Thorsten Kratz
Per Nicolai Martens

Optimization of mucking and hoisting operation in conventional shaft sinking

The mostly applied shaft sinking method is conventional shaft sinking by drilling and blasting. Using this method, almost any shaft geometry is feasible and challenging ground conditions can be sunk through with acceptable sinking performances. Particularly mucking and hoisting operations of the sinking cycle have a relevant impact on sinking performance and offer a considerable optimization potential. Nevertheless further developments concerning sinking performance are only rarely noticeable over the last decades.

At the beginning, this paper discusses parameters influencing mucking and hoisting performance. Furthermore, it is shown with assumed sinking scenarios that the selection of appropriate mucking equipment reduces mucking time significantly. The paper ends with concepts of pneumatic loading technology that offer additional options to improve sinking performance.

Optimierung der Lade- und Förderarbeit beim konventionellen Schachtabteufen

Das konventionelle Schachtabteufen mittels Bohr- und Sprengtechnik kommt beim Bau von Tagesschächten am häufigsten zum Einsatz. Nahezu unabhängig zur Schachtgeometrie ermöglicht das konventionelle Teufverfahren ein wirtschaftliches Abteufen auch durch schwieriges Gebirge. Die Arbeitsschritte Laden und Fördern der Berge beeinflussen hierbei die Teufleistung maßgeblich. Vor diesem Hintergrund hat sich das Verfahren in den letzten Jahrzehenten kaum weiterentwickelt, etwa was die Teufleistung betrifft.

Der Beitrag beginnt mit einer Vorstellung der Einflussfaktoren auf die Lade- und Förderleistung. Ein Vergleich gängiger Ladeverfahren zeigt den Einfluss der Geräteauswahl auf die Ladezeit für einen Abschlag. Abschließend stellt der Beitrag pneumatische Lade- und Förderkonzepte vor, die eine Steigerung der Teufleistung ermöglichen

1 Introduction

For civil and mining construction purposes shafts provide a vertical connection from surface to an underground working area. Those shafts can be excavated either by conventional drilling and blasting or by mechanical sinking methods. In the majority of cases (roughly 70 %) conventional shaft sinking is the applied sinking method, due to its flexibility concerning shaft geometry and surrounding rock conditions. Nevertheless development respective, e. g. sinking performance of the conventional shaft sinking method is lacking over the last decades.

The process cycle of conventional shaft sinking involves drilling and blasting operation, mucking and hoisting of blasted material, installation of primary rock support and permanent shaft lining. Mainly, blastholes are drilled with special shaft jumbos or less by handheld-drills. After charging and blasting a round, gases and dust have to be ventilated out of the shaft. Subsequent mechanized muckers load the blasted rock fragments into rock kibbles. Here, several types of muckers with different operation principles and locations are used. The filled kibble is transported

1 Einleitung

Schächte dienen primär zur Erschließung untertägiger Arbeitsstätten, sowohl im zivilen Sektor als auch in der Rohstoffindustrie. Dabei verfolgt die Erstellung eines Schachtes prinzipiell drei Hauptziele: schnelles, sicheres und wirtschaftliches Abteufen. Hierfür kommen das konventionelle und mechanisierte Teufverfahren zum Einsatz. Besonders das konventionelle Schachtabteufen mittels Bohr- und Sprengtechnik zeichnet sich durch sein breites Anwendungsspektrum aus und findet aus diesem Grund überwiegend Anwendung. Derzeit befinden sich weltweit rund 70 Großprojekte in der Bauphase, davon werden etwa 70 % konventionell geteuft.

Die größtenteils mechanisierten Arbeitsschritte des konventionellen Teufverfahrens setzen sich aus den Vorgängen Bohren, Sprengen, Laden und Fördern sowie dem anschließenden Einbringen von Gebirgssicherung und Schachtausbau zusammen. Nach Bohren der Sprengbohrlöcher mittels Schachtbohrgerät und Sprengen des Abschlags erfolgt das mechanisierte Laden des Haufwerks in einen Bergekübel durch Ladevorrichtungen, in oder

via mine hoist to the surface. After mucking and cleaning up the shaft bottom, primary rock support is installed as required. Shaft lining is erected either from the sinking stage or from the shaft bottom. Mucking and hoisting in shaft sinking can account for over 50 % of cycle time, particularly at large diameters and long rounds. Hence, this process step provides the opportunity to improve sinking performance.

Firstly, basic parameters are presented that influence mucking and hosting performance. Beside different mode of operating of the respecting equipment, mucking capacity depends on size of rock fragmentation and dimensions of blasting round. The following shaft mucker types are considered in this paper: Cactus Grab, Cryderman Shaft Mucker and Overshot Loader.

In the following the optimal selection of these shaft muckers will be illustrated in depending of different frame conditions. Finally in the last section of this paper, additional approaches regarding pneumatic loading technology to increase shaft sinking performance will be discussed.

2 Parameters influencing mucking and hoisting performance

The time for mucking and hoisting excavated material from one round is defined by the average mucking performance and the performance of the hoisting equipment. While the mucking performance is almost independent of the sinking progress, the hoisting performance decreases with increasing depth, assuming a constant kibble size. When hoisting performance is the limiting factor of mucking and hoisting operation, this is called the critical hoisting depth. Before starting the actual mucking and hoisting operation, the blasted rock has to be prepared for mucking operation and mucking equipment has be brought into position.

2.1 Preparatory Work

Preparation before mucking and hoisting operation comprises leveling of the shaft bottom and boulder breaking. The duration of these preparatory steps varies, depending on the used blasting and mucking technique. When required pre-work at the shaft bottom is completed, the mucking equipment can be brought into position.

A plain working surface provides the basis for efficient and more safety working operation at the shaft bottom. The manual leveling work begins after the first inspection to assess the blasting results. An average leveling capacity of about 1.5 m^2/min can be expected. Higher requirements concerning the evenness of the working surface extend the leveling process.

For example, a rough working surface impedes a smooth-running mucking operation using a crawler mounted overshot loader that operates with a front-mounted shovel. Due to its compact construction and jerky mucking movement, especially overshot loaders need an even shaft bottom. Furthermore, a secure kibble base area on the shaft bottom during mucking operation is absolutely necessary. The sinking crew has to prepare a slightly lower position for the incoming kibble. This working step has to be considered during the entire mucking and hoisting operation.

Sometimes the blasted rock contains components of large size fragmentation, so called boulders. These oversize rocks have to be broken into a loadable fragmentation size. Depending on

unter der Arbeitsbühne gelagert, oder Lademaschinen auf der Schachtsohle. Im Anschluss wird der gefüllte Bergekübel mittels Fördermaschine über ein Förderseil nach über Tage gefördert und dort entleert. Sind Schachtsohle und -stoß von gelöstem Gebirge befreit, kann eine vorläufige Gebirgssicherung bzw. der endgültige Ausbau eingebracht werden und der Arbeitszyklus beginnt von neuem. Die Tagesleistungen liegen in der Regel zwischen 1,5 m und 3,0 m, nur in Ausnahmefällen werden unter optimalen Rahmenbedingungen Teufleistungen um 4 m/d erreicht. Dabei beeinflussen die zeitaufwendigen Arbeitsvorgänge Laden und Fördern die Teufleistung im besonderen Maß.

Der Zeitaufwand für die Lade- und Förderarbeit ergibt sich in erster Linie aus dem Zusammenspiel von Lade- und Förderleistung. Die Leistung gängiger mechanischer Ladeverfahren unterliegt, neben gerätespezifischen Eigenschaften und entsprechender Bedienung, weiteren Einflussfaktoren wie beispielsweise Haufwerkseigenschaften (Korngrößenverteilung) und Abschlagsgeometrie (Abschlagslänge und Schachtdurchmesser). Darüber hinaus beeinflussen die fortschreitende Teufe und die gewählte Kübelgröße maßgeblich die Förderleistung. Dies verdeutlicht, dass die Wahl eines geeigneten Ladeverfahrens unter Berücksichtigung der zuvor genannten Einflussfaktoren und in Abhängigkeit von der Förderleistung entscheidend die Teufleistung beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Optimierung der Lade- und Förderarbeit beim konventionellen Schachtabteufen Gegenstand der nachfolgenden Betrachtung.

Zunächst erfolgt eine allgemeine Erläuterung der Einflussfaktoren auf die Lade- und Förderleistung. Die Ladearbeit wird hierfür in drei leistungsbezogene Teilabschnitte unterteilt: Laden mit Volleingriff, Laden mit reduzierter Leistung und manuelles Sauberladen der Schachtsohle. Eine Gegenüberstellung von Wurfschaufellader, Mehrschalengreifer und Cryderman Shaft Mucker mittels exemplarischer Teufszenarien verdeutlicht den Einfluss der Geräteauswahl auf die Ladezeit für einen Abschlag.

Im weiteren Verlauf beinhaltet der Beitrag weiterführende Optimierungsmöglichkeiten, wie beispielsweise das Parallelisieren von Ladearbeit und Gebirgssicherung oder Steigerung der durchschnittlichen Ladeleistung trotz begrenzender Förderleistung. Abschließend erfolgt ein kurzer Ausblick zur Integration pneumatischer Lade- und Förderkonzepte in das konventionelle Schachtabteufen.

2 Einflussfaktoren auf die Lade- und Förderleistung

Grundsätzlich ermittelt sich der Zeitaufwand für das Laden und Fördern eines Abschlags aus der Leistung der Ladevorrichtung oder der Fördereinrichtung. Während sich die durchschnittliche Ladeleistung nahezu unabhängig zum Teuffortschritt verhält, sinkt die Förderleistung bei gleichbleibendem Kübelvolumen beständig mit zunehmender Teufe. Der Zustand, bei dem die Förderleistung den begrenzenden Faktor für die Ladearbeit darstellt, wird als kritische Förderlänge bezeichnet. Doch bevor die eigentliche Lade- und Förderarbeit beginnt, erfolgt das Aufrüsten der Schachtsohle und die Bereitstellung der Ladevorrichtung.

2.1 Sohle aufrüsten und Bereitstellen der Ladevorrichtung

Das Aufrüsten der Schachtsohle beinhaltet nach der Kontrolle der

the bucket size of the mucking equipment, the maximum loadable rock size varies. Using a Cryderman Shaft Mucker with a generally smaller bucket compared to a Cactus Grab, a relatively higher amount of boulders in the muck can be expected. Boulder breaking is done mechanically with drills or by blasting. Blasting is very time-consuming, as the common shaft sinking cycle is interrupted by additional blasting and ventilation (1).

The mucking equipment listed above differs regarding the way to bring it into position. An overshot loader is hoisted from the surface down to the shaft bottom. In exceptional cases, the overshot loader can be stored on the sinking stage. With regard to total time demand, both hoisting and lashing of the overshot loader has to be considered. The hoisting time from surface increases with sinking progress.

A Cryderman Shaft Mucker with limited telescopic boom is mounted on the sinking stage. Thus, a Cryderman Shaft Mucker is brought into position by lowering the sinking stage (2). Based on a safety distance of roughly 30 m between shaft bottom and sinking stage to prevent blasting damages and a lowering velocity of the sinking stage of 1 m/min, it takes about 30 min to set up a Cryderman for mucking. Concerning long rounds and large shaft diameters, the Cryderman's telescopic boom is not long enough to load a complete round, without additional lowering of the sinking stage.

Mucking operation using Cactus Grabs is almost independent of the position of the sinking stage, because the vertical movement is accomplished by a rope winch that is mounted under the sinking stage (3).

2.2 Mucking Operation

Mechanical mucking operation in shaft sinking consists of three consecutive parts: mucking with maximum capacity, mucking with reduced capacity and final cleaning. The performance of mechanical shaft muckers decreases, when their digging units hit solid rock and the filling degree of the bucket is not optimal anymore. That means the less blasted material on the shaft bottom the less mucking performance due to a reduced filling factor of the bucket. The digging depth of the bucket defines when mucking with reduced capacity sets in. When finally mechanical mucking equipment is getting less efficient than manual mucking by the shaft crew, this indicates the beginning of the final mucking part: cleaning the shaft bottom.

Accordingly, the capacities of each part of mucking operation and their relative shares add up to the average mucking capacity. Different blasting round dimensions and mucking equipment parameters - e. g. bucket size and digging principle - lead to different amounts of blasted rock that can be mucked with appropriate capacity.

Sprengung u. a. die Arbeitsvorgänge Planieren der Schachtsohle sowie Knäpperzerkleinerung. Ob und wie arbeitsintensiv die beiden letztgenannten Arbeitsschritte ausfallen, ist prinzipiell abhängig von den Eigenschaften des anstehenden Gebirges, der Sprengtechnik und vom eingesetzten Ladegerät. Nachdem die Schachtsohle für den Einsatz des Ladegerätes hergerichtet ist, kann die Ladearbeit beginnen.

Eine ebene Arbeitsoberfläche gilt als Grundlage für effizientes Arbeiten auf der Schachtsohle. Gleichzeitig wird die Verletzungsgefahr deutlich reduziert. Das Planieren der Schachtsohle erfolgt i. d. R. von Hand durch die Schachthauer im Anschluss an die erste Seilfahrt nach der Sprengung und der Kontrolle des Sprengergebnisses. Als Basiswert für eine manuelle Planierleistung auf der Schachtsohle können etwa 1,5 m^2/min angenommen werden. Besondere Anforderungen an die Schachtsohle als Arbeits- und Standfläche verlängern den Zeitbedarf der Planierarbeit.

Als anschauliches Beispiel dient in diesem Zusammenhang der Wurfschaufellader. Bedingt durch die kompakte, hohe Bauweise des Laders und der ruckartigen Bewegung durch den pneumatischen Antrieb ist eine möglichst ebene Arbeitsfläche erforderlich, um die Standsicherheit zu gewährleisten. Die Kübelbeladung auf der Schachtsohle stellt ebenso spezielle Anforderungen an die Haufwerksoberfläche. Die Standsicherheit des Kübels wird durch eine Vertiefung im Haufwerk, dem Kübelstand erreicht. Dieser Arbeitsschritt ist sowohl beim Aufrüsten der Schachsohle als auch im weiteren Verlauf der Ladearbeit zu berücksichtigen.

Häufig entstehen bei der Sprengung eines Abschlags grobstückige Haufwerksbrocken, sogenannte Knäpper. Diese müssen zunächst in ladefähige Korngrößen zerkleinert werden. Die Nachzerkleinerung von Knäppern erfolgt entweder mechanisch durch Bohrhämmer oder mittels Sprengtechnik. Letztgenannte Methode gestaltet sich sehr zeit- und kostenintensiv, da der Betriebsablauf durch Sprengung und erforderliches Auswettern der Schwaden unterbrochen wird (1). Das Grabwerkzeug und die Grabbewegung beeinflussen die ladbare Korngröße, so dass beispielsweise beim Einsatz von Ladegeräten mit geringer Schaufelgröße – z. B. Cryderman Shaft Mucker – im Vergleich zum Mehrschalengreifer ein relativ betrachtet höherer Knäpperanteil im Haufwerk zu erwarten ist. Beim Wurfschaufellader begrenzt die geringe Eindringtiefe der Frontschaufel beim Grabvorgang die maximal ladbare Korngröße. Hingegen lässt sich ein feinkörniges Haufwerk mit einem Wurfschaufellader bei entsprechender Bedienung ausgezeichnet laden.

Ladegeräte unterscheiden sich hinsichtlich der Art und Weise der Bereitstellung. Der Mehrschalengreifer wird i. a. mit einer Greiferwinde auf und ab bewegt. Die Greiferwinde befindet sich hierbei auf einer Greiferbühne unterhalb der Arbeitsbühne. Zwischen Arbeitsbühne und Schachtsohle beträgt der Sicherheitsabstand etwa 30 m, um Schäden durch Sprengung zu vermeiden. Bei ausreichender Länge des Greiferseils lädt der Mehrschalengreifer nahezu unabhängig zur Position der Arbeitsbühne (2). Bei Einsatz eines in der Arbeitsbühne integrierten Cryderman Shaft Muckers, muss die Bühne für die Ladearbeit nach der Sprengung zur Schachtsohle abgesenkt werden. Dieser Vorgang kann bei einer Sinkgeschwindigkeit der Arbeitsbühne von 1 m/min entsprechend viel Zeit in Anspruch nehmen. Zudem ist zu beachten, dass bei langen Abschlägen die begrenzte Auslegerreichweite des Cryder-

To calculate the maximum capacity of the mucking equipment, the following formula may be used:

$$P_{La} = \frac{V_{Gr}}{t_{LaSp}} * f_F * f_D * A * V$$

With:

P_{La} = mucking capacity [m³/min]
V_{Gr} = bucket volume [m³]
t_{LaSp} = mucking cycle time [min]
f_F = fill factor
f_D = factor for equipment dimension
A = capacity utilization
V = availability

The length of the mucking cycle time, composed of the process steps digging, swinging (or driving backwards) and lifting, discharging, swinging (or driving forward) and lowering is determined by the general working principle of the mucking equipment. Furthermore, major factors affecting the muck cycle time are properties of the blasted muck and operator skills.

When mean fragmentation size is getting larger, digging time increases due to higher digging resistance of the coarse material (4). A comparison of digging times between cactus grab and overshot loader clarifies that besides mean fragmentation size, bucket configuration and digging movements also effect the digging time. The pointed grab shells of a cactus grab hit vertically on the blasted material and intrude smoothly into the muck, almost independent of fragmentation size. In contrast to that, coarse material restrains a smooth filling of the front shovel of an overshot loader when driving forward. Hence, the digging time of an overshot loader increases considerably, in case coarse material has to be loaded.

Additional impact on the muck cycle time has the selection of equipment dimensions specifically bucket dimensions. Larger equipment size leads to slower movement and larger bucket size results in increasing digging resistance (5). These parameters again lead to longer mucking time. They are considered in the formula for mucking capacity with an empirical factor for equipment dimension (fD). Beside operator skill, the bucket fill factor (fF) of mucking equipment is mainly dependent the distribution of fragmentation size. Empirical investigations show that low fill factors are attended by increasing mean fragmentation size (6).

The following diagrams show the development of the maximum mucking performances of the mentioned equipment affected by both, mean fragmentation size and commonly used bucket sizes.

man Shaft Muckers nicht ausreicht, sodass der Abschlag nur mit erneutem Absenken der Arbeitsbühne vollständig geladen werden kann (3). Die Bereitstellung des Wurfschaufelladers erfolgt im Regelfall über die Förderung von über Tage zur Schachtsohle. Neben der Förderzeit entsteht zusätzlicher Zeitaufwand für das An- und Abschlagen des Ladegeräts.

2.2 Ladearbeit auf der Schachtsohle

Die mechanische Ladearbeit im Schacht lässt sich theoretisch in drei leistungsbezogene Abschnitte einteilen: Laden bei Volleingriff, Laden mit reduzierter Leistung und Sauberladen. Zu Beginn der Ladearbeit eines Abschlags liegt eine ausreichende Haufwerksmenge vor, die dem Grabwerkzeug vollen Eingriff in das Haufwerk ermöglicht. In diesem ersten Abschnitt der Ladearbeit ist die Leistung entsprechend hoch zu erwarten. Trifft das Grabwerkzeug beim Grabvorgang auf festes Gestein, ist eine optimale Füllung nicht mehr möglich, die Ladeleistung sinkt. Je weniger Haufwerk auf der Schachtsohle liegt, desto deutlicher verringert sich die Ladeleistung, da sich der Füllungsgrad des Grabwerkzeuges ebenfalls verringert. Das Einsetzen des Ladeabschnittes mit reduzierter Leistung hängt somit von der Eindringtiefe des Grabwerkzeuges ab. Der Zeitpunkt, ab dem der Einsatz eines mechanischen Ladeverfahren nicht mehr lohnt, da das manuelle Zusammentragen der Berge durch Schachthauer eine höhere Ladeleistung erzielt, kennzeichnet den Beginn des letzten Teilabschnittes der Ladearbeit, das Sauberladen und Bohrfestmachen der Schachtsohle. In Abhängigkeit von Abschlagsgeometrie und Grabvorgang bzw. -werkzeug liegen unterschiedliche Haufwerksanteile vor, die das Ladegerät mit entsprechender Leistung lädt.

Mit nachfolgender Formel lässt sich die Ladeleistung bei Volleingriff berechnen:

$$P_{La} = \frac{V_{Gr}}{t_{LaSp}} * f_F * f_D * A * V$$

Mit:

P_{La} = Ladeleistung [m³/min]
V_{Gr} = Volumen Grabwerkzeug [m³]
t_{LaSp} = Dauer des Ladespiels [min]
f_F = Faktor für Füllungsgrad
f_D = Faktor für Gerätedimensionierung
A = Auslastung
V = Verfügbarkeit

Ein Ladespiel besteht aus den Einzelvorgängen Graben, Schwenken/Heben, Entleeren und Schwenken/Senken. Die grundlegende Funktionsweise des Ladegeräts und die vorliegenden Haufwerkseigenschaften beeinflussen die Dauer dieser Vorgänge. Beispielsweise verlängert sich die Dauer des Grabvorganges mit zunehmender Korngröße, da der Grabwiderstand beim Eindringen der Schaufel in das Haufwerk bei grobkörnigem Haufwerk höher einzuordnen ist (4). Ein Vergleich zwischen Mehrschalengreifer und Wurfschaufellader verdeutlicht, dass neben der Korngröße, die Schaufelform und Ausführung der Grabbewegung die Dauer des Grabvorganges beeinflussen. Die spitzen Greiferschalen eines Mehrschalengreifers treffen vertikal auf das gesprengte Haufwerk und dringen nahezu unabhängig von der Korngröße

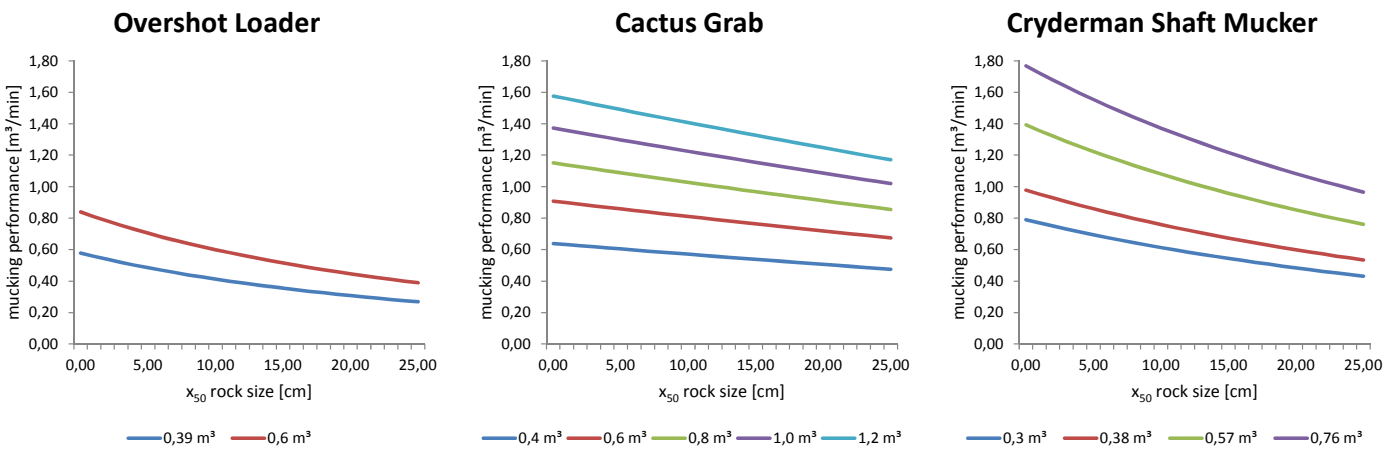

Fig. 1. Mucking performance of selected equipment.
Bild 1. Entwicklung der Ladeleistung ausgewählter Ladegeräte bei vollem Eingriff in das Haufwerk

2.3 Hoisting Operation

To calculate the cycle time of the sinking process, mucking and hoisting operation have both to be considered. Independent of mucking performance, hoisting performance (kibbles/h) is determined by hoisting cycle time, kibble size and number of used kibbles. The hoisting cycle time consists of lashing on the filled kibble to the hoisting rope, hoisting to surface (filled), kibble discharging, hoisting down to shaft bottom (empty) and lashing of the lowered kibble. The hoisting time, without lashing and discharging, is affected by effective depth of the shaft and hoisting velocity. In the vicinity of sinking stage and shaft headframe slow hoisting velocities have to be considered. According to "Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen" (TAS), the maximum hoisting velocity for shaft sinking operation is 12 m/s in normal mode and 1 m/s during slow hoisting (7).

In great depth, loading capacity of the hoisting rope limits the kibble size. Generally, kibble sizes of 3 - 7 m³ are common. In particular cases, mucking equipment determines the maximum kibble size. So is the discharge height of an overshot loader about 1.9 m, accordingly the kibble dimension has to be adapted to the mucking equipment's construction (8).

An increasing number of kibbles improve hoisting performance. A double drum hoisting machine enables shaft sinking with three-kibble-operation, which represents the maximum number of kibbles. The kibble handling on the shaft bottom is done by the sinking crew. They push the empty kibble, coming from the surface into the provided slot in the blasted muck. Then, the snap hook is lashed off from the empty kibble and is connected to the kibble standing already filled on the shaft bottom. The diagonal pull of the hoisting rope generates an oscillating kibble movement that has to be slowed down manually by the sinking crew. At the same time, the third kibble is discharged at the surface in a chute on the headframe. Generally, discharge the kibble needs more time than lashing work at the shaft bottom.

Figure 2 illustrates the lower capacity of a two-kibble hoisting system compared to a three-kibble-system. In this example, the critical hoisting depth for two-kibble-operation is roughly 780 m, considering a minimum hoisting performance of 6.5 kibbles/h. For greater depths, it is reasonable to increase the hoisting per-

problemlos in das Haufwerk ein. Im Gegensatz dazu verhindert grobkörniges Haufwerk ein leichtgängiges Füllen der Frontschaufel des Wurfschaufelladers, wodurch sich die Grabzeit bei zunehmender Korngröße deutlich verlängert.

Zusätzlichen Einfluss auf die Dauer des Ladespiels hat die Gerätedimensionierung bzw. Wahl der Greifergröße. Ein größeres Greifervolumen bedeutet im Allgemeinen eine langsamere Schwenk-, Heb- und Senkbewegungen des Ladegeräts. Zudem stellt sich beim Einsatz eines größeren Grabwerkzeuges ein höherer Grabwiderstand ein, wodurch sich folglich auch die Grabzeit verlängert (5). Diese Einflussparameter werden in der Formel zur Leistungsberechnung der Ladearbeit mit dem Faktor für Gerätedimensionierung berücksichtigt.

Neben einer Bedienung des Ladegeräts, bestimmt die mittlere Korngröße x50 den Füllungsgrad des Grabwerkzeuges. Empirische Untersuchungen zeigen, wie grobstückiges Haufwerk den Füllungsgrad der Schaufel verringert (6).

Die folgenden Diagramme in Abbildung 1 verdeutlichen die Entwicklung der Ladeleistung ausgewählter Ladegeräte bei vollem Eingriff in das Haufwerk, in Abhängigkeit zur mittleren Korngröße und zum Greifer- bzw. Schaufelvolumen.

2.3 Förderarbeit im Teufbetrieb

Zur Berechnung der Zykluszeit beim konventionellen Schachtabteufen werden Lade- und Förderarbeit stets gemeinsam betrachtet. Losgelöst von der Ladeleistung ermittelt sich die Förderleistung (Kübel/h) aus der Förderspielzeit pro Kübel, dem Kübelvolumen und der Kübelanzahl. Der Zeitaufwand für ein Förderspiel setzt sich aus der reinen Förderzeit und dem Zeitaufwand für das An- und Abschlagen sowie der Entleerung des Kübels zusammen. Hierbei wird die Förderzeit maßgeblich durch Teufe und Fördergeschwindigkeit beeinflusst. Bei der Förderung sind im Bereich von Arbeitsbühne und Fördergerüst Schleichfahrtstrecken mit verminderter Fördergeschwindigkeit zu berücksichtigen. Nach den Technischen Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen (TAS) liegt die max. Fördergeschwindigkeit im Teufbetrieb bei 12 m/s und im Schleichfahrtbereich bei 1 m/s (7). Die Tragfähigkeit des Förderseils begrenzt in großen Teufen das Kübelvolumen, im Regelfall werden Drei- bis Sieben-Kubik-

formance by using the three-kibble-system. The critical depth of the three-kibble-system is about 2670 m. Below this depth, the mucking equipment cannot reach its maximum performance due to further decreasing hoisting performance.

3 Mucking Eqiupment Selection

The selection of appropriate mucking equipment reduces the time needed for mucking an entire blasting round and thus enhances sinking performance. Table 1 describes three assumed shaft sinking scenarios, to compare overshot loader, Cryderman Shaft Mucker and Cactus Grab regarding their operating performance. The sinking scenarios differ concerning blasting round length, shaft diameter, depth and rock properties. The selected bucket sizes of each mucking equipment are adapted to the respective operating condition. For this comparison, it is assumed that hoisting performance is always higher than maximum mucking capacity. The calculated data regarding mucking time and capacity are based on a proprietary performance and cost model for conventional shaft sinking.

The first scenario is characterized by a short blasting round and finely grained rock fragmentation. This makes an overshot loader the equipment of choice, which is proven by the calculated mucking time (figure 3). Finely grained material enables a

meterkübel eingesetzt. Zu beachten ist, dass auch das eingesetzte Ladegerät die Kübelgröße begrenzen kann. Beispielsweise liegt die Entladehöhe eines Wurfschaufelladers bei etwa 1,9 m, sodass die Kübeldimensionierung an die Bauweise des Laders angepasst werden muss (8).

Zur Förderung der Berge nach über Tage können bis zu drei Kübel eingesetzt werden. Eine geübte Sohlenmannschaft und geeignete Fördermaschine vorausgesetzt, ermöglicht die Förderung im Drei-Kübelsystem die höchste Leistung. Für das An- und Abschlagen der Kübel auf der Schachtsohle ist die Sohlenmannschaft zuständig, die den ankommenden Kübel in den vorgefertigten Kübelstand drückt und abstellt. Der Karabinerhaken wird abgeschlagen und an den zweiten Kübel angeschlagen, der bereits gefüllt auf der Sohle steht. Anschließend wird der gefüllte Kübel angehoben, wobei durch den Schrägzug des Förderseils eine Pendelbewegung des Kübels entstehen kann. Die Sohlenmannschaft bremst diesen durch Gegendrücken von Hand ab. Zur gleichen Zeit wird der dritte Kübel über Tage durch eine Kippvorrichtung am Teufgerüst entleert. Die Kübelentleerung dauert i. a. etwas länger als das An- und Abschlagen.

Abbildung 2 zeigt die niedrigere Förderleistung im Zwei-Kübelbetrieb (gelb) im Vergleich zu einem Drei-Kübelsystem (grün) und verdeutlicht den Zustand der kritischen Förderteufe im Zusammenhang mit der minimalen Förderleistung (blau, hier bei rund 6,5 Kübel/h). In diesem fiktiven Beispiel liegt die kritische Förderteufe für das Zwei-Kübelsystem bei etwa 780 m. In größeren Teufen wäre es in diesem Fall sinnvoll, die Förderleistung durch Hinzunahme eines dritten Kübels zu steigern. Die kritische Förderteufe verlagert sich dadurch in eine Teufe von etwa 2.670 m. Bei weiterführenden Teufarbeiten könnte die Ladearbeit auf der Schachtsohle nicht mehr mit voller Leistung durchgeführt werden.

3 Einsatzoptimierung mechanischer Ladegeräte

Bei Berücksichtigung verschiedenster Rahmenparameter verkürzt die Wahl eines geeigneten Ladegeräts den Zeitaufwand für die Ladearbeit pro Abschlag und steigert somit die Teufleistung. Mit Hilfe der in Tabelle 1 aufgeführten Teufszenarien, die sich hinsichtlich Abschlagslänge, Schachtdurchmesser und Haufwerkseigenschaften (Korngrößenverteilung) unterscheiden, soll der Einfluss der Geräteauswahl verdeutlicht werden. Grundsätzlich

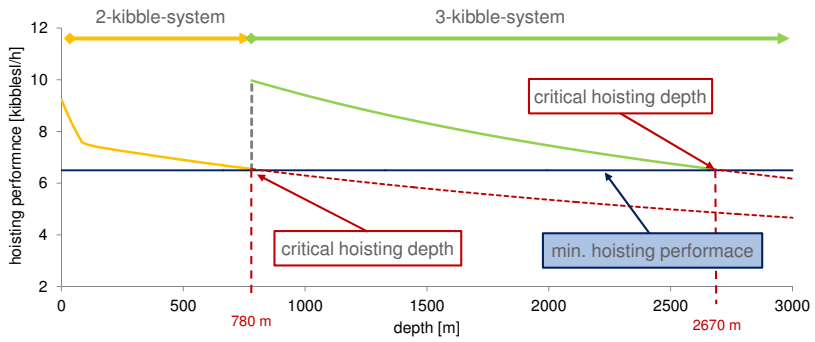

Fig. 2. Interaction of mucking and hoisting performance affected by depth and hoisting system
Bild 2. Lade- und Förderleistung in Abhängigkeit von Teufe und Kübelanzahl

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
x_{50}	2.5 cm	4.5 cm	7.5 cm
x_{100}	25 cm	50 cm	100 cm
diameter	8.5 m	7.5 m	9.5 m
advance	1.5 m	3.0 m	4.5 m
depth	300 m	900 m	1,500 m

Table 1. Shaft sinking scenarios for comparison of the mucking equipment
Tabelle 1: Teufszenarien für die Auswahl von Ladegeräten.

smooth filling of the lowered front shovel and a mucking cycle takes around 35 s. The available space (8.5 m diameter) is sufficient for mucking movement of an overshot loader.

Furthermore, short blasting rounds lead to relatively higher proportion of cleaning the shaft bottom in comparison to long blasting rounds. Here, the low digging depth of an overshot loader is of advantage and only a small amount of blasted material has to be mucked manually by the sinking crew. The histogram in figure 3 highlights that the overshot loader can muck at maximum capacity for a longer time than the other equipment. Thus, the comparatively lower mucking capacity is balanced. The longer time needed to bring the overshot loader into position (hoisting from surface) is not relevant for low depths. The low investment costs are a further advantage of the overshot loader. This fact is important for low budget shaft sinking projects.

Based on the model calculation, the Cryderman Shaft Mucker is the optimal mucking equipment for sinking scenario 2. The frame conditions comprise moderate length of blasting round, smaller shaft diameter comparing to scenario 1 and medium grained fragmentation size. Due to the short mucking cycle of about 25 s, the Cryderman Shaft Mucker accomplishes a high-capacity mucking operation. As a result of the medium sized bucket, the time needed for mucking with reduced capacity and shaft cleaning is smaller compared to a Cactus Grab. Present rock

wird angenommen, dass die Förderleistung über der maximalen Ladeleistung liegt. Die Dimensionierung der Ladevorrichtungen entsprechen gängigen Schaufel- bzw. Greifergrößen bei jeweiligen Rahmenbedingungen. Die Daten zur Dauer der Ladearbeit basieren auf einem eigens erstellten Leistungs- und Kostenmodell zum konventionellen Schachtabteufen.

Das erste Szenario ist durch eine geringe Abschlagslänge und feines Haufwerk gekennzeichnet. Wie Abbildung 1 zeigt, begünstigen beide Parameter den Einsatz eines Wurfschaufelladers, der Zeitaufwand zum Laden ist somit am geringsten zu erwarten. Feinstückiges Haufwerk ermöglicht ein leichtgängiges Füllen der abgesenkten Frontschaufel, sodass ein Ladespiel nur etwa 35 s dauert. Der für den Ladevorgang benötige Platz zum Manövrieren des Wurfschaufelladers ist hier mit einem Schachtdurchmesser von 8,50 m gegeben. Bei kurzen Abschlägen ist der prozentuale Anteil des Sauberladens an der gesamten Ladearbeit höher als bei größeren Abschlagslängen. Unter diesen Rahmenbedingungen ist der Einsatz des Wurfschaufelladers von Vorteil, da durch die geringe Eindringtiefe der Schaufel nur eine geringe Menge Haufwerk auf der Schachtsohle zurückbleibt, die mit reduzierter Leistung und von Hand geladen werden muss. Das Balkendiagramm in Abbildung 3 verdeutlicht, dass beim Wurfschaufellader die Dauer für das Sauberladen der Schachtsohle am kürzesten zu erwarten ist, wodurch die vergleichsweise geringe Ladeleistung bei Volleingriff ausgeglichen werden kann. Der zusätzliche Zeitaufwand zur Bereitstellung (Einförderung von über Tage) des Wurfschaufelladers fällt bei geringer Schachtteufe nicht sonderlich ins Gewicht. Weiterhin zeichnet sich der Wurfschaufellader durch geringe Investitionskosten aus. Dieser Vorteil ist besonders bei weniger kapitalintensiven Schachtbauprojekten (z. B. geringe Teufe) von Bedeutung.

Auf Basis der Modellrechnung ist der Cryderman Shaft Mucker das optimale Ladegerät für Teufszenario 2. Durch ein relativ kurzes Ladespiel (ca. 25 s) erreicht der Cryderman eine hohe Ladeleistung von etwa 0,84 m³/min. Abbildung 4 zeigt, dass aufgrund der mittleren Greifergröße die Ladeabschnitte mit reduzierter Ladeleistung und Sauberladen im Vergleich zum Mehrschalengreifer kürzer ausfallen. Das anfallende Haufwerk ist mit dem

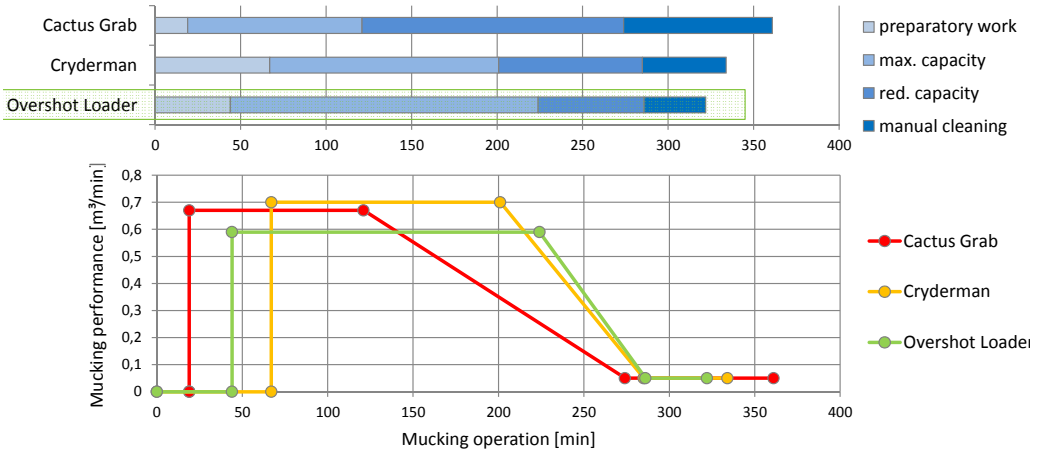

Fig. 3. Time for mucking operation (scenario 1)
Bild 3. Zeitaufwand für Ladearbeit (Teufszenario 1)

fragmentation size is suitable for the selected bucket size and additional boulder breaking would not be required. Despite the long time to bring the Cryderman into position due to slow sinking velocity of the sinking stage, it achieves high mucking performance and requires low effort for shaft cleaning.

By means of long blasting rounds, a high sinking performance can be reached, also for wide shaft diameters. A high-capacity Cactus Grab using a 1.2 m³ bucket achieves under these frame conditions the highest average mucking performance considering the preparatory time. Moreover, the large scale geometry of the blasting round requires mucking equipment with an appropriate vertical and horizontal operating reach. The widely opened grab shells of the Cactus Grab provide an efficient mucking of coarse material. The histogram in figure 5 illustrates that prior boulder breaking delays the start of mucking operation for an Overshot Loader or a Cryderman Shaft Mucker. No further boulder breaking is needed, when a Cactus Grab is used. When using a Cryderman Shaft Mucker, the sinking stage has to be lowered twice for mucking the entire round. Thus, the mucking operation is interrupted and the average mucking performance of a Cryderman Shaft Mucker with limited reach is lower compared to the Cactus Grab. Scenario 3 represents a capital intense shaft sinking project. The overall sinking costs are mainly driven by costs of consumables and other operations. Expenditures for expensive mucking equipment like a Cactus Grab have only minor impact on total sinking costs.

4 Further Optimization Approaches

To increase sinking performance while using conventional equipment, partly parallel implementation of selected process steps of the shaft sinking cycle is feasible. Safety regulations and process steps that have to be extended in a sequence are often obstacles for running several processes in parallel. Installation of primary rock support and final shaft lining are process steps that can take place on different levels of the sinking stage, simultaneous to drilling and mucking operations on the shaft bottom, as long as stability of the surrounding rock allows for a delayed installation. However, after exposing the unsupported shaft wall, commonly

gewählten Greifervolumen gut ladbar und bedarf im Regelfall keiner zusätzlichen Knäpperzerkleinerung. Der zeitliche Aufwand zur Bereitstellung ist im Vergleich zu den beiden anderen Ladevorrichtungen am längsten, da für den Ladeeinsatz des Crydermans zunächst die Arbeitsbühne abgesenkt werden muss.

Mit Hilfe langer Abschläge können auch bei großen Schachtdurchmessern hohe Teufleistungen erzielt werden. Ein entsprechend dimensionierter Mehrschalengreifer erreicht unter diesen Einsatzbedingungen durch sein großes Greifervolumen (1,2 m³) sowie die vertikale und horizontale Reichweite die höchste Ladeleistung. Weitgeöffnete Greiferschalen ermöglichen das Laden größerer Haufwerksbrocken, sodass im Gegensatz zum Wurfschaufellader und Zweischalengreifer keine zeitaufwendige Knäpperzerkleinerung durchgeführt werden muss. Zudem ist die Dauer des Ladespiels nahezu unabhängig von der Stückigkeit des Haufwerks. Dieses Teufszenario stellt ein kapitalintensives Großprojekt dar, bei dem die gesamten Teufkosten weniger von den Investitionskosten in das Equipment, als von Verbrauchsmaterialien sowie Betriebskosten und damit von der Projektdauer und Teufleistung abhängen. Folglich kann der Kostenaufwand für einen Mehrschalengreifer entsprechend hoch liegen.

4 Weitere Optimierungskonzepte

Die folgenden Optimierungsansätze betrachten zur Steigerung der Teufleistung zum einen die Erhöhung der durchschnittlichen Ladeleistung und zum anderen Änderungen im Verfahrensablauf, die zusätzlich eine Verbesserung der Arbeitssicherheit bewirken.

Um die Teufleistung zu steigern, besteht die Möglichkeit, bestimmte Prozessschritte des konventionellen Teufverfahrens bis zu einem gewissen Grad zu parallelisieren. Grundsätzlich können Arbeiten parallelisiert werden, die nicht aufeinander aufbauen und Sicherheitsanforderungen weiterer Verfahrensabläufe berücksichtigen. Auf den Etagen der Arbeitsbühne können beispielsweise Gebirgssicherung und Schachtauskleidung teilweise parallel zur Bohr- oder Ladearbeit auf der Schachtsohle eingebracht werden, sofern die Standsicherheit des Gebirges ein verspätetes Einbringen von Sicherung und Ausbau zulässt. Nach Freilegung der ungesicherten Schachtwandung durch das Wegladen der

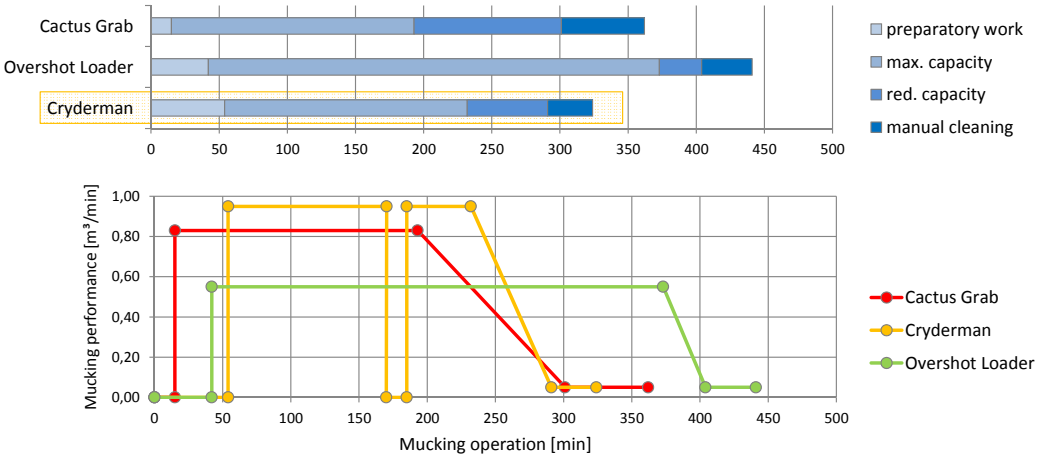

Fig. 4. Time for mucking operation (scenario 2)
Bild 4. Zeitaufwand für Ladearbeit (Teufszenario 2)

mucking and hoisting operations have to be interrupted during the installation of primary rock support, e. g. rock bolts and wire mesh. Depending on the used mucking and hoisting equipment, appropriate space and manpower are required, thus avoiding the installation of primary rock support in parallel to mucking operation.

Certainly, increasing the mucking capacity by using even larger bucket sizes is an obvious option. However, more stable construction components have to be provided, which increases all in all equipment costs, weight and dimensions.

Furthermore, state of the art hoisting technology (even when using three-kibble-system) is limiting the maximum mucking performance in great depth due to decreasing hoisting performance. Accordingly, to increase maximum mucking capacity of conventional equipment makes sense only for low depth shaft sinking projects. In contrast to that hoisting performance is higher than mucking with reduced capacity and even more so for cleaning the shaft bottom. The potential of optimization of these mucking parts is a significant opportunity, since hoisting performance in great depths is not a limiting factor anymore.

Besides selecting appropriate and high-capacity mucking equipment, pneumatic suction technology provides an alternative to increase sinking performance and additionally improves occupational safety. Finely grained rock that remains at the shaft bottom after mechanical mucking can be loaded into a special pneumatic kibble with a suction device. Pneumatic cleaning of the shaft bottom will reduce time and manpower needed in comparison to conventional cleaning operation. Model calculations show that the application of pneumatic suction technology for shaft bottom cleaning leads to higher total sinking performance of about 5 – 8 %.

A further concept comprises the relocation of kibble loading from the shaft bottom to a fixed loading facility on the sinking stage. This avoids complicated and partly dangerous handling of large rock kibbles. In addition, otherwise busy manpower is available for further work, e. g. installation of primary rock support. Raising the location of kibble loading leads to an improved hoisting performance, due to the reduction of slow hoisting parts and

Berge besteht jedoch häufig die Notwendigkeit, sofort Gebirgssicherung am Schachtstoß einzubringen, beispielsweise in Form von Systemankerung und Verzug. Je nach Ladeverfahren besteht entsprechender Platz- und Personalbedarf auf der Schachtsohle, der jedoch einen hohen Parallelisierungsgrad von Ladearbeit und Gebirgssicherung verhindert. Besonders das Einbringen langer Anker gestaltet sich sehr schwierig.

Sicherlich besteht die Möglichkeit leistungsstärkere Ladegeräte einzusetzen, um beispielsweise mit einer Vergrößerung des Greifervolumens die Ladeleistung bei Volleingriff und reduzierter Ladeleistung zu erhöhen. Bauteile müssen folglich - angepasst an gestiegene Belastungen - stabiler konstruiert werden, wodurch sich in der Regel Abmessung, Gewicht und Kosten des Ladegerätes vergrößern.

Nach dem heutigen Stand der Fördertechnik begrenzt in großen Teufen häufig die sinkende Förderleistung auch bei einem leistungsstarken Drei-Kübel-Betrieb die maximale Ladeleistung bei vollem Eingriff. Demnach ist hier eine Steigerung der Ladeleistung nur in geringen Teufen realisierbar. Im Gegensatz dazu begrenzt die Ladearbeit beim Laden mit reduzierter Leistung und beim Sauberladen die Förderleistung nahezu unabhängig von der Teufe. Die Ladearbeit mit reduzierter Leistung und beim Sauberladen weist also ein deutlich größeres Optimierungspotenzial auf, wenn die teufenabhängige Förderleistung als begrenzender Faktor berücksichtigt wird.

Eine leistungsstarke Alternative zum manuellen Sauberladen stellt das pneumatische Laden dar. Über eine Saugvorrichtung werden die auf der Sohle verbliebenen Berge in den Kübel geladen, wodurch einerseits die benötigte Ladezeit und andererseits die körperliche Arbeit der Schachthauer reduziert werden. Modellrechnungen ergeben, dass der Einsatz eines solchen Saugsystems beim Sauberladen der Schachtsohle die Teufleistung um 5 – 8 % steigern kann.

Eine grundsätzlich mögliche Systemänderung besteht darin, die Kübelbeladung anstatt auf der Schachtsohle auf der Arbeitsbühne erfolgen zu lassen. Hierfür ist eine senkrechte Zwischenförderung der Berge von der Schachtsohle zu einem Zwischenbunker auf der Arbeitsbühne nötig. Die Beladung der Bergekübel

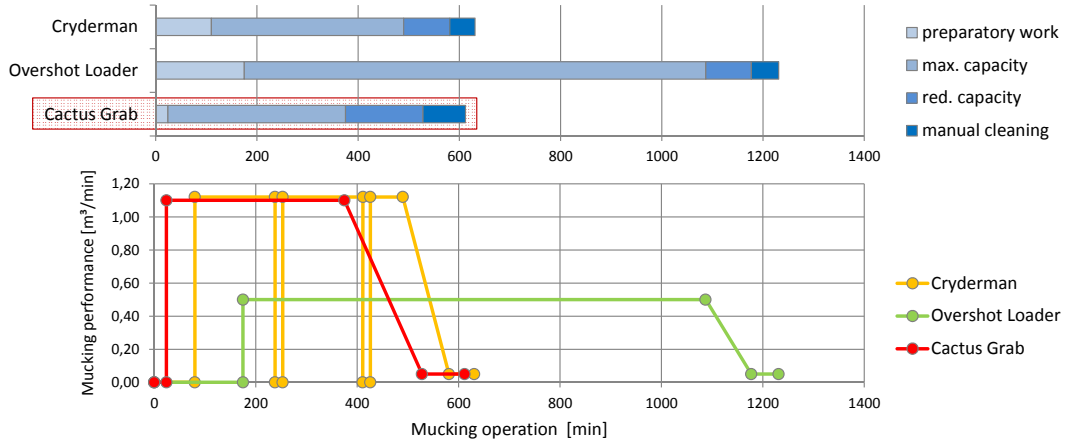

Fig. 5. Time for mucking operation (scenario 3)
Bild 5. Zeitaufwand für Ladearbeit (Teufszenario 3)

the option to use larger kibble sizes. This modification will need a vertical intermediate conveyor, transporting the rock from the shaft bottom up to a bunker installed on the sinking stage. Additionally, the bunker serves as a buffer for deviation of the mucking and hoisting performance. The kibble is then loaded via bunker removal. A pneumatic suction system can provide mucking on the shaft bottom and vertical conveying to the intermediate bunker on the sinking stage. According to the model calculation, pneumatic mucking and conveying can significantly improve sinking performance for low particle sized muck.

erfolgt von dem Zwischenbunker über eine Art Schurre. Ein fester Kübelstand auf der Arbeitsbühne vermeidet das schwierige Handling großer Bergekübel (Kette an- und abschlagen, Kübel in vorgesehen Kübelstand drücken) und erhöht damit deutlich die Arbeitssicherheit. Gleichzeitig spart diese Variante der Kübelbeladung Arbeitskräfte ein, die nun parallel andere Arbeiten – z. B. zur Gebirgssicherung - verrichten können. Weiterhin ermöglicht das Beladen der Kübel auf der Arbeitsbühne eine Steigerung der Förderleistung, zum einen durch Verkürzung der Schleichfahrtstrecke und zum anderen durch Verwendung größerer Kübel.

Die Senkrechtförderung kann ebenfalls mittels pneumatischer Förderung erfolgen. Ein pneumatisches Saugsystem realisiert sowohl die Haufwerksaufnahme als auch die senkrechte Förderung über den Saugschlauch in einen Zwischenbunker auf der Arbeitsbühne. Auch hier ergeben Modellrechnungen, dass bei entsprechend installierter Saugleistung und optimalen Haufwerkseigenschaften eine Steigerung der Teufleistung durch den Einsatz eines pneumatischen Lade- und Fördersystems erzielt werden kann.

References / Quellenverzeichnis

(1) Wild, H. W. (1984): Sprengtechnik in Bergbau, Tunnel- und Stollenbau sowie in Tagebauen und Steinbrüchen. Glückauf-Betriebsbücher: Vol. 10 (3. Aufl.). Verlag Glückauf GmbH, Essen, S. 280.
(2) OLKO Maschinentechnik GmbH (2011): Greiferwinde.
(3) Mining Technologies International Inc. (2013): Shaft Mucker. Retrieved from www.mti.ca.
(4) Singh, S., Narendrula, R., Duffy, D (2005): Influence of blasted muck on the performance of loading equipment. Proceedings 3rd EFEE Conference on Explosives and Blasting, Brighton, U.K.
(5) Caterpillar Performance Handbook, Edition 29: Cycle Time Estamating Charts. Retrieved from http://nees.ucsd.edu/facilities/docs/Performance_Handbook_416C.pdf.
(6) Singh, S. P., Glogger, M., Willock, D: Effect of Fragmentation on Loader Efficiency. Laurentian University, Sudbury, Kanada.
(7) DSK Deutsche Steinkohle AG (2005): Technische Anforderungen an Schacht- und Schrägförderanlagen, Herne.
(8) Trident S.A. (2013): EIMCO 12AC Rockershovel. Retrieved from http://www.tridentsa.co.za./downloads.html.

Authors / Autoren

Dipl.-Ing. Thorsten Kratz, Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Per Nicolai Martens, Leiter des Instituts für Bergbaukunde I (BBK I) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, Aachen