

Making an Exploration Investment Case

Exploration expenditure is closely linked to commodity prices and in the current low commodity price environment pressure on exploration budgets and reduction in spending has been dramatic. This calls for making robust business cases for exploration spending to demonstrate value-added to senior management. This contribution examines exploration and related resource definition in the context of the mine production value chain which is conceptualized by means of Theory of Constraints. This framework

allows to link uncertainty around the deposit being mined with production costs and hence deriving a value to improved resource definition. A demonstration study in a bulk commodity shows the application of the framework with impressive cost savings and return on capital achievable, supporting a business case for considerable resource definition spending. The Value of Information concept is introduced to help establishing upper bounds for expenditure on a project.

Darstellung eines Investment Case für die Exploration

Explorationsaufwendungen sind eng an Rohstoffpreise gekoppelt, und im derzeitigen Klima niedriger Rohstoffpreise sind der Druck auf Explorationsbudgets und die Kürzung der Aufwendungen dramatisch. Deshalb bedarf es der Entwicklung von soliden Business Cases für Explorationsaufwendungen, um gegenüber der Geschäftsleitung einen Mehrwert nachzuweisen. Dieser Beitrag untersucht die Exploration und die damit verbundene Ressourcendefinition vor dem Hintergrund der Wertschöpfungskette im Bergbau, die anhand des Konzepts der Engpassstheorie („Theory of Constraints“) dargestellt wird. Mit diesem Konzept

lässt sich eine Verbindung zwischen der Ungewissheit im Zusammenhang mit dem Abbau einer Lagerstätte einerseits und den Produktionskosten andererseits herstellen, woraus sich dann ein Wert der verbesserten Ressourcendefinition ableiten lässt. Eine Demonstrationsstudie für einen Massenrohstoff zeigt, dass die Anwendung des Konzepts zu beeindruckenden Kosteneinsparungen und erreichbaren Kapitalrenditen führt, die einen Business Case für signifikante Ausgaben für die Ressourcendefinition stützen. Das Informationswertkonzept wird zur Festlegung der Obergrenzen für Projektausgaben herangezogen.

Introduction

Exploration and resource definition activities deliver the basis for any mining venture. Greenfield exploration is a high risk activity with the aim of finding a economically material deposit of mineral raw materials. Lead times for greenfield projects usually exceed ten years before a mine gets developed and generates cash flow. Brownfield exploration is lower risk and has the goal of growing the resource base in known systems and near existing infrastructure. Lead times are considerably shorter with a time scale of about five years.

Due to the risks involved and the long lead times, exploration activities generally are among the first victims of cost cutting in periods of falling commodity prices and reduced capital inflow to the mining industry. Figure 1 shows 25 years of exploration expenditure data for Australia, sourced from the Australian Bureau of Statistics (1), along with the metal price index, sourced from the International Monetary Fund (2). Brownfield exploration as well as greenfield and total exploration show clear correlation with price index movements. Exploration activities have been

Einleitung

Exploration und Ressourcendefinition bilden die Grundlage für jedes Bergbauvorhaben. Die Greenfield-Exploration ist eine mit hohem Risiko behaftete Tätigkeit mit dem Ziel, eine wirtschaftlich signifikante Lagerstätte mineralischer Rohstoffe zu finden. Vorlaufzeiten für Greenfield-Projekte betragen normalerweise mehr als zehn Jahre bis ein Tagebau erschlossen ist und einen Cashflow erwirtschaften. Die Brownfield-Exploration ist weniger risikoreich und verfolgt das Ziel, die Ressourcenbasis in bekannten Systemen und in der Nähe vorhandener Infrastrukturen zu erweitern. Die Vorlaufzeiten sind bedeutend kürzer und bewegen sich in einem Zeitrahmen von etwa fünf Jahren.

Aufgrund der vorhandenen Risiken und langen Vorlaufzeiten zählen Explorationstätigkeiten in Zeiten fallender Rohstoffpreise und geringerer Kapitalzuflüsse in den Bergbau generell zu den ersten Opfern von Kosteneinsparungen. Bild 1 zeigt die vom Australian Bureau of Statistics (1) stammenden Angaben für Explorationsaufwendungen in Australien im Verlauf von 25 Jahren sowie den Metallpreisindex des Internationalen Währungsfonds

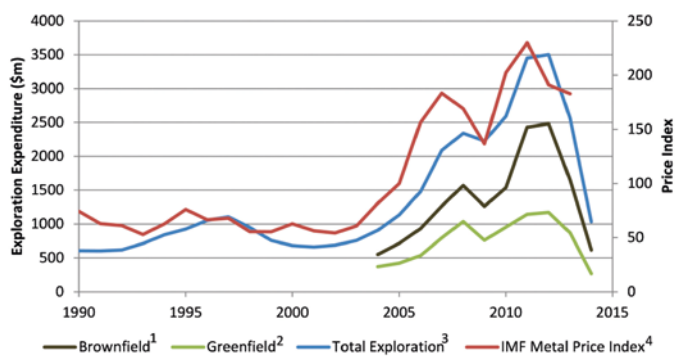


Fig. 1. Exploration expenditure data for Australia and the IMF metal price index.

Bild 1. Explorationsaufwendungen in Australien und der IWF-Metallpreisindex.

severely reduced since 2013 with expenditure dropping for peak levels of \$ 3,5B in 2012 to \$ 1B in 2014.

This pattern of indexed expenditure is well known from previous cycles, despite the fact the industry cycle duration is similar to exploration lead times. The often advocated investment through the cycle would make particularly sense for exploration as an anti-cyclical, strategic investment.

Given this strong pressure in the down cycle professionals need to make a compelling business case to get management support for the investment. The exploration value-added can be demonstrated through integrating the resource into a broader supply chain framework thus linking the cost of resource definition to capacity and buffer optimization within the mining supply chain.

An example application shows that even considerable investment into better resource definition can have high present value and very attractive return on investment. After demonstrating the deterministic business case, it is extended using the value of information concept, allowing to establish upper investment bounds for the acquisition of additional information.

Theory of Constraints Framework

The Theory of Constraints (4) is an intuitive framework to investigate supply chains for design and operations improvement with the aim of maximizing value throughput. A key element is the analysis of „bottlenecks“ (constraints) of processes and buffers along the supply chain such that the overall system value generation is maximized.

In a mining operation the supply chain consists of all production components starting with the resource being exploited and the mine design enabling access, the mining process, haulage, processing plant and shipping/sale. Typically the plant is by design the system constraint due to its high capital and operating cost.

The resource delivers products into the supply chain which is variable and uncertain due to incomplete knowledge of the resource. The resource cannot be controlled, however the level of resource definition can be managed along with the supply chain design and effective planning processes. As such the deposit, the level of resource definition and related input variability is balanced with a suitable mine design and production processes with the aim to maximize value throughput at the plant.

(2). Brownfield-Exploration, Greenfield-Exploration sowie die Exploration insgesamt zeigen eine eindeutige Korrelation zu den Preisindexschwankungen. Seit 2013 wurden Explorationstätigkeiten stark beschnitten, die Ausgaben gingen vom Spitzenwert in Höhe von 3,5 Mrd. \$ im Jahr 2012 auf 1 Mrd. \$ im Jahr 2014 zurück.

Dieses Muster mit indexgebundenen Aufwendungen ist aus früheren Konjunkturzyklen gut bekannt, dennoch entspricht die Dauer des Branchenzyklus in etwa den Explorationsvorlaufzeiten. Die häufig befürworteten Investitionen über den gesamten Zyklus wären insbesondere im Falle der Exploration als einer antizyklischen strategischen Investition sinnvoll.

Angesichts dieses starken Drucks während des Konjunkturabschwungs müssen Fachleute einen überzeugenden Business Case vorlegen, um von der Geschäftsleitung Unterstützung für Investitionen zu erhalten. Der Mehrwert der Exploration kann nachgewiesen werden, indem man die Ressource in den Gesamtkontext der Lieferkette einbindet und somit die Kosten der Ressourcendefinition mit einer Kapazitäts- und Pufferoptimierung innerhalb der Bergbau-Lieferkette verknüpft.

Ein Anwendungsbeispiel zeigt, dass selbst erhebliche Investitionen zur Verbesserung der Ressourcendefinition einen hohen Barwert und eine sehr attraktive Kapitalrendite aufweisen können. Nach Darstellung des deterministischen Business Case wird er mit Hilfe des Informationswertkonzepts erweitert, wodurch sich Investitionsobergrenzen für die Beschaffung zusätzlicher Informationen festlegen lassen.

Die Engpassstheorie als Rahmen

Die Engpassstheorie („Theory of Constraints“) (4) bildet einen intuitiven Rahmen zur Untersuchung von Lieferketten im Hinblick auf konzeptionelle und operative Verbesserungen mit dem Ziel, den Wertdurchsatz zu maximieren. Ein zentrales Element ist die Analyse von „Engstellen“ (Engpässen) in Prozessen und Puffern entlang der Lieferkette, so dass die Wertschöpfung im Gesamtsystem maximiert wird.

In einem Bergbaubetrieb besteht die Lieferkette aus allen Produktionskomponenten beginnend mit dem zu gewinnenden Rohstoff und dem Zuschnitt zur Erschließung der Lagerstätte über den Abbau, den Transport, die Aufbereitungsanlage bis zum Versand/Vertrieb. Im Normalfall bildet die Aufbereitungsanlage aufgrund der hohen Kapital- und Betriebskosten den Systemengpass.

Der Abbau bringt Produkte in die Lieferkette ein, die aufgrund unvollständiger Kenntnisse über die Lagerstätte Variabilität und Ungewissheiten aufweist. Die Lagerstätte selbst ist nicht beeinflussbar, aber neben der Auslegung der Lieferkette und effektiven Planungsprozessen kann auch der Umfang der Ressourcendefinition gesteuert werden. Somit werden die Lagerstätte, der Umfang der Ressourcendefinition und die damit zusammenhängenden Input-Schwankungen mit einem geeigneten Tagebauszuschnitt und Produktionsprozessen mit dem Ziel gegeneinander abgewogen, den Wertdurchsatz in der Aufbereitungsanlage zu maximieren.

In diesem dynamischen Umfeld dienen der Tagebauszuschnitt und die Flottenkapazitäten in der Lieferkette als Puffer für die Aufbereitungsanlage. Wie in Bild 2 gezeigt, stehen eine Reihe von Puffern zur Verfügung, um Input-Schwankungen auszugleichen. Der Tagebauszuschnitt und die Pushback-Erschließung ermöglichen den Zugang zur Lagerstätte und bestimmen die Abbaubereiche

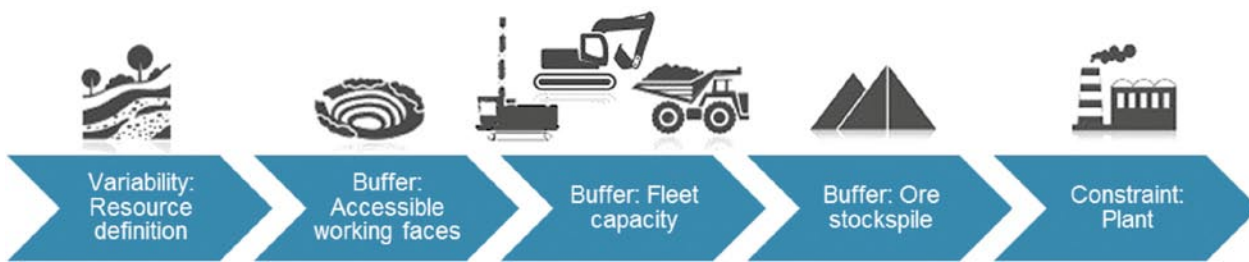


Fig. 2. Theory of Constraints model of the mining supply chain.
Bild 2. Modell der Engpasstheorie in der Bergbau-Lieferkette.

In this dynamic environment the mine design and fleet capacities in the supply chain serve as buffers for the plant. As illustrated in Figure 2 a number of buffers are available to deal with the input variability. The mine design and push back development enables access to the resource and provides work areas within the mine. These working faces determine the flexibility of production scheduling with regard to accessible waste and ore blocks, allowing the scheduler to balance short term strip ratios and blend ore qualities towards specifications. The mobile fleet capacity determines the mining rate and is based on ore production and waste movement requirements in the long-term mine plan. Ore stockpiles generally have the purpose of short-term quality blending however they do also get used as a volume buffer ensuring continuous ore supply to the plant.

All these components of the supply chain design are based on the resource model and long-term mine plan which normally understate variability and do not consider uncertainty (3). Therefore the design of buffers within the mine production system is often based on experience assuming the resource model and resultant mine plan are overall accurate and unbiased.

Example Application

The application of the Theory of Constraints framework uses an open pit bulk mining example with a mine plan for 25 mt/a productive movement and a processing plant with 10 mt/a capacity. The mine generates a single ore product that feeds the plant. An ore stockpile for quality blending purposes has a capacity of 5 mt.

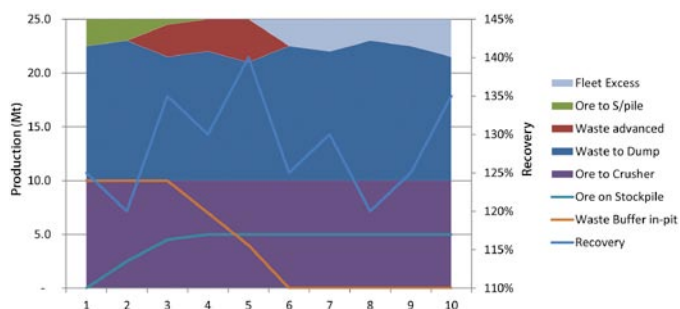


Fig. 3. Ore over-recovery and buffer exhaustion resulting from excess fleet.
Bild 3. Überplanmäßige Erzgewinnung und Vollausslastung der Pufferkapazität durch eine zu große Fahrzeugflotte.

innerhalb des Tagebaus. Diese Abbaubetriebspunkte bestimmen die Flexibilität der Produktionsplanung im Hinblick auf zugängliche Abraum- und Erzblöcke und ermöglichen es dem Planer, kurzfristig Erz-/Abraumverhältnisse auszugleichen und Erzqualitäten den Anforderungen entsprechend zu mischen. Die mobile Flottenkapazität bestimmt die Abbaugeschwindigkeit und basiert auf den Anforderungen der Erzproduktion und Abraumbewegungen im langfristigen Abbauplan. Erzlager dienen generell dazu, kurzfristig verschiedene Erzgütern zu mischen, sie werden aber auch als Mengepuffer genutzt, um die kontinuierliche Erzversorgung der Aufbereitungsanlage zu sichern.

Alle diese Komponenten des Lieferkettenkonzepts stützen sich auf das Lagerstättenmodell und den langfristigen Abbauplan, die normalerweise die Variabilität unterschätzen und Ungewissheiten nicht betrachten (3). Daher stützt sich die Dimensionierung von Puffern im Produktionssystem eines Tagebaus häufig auf Erfahrungswerte und geht davon aus, dass das Lagerstättenmodell und der darauf basierende Abbauplan insgesamt zutreffend und erwartungstreu sind.

Anwendungsbeispiel

Die Anwendung der Engpasstheorie verwendet das Beispiel eines Tagebaus mit einem Abbauplan, der eine Gesamtförderung von 25 Mio. t/Jahr und eine Aufbereitungsanlage mit einer Kapazität von 10 Mio. t/Jahr vorsieht. Es wird nur ein einziges Erzprodukt abgebaut, das an die Aufbereitungsanlage geliefert wird. Zum Mischen der Erzqualitäten ist eine Halde mit einer Kapazität von 5 Mio. t vorhanden.

Überplanmäßige Erzausbeute und Lieferkettenpuffer

Der Abbaubetrieb in diesem Beispiel zeichnet sich durch eine ständig um 20 bis 40 % über der Planung liegende Erzausbeute aus, was auf unzureichende Ressourcendefinition und eine Unterschätzung der Erzvorräte zurückzuführen ist. Das zusätzlich gewonnene Erz und das damit verbundene Absinken des Erz-/Abraumverhältnisses führen zu Planabweichungen, weil zusätzliche Mengen Erz abgebaut und transportiert werden müssen. Da das Produktionsmanagement das Ziel verfolgt, die vorhandene Abbaukapazität auszulasten, wird das zusätzliche Erz abgebaut und auf Halde gelagert, bis die vorhandene Haldenkapazität erschöpft ist. Parallel dazu wird vermehrt Abraumförderung betrieben. Die Erzaufhaltung und die vorgezogenen Abraumbewegungen senken den Wert des Projekts, weil sich die damit verbundenen Abbaukosten auf den Cashflow auswirken. Es ist anzumerken, dass es weniger kostenintensiv wäre, die Fahrzeugflotte nicht einzu-

Item	Unit	Cost	Comments
Resource definition	\$/t	0.1	Incremental cost of improving resource definition
Mining cost	\$/t	5.0	Fixed and variable costs
Mobile fleet capacity	\$/t/a	2.5	Fixed cost only
Waste advanced	\$/t/a	0.5	Annual interest on mining cost
Ore re-handling	\$/t	1.0	Cost for double handling of ore through the stockpile

Table 1. Relevant supply chain cost items.

Ore Over-Recovery and Supply Chain Buffers

The operation in this example is characterized by consistent over-recovery of ore by 20 to 40% against plan due to insufficient resource definition and underestimation of ore in the reserve. The additional recovered ore and the related reduction in strip ratio leads to deviations from the plan as additional ore tonnes need to be mined and handled. As production aims to utilize existing capacity, the additional ore is mined and stockpiled until the stockpile capacity is exhausted. In parallel waste mining is advanced. Ore stockpiling and advancing waste movements reduces project value as related mining costs impact cash flows. Note that not utilizing the fleet would have been less costly as variable mining costs would not have been incurred. However, this is not the typical behaviour in a production environment.

Figure 3 summarizes the actual production schedule and consequent buffer utilization in the mining supply chain. Advancing ore and waste movements to utilise fleet in the years 1 to 5 results in exhaustion of ore stockpile capacity in year 3 with advanced waste mining leading to the operation becoming ore bound in year 6. With all buffers exhausted there is an excess budgeted fleet capacity during the years 6 to 10, totalling 13.5 mt non-utilized capacity incurring fixed costs. The ore supply to the plant is met in all years but at excessive cost due to excess capacities in the supply chain.

Exploration Business Case

The business case for exploration is based on possible cost savings when comparing a better optimized, leaner supply chain with the actual baseline performance described in the section above. In this baseline model only advanced waste movements and fixed costs of non-utilized fleet capacity are considered, resulting in a conservative cost estimate.

With relevant costs for the example listed in Table 1 fleet excess costs the operation approximate 25 m\$. Applying a 7.5% discount rate the present value of these costs in the year before operation startup is 14.5 m\$. Advancing ore and waste mining adds further costs that could have been deferred to the end of the mine life. Assuming ore stockpiling is beneficial the present value of costs for advanced waste mining accounts for another 65 m\$. The total present value of these costs over the life of the operation is 80 m\$.

Three scenarios were considered for the business case:

1. Improved resource definition, case A – implementing a 6 m\$ drilling program reduces strip ratio estimation error to 25% of

Position	Einheit	Kosten	Anmerkungen
Ressourcen- definition	\$/t	0,1	Inkrementelle Kosten zur Verbesserung der Ressourcendefinition
Abbauskosten	\$/t	5,0	Fixkosten und variable Kosten
Fahrzeugflotten- kapazität	\$/t/a	2,5	Nur Fixkosten
Fortschreitender Abraumabbau	\$/t/a	0,5	Jährliche Zinsen auf Abbauskosten
Erneuter Erztransport	\$/t	1,0	Kosten für die Verdoppelung des Erztransports über die Halde

Tabelle 1. Relevante Kostenpositionen in der Lieferkette.

setzen, weil keine variablen Abbauskosten anfielen. Aber das ist kein typisches Verhalten in einem Produktionsumfeld.

Bild 3 fasst den tatsächlichen Produktionsplan und die sich daraus ergebende Haldenauslastung in der Bergbau-Lieferkette zusammen. Die Erhöhung der Erz- und Abraumbewegungen zur Auslastung der Fahrzeugflotte in den Jahren 1 bis 5 führt dazu, dass die Kapazität der Erzhalde im dritten Jahr erschöpft ist, und die vorgezogene Abraumbewegung führt dazu, dass im sechsten Betriebsjahr der gesamte Abraum im Tagebau gefördert wurde und die Förderung durch den Erzfluss beschränkt ist. Mit vollständiger Auslastung aller Puffer ist die eingeplante Fahrzeugflottenkapazität in den Jahren 6 bis 10 überdimensioniert, wodurch Fixkosten für insgesamt 13,5 Mio. t ungenutzte Kapazität anfallen. Die Erzversorgung der Aufbereitungsanlage wird in allen Jahren erreicht, aber aufgrund der Überkapazitäten in der Lieferkette fallen zu hohe Kosten an.

Business Case für Exploration

Der Business Case für die Exploration und verbesserte Lagerstättendefinition stützt sich auf mögliche Kosteneinsparungen, wenn man eine stärker optimierte, gestraffte Lieferkette mit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ausgangslage vergleicht. In diesem Ausgangsmodell werden nur die vorgezogenen Abraumbewegungen und die Fixkosten für die nicht ausgelastete Flottenkapazität berücksichtigt, wodurch sich eine konservative Kostenschätzung ergibt.

Mit den relevanten Kosten für das beschriebene Beispiel in Tabelle 1 kostet die zu groß dimensionierte Fahrzeugflotte den Betrieb ca. 25 Mio. \$. Bei einem Diskontsatz von 7,5% beläuft sich der Barwert dieser Kosten im Jahr vor Betriebsbeginn auf 14,5 Mio. \$. Die vorgezogene Erz- und Abraumbewegung verursacht zusätzliche Kosten, die bis zum Ende der Betriebsdauer des Tagebaus hätten verschoben werden können. Selbst wenn die Erzaufhaltung in der Kostenrechnung ignoriert wird, da sie operative Vorteile erbringen kann, machen die Kosten für die vorgezogene Abraumbewegung weitere 65 Mio. \$ aus. Der gesamte Barwert der erhöhten Kosten beläuft sich über die Betriebsdauer auf 80 Mio. \$.

Für den Business Case wurden drei Szenarien betrachtet:

1. Verbesserung der Ressourcendefinition, Fall A – die Durchführung eines Bohrprogramms im Umfang von 6 Mio. \$ reduziert den Schätzfehler beim Abraumverhältnis auf 25% des tatsächlichen Fehlers. Dieses Szenario spiegelt ein erfolgreiches Programmresultat wider und liefert Kosteneinsparungen von mehr als 53 Mio. \$.

the actual error. This scenario reflects a successful outcome of the program and delivers cost savings exceeding 53 m\$.

2. Improved resource definition, case B – implementing a 6 m\$ drilling program reduces strip ratio estimation error to 50% of the actual error. This scenario reflects the possibility of an only moderately successful program and delivers cost savings of approximate 34 m\$.
3. Improved fleet management – assume excess fleet can be re-allocated to other operations in a broader portfolio or managed through contracting with only 50% of excess and fixed cost incurred. This scenario shows the potential of a capacity focussed solution which delivers cost savings of approximate 40 m\$.

The large increment in value-added of 19 m\$ between cases A and B highlights the importance of planning and executing the drilling program well to maximize return. The effectiveness of the program is crucial in this context rather than the final cost of the program. However, even for case B the return on investment (ROI) exceeds 500%.

The fleet management solution also shows very attractive return but it has to be noted that, in practice, such a solution is difficult to implement even when the credibility of the resource model is low after poor performance over extended periods. However, such alternative risk management options in other parts of the supply chain should be assessed by a cross-functional team using a broad system focussed approach. For example, additional working faces might be cheaply developed and create sufficient buffer in the system when combined with clear fleet management policies.

Value of Information

The exploration business case above is an application of the value of information concept for decisions where the outcome, i.e. the actual strip ratio, is known. In a more general way the concept can be applied without knowing the actual strip ratio. Under such circumstances different decision options have a range of possible consequences, depending on what the actual strip ratio turns out to be.

Assuming at feasibility stage of a mining project, the study team realizes a material uncertainty about the strip ratio and consequently there is uncertainty about the optimal fleet size. This situation is summarized in Table 2 showing three fleet options for three possible strip ratio scenarios with their respective likelihood of occurrence. It is important to assess these probabilities diligently, avoiding common cognitive biases such as anchoring (5). Depending on the different strip ratios the study team can

Fleet Alternatives	High Strip Ratio P = 20%	Moderate Strip Ratio P = 50%	Low Strip Ratio P = 30%
Large Fleet	100 m\$	90 m\$	80 m\$
Medium Fleet	60 m\$	120 m\$	100 m\$
Small Fleet	30 m\$	90 m\$	140 m\$

Table 2. Profit matrix for strip ratio and fleet size scenarios.

2. Verbesserung der Ressourcendefinition, Fall B – die Durchführung eines Bohrprogramms im Umfang von 6 Mio. \$ reduziert den Schätzfehler beim Abraumverhältnis auf 50% des tatsächlichen Fehlers. Dieses Szenario spiegelt die Möglichkeit eines nur eingeschränkt erfolgreichen Programms wider und liefert Kosteneinsparungen von ca. 34 Mio. \$.
3. Verbesserung des Flottenmanagements – Annahme, dass die überzähligen Fahrzeuge anderen Operationen innerhalb eines größeren Portfolios zugewiesen oder über Fremdaufträge gemanagt werden können, sodass nur 50% der zusätzlichen Kosten bzw. Fixkosten anfallen. Dieses Szenario zeigt das Potential einer kapazitätsorientierten Lösung, die Kosteneinsparungen von ca. 40 Mio. \$ erbringt.

Der große Sprung von 19 Mio. \$ Mehrwert zwischen den Fällen A und B unterstreicht die Bedeutung einer guten Planung und Durchführung des Bohrprogramms zur Renditemaximierung. Die Effektivität des Programms ist in diesem Zusammenhang entscheidender als die Gesamtkosten des Programms. Aber selbst für den Fall B liegt die Kapitalrendite (ROI) bei mehr als 500%.

Die Lösung über das Flottenmanagement ergibt ebenfalls eine sehr attraktive Rendite. Es ist jedoch anzumerken, dass eine solche Lösung in der Praxis schwer umzusetzen ist, selbst wenn die Glaubwürdigkeit des Ressourcenmodells nach einer schlechten Performance über längere Zeiträume gering ist. Dennoch sollten solche alternativen Risikomanagementoptionen in anderen Teilen der Lieferkette von einem interdisziplinären Team mit einem breit angelegten, systemfokussierten Ansatz bewertet werden. Beispielsweise lassen sich unter Umständen zusätzliche Abbaubetriebspunkte preisgünstig entwickeln und schaffen einen ausreichenden Puffer im System, wenn sie mit klaren Vorgaben für das Flottenmanagement kombiniert werden.

Wert der Informationen

Der obige Business Case für die Exploration stellt eine Anwendung des Informationswertkonzepts für Entscheidungen dar, bei denen das Ergebnis, d. h. das tatsächliche Erz-/Abraumverhältnis, bekannt ist. Generell kann das Konzept auch angewendet werden, ohne dass das tatsächliche Erz-/Abraumverhältnis bekannt ist. Unter solchen Umständen führen unterschiedliche Entscheidungsoptionen zu einer Bandbreite von möglichen Konsequenzen, die vom sich tatsächlich ergebenden Erz-/Abraumverhältnis abhängen.

Angenommen, ein Studienteam erkennt während der Machbarkeitsprüfung eines Bergbauprojekts eine erhebliche Unsicherheit beim Erz-/Abraumverhältnis, so ergibt sich daraus eine Ungewissheit mit Blick auf die optimale Fahrzeugflottengröße. Diese Situation ist in Tabelle 2 zusammengefasst, die drei Flot-

Flottengrößen-Alternativen	Hohes Erz-/Abraumverhältnis P = 20%	Mittleres Erz-/Abraumverhältnis P = 50%	Niedriges Erz-/Abraumverhältnis P = 30%
Große Flotte	100 Mio. \$	90 Mio. \$	80 Mio. \$
Mittlere Flotte	60 Mio. \$	120 Mio. \$	100 Mio. \$
Kleine Flotte	30 m\$	90 m\$	140 m\$

Tabelle 2. Gewinnmatrix für die Szenarien von Erz-/Abraumverhältnissen und Flottengrößen.

Fleet Alternative	Expected Value of Profit
Large Fleet	$100 \text{ m\$} \times 0.2 + 90 \text{ m\$} \times 0.5 + 80 \text{ m\$} \times 0.3 = 89 \text{ m\$}$
Medium Fleet	$60 \text{ m\$} \times 0.2 + 120 \text{ m\$} \times 0.5 + 100 \text{ m\$} \times 0.3 = 102 \text{ m\$}$
Small Fleet	$30 \text{ m\$} \times 0.2 + 90 \text{ m\$} \times 0.5 + 140 \text{ m\$} \times 0.3 = 93 \text{ m\$}$

Table 3. Expected profit value for each fleet scenario.

scale the mining fleet in three different ways. Table 2 details the profits for all possible outcomes, which can be derived from different mine schedule scenarios for each strip ratio case.

Given the state of knowledge expressed in the probabilities of the strip ratio cases, an often used decision criteria is to choose the option that maximizes expected profit (6). This can be calculated as the weighted average of profit outcomes for each decision option as shown in table 3. So without having additional information about the true strip ratio the preferred decision option would be the medium fleet with an expected value of 102 m\$ profit.

If perfect knowledge about the strip ratio could be acquired it would be possible to choose the optimal option for any strip ratio case as the fleet can be scaled appropriately. This gives the decision value with perfect information, which is calculated as the weighted average of the optimal fleet size profits, the expected value with perfect information:

$$100 \text{ m\$} \times 0.2 + 120 \text{ m\$} \times 0.5 + 140 \text{ m\$} \times 0.3 = \underline{122 \text{ m\$}}$$

Expected Value of Perfect Information (EVPI) describes the value added through acquiring perfect information about the factors influencing the decision outcome. It is calculated as:

$$\begin{aligned} \text{EVPI} &= \text{EV Decision with} - \text{EV Decision without} \\ &= 122 \text{ m\$} - 102 \text{ m\$} = \underline{20 \text{ m\$}} \end{aligned}$$

This means the feasibility study team in this example should pay at most 20 m\$ for additional information about the strip ratio. As information in practice is never perfect residual uncertainty needs to be taken into consideration. A rule of thumb is to pay no more than half the EVPI, i.e., 10 m\$.

Conclusions

Exploration expenditure is pressured when the commodity price cycle is low and geology professionals need to justify spending requests with a robust business case. The Theory of Constraints is an intuitive approach to analyze the cost impact of resource model uncertainty in the mining supply chain. This can help professionals translating technical concepts into the broader business context and communicating value proposals to senior management.

Flottengrößen-Alternativen	Erwarteter Wert des Gewinns
Große Flotte	$100 \text{ Mio. \$} \times 0.2 + 90 \text{ Mio. \$} \times 0.5 + 80 \text{ Mio. \$} \times 0.3 = 89 \text{ Mio. \$}$
Mittlere Flotte	$60 \text{ Mio. \$} \times 0.2 + 120 \text{ Mio. \$} \times 0.5 + 100 \text{ Mio. \$} \times 0.3 = 102 \text{ Mio. \$}$
Kleine Flotte	$30 \text{ Mio. \$} \times 0.2 + 90 \text{ Mio. \$} \times 0.5 + 140 \text{ Mio. \$} \times 0.3 = 93 \text{ Mio. \$}$

Tabelle 3. Wert des Gewinnerwartung für die einzelnen Flottengrößenszenarien.

tengrößenoptionen für drei mögliche Erz-/Abraumverhältnisszenarien mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit zeigt. Es ist wichtig, diese Wahrscheinlichkeiten sorgfältig zu bewerten und dabei typische kognitive Verzerrungen wie den Ankereffekt (5) zu vermeiden. In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Erz-/Abraumverhältnissen kann das Studienteam die Größe der jeweils erforderlichen Fahrzeugflotte ermitteln. Tabelle 2 führt detailliert die Gewinne für alle potentiellen Ergebnisse auf, die sich aus unterschiedlichen Abbauplanungsszenarien für die jeweiligen Erz-/Abraumverhältnisse ergeben.

Angesichts des Kenntnisstandes, der sich in der Eintrittswahrscheinlichkeit der verschiedenen Erz-/Abraumverhältnisse widerspiegelt, besteht ein häufig eingesetztes Entscheidungskriterium darin, die Option mit der maximalen Gewinnerwartung zu wählen (6). Sie kann als der gewichtete Durchschnitt der mit jeder Entscheidungsoption erzielten Gewinne berechnet werden und wird in Tabelle 3 dargestellt. Ohne dass man also über zusätzliche Informationen über das wahre Erz-/Abraumverhältnis verfügt, wäre die bevorzugte Entscheidungsoption die mittlere Flottengröße mit einem erwarteten Gewinn von 102 Mio. \$.

Wenn man perfekte Informationen über das Erz-/Abraumverhältnis bekommen könnte, wäre es möglich, die optimale Lösung für das jeweilige Erz-/Abraumverhältnisszenario zu wählen, weil die Fahrzeugflotte angemessen dimensioniert werden kann. So erhält man den Entscheidungswert *mit* perfekten Informationen, der als gewichteter Durchschnitt der Gewinne bei optimaler Fahrzeugflottengröße berechnet wird, und damit ergibt sich der Erwartungswert bei perfekten Informationen wie folgt:

$$100 \text{ Mio. \$} \times 0.2 + 120 \text{ Mio. \$} \times 0.5 + 140 \text{ Mio. \$} \times 0.3 = \underline{122 \text{ Mio. \$}}$$

Der Erwartungswert der perfekten Informationen („Expected Value of Perfect Information“, EVPI) beschreibt die Wertschöpfung durch Beschaffung perfekter Informationen über die Faktoren, die die Entscheidungsfindung beeinflussen. Er wird berechnet als:

$$\begin{aligned} \text{EVPI} &= \text{Erwartungswert (EW) der Entscheidung} \\ &\text{mit perfekter Information} - \text{EW ohne perfekte Information} = \\ &122 \text{ Mio. \$} - 102 \text{ Mio. \$} = \underline{20 \text{ Mio. \$}} \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass das Team, das die Machbarkeitsstudie durchführt, in diesem Beispiel höchstens 20 Mio. \$ für zusätzliche Informationen über das Erz-/Abraumverhältnis bezahlen sollte. Weil

The example application in an open pit bulk mining operation with consistent ore over-recovery illustrates the large value potential of an improved resource model that enables a leaner supply chain operation. Even with considerable exploration spending the return on investment is impressive. However, teams need to be mindful to maximize effectiveness of the drilling program as it is the key driver of value. For a balanced view of all options a cross-functional team should assess available levers for risk management in all parts of the supply chain.

Extending the example to a more general case the value of information concept can support decision making including the question of value-added through additional geology data. The Expected Value of Perfect Information helps establishing upper bounds for spending on data and guides the study team regarding value drivers.

Informationen in der Praxis nie perfekt sind, muss man eine Res-tunsicherheit in Betracht ziehen. Als Faustregel gilt, dass man nicht mehr als die Hälfte des EVPI ausgeben sollte, d. h. hier 10 Mio. \$.

Fazit

Explorationsaufwendungen stehen unter Druck, wenn der Rohstoffpreiszyklus am Tiefpunkt ist und Geologen müssen ihre be-antragten Ausgaben durch einen robusten Business Case rech-tfertigen. Die Engpasstheorie stellt einen intuitiven Ansatz dar, um Auswirkungen von Ungewissheiten im Ressourcenmodell in der Bergbaulieferkette auf die Kosten zu analysieren. Sie kann Fach-leute dabei unterstützen, technische Konzepte in den gesamten geschäftlichen Zusammenhang zu übertragen und deren Wert-haltigkeit gegenüber der Geschäftsleitung zu kommunizieren.

Das Anwendungsbeispiel für einen Tagebaubetrieb mit stän-diger überplanmäßiger Erzgewinnung zeigt das große Wertpo-tential eines verbesserten Ressourcenmodells, das einen schlan-keren Lieferkettenablauf ermöglicht. Selbst bei erheblichen Explorationsausgaben sind die Kapitalrenditen beeindruckend. Die Teams müssen jedoch sorgfältig darauf achten, die Effek-tivität des Bohrprogramms zu maximieren, weil es sich dabei um den zentralen Werttreiber handelt. Um eine ausgewogene Sicht auf alle Optionen zu gewährleisten, sollte ein interdisziplinäres Team die vorhandenen Möglichkeiten für das Risikomanagement in allen Bereichen der Lieferkette bewerten.

Bei einer Ausweitung des Beispiels auf einen allgemeineren Fall kann das Informationswertkonzept die Entscheidungsfin-dung und auch die Frage des Mehrwerts durch zusätzliche geo-logische Daten unterstützen. Der Erwartungswert der perfekten Informationen ist hilfreich, um die Ausgabenobergrenzen für Da-ten festzulegen und das Studienteam im Hinblick auf die Wert-treiber anzuleiten.

References / Quellenverzeichnis

- (1) <http://www.abs.gov.au/AUSSTATS/abs@.nsf/DetailsPage/8412.oMar%202015?OpenDocument>, last accessed 06/2015.
- (2) http://www.imf.org/external/np/res/commod/External_Data.xls, last accessed 6/2015.
- (3) Boucher, A., Dimitrakopoulos, R., Vargas-Guzman, J. A.: Joint Simu-lations, Optimal Drillhole Spacing and the Role of the Stockpile. In: Geostatistics, Banff 2004, pp 35 - 44, Springer, Netherlands, Quanti-tative Geology and Geostatistics 14, 2005.
- (4) Goldratt, E., Cox, J.: The Goal: A Process of Ongoing Improvement. North River Press, Great Barrington, 1984.
- (5) Tversky, A., Kahneman, D.: Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Science 185 (4157) 1974, pp 1124 - 1131.
- (6) Howard, R.A., Matheson, J.E. (eds.): Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis. Strategic Decisions Group, Menlo Park, California, 1984.

Author / Autor

Dipl.-Geol. Volker Osterholt (MPhil. Geostatistik),
Principal Consultant, Osterholt Consulting, Darmstadt, Germany