

Ali H. Beyglou
Aarti-Mona Sörensen
Elisabeth Clausen
Håkan Schunnesson

Improving Productivity Performance in Aitik: An Insight into the World's most efficient Mine

Declining ore grades and increasing extraction costs have given a high priority to productivity in operational mines. However, improving productivity in an industry with decades long plans and budgets requires a certain level of agility. Boliden's Aitik open pit copper mine in Northern Sweden has been through a long jour-

ney to reach the title of world's most productive open pit copper mine. This article discusses the different factors contributing to the success of Aitik, from long-term strategic planning to incremental and short-term adjustments and from implementing and integrating new technologies to tackling "the human factor".

Produktivitätssteigerung in Boliden's Aitik Kupfertagebau: Ein Einblick in das effizienteste Bergwerk der Welt

Sinkende Erzgehalte und steigende Gewinnungskosten haben dazu geführt, dass die Steigerung der Produktivität in bereits laufenden Bergwerken einen hohen Stellenwert erhalten hat. Die Steigerung der Produktivität in einer Branche mit Planungen und Budgets, die über Jahrzehnte reichen, erfordert jedoch ein gewisses Maß an Agilität. Der Kupfertagebau Aitik in Nordschweden hat einen langen Weg zurückgelegt, um den Titel des produktivsten

Kupfertagebaus der Welt zu erlangen. Dieser Artikel diskutiert die verschiedenen Faktoren, die zum Erfolg von Aitik beitragen, von der langfristigen strategischen Planung über inkrementelle und kurzfristige Anpassungen bis hin zur Implementierung und Integration neuer Technologien und der Auseinandersetzung mit dem „Faktor Mensch“.

1 A Global Challenge

Human's dependence on minerals have only increased over time. From primitive tools of the Bronze Age to modern electronics, mining has been the primary industry contributing to our development and welfare. However, the rapid rate of technological innovations is transforming not only the demand for minerals, but also the way we extract these minerals.

The demand for copper, with its central role in modern society, is still increasing. At the same time, the average head grade of copper mines in operation has been decreasing for the past decades and the forecasts point to a further downward trend for the coming years (Figure 1).

A common belief is that this reduction in ore grades is due to depletion of high grade, close to surface deposits. Simultaneously, the industry is actively shifting toward lower grades due to advancements in metallurgical and extraction technologies (2). The availability of such technologies has made it possible to mine low-grade ores at high volumes and low extraction costs, which can, in turn, extend the life of mine in established operations.

Low-grade operations depend on a high productivity performance to remain profitable. This becomes an intricate issue if

1 Eine globale Herausforderung

Die Abhängigkeit der Menschheit von mineralischen Rohstoffen hat mit der Zeit immer weiter zugenommen. Von einfachen Werkzeugen der Bronzezeit bis hin zur modernen Elektronik war und ist der Bergbau stets die primäre Industrie, die zur gesellschaftlichen Entwicklung und letztlich unserem Wohlstand beiträgt. Die rasante Geschwindigkeit der technologischen Innovationen verändert jedoch nicht nur die Nachfrage nach Bodenschätzen, sondern auch die Art und Weise, wie diese Rohstoffe gewonnen werden.

Die Nachfrage nach Kupfer, das in der modernen Gesellschaft eine zentrale Rolle spielt, nimmt weiter zu. Gleichzeitig nimmt allerdings der durchschnittliche Erzgehalt der in Betrieb befindlichen Kupferbergwerke seit Jahrzehnten ab, und die Prognosen deuten auf einen weiteren Abwärtstrend für die kommenden Jahre hin (Bild 1).

Eine verbreitete Begründung ist, dass diese Verringerung der Erzgehalte auf den bereits erfolgten Abbau von oberflächennahen „reichen“ Erzen mit hohen Konzentrationen zurückzuführen ist. Gleichzeitig ist es der Industrie jedoch aufgrund der Fortschritte in der Metallurgie und bei den Gewinnungstechnologien gelungen, auch Erzkörper mit deutlich niedrigeren Qualitäten wirtschaft-

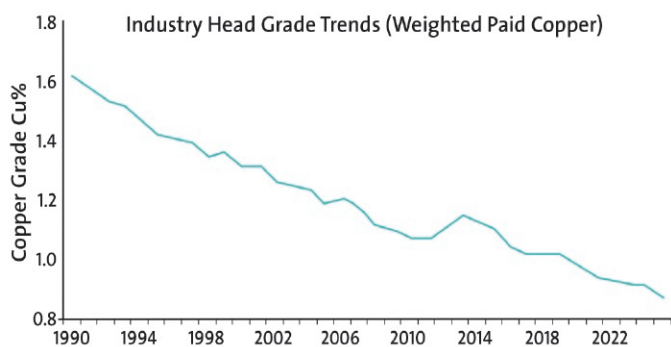


Fig. 1. Declining grades of copper over time (1). // Bild 1. Im Zeitverlauf abnehmende Kupfergehalte (1).

one considers the market volatilities, increased capital and labor costs as well as stringent environmental regulations. Given the increasing stakeholder expectations and complications concerning the social license to operate, the mines have no choice but to increase their productivity and efficiency in order to thrive and remain socially accepted.

What follows is an insight into the world's most productive open pit copper mine. As a case study for low grade ore mining, Aitik exemplifies the importance of a holistic approach to different layers of efficiency to achieve sustained high performance at a mining operation.

2 Boliden Aitik

About 60 km above the Arctic Circle in northern Sweden lies Aitik, Europe's largest open pit copper mine at 3 km length, 1.1 km width and 450 m depth. The low grade mineralization in Aitik was discovered in 1930s and mining began in 1968. Since production started, the mine has been owned and operated by Boliden Mineral AB, Stockholm, a mid tier mining company focused on high tech, High Performance Mining in Scandinavia.

What makes Aitik a special case is a combination of factors that allow mining an exceptionally low-grade ore with a good margin of profit. The average ore grade in Aitik is 0.22%, with a cut off grade of 0.06%. Comparing this to the vertical axis in figure 1 reveals that the ore in Aitik is considered waste rock in most mines. The average ore grade in a typical open pit copper mine is around 1.0%.

The low grade ore in Aitik necessitates a highly efficient operation to yield profit. In 2018, Aitik produced 39 Mt of milled ore, yielding an operating profit of around 270 M US\$. This was achieved by a relatively small number of employees (<700) and mining fleet. In a benchmark study by Wood Mackenzie, Aitik is ranked as the most productive open pit copper mine in the world (Figure 2).

So how is this achieved? The answer lies in a holistic view of the operation over time. The aim here is not to define a generic roadmap, but rather to provide a holistic view of the attitude and approach to increasing productivity and efficiency, both in the short-term and in the long-term. The long-term strategic decisions paved the way for Aitik to achieve this goal, while in the short-term, a strong focus on integration of advanced technologies helped to realize the goal through many incremental improvements.

lich abzubauen (2). Die Verfügbarkeit solcher Technologien hat es ermöglicht, Erze mit niedrigen Wertmineralgehalten bei hohen Durchsätzen und niedrigen Förderkosten ökonomisch abzubauen, was wiederum die Lebensdauer des Bergwerks im laufenden Betrieb verlängern kann.

Bergwerke mit niedrigen Erzgehalten sind dementsprechend auf eine hohe Produktivität angewiesen, um profitabel bleiben zu können. Dies wird zu einer echten Herausforderung, wenn die Marktvolatilitäten, die gestiegenen Kapital- und Arbeitskosten sowie die strengen Umweltauflagen berücksichtigt werden. Angesichts der steigenden Erwartungen der verschiedenen Stakeholder und der Komplikationen im Zusammenhang mit der „Social License to Operate“ haben die Bergwerke keine andere Wahl, als ihre Produktivität und Effizienz zu steigern, um wirtschaftlich erfolgreich zu sein und gesellschaftlich anerkannt zu bleiben.

Im Folgenden wird der produktivste Kupfertagebau der Welt vorgestellt. Als Fallstudie für einen Erzbergbau mit geringen Erzkonzentrationen veranschaulicht Aitik die Bedeutung eines ganzheitlichen Ansatzes für verschiedene Ebenen der Effizienz, um eine dauerhaft hohe Leistung im Bergbaubetrieb zu erzielen.

2 Boliden Aitik

Etwa 60 km nördlich des Polarkreises in Nordschweden liegt Aitik, Europas größter Kupfertagebau mit 3 km Länge, 1,1 km Breite und einer Teufe von 450 m. Die Erze mit niedrigen Wertmineralgehalten wurden in Aitik in den 1930er Jahren entdeckt, und der Abbau begann im Jahr 1968. Seit Beginn der Produktion befindet sich die Anlage im Besitz von Boliden Mineral AB, Stockholm, einem mittelständischen Bergbauunternehmen, das sich auf Hochleistungstechnologiebergbau in Skandinavien konzentriert.

Was Aitik zu einem Sonderfall macht, ist eine Kombination von Faktoren, die es ermöglichen, ein außergewöhnlich geringwertiges Erz mit einer guten Gewinnmarge zu fördern. Der durchschnittliche Erzgehalt in Aitik beträgt 0,22%, der Cutoff-Grade liegt bei 0,06%. Bild 1 verdeutlicht, dass das Erz in Aitik im weltweiten Vergleich in den meisten Bergwerken als Abraum gelten würde. Der durchschnittliche Gehalt in einem typischen Kupfertagebau liegt bei etwa 1,0%.

Das geringwertige Erz in Aitik erfordert daher einen hocheffizienten Betrieb, um Gewinne erzielen zu können. Im Jahr 2018 produzierte Aitik 39 Mio. t Erz und erzielte damit ein Betriebsergebnis von rd. 270 Mio. US-\$. Dies wurde mit einer relativ kleinen Anzahl von Mitarbeitern (< 700) und einem relativ kleinen Maschinenpark erreicht. In einer Referenzstudie von Wood Mackenzie wird Aitik als produktivster Kupfertagebau der Welt eingestuft (Bild 2).

Wie wird dies erreicht? Die Antwort liegt in einer ganzheitlichen Betrachtung des Betriebs über die Zeit. Dabei geht es nicht darum, eine generische Roadmap zu definieren, sondern eine ganzheitliche Sicht auf die Denkweise und den Ansatz zur sowohl kurz- als auch langfristigen Steigerung von Produktivität und Effizienz zu vermitteln. Die langfristigen strategischen Entscheidungen ebneten den Weg für Aitik, das grundlegende Ziel zu erreichen, während kurzfristig ein starker Fokus auf die Integration fortschrittlicher Technologien dazu beigetragen hat, das Gesamtziel durch eine Vielzahl inkrementeller Verbesserungen zu erreichen.

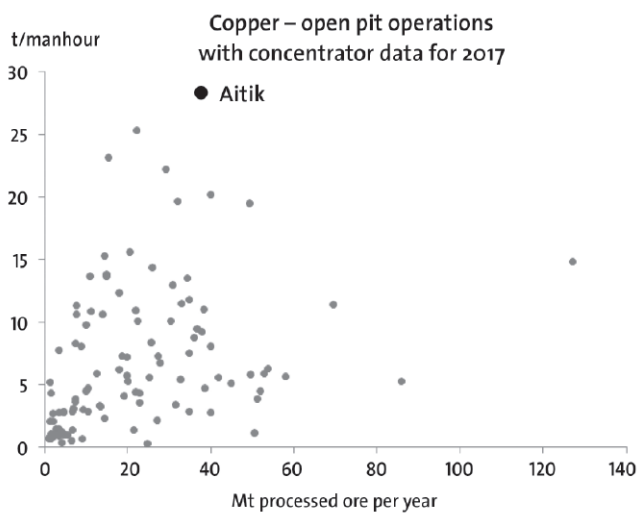


Fig. 2. Aitik as the world's most productive open pit copper mine (3).
Bild 2. Aitik ist der produktivste Kupfertagebau der Welt (3).

3 Strategic planning

The influence of investments and strategic plans on the long-term productivity of an operation is undeniably important. However, the timespan for a large-scale mine to go through exploration, feasibility studies, planning and finally entering the production phase varies between five to 20 years. Besides, timespans between planning and implementing investments during the production process are often too long to be able to keep up with technological developments and take full advantage of them. Therefore, increasing productivity at every stage of development is a strategic imperative rather than a temporary goal. It takes a great deal of operational agility, as well as an iterative effort to re-evaluate and adjust the plans on a regular basis to adopt new technologies to continuously improve efficiency.

In case of Aitik, the low grade mineralization was discovered in 1930s, but mining did not commence until 1968. This was due to immaturity of the technology required to process ores with such low grades. As the technological development progressed and reached a mature state, production started at only 2 Mt/a in 1968. An overview of Aitik's production volume over time reveals the constant increase of the production volume since production commenced (Figure 3).

The mine's production gradually increased in accordance with the availability and capacity of the equipment of the time, reaching 6 Mt/a in the 1970s. The introduction of a new mill and workshop increased the production to 18 Mt/a in 2000, after which a series of studies were conducted to evaluate the necessity and potential effects of further investments to increase production volume.

Consequently, in 2007 a total of 710 M US\$ was invested to double the production from 18 to 36 Mt/a. The importance of this investment lies not in the capital itself, but in the engineering details preceding the investment. Two new crushers, e.g., were added to the pit, but it was the placement of these crushers that played a crucial role in the long-term efficiency of the mine's transportation. Two out of the three crushers in Aitik were placed inside the pit, which is rather unusual. This, however, led to shorter transpor-

3 Strategische Planung

Der Einfluss von Investitionen und einer strategischen Planung auf die langfristige Produktivität eines Unternehmens ist unbestreitbar wichtig. Die Zeitspanne, in der ein großes Bergwerk nach Erkundung, Machbarkeitsstudien und Planung schließlich in die Produktionsphase geht, variiert häufig zwischen fünf und 20 Jahren. Zudem sind die Zeitspannen zwischen Planung und Umsetzung von Investitionen während des Produktionsprozesses oft zu lang, um mit den technologischen Entwicklungen Schritt halten und diese optimal nutzen zu können. Daher ist die Steigerung der Produktivität in jeder Entwicklungsphase eher ein strategischer Imperativ als ein temporäres Ziel. Es erfordert viel operative Agilität sowie iterative Anstrengungen, um die Planungen regelmäßig neu zu bewerten und anzupassen und um Technologien zur kontinuierlichen Effizienzsteigerung einzusetzen.

Im Fall von Aitik wurden die Erze mit niedrigen Wertmineralgehalten bereits in den 1930er Jahren entdeckt, aber der Abbau begann erst im Jahr 1968. Dies war auf die mangelnde Reife der Technologie zur Verarbeitung von Erzen mit so niedrigen Gehalten zurückzuführen. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung begann die Produktion 1968 bei nur 2 Mio. t/a. Ein Überblick über die Produktionsmenge von Aitik von Beginn an bis heute zeigt eine ständige Zunahme (Bild 3).

Die Produktion des Bergwerks stieg allmählich, entsprechend der Verfügbarkeit und Kapazität der damaligen Ausrüstung, und erreichte in den 1970er Jahren 6 Mio. t/a. Die Einführung einer neuen Aufbereitungsanlage und Werkstatt erhöhte die Produktion im Jahr 2000 auf 18 Mio. t/a. Danach wurde eine Reihe von Studien durchgeführt, um die Notwendigkeit und die möglichen Auswirkungen weiterer Investitionen auf die Steigerung des Produktionsvolumens zu bewerten.

Folglich wurden im Jahr 2007 insgesamt 710 Mio. US-\$ investiert, um die Produktion von 18 auf 36 Mio. t/a zu verdoppeln. Die Bedeutung dieser Investition liegt nicht in der Anschaffung selbst, sondern in den ingenieurtechnischen Details, die im Vorfeld der Investition ausgearbeitet wurden. So wurden beispielsweise zwei neue Brecher in der Grube installiert; jedoch war es der Standort dieser Brecher, der eine entscheidende Rolle für die langfristige Effizienz des Materialtransports innerhalb des Bergwerks spielte. Zwei der drei Brecher in Aitik wurden innerhalb des Tagebaus platziert, was eher ungewöhnlich ist. Dies führte jedoch zu kürzeren Transportwegen sowie zu einer hohen Flexibilität in der täglichen Steuerung und Produktionsanpassung des Betriebs. Zusätzlich wurde der Erztransport mit einer Kombination aus über- und untertägigen Förderbändern geplant, von denen das längste 8 km lang ist. Das Fördersystem hatte einen großen Einfluss auf die Transporteffizienz des Bergwerks und führte sowohl zu einer Senkung der Kosten als auch des ökologischen Fußabdrucks. Dies war vor allem angesichts der klimatischen Bedingungen in Nordschweden und der damit verbundenen vielen unvorhergesehenen Produktionsunterbrechungen von Vorteil. Weitere Bestandteile dieser Investition waren eine LKW-Werkstatt für eine höhere Verfügbarkeit und eine gut geplante Wartung der Flotte sowie ein Bahnterminal vor Ort für einen effizienten Transport zur Weiterverarbeitung.

Wichtigster Bestandteil dieser Investitionsrunde war eine hochmoderne Aufbereitungsanlage. Die weltweit führende Tech-

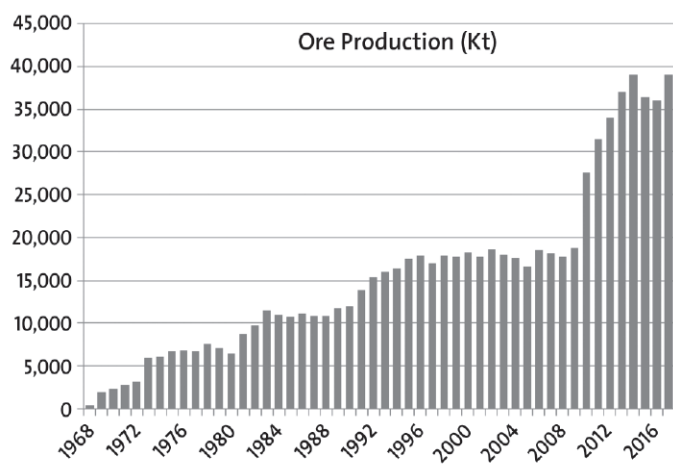


Fig. 3. Ore production in Aitik since operation's start.
Bild 3. Erzabbau in Aitik seit Betriebsbeginn.

tation distances as well as great flexibility in the daily management and production adjustment of the operation. Additionally, the ore transportation in the mine was planned using a combination of above and underground conveyor belts, of which the longest is 8 km long. The conveyor system has had a large influence on the transportation efficiency of the mine, reducing both costs and environmental footprint. This was especially beneficial considering the climate conditions in Northern Sweden and hence the many unforeseen interruptions in production. Other items included in this investment were a truck workshop to provide higher levels of availability and well planned maintenance of the fleet, as well as a railway terminal on site for efficient transportation to the smelter.

The most important item in this investment round was a state-of-the-art mill/concentrator plant. The world leading technology used in this plant enabled a fully automated process with high capacity. This new mill/concentrator plant was instrumental in reaching the planned 36 Mt/a in 2012.

The next iteration of these evaluations resulted in another 118 M US\$ investment in 2015 in order to increase production levels further to 45 Mt/a by 2020.

The key to the success of these investments is their timing in accordance with the maturity of the applied technologies. It is also crucial that the operation is capable to integrate them into the operating process in the most effective way to maximize their benefits. The integration and acceptance of new technologies by the staff on site is as important as their implementation. An all inclusive education plan and full support of the engineering team during and after the implementation ensured a trouble free transition, as well as acceptance and interest among operational staff.

The mentioned examples were decisions made at the strategic level. Their impact, however, ran deep in the operation. Aitik being one of the pioneers of in-pit crushing and conveying gave a boost to the production capacity of the mine. The automated mill/concentrator plant also increased the process capacity of the operation significantly. These not only increased the productivity and production volume in and by themselves, but also provided a platform for further developments of the efficiency in the sense of "doing more with less". Incremental improvements by imple-

nologie in dieser Anlage ermöglichte einen vollautomatischen Prozess mit hoher Kapazität. Diese neue Aufbereitungsanlage trug wesentlich dazu bei, die geplanten 36 Mio. t/a im Jahr 2012 zu erreichen.

Die nächste Iteration der Evaluierungen führte zu weiteren 118 Mio. US-\$ Investitionen im Jahr 2015, um das Produktionsniveau bis 2020 weiter auf 45 Mio. t/a zu steigern.

Der Schlüssel zum Erfolg dieser Investitionen liegt in ihrem Timing entsprechend dem Reifegrad der eingesetzten Technologien. Es ist zudem entscheidend, dass der Betrieb in der Lage ist, die neuen Technologien auf möglichst effektive Weise in den Betriebsprozess zu integrieren, um ihren Nutzen zu maximieren. Die Integration und Akzeptanz neuer Technologien durch die Mitarbeiter vor Ort ist ebenso wichtig wie deren Einführung. Ein umfassender Schulungsplan und die volle Unterstützung des Ingenieurteams während und nach der Implementierung sorgten bei Aitik für einen reibungslosen Übergang sowie für Akzeptanz und Interesse beim Betriebspersonal.

Die genannten Beispiele waren Entscheidungen auf strategischer Ebene. Ihre Auswirkungen waren jedoch weitreichend. Aitik als einer der Pioniere des in-pit crushing and conveying hat damit die Produktionskapazität des Bergwerks weiter erhöht. Die automatisierte Aufbereitungsanlage erhöhte zudem die Prozesskapazität des Betriebs deutlich. Dies steigerte nicht nur die Produktivität und das Produktionsvolumen an sich, sondern bildete auch eine Grundlage für die Weiterentwicklung der Effizienz im Sinne von „mehr tun mit geringerem Einsatz“. Stufenweise Verbesserungen durch den Einsatz neuer Technologien auf operativer Ebene erhöhten die Effizienz und Effektivität verschiedener Prozesse. Der singuläre Effekt solcher neuer Technologien auf die allgemeine betriebliche Effizienz mag eher gering erscheinen. Wenn sie jedoch kumuliert werden, tragen sie wesentlich zur Gesamteffizienz des Betriebs bei.

4 Technologiefokus

Die aktuellen Entwicklungen in puncto Verfügbarkeit, Benutzerfreundlichkeit und Leistungsfähigkeit neuer Technologien haben eine Verschiebung des Status quo in der Bergbauindustrie eingeleitet. Dies liegt nicht nur an den Auswirkungen der Technologie auf die Produktivität und Qualität der Prozesse, sondern auch an der ungeahnten Chance, die generelle Arbeitsweise, insbesondere in Bezug auf die Automatisierung, zugunsten der Effizienz neu zu gestalten.

Der multidisziplinäre Charakter der Bergbauindustrie ermöglicht und erfordert die Zusammenarbeit einer Vielzahl von Disziplinen, um die Prozesse signifikant verbessern zu können. Die Technologie als Oberbegriff berücksichtigt alle Aspekte solcher Verbesserungen in verschiedenen Bereichen und Größenordnungen, von der offensichtlichen Produktivitätssteigerung automatisierter Großanlagen bis hin zu differenzierten Effizienzsteigerungen durch teilautomatisierte Lösungen bei der Bergwerksplanung und Vermessung. Der Schlüssel zum Erfolg, basierend auf den Erfahrungen bei Aitik, ist die enge Zusammenarbeit mit Lieferanten und Technologieanbietern, um die Technologie an die spezifischen Bedürfnisse des Betriebs anzupassen. Gleichzeitig ist es für die Betriebe ebenso wichtig, flexibel zu sein und ihre bisherige Vorgehensweise an diese Technologien anzupassen.

mentation of new technologies on the operational level increased the efficiency and effectiveness of several processes. The singular effect of such new technologies on overall operational efficiency may seem rather small. When accumulated though, they contribute significantly to the total efficiency of the operation.

4 Focus on Technology

The recent developments in availability, usability and performance of new technologies have initiated a shift of the status-quo in the mining industry. This is not only due to the impact of technology on productivity and quality of processes, but also a result of the unprecedented opportunity it provides to re-design Boliden's way of work in favor of efficiency, especially with respect to automation.

The multi-disciplinary nature of the mining industry allows for a wide range of disciplines to collaborate in order to improve their operations. Technology, as an umbrella term, accommodates all aspects of such improvements in various fields and scales, from the overt productivity improvements of large-scale automated machinery, to more subtle increases in efficiency due to semi-automated mine planning and surveying tools. The key to success, based on the experience at Aitik, is close collaboration with suppliers and technology providers in order to adapt the technology to specific needs of the operation. Simultaneously, it is of equal importance for the operations to be flexible to adapt and modify their current practice to accommodate these technologies.

Furthermore, universities and research institutes act as a catalyst in steering these developments. In case of Aitik, close collaboration of Boliden with Luleå University of Technology, RWTH Aachen University and several other research institutes has strengthened the industry's link to innovation and research community. This, in turn, not only drives forward the innovations, but also establishes a firm ground for education and training of future engineers.

Below are a few selected examples from Aitik to demonstrate improvements made by implementing new technologies and adapting processes accordingly.

4.1 Rock mechanics

It is a rather neglected aspect of efficiency when it comes to open pits, but rock mechanics play an important role in defining the stripping ratio and safety margins of every operation. The higher the ability to monitor and control the wall stability, the better the stripping ratio. In case of Aitik, a combination of advanced monitoring systems, slope control and complex modelling of the walls on a regular basis provides a unique opportunity for the mine to achieve a 1:1 stripping ratio. Considering the enormous amounts of waste rock removal required for such low grade ore, this is a definitive advantage contributing to overall efficiency of the operation.

Another contributing factor is pre-splitting quality and precision drilling thanks to high-precision navigation systems. The higher the precision of the drilling, the higher the wall quality. This translates into steeper walls and hence better stripping ratio. With the latest wall optimization in Aitik, a 1 degree increase in the slope of the walls led to 11 Mt of rock per kilometer of slope, with the current pit size, this saved a total of 83 Mt of waste rock removal to reach the ore.

Darüber hinaus wirken Universitäten und Forschungseinrichtungen als Impulsgeber und Katalysator bei diesen technologischen Entwicklungen mit. Im Fall von Aitik hat die enge Zusammenarbeit Bolidens mit der Technischen Universität Luleå, der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen und mehreren anderen Forschungseinrichtungen die Verbindung der Industrie zu Innovationen und der internationalen Forschungsgemeinschaft gestärkt. Dies wiederum treibt nicht nur die Innovationen voran, sondern schafft auch eine solide Basis für die Aus- und Weiterbildung des Ingenieur Nachwuchses.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Beispiele aus Aitik vorgestellt, die Verbesserungen durch die Einführung neuer Technologien und die Anpassung von Prozessen veranschaulichen.

4.1 Gebirgsmechanik

Es ist zwar ein eher vernachlässigter Aspekt bei der Bewertung der Effizienz bei Tagebauen, aber die Gebirgsmechanik spielt eine wichtige Rolle bei der Definition des Abraum/Erz-Verhältnisses und der einzuhaltenen Sicherheitsabstände jedes Betriebs. Je besser die Überwachung und Steuerung der Böschungstabilität ist, desto besser ist auch das Abraum/Erz-Verhältnis. Im Fall von Aitik bietet eine Kombination aus fortschrittlichen Überwachungssystemen, Böschungsmonitoring und regelmäßiger komplexer Modellierung der Böschungen eine einzigartige Möglichkeit, ein Abraum/Erz-Verhältnis von 1:1 zu erreichen. In Anbetracht der für ein Erz mit solch geringen Wertmineralgehalten erforderlichen enormen Mengen an Abraum ist dies ein entscheidender Vorteil, der zur Gesamteffizienz des Betriebs beiträgt.

Ein weiterer Faktor ist die Genauigkeit beim Bohren durch hochpräzise Steuerungssysteme. Je genauer das Bohren erfolgt, desto besser ist die Böschungsqualität, was zu steileren Wänden und damit zu einem besseren Abraum/Erz-Verhältnis führt. Mit der neuesten Optimierung in Aitik führte eine um ein Grad erhöhte Neigung der Böschungen zu einer zusätzlichen Gewinnung von 11 Mio. t Gestein pro Kilometer, was bei der aktuellen Größe des Bergwerks dazu führte, dass insgesamt 83 Mio. t weniger Abraum bewegt werden mussten, um das Erz zu erreichen.

4.2 Automatisiertes Bohren

Automatisiertes Bohren wird seit einiger Zeit weltweit praktiziert und hat sich als vorteilhaft im Hinblick auf die Effizienz erwiesen. Aitik ging einen Schritt weiter und präsentierte kürzlich die weltweit erste Bohrung mit elektrisch betriebenen Bohrgeräten. In Anbetracht der Schwierigkeiten, welche die Verwendung von elektrischen Kabeln mit sich bringen, ist dies ein Fortschritt sowohl in der Automatisierung als auch in der Elektrifizierung und erhöht die Auslastung und Effizienz von Bohrgeräten.

Dem autonomen Betrieb ist zunächst eine Versuchszeit im ferngesteuerten Modus vorausgegangen, die eine 20%ige Steigerung der Auslastung der Anlagen sowie eine höhere Bohrqualität und -genauigkeit ergab. Des Weiteren kann die Auslastung der Maschinen durch die Tatsache, dass die Bohrgeräte nun auch in den vormals ungenutzten Zeiten zwischen den Schichtwechseln sowie Pausenzeiten eingesetzt werden können, weiter erhöht werden. Darüber hinaus kann ein Bediener bis zu drei Geräte gleichzeitig steuern, was wiederum zu einer Steigerung der Bohrleistung bei gleicher Anzahl von Bedienern führt. Das Fernbleiben

4.2 Automatisated drilling

Automatisated drilling has been practiced for a while around the world and has proven benefits in efficiency. Aitik took this one step further and recently premiered the world's first autonomous drilling by electric rigs. Considering the complications that electric cables entail, this is a step forward in both automation and electrification, increasing the utilization and efficiency of drill rigs.

The autonomous drilling was based off a trial period of tele-remote drilling, which proved a 20% increase in utilization of rigs as well as higher drilling quality and precision. The autonomous rigs would further increase the utilization of the machines by taking advantage of all the hours and minutes between shift changes as well as break and lunch times. In addition, the possibility of one operator controlling up to three rigs simultaneously enables the mine to increase its drilling efficiency with the same number of operators. Removing the operators from the harsh work environment is another worthwhile benefit contributing to the operator comfort and safety of the operation.

4.3 Trolley truck lane

Electrification in the mining industry is not a new concept, but implementing practical solutions in large scale mines has been a challenge for many operations. After using electric drills for decades, Aitik introduced the first arctic trolley lane for large haul trucks. The simple idea of running such large trucks on electricity comes with many challenges, including technical ones as well as strategic ones such as adapting the mine planning routines to fit in the lane and coordinating it with future expansions. However, its long-term benefits are well in line with the strategies to increase efficiency and reduce the environmental impact.

A trolley lane not only reduces the diesel consumption and hence carbon footprint, but also improves the transportation efficiency due to higher truck speeds. The electric trucks with a full load achieve almost double the speed of similar diesel trucks. The reduced cycle time for load and haul in the first 700 m trial lane in Aitik resulted in savings equivalent to one less haul truck and eight drivers, as well as 830 m³/a diesel. The ongoing extension of this lane will leave a significant impact on the long-term efficiency of ore transportation in Aitik.

4.4 Continuous blast optimization

When it comes to efficiency in open pit mines, a major influencing factor is the quality of drill and blast operations. Its costs and downstream influence, in form of "run of mine" fragmentation, is well known and has been the subject of research for decades. Continuous research and utilization of "state of the art" technologies to monitor and optimize the fragmentation has shown large savings in Aitik. Although the improvements seem rather insignificant in themselves, the accumulated influence of them on an operation that runs 24/7 is momentous.

An example of the large influence of such minor improvements in Aitik is changing blast directions in accordance with rockmass jointing (4). Simply mapping the rock structure, and adjusting the blast designs to their direction in Aitik led to an improvement in loading efficiency of rope shovels. The finer fragmentation resulting from this led to a seemingly small increase in bucket weight from 70 to 72 t. Yet it accumulated to a 1.8 Mt increase in annual

der Bediener von der rauen Arbeitsumgebung vor Ort ist ein weiterer lohnender Vorteil, der zum Komfort und zur Sicherheit des Bedieners beiträgt.

4.3 Truck/Trolley-Systeme

Die Elektrifizierung im Bergbau ist zwar kein neues Konzept, aber die Umsetzung von praktischen Lösungen insbesondere in großen Bergwerken war und ist für viele Betriebe eine Herausforderung. Nach jahrzehntelangem Einsatz von elektrisch betriebenen Bohrgeräten führte Aitik die erste arktische Oberleitungsbahn für Schwerlastkraftwagen ein. Die vermeintlich einfache Idee bringt eine Vielzahl von Herausforderungen mit sich, sei es sowohl technischer als auch strategischer Art, wie beispielsweise die Anpassung der Bergwerksplanung an die Fahrspur und deren Abstimmung mit zukünftigen Erweiterungen. Der langfristige Nutzen steht jedoch im Einklang mit den Strategien zur Effizienzsteigerung und Reduzierung der Umweltbelastung.

Ein Truck/Trolley-System reduziert nicht nur den Dieserverbrauch und damit den CO₂-Fußabdruck, sondern verbessert auch die Transporteffizienz durch höhere Fahrgeschwindigkeiten. Elektrisch betriebene Trucks erreichen unter Vollast nahezu die doppelte Geschwindigkeit gegenüber dieselgetriebenen. Die verkürzte Zykluszeit für Beladung und Transport auf der ersten 700 m langen Teststrecke in Aitik führte zu Einsparungen von einem SKW, acht Fahrern sowie 830 m³ Diesel pro Jahr. Der laufende Ausbau dieser Fahrspur wird einen erheblichen Einfluss auf die langfristige Effizienz des Erztransports in Aitik haben.

4.4 Kontinuierliche Sprengoptimierung

Wenn es um die Effizienz im Tagebau geht, ist die Qualität der Bohr- und Sprengarbeit ein wesentlicher Einflussfaktor. Die Kosten und der Einfluss der Zerkleinerung auf die nachgelagerten Prozesse ist bekannt und wird seit Jahrzehnten erforscht. Kontinuierliche Forschung und der Einsatz modernster Technologien zur Überwachung und Optimierung der Zerkleinerung haben in Aitik zu großen Einsparungen geführt. Obwohl die Verbesserungen an sich eher unbedeutend erscheinen, ist der kumulierte Einfluss auf einen Betrieb, der rund um die Uhr läuft, von großer Bedeutung.

Ein Beispiel für den großen Einfluss solch kleiner Verbesserungen in Aitik ist die Änderung der Sprengrichtung in Abhängigkeit von den Klüften (4). Die einfache Kartierung der Gesteinsstruktur und die Anpassung der Sprengschemata an ihre Richtung führten in Aitik zu einer Verbesserung der Ladeeffizienz von Seilbaggern. Die daraus resultierende höhere Zerkleinerung führte zu einem scheinbar geringen Anstieg des Schaufelgewichts von 70 auf 72 t. Dennoch summierte es sich zu einer Erhöhung der jährlichen Ladekapazität um 1,8 Mio. t. Dies liegt einfach daran, dass jeder SKW mit drei bis vier Ladespielen bei mehr als 300.000 SKW-Zyklen pro Jahr beladen wird. Darüber hinaus ermöglichte die Verbesserung der Zerkleinerung eine Senkung der Bohr- und Sprengkosten um 6% bei gleichbleibendem Wirkungsgrad der Aufbereitung. Dies ist angesichts der Tatsache von Bedeutung, dass das jährliche Produktionsbudget eines typischen großen Tagebaus mehr als 20 Mio. US-\$ beträgt.

Es sollte jedoch erwähnt werden, dass solche Verbesserungen stark von den Werkzeugen und Methoden abhängen, die den In-

loading capacity of shovels. This is simply because each truck is loaded by three to four buckets and more than 300,000 truck cycles are loaded per year. Furthermore, the improvement in fragmentation allowed a 6% decrease in drill and blast costs while maintaining a constant mill efficiency. This is rather significant considering that a typical large scale mine's annual production budget is more than 20 M US\$.

It should, however, be mentioned that such improvements depend heavily on the tools and methods available to the engineers. The aforementioned example would not be possible without the modern techniques of photogrammetry, digital data integration and analytics, which leads to the last point.

4.5 Digitalization

The area of analytics and data integration is constantly proving benefits in all industries, mining included. Analytics provide insights into the details of processes, which leads to invaluable information on how to improve them.

An example of such applications in Aitik is following the ore along the production chain and integrating the data from different sources into valuable information that inform the day to day management of the operation (5). It is of course a challenging task to integrate the data produced by different systems and derive information from them, but when done properly, this leads to unprecedented improvement opportunities.

In a proof of concept trial, the data from the crushers in Aitik provided a measure for throughput and energy consumption. This, combined with image analysis from cameras on top of the crushers provided a continuous evaluation of crushing efficiency versus fragmentation. These were then correlated to fleet data to identify the truck dump for the corresponding crushing cycle, and henceforth to the rope shovel loading each specific truck. Consequently, not only did the data reveal the efficiency of loading and crushing, it also provided the exact coordinates of the loaded rock for further analysis of the geological condition, drill and blast setup and ore grades in a certain location in the mine.

Such a scheme enables a range of possibilities for manipulating the drill and blast, as well as crusher size setting to optimize the process. Furthermore, ongoing studies try to stretch this scheme further to the Measure-While-Drilling data to provide a prediction of the rock condition and ore grades. All these are invaluable information from a mine to mill perspective, providing the potential for significant process optimization.

5 The Human Factor

A relatively overlooked, though delicate subject in efficiency is the role of humans in the current hype of automation and digitalization. It is fantastic to observe all the positive effects of technological advancements, especially in terms of safety, efficiency and productivity. Yet implementing such radical shifts in the oldest industry known to man necessitates continuous education and smooth transitions.

At Aitik, competent and committed employees are as important to the operation as the tools and methods available to them. The continuous education for all employees gives everyone a chance to adapt to new tools and methods. It simultaneously provides a feedback to technology providers to advance their solutions. It is worth

genieuren zur Verfügung stehen. Das vorgenannte Beispiel wäre ohne die modernen Techniken der Photogrammetrie, der digitalen Datenintegration und -auswertung nicht möglich, was zum letzten Punkt der Betrachtung führt.

4.5 Digitalisierung

Der Bereich der Datenintegration und -auswertung erweist sich in allen Branchen einschließlich des Bergbaus zunehmend als vorteilhaft. Eine hochentwickelte Datenanalyse gibt Einblicke in Prozessdetails, was zu unschätzbaren Informationen über deren Verbesserungsmöglichkeiten führen kann.

Ein Beispiel für eine solche Anwendung in Aitik ist die Verfolgung des Erzes entlang der gesamten Wertschöpfungskette und das Integrieren der Daten aus verschiedenen Quellen in wertvolle Informationen, die das laufende Management des Betriebs unterstützen (5). Es ist natürlich eine anspruchsvolle Aufgabe, die von verschiedenen Systemen erzeugten Daten zu integrieren und daraus Informationen abzuleiten, aber, richtig umgesetzt, gibt dies Aufschluss über beispiellose Verbesserungsmöglichkeiten.

In einem Proof-of-Concept-Versuch lieferten die Daten der Brecher in Aitik ein Maß für Durchsatz und Energieverbrauch. Dies, kombiniert mit der Bildverarbeitung von Kameras auf den Brechern, ergab eine kontinuierliche Bewertung der Brechereffizienz gegenüber der Zerkleinerung. Diese Informationen wurden dann mit den Flottendaten korreliert, um die SKW-Kippstelle für den entsprechenden Brecherzyklus zu identifizieren, und im Weiteren mit der Seilbaggerladung für jeden einzelnen SKW. Folglich deckten die Daten nicht nur die Effizienz der Verladung und des Brechens auf, sondern lieferten auch die genauen Koordinaten des beladenen Gesteins für die weitere Analyse des geologischen Zustands, der Bohr- und Sprengvorrichtung und der Erzgehalte an einem bestimmten Ort im Tagebau.

Ein solches Schema ermöglicht eine Reihe von Möglichkeiten zur Steuerung von Bohr- und Sprengvorgängen sowie die Einstellung der Brechergröße zur Prozessoptimierung. Darüber hinaus versuchen laufende Studien, dieses Schema weiter auf die „Measuring-While-Drilling“-Daten auszudehnen, um eine Vorhersage des Gesteinszustands und der Erzgehalte bereits beim Bohren zu ermöglichen. All dies sind unschätzbare Informationen für eine integrierte Mine-to-Mill Betrachtung und bieten das Potential für eine signifikante Prozessoptimierung.

5 Der Faktor Mensch

Ein relativ vernachlässigtes, wenn auch kritisches Thema bei der Effizienzbewertung ist die Rolle des Menschen im aktuellen Hype der Automatisierung und Digitalisierung. Es ist fantastisch, alle positiven Auswirkungen des technologischen Fortschritts zu beobachten, insbesondere in Bezug auf Sicherheit, Effizienz und Produktivität. Doch die Umsetzung solcher radikaler Veränderungen in der ältesten dem Menschen bekannten Branche erfordert eine kontinuierliche Weiterbildung und reibungslose Übergänge.

Bei Aitik sind kompetente und engagierte Mitarbeiter ebenso wichtig für den Betrieb wie die ihnen zur Verfügung stehenden Werkzeuge und Methoden. Die kontinuierliche Weiterbildung aller Mitarbeiter gibt jedem die Möglichkeit, sich an neue Werkzeuge und Methoden anzupassen. Gleichzeitig gibt es ein Feedback an Technologieanbieter, um ihre Lösungen weiterzuentwickeln.

wondering how the senior employees use drones and laser scanners, while they were doing similar tasks 50 years ago without GPS navigation or even computers. This is of equal importance for the junior engineers too, to gain a deep understanding of the fundamental principles of the trade to reap full benefits of the technologies. Therefore, universities and education strategies play a central role in the long-term adaptability and competence among the industry. The need for multi-disciplinary professionals is only increasing, which necessitates an adapted course of action in educational tactics and programs. This is crucial for all, not only to earn financial benefits, but also to share the outlook to run environmentally friendly and sustainable operations for generations to come.

6 In Closing

The journey of Aitik is a leading example for the industry to achieve high performance and sustainable operations. The single most important lesson from Aitik is that efficiency is a result of iterative evaluations and improvements, rather than a short-term goal. Besides, the technology can only be successful if integrated at the right time, accompanied by continuous training for all employees. The Aitik of today is reaping the benefits of several decades of continuous evaluation and planning, as well as an agile and progressive attitude towards technology and educational needs that come with it. The agility of the operation not only enables new technologies to be implemented, but also contributes to advancing technology together with the tech providers. Finally yet importantly, the current state of the industry requires professionals who are literate in many facets of technology, which in turn necessitates our education and training systems to adapt to the needs of the times. Universities have to make sure educational programs are adapted to the needs of the industry and industry ought to provide continuous on-the-job training. Training professionals who are as competent as they are broad-minded and creative is a heavy responsibility that both industry and universities shoulder.

After all, safe, efficient and green mining operations are not far from reach. We can all contribute to it by being open to change and making incremental improvements while sharing a clear vision of abundance with the least possible damage to mother earth.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Kabwe & Yiming: Analysis of copper's market and price-focus on the last decade's change and its future trend. *Journal of Scientific & Technology Research* 4–10, 2015.
- (2) West, J.: Decreasing Metal Ore Grades. *Journal of Industrial Ecology* 15(2): pp. 165–168, 2011.
- (3) Wood Mackenzie: Metals cost benchmarking, 2017.
- (4) Beyglou, A.; Schunnesson, H.; Johansson, D.: Adjusting initiation direction to domains of rock mass discontinuities in Aitik Open Pit Mine. In: 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting: Fragblast 11, 2015, pp. 385–391.
- (5) Beyglou, A.; Johansson, D.; Schunnesson, H.: Target fragmentation for efficient loading and crushing – the Aitik case. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* [online]. 2017, vol.117, n.11, pp.1053–1062. ISSN 2411-9717.

Es lohnt sich zu fragen, wie die leitenden Angestellten Drohnen und Laserscanner benutzen, während sie vor 50 Jahren ähnliche Aufgaben ohne GPS-Navigation oder gar Computer erledigt haben. Dies ist auch für die Nachwuchingenieure von Bedeutung, um ein tiefes Verständnis für die Grundprinzipien des Handwerks zu erlangen, um erst dadurch den vollen Nutzen aus den Technologien ziehen zu können. Daher spielen Universitäten und Bildungsstrategien eine zentrale Rolle für die langfristige Anpassungsfähigkeit und Kompetenz der Industrie. Der Bedarf an multidisziplinären Fachkräften nimmt stetig zu, was eine Anpassung der pädagogischen Vorgehensweise und der Studienprogramme erfordert. Dies ist für alle von entscheidender Bedeutung, nicht nur, um finanzielle Vorteile zu erzielen, sondern auch, um die nachfolgenden Generationen für die Möglichkeit eines umweltfreundlichen und nachhaltigen Bergbaus zu sensibilisieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Geschichte von Aitik ist ein typisches Beispiel dafür, wie die Bergbaubranche leistungsstarke und nachhaltige Produktionsabläufe realisieren kann. Die wichtigste Lektion aus Aitik ist, dass eine Verbesserung der Effizienz das Ergebnis iterativer Bewertungen und Verbesserungen ist und nicht ein kurzfristiges Ziel. Außerdem kann die Technologie nur erfolgreich sein, wenn sie zum richtigen Zeitpunkt integriert und von einer kontinuierlichen Schulung aller Mitarbeiter begleitet wird. Die Aitik von heute profitiert von mehreren Jahrzehnten kontinuierlicher Evaluierung und Planung sowie einer agilen und fortschrittlichen Einstellung zu Technologie und dem sich daraus ergebenden Aus- und Weiterbildungsbedarf. Die Agilität des Betriebs ermöglicht nicht nur die Implementierung neuer Technologien, sondern trägt auch dazu bei, gemeinsam mit den Technologieanbietern die Technologie voranzutreiben. Schließlich, aber dennoch essentiell wichtig, erfordert der aktuelle Stand der Branche Fachleute, die in vielen Bereichen der Technik versiert sind, was wiederum eine Anpassung unserer Aus- und Weiterbildungssysteme an die Bedürfnisse der Zeit erfordert. Einerseits muss durch die Universitäten sichergestellt sein, dass die Absolventen bestmögliche auf die Bedürfnisse der Industrie vorbereitet werden, andererseits sollte die Industrie kontinuierliche Weiterbildung und Trainings am Arbeitsplatz vorsehen. Die Ausbildung von Fachkräften, die ebenso kompetent wie vielseitig und kreativ sind, ist eine große Verantwortung, die sowohl die Industrie als auch die Universitäten übernehmen.

Schließlich ist der sichere, effiziente und umweltfreundliche Abbau durchaus greifbar. Wir alle können dazu beitragen, indem wir offen für Veränderungen sind und schrittweise Verbesserungen vornehmen und gleichzeitig eine klare Vision von Wohlstand mit möglichst geringem Schaden für unseren Planeten haben.

Authors / Autoren

Ali H. Beyglou, Boliden Mineral AB, Stockholm/Sweden and Luleå University of Technology, Luleå/Sweden, Aarti-Mona Sörensen M. A. and Univ.-Prof. Dr.-Ing. Elisabeth Clausen, RWTH Aachen University, Aachen/Germany, Prof. Dr.-Ing. Håkan Schunnesson, Luleå University of Technology, Luleå/Sweden