



*Dr.-Ing. Metodi Zlatev
HAVER NIAGARA GmbH
Münster/Deutschland
www.haverniagara.com*

Nach seinem Maschinenbaustudium an der Universität für Bergbau und Geologie "St. Ivan Rilski" in Bulgarien (1992-1997) mit der Fachrichtung Gewinnungs- und Aufbereitungsmaschinen, promovierte Dr. Metodi Zlatev im Jahr 2005 am Institut für Aufbereitungsmaschinen der TU Bergakademie Freiberg. Seit 2004 arbeitet er für den Geschäftsbereich Aufbereitungstechnik bei der Firma HAVER & BOECKER in Münster. Seit Januar 2012 leitet er den Vertrieb der HAVER NIAGARA GmbH in Münster. Neben seiner Funktion als Vertriebsleiter bei der HAVER NIAGARA, ist er seit April 2017 auch Geschäftsführer der HAVER ENGINEERING in Freiberg.



*Dr.-Ing. Hagen Müller
HAVER ENGINEERING GmbH
Freiberg/Deutschland
www.haverengineering.de*

Dr. Hagen Müller studierte an der TU Bergakademie Freiberg Maschinenbau mit einer Spezialisierung im Bereich Aufbereitungsmaschinen sowie Spezialtiefbau und Gewinnungsmaschinen. Danach promovierte er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbereitungsmaschinen über Reinigungs- und Läuterprozesse zum Dr.-Ing. Anschließend arbeitete er im Bereich Forschung und Entwicklung bei HAVER Engineering Meißen, inzwischen HAVER ENGINEERING Freiberg. Seit 2017 ist er für Forschung, Entwicklung und Vertrieb für den Bereich Waschtechnik zuständig.

Reinigungsprozess Cleaning process

Untersuchung und Bewertung der im Hochdruckreinigungssystem „HAVER Hydro-Clean“ verwendeten Beanspruchungsgrößen

Zusammenfassung: Seit vielen Jahren wird der HAVER Hydro-Clean von HAVER NIAGARA bereits bei zahlreichen Reinigungsanwendungen in den Bereichen Bergbau, Recycling, Steine/Erden und Sand/Kies eingesetzt. Der Beitrag zeigt Möglichkeiten auf, durch Optimierung reinigungsrelevanter Prozessparameter die Materialqualität zu verbessern und eine Senkung der spezifischen Betriebskosten, insbesondere durch Reduzierung von Verschleiß sowie des Einsatzes der Ressourcen „Wasser“ und „Energie“ zu erreichen.

Study and assessment of the stress parameters applied in the “HAVER Hydro-Clean” high-pressure cleaning system

Summary: For many years now, the HAVER Hydro-Clean from HAVER NIAGARA has been used in a range of cleaning applications in the mining, recycling, industrial minerals as well as sand and gravel industries. The article points out possibilities to improve material quality by optimizing the process parameters involved in cleaning and to lower specific operational costs specifically by reducing wear as well as the consumption of the resources “water” and “energy”.



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

Der HAVER Hydro-Clean befreit mineralische Rohstoffe von unerwünschten Schad- bzw. Störstoffen
 HAVER Hydro-Clean removes contaminants/impurities from mineral resources

1 Einleitung

Die Entfernung bzw. Reduzierung von unerwünschten Bestandteilen aus mineralischen Rohstoffen stellt für viele Bereiche der Rohstoffaufbereitung eine unverzichtbare Aufgabe dar. Das Ziel dieses Aufbereitungsschrittes besteht darin, durch verschiedene Formen des Energieeintrages Beanspruchungen im Rohmaterial zu erzeugen, die nach selektivem Aufschluss des Rohstoffes eine Abtrennung der unerwünschten Bestandteile (Schad-/Störstoffe) vom Wertstoff ermöglichen.

Von HAVER & BOECKER wurde auf der Basis ihrer langjährigen und weltweiten Erfahrungen auf dem Gebiet der mineralischen Aufbereitung ein innovatives Hochdruckwaschsystem entwickelt, das den hohen Ansprüchen des Bergbaus, der Rohstoffindustrie, des Recyclings, der Sand/Kies- sowie Steine/Erden-Aufbereitung gerecht wird. Die Vorteile gegenüber anderen konventionellen Reinigungsverfahren werden vor allem in einem hohen Reinigungsgrad bei guter Produktqualität und im sparsamen Einsatz der Ressourcen „Wasser“ und „Energie“ gesehen, was zu einer maßgeblichen Senkung der Betriebskosten beiträgt [3, 4].

2 Aufbau und Funktionsweise des HAVER Hochdruckwaschsystem

Das Hydro-Clean Waschsystem wurde mit dem Ziel entwickelt, verunreinigte mineralische Rohstoffe durch Besprühen mit Hochdruckwasserstrahlen von unerwünschten Schad-/Störstoffen zu befreien. Mineralische Rohstoffaufwerke setzen sich im Allgemeinen aus den beiden Hauptkomponenten Wertstoff und Schad-/Störstoff zusammen. Zur Gruppe der Schad-/Stör-

1 Introduction

The removal or reduction of unwanted components from mineral resources is an essential task in many sectors involving the processing of raw materials. The goal of this processing step is to introduce energy in various forms into the raw material in order to generate stresses that in turn, following selective liberation of the raw material, enable a removal of the unwanted components (contaminants/impurities) from the recoverable content.

Drawing from its many years of experience in mineral processing gained worldwide, HAVER & BOECKER has developed an innovative high-pressure washing system that meets the high demands in mining, the raw materials industry, recycling, aggregates and industrial minerals processing. The main advantages compared to other conventional cleaning process are regarded as the high cleaning efficiency leading to good product quality and in the sparing use of the resources “water” and “energy”, which results in a significant reduction in operating costs [3, 4].

2 Design und operating principle of the HAVER high-pressure washing system

The Hydro-Clean washing system was developed with the aim of removing contaminants/impurities from contaminated mineral resources by spraying these with high-pressure water jets. Mineral raw materials generally consist of the two main components, the recoverable content and contaminants/impurities. The group of contaminants/impurities includes the fines <math><63 \mu\text{m}</math>, which are mostly present as

Tabelle 1: Bindungsformen, Beanspruchungsarten und ausgewählte Maschinenteknik in der Aufbereitungstechnik
 Table 1: Bond forms, stress types and selected typical machines used in mineral processing

| Bindungsform Bonding form | Beanspruchungsart Type of stress | Maschinenteknik Machine type |
|------------------------------|--|--|
| Ohne (lose) None (loose) | Keine None | Waschsieb Wet screen |
| Konglomerate Conglomerate | Mechanisch Mechanic | Schwertwäscher Log washer Turbowasher Waschtrommel HAVER Hydro-Clean HAVER Friction-Clean |
| Überzüge Coatings | Hydraulisch Hydraulic Elektrisch Electric | |
| Agglomerate Agglomerate | | |
| Verwachsungen Concrecence | Mechanisch Mechanic | Prallbrecher Impact crusher / mill Walzenmühle Roller mill Hammermühle Hammer mill |

stoffe gehören insbesondere auch die sogenannten abschlämmbaren Haufwerksbestandteile $< 63 \mu\text{m}$, die meist als lehmig-tonige Bestandteile oder feine Gesteinsmehle vorliegen [1, 5]. Das Rohstoffmaterial kann daher als ein Haufwerk angesehen werden, das aus den Komponenten „Wertstoff“ und „Schad-/Störstoff“ besteht, die durch unterschiedliche Bindungsformen und -stärken miteinander verbunden sind (Tabelle 1).

Das Hydro-Clean Waschsysteem, das auf einer Beanspruchung des Haufwerkverbundes durch hydraulische Hochdruckwasserstrahlen basiert, wird vor allem bei Rohstoffhaufwerken mit den Bindungsformen „Agglomerate“, „Konglomerate“ und „Überzüge“ eingesetzt. Nachfolgend soll der Beanspruchungsvorgang bei Anwendung der Hochdruckwasserstrahltechnik näher erläutert werden.

2.1 Beanspruchungsmodell „Hochdruckwasserstrahl“

Bei dem hydraulischen Reinigungsverfahren mit Hochdruckwasserstrahlen wird ein Wasserstrahl, der in einer Düse mit Hilfe eines Druckerzeugersystems beschleunigt wird, zum Aufprall auf die zu reinigende Oberfläche des Rohmaterials gebracht (Bild 1). Die Beanspruchung der Haufwerkspartikel erfolgt durch eine Vielzahl aufeinanderfolgender Tropfenschläge variabler Größe und Frequenz. Der zeitliche Verlauf des Druckes im Auftreffpunkt entspricht dabei dem Fall einer quasistatischen Belastung in Höhe des Staudruckes mit überlagerten Stoßdruckwellen. Der sich auf der Oberfläche der Waschgutteilchen ausbildende Flüssigkeitsfilm verringert bereits bei sehr geringer Dicke die Aufprallintensität stark. Nachfolgende Wirkmechanismen sind für die Beanspruchung des Stoffverbundes „Wertstoff/Schad-Störstoff“ von Bedeutung [6, 7]:

- Die durch den Tropfenaufprall entstehende Stoßdruckbelastung bewirkt eine partielle Verformung im Stoffverbund.
- Die mechanischen Stoßwellen breiten sich radial im Waschgut aus und treten in Wechselwirkung mit den bereits bestehenden Rissen und mikrostrukturellen Stoffeigenschaften.

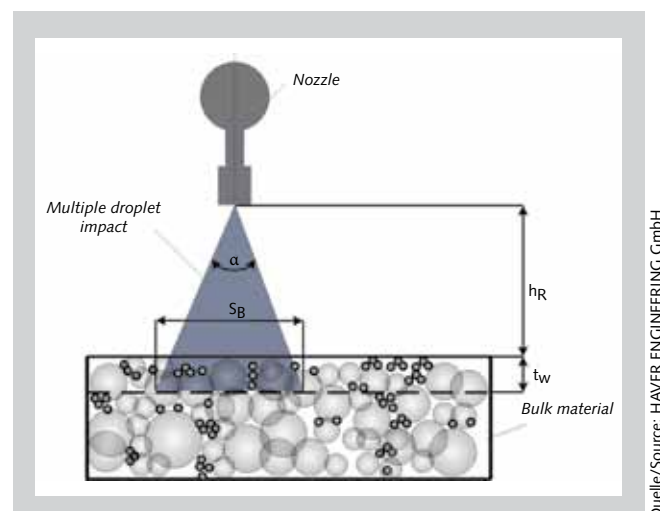
clayey constituents or fine rock flour [1, 5]. The raw material can therefore be regarded as material mass consisting of the constituents “recoverable” and “contaminants/impurities” which are joined to each other with different bond forms and strengths (Table 1).

The Hydro-Clean washing system, which is based on stressing of the material by hydraulic high-pressure water jets is used primarily in raw materials with the bond forms “agglomerates”, “conglomerates” and “coatings”. In the following, the stress process on application of the high-pressure water jet system is explained in more detail.

2.1 “High-pressure water jet” stress model

In the hydraulic cleaning process with high-pressure water jets, a jet of water that is accelerated in a nozzle with the help of a pressure generation system is brought to impact the surface of the raw material to be cleaned (Fig. 1). The material particles are subject to stress by a multitude of successive droplet impacts of variable size and frequency. The time sequence of the pressure at the impact point corresponds to the case of a quasi-static load to the amount of the dynamic pressure with superimposed shock-front pressure waves. The film of liquid forming on the surface of the particles of material washed considerably reduces the impact intensity, even if this film is very thin. The following modes of action are significant for the stressing of the material mass comprising “recoverable/ contaminants-impurities” [6, 7]:

- The shock pressure load generated as a result of the droplet impact effects a partial deformation in the material mass.
- The mechanical shock waves propagate radially in the material washed and interact with any existing cracks and the microstructural material properties.
- As a result of the radial flow of the impact water, shear stress is generated in the material mass to be cleaned caused by friction between the water jet and the material washed, which effects erosion at the surface of the material particles.
- During impact of the droplets on porous or cracked areas of the washed material, hydraulic ingress and undercutting are conducive to separation of the material bond.
- As a result of the ingress of the high-pressure water in areas of the bulk solids with outer volume porosity, the particles of



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

1 Beanspruchungsmodell „Hochdruckwasserstrahl“
 “High-pressure water jet” stress application model

Tabelle 2: Übersicht zu den HAVER Hydro-Clean Waschaggregaten • Table 2: Overview of the HAVER Hydro-Clean washing components

| Baugröße Size | Anwendung Application | Anzahl Qty. Rotor / Düsen Rotor / Nozzles | Durchsatz [t/h] Feed rate Korngröße [mm] Grain size | Druckbereich [bar] Pressure range | Anschlußleistung [kW] Installed power | Wasserbedarf [m ³ /t Rohmaterial] Water consumption | Flächen- bzw. Raumbedarf [m ²] bzw. [m ³] Area requirements |
|------------------|--|---|--|--------------------------------------|---|--|--|
| LAB 200 | Labortestgerät Lab tests | 0 / 1 | 1...2 kg 0...30 | 50...150 | 4 | - | - |
| HC 350 | Pilotmaßstab und Exploration Pilot scale | 1 / 7 | 15 0...80 | 50...150 | 40 | 0,5 | 1,6 / 3,2 |
| HC 700 | Aufbereitung Allgemein Processing general | 1 / 13 | 80 0...120 | 50...150 | 75 | 0,2 | 6,2 / 18,7 |
| HC 1000 | Aufbereitung Allgemein Processing general | 1 / 32 | 160 0...120 | 50...150 | 120 | 0,2 | 8,9 / 29,4 |
| HC 2000 | Aufbereitung Allgemein Processing general | 2 / 64 | 320 0...120 | 50...150 | 230 | 0,2 | 12,2 / 42,7 |

- Durch radiales Abströmen des Aufschlagwassers entstehen Schubbeanspruchungen im zu reinigenden Stoffverbund infolge Reibung zwischen Wasserstrahl und Waschgut, wodurch eine Erosionswirkung an der Oberfläche der Stoffpartikel erreicht wird.
- Während des Tropfenaufpralls auf poröse oder mit Rissen behaftete Waschgutbereiche wird durch hydraulisches Eindringen und Unterhöhlen eine Trennung des Materialverbundes begünstigt.
- Durch das Eindringen des Hochdruckwassers in Schüttgutbereiche mit äußerer Volumenporosität wird eine Auflockerung und Umverteilung der Waschgutpartikel bewirkt. Die damit verbundenen mechanischen Reibeffekte tragen ebenfalls zur Reinigungswirkung im Waschgut bei.

Bindungsform und -stärke zwischen Wertstoff und Schad-/Störstoff sowie weitere materialspezifische Eigenschaften (z.B. Granulometrie, Rohdichte, Porosität, Feuchte) bestimmen in starkem Maße, welche der aufgeführten Wirkmechanismen in welchem Umfang zum Reinigungserfolg beitragen.

2.2 HAVER-Hochdruckwaschsystem und HC-Baugrößen

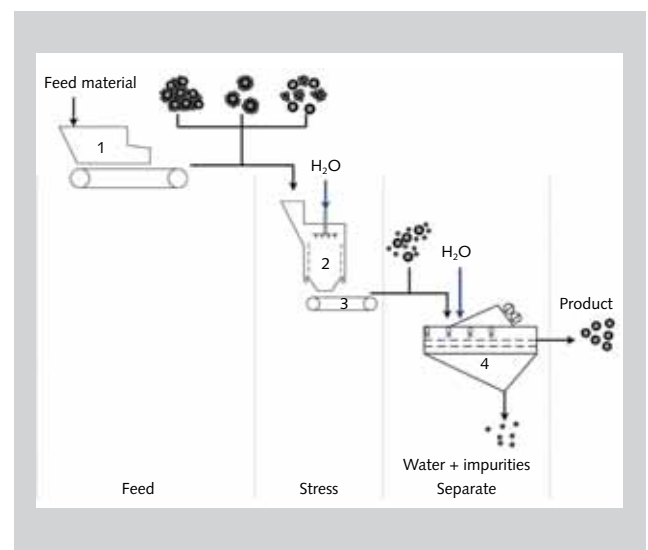
Bild 2 zeigt eine schematische Gesamtansicht des HAVER-Hochdruckwaschsystems. Aus verfahrenstechnischer Sicht besteht das System aus den Verfahrensschritten „Fördern“, „Beanspruchen“ und „Trennen“. Die Beanspruchung des Waschgutes erfolgt je nach Bindungsart und -stärke zwischen Wert- und Schad-/Störstoff im HAVER Hydro-Clean (2) mit angepasster Beanspruchungsintensität und -dauer. Das aufgeschlossene Rohmaterial wird nach Abzug (3) aus dem Hydro-Clean einem Waschsieb (4) zugeführt und dort in die beiden Komponenten „Fertiggut“ (Wertstoff) und den im Wasser dispergierten Schad-/Störstoffen getrennt. In dieser ersten Klassierstufe wird ebenfalls die Feinsandfraktion abgeschieden und anschließend in einer separaten Prozessstufe zur Feinsandaufbereitung gewonnen. Dies erfolgt beispielsweise in einem Schöpfrad oder einer Hydrozyklonanlage.

the material washed are loosened up and redistributed. The associated mechanical friction effects also contribute to the cleaning effect in the material washed.

Form and strength of the bond between the recoverable and contaminants/impurities as well as other material-specific properties (e.g. granulometry, bulk density, porosity and moisture content) determine to a significant extent how far each of the above-listed modes of action contribute to the cleaning efficiency.

2.2 HAVER-High-Pressure Washing System and HC Sizes

Fig. 2 shows schematic of the HAVER high-pressure washing system. With regard to its process engineering, the system comprises the process steps “feeding”, “stressing” and “separation”.



2 Schematische Darstellung zum HAVER Hydro-Clean Waschsystem
Schematic showing the HAVER Hydro-Clean washing system

Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

3 HAVER LAB 200

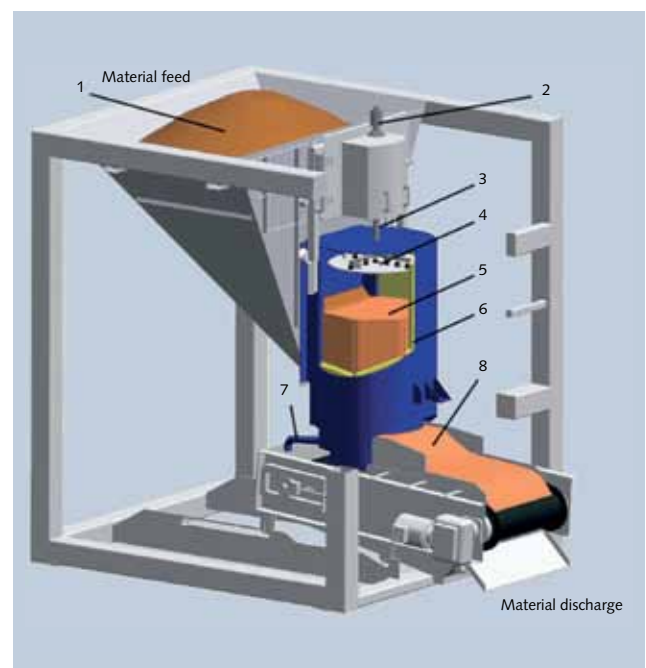
Durch Wiederaufbereitung von verunreinigtem Prozesswasser und dessen Wiederverwendung in dem Aufbereitungsprozess, sieht HAVER & BOECKER weitere Möglichkeiten zur Senkung der Betriebskosten und zur Entlastung der Umwelt [10]. Eine optimale technische Auswahl wird nach Bewertung aller o.g. Faktoren umgesetzt. Das gereinigte Brauchwasser kann im Kreislauf erneut für Reinigungszwecke, vorzugsweise für das Waschsieb, verwendet werden. Je nach Rohstoffaufkommen können die in **Tabelle 2** aufgeführten HC-Baugrößen unterschiedlicher Konfiguration und Baugröße eingesetzt werden. Die Baugröße LAB200 (**Bild 3**) ist ein Labortestgerät, das zur Durchführung von materialspezifischen Waschttests angeboten wird. Die Testergebnisse können zur Auswahl und Konfiguration der praxisrelevanten Baugrößen HC350 bis HC2000 verwendet werden.

Der prinzipielle Aufbau und die Funktionsweise eines Hydro-Cleans gehen aus **Bild 4** hervor. Konstruktiv besteht ein HC aus einem Aufgabebunker (1) für das Rohmaterial, einer Waschtrommel (5), ein oder zwei Waschrotoren (4), die über eine Antriebswelle (3) in Drehung versetzt werden. Je nach Baugröße ist der Rotor mit einer unterschiedlichen Anzahl Flachstrahldüsen bestückt. Unterhalb der Waschtrommel (5) ist ein Abzugsorgan (Gurtbandförderer oder Schwingrinnen) (8) angeordnet. Das im Aufgabebunker (1) befindliche Rohmaterial wird im Schwerkraftfluss der Waschtrommel (5) zugeführt und baut sich dort zu einem Materialbett auf. Über dem Materialbett rotiert der mit Flachstrahldüsen bestückte Waschrotor (4), der über eine Drehdurchführung für die Hochdruckwasserleitung (2) die Düsen mit Druckwasser von 50...160 bar versorgt. Die Anpassung der Beanspruchungsintensität und -dauer an die materialspezifischen Erfordernisse des Rohstoffes erfolgt durch Änderung des Spritzdruckes p_D und durch Variation der Abzugsgeschwindigkeit v_B des Abzugsorganes (Beanspruchungs-

The stressing of the material being washed is performed according to the type and strength of the bond between recoverable and contaminant/impurity in the HAVER Hydro-Clean (2) with adapted stress intensity and time. The broken up raw material is discharged from the Hydro-Clean (3), fed to a washing screen (4) and separated there in the two components “product” (recoverable) and the contaminants/impurities dispersed in the water. In this first screening stage, the fine sand fraction is also separated and then extracted in a separate process stage for fine sand processing. This is done, for example, in a bucket wheel or hydrocyclone.

With treatment of contaminated process water and its reuse in the processing operation, HAVER & BOECKER sees further possibilities to reduce the operating costs and reduce the impact on the environment [10]. An optimum technical selection is realized after assessment of all above-mentioned factors. The cleaned process water can then be recirculated for cleaning purposes, mainly for the washing screen. Depending on the volume of raw material to be washed, the HC models listed in **Table 2** can be used with different configuration and size. The LAB200 model (**Fig. 3**) is a laboratory testing device available for performing material-specific washing tests. The test results can be used for the selection and configuration of the field-oriented models HC350 to HC2000.

The set-up and principle of operation of a Hydro-Clean are shown in **Fig. 4**. In terms of design, a HC consists of a feed bin (1) for the raw material, a washing drum (5), one or two washing rotors (4), which are rotated by means of a drive shaft (3). Depending on the size, the rotor is fitted with a varying number of flat-spray nozzles. Below the washing drum (5) is a discharge system (belt conveyor or vibrating chute) (8). The raw material in the feed bin (1) is fed in a gravity flow to the washing drum (5) and builds up there to form a material bed. Above the material bed, the washing rotor (4) fitted with



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

4 Funktionsaufbau des Hydro-Cleans
 Operation of the Hydro-Clean

dauer t_B). Die Ableitung des entstehenden Schmutzwassers erfolgt über seitlich angeordnete PU-Filterelemente (6) und eine separate Schmutzwasserleitung (7).

3 Zielgrößen und Prozessparameter

Die Effizienz des Reinigungsprozesses im Hydro-Clean Waschsystem (Bild 5), charakterisiert durch Parameter der Produktqualität und die spezifischen Kosten, wird durch eine Vielzahl von Einflussparametern bestimmt, die sich in nachfolgende Gruppen einordnen lassen:

- Maschinen- und Geometrieparameter, wie z.B. Festlegungen zu Rotorkonfiguration und -betrieb (Rotordurchmesser D_R , Drehzahl n_R , Düsenanordnung und -anzahl i_R , Anstellwinkel γ der Düsen) und zur Waschtrommel (z.B. Waschtrommeldurchmesser D_W und -höhe H_W)
- Betriebsparameter, wie z.B. die Düsenparameter (Spritzdruck p_D , Spritzwinkel α und -breite s_B), Maschinendurchsatz m_{HC} , Beanspruchungszeit t_B und Strahlwirkungstiefe t_W
- Materialparameter, wie z.B. Angaben zur Granulometrie (Korngröße und Korngrößenverteilung, Kornform, spezifische Oberfläche), zu den Schüttguteigenschaften (z.B. Roh- und Schüttdichte ρ_0 bzw. ρ_s , Porosität P Feuchte φ_W , Böschungswinkel β , Art und Menge der im Waschgut enthaltenen Schad-/Störstoffe sowie deren Bindungsverhältnisse und -stärken mit den Wertstoffen

Zwischen den verschiedenen Einflussparametern bestehen vielfältige Interaktionen, die eine gezielte Anpassung der reinigungsrelevanten Beanspruchungsgrößen, wie z.B. Beanspruchungsintensität und -dauer, an die spezifischen Eigenschaften des zu reinigenden Rohstoffes erlauben. Prinzipiell kann dabei von einer Proportionalität der verschiedenen Reinigungskennwerte auf das erreichbare Reinigungsergebnis ausgegangen werden. Eine Quantifizierung des erzielbaren Reinigungseffektes ist jedoch nur in Verbindung mit den rohstoffspezifischen Waschguteigenschaften möglich.

Da bisher jedoch noch keine befriedigenden Berechnungsmodelle zur Klärung der Vorhersage des Reinigungsergebnisses vorliegen, ist die Durchführung von Testwaschversuchen im Labor- bzw. halbtechnischen Maßstab unerlässlich. Über Ergebnisse solcher Reinigungstests und deren Auswirkungen auf die Einsatzbedingungen und Effizienz der HAVER Hydro-Clean Waschtechnik soll daher zu einem späteren Zeitpunkt berichtet werden. Nachfolgend soll nun auf einige Interaktionen zwischen ausgewählten Prozessparametern, die für

- die Konfiguration des Waschrotors und der Beanspruchungsgeometrie,
 - die Reinigungsintensität und -dauer sowie
 - spezifische Kosten
- bedeutsam sind, näher eingegangen werden.

3.1 Ausgewählte Interaktionen zwischen den Prozessparametern

Für die Effizienz des Reinigungsprozesses ist der erforderliche Wasserbedarf, der u.a. stark von den rohstoffspezifischen Erfordernissen bestimmt wird, von ausschlaggebender Bedeutung. Durch die von den Rotordüsen auf die Waschgutoberfläche bzw. in das Waschgut eingebrachte Wassermenge entsteht ein Wasserfilm um die Waschgutpartikeln, der bei Überschreitung einer bestimmten Dicke d_W zu Dämpfungerscheinungen beim Tropfenaufprall auf



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

5 Hochdruckreinigungssystem „HAVER Hydro-Clean“
“HAVER Hydro-Clean” high-pressure cleaning system

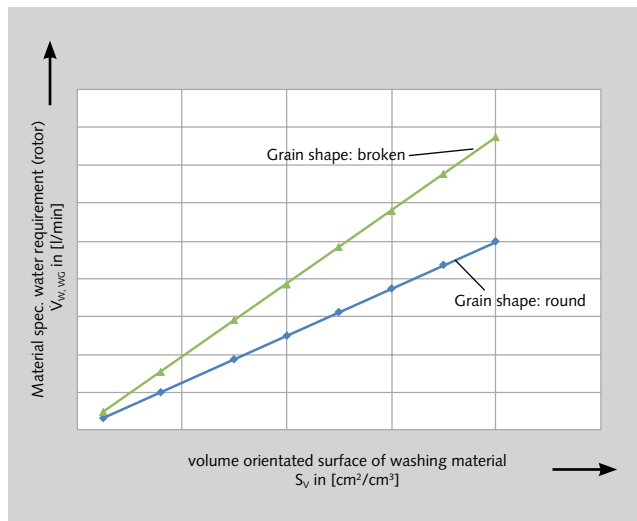
flat-spray nozzles rotates. Via a rotary joint for the high-pressure water pipe (2), the rotor supplies the nozzles with pressurized water at 50...160 bar. Adjustment of the stress intensity and time to the material-specific requirements of the raw material is performed by means of changes to the nozzle pressure p_D and with variation of the discharge velocity v_B of the discharge system (stress time t_B). Any dirty water produced is discharged via PU filter elements (6) at the side and a separate pipeline for dirty water (7).

3 Target values and process parameters

The efficiency of the cleaning process in the Hydro-Clean washing system (Fig. 5), characterized by parameters of the product quality and the specific costs, is determined by a range of influencing parameters, which can be assigned to the following groups:

- Machine and geometry parameters, e.g. defined with regard to the rotor configuration and operation (rotor diameter D_R , speed n_R , arrangement and the number of nozzles i_R , work angle γ of the nozzles) and the washing drum (e.g. washing drum diameter D_W and height H_W)
- Operating parameters, like, for example, the nozzle parameters (nozzle pressure p_D , spraying angle α and width s_B), machine throughput rate m_{HC} , stress time t_B and jet impact depth t_W
- Material parameters, like, for example, details on granulometry (particle size and particle size distribution, particle shape, specific surface area), on the bulk solid properties (e.g. bulk and apparent density ρ_0 or ρ_s , porosity P , moisture content φ_W , angle of repose β , type and quantity of the contaminants/impurities contained in the material washed and their bond relationships and strengths with the recoverable material.

Between the different influencing parameters there are diverse interactions that allow selective adjustment of the cleaning-relevant stress application parameters, like, for example, stress intensity and time, to the specific properties of the raw material



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

6 Qualitative Abhängigkeit der Waschgutoberfläche und der Kornform auf den Wasserbedarf
Qualitative dependence of the surface of the material washed and the particle shape on the water requirement

die Partikeln führt. Dieser Effekt bewirkt eine unerwünschte Reduzierung des angestrebten Reinigungseffektes.

Aus experimentellen Untersuchungen und Modellbetrachtungen konnte ermittelt werden, dass der waschgutspezifische Wasserbedarf $\dot{V}_{W,WG}$ von einer Vielzahl von Einflussparametern, wie z.B. der zulässigen Wasserfilmdicke d_W , der Waschgutoberfläche A_{HC} , Granulometrie des Waschgutes (volumenbezogene Oberfläche S_V , Kornform f_{KF}), Wirkungstiefe t_W der Hochdruckwasserstrahlen und deren Beanspruchungszeit t_B abhängig ist. Allgemein gilt daher:

$$\dot{V}_{W,WG} = f(d_W, A_{HC}, S_V, f_{KF}, t_W, \dots, t_B) \quad \text{in [l/min]} \quad (1)$$

Da Angaben zur „kritischen“ Wasserfilmdicke d_W nicht bekannt sind, muss auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden, die sich an einfachen experimentellen Messungen bzw. Modellabschätzungen orientieren. Die Waschgutoberfläche A_{HC} lässt sich über den Waschtrommeldurchmesser D_W ermitteln. Bei bekannter Korngrößenverteilung des Waschgutes und deren Auswertung im RRSB-Netz können Lageparameter d_{63} , Anstiegsmaß n und der dimensionslose Oberflächenkennwert $S_V \cdot d_{63} / f_{KF}$ abgelesen werden. Nach Division des Oberflächenkennwertes durch den Lageparameter d_{63} erhält man die volumenbezogene Oberfläche S_V (in $[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$) des Waschgutes.

Zur Berücksichtigung der Kornform können insbesondere solche Kornformfaktoren verwendet werden, die sich an der Abweichung der Realpartikel von der Kugelgestalt orientieren (z.B. Heywood-Faktor f_{Hey} oder Sphärizität ψ). Unter der Wirkungstiefe der Hochdruckwasserstrahlen t_W wird die von der Waschgutoberfläche ausgehende vertikale Tiefe im Waschgut verstanden, in der reinigungswirksame Wascheffekte stattfinden (Bild 1). Dabei ist t_W als eine stochastische Größe anzusehen, die nicht oder nur sehr ungenau quantifiziert werden kann, da sie im starkem Maße von den Belastungs- und Rohstoffeigenschaften schwankungen beeinflusst wird. Aus Modellbetrachtungen wurde abgeleitet, dass die Wirkungstiefe, insbesondere von der Beanspruchungszeit t_B , der Waschgutporosität P und den

to be cleaned. In principle, a proportionality of the different cleaning characteristics to the achievable cleaning efficiency can be expected. A quantification of the achievable cleaning effect is, however, only possible in conjunction with the raw-material-specific properties of the material washed.

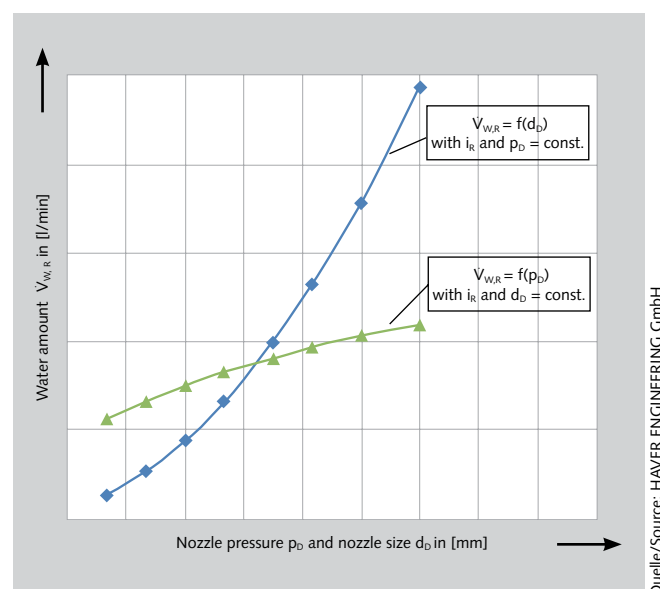
As no satisfactory calculation model so far exists to predict cleaning efficiency, performing washing tests on laboratory or pilot scale is essential. A report on the results of such cleaning tests and their effects on the working conditions and efficiency of the HAVER Hydro-Clean washing technology is to be provided at a later time. In the following, certain interactions between selected process parameters that are significant for

- the configuration of the washing rotor and the stress application geometry,
 - the cleaning intensity and time as well as
 - specific costs
- are discussed in greater detail.

3.1 Selected interactions between process parameters

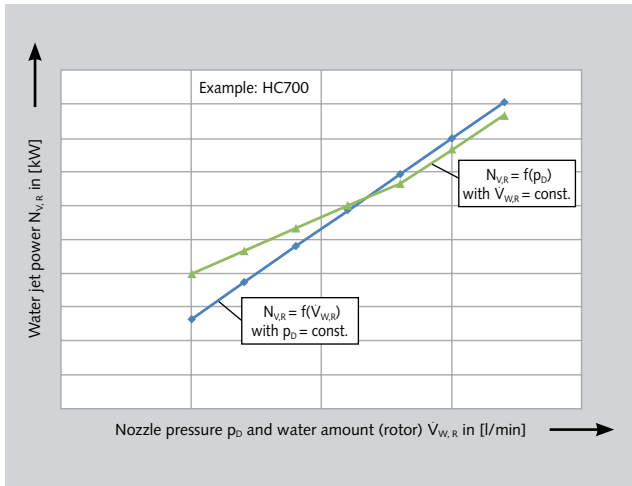
For the efficiency of the cleaning process, the necessary water consumption, which is, for example, determined to a large extent by the raw-material-specific requirements, is of crucial significance. With the volume of water introduced by the rotary jets onto the surface of the material being washed and into the material washed, a film of water is formed around the particles of the material washed, which on exceeding a certain thickness d_W leads to attenuation of the impact of the droplets on the particles. This effect leads to an unwanted reduction of the desired cleaning efficiency.

From experimental studies and model analyses, it could be determined that the specific water requirement of the material washed $\dot{V}_{W,WG}$ is dependent on a large number of influencing parameters, e.g. the permissible water film thickness d_W , the surface of the material washed A_{HC} , granulometry of the



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

7 Qualitativer Einfluss von Spritzdruck und Düsendurchmesser auf die vom Rotor in das Waschgut einzubringende Wassermenge
Qualitative influence of the nozzle pressure and nozzle diameter on the quantity of water to be introduced into the washed material by the rotor



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

8 Qualitativer Einfluss von Spritzdruck und Wassereintrag auf die Strahlleistung • Qualitative influence of the nozzle pressure and water input on the jet power

Düsenparametern „Spritzdruck p_D “ und „Düsendurchmesser d_D “, abhängig ist.

$$t_W = f(t_B, P, p_D, \dots, d_D) \quad \text{in [cm]} \quad (1.1)$$

Zur Abschätzung der Beanspruchungszeit t_B sind ebenfalls Modellbetrachtungen notwendig. Relevante Einflussparameter sind der Durchmesser der Waschtrommel D_W , die Porosität P und Rohdichte ρ_0 des Waschgutes sowie der Durchsatz des Waschaggregates m_{HC} , der vom Förderquerschnitt A_q und der Geschwindigkeit v_B des Abzugsorgans bestimmt wird. Damit folgt:

$$t_B = f(D_W, P, \rho_0, A_q, \dots, v_B) \quad \text{in [s]} \quad (1.2)$$

In **Bild 6** ist der qualitative Einfluss der Rohstoffgranulometrie, charakterisiert durch die volumenbezogene Oberfläche S_V und ein Waschgut mit runden bzw. gebrochenen Partikeln, auf den stoffspezifischen Wasserbedarf $\dot{V}_{W,WG}$ dargestellt. Es ist erkennbar, dass mineralische Rohstoffe mit großer spezifischer Oberfläche einen wesentlich höheren Waschwasserbedarf besitzen als Materialien mit geringen Feingutanteilen. Außerdem ist ersichtlich, dass ein Waschgut, das überwiegend aus Partikeln mit gebrochener, rauer Oberflächengestalt besteht, ebenfalls einen erhöhten Waschwasseranspruch besitzt gegenüber einem Rohstoff mit vorwiegend runden, unebrochenen Körnern.

Die Konfiguration des Waschrotors ist unter Beachtung des prognostizierten materialspezifischen Wasseranspruchs $\dot{V}_{W,WG}$ durchzuführen. Die vom Rotor in das Waschgut einzubringende Wassermenge $\dot{V}_{W,R}$ ist dabei von der Düsenanzahl i_R , vom Spritzdruck p_D und vom Düsendurchmesser d_D abhängig.

$$\dot{V}_{W,R} = f(i_R, p_D, d_D) \quad \text{in [l/min]} \quad (2)$$

Um einen möglichst großen Überdeckungsgrad \ddot{U}_R zu erreichen, der das Verhältnis von „aktiver“ Spritzfläche A_D zur Gesamtoberfläche des Waschgutes A_{HC} widerspiegelt,

$$\ddot{U}_R = \frac{A_D}{A_{HC}} \quad \text{in [-]} \quad (3)$$

material washed (surface area per unit of volume S_V , particle shape f_{KF}), impact depth t_W of the high-pressure water jets and their stress-time factor t_B . In general, the following therefore applies:

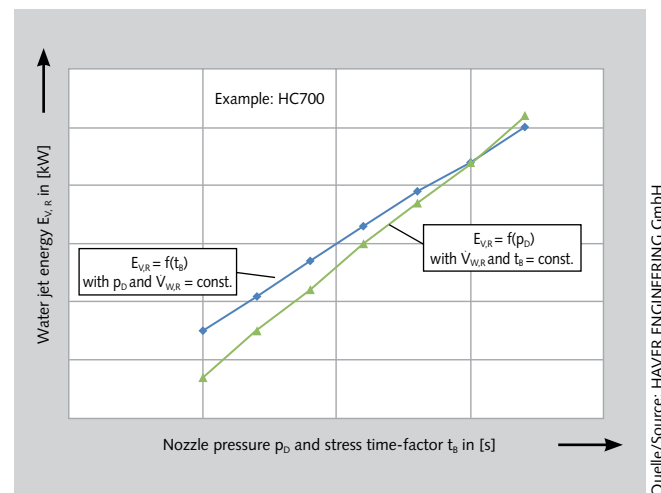
$$\dot{V}_{W,WG} = f(d_W, A_{HG}, S_V, f_{KF}, t_W, \dots, t_B) \quad \text{in [l/min]} \quad (1)$$

As details on the “critical” water film thickness d_W are not known, it is necessary to refer to empirical values, which are oriented to simple experimental measurements or model calculations. The surface area of the material washed A_{HC} can be determined based on the washing drum diameter D_W . With known particle size distribution of the material washed and its evaluation in the RRSB grid, the location parameter d_{63} , increase rate n and non-dimensional surface area parameter $S_V \cdot d_{63} / f_{KF}$ can be read. After division of the surface parameter by the location parameter d_{63} , the surface area per unit of volume S_V (in $[cm^2/cm^3]$) of the material washed is obtained.

To take the particle shape into account, particularly such particle shape factors can be used that are oriented to the deviation of the real particles from the spherical shape (e.g. Heywood factor f_{Hey} or sphericity ψ). The impact depth of the high-pressure water jets t_W refers to the vertical depth in the material being washed from the surface of the washed material in which cleaning-relevant washing effects take place (**Fig. 1**). Here t_W can be regarded as a stochastic variable, which can either not be quantified at all or only very inaccurately, as it is influenced to a considerable extent by the variations in the stress and raw material properties. From model calculations, it was derived that the impact depth is dependent especially on the stress-time factor t_B , the porosity of the material washed P and the nozzle parameters “nozzle pressure p_D ” and “nozzle diameter d_D ”.

$$t_W = f(t_B, P, p_D, \dots, d_D) \quad \text{in [cm]} \quad (1.1)$$

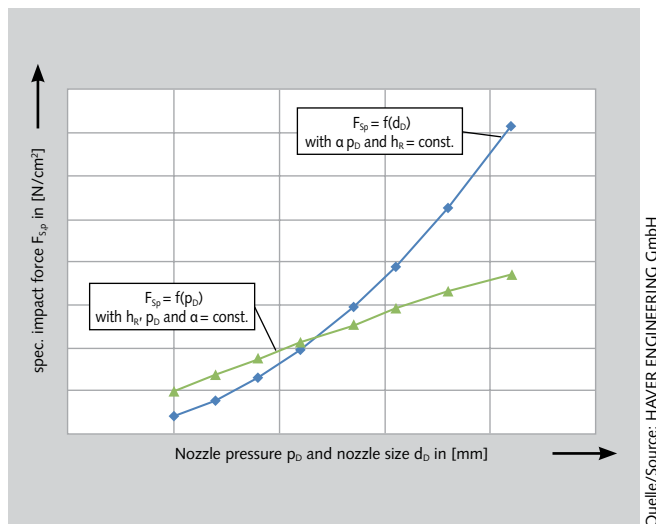
To estimate the stress time factor t_B , model calculations are also necessary. Relevant influencing parameters are the diameter of the washing drum D_W , the porosity P and apparent density ρ_0 of the material washed as well as the throughput rate of



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

9 Qualitativer Einfluss von Spritzdruck und Beanspruchungszeit auf die Strahlenergie • Qualitative influence of the nozzle pressure and stress time factor on the jet energy

wurde die Düsenanzahl i_R für die einzelnen HC-Baugrößen konstruktiv festgelegt (Tabelle 2). Nach Bild 7 wird die vom Rotor in das Waschgut einzubringende Wassermenge vor allen vom Düsendurchmesser d_D bestimmt, da der Volumenstrom der Strahlflüssigkeit über den Düsendurchmesser festgelegt wird. Die dazu erforderlichen Flachstrahldüsen können aus Angebotskatalogen der Düsenhersteller ausgewählt werden [2]. Der Spritzdruck p_D , der für alle Rotordüsen gleich groß ist, kann unter Beachtung der rohstoffspezifischen Eigenschaften über das Druckerzeugersystem optimal eingestellt werden.



Quelle/Source: HAVER ENGINEERING GmbH

10 Qualitativer Einfluss von Spritzdruck und Düsendurchmesser auf die spezifische Aufprallkraft • Qualitative influence of the nozzle pressure and nozzle diameter on the specific impact force

3.2 Reinigungsrelevante Kenngrößen

Zur Quantifizierung der Beanspruchung durch die Hochdruckwasserstrahltechnik sind Kenngrößen geeignet, die Rückschlüsse auf die Intensität und Dauer der Belastung zulassen. Als reinigungsrelevante Kenngrößen sind daher insbesondere die

- Strahlleistung $N_{V,R}$,
- Strahlenergie $E_{V,R}$ und
- spezifische Aufprallkraft F_{Sp}

geeignet. Die Strahlleistung kann aus dem Produkt von eingetragener Wassermenge (in [l/min]) und Spritzdruck (in [bar])

$$N_{V,R} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot p_D \cdot \dot{V}_{W,R} \quad \text{in [kW]} \quad (4)$$

berechnet werden. Sie ist ein Maß für die Intensität der Beanspruchung der zu reinigenden Rohstoffe durch die Hochdruckwasserstrahlen. In Bild 8 ist der qualitative Einfluss von Spritzdruck und Wassermenge auf die Strahlleistung für die Baugröße HC700 dargestellt. Eine Vergrößerung der Strahlleistung kann sowohl durch Erhöhung des Wassereintrages als auch durch Steigerung des Spritzdruckes erreicht werden. Die Strahlenergie berücksichtigt neben der vom Rotor in das Waschgut eingetragenen Wassermenge und dem Spritzdruck zusätzlich noch die Beanspruchungszeit t_B (in [s]).

$$E_{V,R} = 4,63 \cdot 10^{-7} \cdot p_D \cdot \dot{V}_{W,R} \cdot t_B \quad \text{in [kWh]} \quad (5)$$

Durch Erhöhung der Beanspruchungsintensität bzw. -dauer kann gemäß Bild 9 eine Intensivierung der Reinigungseffekte

the washing unit m_{HC} , which is determined based on the feed cross-section A_q and the velocity v_B of the discharge unit. Accordingly, it follows:

$$t_B = f(D_W, P, p_0, A_q, \dots, v_B) \quad \text{in [s]} \quad (1.2)$$

In Fig. 6, the qualitative influence of the raw material granulometry, characterized based on the surface area per unit of volume S_V and a washed material with round or crushed particles, on the material-specific water requirement $\dot{V}_{W,WG}$ is shown. It can be seen that mineral resources with a large specific surface area have a higher washing water requirement than materials with a small fines content. In addition, it can be seen that a material being washed that consists predominantly of particles with broken, rough surface also requires more water than a raw material with predominantly round, unbroken particles.

The washing rotor should be configured with consideration of the forecast material-specific water requirement $\dot{V}_{W,WG}$. The amount of water to be introduced into the washed material by the rotor $\dot{V}_{W,R}$ depends on the number of nozzles i_R , nozzle pressure p_D and the nozzle diameter d_D .

$$\dot{V}_{W,R} = f(i_R, p_D, d_D) \quad \text{in [l/min]} \quad (2)$$

To achieve an as large as possible coverage ratio \ddot{U}_R that reflects the ratio of “active” spraying area A_D to the total surface area of the material washed A_{HC} ,

$$\ddot{U}_R = \frac{A_D}{A_{HC}} \quad \text{in [-]} \quad (3)$$

the number of nozzles i_R is defined in the design of the individual HC sizes (Table 2). According to Fig. 7, the amount of water to be introduced into the washed material by the rotor is determined based primarily on the nozzle diameter d_D , as the volume flow of the jet liquid is defined based on the nozzle diameter. The flat spray nozzles necessary for this can be selected from the product range catalogues of the nozzle manufacturers [2]. The nozzle pressure p_D , which is the same for all rotor nozzles, can be optimally adjusted with consideration of the raw-material-specific properties using the pressure generation system.

3.2 Cleaning-relevant parameters

For quantification of the stress application by high-pressure water jet technology, characteristic values are suitable that enable conclusions to be drawn with regard to the intensity and duration of the stress applied. The cleaning-relevant characteristic values are therefore especially

- jet power $N_{V,R}$,
- jet energy $E_{V,R}$ and
- specific impact force F_{Sp}

suitable. The jet power can be calculated from the product of input quantity of water (in [l/min]) and nozzle pressure (in [bar]).

$$N_{V,R} = 1,67 \cdot 10^{-3} \cdot p_D \cdot \dot{V}_{W,R} \quad \text{in [kW]} \quad (4)$$

It is the measure for the intensity of the stress applied to the raw materials to be cleaned by the high-pressure water jets.

erreicht werden. Für die Beurteilung der Strahlwirkung auf die Waschgutoberfläche hat sich die spezifische Aufprallkraft F_{Sp} als besonders aussagefähig erwiesen, da neben der Beanspruchungsintensität auch noch die Spritzgeometrie (Spritzwinkel α und Abstand Rotor/Materialoberfläche h_R) berücksichtigt wird. Dazu ist die theoretische Gesamt-Aufprallkraft durch Faktoren für den gewählten Spritzwinkel k_α und den festgelegten Abstand Rotor/Waschgutoberfläche k_{hR} zu korrigieren [2].

$$F_{Sp} = 0.238 \cdot \dot{V}_{w,R} \cdot \sqrt{\rho_D} \cdot k_\alpha \cdot k_{hR} \quad \text{in [N/cm}^2\text{]} \quad (6)$$

In **Bild 10** und **Bild 11** ist der qualitative Einfluss der in Gleichung (6) enthaltenen Einflussfaktoren auf die spezifische Aufprallkraft dargestellt. Von den beiden Intensitätsparametern dominiert der Einfluss der vom Rotor in das Waschgut eingetragenen Wassermenge, die dem Düsendurchmesser proportional ist (**Bild 10**). Der Spritzdruck kann insbesondere zur Anpassung der Beanspruchungsgrößen an die spezifischen Materialeigenschaften des Waschgutes verwendet werden. Einen großen Einfluss auf die spezifische Aufprallkraft hat gemäß **Bild 11** die Spritzgeometrie. Durch Verwendung von Flachstrahldüsen mit kleinen Spritzwinkeln und Realisierung möglichst geringer Arbeitsabstände zwischen Rotor und Waschgutoberfläche kann eine erhebliche Vergrößerung der Aufprallkräfte erreicht werden. Jedoch muss dabei stets auch die damit einhergehende Verringerung des Überdeckungsgrades \dot{U}_R betrachtet werden, s. Gleichung (3).

3.3 Produktqualität und Kosten

Die Effizienz des Reinigungsprozesses wird besonders durch die erreichbare Produktqualität und die dazu aufzuwendenden spezifischen Kosten, z.B. für Frischwasser, Energie und Verschleiß, bestimmt. Das Hauptziel des Reinigungsprozesses besteht in der Entfernung bzw. Reduzierung unerwünschter Feinanteile $<63 \mu\text{m}$ aus mineralischen Rohstoffen, wie z.B. Locker- und Festgesteinen, Erzen etc., um hochwertige Zuschlagstoffe für die Bau- und Baustoffindustrie bereitzustellen zu können.

Zur Beurteilung des Reinigungsprozesses wird in der Praxis die sogenannte Läutergüte LG verwendet, die nach Bestimmung der Feinanteile im Aufgabegut m_A (Rohmaterial) und Fertigung m_F (Produkt) mit Hilfe von Nasssiebanalysen, wie folgt berechnet werden kann [1]:

$$LG = \frac{m_A - m_F}{m_A} \quad \text{in [-]} \quad (7)$$

Vielfach ist auch zur Qualitätsbeurteilung, insbesondere bei durchsatzstarken Waschprozessen, die Ermittlung des Restanteil FSS an Stör-/Schadstoffen im verkaufsfähigen Waschprodukt ausreichend für die Charakterisierung des Reinigungserfolges. Die einzuhaltenden Grenzwerte sind dazu für Produkte der Bau- und Baustoffindustrie in der DIN-EN 12620 und der TL Gestein – StB 04 festgelegt.

Eine weitere Verbesserung der Reinigungsleistung erfordert umfangreiche Kenntnisse über die Verfahrensabläufe bei Konfiguration und Betrieb der HAVER Hydro-Clean Waschtechnik, bei konsequenter Nutzung der Optimierungsmöglichkeiten der Prozessparameter.

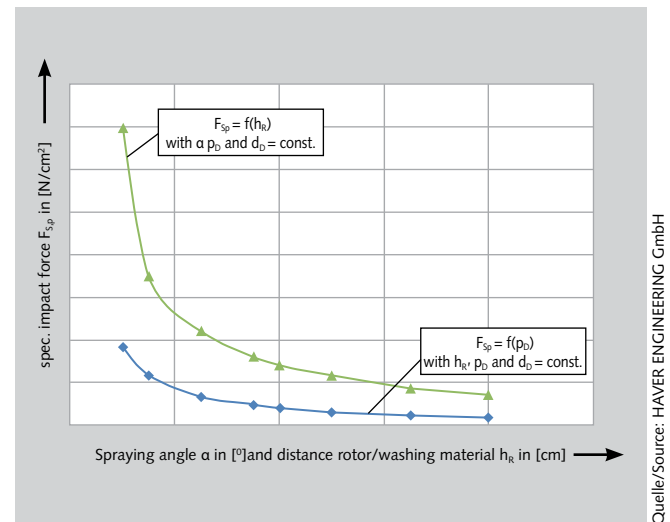
Fig. 8 shows the qualitative influence of nozzle pressure and quantity of water on the jet power for the HC700. A higher jet power can be achieved by increasing the water input as well as an increase in the nozzle pressure. The jet energy takes into account besides the quantity of water input into the washed material by the rotor and the nozzle pressure the stress time factor t_B (in [s]).

$$E_{V,R} = 4,63 \cdot 10^{-7} \cdot p_D \cdot \dot{V}_{w,R} \cdot t_B \quad \text{in [kWh]} \quad (5)$$

With increase of the stress intensity and time, the cleaning effects can be intensified in accordance with **Fig. 9**. For assessment of the jet effect on the surface of the material washed, the specific impact force F_{Sp} has proven especially useful, as in addition to the stress intensity, the spraying geometry (spraying angle α and distance between rotor and material surface h_R) is taken into account. In addition, the theoretical total impact force has to be corrected with factors for the selected spraying angle k_α and the defined distance between the rotor and surface of the material washed k_{hR} [2].

$$F_{Sp} = 0.238 \cdot \dot{V}_{w,R} \cdot \sqrt{\rho_D} \cdot k_\alpha \cdot k_{hR} \quad \text{in [N/cm}^2\text{]} \quad (6)$$

Fig. 10 and **Fig. 11** shows the qualitative influence of the influencing factors contained in Equation (6) on the specific impact force. From the two intensity parameters, the influence of the quantity of water introduced by the rotor into the material washed dominates, which is proportional to the nozzle diameter (**Fig. 10**). The nozzle pressure can be used especially



11 Qualitativer Einfluss von Spritzwinkel und Abstand Rotor/Waschgut auf die spezifische Aufprallkraft
Qualitative influence of the spraying angle and distance between the rotor and material washed on the specific impact force

to adjust the stress variables in line with the specific material properties of the material washed. According to **Fig. 11**, the spraying geometry has a big influence on the specific impact force. With use of flat spray nozzles with small spraying angles and minimized working distances between rotor and surface of the material being washed, a considerable increase in the impact forces can be achieved. However, the associated decrease in the degree of coverage \dot{U}_R must always be taken into account, see Equation (3).

Neben der Erhöhung des Reinigungserfolges besteht ein weiterer Schwerpunkt in der Reduzierung der eingesetzten Ressourcen und der damit verbundenen Senkung der Betriebskosten, z.B. für die

- Frischwasserentnahme,
- Brauchwasseraufbereitung,
- Energieinanspruchnahme für das Hochdruckwaschsystem sowie den Rotorantrieb und
- Instandhaltung bzw. Erneuerung relevanter Maschinenelemente (z.B. Hochdruckpumpe, Düsenbesatz).

Schwerpunkte der Weiterentwicklung des HAVER Waschsystems konzentrieren sich daher auf die

- Erschließung neuer kunden- bzw. stoffspezifischer Anwendungsfälle,
- Steigerung der Reinigungsqualität bei Minimierung des hydraulischen Energieeinsatzes durch Optimierung relevanter Düsen- und Betriebsparameter und
- Senkung der spezifischen Wasser-, Energie- und Verschleißkosten sowie der Kosten für die Brauchwasseraufbereitung.

4 Schlussfolgerung

HAVER & BOECKER hat auf Basis ihrer langjährigen und weltweiten Erfahrungen ein innovatives Hochdruckreinigungssystem entwickelt, das sich bereits bei vielen Reinigungsanwendungen in den Bereichen Bergbau, Recycling, Steine/Erden und Sand/Kies bestens bewährt hat [8 bis 11]. Durch Optimierung solcher reinigungsrelevanter Prozessparameter, wie z.B. Düsenparameter, benötigte Wassermenge und Spritzgeometrie, soll die Reinigungsqualität verbessert und eine weitere Senkung der spezifischen Betriebskosten, insbesondere durch Reduzierung des Einsatzes der Ressourcen „Wasser“ und „Energie“ erreicht werden.

Literatur • Literature

- [1] Müller, H.: Beitrag zur systematischen Untersuchung von Reinigungs- und Läuterprozessen. Diss. der TU Bergakademie Freiberg 2011
- [2] Düsenkunde der Fa. Spray System http://www.spray.de/cat-70de/pdf/cat70de_a.pdf
- [3] Technische Unterlagen der HAVER NIAGARA GmbH Münster: <http://www.haverniagara.com/>
- [4] Schicht, E.: Vom Waschen mineralischer Rohstoffe. Steinbruch und Sandgrube 07/2011, S. 12-14
- [5] Müller, H.: Läuterprozesse in der Aufbereitungstechnik. Bergbau 04/2010, S. 165-167
- [6] Momber, A.: Handbuch Druckwasserstrahl-Technik. Beton-Verlag 01/1993
- [7] Momber, A. (et. al.): Materialrecycling mit Hochdruckwasserstrahlen: Grundlagen und praktische Anwendungen. Expert-Verlag, 2000
- [8] Krellmann, J.; Hoppe, J.; Grotjohann P.: Internal presentation 'Iron Ore Washing – pilot test results', 2008 (HAVER Niagara, Muenster/Germany)
- [9] Grotjohann, P.; Mueller, H.: Innovative and resource-preserving washing processes for primary and secondary raw materials, 2010 (XXV International Mineral Processing Congress, Brisbane/Australia)
- [10] Kompakte Wasch- und Klassieranlage, Steinbruch und Sandgrube, 7/2008, S. 20-21
- [11] Effiziente Aufbereitung durch flexible Prozess- und Maschinenlösungen, Gesteins Perspektiven 5/2017, S.110-112

3.3 Product quality and costs

The efficiency of the cleaning process is determined particularly by the achievable product quality and the specific costs, e.g. for fresh water, energy and wear, and the costs incurred for this. The main objective of the cleaning process is the removal or reduction of unwanted fines < 63 µm from mineral raw materials, e.g. unconsolidated and consolidated rock, ores, etc. to supply high-quality aggregates for the construction and construction materials industry.

To assess the cleaning process, in practice the so-called washing quality LG is used., which after determination of the fines in the feed material m_A (raw material) and washed material m_F (product) with the help of wet screen analyses, can be calculated as follows [1]:

$$LG = \frac{m_A - m_F}{m_A} \quad \text{in } [-] \quad (7)$$

Often for the characterization of the cleaning performance, especially in the case of high-capacity washing processes, the determination of the residual content FSS of impurities/contaminants in the saleable washed product is sufficient in the scope of a quality assessment. The limits to be complied with for products in the construction and construction materials industry are specified in DIN-EN 12620 and TL Gestein – StB 04.

Further improvement of the cleaning efficiency requires extensive knowledge of the process sequences during the configuration and operation of the HAVER Hydro-Clean washing technology, with systematic use of the possibilities for optimizing the process parameters.

Besides the increase in the cleaning efficiency, another focus is the reduction of the resources used and the associated lowering of the operating costs, e.g. for the

- fresh water consumption,
- process water treatment,
- energy consumption for the high-pressure washing system as well as the rotor drive and
- maintenance or replacement of relevant machine elements (e.g. high-pressure pump, nozzles).

Focuses of the further development of the HAVER washing system are therefore concentrating on the

- development of new customer- or material-specific applications,
- improving the cleaning quality with minimization of the hydraulic energy input based on optimization of relevant nozzle and operating parameters and
- reduction of specific water, energy and wear costs and the costs for the process water treatment.

4 Conclusion

Drawing from its many years of experience gained worldwide, HAVER & BOECKER has developed an innovative high-pressure cleaning system, which has already proven very effective in mining, recycling, non-metallic minerals and sand/gravel [8 to 11]. With optimization of such cleaning-relevant process parameters, such as the jet nozzle parameters, required quantity of water and spraying geometry, the cleaning quality is to be improved and a further reduction of the specific operating costs, especially with the reduction of the consumption of the resources “water” and “energy”, is to be achieved.