

# Advantages and Applications of Rail Haulage Systems in Underground Hard Rock Mining Operations

In the past twenty years, substantial efforts have been made to introduce improvements to rail haulage systems and to catch up with the advantages of the other methods of haulage and conveyance in underground hard rock mining operations. Modern high performance rail haulage systems eliminate the historical disadvantages and have been able to take over the 'number-one' position with regard to productivity, reliability, servicing and maintenance. Together with the global trend of going underground using bulk mining methods within hard rock mining this leads to an increasing usage of rail haulage systems.

With regard to the choice of the most suitable haulage system it is necessary to analyze the advantages and disadvantages dependent on defined background conditions as well as to assess their economic influences and their 'weighting' within the overall context of mining operations. Therefore, an evaluation tool has been developed to identify the cost drivers of the various haulage systems through which especially the advantages but also the reduction of possible disadvantages of rail haulage for underground mining operation can be made transparent.

## Vorteile und Einsatzmöglichkeiten von Zugfördersystemen im untertägigen Erzbergbau

Im Bereich der Zugfördersysteme hat in den vergangenen zwanzig Jahren eine starke Aufholjagd begonnen. Mit den heute eingesetzten Systemen konnten die Nachteile der Vergangenheit nicht nur eliminiert, sondern gegenüber allen anderen Fördersystemen gerade in Punkto Produktivität und Wartung die Spitzenposition eingenommen werden. Gemeinsam mit dem anhaltenden Trend zum untertägigen Erzbergbau führt dies dazu, dass sich Züge als Fördersystem mehr und mehr durchsetzen.

Im Hinblick auf die Auswahl des geeigneten Fördersystems gilt es, die je nach Einsatzfall unterschiedlichen Vor- und Nachteile zu analysieren und deren wirtschaftlichen Einfluss auf das gesamte Abbausystem zu bewerten. Hierzu wurde ein Modell zur Identifikation relevanter Kostentreiber entwickelt, durch welches gerade die Vorteile und auch die Möglichkeiten zur Reduzierung potentieller Nachteile von Zugfördersystemen transparent gemacht werden können.

### 1 Haulage systems for underground hard rock mining

The ongoing development of large scale bulk mining activities in underground hard rock mining brings the loading and haulage systems into question which require improvement, as these frequently represent the bottlenecks in the mining process. Innovative problem solutions attempt to address the need for a synchronization of the mining process chain: Extraction, loading and haulage of ore. It is especially the haulage which occupies a major role. Current techniques are continually being reviewed because these take up between 15 and 30 percent of the overall capital investment in a mine and an ever more significant part of the production costs (1).

In recent decades, the increase in production by bulk mining methods has led to more and more progress in extraction techniques which also in turn has led to significant advances in materials handling. Whilst, during the seventies, ore haulage was

### 1 Fördersysteme im Untertage-Erzbergbau

Die stetige Weiterentwicklung von Abbauverfahren im untertägigen Erzbergbau bringt die nachgeschalteten Lade- und Fördersysteme – häufig die Engstellen im Abbauprozess – in Zugzwang. Mit innovativen Lösungen wird versucht, dem Wunsch nach Abstimmung von Lösen, Laden und Fördern nachzukommen. Gerade das Fördern nimmt dabei eine entscheidende Rolle ein: Mit einem Anteil zwischen 15 und 30 Prozent der Gesamtinvestitionen eines Bergwerks (1) und einem signifikant steigenden Anteil an den Gewinnungskosten müssen aktuelle Techniken immer wieder auf den Prüfstand gestellt werden.

In den vergangenen Jahrzehnten führten die Produktivitätssteigerungen in der Gewinnung immer wieder auch zu Technologiesprüngen bei der Förderung, die eine deutliche Steigerung des Fördervolumens nach sich zogen. Während bis in die frühen Siebziger Jahre die Förderung fast ausschließlich durch Züge erfolgte,

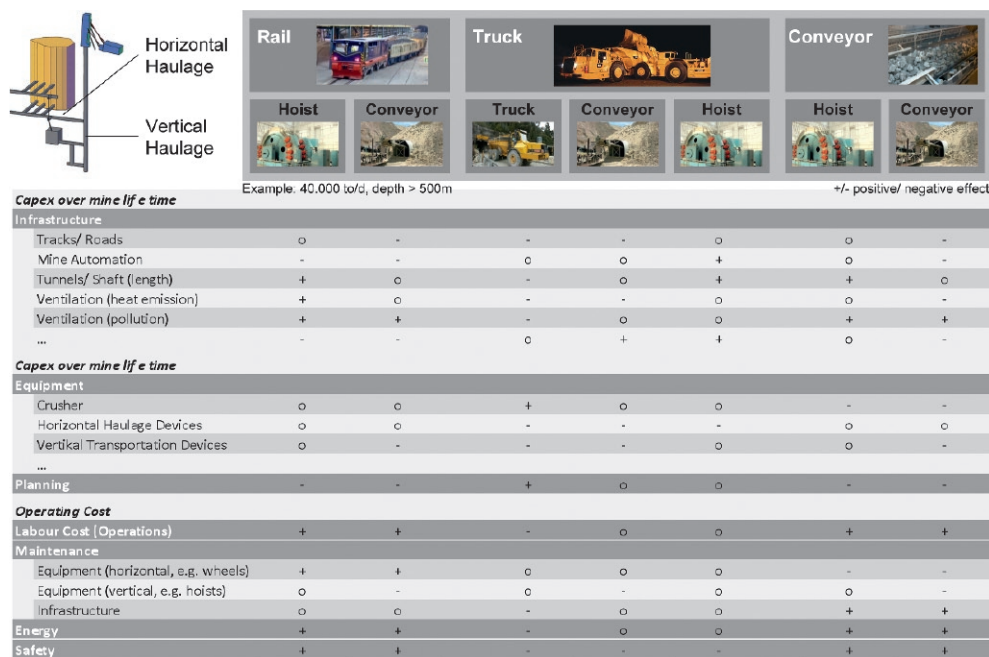


Fig. 1. Qualitative evaluation of possible haulage combinations

Bild 1. Qualitative Bewertung möglicher Transportsystem-Kombinationen

almost always carried out with rail haulage systems, the method has as a result of technological progress been practically superseded. Progress in decline access has enabled the use of alternative systems of haulage, such as underground haul trucks and conveyor belts.

The use of haul trucks has meant that the risk in the absence of parallel backup for and the susceptibility to disruption of rail haulage systems have been reduced. Even the cost of servicing and maintenance of an electrically driven DC locomotive has not proved any great advantage over the use of diesel engine driven haul trucks. In addition, production processes with haul trucks have an advantage over the service life of mining operations because of the ease in which operations can be scaled up or down. It is much easier to react more flexibly to ever changing background conditions by adding or removing trucks. Energy and environmental conservation aspects have however been neglected.

Conveyor belts have also been able to gain more market share with the development of stronger and more cut resistant belt coatings, but the conveyor has the same issues of flexibility as rail haulage. In coal mining, however, this has been different. The increasing reliability and the advantage of continuous transportation away from the face has led to the situation where trains have practically been superseded everywhere by conveyor belts for the extraction of coal.

Nevertheless, the use of trains for underground haulage systems has not been entirely superseded – especially in the North and South Americas as well as in South Africa, where rail track systems and trains remain a seriously considered alternative. With the technological development of rail haulage systems in recent years (high degrees of automation in conjunction with modern electrical AC-drives), haulage with trains has again gained significance, not only from the technological point of view but also from the business and economic aspects (2).

wurden diese in der Folge fast vollständig verdrängt. Fortschritte beim Auffahren von Strecken ermöglichten den Einsatz von alternativen Fördersystemen wie Muldenkipper und Förderbänder.

Mit dem Einsatz von automobiler Fördertechnik konnte das Ausfallrisiko gegenüber den nicht redundanten und störungsanfälligen schienengebundenen Fördersystemen reduziert werden. Auch hinsichtlich der Wartung boten die mit DC-Antrieben ausgestatteten Lokomotiven keinen Vorteil gegenüber diesel-betriebenen Muldenkippern. Durch die Verwendung von automobiler Fördertechnik kann auf variable Rahmenbedingungen sehr flexibel reagiert werden, indem die Anzahl der Transporteinheiten variiert wird. Energetische Betrachtungen und auch der Umweltschutz standen hingegen weniger im Fokus.

Auch die Bandfördertechnik konnte Marktanteile hinzugewinnen. Im Vergleich zur automobilen Fördertechnik jedoch deutlich weniger – nicht zuletzt begründet in dem stark abrasiven Verhalten des Erzes. Anders hingegen im Kohlenbergbau. Die steigende Zuverlässigkeit und der Vorteil des kontinuierlichen Abtransports führten hier dazu, dass Züge für die Förderung der Kohle fast vollständig durch Förderbänder ersetzt wurden.

Dennoch wurden Züge als Fördersystem nie vollständig verdrängt. Gerade in Nord- und Südamerika sowie in Südafrika blieben sie weiterhin eine ernstzunehmende Alternative. Mit der kontinuierlichen technologischen Weiterentwicklung der Zugsysteme in den letzten Jahren (hohe Automation in Kombination mit modernen AC-Antrieben) hat die Förderung mit Zügen nicht nur technologisch sondern auch wirtschaftlich wieder deutlich an Bedeutung gewonnen (2).

Im Rahmen des untertägigen Erzbergbaus kommen damit heute eine Reihe unterschiedlicher Fördersysteme zur Anwendung (Bild 1). Mit dem Fokus auf die Bruchbauverfahren Teilsohlen- oder Blockbruchbau, bei denen große Volumina an Fördergut transportiert werden müssen, kann die Förderkette in zwei Teilssegmente untergliedert werden: Die horizontale Förderung auf

Within the scope of underground hard rock mining, a number of common haulage systems are being employed (Figure 1). With increasing focus on long-hole open stoping, sub-level caving and block caving, where large volumes of mined material are to be moved, haulage can be divided into two segments: horizontal haulage from the underground draw point level, and the vertical haulage from the underground collection/deposit site to the surface processing plant and equipment above ground.

Horizontal haulage is carried out using one or two of three haulage systems: In bulk mining applications such as block cave mines the ore on the extraction level is passed to the haulage level through vertical ore passes. The ore is moved from the draw point to the ore passes using a 'load-haul-dump' machine (LHD). Loading is undertaken at the bottom of the ore pass onto trains, haul trucks or conveyor belts. In the case of truck haulage application, there is also the alternative of a combined extraction and haulage level with a single-step LHD to truck haulage chain. This is common with sub-level caving systems. The haulage is then undertaken to a transfer station for the vertical haulage, i.e. from underground to surface out of the mining area.

For vertical haulage purposes, there are also three different methods available: Haulage by haul trucks through a decline roadway, haulage via conveyor belts and haulage via haulage shafts. Unfortunately, such methods cannot be easily combined with the previously described horizontal haulage systems.

In the case of horizontal rail haulage systems, the vertical haulage can, after transitional unloading/reloading, be undertaken through haulage shafts or by conveyor belts in a declined shaft, at a gradient smaller than 1:3. Both systems require primary crushing of the ore before loading. As the ore has to be crushed for the horizontal haulage with conveyor belts at the ore pass loading point between the extraction and the haulage level, both processes are applicable. Haul trucks are commonly used to haul ore from the production face to the surface but depth and haulage volume are constraining factors which raise the cost.

On the one hand, the underlying morphology should serve for a relative comparison of a variety of combinations of horizontal and vertical haulage (see next chapter). On the other hand, it should serve as a basis for an economic and performance modelling of different haulage scenarios (see subsequent chapter). The results of such a model thus represent the cost drivers of the various haulage systems and their influence on the overall mining operations. Moreover, they provide trend statements on the advantages of certain haulage systems dependent of pre-defined background conditions, such as for example the targeted daily production, the characteristics and the position of the ore body, and the anticipated life of the mine. The last two chapters then investigate and present more closely the advantages and the reduction of the potential disadvantages of a rail haulage system in particular.

## **2 Advantages and disadvantages of existing haulage systems**

The underground haulage systems described in the first chapter indicate a variety of advantages and disadvantages upon closer examination, dependent on the particular application in question (Figure 1). This has also an influence on the various suitabilities in specific cases of application. The aim of this chapter is there-

der untertägigen Abbauebene und die vertikale Förderung vom untertägigen Füllort hinauf zu den übertägigen Anlagen.

Die horizontale Förderung kann prinzipiell durch drei Fördersysteme realisiert werden. Insbesondere bei den Abbauverfahren Teilsohlenpfeiler- und Blockbruchbau werden häufig sowohl eine Gewinnungssohle als auch ein Fördersohle aufgeföhren, die durch ein Rollloch miteinander verbunden sind. Das Gestein wird durch Fahrlader in die Rolllöcher verstürzt, an deren unteren Enden die Beladung sowohl auf Züge, Muldenkipper oder Förderbänder erfolgt. Im Falle der automobilen Förderung können alternativ die Gewinnungs- und Fördersohle zusammenfallen, sofern der Muldenkipper unmittelbar durch den Fahrlader beladen wird. Der Transport führt dann direkt zum Füllort.

Bei der vertikalen Förderung gibt es ebenfalls drei unterschiedliche Förderkonzepte: Die Förderung mittels automobiler Förderung oder Bandanlagen über einen tonnlägigen Schacht und die Förderung mittels Schachtfördertechnik über seigere Schächte. Dabei sind diese Prinzipien jedoch nicht frei kombinierbar mit den zuvor dargestellten horizontalen Fördersystemen.

Im Falle eines horizontalen Zugfördersystems kann die vertikale Förderung nach über Tage einerseits durch Schachtfördertechnik und andererseits auch mit Förderbändern in Schrägschächten erfolgen – beides jeweils mit vorgelagerten Brechereinheiten. Da das Gestein für die horizontale Förderung mit Förderbändern bereits beim Übergang von der Gewinnungs- auf die Fördersohle gebrochen werden muss, kommen diese beiden Verfahren ebenfalls hierfür in Frage. Während diese beiden vertikalen Fördersysteme auch im Falle einer horizontalen Förderung mittels Muldenkipper vorstellbar sind, eignet sich die automobilen Fördertechnik auch zur vertikalen Förderung und stellt damit die dritte vertikale Förderalternative dar.

Diese grundlegende Morphologie soll im Weiteren dazu dienen, die unterschiedlichen Kombinationen aus horizontaler und vertikaler Förderung einerseits relativ zueinander zu vergleichen (Kapitel 2); andererseits dient sie als Basis für ein Modell zur Wirtschaftlichkeitsberechnung (Kapitel 3). Ergebnis dieses Modells sind die Kostentreiber der verschiedenen Fördersysteme und deren Einfluss auf das Gesamtsystem sowie Trendaussagen bezüglich der Vorteilhaftigkeit bestimmter Fördersystemkombinationen in Abhängigkeit definierter Rahmenbedingungen, wie z. B. der angestrebten Tagesförderung, der Beschaffenheit und Lage der Lagerstätte und der Lebensdauer des Bergwerks. In Kapitel 4 sollen hierzu insbesondere die Vorteile sowie die Reduzierung potentieller Nachteile der Zugfördertechnik näher untersucht und vorgestellt werden.

## **2 Vor- und Nachteile bestehender Fördersysteme**

Die in Kapitel 1 vorgestellten und im untertägigen Erzbergbau eingesetzten Fördersysteme (Bild 1) weisen bei näherer Betrachtung je nach Einsatzfall unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. Dies hat wiederum Einfluss auf die jeweilige Eignung im konkreten Anwendungsfall. Zielsetzung dieses Kapitels ist daher die qualitative Gegenüberstellung der Fördersysteme. Hierauf aufbauend kann dann mittels des in Kapitel 3 vorgestellten Bewertungstools der wirtschaftliche Einfluss dieser Vor- und Nachteile und damit deren Gewichtung im Gesamtkontext eines Abbauprozesses erfolgen.



Fig. 2. Example of Schalke's full automated rail haulage system at LKAB  
Bild 2. Beispiel des vollautomatischen Schalke-Zugfördersystems bei LKAB

fore to give a qualitative comparison of the variety of haulage systems. On this basis, the evaluation tool described in the next chapter provides an indication of the economic influence of the advantages and disadvantages and their 'weighting' within the overall context of mining operations.

## 2.1 Rail haulage

In the past twenty years, significant efforts have been made to introduce improvements to catch up on the advantages of the other methods of haulage and conveyance. The current available systems eliminate the previous disadvantages (among other things, low reliability and a high degree of expenditure on servicing and maintenance of electrical DC-technology), and have been able progressively to take over the 'number-one' position in regard of productivity, servicing and maintenance (2). The state-of-the-art AC-electrical technology based systems (Figure 2) have demonstrated extremely low expenditures on servicing and maintenance routines, which in combination with a long service life is particularly advantageous for mine working operations with a long-term business horizon (3). In addition, the train haulage systems take greater consideration of safety and ecological environment regulations for example with zero emissions, fully automated driverless operation and low operating energy consumption (3). On the other hand, this is offset by the high initial capital investment costs (Capex) which poses an important expenditure position.

With vertical haulage being limited to either a hoisting system or a declined shaft system with conveyor belts, the advantages of a horizontal rail haulage system become apparent particularly for large daily production volumes. Economies of scale start taking effect with a certain basic volume of material to be hauled. Technologically speaking, the principal disadvantages of the rail haulage systems are their interrupted/ intermittent operation and the limited gradability. The other common complaint, that rail haulage systems are inflexible, can now be largely discounted (see last two chapters). The technological advantages are the fact, that run-of-mine material can be transported without difficulty, curves in the system are possible and above all, large distances can be covered quickly and with very few staff requirements.

## 2.2 Truck haulage

In truck haulage systems, a general differentiation can be made between diesel engined and electric powered haul trucks. The electric powered haul trucks have not yet become adopted in

## 2.1 Zugförderung

Im Bereich der Zugfördersysteme hat in den vergangenen zwanzig Jahren eine starke Aufholjagd begonnen. Mit den heute eingesetzten Systemen konnten die Nachteile von damals (u.a. niedrige Zuverlässigkeit und hoher Wartungsaufwand der DC-Technologie) nicht nur eliminiert, sondern gegenüber allen anderen Fördersystemen hinsichtlich Produktivität und Wartung die Spitzenposition eingenommen werden (2). Die neuen, auf AC-Technologie basierenden Systeme weisen damit extrem niedrige Wartungs- und Instandhaltungskosten auf, was sich in Kombination mit langen Laufzeiten insbesondere für Bergwerke mit längerfristigem Horizont als sehr vorteilhaft erweist (3). Darüber hinaus trägt die Gleisfördertechnik den immer strengeren Sicherheits- und Umweltvorschriften Rechnung. Mit Null-Emissionen, der Möglichkeit zur fahrerlosen Vollautomation und dem niedrigen Energieverbrauch kann gerade hier gepunktet werden. Dem stehen allerdings hohe Investitionskosten (Capex) und ein nicht zu unterschätzender Planungsaufwand gegenüber.

Durch die Restriktion, die vertikale Förderung entweder mittels Schachtfördertechnik (Seigerschacht) oder Bandanlagen (tonnlägiger Schacht) durchzuführen, kommen die Vorteile der Zugfördersysteme vornehmlich bei größeren Tagesproduktionen zum Tragen. Entsprechend fängt auch die Skalierung erst bei einer hohen Grundfördermenge an. Nachteilig wirken sich die diskontinuierliche Förderweise und die geringe Steigfähigkeit der Lokomotiven aus. Dem häufig noch vorherrschenden Vorurteil, Zugfördersysteme seien unflexibel, kann in weiten Teilen widersprochen werden (siehe Kapitel 4). Technologische Vorteile bestehen darin, dass Kurven in der Streckenführung möglich sind und grobes Haufwerk problemlos und vor allem über längere Distanzen gefördert werden kann.

## 2.2 Automobile Förderung

Bei der automobilen Fördertechnik kann generell zwischen diesel- und elektro-betriebenen Transporteinheiten unterschieden werden, wohingegen die elektro-angetriebenen Systeme sich noch nicht flächendeckend durchgesetzt haben (4). Gründe hierfür sind nicht zuletzt die hohen Anforderungen an die Infrastruktur (5) und die Tatsache, dass auch ein höherer realisierter Automatisierungsgrad weiterhin Personal erfordert. Entsprechend soll im Weiteren auf etablierte diesel-angetriebene Systeme eingegangen werden.

Die betriebliche Verfügbarkeit von Fördersystemen mit Dieseltrucks beträgt aufgrund der Wartungsanforderungen und der Tatsache, dass sie einen Fahrer benötigen, maximal 85%. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Zugfördersystemen weisen sie jedoch eine gute Skalierbarkeit und damit die Möglichkeit zum Einsatz auch bei sehr kleinen Tagesproduktionsmengen auf. Dieses System ist damit auch sehr vorteilhaft für kurze Laufzeiten von Bergwerken, nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund, dass die Lebensdauer von Muldenkippern zwischen fünf und sieben Jahren liegt. Der Vorteil der guten Skalierbarkeit wirkt sich jedoch zugleich nachteilig bei steigenden Produktionsmengen aus; denn je mehr Transporteinheiten eingesetzt werden müssen, desto größer der Logistik- und Koordinationsaufwand. Einhergehend hiermit treten vor allem Zielkonflikte in den Bereichen Arbeitssicherheit und Umweltschutz auf. Mit steigender Anzahl an einge-

many mines (4). The reason for this is that they are expensive compared to a diesel truck, require catenary, concrete roads, have medium capacity (only 30 – 50 tons) (5) as well as the fact, that in spite of a higher potential degree of automation, drivers are still required. Therefore, greater focus is thus placed on the established diesel engine haulage system.

The operational availability of diesel engine truck haulage systems is maximum 85 % due to maintenance requirements and the fact that they have a driver. Utilization does not often exceed 65% because of the dynamics of the truck haulage system with waiting time for loading, passing and the fact that the drivers are human. In contrast to the previously described rail haulage system, diesel engine haul truck systems can be easily scaled depending on the production volume and thus prove advantageous for employment under conditions of very small to medium daily extraction volumes. Such a system is recommended thus mainly for mines with short time periods of useful life, and not least because the useful service life of a haul truck is around 30,000 operating hours. The advantage of truck fleet flexibility has also disadvantages in cases of increasing volumes, because the more haul trucks required, the greater the expenditure on logistics and coordination. There are also inherent target conflicts in the form of workplace safety and ecological environment conservation. With greater number of haul trucks used the expenditure on workplace safety rises more than proportionally.

Because of the large workforce requirement, haulage by truck has disadvantages in comparison with rail haulage and conveyor belt systems. The consumption of fossil fuels and the associated emissions counteract recent efforts and success in underground health and safety – besides that they do not only harbor difficulties with the ecological environment and sustainable development but also have economical drawbacks. The long-term aspects of oil-price increases and high expenditures on underground ventilation lead to higher production costs, quite apart from the increased labor costs – while future mining operations take place in more and more isolated fly-in-and-out areas. From a technological perspective, however, diesel engine haul trucks offer a maximum in flexibility.

Apart from exploitation over a time scale of varying loading and unloading stations, underground inclines of 15% can be handled and curves can be built into the underground roadways. Beyond such, however, considering horizontal haulage, combining extraction and haulage levels is possible where haul trucks can be directly loaded within 'LHD' systems. Analogous to rail haulage, there are no real restrictions as regards the broken size of the ore-bearing hard rock material, so that even in cases of vertical haulage with trucks, no transition stations or crushers need to be installed below the surface. Nevertheless one disadvantage is the fact that diesel fuel needs to be taken and stored underground. In cases of deeper mining operations, the Capex advantage of declines turns into a disadvantage in comparison with vertical shafts.

### 2.3 Conveyor-belt haulage

Haulage by conveyor belt places clear demands upon the type and broken size of the extracted ore-bearing hard rock material being hauled. As a rule, the ore from the draw point is generally too coarse for conveyance by conveyor belt and needs to

setzen Muldenkippern steigt der Aufwand für Arbeitssicherheit überproportional. Aufgrund des hohen Personaleinsatzes ist die automobilen Förderung hierbei zudem benachteiligt gegenüber Zugfördersystemen und Förderbändern. Der Verbrauch fossiler Energieträger wirkt sich sowohl hinsichtlich der Nachhaltigkeit und Umwelt als auch wirtschaftlich negativ auf das Gesamtkonzept aus. Auf lange Sicht steigende Ölpreise sowie hohe Aufwendungen für Bewetterung (Energiekosten) führen neben den Personalkosten zu hohen Produktionskosten. Technologisch hingegen bietet die diesel-betriebene automobilen Förderung das maximale Maß an Flexibilität: Neben der Nutzung variierender Förderbezugspunkte sind Steigungen von bis zu 15% und Kurven in der Streckenführung möglich. Darüber hinaus ist mit Blick auf die untertägige Förderung eine Kombination von Gewinnungs- und Fördersohle möglich, indem die Muldenkipper direkt durch die Fahrlader beladen werden. Analog zur Zugförderung bestehen auch bei der automobilen Förderung keine Restriktionen bezüglich der Gesteinskörnung, so dass im Falle einer ebenfalls durch Muldenkipper durchgeführten vertikalen Förderung weder Übergabepunkte noch Brecher unter Tage installiert werden müssen. Nachteilig wirkt sich der logistische Aufwand für die Treibstoffversorgung aus. Der Kraftstoff muss nach unter Tage verbracht werden. Besonders bei steigender Teufe beeinflusst dies negativ die Betriebskosten eines Schrägschachts gegenüber denen eines Seigerschachts.

### 2.3 Bandförderung

Die Förderung mittels Bandanlagen stellt klare Bedingungen an die Art und Größe des Haufwerks. In der Regel ist das gesprengte Haufwerk zu grobstückig für die Förderung mit Förderbändern und muss zuvor zerkleinert werden. Entsprechend sind an jeder Aufgabestation Brecher nötig.

Der sich hieraus ergebende hohe Bedarf an zusätzlichen Investitionen für die Brechanlagen führt zu einem deutlichen Nachteil gegenüber der Zug- und automobilen Fördertechnik. Zusätzlich muss das abrasive Verhalten des Förderguts in Betracht gezogen werden. Auch wenn die Komponenten und Materialeigenschaften neuerer Bänder deutlich verbessert werden konnten, so wirkt sich der Verschleiß der Bandgurte stark auf die Betriebskosten aus.

Die hohe Förderkapazität der Bandanlagen wirkt sich positiv auf die Förderkosten aus, die besonders durch die hohen Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten beeinflusst werden. Analog hierzu ist mit hohen Förderkosten bei kleinen Bergwerken zu rechnen. Bezüglich aktueller Umweltschutzanforderungen sind Bandanlagen neben Zugfördersystemen positiv hervorzuheben: Null Emission bei einer hohen elektrischen Energieeffizienz. Der hohe Automatisierungsgrad von Bandanlagen wirkt sich durch einen mannslosen Betrieb positiv auf die Arbeitssicherheit des Bergwerks aus. Der hohen Brandgefahr durch viele Antriebe und Wärmeentwicklung der Bandrollen muss mit geeigneten Schutz- und Präventionsmaßnahmen entgegengewirkt werden. Technologisch ist die Förderung mit Förderbändern aktuell das einzige etablierte kontinuierliche Verfahren und kommt damit den Bestrebungen nach kontinuierlichen Abbauverfahren nach. Durch die Steigfähigkeit von bis zu 20% eignet sich die Bandfördertechnik, analog zur automobilen Fördertechnik, so-

be crushed to approximately -100 mm prior to loading. Crushing equipment is therefore set up at the bottom of the ore pass at each loading station. The resulting high requirement for crushers therefore leads to a significant disadvantage in comparison with rail and truck haulage systems where only a few large crushers are needed at the central unloading stations.

Independent thereof, the abrasive nature of the ore material has to be taken into the economic calculation. Even if the construction components and the material characteristics of new conveyor belts have essentially been improved, the ongoing reduction of wear-and-tear through abrasion represents a continuous challenge on the engineering.

The great advantage of conveyor belt systems is, however, to be seen in the possibility of the great volume of material it can move. In this regard, the high capital investment costs for the system as well as the not to be underestimated expenditure on control, servicing and maintenance routines can be spread over the volume of tons conveyed in an ever reducing cost/ performance ratio. But this advantage also represents a disadvantage in mine workings with usually relative low daily production volumes.

As far as the aspect of current ecological environment conservation regulations is concerned, conveyor belt systems are equally as viable as rail haulage systems: zero emissions coupled with electrical energy efficiency. As far as labor safety is concerned, the positive effect of unattended/ unmanned operations is countered by the fire hazard emanating from the many continuously running electrical motor drives and rollers required in a conveyor belt system.

wohl für die untertägige horizontale als auch die vertikale Förderung. Die Streckenführung ist durch die geringe Kurvengängigkeit der Bandanlagen sehr unflexibel. Richtungsänderungen sind nur durch gesonderte Übergabestationen möglich. Damit sinkt die Einsatzfähigkeit der Bandanlagen mit zunehmender Teufe.

#### **2.4 Schachtförderung**

Die vertikale Schachtförderung ist sowohl in seigerer Richtung als auch bei steil abfallender Horizontalebene ( $> 1:3$ ) notwendig. Grundvoraussetzung für diese Methode ist eine primäre Brecher- und Ladestation an der Schachthöhe und ein Bunker als Puffervolumen. Dementsprechend gibt es bestimmte Mindestanforderungen an das ausgewählte Gesamtsystem (z.B. Füllort mit Brecheranlage).

Der Hauptnachteil von Förderschächten sind die hohen Investitionsaufwendungen und relativ hohe Wartungskosten. Nur mit einem entsprechend hohen Fördervolumen sind Skalenvorteile zu erreichen und die Förderkosten pro Tonne in einen konkurrenzfähigen Bereich zu senken. Ein direkter Vergleich von seigeren und tonnlägigen Schächten mit Bandfördersystemen hängt von der relativen Teufe des Bergwerks ab. Es gibt jedoch immer noch eine gewisse ökonomische Grenze für die Bergwerksteufe, unterhalb derer der Break-even für die Schachtförderung erreicht ist. Ein ähnlicher Vergleich ist auch mit Muldenkippern möglich. Technisch gesehen stellen Schächte auch eine Form eines unterbrochenen/intermittierenden Transportsystems dar, das verschieden genutzt werden kann. Neben der eigentlichen Erzförderung sind

From the technological aspect, haulage by a conveyor belt system is currently the only established continuously running process, and thus ideally supplements efforts for introducing continuously working extraction routines. The possibility of negotiating inclines of up to 20 % makes a belt conveyor system approach the advantages provided by truck haulage, for achieving horizontal haulage and vertical conveyance without the necessity of underground transitional loading and unloading stations. This advantage, however, must be qualified by the restrictions imposed upon the path. Since no curves are possible, changes of direction have to be enabled by complex and elaborate transition stations. Such a system is extremely inflexible. For this reason, the benefit of the system reduces in cases of many mining operations, and not least because of the inherently increasing complexity and breakdown hazard without a parallel backup system.

## 2.4 Hoisting

Vertical shaft hoisting is common in both vertical plane and steeply dipping (>1:3) horizontal plane operations. The method always requires a primary crushing and loading station at the shaft bottom and a bunker as buffer storage. Accordingly, there are certain minimum requirements placed upon the selected overall system (e.g. transitional unloading and loading stations with crusher equipment), which have been previously described above.

The main disadvantage of shafts is the high capital investment costs and relatively high maintenance costs. Only by means of a corresponding high haulage volume economies of scale can be achieved, and thus the conveyance costs per ton brought into a competitive zone. A direct comparison of vertical and sub-vertical shafts with conveyor belt systems depends on the relative depth of the mine. However, there still exists a certain economic limit of mine-depth, after which the break-even point for haulage through shafts is obtained. A similar comparison is also possible with haul trucks. Technologically, shafts are also an interrupted/intermittent form of transportation system, which can be exploited in a variety of ways. Alongside the actual haulage of the ore, such shafts are also used for safety functions, man riding, services and ventilation purposes.

In comparison there are multiple different haulage systems and technologies available, they all have their well-known pro's and con's and their common main application scenarios. But recent technology improvements initiated a new evaluation of these systems and the rules of thumb in mine haulage planning.

Against the background of the significant improvements in rail haulage technologies and the impressive demonstration of the performance, outstanding reliability and economics in some of the world's largest underground high performance mine operations like LKAB's Kiruna mine and Codelco's Chilean copper operations show, that the benefits of today's state-of-the-art underground rail haulage are back in competition and getting more and more into the focus of upcoming large mining projects.

## 3. Economic Evaluation of Underground Haulage Systems

For the evaluation of applications for rail haulage systems a Microsoft Excel™ based model has been developed which allows for

solche Schächte auch für Sicherheitsfunktionen, Personaltransport, Service- und Bewetterungszwecke zu nutzen.

Im Vergleich gibt es zahlreiche unterschiedliche Fördersysteme und verfügbare Technologien, die alle wohlbekannte Vor- und Nachteile und für sie typische Einsatzbereiche haben. Die jüngsten technologischen Verbesserungen haben jedoch eine Neubewertung dieser Systeme und der Faustregeln bei der Förderungsplanung im Bergbau angestoßen.

Vor dem Hintergrund der bedeutenden Fortschritte in der Zugfördertechnik und herausragenden Wirtschaftlichkeit in einigen der weltweit größten untertägigen Bergbaubetriebe, wie dem LKAB-Bergwerk Kiruna in Schweden und dem Kupferbergbaukomplex von Codelco in Chile, zeigt sich, dass die Nutzung der modernsten Zugfördertechnik bei großen anstehenden Bergbauprojekten zunehmend in den Fokus rückt und diese wieder wettbewerbsfähig macht.

## 3. Ökonomische Bewertung untertägiger Transportsystem

Zur Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von Zugfördersystemen wurde ein Microsoft Excel™ basierendes Modell entwickelt, das in der Lage ist, eine Kostenanalyse verschiedener Transporttechnologien in einem Bergwerk mit großer Fördertonnage (Massenabbauverfahren) durchzuführen. Ein hoher Massentransport ab ca. 5.000 t pro Tag (entspricht ca. 1,7 Mio. t pro Jahr) ist also Voraussetzung zur Anwendung des Modells. Bei der Bergwerksplanung stehen verschiedene Systeme zum untertägigen horizontalen und vertikalen Transport nach über Tage zur Verfügung (vgl. vorangegangene Kapitel). Es gibt eine Vielzahl von Abbauverfahren, aber nur einige wenige eignen sich für sogenannte Massenabbauverfahren in Verbindung mit Zugfördersystemen. Diese sind im Wesentlichen:

- Blockbruchbau,
- Teilsohlenpfeilerbruchbau und
- Weitungsbau.

Die Bewegung solch großer Tonnagen eröffnet den Bergwerksplanern die Möglichkeit, auch andere Alternativen als die standardisierte Förderung mit Muldenkippern in Betracht zu ziehen.

### 3.1 Modellparameter

Bei der Konzeption des Modells wurden folgende Hauptentscheidungskriterien im Hinblick auf das geeignetste Transportsystem betrachtet:

- Aus- und Vorrichtung der Lagerstätte,
- Transportsystem inkl. der benötigten Infrastruktur,
- Anforderungen an die Bewetterung,
- Kosten (Capex, Opex und Total Costs).

Die in das Modell einbezogenen Kosten bestehen aus tatsächlichen Betriebskosten der Bergwerksbetreiber, sowie Angebotskosten von Subunternehmern für spezifische Arbeiten.

#### 3.1.1 Aus- und Vorrichtung

Generell unterscheidet das Modell bei der Ausrichtung vom Tage zwischen dem Schachtzugang und dem Rampenzugang. Die Ausrichtung über einen Schacht bzw. eine Rampe hängt wiederum

cost analysis of different haulage systems in underground bulk mining operations. Bulk haulage for this exercise has been defined as a requirement to move more than 5,000 tons ore per day (1.7mtons ore per year). An initial evaluation identified options of horizontal and vertical haulage available to mine designers which build the necessary elements to be included in the model (see previous chapters). There are many different mining methods but only a few can be performed as bulk mining operations in conjunction with rail haulage systems. These are mainly:

- Block caving,
- Sub-level caving and
- Open stoping methods.

The movement of such large tonnages opens the opportunity of mine planners to consider options apart from the common truck haulage.

### 3.1 Model Parameter

In building the model the main drivers of the decision on the type of transportation were considered. These include:

- Mine development of the orebody;
- Transportation system incl. necessary infrastructure,
- Ventilation requirements;
- Costs (capex, opex and total cost).

The costs included in the model are derived from data received from actual mining costs and quoted costs for the work to be carried out by contractors.

#### 3.1.1 Mine Development

In general, the model differs between shaft and ramp development for the connection to the surface. Shaft or ramp in turn development is depending on the selected transportation system. In case that hoisting is selected as transport to the surface a shaft has to be sunk. Trucks and conveyor belts are operating in a surface ramp. The gradient for truck transportation is assumed to 1:7 and for conveyor belt to 1:5,5. In the development of a large bulk excavation mine the pre-mining work will take up to 5 years to complete. This equals the productive life of a truck (~ 38,000 hours). If the decision is to continue using haul truck for production haulage, depending on the fleet size, it will require additional ventilation.

Specific excavation requirements are necessary if the mine is planned with rail or conveyor haulage. From the pre-feasibility stage the need for large amounts of additional excavation can be eliminated or significantly reduced. Conveying works best with long straight roadways and rail haulage with standard gauge requires curves with a radius of not less than 60 meters. A smaller radius can be used for narrower gauge tracks.

#### 3.1.2 Transportation Systems

The model includes the discussed transportation systems of the previous chapters. These are:

- Rail Haulage,
- Truck Haulage,
- Conveyor belt haulage,
- Hoisting.

vom betrachteten Transportsystem ab. Im Fall der Schachtförder-technik muss folgerichtig ein Schacht geteuft werden. Wird von einem Muldenkipper- und Bandanlagentransport ausgegangen, so wählt das Modell automatisch eine Rampe als überträgige Ausrichtungsalternative aus. Beim Muldenkippertransport wird von einer Steigung von 1:7 und beim Bandtransport von einer Steigung von 1:5,5 ausgegangen. Bei der Auffahrung eines Bergwerks mit massenweisem Abbau sind Zeiträume von weit über fünf Jahren bis zur Fertigstellung der Aus- und Vorrichtung durchaus üblich. Das wiederum entspricht der Lebensdauer eines Muldenkippers (~ 38.000 Stunden). Werden im Folgenden Muldenkipper für die Produktionsphase eingesetzt, ist eine ausreichende Wettermenge sicherzustellen.

Wird das Bergwerk mit Zugförderung oder Bandanlagen geplant, sind spezielle Ausrichtungsanforderungen zu beachten. Ab der Vorplanungsphase kann man die Notwendigkeit von zusätzlichen Aus- und Vorrichtungsarbeiten weitgehend ausschließen oder deutlich reduzieren. Bandförderung funktioniert am besten mit langen, gerade verlaufenden Strecken, die Zugförderung mit Normalspur hingegen verlangt Kurven mit einem Radius von nicht weniger als 60 m. Bei Anlagen mit schmalere Spurweite kann ein kleinerer Radius genutzt werden.

#### 3.1.2 Transportsysteme

Wie in den vorgegangenen Kapiteln bereits beschrieben wurde, ermöglicht das Modell die Simulation der folgenden Transportsysteme:

- Zugförderung,
- automobiler Förderung,
- Bandförderung,
- Schachtförderung.

Die Leistungs- und Kostenrechnung der verschiedenen Transportprozesse basiert auf der üblichen Zykluszeitenberechnung inklusive der Maschineneffizienz und des Personalbedarfs. Hierbei können die einzelnen Teilprozesse beliebig miteinander kombiniert werden. Die in Kapitel 1 bereits diskutierten Möglichkeiten wurden folgerichtig auf die Modellierung übertragen. Dazu zählen:

- Zugförderung + Schachtförderung
- Zugförderung + Bandförderung
- Muldenkipper + Muldenkipper
- Muldenkipper + Schachtförderung
- Muldenkipper + Bandförderung
- Bandförderung + Schachtförderung
- Bandförderung + Bandförderung

#### 3.1.3 Bewetterung

Ein großer Kostenfaktor in einem untertägigen Bergwerk ist die Bewetterung. Dies gilt insbesondere für Bergwerke in abgelegenen Regionen mit viel dieselbetriebenem Equipment. Wegen der fehlenden Anbindung der meisten Bergbauprojekte an das öffentliche Stromnetz muss der Strom für Lüfter und Bewetterungsanlagen selbst erzeugt werden. Die weltweit geltenden „Faustformeln“ fordern einen Luftstrom im Grubenraum von 0,063–0,126 m<sup>3</sup>/s pro Kilowatt installierter Leistung der untertägigen Dieselanlagen.



The performance and cost calculations are derived from mining engineering analysis fundamentals including cycle time calculations, equipment efficiencies and personal requirements. Here, any sub-processes can be combined. Chapter 1 already discussed the transportation options which are transferred into the model. These are:

- Rail + Hoist
- Rail + Conveyor
- Truck + Truck
- Truck + Hoist
- Truck + Conveyor
- Conveyor + Hoist
- Conveyor + Conveyor

### 3.1.3 Ventilation

A large cost factor of an underground mine operation is ventilation. This is particularly the case – due to the lack of a power grid connection in most mining projects – where a large number of diesel-powered equipment is used to generate fan and air conditioning power. The statutory requirement around the world is that a mine requires 0.063–0.126 m<sup>3</sup>/sec of airflow for each kilowatt of power of underground diesel equipment.

Where a mine is running 10 haul trucks with 500 kW engines the ventilation requirement is 31.5 m<sup>3</sup>/sec for each haul truck and 315 m<sup>3</sup>/sec for the fleet. This requires a dedicated air intake and fan with an output of greater than 300 m<sup>3</sup>/sec (one vent shaft) and over 1200 kW of electric power to provide.

Ventilation for conveyor and rail haulage is considerably lower as they typically use electric or battery power. Hence, normal mine ventilation for the other mining activities is sufficient. In conveyor operations where the identified risk is frictional ignition the ventilation requirement may be greater than for a rail system. When a diesel locomotive system is used the quantity and power of the engines will be significantly less than a haul truck fleet for a given tonnage hauled.

### 3.1.4 Costs

The largest component of the Capex is the initial purchase of the equipment. The model focused exclusively on the Capex for haulage equipment purchase. Equipment for production (e.g. LHDs as mucking equipment) is not included as they are common to all systems.

Apart from purchase of the equipment the Capex also includes the infrastructure. In the case of rail this includes the track, loading and unloading systems, signaling and communication infrastructure. A conveyor system includes a loading and transfer system from belt to belt plus the drive, control and communications systems. A conveyor will also consist of an extensive monitoring system and fire suppression system.

With both the rail and conveyor haulage the capital spent will tend to be at the beginning of the project whereas a trucking system will have capital spread over the mine life.

The ongoing operating costs of the three mentioned underground haulage systems show a very large cost burden for trucking contrary to significantly lower Opex for conveying and rail systems. Rail haulage offers a very low cost of maintenance per ton hauled, with conveyor Opex at around 3 times the cost of rail and truck haulage over 8 times the Opex of rail per ton hauled.

Betrieht ein Bergwerk zehn Muldenkipper mit jeweils 500 kW Motorleistung, ergibt sich ein Belüftungsbedarf von 31,5 m<sup>3</sup>/s für jede Transporteinheit bzw. 315 m<sup>3</sup>/s für die Flotte. Dafür ist eine spezielle Bewetterungsanlage mit einer Leistung von mehr als 300 m<sup>3</sup>/s (ein Wetterschacht) und mehr als 1.200 kW elektrischer Leistung erforderlich.

Die Bewetterung ist bei Bandförderanlagen und Zugfördersystemen wesentlich geringer, weil sie normalerweise elektrisch betrieben werden. Im Falle von Bandförderanlagen liegen die Anforderungen an die Bewetterung aufgrund des Selbstentzündungsrisikos höher als bei der Zugförderung. Wird ein System mit Diesellokomotiven eingesetzt, ist die Anzahl und Leistung der Motoren für eine vorgegebene beförderte Tonnage signifikant geringer als bei einer Muldenkipper-Flotte.

### 3.1.4 Kosten

Die größte Capex-Komponente ist die Erstbeschaffung der Geräte und Anlagen. Das Modell hat sich ausschließlich auf den Capex für die Beschaffung von Fördergeräten konzentriert. In der Produktion eingesetzte Maschinen (z. B. Fahrlader zum Laden des gesprengten Haufwerks) werden nicht einbezogen, da angenommen wird, dass sie in allen Systemen gleich sind.

Abgesehen von der Beschaffung der Geräte und Anlagen umfasst der Capex auch die Infrastruktur. Im Fall von Zugsystemen gehören dazu die Schienen, die Be- und Entladesysteme, die Signalisierungs- und Kommunikationsinfrastruktur. Ein Bandfördersystem beinhaltet die Beladung und Übergaben von einem Bandförderer zum anderen. Darüber hinaus gehören Antriebs-, Steuerungs- und Kommunikationssysteme sowie ein umfangreiches Überwachungssystem und eine Brandunterdrückungsanlage dazu.

Beim Zugfördersystem und bei der Bandförderanlage erfolgt die Investition tendenziell am Anfang des Projekts, während beim automobilen Systemen die Investitionen über die gesamte Lebensdauer des Bergwerks verteilt sind.

Die laufenden Betriebskosten der drei genannten untertägigen Fördersysteme zeigen eine sehr große Kostenbelastung bei automobilen Systemen und im Gegensatz dazu bedeutend geringere Betriebskosten (Opex) für Band- und Zugfördersysteme. Zugfördersysteme bieten geringe Wartungskosten pro geförderter Tonne, wobei der Opex bei Bandanlagen im Bereich der Zugfördersysteme liegt, und bei Muldenkippertransport der Opex pro geförderter Tonne teilweise mehr als das Achtfache von Zugfördersystemen beträgt.

Die Förderung nach über Tage wird in dem Modell ebenfalls betrachtet. Wie bei der untertägigen Förderung hat die Bewetterung aufgrund der großen Anzahl benötigter Muldenkipper einen großen Einfluss auf die Kosten. Das erforderliche Areal für die Beförderung mit Bandanlagen über Vertikaldistanzen von mehr als 1.000 m schränken deren Verwendung für diese Zwecke ein.

Schachtförderung ist das bei weitem vorherrschende Transportverfahren in großer Teufe. Bei einer Jahresproduktion von weniger als 2,5 Mio. t pro Jahr und einer Teufe von weniger als 600 m bleiben Muldenkippertransport und die Ausrichtung über eine Rampe weiterhin eine bevorzugte Option.

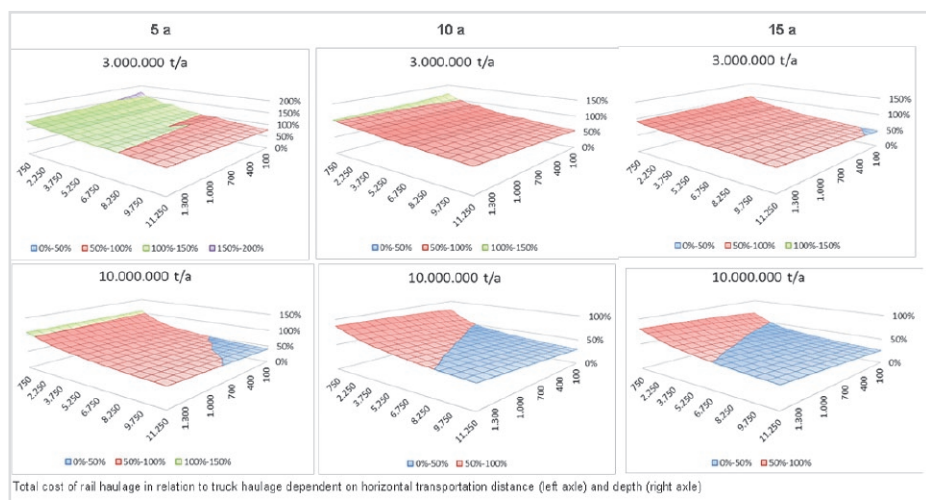


Fig. 3. Influence of Life Time Assumption on Total Cost of Rail and Truck Haulage Systems  
Bild 3. Einfluss der angenommenen Lebensdauer auf die Total Cost von Zug- und Truckfördersystemen

The model includes also surface haulage. As for underground haulage the ventilation requirements for trucking seriously influence the costs. The real estate requirements for conveyor haulage over vertical distances greater than 1,000 meters limit its use for this task.

Hoisting is by far the most prevalent method of deep mining. Where the total tons hauled per year are less than 2.5 million tons and the vertical haul is less than 600 meters trucking is and will remain a preferred option.

### 3.2 Model Outputs

As well as taking account of the operating parameters and restrictions, the evaluation tool also uses as input the cost and performance figures from the relevant databases that are used for modelling the different haulage systems. Within the respective system boundaries it is possible to draw up any number of scenarios allowing the derivation of variables such as Capex, Opex and Total Cost.

The tool is useful in a number of ways – not just in providing support for the planning of underground mining projects but also in helping to identify both the technical and the economic restrictions to the installation of different transport and haulage systems.

Horizontal transportation is one area in particular where there is real potential to be exploited. While truck haulage has so far tended to dominate this field of activity, the tool is able to identify very precisely the particular operating conditions in which train transport systems can offer a viable alternative.

While special circumstances, and hence a huge range of decision drivers, can apply in each individual case, when the tool is being deployed the following parameters have emerged as main factors influencing the decision variables Capex, Opex and Total.

Cost: the inherent advantage of employing rail transport systems will depend primarily on the assumed lifetime of the mine, the annual production figure and the length and operating depth of the horizontal transport circuit.

When variations are applied to the assumed operating life of the mine it becomes clear, especially at low production rates, that train transport installations can only make the most of the advantages they offer when lengthy operating times are involved (Figure 3). The rail transport system, which is characterised by a

### 3.2 Ergebnisse des Modells

Neben der Berücksichtigung der dargestellten Rahmenbedingungen und Restriktionen fließen die zur Modellierung der unterschiedlichen Fördersysteme erforderlichen Kosten- und Performancedaten aus einschlägigen Datenbanken in das entwickelte Tool ein. In den jeweiligen Systemgrenzen lassen sich beliebig viele Szenarien aufstellen und die Größen Capex, Opex und Total Cost ableiten.

Entsprechend groß ist der Nutzen des Tools – nicht nur als Unterstützung zur Planung von untertägigen Bergwerksprojekten, sondern auch, um neben den technischen auch wirtschaftliche Restriktionen für den Einsatz verschiedener Fördersysteme zu identifizieren.

Gerade im Bereich der horizontalen untertägigen Förderung gibt es Potentiale zu heben. Während hier bis dato Muldenkipper dominierten, lassen sich mit Hilfe des Tools sehr genau diejenigen Einsatzbedingungen identifizieren, in denen Zugfördersysteme eine veritable Alternative darstellen.

Obwohl es in jedem konkreten Anwendungsfall spezielle Konstellationen und damit die unterschiedlichsten Entscheidungstreiber geben kann, haben sich in der Nutzung des Tools die folgenden Parameter als Haupttreiber zur Beeinflussung der Entscheidungsgrößen Capex, Opex und Total Cost herauskristallisiert: Die Wirtschaftlichkeit von Zugfördersystemen hängt primär von der angenommenen Lebenszeit, der Jahresproduktionsmenge sowie den Größen horizontale und vertikale Transportlänge ab.

Variiert man die angesetzte Lebensdauer eines Bergwerks, so wird insbesondere bei niedrigen Produktionsraten deutlich, dass Zugfördersysteme erst bei langen Einsatzzeiten ihren Vorteil ausspielen können (Bild 3). Das durch hohe Anfangsinvestitionen (Capex) bei später niedrigen laufenden Kosten (Opex) gekennzeichnete Zugfördersystem kann bei der Betrachtung der Total Cost seine Vorteile nicht ausspielen.

Die Untersuchung zeigt aber auch, dass sich mit steigender Produktionsrate – hier am Beispiel einer Jahresproduktionsmenge von 10 Mio. t dargestellt – der Einfluss der angesetzten Lebensdauer reduziert. Die Betrachtung der Total Cost fällt immer zu Gunsten des Zugfördersystems aus, wobei mit steigender Tiefe und insbesondere mit einem größer werdenden horizontalen Streckennetz der Abstand zur Förderung mit Muldenkippern stetig wächst.

Scenarios		Capex	Opex	Total Cost	
Production per year	1.825.000 t/a	Truck + Truck	85%	185%	119%
Depth	300 m	Truck + Hoist	100%	100%	100%
U/G transp. distance	3.000 m	Rail + Hoist	180%	30%	103%
Life of Mine	10 a	Conv. + Hoist	86%	78%	99%
Distance Factor Truck: 68%					
No Alternative for Horizontal Truck Haulage					
Production per year	3.650.000 t/a	Truck + Truck	105%	289%	180%
Depth	600 m	Truck + Hoist	100%	100%	100%
U/G transp. distance	3.000 m	Rail + Hoist	154%	28%	85%
Life of Mine	10 a	Conv. + Hoist	84%	53%	84%
Production per year	7.300.000 t/a	Truck + Truck	123%	245%	196%
Depth	600 m	Truck + Hoist	100%	100%	100%
U/G transp. distance	3.000 m	Rail + Hoist	138%	20%	50%
Life of Mine	15 a	Conv. + Hoist	80%	36%	63%
Production per year	14.600.000 t/a	Truck + Truck	167%	332%	275%
Depth	1.000 m	Truck + Hoist	100%	100%	100%
U/G transp. distance	5.000 m	Rail + Hoist	118%	23%	45%
Life of Mine	15 a	Conv. + Hoist	73%	30%	51%
Horizontal Rail Haulage becomes a veritable Alternative – especially if Capex can be stretched and reduced					
Production per year	18.250.000 t/a	Truck + Truck	177%	294%	260%
Depth	1.200 m	Truck + Hoist	100%	100%	100%
U/G transp. distance	8.000 m	Rail + Hoist	107%	21%	37%
Life of Mine	15 a	Conv. + Hoist	68%	25%	42%
No Alternative for Horizontal Rail Haulage					

Fig. 4. Capex-/ Opex-Trade-offs for different Haulage Scenarios  
 Bild 4. Capex-/Opex-Trade-offs für verschiedene Förderszenarien

high initial capital expenditure (Capex) followed by low operating costs (Opex), cannot fully exploit its advantages when the total cost is taken into account.

However, the investigation also shows that as production rates rise – in this case the example used is an annual output of 10 million t – the effect of the assumed life expectancy is reduced. The total cost analysis is always tilted in favour of the rail transport system, while as working depths increase and, more particularly, as the horizontal roadway network becomes ever more extended, there is an increasingly widening efficiency gap to the truck haulage method.

An examination of the total cost gives no more than an early indication of the benefits offered by a particular system. At the end of the day it is the interaction between the Capex and Opex that is the key factor for mine operators. The benefits derived on the Opex side of the balance do not necessarily result in a decision in favour of the system with the lowest total cost. The cash-flow situation of the operator also has to be borne in mind, along with the risk associated with up-front investments. This means we inevitably end up with an evaluation of trade-off pairs between Capex and total cost.

Figure 4 illustrates this by way of selected scenarios. Here the focus is on a comparison between the “Truck + Hoist system” and the “Rail + Hoist system”. If scenario 2 (3,650,000 t/a) is compared against scenario 4 (14,600,000 t/a) it can be seen that in both cases rail haulage incurs much lower running costs (Opex) than haulage by truck. The positive impact on the total cost in scenario 2 is much lower than in scenario 4. This is because in scenario 2 the initial investment (Capex) is much higher for the rail transport system than it is for the truck haulage method. The long-term benefit of low total cost is offset by the disadvantage of significantly higher up-front investments. In scenario 4, on the other hand, the total cost (45%) and the Capex (118%) are in reasonable proportion. The higher cash flow burden and associated risk at the start of the project are more than compensated for by the lower Opex in the long term.

As well as being able to analyse and compare different scenarios it is useful for those responsible for planning underground transport and conveying systems to know not just the technical limits but the economic boundaries too, i. e. when would it be economically viable, even at low production levels, to use a rail

Die Betrachtung der Total Cost gibt nur eine erste Indikation der Vorteilhaftigkeit eines Systems wider. Das Zusammenspiel der Größen Capex und Opex ist am Ende für den Bergwerksbetreiber entscheidend. Vorteile aus den Opex führen nicht zwangsläufig zu einer Entscheidung für das System mit den geringsten Total Cost. Es gilt immer auch die Cash-Flow-Situation des Betreibers zu berücksichtigen und das mit Anfangsinvestitionen verbundene Risiko. Damit kommt man zwangsläufig zu einem gegenseitigen Abwägen zwischen Capex und Total Cost.

Bild 4 macht dies anhand ausgewählter Szenarien deutlich. Der Fokus liegt dabei auf dem Vergleich zwischen den Systemen „Muldenkipper + Schacht“ und „Zug + Schacht“. Vergleicht man die Szenarien 2 (3.650.000 t/a) und 4 (14.600.000 t/a), ist zu erkennen, dass die Zugförderung in beiden Fällen deutlich geringere laufende Kosten (Opex) hat als die Förderung mit Muldenkippern. Der positive Einfluss auf die Total Cost in Szenario 2 ist wesentlich niedriger als in Szenario 4. Das liegt daran, dass in Szenario 2 die Anfangsinvestitionen (Capex) in das Zugfördersystem signifikant höher ausfallen als bei einer Förderung mit Muldenkippern. Der langfristige Vorteil von niedrigen Total Cost wird durch den Nachteil erheblich höherer Anfangsinvestitionen überkompensiert. Hingegen stehen in Szenario 4 Total Cost mit 45% und Capex mit 118% in einem vertretbaren Verhältnis. Die höhere Cash Flow-Belastung und das damit verbundene Risiko zu Beginn des Projekts werden durch die langfristig niedrigen Opex mehr als kompensiert.

Neben der Analyse bzw. dem Vergleich unterschiedlicher Szenarien ist es für die Planer untertätiger Fördersysteme interessant zu wissen, wo sich neben technischen auch wirtschaftliche Grenzen auftun, d.h. ab wann beispielsweise auch bei niedrigen Produktionsraten der Einsatz von Zugfördersystemen wirtschaftlich lohnend ist. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen bietet das Tool die Möglichkeit der Sensitivitätsanalyse.

Bild 5 veranschaulicht dies am Beispiel eines Bergwerks mit 7 Mio. t Förderleistung. Im Vergleich stehen die Fördersysteme Zug und Muldenkipper; Bezugsgröße ist die Förderung mit Muldenkipper.

Liegen die Anfangsinvestitionen des Zugfördersystems 30% über denen der Förderung mit Muldenkippern und ist der Vorteil der Total Cost geringer als 50%, kann eine Vorteilhaftigkeit der Zugförderung ausgeschlossen werden. Im konkreten Fall trifft

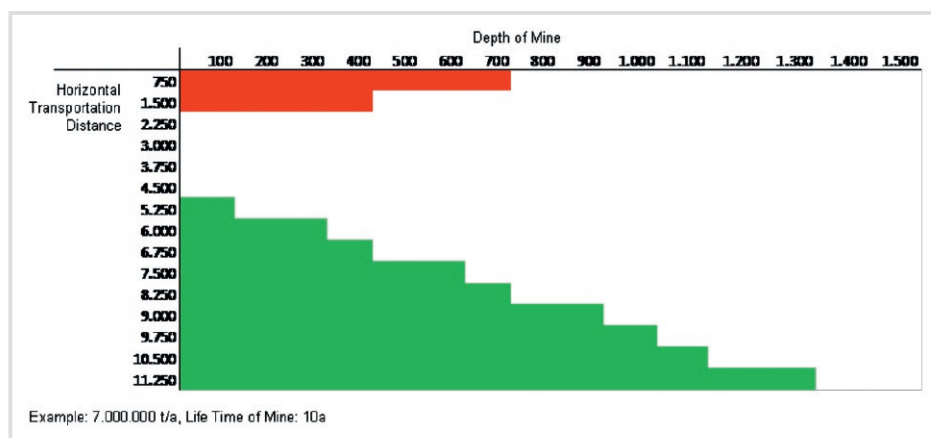


Fig. 5. Capex-/Opex-Trade-offs for different Haulage Scenarios  
Bild 5. Capex-/Opex-Trade-offs für verschiedene Förderszenarien

transport system. The tool has the capacity to undertake a sensitivity analysis in order to find answers to questions of this kind. The example shown in Figure 5 represents a mine with a production rate of 7 million t. A comparison is drawn between rail and truck haulage systems, whereby the truck haul scenario is taken as the reference parameter.

If the initial investment in the rail haulage system is 30% higher than that of a truck-based system, and if the total cost is less than 50%, then there is no chance of any advantage being gained by using train transportation. In the case in point this will apply at shallow operating depths in combination with short horizontal transport distances. However, if one of the above thresholds is met it is in theory possible to employ either of the two systems. It would then be a matter of reaching a decision for the particular application in question, taking into account the relevant technical and economic factors.

Rail haulage systems are clearly to be favoured if both threshold values can be met. These trade-offs are achieved with increasing horizontal transport distances, while the influence of the vertical transport factor – which by comparison can be assumed as constant – will grow in line with increasing depth. Looked at the opposite way, this means that the advantages and drawbacks of the horizontal haulage system will have an underproportionate impact on the analysis as operating depths increase.

### 3.3 Conclusion

And finally, by applying the evaluation tool the following general conclusions can be drawn as regards the comparison between truck and train haulage systems:

- At a production rate of less than 8,000 tons per day the haul truck is the lowest cost alternative for horizontal haulage.
- The higher the production volume the more advantageous rail and conveyer haulage become – depending on mine-specific factors such as depth, material characteristics, profile and length of the tunnels.
- Rail equipment has a long life with limited requirement for additional equipment and less Opex after initial set up.
- Rail maintenance costs are the lowest of the three methods while the system itself provides the highest availability.
- Rail haulage has the lowest labor cost due to a high level of automation.

dies bei geringen Teufen in Kombination mit kurzen horizontalen Transportstrecken zu.

Wird hingegen eine der oben aufgezeigten Grenzen eingehalten, sind prinzipiell beide Varianten umsetzbar. Es gilt dann, für den jeweiligen Einzelfall eine Entscheidung unter Berücksichtigung der relevanten technischen und wirtschaftlichen Einflussgrößen zu treffen.

Zugfördersysteme sind eindeutig zu favorisieren, wenn beide Grenzen eingehalten werden. Dieser Effekt wird mit zunehmenden horizontalen Transportstrecken erreicht, wobei der Einfluss der im Vergleich als konstant angenommenen vertikalen Förderung mit wachsender Teufe zunimmt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Vor- bzw. Nachteile der horizontalen Förderung mit steigender Teufe unterproportional in die Bewertung einfließen.

### 3.3 Fazit

Abschließend lassen sich im Hinblick auf den Vergleich zwischen automobilier Fördertechnik und Zugfördersystemen folgende generelle Aussagen aus der Anwendung des Tools ableiten:

- Bei einer Produktionsrate von weniger als 8.000 t/d ist der Muldenkipper für die horizontale Förderung die kostengünstigste Alternative.
- Je höher die Produktionsmenge, desto vorteilhafter werden die Zug- und Bandförderung – in Abhängigkeit von bergwerksspezifischen Faktoren wie Teufe und untertägige Transportdistanz.
- Zugfördersysteme haben eine lange Lebensdauer mit begrenztem Bedarf an zusätzlicher Ausrüstung und geringeren laufenden Kosten nach der Erstinbetriebnahme.
- Die Wartungskosten von Zugsystemen sind die geringsten aller drei Methoden, während das System selbst die höchste Verfügbarkeit bietet.
- Zugförderung weist aufgrund des hohen Automatisierungsgrades die geringsten Personalkosten auf.

Neben der wirtschaftlichen Auswertung können weitere Faktoren wie Arbeitsschutz, Automatisierung, Nachhaltigkeit und Auswirkungen auf die Umwelt nicht nur bei hohen Produktionsmengen zu einer Entscheidung zugunsten von Zugfördersystemen führen – in speziellen Fällen eventuell auch zugunsten von Bandförderanlagen.

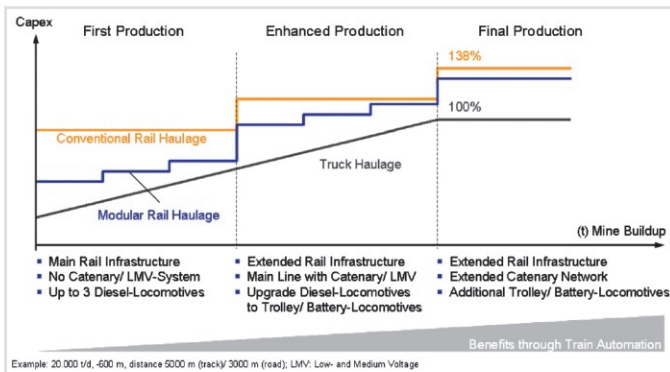


Fig. 6. Reduction of Capex by using a new strategy based on Schalke's "modular multi" system locomotive technologies

Bild 6. Capex-Reduzierung durch Einsatz einer neuen Strategie auf der Basis der „modularen Mehrsystem“-Lokomotiventeknik von Schalke

Besides the economical evaluation other factors such as health and safety, automation, sustainability and ecological impact may lead to the decision for rail haulage systems (and in special cases maybe also for conveyors) not only at high production volumes.

#### 4. Improved Economics by Schalke's Innovative Rail Haulage Technology

As already indicated in the model and mentioned in the prior chapters, in a lot of mining scenarios rail could be the best option for a suitable underground haulage solution. As established, the significant advantages of an underground rail haulage system are the very low operating costs and according to this the lowest TCO (Total Cost of Ownership over equipment lifetime) for multiple haulage scenarios. As described above, some of the biggest mining companies worldwide realized these great benefits and rely on Schalke's rail technology.

This actual development – especially in a weak market environment as the mining sector is facing these days, where the initial Capex becomes more important than the TCO and short term effects are dominating long term benefits – is seen in many discussions as the starting point of a general paradigm shift back to rail haulage systems in underground bulk mining operations.

##### 4.1 Lower Initial Investment by Higher Flexibility

In general, for new mines or levels the mining companies try to minimize the initial Capex and preproduction cost and time; major goal is a fast production ramp-up to generate revenue as soon as possible. Because of this development it seems that the major advantages of rail haulage systems (lowest TCO) become less important. However, Schalke's new strategy minimizes the major disadvantages of rail haulage systems (i.e. high initial Capex) by using Schalke's "modular multi" system locomotive technologies. Through this technology production can be started earlier and the costs can be reduced as well. As a specialist for safe, reliable high-performance drive units, the German-based company Schalke provides a range of mining locomotives from 10 to 130 tons as well as service and/ or shunting locomotives.

Usually a conventional buildup of an underground rail haulage system is divided in a few phases, e.g. three phases as shown in

#### 4. Verbesserte Wirtschaftlichkeit durch Innovative Zugfördersysteme von Schalke

Wie beschrieben könnten Zugfördersysteme in zahlreichen Bergwerksszenarien die beste Alternative für eine geeignete untertägige Förderlösung sein. Die bedeutendsten Vorteile eines untertägigen Zugfördersystems sind dessen sehr geringe Betriebskosten und die sich daraus ergebenden geringsten Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership über die Lebensdauer der Ausrüstung, TCO) in zahlreichen Förderungsszenarien. Einige der größten Bergbaubetreiber weltweit haben diese Vorteile erkannt und verwenden innovative Zugfördersysteme von Schalke.

Diese aktuelle Entwicklung – insbesondere in dem schwachen Marktumfeld, mit dem der Bergbau derzeit konfrontiert ist – wird in vielen Gesprächen als Ausgangspunkt für einen generellen Paradigmenwechsel zurück zu Zugfördersystemen in untertägigen Bergbaubetrieben mit hohen Fördervolumen betrachtet.

##### 4.1 Geringere Anfangsinvestitionen durch größere Flexibilität

Generell versuchen Bergwerksbetreiber den Kosten- und Zeitaufwand für die Aus- und Vorrichtungssphase zu minimieren; das Hauptziel ist eine schnelle Erreichung der Produktionsphase, um so schnell wie möglich Umsätze zu erwirtschaften. Wegen dieser Entwicklung hat es den Anschein, dass die großen Vorteile von Zugfördersystemen (niedrigste TCO) weniger bedeutsam werden. Durch den Einsatz der „modulare Mehrsystem“-Lokomotiventeknik können die hohen Anfangsinvestitionen minimiert werden. Mithilfe dieser Technologie kann die Produktion früher anlaufen, und die Kosten lassen sich ebenfalls reduzieren.

Normalerweise wird ein konventioneller Ausbau eines untertägigen Zugfördersystems in drei Phasen unterteilt (Bild 6). Wegen der hohen Bewetterungskosten und zunehmender Umweltprobleme werden Elektrolösungen in der nahen Zukunft gegenüber dem Dieselbetrieb den Vorzug erhalten. Daher wird eine Elektrolösung für dieses Beispiel gewählt. Im Fall eines konventionellen Ausbaus (in Bild 6 gelb bzw. in Bild 7 im oberen Teil dargestellt) belaufen sich die Investitionen für die einzelnen Phasen im Beispiel auf:

- Phase 1 (anfängliche Produktion):
  - vollständige „Hauptschieneninfrastruktur“ (inkl. Fahrleitungs- und Nieder-/Mittelspannungssystem (LMV-System),
  - erste Zugverbände (Stromabnehmer-Lokomotiven) und erste Be-/Entladestation(en).
- Phase 2 (gesteigerte Produktion):
  - Teil-„Ausbauschieneinfrastruktur“ (inkl. Fahrleitungs- und LMV-System),
  - weitere Zugverbände (Stromabnehmer-Lokomotiven) und erste Be-/Entladestation(en).
- Phase 3 (endgültige Produktion):
  - Voll-„Ausbauschieneinfrastruktur“ (inkl. Fahrleitungs- und LMV-System),
  - endgültige Anzahl von Zugverbänden (Stromabnehmer-Lokomotiven) + endgültige Anzahl von Be-/Entladestation(en).

our example in figure 6 (marked in black). Because of the high ventilation costs and increasing environmental issues electrical solutions will win over diesel operations in the near future. Hence, we have chosen an electrical solution for our example. In case of a conventional buildup (marked in red in figure 6 and shown in the upper area of figure 7) the investments for the phases in our example are:

- Phase 1 (first production):
  - complete “main rail infrastructure” (incl. catenary and low and medium voltage (LMV) system),
  - first train sets (trolley-locomotives) and first loading/unloading station(-s).
- Phase 2 (enhanced production):
  - partial “extension rail infrastructure” (incl. catenary and LMV system),
  - additional train sets (trolley-locomotives) and additional loading/unloading station(-s).
- Phase 3 (final production):
  - complete “extension rail infrastructure” (incl. catenary and LMV system),
  - final train sets (trolley-locomotives) + final loading/unloading station(-s).

A Buildup of an underground rail haulage system based on Schalke’s locomotive technologies (marked in green in figure 6 and shown in the lower area of figure 7) allows minimizing the initial Capex, to start production early and generate revenues. Each of the three phases can be divided in several intermediate phases:

- Phase 1 (first production):
  - a. Initial first production
    - partial “main rail infrastructure” (no catenary and LMV system)
    - one first train set (diesel-locomotive)
    - first few loading stations and one unloading station.
  - b. Increased first production
    - additional (or final; depending on the scheduled intermediate phases for phase 1) “main rail infrastructure” (no catenary and LMV system)
    - additional train set(-s) (diesel-locomotives)
    - additional loading stations
    - if necessary additional unloading station (depending on the scheduled production for phase 1)
- + X additional intermediate phases (equal to intermediate phase b.) depending on planned total production for phase 1. The number of trains using diesel locomotives can be increased as long as the installed ventilation of the final production set-up can handle all the diesel exhausts
- Phase 2 (enhanced production):
  - a. Initial enhanced production
    - first “extension rail infrastructure” (no catenary and LMV system)
    - upgrade of “main rail infrastructure” with catenary and LMV system
  - upgrade of the existing train sets to battery/trolley-locomotives
  - additional loading/unloading station(-s)

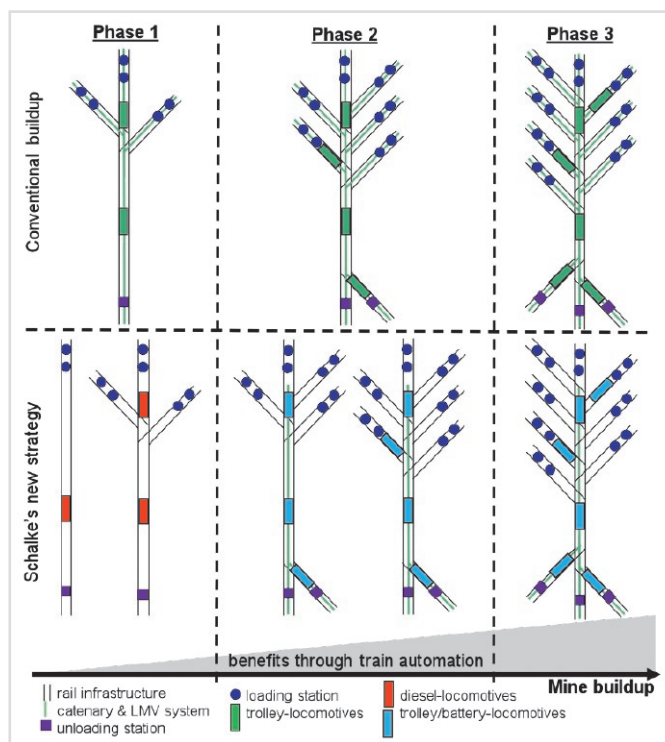


Fig. 7. Conventional buildup of an underground rail haulage system versus new strategy based on Schalke’s locomotive technologies  
 Bild 7. Konventioneller Ausbau eines untertägigen Zugfördersystems im Vergleich zur neuen Strategie auf Grundlage der Schalke-Lokomotiventeknik

Ein Ausbau eines untertägigen Zugfördersystems (wie in Bild 6 blau markiert bzw. in Bild 7 im unteren Teil dargestellt) ermöglicht eine Minimierung des anfänglichen Capex, eine frühe Aufnahme der Produktion bzw. Erwirtschaftung von Umsätzen. Jede der drei Phasen lässt sich in mehrere Zwischenphasen unterteilen:

- Phase 1 (Produktionsaufnahme):
  - a. Anfängliche Produktionsaufnahme
    - Teilausbau der „Hauptschieneninfrastruktur“ (keine Fahrleitung bzw. LMV-System),
    - ein erster Zugverband (Diesellokomotive),
    - einige erste Beladestationen und eine Entladestation.
  - b. Erhöhte Produktionsaufnahme
    - Erweiterung (oder Fertigstellung; je nach geplanten Zwischenphasen in Phase 1) der „Hauptschieneninfrastruktur“ (keine Fahrleitung bzw. kein LMV-System),
    - weitere(r) Zugverband/Zugverbände (Diesellokomotives),
    - weitere Beladestationen,
    - bei Bedarf weitere Entladestation (je nach Produktionsplanung für Phase 1).
- + X weitere Zwischenphasen (identisch mit Zwischenphase b.) je nach Produktionsplanung für Phase 1. Die Anzahl der Züge mit Diesellokomotives lässt sich steigern, sofern die installierte Bewetterung der endgültigen Produktionskonfiguration alle Dieselabgase bewältigen kann.
- Phase 2 (Produktionserweiterung):
  - a. Anfängliche Produktionserweiterung
    - erste „Erweiterung der Schieneninfrastruktur“ (keine Fahrleitung bzw. kein LMV-System),

- b. Increased enhanced production
  - additional “extension rail infrastructure” (no catenary and LMV system)
  - additional train set(-s) (trolley/battery-locomotives)
  - additional loading/unloading station(-s)
- + X additional intermediate phases (equal to intermediate phase b.) depending on total planned production for phase 2.
- Phase 3 (final production):
  - complete “extension rail infrastructure” (no catenary and LMV system)
  - final train set(-s) + final loading/unloading station(-s)

The key of this game-changing strategy are Schalke’s modular multi system locomotives called “ModuTrac”:

- “Modular” means that the power supply system can be changed directly on one locomotive, e.g. from diesel to battery (and/or vice versa) via Schalke’s innovative power-pack system. Hence, only the power-packs have to be changed, not the complete locomotive. E.g. it is possible to start with a diesel power-pack and change later on to a battery power-pack. There is no need for Capex in a catenary system from day one.
- “Multi” stands for more than one installed power supply system on one locomotive (up to three realized by Schalke until today). The best example is the battery/trolley-combination, with which it is possible to drive on the main lines using catenary power and on the extension lines using power from on-board batteries (no Capex in a catenary system on the extension lines, at no times).
- “Modular multi” is the combination of both above mentioned technologies. It is possible to start with a diesel power-pack and change later on to a battery power-pack with an integrated trolley system on the roof for catenary operations.

One example for this new strategy is shown by Schalke’s MMT-M-270-BDE “ModuTrac” locomotive (Figure 8). This locomotive will run in PT Freeport Indonesia’s Grasberg mine, which is currently going underground. The locomotive is designed with a central cab, weight of 40 tons and is currently the heaviest twin-axle locomotive Schalke manufactures. Each wheel set is driven by a 135-kW AC electric traction motor. Two state-of-the-art, amongst others liquid-cooled IGBT-controlled traction converters make it possible to control each wheel set individually. The locomotive design is based on the “modular multi” system featuring a trolley system for overhead catenary operations and one traction power-pack, either battery or diesel. Changing from one power-pack to the other can be quickly and smoothly done in approximately one hour. This “ModuTrac” mining locomotives are equipped with several state-of-the-art traction technologies simultaneously and are perfectly matched to the above mentioned strategy.

With Schalke’s modular power-pack system technologies the locomotives are directly prepared for future technologies as well. Besides the change e.g. from diesel- to battery-power-packs during mine buildup, more precisely said plug-and-play and low priced upgrade of the locomotives, which avoids an immense investments in new locomotives, the power-packs themselves can be replaced/upgraded later on. For example today’s mostly used traction batteries, because of the best price/performance ratio, are lead-acid batter-

- Aufrüstung der „Hauptschieneninfrastruktur“ mit Fahrleitung und LMV-System,
- Aufrüstung der vorhandenen Zugverbände auf Lokomotiven mit Batterie/Stromabnehmer
- weitere Be-/Entladestation(en).
- b. Erhöhte Produktionserweiterung
  - weitere „Erweiterung der Schieneninfrastruktur“ (keine Fahrleitung bzw. kein LMV-System),
  - weitere Zugverbände (Lokomotiven mit Batterie/Stromabnehmer),
  - weitere Be-/Entladestation(en).
- + X weitere Zwischenphasen (identisch mit Zwischenphase b.) je nach Produktionsplanung für Phase 2.
- Phase 3 (Endausbau der Produktion):
  - Vollständige „Erweiterung der Schieneninfrastruktur“ (keine Fahrleitung bzw. kein LMV-System),
  - endgültige Anzahl der Zugverbände + endgültige Zahl an Be-/Entladestation(en).

Der Schlüssel zu dieser bahnbrechenden Strategie sind modulare Mehrsystem-Lokomotiven mit der Bezeichnung „ModuTrac“:

- „Modular“ bedeutet, dass das Energieversorgungssystem mithilfe des Schalke-Powerpack-Systems unmittelbar auf der einzelnen Lokomotive gewechselt werden kann, z. B. von Diesel auf Batteriebetrieb (und/oder umgekehrt). So müssen nur die Powerpacks und nicht die komplette Lokomotive getauscht werden. Beispielsweise ist es möglich, mit einem Diesel-Powerpack zu beginnen und später auf ein Batterie-Powerpack umzustellen. Der Investitionsaufwand in ein Oberleitungssystem gleich zu Anfang ist nicht notwendig.
- „Mehrsystem“ steht für mehr als ein installiertes Energieversorgungssystem auf einer Lokomotive. Das beste Beispiel ist die Kombination aus Batterie und Stromabnehmer, mit deren Hilfe man auf den Hauptschienensträngen die Energie aus dem Oberleitungssystem und auf den Erweiterungsstrecken die Energie der Bordbatterien nutzt (kein Investitionsaufwand in ein Oberleitungssystem auf den Erweiterungsstrecken, zu keinem Zeitpunkt).
- „Modulares Mehrsystem“ beschreibt die Kombination aus beiden oben genannten Technologien. Es ist möglich, mit einem Diesel-Powerpack zu beginnen und später für den Oberleitungsbetrieb auf ein Batterie-Powerpack mit integriertem Dachstromabnehmersystem umzustellen.

Ein Beispiel für diese neue Strategie zeigt sich in der „ModuTrac“-Bergbaulokomotive MMT-M-270-BDE von Schalke (Bild 8). Diese Lokomotive wird in der Grasberg-Mine von PT Freeport Indonesia eingesetzt, die derzeit auf einen Untertagebetrieb ausgerichtet wird. Das Design der Lokomotive basiert auf dem „Modularen Mehrsystem“ mit einem Stromabnehmersystem für Oberleitungen und einem Traktionspowerpack für den Diesel- oder Batteriebetrieb. Der Wechsel von einem Powerpack auf ein anderes kann in rund einer Stunde vorgenommen werden.

Mit der modularen Powerpack-Systemtechnologie sind Lokomotiven auch direkt für künftige Technologien gerüstet. Neben der Umstellung beispielsweise vom Diesel- auf das Batterie-Powerpack während des Bergwerksausbaus, oder genauer gesagt



Fig. 8. MMT-M-270-BDE – Schalke's „ModuTrac“ mining locomotive running on battery or diesel power-pack with integrated trolley system  
Bild 8. MMT-M-270-BDE – Schalkes „ModuTrac“-Bergbaulokomotive mit Powerpack-Antrieb für Batterie- oder Dieselpowerpack und integriertem Stromabnehmersystem

ies. But in the near future this “older” technology will be overtaking by lithium-ion technologies. In this case Schalke's locomotives with lead-acid battery-power-packs mustn't be replaced completely; just the old power-packs must be replaced by new lithium-ion battery-power-packs without changes, adaptations or whatever on the locomotives per se. According to this same locomotives just equipped with new power-packs can e.g. drive much longer on battery power without recharging; and all that without immense investments in new locomotives, but rather favorable investments just in new power-packs. Same upgrade possibilities exist for diesel-, trolley- and multi-traction-power-packs, e.g. battery/trolley-power-packs, as well.

## 5. Lower Operating Costs by Automated Rail Haulage Systems

As shown in figure 7 the benefits of train automation and integration in the whole system – starting from train protection (ATP) up to automatic train (driverless) operations (ATO) – are increasing with the quantities of trains, loading- and unloading stations in operation. Automation and integration of the train transport with loading and unloading stations but also with process control reduces directly the operational costs and delivers a number of further advantages to an underground mining operation. Main operational benefits are, for example, no need for a driver in each train, no need for operators at the loading and unloading stations or no loss in production time during shift change or blasting periods. Having everything from one single source provides benefits such as locomotives come factory fitted and tested with ATP and ATO or the train control system is already tested with loading and unloading stations in advance.

Accomplishing more together, Schalke as a specialist for mining locomotives cooperates with superior partners on joint major projects in order to concentrate expertise and benefit from synergies – and in one word, to define the state-of-the-art in fully automated high-performance rail haulage.

One particularly fine example is the already mentioned complete underground rail haulage system which Schalke has devel-

dem kostengünstigen Umrüstungssystem nach dem Plug-and-play-Prinzip, können auch die Powerpacks selbst später ausgetauscht/modernisiert werden. Beispielsweise sind Bleibatterien aufgrund ihres günstigen Preis-/Leistungsverhältnisses die derzeit am häufigsten eingesetzten Traktionsbatterien. Aber in der näheren Zukunft wird diese „ältere“ Technik von Lithium-Ionen-technologien abgelöst werden. In diesem Fall muss man Lokomotiven mit Bleibatterie-Powerpacks nicht komplett austauschen; nur die alten Powerpacks müssen ohne weitere Änderungen, Anpassungen oder sonstigen Arbeiten an den Lokomotiven selbst gegen neue Lithium-Ionen-Powerpacks ausgetauscht werden. Dementsprechend können dieselben, mit neuen Powerpacks ausgerüsteten Lokomotiven ohne erneutes Aufladen wesentlich länger im Batteriebetrieb genutzt werden. All das ohne Investitionen in neue Lokomotiven, sondern lediglich mit Investitionen in neue Powerpacks. Die gleichen Aufrüstungsmöglichkeiten gibt es auch für Diesel-, Stromabnehmer- und Mehrsystem-Traktionspowerpacks, z. B. auch für Batterie/Stromabnehmer-Powerpacks.

## 5 Geringere Betriebskosten durch automatisierte Zugfördersysteme

Wie in Bild 7 gezeigt, erhöht sich der Nutzen der Zugautomatisierung und -integration in das Gesamtsystem – vom Zugsicherungssystem (ATP) bis zum vollautomatischen (fahrerlosen) Zugbetrieb (ATO) – mit der Anzahl der betriebenen Züge, Be- und Entladestationen. Die Automatisierung und Integration des Zugbetriebs und der Be- und Entladestationen und darüber hinaus auch der Prozesssteuerung senkt direkt die Betriebskosten und resultiert in einer Reihe weiterer Vorteile für einen untertägigen Bergbaubetrieb. Wichtige betriebliche Vorteile sind beispielsweise die fehlende Notwendigkeit, auf jedem Zug einen Fahrer oder an allen Be- und Entladestationen Betriebspersonal einzusetzen, und es fallen während der Schichtwechsel oder Sprengungen keine Produktionsausfallzeiten an. Die Beschaffung aus einer Hand ergibt Vorteile dadurch, dass die Lokomotiven ab Werk bereits mit dem ATP- und ATO-System ausgerüstet und getestet werden bzw. das Zugsteuerungssystem bereits im Vorhinein mit Be- und Entladestationen getestet worden ist.

Als Spezialist für Bergbaulokomotiven arbeitet Schalke bei gemeinsamen Großprojekten mit Partnern zusammen, um Fachwissen zu bündeln und davon zu profitieren. Ein Beispiel ist das Untertage-Zugfördersystem, das Schalke in Zusammenarbeit mit Bombardier Transportation (BT), einem weltweit tätigen und führenden Hersteller von Transporttechnologien, entwickelt hat, und das auch das Signalisierungs- und Zugsicherungssystem INTERFLO 150 umfasst, sowie Nordic Minesteel Technologies (NMT), einem in Ontario ansässigen Hersteller von Bergbauwagen, Be- und Entladestationen (Bild 9). Alle drei Parteien haben ihr Wissen und ihre Fähigkeiten gebündelt, um ein aus einer Hand stammendes Komplettsystem zusammenzustellen. Schalke liefert die Lokomotiven, und BT steuert das spezielle Signalisierungs- und Automatisierungssystem bei, während NMT die Grubenwagen sowie die Be- und Entladestationen liefert. Die Zusammenarbeit resultierte in einem weltweit einzigartigen Komplettsystem. Die Robustheit des Systems bedeutet, dass die Zuverlässigkeit hoch, Stillstandszeiten minimal und Betriebskosten, aber auch Instandhaltungskosten im Vergleich zu anderen Fördersystemen gering sind.



oped in collaboration with Bombardier Transportation (BT; world-wide operating and leading manufacturer of rail transportation technologies including INTERFLO 150 signaling and train automation system) and Nordic Minesteel Technologies (NMT; Ontario based manufacturer of mining cars, loading and unloading stations). Each of the three partners has decades of experience in developing and producing mining equipment. All three parties have combined their knowledge and ability to form a complete system supplied from one single source.

As shown in figure 9 Schalke provides the locomotives, BT contributes a special train signaling and automation system while NMT supplies the mining cars as well as the loading and unloading stations. The collaboration has resulted in a complete system unique worldwide that features a high degree of automation and incredible robustness. All of the system's components are designed to withstand 25 to 30 years of continued operation. The system enables constant around-the-clock operation at high speed and maximum capacity. The automatic operation guarantees maximum effectiveness, reduced costs and increased safety underground. The -round proven robustness of the system means that the reliability is high, downtimes are minimal and operating as well as maintenance costs are extremely low in comparison to other haulage systems.

The operators of several largest mines in the world already trust in this complete system, including CODELCO's El Teniente mines in Chile, LKAB's Kiruna mine in Northern Sweden or Freeport's Grasberg mine (under construction) in West Papua, Indonesia. Since 1996 Schalke's locomotives using BT's signaling and train automation system (including driverless operation) run underground in CODELCO's Esmeralda mine, which is a part of the El Teniente mining complex in the Andes Mountains in Chile. The partners have nearly two decades of joint experience now. The fact that all these global players rely on the performance and quality of this system is an affirmation of Schalke's strategy of success through teamwork with customers as well as with partners.

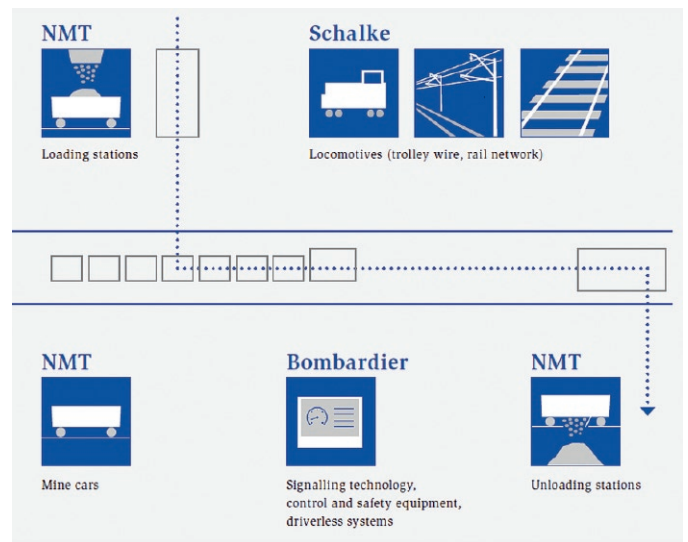


Fig. 9. Proven underground rail haulage system from Schalke, NMT and BT  
Bild 9. Das bewährte Untertage-Zugfördersystem von Schalke, NMT und BT

Die Betreiber mehrerer Großbergwerke wie des CODELCO Bergwerkkomplexes von El Teniente in Chile, des LKAB-Bergwerks Kiruna in Nordschweden oder des Bergwerks Grasberg von Freeport in West Papua, Indonesien, vertrauen auf ein solches Komplettsystem.

#### References / Quellenverzeichnis

- (1) N.N.: AMC Underground Haulage Benchmark. Study on underground haulage systems for Schalker Eisenhütte Maschinenfabrik GmbH, Melbourne, 2015.
- (2) Pratt, A.G.L.: Mine Haulage – Options and the Process of Choice. Tenth Underground Operations' Conference, Launceston, 2008.
- (3) Bergstroem, R., Sterner, T., Nordstroem, T.: Heavy haul 1.365 meter underground. IHHA meeting, Calgary, 2011.
- (4) Paraszcak, J., Svedlund, E., Fytas, K., Laflamme, M.: Electrification of Loaders and Dumper-trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining. International Conference of Renewable Energies and Power Quality, Cordoba, 2014.
- (5) Paraszcak, J., Fytas, K., Laflamme, M.: Feasibility of Using Electric Dumper-trucks in Deep Metal Mines. In: Drebenstedt, C., Singhal, R. (eds.), Mine Planning and Equipment Selection, pp. 1265-1276, Springer Cham, Heidelberg/New York/Dordrecht/London, 2014.

#### Authors / Autoren

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Andreas Merchiers  
Dr.-Ing. Gregor Brudek  
Schalker Eisenhütte Maschinenfabrik GmbH, Bochum, Germany

Markus Dammers, M.Sc.  
Institute of Mining Engineering I (BBK1),  
RWTH Aachen University, Germany