

Empirical Evaluation of Application Parameters of Iron-Clay-Buckets

A decrease in output, caused by iron-clay or rather siderite, has been detected on the fifth and sixth floor of the opencast mine Hambach of RWE Power AG, Essen/Germany, since 2005. The material is known as hard to extract, so several special types of buckets were developed and used on the bucket wheel excavator 293. In this summarized diploma thesis the adjusted operating parameters up to now in the area of iron-clay should be verified with the current type of bucket, the iron-clay-bucket. Therefore, systematic trials were conducted locally and evaluated statisti-

cally. The increase in output with constant downtime mattered. The output increase especially depends on the protection of the bucket wheel excavator and the following conveyors. In this summary the topic of iron-clay in the opencast mine Hambach is presented first. After that, the empirical verification is described commencing by the design of experiments following by a trial realisation and evaluation. Finally, the results and recommendations for action are shown. An optimization potential can be pointed out.

Empirische Überprüfung der Einsatzparameter der Toneisenstein-Schaufeln

Seit dem Jahr 2005 wurden auf der 5. und 6. Sohle im Tagebau Hambach der RWE Power AG, Essen, Einbußen in der Förderleistung festgestellt. Die Ursache dafür ist der anstehende Toneisenstein. Für dieses schwierig gewinnbare Material wurden in der Vergangenheit mehrere spezielle Schaufeltypen entwickelt und am Schaufelradbagger 293 eingesetzt. In der hier zusammengefassten Diplomarbeit sollten die in diesem Bereich angepassten Betriebsparameter an dem aktuellen Schaufeltyp, der Toneisenstein-Serienschaufel, überprüft werden. Dazu wurden systematische Versuche vor Ort durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Ziel der Versuche war eine Steigerung des Lastgrads, also eine Erhöhung der Förderleistung unter Beibehaltung der Anlagenschonung.

In der vorliegenden Zusammenfassung wird zunächst in die Thematik des Toneisensteins im Tagebau Hambach eingeleitet. Die empirische Überprüfung der Betriebsparameter wird anschließend von der Versuchsplanung über die Versuchsdurchführung und -auswertung beschrieben. Aus den Ergebnissen werden schließlich Handlungsempfehlungen abgeleitet und ein Optimierungspotential aufgezeigt.

1 Introduction and starting situation of the diploma thesis

The opencast mine Hambach of RWE Power AG, Essen/Germany, is located in the Rhenish lignite mining area. The usage of eight bucket wheel excavators enables the extraction of lignite and overburden in seven floors (1). A decrease in output, caused by iron-clay or rather siderite, has been detected in north-east of the fifth and sixth floor since 2005. These deposits are characterized by tuberous distributions and varying sizes up to several decimetres, as shown in figure 1. Besides the iron-clay, this area is already known as hard to extract because of the surrounding clay with layer thickness up to 40 m. Furthermore, the hardness, binding forces and sharp-edged fractured surfaces of iron-clay are responsible for negative effects on the bucket wheel excavator 293 and the following conveyor system (2, 3, 4).

In the past there were deformations and cracks on the cutting edges of the buckets of the excavator 293. Additionally, dam-

1 Einleitung und Ausgangspunkt der Diplomarbeit

Im Rheinischen Braunkohlenrevier befindet sich der Tagebau Hambach der RWE Power AG, Essen. Hier werden auf sieben Sohlen acht Schaufelradbagger zur Gewinnung von Abraum und Kohle eingesetzt (1). Seit dem Jahr 2005 wurden hauptsächlich im nordöstlichen Bereich auf der 5. und 6. Sohle Einbußen in der Förderleistung festgestellt. Die Ursache dafür ist der anstehende Toneisenstein bzw. Siderit. Toneisensteinvorkommen sind durch eine unregelmäßige knollenartige Verteilung zu beschreiben, wobei die Knollen Durchmesser von wenigen Dezimetern annehmen können (Bild 1). Diese Vorkommen befinden sich im Tagebau Hambach in einem Bereich, der sich teilweise komplett aus bis zu 40 m mächtigem Ton zusammensetzt und ohnehin schon als schwierig gewinnbar gilt. Die Eigenschaften des Toneisensteins wie hohe Bindungskräfte, Härte und scharfkantige Bruchflächen führen zusätzlich zu möglichen negativen Auswirkungen auf das Gewinnungsgerät, den Schaufelradbagger 293, und die nachfolgenden Förderwege (2, 3, 4).



Fig. 1. Side slope with iron-clay (red marks). // Bild 1. Seitliche Böschung mit harten Toneisenstein-Knollen (rot markiert). Photo/Foto: RWE

ages on the steel construction, the rolls and belt of the conveyor were detected. The increased rate of maximum sized grains in the transported material caused blockages in the following conveyor system. Under these circumstances, a safe process of extraction was only possible limitedly (5, 6, 7).

The use of other buckets led to improvements, especially in regard to damages. After different stages of development the iron-clay-bucket was finally formed. This type of bucket was deployed at the time of the diploma thesis. It was an overall optimum in relation to technology, efficiency and considered parameters (current consumption of bucket wheel, vibration, transportability of material, endurance and abrasion) (5, 6).

The operating parameters of extraction in iron-clay have been determined at an earlier stage of development. These parameters ought to be proven by usage of systematic trials on the bucket wheel excavator 293 and a statistical evaluation in this diploma thesis. The increase in output with constant downtime mattered. Thereby, the rate of maximum sized grains in the transported material was essential. Additionally, other values, e.g., current consumption of bucket wheel or vibration, had to be included.

2 Design of experiments

The determination of ideal operating parameters by increasing the output and decreasing the rate of maximum sized grains was the long-term objective. The design of experiments was characterized by special requirements, especially the experimental execution during regular operation. The process of extraction had to be safe all the time. Furthermore, an easy adjustability of test points was indispensable.

2.1 Target values

In the beginning of the design of experiments the specification of target values was necessary. First of all, the output was essential to improve the process. Additionally, the rate of maximum sized grains in the transported material was necessary for the experi-

Durch das schwierig gewinnbare Material konnten am Schaufelradbagger 293 Deformationen und Risse an den Messerträgern und Schneiden der Schaufeln, Schäden am Stahlbau, an Rollengirlanden und am Fördergurt festgestellt werden. Die hohe Anzahl an Größtkörnern im Fördermaterial (Brockigkeit) führte weiterhin zu Überschüttungen und Verstopfungen an den Bandübergaben. Unter diesen Bedingungen war eine prozesssichere Förderung nur eingeschränkt möglich (5, 6, 7).

Der Einsatz anderer Schaufeltypen führte zu Verbesserungen. Über mehrere Entwicklungsstufen sind schließlich die sogenannten Toneisenstein-Serienschaufeln entstanden. Dieser Schaufeltyp wurde zum Zeitpunkt der Anfertigung der diesem Beitrag zugrunde liegenden Diplomarbeit eingesetzt und stellt hinsichtlich der Technik, Wirtschaftlichkeit und der betrachteten Parameter (Schaufelrad-Stromaufnahme, Schwingung, Transportfähigkeit des Fördermaterials, Standzeit und Verschleiß) das Gesamtoptimum dar (5, 6).

Die Betriebs- und Einsatzparameter im Toneisenstein wurden zu einer frühen Entwicklungsphase bestimmt und sollten daher in der hier zusammengefassten Diplomarbeit durch systematische Versuche vor Ort und statistische Auswertungen überprüft werden. Ziel der Versuche war eine Steigerung des Lastgrads, also eine Erhöhung der Förderleistung ohne Verursachung zusätzlicher Stillstandszeiten. Diese Steigerung korreliert nur mit einer Beibehaltung der anlagenschonenden Brockigkeit des Förderstroms und unter Beachtung weiterer Größen, wie beispielsweise der Schaufelrad-Stromaufnahme oder Schwingung des Schaufelrad-Auslegers.

2 Versuchsplanung

Die langfristige Zielsetzung der Versuche war die Ermittlung optimaler Einsatzparameter in Hinblick auf eine größtmögliche Förderleistung unter Beibehaltung der Anlagenschonung. Besondere Anforderungen, wie z. B. die Durchführung der Versuche während des täglichen Betriebs, waren in der Versuchsplanung zu beach-

ments to protect the steel construction of excavator and conveyors. Therefore, the rate was defined as number of grains with specific diameter at a particular time. The current consumption of the bucket wheel had to be considered to include the forces acting on the buckets and the construction.

The vibration of the bucket wheel boom was another essential target value concerning damages on buckets. For this, the amplitude had to be measured. The value of performance of the bucket wheel in relation to the output is necessary to verify operating parameters in regard to ideal extraction. The torques and speeds of driving motors of the bucket wheel were used to calculate the mechanical performance. As last target value the specific energy is the ratio of the mechanical performance and the output of the excavator.

2.2 Parameters and factors

First, all relevant parameters of the process of extraction were shown to get a better overview. Their influences on the target values were assessed. This approach is necessary to choose the main parameters (factors) which are examined in the systematic trials.

The number of test points and the scope of experiments usually grow with the increasing amount of factors. So, the parameters had to be regarded in detail. The decision about which parameters will be included in the trials was made according to several criteria, consultations with machine operators of excavator 293 and persons responsible. Finally, the cutting depth, slewing speed and height of slice were chosen as relevant factors. The position of iron-clay in the cut has been solely observed during trial realisation. Even the rotation speed of the bucket wheel was not determined as a factor because the process of extraction was already performing at its maximum. Decreasing this parameter causes the increasing in chip cross-section and rate of maximum sized grains.

2.3 Selection of factor levels and experimental plan

The determination of factor levels was made by consideration of documented operating parameters during extraction of iron-clay in 2015 (8) and older work instructions. A two-level design was chosen. In this way, the importance of factors for the process and the linear effects to the target values could be determined.

The adjustability of the height of slice was complex because this factor depends on the local situation, material and machine operators. So a short-term change was not expedient in regard to the safety of the process and test results. It was assumed that the height of slice would change during the whole trial realisation. Therefore, two levels of this factor could be included.

The trials were performed with a full factorial design to get extensive results concerning the chosen factors. The restriction of the factors and two levels enabled this design and the necessarily low scope of experiments. The cutting depth, slewing speed and height of slice were the factors of the design. The latter was included as blocking factor. This means that cutting depth and slewing speed formed a 2² factorial design with blocks of different heights of slices. A testing point in the centre of design enabled additionally the verification of linear dependence of the factors.

ten. Der Prozess der Gewinnung durfte zu keiner Zeit gefährdet werden und die Zumut- und Einstellbarkeit der Versuchspunkte musste gewährleistet sein.

2.1 Zielgrößen

Für die Versuchsplanung wurden zunächst die Zielgrößen festgelegt. Als erste Zielgröße ist die Förderleistung für die Betrachtung des Lastgrads unerlässlich. Des Weiteren ist für die Beibehaltung der Anlagenschonung die Transportfähigkeit des Fördermaterials essenziell. Die definierte Brockigkeit beschreibt daher die Anzahl von Größtkörnern mit gewissem Durchmesser pro Zeiteinheit und wurde als weitere Zielgröße betrachtet. Die Schonung des Gewinnungsorgans ist zudem von der Krafteinwirkung bei der Gewinnung des Materials abhängig. Ein Maß für diese Einwirkung liefert die Schaufelrad-Stromaufnahme.

Eine weitere Zielgröße ist, insbesondere in Hinblick auf Gewaltschäden an den Schaufeln, die Schwingung des gesamten Schaufelrad-Auslegers beim Gewinnungsvorgang. Als Maß für die Schwingung wurde der Nickweg aufgezeichnet. Um Einsatzparameter für eine optimale Gewinnung zu überprüfen, musste zudem die Leistung des Schaufelrads in Abhängigkeit von der Förderleistung betrachtet werden. Dafür wurde aus den Drehmomenten und Drehzahlen der Schaufelrad-Antriebsmotoren die mechanische Leistung des Schaufelrads bestimmt und mit der Förderleistung die spezifische Energie berechnet.

2.2 Einflussgrößen und Faktoren

Zur besseren Übersicht wurden zunächst alle Einflussgrößen, die auf den Prozess wirken, aufgezeigt und ihr Einfluss auf die festgelegten Zielgrößen bewertet. Dieses Vorgehen ist zu empfehlen, um die zu untersuchenden Einflussgrößen (Faktoren) für die Versuche auszuwählen. Da mit steigender Faktoranzahl in der Regel die Anzahl der durchzuführenden Versuchspunkte und damit der Versuchsumfang steigt, wurden die Einflussgrößen dann im Detail betrachtet. Die Entscheidung, welche dieser Größen als Faktor in den Versuchen einbezogen wird, konnte anschließend an mehreren Kriterien und unter Absprache mit den Geräteführern und verantwortlichen Personen getroffen werden. Aus diesem Prozess wurden die Spantiefe (Spannvorfahrt), die Schwenkgeschwindigkeit und die Scheibenhöhe als maßgebende Faktoren ausgewählt. Die Lage der harten Toneisenstein-Knollen im Schnitt konnte während der Versuche lediglich beobachtet werden. Auch die Schüttungszahl wurde nicht als Faktor festgelegt, da diese Einflussgröße bei der Gewinnung im Toneisensteinmaterial bereits maximal hoch ist. Eine Verringerung der Schüttungszahl führt zu einer Verschlechterung der Brockigkeit (durch Erhöhung des Spanquerschnitts).

2.3 Auswahl der Faktorstufen und Aufstellung des Versuchsplans

Die Festlegung der Stufen der Faktoren erfolgte mittels bisher dokumentierter Betriebsparameter aus dem Jahr 2015 (8) und der „Arbeitsanweisung für die Gewinnung im Toneisenstein“. Mit einem oberen und unteren Wert wurde die Anzahl auf zwei Stufen festgelegt. Damit konnte die Bedeutung der einzelnen Faktoren für den Prozess und der lineare Effekt auf die Zielgrößen festgestellt werden. Die Einstellbarkeit der Scheibenhöhe als dritter



Fig. 2. Overview of the higher level which was extracted during trial realisation (red marks).
Bild 2. Übersicht über die zu gewinnende Hochstufe zwischen den roten Markierungen.
Photo/Foto: RWE

The trials of each block were performed in random order without planned stops but with the same machine operator. A whole pan (pan to side slope and subsequent in the other direction) for each trial was striven first. In sum, a few days were planned for the realisation of the trials.

3 Trial realisation

The trials were performed in four shifts while the higher level (Figure 2) on the sixth floor was extracting. The duration of the trials was limited due to the shift plan of bucket wheel excavator 293. The trials were split in four blocks in accordance with the shifts. Each block was performed by one machine operator. Disturbances like weather conditions or inhomogeneous material could be regarded on the basis of this block classification. The extraction of the ramp to the higher level enabled the recording of three different heights of slices.

The planned trial design could be completely realized only in the first block with the lowest height of slice. The maximum cutting depth had to be reduced already in the second block to ensure the safety of process concerning machine operator's perspective. Block three and four were performed with the same height of slice in automatic operation. This means that the slewing speed was adapted to a specified output or current consumption of the bucket wheel automatically. Therefore, the cutting depth could be changed solely. The values of slewing speed were noted.

The target values were received during trial realisation through different ways. A belt weigher at conveyor one of excavator 293 was measuring the output. These values were indicated in tonnes per hour. The rate of maximum sized grains was analysed optically. For this, a camera was fixed over conveyor one. The current consumption of the bucket wheel was shown in the driver's platform. This target value and the output were archived and saved. Thereby, the values could be edited after the trial realisation. Another software program archived values for calcula-

Faktor ist wesentlich komplexer, da diese Größe hauptsächlich materialbedingt und durch den Geräteführer festgesetzt wird. Eine kurzfristige Änderung dieses Faktors war daher für einen sicheren Prozess und hinsichtlich der Versuchsergebnisse nicht verhältnismäßig. Es wurde aber erwartet, dass die Scheibenhöhe im Verlauf der gesamten Durchführung der Versuche verändert wird und somit mindestens zwei Stufenwerte erfasst werden können.

Um Aussagen über die gewählten Faktoren in einem umfangreichen Versuchsreich zu erhalten, wurden die Versuche mit einem vollständig faktoriellen Versuchsplan durchgeführt. Die Eingrenzung der Faktoren und die ausgewählten zwei Stufen ermöglichten diesen Versuchsplan und bedingten den notwendigen geringen Versuchsaufwand. Die Spantiefe, Schwenkgeschwindigkeit und Scheibenhöhe wurden in diesen Versuchsplan als Faktoren festgelegt, wobei letztere Größe als Blockfaktor

betrachtet werden musste. Das bedeutet, dass mit der Spantiefe und Schwenkgeschwindigkeit ein 2²-Versuchsplan in verschiedenen Blöcken mit unterschiedlichen Scheibenhöhen umgesetzt wurde. Zusätzlich diente ein Versuchspunkt im Zentrum dieses Plans zur Überprüfung der linearen Abhängigkeit der Faktoren.

Die Versuche innerhalb eines Blocks wurden in randomisierter Reihenfolge ohne geplante Pausen bei demselben Geräteführer durchgeführt. Zunächst wurde für die Dauer eines Versuchs ein kompletter Schwenk (Schwenk zur Böschung mit anschließendem Schwenk aus der Böschung) angestrebt. Insgesamt waren für die Versuchsdurchführung mehrere Tage geplant.

3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden innerhalb von vier Schichten umgesetzt, während die Hochstufe auf der 6. Sohle gewonnen wurde (Bild 2). Aufgrund des Einsatzplans des Baggers 293 war die Versuchsdauer insgesamt zeitlich begrenzt. Die Versuche wurden entsprechend der Schichten in vier Versuchsblöcke aufgeteilt und jeweils bei einem Geräteführer durchgeführt. Durch diese Blockeinteilung konnten Störgrößen, wie beispielsweise Witterung oder inhomogenes Toneisensteinmaterial, berücksichtigt werden. Die Gewinnung der auf die Hochstufe führenden Rampe ermöglichte die Erfassung von drei verschiedenen Scheibenhöhen.

Der definierte Versuchsplan konnte nur im ersten Versuchsblock bei der niedrigsten Scheibenhöhe komplett durchgeführt werden. Im zweiten Block musste bereits die maximale Spantiefe gesenkt werden, um die Sicherheit des Gewinnungsprozesses aus Sicht des Geräteführers zu gewährleisten. Die Versuchsblöcke 3 und 4 wurden bei gleicher Scheibenhöhe hauptsächlich im Automatikbetrieb durchgeführt. Das bedeutet, dass die Schwenkgeschwindigkeit automatisch anhand einer angegebenen Förderleistung oder Schaufelrad-Stromaufnahme geregelt wird. Dadurch konnte lediglich die Spantiefe verändert werden. Die Schwenkgeschwindigkeiten wurden notiert.

tion of the specific energy and vibration of the bucket wheel boom.

4 Trial evaluation

In the trial evaluation the influence of pan direction on received values was considered first. For this, the Wilcoxon rank-sum test was used. This statistical test proves the location of two samples (9, 10, 11). Concerning a useful scope, three test points from all blocks were chosen. Those received values were tested. The differences caused by pan direction were negligible. This result of the Wilcoxon rank-sum test enabled an independent evaluation. So the pan direction was not considered. Furthermore, the slew angle was essential to compare the trials. Therefore, a range from -15° to 45° was determined. In addition to this, the slew angle was used for the temporal customization of target values.

The received values of output, current consumption of bucket wheel and amplitude of vibration could be processed directly after temporal adjustment. The specific energy was calculated from mechanical performance of driving motors of the bucket wheel and the output. The mechanical performance was generated with the torques and speeds.

A specific feature was the evaluation of the rate of maximum sized grains. This target value was determined with video analysis of the material. The grains with diameter > 0.5 m were counted per minute. Therefore, a grid was used. Previously placed markings as reference were applied (Figure 3).

The means of target values were calculated in the range of slew angles from -15° to 45° and combined in test points. So the comparison of the trails became possible. Finally the effects of factors could be calculated with these values. The assessment of effects was made by determining the statistical significance.

5 Results

5.1 Evaluation of target values

The results of trials concerning the output are clear. Any type of expansion of operating parameters like cutting depth, slewing speed or height of slice is causing an increase in this target value. Their effects are similar in regard to the proportional magnification. Therefore, an equivalent increase in output is made by any of these parameters. Additionally, partially significant differences can be determined comparing block three and four although they were performed in automatic operation. The influence of disturbances cannot be excluded because the automatic operation was not examined explicitly.

A dependence of cutting depth and slewing speed to the rate of maximum sized grains can be observed in block one and two. Additionally, a significant interaction is evident. That means that both factors influence this target value in relation to each other. The influences of cutting depth and slewing speed can be described and plotted due to linear regression (Figure 4). Furthermore, a significant increase in the rate of maximum sized grains

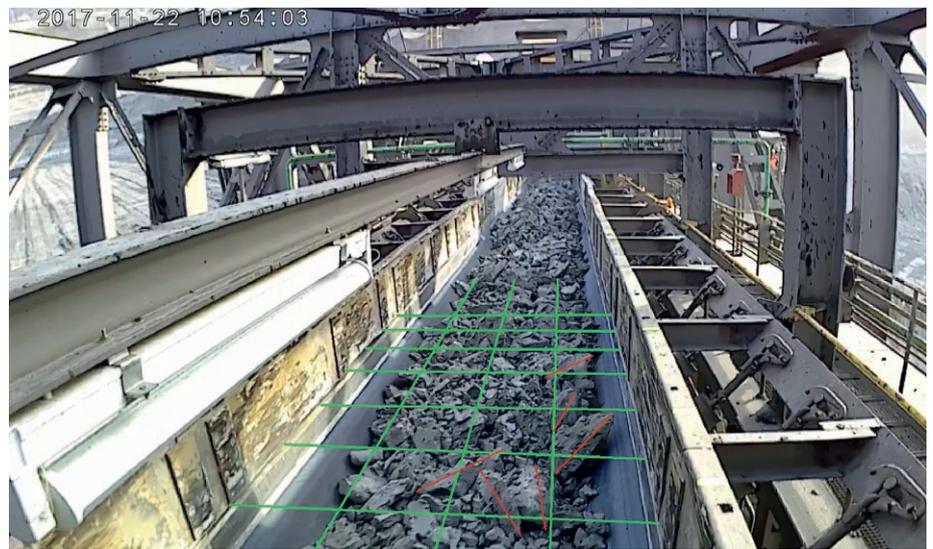


Fig. 3. Analysis of transported material by grid (maximum sized grains marked).

Bild 3. Analyse des Förderstroms mittels Raster (Größtkörner markiert). Photo/Foto: RWE

Die Zielgrößen wurden während der Versuche über verschiedene Wege aufgenommen. Eine Bandwaage an Band 1 des Baggers 293 erfasste die Förderleistung und lieferte Werte in Tonnen pro Stunde. Die Brockigkeit des Fördermaterials wurde optisch analysiert. Dafür konnte eine Kamera über Band 1 befestigt werden. Die Schaufelrad-Stromaufnahme wurde im Fahrerstand angezeigt und analog zur Förderleistung archiviert. Diese Werte konnten nach den Versuchen aufgerufen und verarbeitet werden. Ein weiteres Programm lieferte die archivierten Daten für die Berechnung der spezifischen Energie und des Nickwegs.

4 Versuchsauswertung

In der Versuchsauswertung wurde zunächst untersucht, ob die Schwenkrichtung für die aufgenommenen Daten von Bedeutung ist. Dafür konnte der Wilcoxon-Rangsummentest angewendet werden. Dieser statistische Test dient der Überprüfung der Lage zweier Stichproben (9, 10, 11). Getestet wurden die aufgenommenen Daten von drei zufällig ausgewählten Versuchspunkten aus den vier Versuchsblöcken. Festgestellt wurde, dass die Unterschiede aufgrund der Schwenkrichtung vernachlässigbar gering sind. Die Daten konnten daher unabhängig von der Schwenkrichtung ausgewertet werden. Weiterhin war der Schwenkwinkel für die Betrachtung der Vergleichbarkeit der Versuche essenziell. Hierfür wurde ein Bereich von -15° bis 45° festgelegt. Zusätzlich diente der Schwenkwinkel als Bezugsgröße für die zeitliche Anpassung der Zielgrößen.

Die aufgenommenen Daten der Förderleistung, der Schaufelrad-Stromaufnahme und des Nickwegs konnten nach zeitlicher Anpassung direkt verarbeitet werden. Die spezifische Energie wurde aus der mechanischen Leistung der Antriebsmotoren und der Förderleistung ermittelt. Erstere wurde aus den Daten der Drehmomente und Drehzahlen berechnet.

Eine Besonderheit stellte die Auswertung der Brockigkeit dar, die per Videoanalyse des Förderstroms erfolgte. Dafür wurden die Körner mit einem Durchmesser $> 0,5$ m pro Minute gezählt. Als Hilfsmittel wurde ein Raster verwendet, das durch zuvor angebrachte Markierungen erzeugt werden konnte (Bild 3).

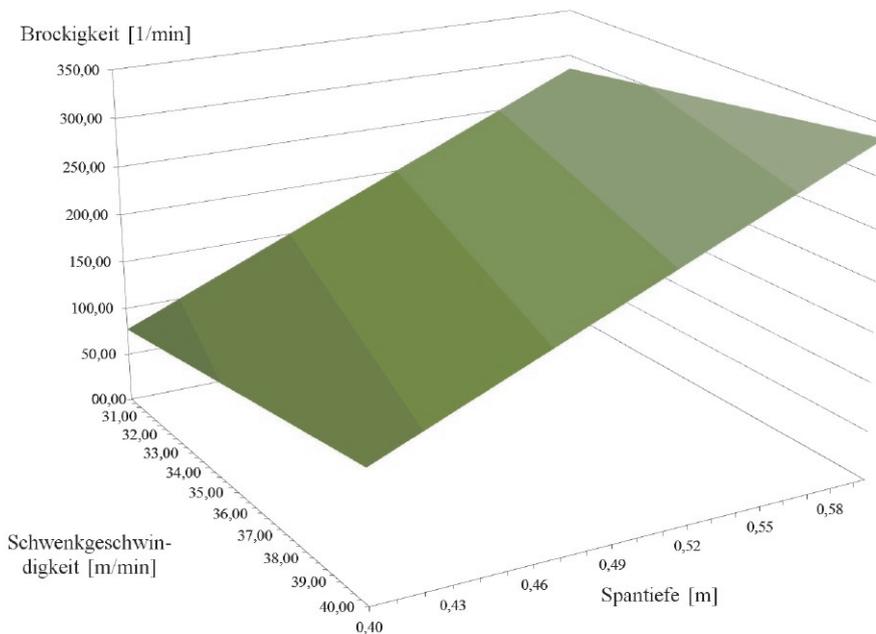


Fig. 4. Presentation of linear regression (block 1).

Bild 4. Darstellung der linearen Regression (Versuchsblock 1). Photo/Foto: RWE

through higher slices can be determined by evaluation including all blocks. This target value is very dependent on the cutting depth. This result is clear after the adjustment of proportional magnification. Higher slices also cause an increase in the rate of maximum sized grains, but not as much as cutting depth. The slewing speed has the smallest influence on this target value.

A potential cause of the different effects of cutting depth and slewing speed to the rate of maximum sized grains can be found in the position of teeth on the cutting edge of the iron-clay-bucket (Figure 5). Besides the vertical dimensions for cutting depth, the chip widths (horizontal lines) are also shown in this figure. In that case, the latter depend only on slewing speed. The teeth of the buckets are completely in the chip cross-section (yellow range). So, the grain destruction effects on the majority of material in the chip. An increase in cutting depth causes conversely a free area of chip cross-section where the teeth of the bucket are not located (green range). The probability to extract maximum sized grains increases.

The influence of the slice height on the rate of maximum sized grains is possibly caused by the cutting depth. The adjusted value of this parameter does not correspond to the resulting one at lower slices. The resulting cutting depth depends on the rotation angle of the bucket wheel. The latter, in turn, depends on the slice height. So, higher slices cause an increase in resulting cutting depth and therefore an increase in the rate of maximum sized grains.

In the evaluation with regard to all blocks an irregular incidence in the rate of maximum sized grains can be determined. An increase in target value is located in a range of $< 5^\circ$ concerning the slew angle (opened sector of working slope). A changed examination and recording of maximum sized grains with diameter > 1 m clarified this phenomenon. A maximum of this grains is located in the slewing range of -15° to -5° . The reason is possibly the extraction of the higher level on the sixth floor.

Zum Vergleich der Versuche wurden die Mittelwerte der Zielgrößen über den Schwenkbereich von -15° und 45° verwendet und jeweils in den dazugehörigen Versuchspunkten zusammengefasst. Aus den Werten der Versuchspunkte konnten schließlich die Effekte der Faktoren berechnet werden. Die Beurteilung der Effekte erfolgte durch die Ermittlung der Signifikanz.

5 Ergebnisse

5.1 Bewertung der Zielgrößen

Die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Förderleistung sind eindeutig. Jegliche Erhöhung der Betriebsparameter Spantiefe, Schwenkgeschwindigkeit und Scheibenhöhe verursacht logischerweise eine Steigerung dieser Zielgröße. Wird die prozentuale Vergrößerung der Faktoren beachtet, sind die Effekte ähnlich. Damit kann eine äquivalente Steigerung der Förderleistung mit jedem der untersuchten Parameter erfolgen. Beim Vergleich der Versuchsblö-

cke 3 und 4 ist zudem auffällig, dass trotz der verwendeten Leistungsautomatik teilweise signifikante Unterschiede festgestellt werden konnten. Ein Einfluss von Störgrößen als Ursache dieser Differenzen kann aber nicht ausgeschlossen werden, da die Leistungsautomatik nicht explizit untersucht wurde.

In den Versuchsblöcken 1 und 2 kann eine Abhängigkeit der Brockigkeit von der Spantiefe und Schwenkgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Zudem ist eine signifikante Wechselwirkung ersichtlich. Beide Faktoren beeinflussen also abhängig voneinander diese Zielgröße. Durch lineare Regression kann der Einfluss der Spantiefe und Schwenkgeschwindigkeit beschrieben und in einem Diagramm dargestellt werden (Bild 4). Weiterhin zeigte die Auswertung über alle Versuchsblöcke, dass bei einer Vergrößerung der Scheibenhöhe eine signifikante Steigerung der Brockigkeit vorliegt. Bei Anpassung der prozentualen Vergrößerung aller drei Faktoren wird deutlich, dass diese Zielgröße in hohem Maße von der Spantiefe abhängig ist. Auch die Vergrößerung der Scheibenhöhe führt zu einer Zunahme, wenn auch nicht im Umfang wie letztere. Die Schwenkgeschwindigkeit hat den geringsten Einfluss auf die Brockigkeit.

Eine mögliche Ursache der unterschiedlichen Effekte von Spantiefe und Schwenkgeschwindigkeit auf die Brockigkeit könnte in der Position der Zähne am Messer der Toneisenstein-Serienschaufel liegen, wie aus Bild 5 ersichtlich. Neben den vertikalen Abmessungen für die Spantiefe sind hier auch die horizontal markierten Spanbreiten dargestellt. Letztere sind in diesem Fall nur von der Schwenkgeschwindigkeit abhängig. Deutlich wird, dass sowohl bei kleiner als auch bei großer Spanbreite die Zähne komplett im Eingriff sind (gelber Bereich). Die Kornzerstörung der Zähne wirkt demnach auf den Großteil des im Span liegenden Materials. Bei höheren Spantiefen hingegen ist ein Bereich im Spanquerschnitt zu sehen, auf den die Zähne nicht unmittelbar wirken (grüner Bereich) und demnach größere Brocken aus dem Festverband reißen können.

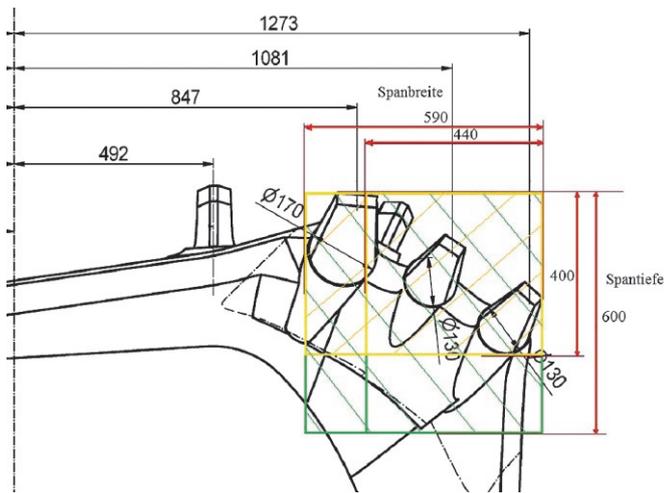


Fig. 5. Cutting edge of iron-clay-bucket with cutting depth and chip width (12, edited). // Bild 5. Messer der Toneisenstein-Serienschaufel mit Spanbreite und -tiefe (12, bearbeitet). Photo/Foto: RWE

There are accumulations of maximum sized grains of iron-clay and clay caused by the extraction of the material over this area. These loose accumulations are not crushed when excavating the material of the higher level.

Increasing the factors cutting depth, slewing speed and slice height causes a raise of current consumption of the bucket wheel. A reason could be the mechanical performance which depends on digging performance, lifting capacity and frictional power (13).

A significant effect on the specific energy can be found solely for the cutting depth. According to that, higher values of this factor cause a decrease of energy which is needed to extract a tonne of iron-clay material. The reasons could be identified with already realized investigations on an equivalent bucket wheel excavator in the opencast mine Hambach. The results show that cutting forces in clay increase only slightly at a defined point concerning the increase in cutting depth. In contrast to that, the increase in chip width causes a continuous gain of cutting forces (14). So, higher values of cutting depth result in an increase in output with a slight increase in cutting forces. The latter is a part of the digging force and therefore a part of the mechanical performance (15). Higher slices cause an equal increase in output and digging force. The latter depends on the number of buckets in the cutting process.

The evaluation of the amplitude (vibration) with peak-analysis shows a decrease of vibration concerning a faster slewing speed and an increase in relation to higher slices. There are no explicit effects of the cutting depth. The reason of the effect of slewing speed possibly is the temporal influence or expansion of slew which depends on this factor. The effect of higher slices is possibly caused by the number of buckets in the cutting process and the increase in probability to extract a hard area of iron-clay.

5.2 Recommendations for action

With regard to the results of trials recommendations for action can be given. First of all, the output and rate of maximum sized

Der Einfluss der Scheibenhöhe auf die Brockigkeit könnte damit begründet werden, dass bei geringmächtigen Scheiben die vorgegebene Spantiefe (bzw. Spanvorfahrt) nicht der resultierenden Spantiefe entspricht. Letztere ist abhängig vom Schaufelrad-drehwinkel und damit von der Scheibenhöhe. Bei höheren Scheiben wird folglich eine größere resultierende Spantiefe und damit auch eine steigende Brockigkeit verursacht.

Hinsichtlich der Schwenkwinkel ist bei der Auswertung über alle Versuchsblöcke auffallend, dass die Brockigkeit im Randbereich zur freien Seite ($< -5^\circ$) zunimmt. Bei veränderter Analyse und Erfassung der Größtkörner mit einem Durchmesser > 1 m kann bei Zusammenfassung aller Versuche ein Maximum im Schwenkabschnitt von -15° bis -5° festgestellt werden. Eine Ursache dafür liegt in der Einsatzart, da bei der Gewinnung der Hochstufe lose Anhäufungen von Toneisensteinknollen und Tonbrocken angetroffen werden. Diese Anhäufungen entstehen zwangsweise bei der Gewinnung des Materials auf der Hochstufe und werden beim Herausschwenken aus der Böschung größtenteils unzerkleinert aufgenommen.

Bezüglich der Schaufelrad-Stromaufnahme kann festgestellt werden, dass die Erhöhung der Einsatzparameter Spantiefe, Schwenkgeschwindigkeit und Scheibenhöhe mit einer Zunahme dieser Zielgröße einhergeht. Eine Begründung dafür könnte in der erbrachten mechanischen Leistung liegen, welche sich aus Grab-, Hub- und Reibleistung zusammensetzt (13).

Die Ergebnisse der spezifischen Energie zeigen lediglich einen signifikanten Effekt der Spantiefe. Demnach wird bei größeren Werten dieses Parameters weniger Energie für die Gewinnung pro Tonne des Toneisensteinmaterials benötigt. Die Ursache dafür könnten bereits durchgeführte Untersuchungen an einem äquivalenten Schaufelradbagger aus dem Tagebau Hambach liefern. Diese ergaben, dass die Schneidkraft im Tonmaterial hinsichtlich der Vergrößerung der Spantiefe ab einem bestimmten Wert nur noch geringfügig zunimmt. Wird hingegen die Spanbreite erhöht, ist eine durchgängige Zunahme der Schneidkraft deutlich (14). Eine größere Spantiefe führt demnach zu einer höheren Förderleistung bei geringfügig steigenden Schneidkräften. Letztere sind wesentlicher Bestandteil der Grabkraft und damit der mechanischen Leistung (15). Bei der Vergrößerung der Scheibenhöhe nimmt sowohl die Förderleistung als auch die Grabkraft (Erhöhung der Anzahl der im Gewinnungsprozess befindlichen Schaufeln) gleichermaßen zu.

Die Auswertung des Nickwegs mittels Peak-Analyse zeigt auf, dass die Schwingung bei höherer Schwenkgeschwindigkeit abnimmt und bei größerer Scheibenhöhe zunimmt. Bezüglich der Spantiefe kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Als Ursache des Effekts der Schwenkgeschwindigkeit ist die zeitliche Einwirkung pro Schwenk naheliegend. Die Zunahme der Schwingung bei höheren Scheiben könnte damit begründet werden, dass sich die Anzahl der Schaufeln im Schnitt und damit die Wahrscheinlichkeit erhöht, harte Toneisensteinknollen anzutreffen.

5.2 Handlungsempfehlungen

Aus den Versuchsergebnissen können Handlungsempfehlungen für den Regelbetrieb ausgesprochen werden. Als Erstes sind die Förderleistung und die Brockigkeit zu betrachten, da diesen Zielgrößen eine besondere Bedeutung für die Optimierung zusteht.



Fig. 6. Loose accumulations of iron-clay and clay at the side slope of the higher level.

Bild 6. Lose Größtbrocken an der zu gewinnenden Hochstufe. Photo/Foto: RWE

grains have to be considered concerning their importance to an optimisation. The results of the output show the equivalent influence or effect of cutting depth, slewing speed and slice height to this target value. So, the rate of maximum sized grains is limiting regarding the objective of output increase with protection for excavator's construction, bucket wheel and conveyors. Here, the cutting depth has the highest influence. So, a further increase in this parameter is not appropriate. The increase in output has to be achieved by maximising the slewing speed. Even a certain increase in slice height is reasonable.

Each increase in examined parameters caused an increase in current consumption of the bucket wheel. The excess of the limit is not expected concerning the maximising of slewing speed and increase in slice height. Appreciable changes regarding the specific energy are not expected as well.

With regard to the results of vibration of the bucket wheel boom no values of amplitude having the potential to exceed the limit which would have caused an automatic shutdown of the bucket wheel. Additionally, an added burden caused by vibration is not expected by the recommended actions, too.

A further optimization potential could relate to the automatic operation. When excavating a hard iron-clay area the slewing speed is choked because of the excess of limit of current consumption of the bucket wheel. After that, the slewing speed increases again. This excess is minimal in time. In relation to the extraction without automatic the limit is exceeded shortly, but the slewing speed is not choked to the dimension. This recognition is only concluded from observations of trials. The automatic operation could not be examined specifically. Further investigations are recommended.

An irregular distribution of the incidence concerning the rate of maximum sized grains was determined. One reason has been described already and is illustrated in figure 6. Considerations about clearing out the boundary area with earth-moving machinery concerning the costs are advisable to protect the bucket wheel excavator.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Spantiefe, Schwenkgeschwindigkeit und Scheibenhöhe einen äquivalenten Einfluss auf die Förderleistung besitzen. Unter dem Ziel der Erhöhung der Förderleistung bei anlagenschonender Gewinnung im Toneisensteinmaterial ist also die Brockigkeit limitierend. Da die Spantiefe hierbei den größten Einfluss besitzt, ist eine weitere Steigerung dieses Parameters nicht zweckmäßig. Um dennoch eine höhere Förderleistung zu erzielen, muss die Schwenkgeschwindigkeit maximiert werden. Auch eine gewisse Vergrößerung der Scheibenhöhe ist sinnvoll.

Hinsichtlich der Schaufelrad-Stromaufnahme führt jegliche Erhöhung der untersuchten Parameter zu einer Steigerung. Bei der empfohlenen Maximierung der Schwenkgeschwindigkeit und der Vergrößerung der Scheibenhöhe ist eine Überschreitung des Grenzwerts dieser Zielgröße aber nicht zu erwarten. Auch bezüglich der spezifischen Energie wird keine nennenswerte Veränderung eintreten.

Werden die Ergebnisse bezüglich der Schwingung des Schaufelradauslegers betrachtet, so konnten während der Versuche keine annähernd hohen Werte des Nickwegs festgestellt werden, die zu einer automatischen Abschaltung des Schaufelrads geführt hätten. Bei der empfohlenen Handlungsweise ist zusätzlich auch keine Mehrbelastung durch Schwingung zu erwarten.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit könnte in der Leistungsautomatik liegen. Bei Antreffen einer Toneisensteinknolle im Gewinnungsprozess wird die Schwenkgeschwindigkeit durch Überschreitung des Grenzwerts der Schaufelrad-Stromaufnahme gedrosselt und im Anschluss schnell wieder maximiert. Diese Überschreitung ist aber zeitlich minimal. Bei der Gewinnung ohne Leistungsautomatik wird zwar auch der genannte Grenzwert kurzzeitig überschritten, aber die Schwenkgeschwindigkeit nicht in dem Maße gedrosselt. Diese Erkenntnis kann lediglich aus Beobachtungen geschlossen werden, da die Leistungsautomatik nicht explizit in den Versuchen behandelt werden konnte. Daher werden weitere Untersuchungen empfohlen.

6 Conclusion

The results of the summarized diploma thesis were delivered by design, realisation and evaluation of experiments. Therefore, recommendations for action could be given. The examination of chosen operating parameters was performed. Not all kinds of parameters could be considered because of temporal conditions and the scope of experiments. Nevertheless, an optimization potential could be pointed out.

References / Quellenverzeichnis

- (1) RWE Power AG. url: <http://www.rwe.com/web/cms/de/1858872/g=2951660/rwepower-ag/energetraeger/braunkohle/standorte/tagebau-hambach/hambach/> (Stand: 21.10.2017).
- (2) Eichhorn, A.: Technisch-wirtschaftliche Untersuchung des Einflusses von Toneisenstein auf den Großgerätebetrieb im Tagebau Hambach. Diplomarbeit. TU Berlin, 2008.
- (3) Franken, H.: Technische und wirtschaftliche Betrachtung von Sonderbetriebskonzepten zur Leistungssteigerung im Tonpaket der 5. und 6. Sohle im Tagebau Hambach. Diplomarbeit. RWTH Aachen, 2008.
- (4) Kleinow, R.: Die Genese von schwer gewinnbaren Tonen und Toneisensteinen im basalen Bereich der Inden-Schichten im Tagebau Hambach. Dissertation. RWTH Aachen, 2015.
- (5) Greven, S.: Vorstellung der TES-Schaufelentwicklung. Persönliche Mitteilungen. RWE Power AG, Okt. 2017.
- (6) Schollmeyer, P.: Versuchseinsatz TES-optimierter Schaukeln im Tagebau Hambach. Präsentation. Unveröffentlicht. RWE Power AG, Juli 2010.
- (7) Schollmeyer, P.: Versuch mit TES-optimierten Schaukeln – Standzeiten der Zähne/Nachpanzerung durch PCZ. Unveröffentlicht. RWE Power AG, Juni 2010.
- (8) Dokumentation der Baggereinsatzparameter mit TES-Schaukeln durch Großgeräteführer. Unveröffentlicht. RWE Power AG, Feb. 2015.
- (9) van den Boogaart, K. G.: Lehrmaterial. <http://www.stat.boogaart.de#/AS1516/DSo809Skript3.pdf> (Stand: 21.12.2017).
- (10) Wikipedia. url: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wilcoxon-Mann-Whitney-Test> (Stand: 21.12.2017).
- (11) Grundlagen der Statistik. url: http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_u_test_wilcoxon.html (Stand: 21.12.2017).
- (12) Zchg.Nr. 606059795-00: TES-Messer (Vers.2015). Unveröffentlicht. RWE Power AG, Apr. 2015.
- (13) Pajer, G.; Kurth, F.; Pfeifer, M.; Hojder, J.: Tagebaugroßgeräte und Universalbagger. VEB Verlag Technik Berlin, 1979.
- (14) Partz, K.-E.: Abschlussbericht – Schneidkraftmessungen am Bagger 287. Unveröffentlicht. Mannesmann-Demag-Baumaschinen, Feb. 1984.
- (15) Kunze, G.; Göhring, H.; Jacob, K.: Baumaschinen – Erdbau und Tagebaumaschinen. Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig/Wiesbaden, 2002.

Author / Autor

Dipl.-Ing. Felix Heinrich, Bergreferendar, Sächsisches Oberbergamt, Freiberg