wert, der mit dem Berechnungs-Programm ermittelt wurde. Trotzdem kann man sagen, dass bei einer überschlägigen Rechnung der Ansatz nach Reisner durchaus heranzuziehen ist. Der zeitliche Aufwand ist sehr gering und das Ergebnis sollte für eine erste Dimensionierung ausreichen. Die Werte der Gurtzugkraft divergieren dagegen sehr deutlich. Dies liegt sicher daran, dass sämtliche Widerstände im Berechnungs-Programm sehr genau mit eingerechnet werden. Bei der Berechnung der Gurtzugkraft nach Reisner werden die Widerstände durch Parameter erfasst, was zu einer ungenauen Berechnung führt.

## 6. Programmaufbau

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wurde das Programm in *Microsoft® Office Excel 2003* in der darin enthaltenen Skriptsprache *Microsoft Visual Basic for Application 6.0* geschrieben. Der hohe Bekanntheitsgrad, die Möglichkeit Tabellenwerte einzubinden und die hervorragende Visualisierung waren ausschlaggebend dafür, dass dieses Programm verwendet wurde.

Bevor das Programm geschrieben wurde, wurde die rein mathematische Vorgangsweise mit Hilfe des Programms *Mathcad 2001 Professional* der Firma *MathSoft, Inc.* erstellt. Aufgrund der guten Übersicht und der Möglichkeit der schnellen Fehlerauffindung diente es aber vorwiegend als Kontrolle des eigentlichen Berechnungsprogramms.

Nach dem Öffnen der Excel-Datei erscheint ein Tabellenblatt mit einer Übersicht und der Schaltfläche zum Starten des Berechnungs-Programms. Die Übersicht dient lediglich der Zusammenfassung der Eingabe- und Ausgabedaten. Nach der Durchführung der Berechnung, erscheinen alle Werte noch einmal aufgelistet. Das hat den Vorteil, das Berechnungs-Programm nicht noch einmal starten zu müssen, um gewisse Werte nachzusehen. Die Werte in der Übersicht bleiben so lange erhalten, bis sie bei einem neuerlichen Berechnungsstart überschrieben werden, oder mithilfe der Schaltfläche „Übersicht leeren“ gelöscht werden. Die Datei enthält noch weitere Tabellenblätter. Diese beinhalten Tabellen, welche für Berechnung notwendig sind. Werden diese geändert, so werden die Werte in die Berechnung übernommen. Dies sollte beim Umgang mit dem Programm unbedingt vermieden werden, um falsche Ergebnisse zu verhindern.

### 6.1. Wertekontrolle

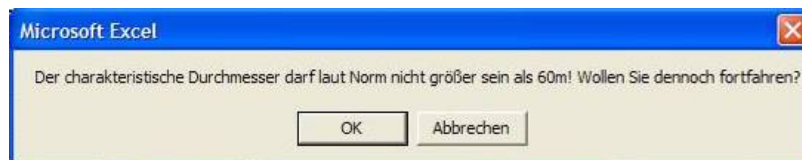
Bevor die in Kapitel 4. und 5. beschriebene Berechnung beginnt, werden vom Programm die eingegeben Werte kontrolliert. Es wird erstens kontrolliert, ob alle relevanten Daten eingegeben wurden und zweitens, ob die Eingabedaten in dem in Kapitel 3.1. erklärten Gültigkeitsbereich liegen.

Bei Fehlen eines Wertes erfolgt eine entsprechende Meldung durch ein Hinweisfenster. Bei Bestätigung des Hinweises durch einen Klick auf „OK“ gelangt der Benutzer zu dem Formular zurück, in welchem die fehlenden Werte eingegeben werden müssen.



**Abbildung 20:** Beispiel einer Meldung, die auf das Nichteingeben der Bunkerbreite hinweist.

Bei der Überprüfung der Gültigkeits- und Anwendungsbereiche hat der Benutzer die Möglichkeit, bewusst diese Bereiche zu verlassen. Zum Beispiel wird überprüft, ob der laut Norm DIN 1055-6 [14] maximal zulässige charakteristische Durchmesser des Bunkers von 60 m eingehalten wird. Ist der eingegebene Durchmesser größer, so erfolgt die in Abbildung 21 dargestellte Meldung.



**Abbildung 21:** Beispiel einer Meldung bei Vorhandensein eines Wertes, welcher nicht in dem definierten Gültigkeitsbereich liegt.

Bei einem Klick auf „Abbrechen“ wird die Berechnung beendet und der Benutzer kehrt zum ersten Eingabeformular zurück, um den Durchmesser dementsprechend zu ändern. Bei einem Klick auf „OK“ verlässt der Anwender absichtlich den Gültigkeitsbereich und die Berechnung wird fortgesetzt.

## 6.2. Formulare

Mit Visual Basic lassen sich Formulare erstellen. Formulare sind Dialogfelder, welche sich genauso verhalten wie Dialogfelder in anderen Windows-Anwendungen [11]. Somit kann auf sehr übersichtlicher Weise eine grafische Oberfläche geschaffen werden, in der Werte eingegeben und Ausgabewerte dargestellt werden können. Unterstützt wird die Ein- und Ausgabe der Daten außerdem durch Grafiken und Zeichnungen.

Die Schaltflächen „Weiter“, „Abbrechen“, „Zurück“ und „Drucken“ haben in jedem Formular dieselbe Funktion. Klickt man auf „Weiter“, so wird das nächste Formular geladen und das aktuelle ausgeblendet. Ähnlich die Funktion bei einem Klick auf „Zurück“, allerdings wird

das vorherige Formular zeigt während das aktuelle ausgeblendet wird. Mit der Taste „Abbrechen“ kann man zu jeder Zeit das Berechnungsprogramm beenden und man kehrt wieder in die Excel Tabelle zurück. Die Ergebnisformulare enthalten zusätzlich die Schaltfläche „Drucken“. Damit wird das Formular mit den Ergebniswerten ausgedruckt.

### 6.2.1. Formular 1: Einleitung

Klickt man auf die Schaltfläche „Berechnung starten“, gelangt man in das Berechnungs-Programm. Die erste Seite zeigt eine allgemeine Einleitung in das Programm.



Abbildung 22: Erstes Formular nach dem Start des Berechnungs-Programms.

### 6.2.2. Formular 2: Geometriedaten und Schüttgutauswahl

Dieses bezieht sich auf die gewünschten bzw. geforderten geometrischen Daten des Bunkers. Höhe und charakteristischer Durchmesser müssen eingegeben werden. Des Weiteren muss die Auswahl getroffen werden, ob der Querschnitt des Schüttgutspeichers rechteckig oder rund ist. Danach erfolgt die Auswahl des Schüttgutes. Abbildung 23 zeigt das Formular, wenn ein Schüttgut ausgewählt wurde, welches in der Liste nach [14] vorhanden ist. In der darauf folgenden Abbildung 24 ist das Formular für ein benutzerdefiniertes Schüttgut abgebildet. Die Felder für die Schüttgutkennwerte müssen ausgefüllt werden.

Abbildung 23: Formular zur Eingabe der Silogeometrie und zur Auswahl des Schüttgutes.

Abbildung 24: Eingabeformular, mit der Eingabe eines benutzerdefinierten Schüttgutes.

### 6.2.3. Formular 3: Eingabe der Trichterdaten

Das nächste Formular dient zur Eingabe der Trichtergeometrie. Die drei verschiedenen Möglichkeiten der Eingabe wurde in den Kapiteln 3.3. und 4.1. erklärt. Durch Anwahl eines der drei Optionsfelder „Trichterhöhe“, „Trichterauslaufbreite“ oder „Trichterhöhe und –



auslaufbreite“ und Eingabe der in der darunter liegenden Skizze eingezeichneten Abmessungen, werden alle relevanten Größen berechnet.

**Eingabe der Trichterdaten**

Geometriedaten des Trichters

Bestimmen Sie die Trichtergeometrie entweder über die Höhen oder über die Trichterauslaufbreite

Trichterhöhe       Trichterauslaufbreite       Trichterhöhe und -auslaufbreite

Trichterhöhe, gemessen von der gedachten Spitze bis zum Trichterübergang  
 $h_h =$   m

Vertikale Höhe der Trichteröffnung mit Ursprung in der Trichterspitze  
 $h_x =$   m  
 Wobei ( $h_x < h_h$ )!

Trichterneigungswinkel, gemessen in Bezug auf die vertikale Achse  
 $\beta =$   °  
 Wobei ( $5^\circ$  bis  $85^\circ$ )!

Breite der Trichteröffnung  
 $b_{\text{Trichter}} =$   0,8 m

Höhe des Trichters  
 $h_{\text{Trichter}} =$   2,5 m

Folgender Werte muss für alle drei Eingabevarianten eingegeben werden

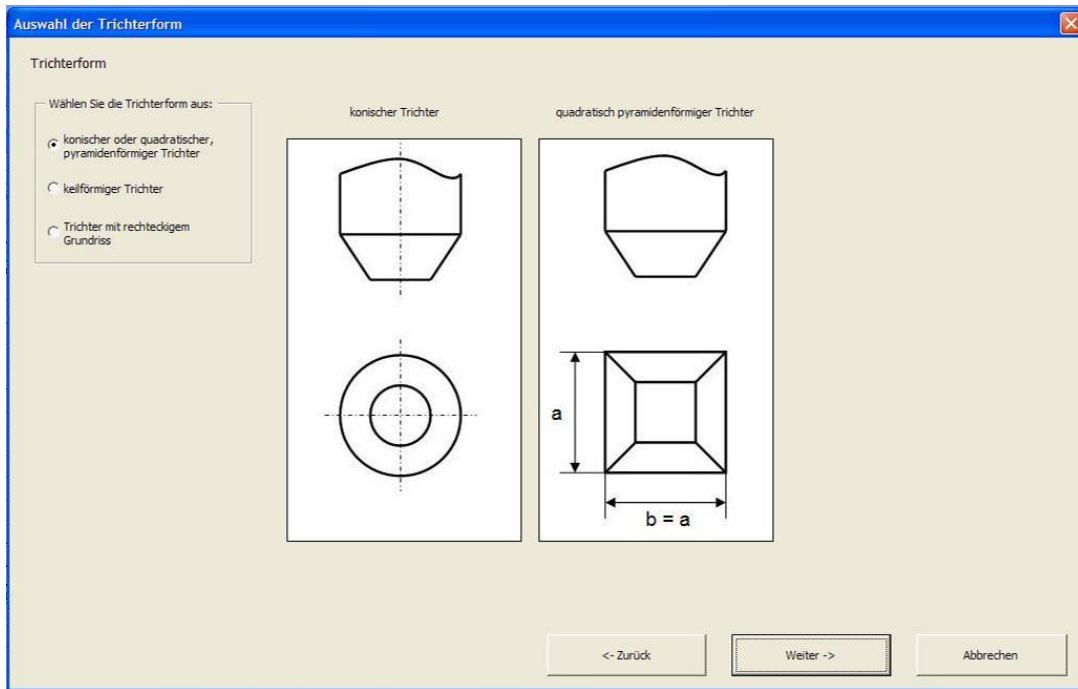
Wandreibungskoeffizient im Trichter  
 $\mu_h =$   0,6

<- Zurück      Weiter ->      Abbrechen

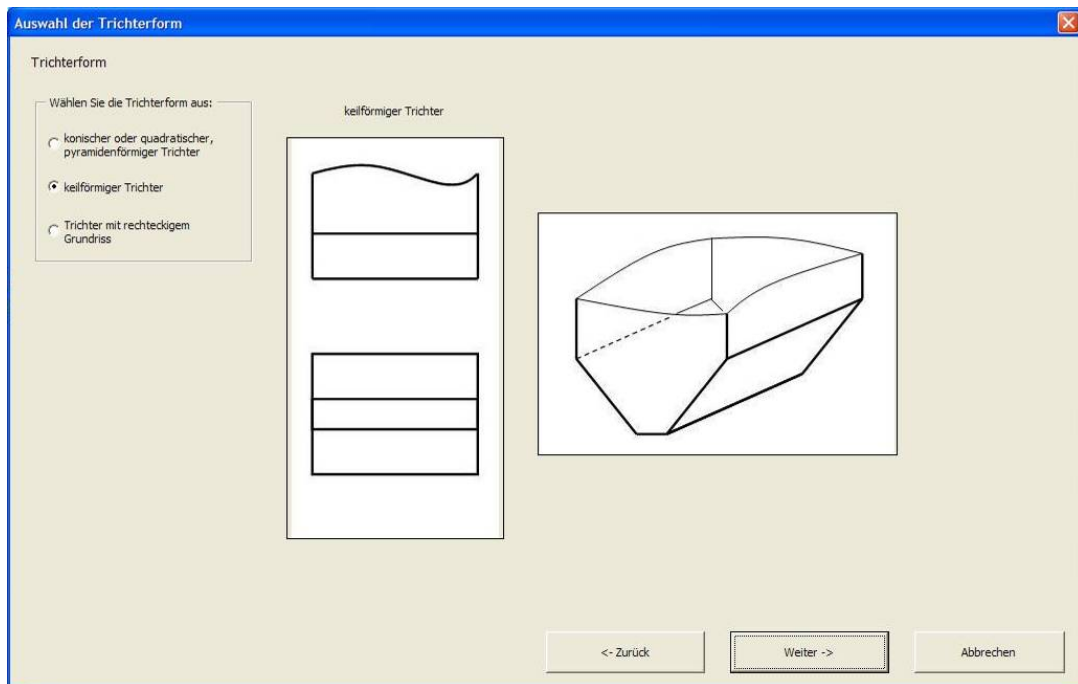
Abbildung 25: Formular für die Geometrie des Trichters.

#### 6.2.4. Formular 4: Auswahl der Trichterform

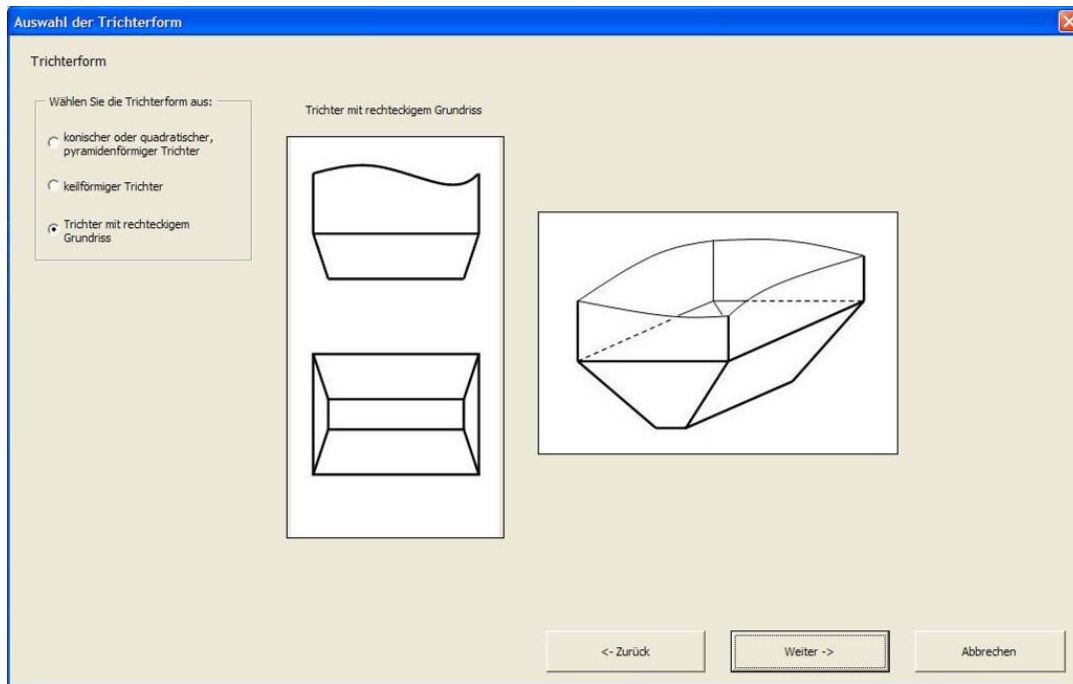
Auf dem nächsten Formular sind drei Auswahlmöglichkeiten abgebildet. Sie betreffen die Form des Trichters, welche in der Norm festgehalten ist. Das bedeutet, dass man zwischen einem konischen oder quadratisch, pyramidenförmigen Trichter, einem keilförmigen oder einem Trichter mit rechteckigem Querschnitt unterscheiden muss.



**Abbildung 26:** Formular zur Auswahl der Trichterform mit der gewählten Form: konischer oder quadratischer, pyramidenförmiger Trichter.



**Abbildung 27:** Formular zur Auswahl der Trichterform mit der gewählten Form: keilförmiger Trichter.



**Abbildung 28:** Formular zur Auswahl der Trichterform mit der gewählten Form: Trichter mit rechteckigem Grundriss.

### 6.2.5. Formular 5: Eingabe Abzugsband 1

Hier müssen die ersten Daten den Fördergurt betreffend eingegeben werden. Die Gurtmuldung und der Neigungswinkel der Stützrollen sind in der oberen Hälfte des Formulars anzugeben. Darunter befindet sich die Eingabemaske für die Länge des Fördergurtes. Einer der Austrag-Kennwerte muss nach erfolgter Auswahl im rechten Teil des Formulars angegeben werden.

Eingabe Abzugsband 1

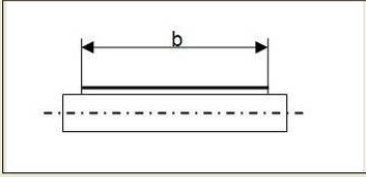
Abzugsbanddaten

Auswahl der Gurtführung

Flache Gurtführung

2teilig gemuldete Gurtführung

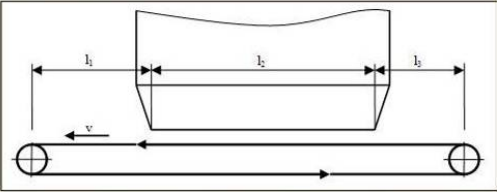
3teilig gemuldete Gurtführung



Wählen Sie die Gurtbreite aus.

b = 1200 mm

Länge der Teilabschnitte des Fördergurt



$l_1 = 3,1$  m     $l_2 = 6,715$  m     $l_3 = 1,2$  m

(Bei keilförmigen Trichtern entspricht dies der Länge a)

Austrag-Kennwerte

Gewünschte Fördergeschwindigkeit

v = 0,35 m/s

ODER

Gewünschter theor. Volumenstrom

$I_{v,th} =$  m<sup>3</sup>/s

ODER

Gewünschter theor. Massenstrom

$I_{m,th} =$  kg/s

<- Zurück    Weiter ->    Abbrechen

Abbildung 29: Formular bei Auswahl einer flachen Gurtführung.

Eingabe Abzugsband 1

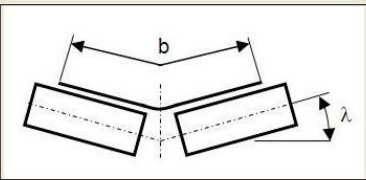
Abzugsbanddaten

Auswahl der Gurtführung

Flache Gurtführung

2teilig gemuldete Gurtführung

3teilig gemuldete Gurtführung



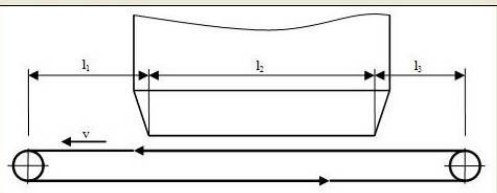
Wählen Sie den Muldungswinkel aus.

$\lambda = 15$  °

Wählen Sie die Gurtbreite aus.

b = 1200 mm

Länge der Teilabschnitte des Fördergurt



$l_1 = 3,1$  m     $l_2 = 6,715$  m     $l_3 = 1,2$  m

(Bei keilförmigen Trichtern entspricht dies der Länge a)

Austrag-Kennwerte

Gewünschte Fördergeschwindigkeit

v = 0,35 m/s

ODER

Gewünschter theor. Volumenstrom

$I_{v,th} =$  m<sup>3</sup>/s

ODER

Gewünschter theor. Massenstrom

$I_{m,th} =$  kg/s

<- Zurück    Weiter ->    Abbrechen

Abbildung 30: 2-teilige Gurtführung mit Auswahl des Muldungswinkels.

**Eingabe Abzugsband 1**

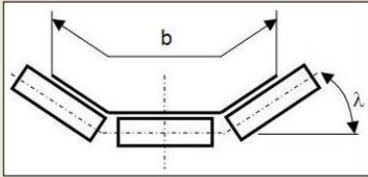
Abzugsbanddaten

Auswahl der Gurtführung

Flache Gurtführung

2teilig gemuldete Gurtführung

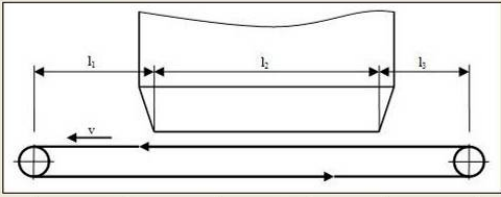
3teilig gemuldete Gurtführung



Wählen Sie den Muldwinkel aus.  $\lambda = 15^\circ$

Wählen Sie die Gurtbreite aus.  $b = 1200$  mm

Länge der Teilschnitte des Fördergurt



$l_1 = 3,1$  m  $l_2 = 6,715$  m  $l_3 = 1,2$  m

(Bei keilförmigen Trichtern entspricht dies der Länge a)

Austrag-Kennwerte

Gewünschte Fördergeschwindigkeit  $v = 0,35$  m/s

ODER

Gewünschter theor. Volumenstrom  $I_{V,th} =$  m<sup>3</sup>/s

ODER

Gewünschter theor. Massenstrom  $I_{m,th} =$  kg/s

<- Zurück Weiter -> Abbrechen

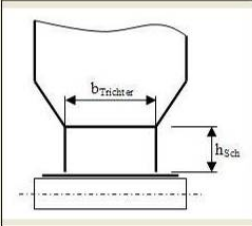
Abbildung 31: Formular bei Auswahl einer 3-teiligen Gurtführung.

### 6.2.6. Formular 6: Eingabe der Schurrengeometrie

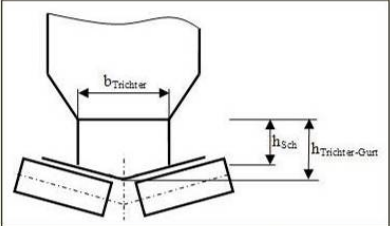
Die Höhe der Gleitbleche und die Länge im Fall eines Gleitbleches im Abschnitt 1 müssen hier eingegeben werden.

**Eingabe der Schurrengeometrie**

Geometriedaten der Schurre

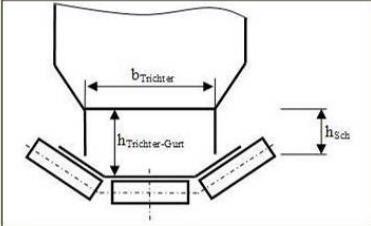


Breite der Schurre (=Breite der Trichteröffnung)  $b_{Trichter} =$  m

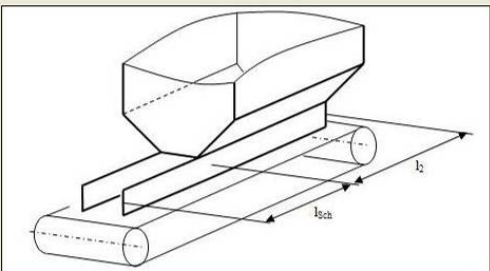


Höhe der Schurre  $h_{Sch} =$  m

Größte Höhe zwischen Trichter-Unterkante und Gurt  $h_{Trichter-Gurt} =$  m



Wandreibungskoeffizient in der Schurre  $\mu_{Sch} =$



Länge der Schurre außerhalb des Trichters  $l_{Sch} =$  m

Länge der Schurre unterhalb des Trichters  $l_2 =$  m

<- Zurück Weiter -> Abbrechen

Abbildung 32: Formular zur Eingabe der Geometrie der Gleitbleche.

## 6.2.7. Formular 7: Eingabe Abzugsband 2

Betreffend die Gurtdaten müssen noch der Umschlingungswinkel und der Reibungsbeiwert zwischen Gurt und Trommeloberfläche eingegeben werden. Der Anlauffaktor wurde wie in Kapitel 5.8. beschrieben aus [12] entnommen. Ob es sich um einen Stahlseil- oder Textil-Fördergurt handelt, ist im rechten oberen Abschnitt auszuwählen, genauso wie die Dicke des Zugträgers, Gewicht des Gurtes und der auf die Breite bezogene Elastizitätsmodul.

**Abbildung 33:** Formular in welchem unter anderem der relative Durchhang und die Art des Fördergurtes eingegeben werden muss.

Der Hauptwiderstand kann aus einer Liste entsprechender Werten ausgewählt werden. Kennt man die Widerstandswerte von etwaigen Neben- und Sonderwiderständen, so können diese hier eingegeben werden. Zur Berechnung der Tragrollenabstände muss hier der relative Gurtdurchhang und der Durchmesser der verwendeten Tragrollen eingegeben werden. Zum Abschluss des Formulars muss noch der Gesamtwirkungsgrad aller Übertragungsglieder zwischen Motor- und Trommelwelle eingegeben werden.

## 6.2.8. Formular 8: Sicherheitsfaktoren zur Gurtauslegung

Im letzten Eingabeformular müssen die Sicherheitsfaktoren  $S_0$  und  $S_I$  ausgewählt werden. Um die richtige Auswahl zu treffen, sind in den beiden Grafiken die Tabellen aus [15] abgebildet.

**Sicherheitsfaktoren zur Gurtauslegung**

Auswahl der Sicherheitsfaktoren zur Bestimmung der Mindestbruchkraft des Gurtes

Sicherheitsfaktor aufgrund der Verbindungsherstellung

$S_0 =$

Sicherheitsfaktor aufgrund der Betriebsbedingungen

$S_1 =$

Merkmale in Hinblick auf die Verbindungsherstellung	Einordnung der Merkmale		
Atmosphäre	normal	staubfrei	staubig
Schutz vor Sonneneinstrahlung	normal	sehr gut	mäßig
Lufttemperatur	mäßig	$\geq 18^\circ\text{C}$ und $\leq 22^\circ\text{C}$	$< 10^\circ\text{C}$ oder $> 30^\circ\text{C}$
Arbeitsplatz	normal	geräumig	eng
Qualifikation der Handwerker	normal	sehr gut	mäßig
Qualität des Verbindungsmaterials	normal	frisch	an der Grenze der Verwendbarkeit
Qualität des Vulkanisiergerätes	normal	sehr gut	mäßig
Sicherheitsfaktor $S_0$	1,1	bewirkt	
		Minderung	Erhöhung
		des Sicherheitsfaktors bis auf	
		1,0	1,2

Aus DIN22101:2002-08, Tabelle 8 – Bestimmung des Sicherheitsfaktors  $S_0$  durch Einstufung der Merkmale für die Verbindungsherstellung, Seite 35

Merkmal in Hinblick auf die dynamische Tüchtigkeit von Gurt und Gurtverbindungen	Einordnung der Merkmale		
Lebenserwartung	normal	niedrig	hoch
Folgeschäden bei Versagen	normal	niedrig	hoch
Chemische/physikalische Beanspruchung	normal	niedrig	hoch
Anlauf-/Stillsetzungsvorgänge	$> 3/\text{Tage}$ $< 30/\text{Tag}$	$\leq 3/\text{Tag}$	$\geq 30/\text{Tag}$
Umlauffrequenz	$> 2/\text{Stunde}$ $< 1/\text{Minute}$	$\leq 2/\text{Stunde}$	$\geq 1/\text{Minute}$
Sicherheitsfaktor $S_1$	1,7	bewirkt	
		Minderung	Erhöhung
		des Sicherheitsfaktors bis auf	
		1,5	1,9

Aus DIN22101:2002-08, Tabelle 9 – Sicherheitsfaktor  $S_1$  in Abhängigkeit von der Einstufung der Betriebsbedingungen, Seite 35

<- Zurück    Weiter ->    Abbrechen

Abbildung 34: Letztes Eingabeformular zur Auswahl der Sicherheitsfaktoren.

### 6.2.9. Formular 9: Ergebnisblatt 1

Im ersten Ergebnisformular werden die maximalen Lasten im Schaft und im Trichter angegeben. Im linken Bereich werden die horizontalen Lasten und die Wandreibungslasten sowohl für den Lastfall Füllen als auch für den Lastfall Entleeren angegeben. Des Weiteren wird die vertikale Last beim Lastfall Füllen angegeben.

**Ergebnisblatt 1**

Lasten im Schüttgut, auf vertikale Wände und im Trichter - nach DIN 1055-6

Symmetrische Lasten auf vertikale Silowände bei maximalen Füllstand am unteren Ende des Siloschafes (Maximalwerte):

Lastfall Füllen:

$p_{h,f} =$    $\text{N/m}^2$

$p_{w,f} =$    $\text{N/m}^2$

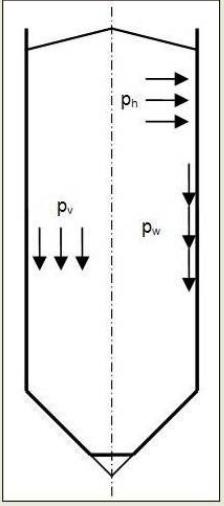
Lastfall Entleeren:

$p_{h,e} =$    $\text{N/m}^2$

$p_{w,e} =$    $\text{N/m}^2$

Vertikallast im Schüttgut nach dem Füllen

$p_v =$    $\text{N/m}^2$



Lasten auf Silotrichter bei maximalen Füllstand am unteren Ende des Trichters (Maximalwerte):

Mittlere Vertikallast am Trichterübergang

$p_{vft} =$    $\text{N/m}^2$

Lastfall Füllen:

$p_{v,f} =$    $\text{N/m}^2$

$p_{n,f} =$    $\text{N/m}^2$

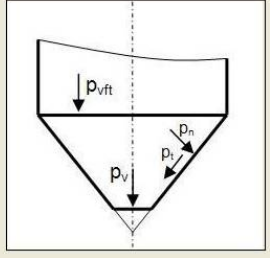
$p_{t,f} =$    $\text{N/m}^2$

Lastfall Entleeren:

$p_{v,e} =$    $\text{N/m}^2$

$p_{n,e} =$    $\text{N/m}^2$

$p_{t,e} =$    $\text{N/m}^2$



Drucken    <- Zurück    Weiter ->    Abbrechen

Abbildung 35: Ergebnisblatt mit Lasten im Bunker und im Trichter.

Die vertikale, normale und tangentielle Last auf den Silotrichter für beide Lastfälle wird im rechten Bereich des Formulars ausgegeben. Ebenso wird die mittlere Vertikallast am Trichterübergang angezeigt.

### 6.2.10. Formular 10: Ergebnisblatt 2

Je nach Verwendung einer flachen oder einer gemuldeten Gurtführung unterscheidet sich das zweite Ergebnisformular. Bei einer gemuldeten Gurtführung werden nämlich die mindestens erforderliche Länge und die gewählte Länge des Muldungsüberganges angezeigt. Bei einer flachen Gurtführung werden diese, da sie nicht vorkommen, nicht angezeigt.

Abbildung 36: Zweites Ergebnisblatt bei einem Abzugsband mit flacher Gurtführung.



**Abbildung 37:** Zweites Ergebnisblatt bei einem Abzugsband mit 2-teiliger oder 3-teiliger Gurtführung.

In beiden Fällen werden aber die wesentlichen Ergebnisse für das Abzugsband angezeigt. Die Gesamtleistung des Antriebes wird oben links angezeigt. Daneben befinden sich die drei Austragkennwerte Fördergeschwindigkeit, Volumen- und Massenstrom. Zur Auswahl des richtigen Gurtes wird die mindestens erforderliche Festigkeit des Gurtes sowie der Trommeldurchmesser angezeigt. Zusätzlich werden die Gurtzugkräfte an der Antriebstrommel angegeben. Ferner wird die erforderliche Spannkraft des Abzugsbandes angezeigt. Schließlich werden auch die mindestens erforderliche Anzahl der Tragrollen und deren Abstände angegeben. Jeweils getrennt nach Ober- und Untertrum und im Obertrum aufgeteilt in die drei Abschnitte, sind die entsprechenden Werte angegeben.

### 6.3. Module

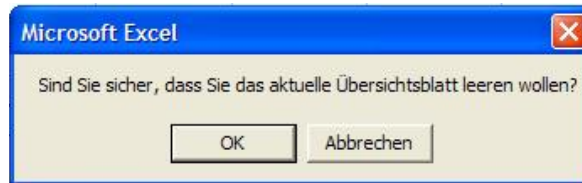
Module sind Ebenen des Visual Basic for Application Programms [11]. In einem Modul ist die Prozedur enthalten, das heißt der Code des Programms. Das Berechnungs-Programm beinhaltet zwei Module.

#### 6.3.1. Modul1

Im ersten Modul befindet sich der Code der gesamten Berechnung.

### 6.3.2. Modul2

Im zweiten Modul steht die Prozedur für das Löschen der eingegeben Werte. Die Prozedur wird über die Schaltfläche „Übersicht leeren“ im Excel-Tabellenblatt gestartet. Danach erscheint ein Hinweisfenster um zu vermeiden, dass die Daten irrtümlich gelöscht werden.



**Abbildung 38:** Hinweisfenster, nachdem im Übersichts-Tabellenblatt die Schaltfläche „Übersicht leeren“ gedrückt wurde.

Bei Bestätigung des Hinweises über die Schaltfläche „OK“ werden alle eingegeben Werte, sowohl auf dem Tabellenblatt 1 als auch die eingegeben Schüttgutwerte im Tabellenblatt 2, gelöscht. Bei einem Klick auf „Abbrechen“ findet kein Löschen statt und das Tabellenblatt wird wieder angezeigt.

### 6.4. Excel-Übersichtsblatt

Wie bereits erwähnt wurde, dient das Übersichtsblatt lediglich zur nochmaligen Auflistung aller Eingabe- und Ausgabewerte.

TU WIEN TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology		Berechnung starten		Übersicht leeren	
<b>1. Eingegebene Werte</b>					
<b>a) Geometrie des Silos/Bunkers</b> $h_c =$ m $d_c =$ m		<b>e) Gurt</b> Gurtführung= - $\lambda =$ ° $l_1 =$ m $l_2 =$ m $l_3 =$ m Gurtbreite $b =$ mm $m_{gu} =$ kg/m <sup>2</sup>		$v =$ m/s $f =$ - Austrag: $\alpha =$ ° $l_{v,th} =$ m/s $l_{m,th} =$ kg/s $h_{gr} =$ % Rollendm. $d_r =$ mm	
<b>b) Querschnitt</b> $a =$ m $b =$ m		<b>f) Antrieb, Widerstände</b> $F_{N1} =$ N $F_{N2} =$ N $M_{Gurt-Trommel} =$ - $p_{AT} =$ - $\eta_{ges} =$ %		<b>h) Schurrgengeometrie</b> $\mu_{sch} =$ - $h_{sch} =$ m $l_{sch} =$ m $h_{Trichter-Gurt} =$ m	
<b>c) Trichter über</b> $\beta =$ ° $h_n =$ m $h_e =$ m $l_{tr} =$ - $S =$ - $l_{Trichter} / l_{Trichter}$ in m		<b>g) Gurteigenschaften</b> Gurtart: - Einlage: - Zugträger: - $E_{GK} =$ N/mm		<b>i) Sicherheitsbeiwerte</b> $S_D =$ - $S_r =$ -	
<b>d) Schüttgut</b>					
<b>2. Berechnungsergebnisse</b>					
<b>a) Silowand-Lasten</b> Fülllasten Entleerlasten $p_{h1} =$ N/m <sup>2</sup> $p_{h2} =$ N/m <sup>2</sup> $p_{v1} =$ N/m <sup>2</sup> $p_{v2} =$ N/m <sup>2</sup> $p_{hT} =$ N/m <sup>2</sup>		$A_{gr} =$ m <sup>2</sup> $F_{Abzug} =$ N $F_{Schurrg.1} =$ N $F_{Schurrg.2} =$ N $F_W =$ N		$f_{rel,vorn.0.2} =$ % $f_{vorn.0.3} =$ mm $F_{mind.0.3} =$ N $h_{rel,vorn.0.3} =$ % $f_{vorn.u} =$ mm $F_{mind.u} =$ N $h_{rel,vorn.u} =$ % $l_{u,min} =$ mm $l_{u,gez} =$ mm	
<b>b) Lasten im Trichterauslauf</b> $p_v =$ N/m <sup>2</sup> $p_h =$ N/m <sup>2</sup> $p_r =$ N/m <sup>2</sup>		<b>d) Tragrollenabstand, Durchhang</b> erf. $l_{r,0.1} =$ mm erf. $l_{r,0.2} =$ mm erf. $l_{r,0.3} =$ mm erf. $l_{r,u} =$ mm $f_{om,0.1} =$ mm $F_{mind,0.1} =$ N $h_{rel,vorn,0.1} =$ % $f_{om,0.2} =$ mm $F_{mind,0.2} =$ N		<b>e) Mindestbruchkraft des Gurtes</b> $k_{N,min} =$ N/mm <b>f) Minstdurchmesser der Antriebstrommeln</b> $D_{r,min} =$ mm	
<b>c) Förderbanddaten</b> $P_W =$ kW $P_{M,erf} =$ kW $F_{T1} =$ N $F_{T2} =$ N $F_{sp} =$ N Kontrolle Eytelweingl. -					

Bitte beachten Sie die Bedingungen und Voraussetzungen für die Gültigkeit des Berechnungs-Programm!

**Abbildung 39:** Tabellenblatt zur Übersicht aller Eingabe- und Ausgabedaten.

Dies bietet die Möglichkeit, die abgeschlossene Dimensionierung abzuspeichern. Des Weiteren muss das Programm nicht jedes Mal gestartet werden, wenn man Werte aus einer durchgeführten Berechnung nachschlagen will. Die Werte, die in den Formularen vom Anwender eingegeben werden, werden bei Wechsel des Formulars, das heißt bei einem Klick auf „Weiter“ oder auf „Zurück“, an das Übersichts-Tabellenblatt übergeben. Das Berechnungs-Programm greift dann auf die Zelle zu, in der der entsprechende Wert gespeichert ist.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Berechnungs-Programm bietet dem Anwender den Vorteil, eine Dimensionierung auf rasche und einfache Weise durchzuführen. Würde die Berechnung ohne das Programm erfolgen, wäre der Zeitaufwand sehr groß. Dieser wäre umso größer, je mehr verschiedene Modelle, welche alle in Geometrie und dem fassenden Schüttgut variieren können, verglichen werden sollen.

Vergleicht man die Ergebnisse des Programms mit Werten real ausgeführter Anlagen, so ergeben sich Unterschiede. Der im Programm errechnete Wert der erforderlichen Motorleistung ist meist zu groß. Der Grund dafür liegt daran, dass sich die im Programm angenommene Bunkergeometrie unter Umständen von realen Anlagen unterscheidet. Der Einfluss der Geometrie des Trichterauslaufes wirkt sich stark auf den Widerstand beim Austrag aus. Die auch in [7] erwähnte Verbreiterung der Trichterbreite in Förderrichtung beeinflussen das Austrageverhalten erheblich und die angenommene Berechnung stimmt dann nicht mehr mit der vorhandenen Situation überein. Bei der Weiterentwicklung des Programms muss unbedingt darauf Rücksicht genommen werden. Erfahrungswerte von vorhandenen Anlagen müssen eingepflegt und die Berechnung dahingehend geändert werden.

Das Programm könnte noch erweitert werden. So können zum Beispiel die weiteren Anforderungsklassen nach [14] in die Berechnung aufgenommen werden. Bunker mit einem Fassungsvermögen von mehr als 100 Tonnen wären dann für die Berechnung zulässig. Besonders vorteilhaft für den Anwendungsbereich des Programms wäre es, wenn mehrere verschiedene Austragorgane zur Auswahl stünden. So könnte man beispielsweise zwischen Abzugsband, Schneckenförderer oder Schwingförderer wählen und die verschiedenen Austragungsarten miteinander vergleichen. Auch die Untersuchung des Austrageverhaltens des Schüttguts bei verschiedenen Trichtergeometrien könnte in die Berechnung einfließen. Austraghilfen, welche das Austragen in Hinblick auf die Gleichmäßigkeit des Austrages positiv beeinflussen können, wie zum Beispiel Einbauten im Trichter, könnten in einer Erweiterung des Programms ebenso implementiert werden. Außerdem sollte eine Verifizierung der Berechnungsergebnisse mit in einem Versuchsaufbau experimentell gefundenen Werten stattfinden.

Die Verknüpfung des Berechnungs-Programms mit anderen, wie zum Beispiel mit Diskrete-Elemente-Methode-Programmen oder mit CAD-Programmen, würde eine enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit des Programms erwirken. Automatisch generierte CAD-Zeichnungen mit den zuvor dimensionierten Austrageeinrichtungen könnten so erzeugt werden, ebenso wie die Untersuchung des Fließverhaltens des Schüttgutes beim Austrag mittels DEM-Simulation. Ein Wechsel der Programmiersprache wäre dann wahrscheinlich notwendig. So würde zum Beispiel *Java* sehr viel mehr Möglichkeiten bieten als Visual Basic for Application.

## 8. Verwendete Formelzeichen

$A_{Sch,1}$	Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 1
$A_{Sch,2}$	Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 2, entspricht der Trichteröffnungsfläche
$A_{Sch,v}$	Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 2, entspricht der Trichteröffnungsfläche
$A_{Silo}$	Querschnittsfläche des vertikalen Schaftes
$A_{th}$	Theoretischer Füllquerschnitt
$C_b$	Vergrößerungsfaktor für die Bodenlasten
$C_h$	Lastvergrößerungsfaktor der horizontalen Entleerungslasten
$C_{op}$	Schüttgutkennwert der Teilflächenlast (Lastvergrößerungsfaktor)
$C_S$	Schlankheitsbeiwert bei einem Silo mittlerer Schankheit
$C_w$	Entleerungsbeiwert für die Wandreibungslasten
$D_{Tr}$	Trommeldurchmesser
$E_{IGK}$	Auf die Breite bezogener Elastizitätsmodul sämtlicher tragender Gurteinlagen (Gurtkern)
$F_{Abzug}$	Widerstand durch den Abzug
$F_e$	Lastverhältnis im Trichter während der Entleerung
$F_f$	Lastverhältnis im Trichter nach dem Füllen
$F_H$	Gesamtheit der Hauptwiderstände
$F_N$	Nebenwiderstände
$F_S$	Sonderwiderstände
$F_{Schurre}$	Gesamtwiderstand durch die Schurren
$F_{Schurre,1}$	Widerstand durch Schurre im Abschnitt 1
$F_{Schurre,2}$	Widerstand durch Schurre im Abschnitt 2
$F_{T1} - F_{T6}$	Örtliche Gurtzugkraft
$F_{T,f,min}$	Mindestens erforderliche Gurtzugkraft zur Einhaltung des Durchhanges
$F_{Tr,max}$	Maximale Anlauf-Trommelumfangskraft
$F_W$	Gesamtheit aller Bewegungswiderstände
$I_{m,th}$	Theoretischer Massenstrom
$I_{V,th}$	Theoretischer Volumenstrom
$K_{Hor}$	Charakteristischer Wert des Horizontallastverhältnisses
$P_M$	Gesamtleistung an der Motorwelle

$P_w$	Gesamte durch die Bewegungswiderstände im stationären Betriebszustand benötigte Leistung an der Antriebstrommel
$S$	Geometriefaktor für die Trichterlasten
$S_0$	Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung der Bedingungen der Verbindungsherstellung
$S_1$	Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung der Lebenserwartung und der Betriebsbeanspruchung
TBF	Trommelbelastungsfaktor
$U_{Sch,1}$	Umfang der Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 1
$U_{Sch,2}$	Umfang der Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 2
$U_{Sch,v}$	Umfang der Querschnittsfläche zwischen den Schurrenblechen im Abschnitt 2
$U_{Silo}$	Umfang des Querschnittes des vertikalen Siloschaftes
$Y_J$	Tiefenvariationsfunktion der Theorie nach Janssen
$Y_{J,Sch,1}$	Tiefenvariationsfunktion in Schurre im Abschnitt 1
$Y_{J,Sch,2}$	Tiefenvariationsfunktion in Schurre im Abschnitt 2
$Y_{J,Sch,v}$	Tiefenvariationsfunktion in Schurre im Abschnitt 2
$Y_R$	Tiefenvariationsfunktion bei niedrigen Silos
$Y_{R,Sch,1}$	Tiefenvariationsfunktion in Schurre im Abschnitt 1
$Y_{R,Sch,2}$	Tiefenvariationsfunktion in Schurre im Abschnitt 2
$a$	Seitenlänge eines Bunkers mit rechteckigem Querschnitt
$b$	Breite eines Bunkers mit rechteckigem Querschnitt
$b_{Gurt}$	Breite des Gurtes
$b_{Gurt,nutz}$	Nutzbare Gurtbreite
$b_s$	Länge der auf einer Seitenrolle aufliegender Teil des Gurtes
$b_{Trichter}$	Breite der Trichterauslauföffnung
$c_{Tr}$	Beiwert zur Ermittlung des Mindestdurchmessers der Trommel
$c_{\ddot{u}}$	Faktor zur Bestimmung der Länge des Muldungsüberganges
$d_c$	Charakteristische Abmessung für den inneren Siloquerschnitt
$d_R$	Durchmesser der Tragrolle
$e$	Exzentrizität

$f$	Fiktiver Reibungsbeiwert
$f_{\text{vorh}}$	Vorhandener Durchhang des Gurtes
$f_{\text{zul}}$	Zulässiger Durchhang des Gurtes
$g$	Gravitationskonstante, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
$h_b$	Gesamthöhe, Trichter und Schaft
$h_c$	Vertikale Siloschaft Höhe
$h_h$	Trichterhöhe, gemessen von der gedachten Trichterspitze bis zum Trichterübergang
$h_{K,0}$	Abstand der Gurtkante zum ebenen Gurtboden
$h_o$	Vertikaler Abstand zwischen der äquivalenten Schüttgutoberfläche und der höchstgelegenen Kontaktstelle des gespeicherten Schüttgutes
$h_{\text{rel,vorh}}$	Vorhandener relativer Durchhang bezogen auf den Tragrollenabstand
$h_{\text{rel,zul}}$	Zulässiger relativer Durchhang bezogen auf den Tragrollenabstand
$h_{\text{Trichter}}$	Höhe des Trichters
$h_{\text{Trichter-Gurt}}$	Abstand zwischen Trichterunterkante und ebenen Gurtboden
$h_x$	Abstand von der gedachten Trichterspitze bis zur Trichterunterkante
$k$	Auf die Breite bezogene Gurtzugkraft
$k_K$	Breitenbezogene Gurtzugkraft im Randbereich des Gurtes
$k_M$	Breitenbezogene Gurtzugkraft im Mittenbereich des Gurtes
$k_{N,\text{min}}$	Mindestbruchkraft des Gurtes
$k_{t,\text{min}}$	Mindest-Referenz-Zeitfestigkeit des Gurtes und der Gurtverbindung
$k_{t,\text{rel}}$	Relative Referenz-Zeitfestigkeit des Gurtes
$\Delta k$	Different der breitenbezogenen Gurtzugkraft zwischen Gurtrand und Gurtmitte
$l_1$	Länge des Gurtes im Abschnitt 1
$l_2$	Länge des Gurtes im Abschnitt 2
$l_3$	Länge des Gurtes im Abschnitt 3
$l_M$	Länge der mittleren Tragrolle
$l_R$	Tragrollenabstand
$l_{\text{Sch}}$	Länge der Schurre im Abschnitt 1
$l_{\text{ü,gew}}$	Gewählte Länge des Muldungsüberganges
$l_{\text{ü,min}}$	Mindestens erforderliche Länge des Muldungsüberganges
$m_G$	Gewicht des Gurtes in $\text{kg/m}^2$
$m'_G$	Streckenlast infolge des Gurtes in $\text{kg/m}$



$m'_L$	Streckenlast infolge des Fördergutes
$m'_R$	Streckenlast infolge drehender Tragrollenteile
$n$	Parameter in den Bestimmungsgleichungen der Lasten
$p_A$	Anlauffaktor zur Begrenzung der Trommelumfangskraft
$p_{h1}$	Horizontaler Druck in der Mitte der Schurre im Bereich 1
$p_{h2}$	Horizontaler Druck in der Mitte der Schurre im Bereich 2
$p_{he}$	Horizontallasten beim Entleeren
$p_{hf}$	Horizontallasten nach dem Füllen
$p_{ho}$	Asymptotische Horizontallasten in großer Tiefe aus gespeichertem Schüttgut
$p_{ne}$	Lasten senkrecht auf die Trichterwände während der Entleerung
$p_{nf}$	Lasten senkrecht auf die Trichterwände nach dem Füllen
$p_{te}$	Reibungslasten im Trichter während der Entleerung
$p_{tf}$	Reibungslasten im Trichter nach dem Füllen
$p_{\text{Trichter,hor}}$	Horizontaler Druck im Trichteröffnungsquerschnitt
$p_{vft}$	Vertikallasten nach dem Füllen am Trichterübergang
$p_{vf}$	Vertikallasten im Schüttgut nach dem Füllen
$p_{v,\text{füll}}$	Vertikallast im Schüttgut nach dem Füllen
$p_{v,\text{ent}}$	Vertikallast im Schüttgut beim Entleeren
$p_{v,\text{Gurt}}$	Vertikaler Druck auf den Gurt
$p_{we}$	Wandreibungslasten während der Entleerung
$p_{wf}$	Wandreibungslasten nach dem Füllen
$r$	Radius der charakteristischen Abmessung des inneren Siloquerschnittes
$v$	Fördergeschwindigkeit
$x$	Vertikale Koordinate zur Bestimmung der Trichterauslaufkante
$y$	Variable zur Berechnung des Druckes an der Gurtoberfläche
$z$	Tiefe unterhalb der äquivalenten Schüttgutoberfläche im gefüllten Zustand
$z_o$	Charakteristische Tiefe nach der Theorie nach Janssen
$z_{\text{Sch}}$	Tiefe unterhalb der Schurreoberkante
$z_V$	Maß für die Tiefe beim Ansatz der Vertikallast in niedrigen Silos

$\alpha$	Trommelumschlingungswinkel
$\beta$	Neigungswinkel der Trichterwand bezogen auf die Vertikale bzw. der steilsten Trichterwände bei einem quadratischen oder rechteckigen Trichter
$\gamma$	Charakteristischer Wert der Wichte des gespeicherten Schüttgutes
$\delta$	Neigungswinkel des Förderers
$\varepsilon_{\text{ent}}$	Parameter zur Berechnung der Entleerungslasten
$\eta_{\text{ges}}$	Gesamtwirkungsgrad aller Übertragungsglieder zwischen Motor- und Trommelwelle
$\lambda$	Muldungswinkel des Fördergurtes im Ober- bzw. Untertrum
$\varphi_i$	Wert des Winkels der inneren Reibung des Schüttgutes
$\varphi_r$	Böschungswinkel eines Schüttgutes (konischer Schütthaufen)
$\varphi_{\text{wh}}$	Wandreibungswinkel im Trichter ( $\varphi_{\text{wh}} = \arctan \mu_h$ )
$\mu$	Wandreibungskoeffizient an der vertikalen Silowand
$\mu_h$	Wandreibungskoeffizient im Trichter
$\mu_{\text{h,eff}}$	Effektiver Wandreibungskoeffizient im flachen Trichter
$\mu_{\text{Sch}}$	Wandreibungskoeffizient in der Schurre
$\mu_{\text{Trommel}}$	Reibungswert zwischen Gurt und Trommel

## 9. Literatur

### 9.1 Allgemeine Literatur

- [1] Janssen, H. A.: *Versuche über Getreidedruck in Silozellen*, ZVDI 39 (1895) S. 1045/49.
- [2] Hager, M.: *Untersuchungen zur Befüllung und zum Gutaustrag von Bunkern mit Abzugsbändern*, Hannover, Technische Hochschule, Dissertation, 1965
- [3] Schulze, D.: *Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Silo und Austragorgan*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1991
- [4] Schwedes, J.: *Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern*, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstr., 1968
- [5] Schwedes, J.: *Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern*, Chem.-Ing.-Techn. 48 (1976), Nr.4 S. 294/300
- [6] Schwedes, J., Schulze, D.: *Beispiele zeitgemäßer Silodimensionierung*, Zement-Kalk-Gips 44 (1991) Nr.10, S. 497/503
- [7] Strydom, E.: *The challenges and advances in belt feeder and hopper design*, *Bulk Solids Handling*, Vol. 26, No. 2, p. 106/115, March/April 2006
- [8] Pajer, G., Kuhnt, H., Kurth, F.: *Stetigförderer*, 5., stark bearbeit. Auflage, Berlin, Verlag Technik, 1988
- [9] Hoffmann, K., Krenn, E., Stanker, G.: *Fördertechnik Band 2*, 5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag Wien München 2004
- [10] Reisner, W., v. Eisenhart Rothe, M.: *Silos und Bunker für die Schüttgutspeicherung – Konstruktion und Verfahrensablauf*, Trans Tech Publications, 1971
- [11] Baloui, S.: *Jetzt lerne ich VBA mit Excel: der einfache Einstieg in die Office-Programmierung; für alle Versionen ab Excel 5*, Haar bei München: Markt und Technik, Buch- und Software-Verlag, 1998
- [12] Grösel, B.: *Grundzüge der Transport- und Fördertechnik*, Skriptum zur Vorlesung, Institut für Konstruktionswissenschaften und technische Logistik, Technische Universität Wien, 2006
- [13] Kühne K&K Sondermaschinen und Förderanlagenbau GmbH, Homepage [www.kuehne.com](http://www.kuehne.com), Stand Februar 2010

## **9.2 Normen und Richtlinien**

- [14] DIN 1055-6, Ausgabe 2005-03  
Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter
- [15] DIN 22101, Ausgabe 2002-08  
Stetigförderer  
Gurtförderer für Schüttgüter  
Grundlagen für die Berechnung und Auslegung
- [16] DIN 22107, Ausgabe 1984-08  
Stetigförderer  
Tragrollenanordnungen für Gurtförderer für Schüttgut  
Hauptmaße
- [17] DIN 15207-1, Ausgabe 2000-10  
Stetigförderer  
Tragrollen für Gurtförderer  
Hauptmaße der Tragrollen für Schüttgutförderer
- [18] DIN 22102 Teil 1, Ausgabe 1991-04  
Textil-Fördergurte für Schüttgüter  
Maße, Anforderungen, Kennzeichnung
- [19] DIN 22109-4, Teil 4, Ausgabe 2000-07  
Textil-Fördergurte für den Steinkohlenbergbau  
Teil 4: Gummi-Fördergurte mit zwei Einlagen für über Tage  
Maße, Anforderungen
- [20] DIN 22109, Teil 5, Ausgabe 1988-02  
Textil-Fördergurte für den Steinkohlenbergbau  
Kennzeichnung
- [21] DIN 22131, Teil 2, Ausgabe 1988-11  
Stahlseil-Fördergurte für die allgemeine Fördertechnik  
Kennzeichnung
- [22] DIN ISO 3435, Ausgabe 1979-02  
Stetigförderer  
Klassifizierung und Symbolisierung von Schüttgütern
- [23] VDI 2694, Entwurf, Ausgabe 2001-09  
Bunker und Silos  
Beschickung, Lagerung und Austrag von Schüttgut