

Underground Cut-off Grade Optimisation in Narrow Vein Deposits Based on an Innovative Mine Design Algorithm

Cut-off grades are crucial strategic parameters in maximising a mine's net present value (NPV). As the state of the art underground cut-off grade optimisation approach is very time and resource consuming, this article presents a rapid innovative algorithm-based solution for the given problem. Based on a geological block model and given input parameters, the developed algorithmic approach automates the entire underground mine design and the financial evaluation, ultimately resulting in the identification of the optimum cut-off grade. The key element of

the algorithm is the translation of the three-dimensional problem into two dimensions, enabling the usage of Dijkstra's algorithm for the development design, allowing to compute a single mine design within three to four hours on a standard workstation. Due to the effortless repeatability and the resulting enhanced comparability based on the variable input parameters, the algorithm delineates a chance for improved long-term strategic planning in narrow vein open stopping operations with decreased time and resource consumption.

Optimierung untertägiger Bauwürdigkeitsgrenzen in Ganglagerstätten basierend auf einem innovativen Grubendesignalgorithmus

Bauwürdigkeitsgrenzen sind wichtige strategische Parameter für die Maximierung des Kapitalwerts eines Bergwerksbetriebs. Da die Optimierung untertägiger Bauwürdigkeitsgrenzen nach aktuellem Stand sehr zeit- und ressourcenintensiv ist, wird in diesem Artikel eine innovative algorithmusbasierte Lösung für diese Problematik vorgestellt. Aufbauend auf einem geologischen Blockmodell und festgelegten Eingangsgrößen ist das ganzheitliche Grubendesign sowie die darauffolgende finanzielle Bewertung automatisiert worden, sodass die optimale Bauwürdigkeitsgrenze gefunden werden kann. Zentrales Element des Algorithmus ist die Reduktion des dreidimensionalen Problems auf zwei Dimensi-

onen, wodurch es gelingt, ein einzelnes Grubenmodell innerhalb von nur drei bis vier Stunden auf einem Standardcomputer zu berechnen. Die Reduktion erlaubt die Anwendung des Dijkstra-Algorithmus zur automatisierten Erstellung der Ausrichtung. Aufgrund der leichten Reproduzierbarkeit der Grubenmodelle und den daraus resultierenden verbesserten Vergleichsmöglichkeiten der verschiedenen Eingangsparameter stellt der Algorithmus eine Chance zur verbesserten strategischen Langzeitplanung für den Teilsohlen-Weitungsbaubau in Ganglagerstätten dar. Das Ergebnis ist ein schnelles strategisches Planungstool für Managemententscheidungen.

0 The master's thesis emergence

This article is a summary of the underground cut-off grade optimisation of the first author's master's thesis "Cut-off Grade Calculation for Maximising Net Present Value at the Björkdal Gold Mine" conducted in collaboration of RWTH Aachen University and the Canadian natural resource company Mandalay Resources. The contact to Mandalay Resources was established through the European Mining Course's alumni network. Following a standard application procedure, a placement within the company was granted, resulting in a successful collaboration and the completion of the cut-off grade optimisation project at the Swedish Björkdal Gold Mine of Mandalay Resources.

1 Introduction and theoretical background

This article presents an innovative algorithm-based solution for underground cut-off grade optimisation. It was developed for

0 Zur Entstehung der Masterarbeit

Der vorliegende Artikel ist eine Zusammenfassung des Abschnitts über die Optimierung untertägiger Bauwürdigkeitsgrenzen der Masterarbeit „Berechnung von Bauwürdigkeitsgrenzen zur Maximierung des Kapitalwerts in der Goldmine Björkdal“ des erstgenannten Verfassers, die in Zusammenarbeit der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen mit dem kanadischen Rohstoffunternehmen Mandalay Resources erstellt wurde. Der Kontakt zu Mandalay Resources ist über das Alumninetzwerk des European Mining Courses zustande gekommen. Die Stelle für die Masterarbeit wurde nach einem typischen Bewerbungsverfahren vergeben. Die gute Zusammenarbeit resultierte im erfolgreichen Abschluss des Projekts zur Optimierung der Bauwürdigkeitsgrenzen im schwedischen Goldbergwerk Björkdal von Mandalay Resources.

Mandalay Resources' Björkdal Gold Mine located in northern Sweden. The mine produces gold in an open pit as well as in an adjacent underground operation, both mining gold from a narrow vein deposit.¹

A cut-off grade is a descriptive value differentiating material into two different courses of action, most often distinguishing ore from waste. Despite this simple definition, cut-off grades depict a vital interface between geology, finance and engineering. Thus, the interacting parameters should be thoroughly analysed, resulting in a cut-off grade strategy which is aligned with the company's objectives. For the case at hand and commonly used, the objective is the maximisation of the NPV. K. F. Lane was the first who recognised the importance of choosing the right cut-off grade to maximise the value of a mining operation instead of just breaking even (4, 5, 6) and mathematically derived an NPV optimised cut-off grade theory. Since Lane's first publication of his theory in 1964, various research papers relating to cut-off grades have been published, comprising additions and improvements to Lane's theory, as well as entirely new ideas. (1, 2, 3)

Although Lane's methodology and its extensions are theoretically suitable for underground operations, the application of the concept proves to be difficult in practice. This is particularly caused by the complexity of underground operations, the material's spatial distribution and the requirement of a grade-tonnage distribution. For open-pit, the distribution can be obtained using a Whittle pit shell. For an underground operation, it requires a cut-off grade based mine design beforehand, creating a circular reference. Poniewierski et al. established the state of the art underground cut-off grade optimisation approach which requires modelling and scheduling of the mine for a chosen set of cut-off grades (9). Based on a financial analysis of the mine designs, the optimal cut-off grade can be chosen. As this workflow is very time and resource consuming, the Stope Optimiser, an automated stope creation tool, was developed by Alford Mining Systems. However, due to the size of the Björkdal deposit, the software needed 21 days to compute the stope shapes. As the software does not create development drives, the development design and feasibility evaluation of the stopes remains manual. Based on the limited timeline of the project, a more rapid approach was required to produce a sufficient number of mine designs required for a reliable cut-off grade optimisation. (1, 7, 8, 9)

2 Mine design algorithm

In accordance with the state of the art concept and in order to analyse a wide range of cut-off grades rapidly, an approach was developed, automating the entire mine design of a complex deposit. The algorithm is based on pre-set cut-off grades, the underlying data originating from the block model, including attributes such as gold grade, density, mining status and coordinates. Based on the resultant stope and development grade tonnage distribution as well as the predetermined financial parameters, the NPV is calculated. From this the optimum cut-off grade can be identified.

¹ This article is a summary of the underground solution of a 2016 conducted master's thesis, therefore only insights as recent as 2016 were included in the developed underground cut-off grade optimisation algorithm.

1 Einleitung und theoretischer Hintergrund

Für die Optimierung untertägiger Bauwürdigkeitsgrenzen wird in diesem Artikel eine innovative computergestützte Lösung vorgestellt. Der hierfür erstellte Algorithmus wurde für das in Nord-schweden gelegene Goldbergwerk Björkdal entwickelt, welches von Mandalay Resources betrieben wird. In einem übertägigen und untertägigen Bergwerksbetrieb wird dort Golderz aus einer schmaladrigen Ganglagerstätte abgebaut.¹

Eine Bauwürdigkeitsgrenze ist ein klassifizierender Wert, welcher Material in verschiedene Kategorien unterteilt. Am gebräuchlichsten ist die Unterscheidung in Erz und Nebengestein. Trotz dieser simplen Definition stellen Bauwürdigkeitsgrenzen eine wesentliche Schnittstelle zwischen der Geologie, dem Finanzwesen und der Technik dar. Um eine mit der Firmenpolitik übereinstimmende Strategie für die Optimierung der Bauwürdigkeitsgrenzen zu entwickeln, sollten die interagierenden Parameter ausführlich analysiert werden. Die Maximierung des Kapitalwerts ist ein in der Industrie gebräuchliches Ziel, welches auch von Mandalay Resources angestrebt wird. K. F. Lane war der Erste, der die Bedeutung der richtig gewählten Bauwürdigkeitsgrenze für die Maximierung des Kapitalwerts im Vergleich zur Kostendeckung (4, 5, 6) eines Bergwerks beschrieb und eine mathematische Optimierung für die Problematik entwickelte. Seit der Veröffentlichung von Lanes Theorie im Jahr 1964 sind verschiedene Ergänzungen und Neuentwicklungen in der Literatur dargelegt worden. (1, 2, 3)

Obwohl die von Lane konzipierte Methodik und deren Weiterentwicklung theoretisch für untertägige Bergwerksbetriebe nutzbar sind, erweist sich die Anwendung in der Praxis als schwierig. Dies liegt insbesondere an der Komplexität untertägiger Betriebe, an der räumlichen Verteilung des Materials und an dem Bedarf einer Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung. Letztere kann für einen Tagebau mithilfe der Whittle-Software berechnet werden. Für die Kenntnis der Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung einer Grube bedarf es hingegen eines Grubendesigns, welches wiederum auf einer Bauwürdigkeitsgrenze basiert, wodurch die Problematik in einem Zirkelbezug resultiert. Poniewierski et al. beschrieben daher die wiederholte Modellierung und Abbauplanung mit anschließender finanzieller Analyse untertägiger Betriebe basierend auf einer Reihe von Bauwürdigkeitsgrenzen als die bislang bestmögliche Methode zur Optimierung (9). Da diese Arbeitsschritte sehr zeit- und ressourcenintensiv sind, wurde der Stope Optimiser, eine Software für das optimierte Design von Weitungen, von Alford Mining Systems entwickelt. Aufgrund der Größe von Björkdals Lagerstätte benötigt die Software jedoch 21 Tage, um einen Satz an Weitungen zu berechnen. Zudem umfasst das Programm nicht die Erstellung der Ausrichtung, sodass die Wirtschaftlichkeitsprüfung der Weitungen ein manueller Arbeitsschritt bleibt. Angesichts der eingeschränkten Zeit für das Projekt wurde daher ein schnellerer Lösungsansatz benötigt, um eine ausreichende Anzahl von Grubendesigns für eine verlässliche Optimierung der Bauwürdigkeitsgrenzen zu entwickeln. (1, 7, 8, 9)

¹ Da dieser Artikel eine Zusammenfassung der Untertage-optimierung einer im Jahr 2016 verfassten Masterarbeit ist, wurden nur Erkenntnisse aus der Literatur für die Entwicklung des Optimierungsalgorithmus berücksichtigt, die bis zum Jahr 2016 veröffentlicht wurden.

The algorithm is designed based on the characteristics of Björkdal's deposit. It hosts fine to coarse grained free gold and is described as a swarm of sub-vertical to vertical quartz-veins with a thickness of a few centimetres to several metres (10, 11). As the rock mechanical conditions are regarded as excellent due to the high uniaxial compressive strength, the ore is mined by sub-level long-hole open stoping without backfilling. The mine has a vertical level spacing of 15 m, a development cross-cut size of 4.5 x 5.6 m, which is reduced to 3.7 x 4.9 m on on-vein drives. To accommodate the complexity of the deposit, the applied block model at Björkdal has a block size of 5 x 1 x 5 m. For the algorithm, the block model is re-blocked to the smallest stope mining unit (SMU) of 4 x 4 x 5 m, also approximating the development cross-sections.

As the challenge of automated underground mine designs is the intricacy of parameters and extensive amount of data, both have to be reduced in order to compute multiple designs within a matter of a day. For that purpose, the presented algorithm incorporates a break-down of the three-dimensional problem into two dimensions. It partitions the model into the different levels of the mine and projects stopes into the development layer of the level, losing the z-dimension of the data. The remaining two-dimensional point cloud is connected using Dijkstra's graph-theory based algorithm. This results in the development drives and thus in a complete mine design with knowledge about the spatial-dependent grade tonnage distribution. Please note that the introduced approach makes no claim of being a detailed or optimised mine design, rather being a rapid strategic planning tool for management decisions.

2.1 Stope design concept

Stope design is the key part of the reformulation of the three-dimensional problem into two dimensions. The mine is subdivided into levels with a level distance of 15 m. Subsequently, stope units are projected downwards on a set of rules, exclusively examining vertically aligned blocks based on the SMU and not calculating optimal stope shapes.

Simplified, the blocks that are above the pre-set cut-off grade are projected into the development level as 10 m (red) or 15 m

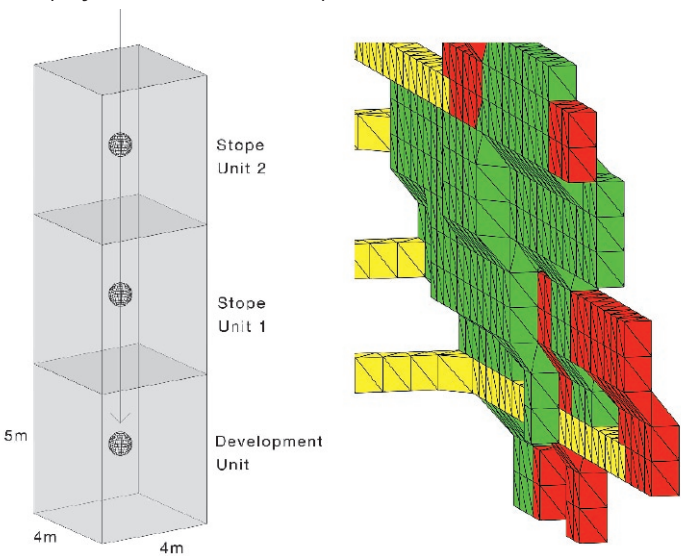


Fig. 1. Stope design concept and design result.
Bild 1. Konzept und Ergebnisse des Weitungsdessigns.

2 Grubendesignalgorithmus

Die Hauptzielsetzung des Algorithmus besteht darin, eine große Anzahl von Bauwürdigkeitsgrenzen möglichst schnell analysieren zu können. Im Ergebnis wird der aktuelle Stand der Technik zur Optimierung von Bauwürdigkeitsgrenzen signifikant erweitert, indem ein Ansatz zur Automatisierung des Grubendesigns einer komplexen Lagerstätte entwickelt worden ist. Dafür bedarf es vorgegebener Bauwürdigkeitsgrenzen, die in Kombination mit Daten aus dem Blockmodell die Datengrundlage des Algorithmus bilden. Benötigte Attribute aus dem Blockmodell sind z.B. der Goldgehalt, die Dichte, der Abbaustatus und die Koordinaten. Der Algorithmus liefert die bauwürdigkeitsgrenzbasierte Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung, die zusammen mit einstellbaren grundlegenden finanziellen Parametern die Kalkulation des Kapitalwerts ermöglicht. Ein Vergleich der Kapitalwerte verschiedener Bauwürdigkeitsgrenzen führt so zur Identifikation der optimalen Bauwürdigkeitsgrenze.

Der Algorithmus wurde für die Charakteristika der Björkdal-Lagerstätte entwickelt. Diese enthält fein- bis grobkörniges freies Gold und wird als Schar von subvertikalen bis vertikalen Quarzadern mit einer Mächtigkeit von einigen Zentimetern bis einigen Metern beschrieben (10, 11). Da die gebirgsmechanischen Eigenschaften und die Druckfestigkeit hervorragend sind, wird das Golderz im Teilsohlen-Weitungsbaue ohne Versatz mit einem Sohlenabstand von 15 m abgebaut. Die Hauptstrecken haben einen Querschnitt von 4,5 x 5,6 m, welcher in Abbaustrecken auf 3,7 x 4,9 m reduziert ist. Um die Komplexität der Lagerstätte abzubilden, hat das Blockmodell eine Blockgröße von 5 x 1 x 5 m. Für den entwickelten Algorithmus wurde das Modell auf eine Blockgröße von 4 x 4 x 5 m adaptiert. Dies entspricht der kleinsten abbaubaren Weitungseinheit (SMU) und nähert zusätzlich den Streckenquerschnitt an.

Die Herausforderung bei automatisierten Grubendesigns ist einerseits die Komplexität der Parameter und andererseits die sehr umfangreiche Datenmenge. Um ein Modell innerhalb weniger Stunden computergestützt erstellen zu können, muss beides bei gleichzeitiger Einhaltung einer ausreichenden Genauigkeit reduziert werden. Zur Verringerung der Datenmenge wird das dreidimensionale Problem um die vertikale Komponente reduziert. Dafür bedarf es einer Unterteilung des Bergwerks in die verschiedenen Sohlen und einer Projektion der Weitungen in die Ausrichtungsebene der einzelnen Sohlen. Die verbleibende zweidimensionale Punktwolke wird mit dem Dijkstra-Algorithmus, welcher auf der mathematischen Graphentheorie basiert, verbunden. Das Resultat ist die Ausrichtung. In Kombination mit der Weitungsprojektion ist ein ganzer untertägiger Abbau inklusive der Kenntnis über die ortsabhängige Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung modelliert worden. Vor dem Hintergrund der oben genannten Zielsetzung hat der entwickelte Ansatz nicht den Anspruch, ein detailliertes oder optimiertes Grubenmodell zu erzeugen, sondern stellt ein schnelles strategisches Planungstool für Managemententscheidungen dar.

2.1 Weitungsdessign

Der Hauptschritt bei der Reduzierung der Dimensionen ist das sogenannte Weitungsdessign, das Design kleinerer Abbaukammern. Hierfür wird der Abbau in die jeweiligen Sohlen unterteilt. Anschließend werden Weitungseinheiten basierend auf einer Reihe von Regeln in die Ausrichtungsebene der einzelnen Sohlen projiziert. Anstelle der Berechnung von optimalen Formen wer-

(green) high stopes, the weighted average gold grade and tonnage stored in a single data point (Figure 1). During the projection, a separation into stope inventory (above existing development) and new stoping areas is undertaken. Notably, due to the thin veins and excellent rock mechanical properties at the Björkdal mine, a rock mechanical restriction for the stope projection is not necessary. Based on the average grades and tonnages of the stopes as well as initially inserted financial data, the revenue of each block in the remaining two-dimensional level is calculated. The block's revenue is later required for the development design (Figure 1: yellow). The stope extends over four levels with the lowest part undeveloped due to its infeasibility.

Although the previously described procedures decreased the block model from the initial 3.8 million to 66,500 blocks per level, the decrease in computational time was not sufficient and thus further mathematical improvements were implemented, due to the text length limit, omitted in the article at hand.

2.2 Development design concept

The connection of stoping areas to existing development or to possible future ramp access points is a network design problem. The optimal path between the two, inflicting minimal cost or potentially a profit, is to be found. This is of special importance because on-vein development accounts for a significant amount of processed ore in Björkdal's thin-vein deposit. Therefore, the algorithm is expected to follow grade adhering areas rather than creating connections based on the shortest Euclidean distance.

A version of Dijkstra's algorithm, a shortest path algorithm, is used for the development design (12, 13). The algorithm, which is based on an undirected mathematical graph, is composed of nodes and their connections, called edges. The nodes illustrate the centroids or blocks of the block model, the edges the connections to the neighbouring blocks. The algorithm is bound to move along the edges to connect source nodes to target nodes, which translates to connecting access points (existing development, future ramp access points and potentially the newly computed development) to stopes in a mining context. The algorithm chooses the path based on the lowest combined edge weight, the weight depicting the cost or value of accessing the next block. Hence, dependent on the design of the edge weights, the algorithm can be used to find the maximum value path (maximum profit or minimum cost).

Dijkstra's algorithm is invoked twice. The first time in order to compute a stope profit to development cost ratio, allowing sorting of the targets. Based on the sorting, the second iteration accesses high value areas first, potentially decreasing development requirements for lower value areas, thus including more feasible material. Due to the existence of multiple starting points to access a new area, all possible maximum value paths are computed. The most profitable path is kept. Stopes that do not exceed their development cost are excluded. The described operations are iteratively executed for every level, checking that the newly created ramp is only included until feasible depths. The grade-tonnage information of all individual levels is summed up for the computation of a NPV, amongst others comprising diverse financial parameters, a development cut-off grade, a stockpiling option and factors for additional development (overbreak, pump and loading stations, turning bays etc.).

den ausschließlich vertikal fluchtende Weitungen basierend auf der SMU betrachtet.

Vereinfacht werden die Blöcke basierend auf der voreingestellten Bauwürdigkeitsgrenze als 10 m (rot) oder 15 m (grün) hohe Weitung in die Ausrichtungsebene projiziert (Bild 1). Der durchschnittliche Goldgehalt und die kumulierte Tonnage werden in einem einzelnen Datenpunkt gespeichert. Während des Schritts der Projektion wird außerdem zwischen Weitungsinventar (Weitungen über existierender Ausrichtung) und neuen Abbaufeldern unterschieden. Aufgrund der hervorragenden gebirgsmechanischen Eigenschaften in der Grube Björkdal ist keine Einschränkung für die Größe der Weitungen notwendig. Unter Berücksichtigung des durchschnittlichen Goldgehalts und der berechneten Tonnage der Weitungen sowie der eingesetzten finanziellen Parameter wird der Ertrag eines jeden Blocks in der verbleibenden zweidimensionalen Ebene berechnet. Dieser Wert wird für die automatisierte Auslegung der Ausrichtung benötigt (Bild 1: gelb). Die in Bild 1 dargestellte Weitung erstreckt sich über vier Sohlen. Der unwirtschaftliche unterste Teil wird durch den Algorithmus nicht erschlossen.

Obwohl die beschriebenen Maßnahmen die Datenmenge von insgesamt 3,8 Mio. Blöcken auf 66.500 Blöcke pro Sohle verringert haben, war die Reduktion für eine akzeptable Berechnungszeit noch nicht ausreichend. Daher wurden verschiedene weitere mathematische Verbesserungen zur Beschleunigung der Berechnungszeit vorgenommen. Eine detaillierte Beschreibung wäre an dieser Stelle zu umfangreich.

2.2 Ausrichtungsdesign

Die Verbindung von Weitungen zur existierenden Ausrichtung oder zu zukünftigen Wendelpunkten ist ein Netzwerkdesignproblem (Graphentheorie). Der optimale Pfad zwischen beiden muss bei minimalen Kosten oder nach Möglichkeit mit einem maximalen Profit gefunden werden. Dies ist von besonderer Bedeutung, da ein Großteil des aufbereiteten Erzes in Björkdal aus den Abbaustrecken stammt. Es ist daher notwendig, dass die optimale Planung der Ausrichtung die werthaltigsten Strecken anstelle der kürzesten räumlichen Distanz berücksichtigt.

Für Letzteres wird eine Version des Dijkstra-Algorithmus, ein Algorithmus der kürzesten Pfade, genutzt (12, 13). Der auf einem ungerichteten mathematischen Graphen beruhende Algorithmus besteht aus Knoten und deren Verbindungen, den Kanten. Die Knoten spiegeln den Mittelpunkt der Blöcke des Blockmodells wider und die Kanten die Verbindungen zu den benachbarten Blöcken. Der Algorithmus bewegt sich entlang der Kanten, um Ausgangspunkte mit Zielpunkten zu verbinden. In einen bergmännischen Zusammenhang übersetzt bedeutet dies das Verbinden von bestehenden Zugangspunkten (existierende Ausrichtung, zukünftige Wendelpunkte und neu berechnete Ausrichtung) mit geplanten Weitungen. Der Algorithmus folgt den Kanten mit dem niedrigsten kumulierten Kantengewicht. Dieses repräsentiert die Abbaukosten oder den Ertrag des nächsten Blocks. Je nach Auslegung des Kantengewichts kann der Algorithmus daher genutzt werden, um den Pfad mit dem maximalen Wert (maximaler Ertrag oder minimale Kosten) zu finden.

Im Detail wird der Dijkstra-Algorithmus zweimal aufgerufen. In der ersten Iteration wird ein Verhältnis des Weitungsertrags

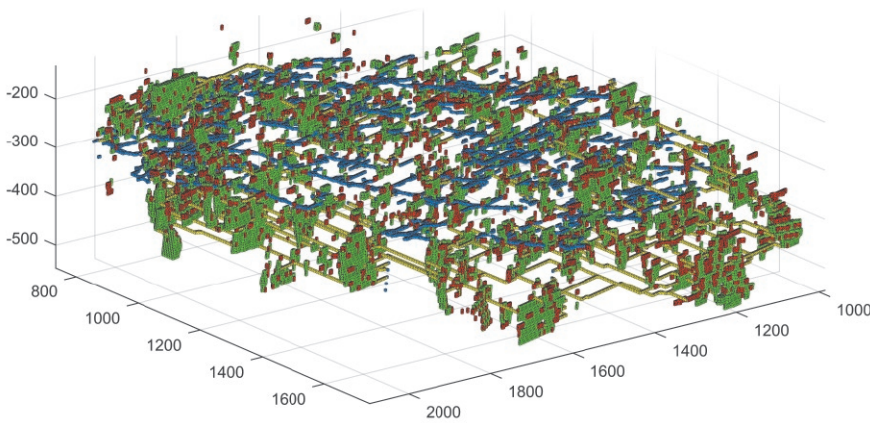


Fig. 2. Computed mine design for a cut-off grade of 1.0 g Au/t.
Bild 2. Grubenmodell für eine Bauwürdigkeitsgrenze von 1,0 g Au/t.

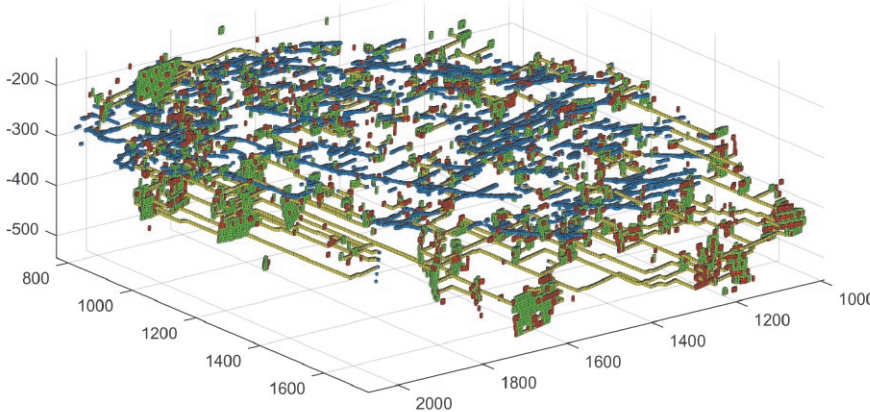


Fig. 3. Computed mine design for a cut-off grade of 1.55 g Au/t.
Bild 3. Grubenmodell für eine Bauwürdigkeitsgrenze von 1,55 g Au/t.

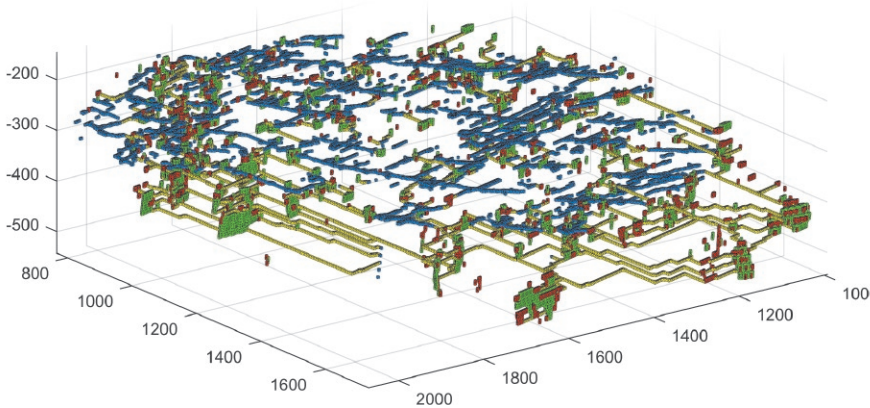


Fig. 4. Computed mine design for a cut-off grade of 2.0 g Au/t.
Bild 4. Grubenmodell für eine Bauwürdigkeitsgrenze von 2,0 g Au/t.

3 Mine design outcome

Figures 2, 3 and 4 delineate computed mine designs for cut-off grades of 1.0, 1.55 (maximum NPV) and 2.0 g Au/t, respectively. The evaluation was based on cut-off grades between 0.5 and 2.1 g Au/t with steps of 0.01. Blue blocks depict existing surveyed development and in the bottom levels the expected ramp ending points, the other colours conforming to the previous description. It can be seen that infeasible stopes are not connected via the development. Furthermore, the designs illustrate the level plunge and dip, mainly towards the right hand axis of the diagrams, corresponding to the real level orientations of the Björkdal Gold

zu den Ausrichtungskosten berechnet, um die Ziele nach diesem zu ordnen. Basierend auf diesem Verhältnis werden in der zweiten Iteration die werthaltigsten Weitungen zuerst erschlossen, sodass gegebenenfalls die benötigte Ausrichtung für weniger werthaltige Weitungen reduziert und dadurch mehr werthaltige Mineralisation berücksichtigt wird. Da immer mehrere Ausgangspunkte für die Erschließung neuer Areale bestehen, werden alle möglichen Pfade berechnet und der profitabelste gespeichert. Weitungen, deren Ertrag die Ausrichtungskosten nicht überschreiten, werden in der Planung ausgeschlossen. Die beschriebenen Maßnahmen werden iterativ für jede Sohle durchgeführt. In Abhängigkeit der Wendelkosten werden unerschlossene Sohlen nur bis in eine profitable Teufe berücksichtigt. Die Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung der einzelnen Sohlen wird für die Kalkulation des Kapitalwerts aufsummiert. Die Kapitalwertkalkulation umfasst u.a. diverse finanzielle Parameter, eine Ausrichtungsbauwürdigkeitsgrenze, eine Option zur Zwischenlagerung und Faktoren für zusätzliche Ausrichtung (Mehrausbruch, Pumpen- und Ladestation, Wendebuchten).

3 Ergebnisse des Grubendesignalgorithmus

Die Bilder 2, 3 und 4 zeigen die automatisch erstellten Grubenmodelle für die Bauwürdigkeitsgrenzen 1,0 g Au/t, 1,55 g Au/t (maximaler Kapitalwert) und 2,0 g Au/t. Die Auswertung der optimalen Bauwürdigkeitsgrenze beruht auf einer Analyse aller Werte von 0,5 bis 2,1 g Au/t in Schritten von 0,01 g Au/t. Blaue Blöcke zeigen die existierende, vermessene Ausrichtung und im unteren Teil der Abbildungen die zukünftigen Wendelendpunkte. Die anderen Farben entsprechen der vorherigen Beschreibung. In den Bildern lässt sich erkennen, dass unwirtschaftliche Weitungen nicht an die Ausrichtung angebunden sind. Des Weiteren zeigen die Bilder das reale Streichen und Einfallen der Sohlen in Björkdal. Der

Hauptunterschied zwischen den drei Grubenmodellen ist erwartungsgemäß die abnehmende Anzahl und Größe der Weitungen mit ansteigender Bauwürdigkeitsgrenze. Das Fehlen von Weitungen im zentralen Teil des Bergwerks liegt in den vorherigen Abbautätigkeiten begründet. Aufgrund von erwarteten hohen Erzgehalten im unteren Teil der Lagerstätte lassen sich dort große Weitungen erkennen.

4 Finanzielle Ergebnisse

Die Ergebnisse der finanziellen Evaluierung sind in Bild 5 dargestellt. Der höchste Kapitalwert wird mit einer Bauwürdigkeits-

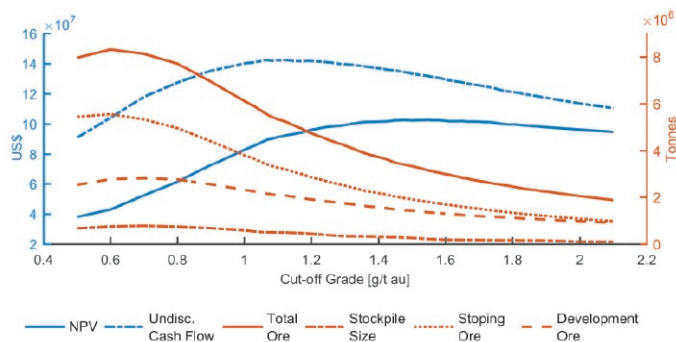


Fig. 5. Financial results.

Bild 5. Finanzielle Ergebnisse.

Mine. Evidently, the main difference between the designs is the decreasing stoping volume for an increasing cut-off grade. The absence of stopes in the central part of the deposit is resultant from the previous depletion, but large stopes can be noticed in the lower part of the deposit due to estimated high grade zones (lower drilling resolution).

4 Financial results

The financial evaluation of the cut-off grade optimisation is presented in Figure 5. The highest NPV is achieved with a cut-off grade of 1.55 g Au/t, whereas the highest undiscounted cash flow is attained with a cut-off grade of 1.07 g Au/t. The undiscounted cash flow corresponds to a full cost break-even cut-off grade, as every processed tonne increases the cash flow at this grade. The difference in NPV of 13 m US\$ illustrates the pitfall of the latter.

Furthermore, Figure 5 displays the different total tonnages. Evidently, higher ore tonnage is available with a lower cut-off grade. The exception in this case being between 0.5 and 0.6 g Au/t, which is caused by the condition of the algorithm to exclude infeasible material to prevent negatively geared (subsidised) ore reserves. Besides the illustrated factors, the algorithm can be utilised to examine the relationship between the cut-off grade and factors such as the mine life, the average grade or the recovered ounces. Furthermore, the algorithm can be utilised for the sensitivity analysis of the financial factors, exemplary displayed for the gold price in Figure 6.

5 Validation

For validation purposes, the results of the presented mine design algorithm are compared to accepted mine designs, the results illustrated in Table 1. The computational design shows an increased grade (5.2%) and stoping tonnage (19.2%) in comparison to Björkdal's reserve calculation from 2015, which can be explained by the different base block models (ongoing production vs. continuous exploration) and the exhaustiveness of the algorithm. A development cut-off grade of 1.15 g Au/t was applied in Björkdal's 2015 model, serving as basis for the development validation. The comparison indicates a strong deviation of 34.3% in tonnage and 18% in grade, clearly a result of the maximum value path algorithm, as manually not all paths are evaluated. Additionally, the designs of the computed algorithm were imported to Deswik and compared to the reserve stope shapes of the areas that have not been mined out, indicating a clear similarity.

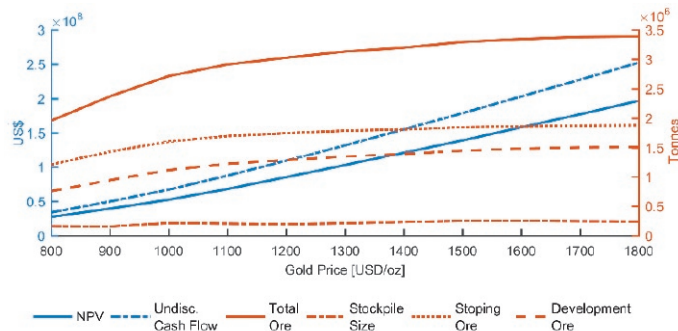


Fig. 6. Gold price sensitivity for a cut-off grade of 1.55 g Au/t.

Bild 6. Goldpreissensitivität (Bauwürdigkeitsgrenze: 1,55 g Au/t).

grenze von 1,55 g Au/t erreicht, wohingegen der höchste diskontierte Cashflow mit 1,07 g Au/t erzielt wird. Der diskontierte Cashflow entspricht einer vollkostendeckenden Bauwürdigkeitsgrenze, da ab diesem Gehalt jede aufbereitete Tonne Erz den Cashflow erhöht. Die Differenz der Kapitalwerte (diskontierter Cashflow gegenüber maximalem Kapitalwert) von 13 Mio. US-\$ zeigt den Nachteil einer vollkostendeckenden Bauwürdigkeitsgrenze.

Des Weiteren sind in Bild 5 die verschiedenen Gesamttonnagen dargestellt. Erwartungsgemäß ist mit einer niedrigeren Bauwürdigkeitsgrenze mehr Erz verfügbar. Die Ausnahme bildet in diesem Fall der Schritt von 0,5 zu 0,6 g Au/t, da der Algorithmus Lösungen, die zu unwirtschaftlich zu förderndem Material führen würden, ausschließt, um kein Material zu subventionieren. Neben den dargestellten Möglichkeiten können in Relation zur Bauwürdigkeitsgrenze weitere Größen analysiert werden, z.B. der durchschnittliche Goldgehalt, die Dauer der Abbautätigkeit oder die gewonnene Goldmenge. Außerdem lässt sich durch den Algorithmus der Einfluss der verschiedenen finanziellen und strategischen Parameter untersuchen, wie in Bild 6 beispielhaft für den Goldpreis dargestellt.

5 Validierung

Die Resultate des präsentierten Grubendesignalgorithmus wurden zur Validierung mit verschiedenen anerkannten Grubenmodellen verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Das automatisiert erstellte Modell enthält im Vergleich zu Björkdals Reservenberechnung aus dem Jahr 2015 einen höheren Goldgehalt (5,2%) und eine höhere Weitungstonnage (19,2%). Letzteres lässt sich auf die verschiedenen Basisblockmodelle (laufende Produktion gegenüber laufender Exploration) und die Untersuchung sämtlicher Areale durch den Algorithmus zurückführen. Da eine Ausrichtungsbauwürdigkeitsgrenze von 1,15 g Au/t der Reservenberechnung aus dem Jahr 2015 zugrunde lag, wird diese als Vergleichsbasis herangezogen. Hieraus ergibt sich eine erhebliche Abweichung von 34,3% bei der Tonnage und 18% beim Goldgehalt. Dies ist eindeutig ein Resultat des maximalen Wertepfads, da manuell nur unter großem Zeitaufwand alle möglichen Pfade untersucht werden können. Darüber hinaus wurden die Grubendesigns in die Modellierungssoftware Deswik importiert und mit dem Reservenmodell aus dem Jahr 2015 verglichen. Hierbei lässt sich eine deutliche Analogie der beiden Modelle erkennen.

Stoping Comparison	Stoping Cut-off Grade		Included Stope Tonnage	Included Stope Average Grade
Björkdal Reserve Calculation	1.26 g Au/t		2.1 Mt	2.54 g Au/t
Computed Design	1.26 g Au/t		2.6 Mt	2.68 g Au/t
Deviation	–		19.2%	5.2%
Stoping Comparison	Stoping Cut-off Grade		Total Stope Tonnage	Total Stope Average Grade
Stope Optimiser Computation	1.2 g Au/t		5.0 Mt	2.07 g Au/t
Computed Design	1.2 g Au/t		5.2 Mt	2.24 g Au/t
Deviation	–		3.85%	7.6%
Development Comparison	Stoping Cut-off Grade	Development Cut-off Grade	Development Ore Tonnage	Development Ore Average Grade
Björkdal Reserve Calculation	1.26 g Au/t	1.15 g Au/t	0.46 Mt	2.01 g Au/t
Computed Design	1.26 g Au/t	1.15 g Au/t	0.7 Mt	2.45 g Au/t
Deviation	–	–	34.3%	18%

Table 1. Validation results. // Tabelle 1. Ergebnisse der Validierung.

Furthermore, a completed design of the Stope Optimiser was used for the comparison of the results based on the same block model. As the Stope Optimiser does not disregard infeasible stopes, the entirety of computed stopes serves as a comparison basis. Interestingly, the computed mine design comprises a higher tonnage with a higher grade than the outcome of the Stope Optimiser. This is caused by the pre-set vertical slice interval of 15 m, correlating to Björkdal's level spacing, in the run of the Stope Optimiser, impeding the generation of stopes with less than 15 m height in contrary to the developed algorithm (10 and 15 m). If comparing only 15 m high areas, the computed mine designs (3.8 Mt at 2.21 g Au/t) include 18.9% less ounces than the actual optimisation of the Stope Optimiser. Nonetheless, the deviations of 3.85% in stope tonnage and 7.6% in stope grade display the usability of the developed algorithm. Additionally, the engineering department of the Björkdal Gold Mine predicated the accuracy and practicability of the mine designs and the outcome of the financial analysis.

Lastly, to test the applicability of the algorithm for undeveloped projects, the underground mine design algorithm was tested on an undepleted block model of the Björkdal Mine without existing openings. The computed design is comparable to the existing mine and the extracted grade tonnage distribution is in the range of Björkdal's historical production.

6 Discussion

Although the validation shows the applicability of the developed algorithm, the algorithm includes minor inaccuracies and drawbacks. Figure 7 indicates problematic vein settings for the calculation, resulting either in lost ore tonnage (if dismissed) or the inclusion of waste material if compared to technically feasible shapes. This is caused in figure 7a by the vertical stope projection and in figure 7b by the perpendicular movement of Dijkstra's algorithm, as the algorithm can only incorporate entire blocks. Furthermore, no incremental stoping cut-off grade for developed areas, e.g. a stoping break-even cut-off grade, is integrated, excluding marginal feasible ore. Additionally, in comparison to the Stope Optimiser, the stope generation is fixed to the development levels, excluding or diluting potentially feasible stopes with a development level at a different depth.

Although all previously described drawbacks potentially result in the inclusion of low-grade material or lost ore tonnage, the validation showed increased tonnage and grade, especially in

Des Weiteren wird der entwickelte Algorithmus auf Basis desselben Blockmodells mit einem Durchlauf des Stope Optimisers verglichen. Da der Stope Optimiser Weitungen, die aufgrund der erforderlichen Ausrichtung unwirtschaftlich sind, nicht ausschließt, wird die Gesamtheit der Weitungen als Vergleichsbasis herangezogen. Interessanterweise zeigt die Summe der Weitungen des entwickelten Algorithmus eine höhere Tonnage und einen höheren Goldgehalt als das Ergebnis des Stope Optimisers. Das voreingestellte Abbauscheibenintervall von 15 m beim Durchlauf des Stope Optimisers, welches mit dem Sohlenabstand von Björkdal korreliert, verhindert die Generierung kleinerer Weitungen im Vergleich zum entwickelten Algorithmus (10 und 15 m). Wenn nur 15 m hohe Weitungen verglichen werden, erfasst das entwickelte Grubendesign (3,8 Mio. t bei 2,21 g Au/t) 18,9% weniger Gold als der Stope Optimiser. Dennoch zeigen die Abweichungen von 3,85% in der Weitungstonnage und 7,6% im Goldgehalt die Anwendbarkeit des entwickelten Algorithmus. Zudem hat die technische Abteilung des Bergwerksbetriebs Björkdal die Genauigkeit und praktische Anwendbarkeit der Grubenmodelle und der finanziellen Ergebnisse bestätigt.

Um die Anwendbarkeit des Algorithmus für Greenfield-Projekte zu testen, wurde das Blockmodell des Bergwerks Björkdal um existierende Ausrichtung bereinigt und der Algorithmus auf dieser Basis ausgeführt. Das erstellte Modell ist vergleichbar mit dem existierenden Abbau. Die Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung liegt in der Größenordnung der historischen Produktion.

6 Diskussion

Obwohl die Validierung die Anwendbarkeit belegt, enthält der Algorithmus erwartungsgemäß verschiedene Ungenauigkeiten und Schwächen, die sich aus der beschriebenen Reduktion der Berechnungszeit ergeben. Bild 7 zeigt eine für den Algorithmus problematische Ausrichtung der Erzadern. In der Realität sind die Adern technisch abbaubar. Im Gegensatz hierzu ergibt die Berechnung entweder einen Tonnageverlust oder eine Inklusion von taubem Gestein. In Bild 7a ist dies aufgrund der vertikalen Weitungsprojektion und in Bild 7b aufgrund der rechtwinkligen Bewegungseinschränkung des Dijkstra-Algorithmus – es können nur ganze Blöcke inkludiert werden – der Fall. Darüber hinaus ist keine inkrementelle Bauwürdigkeitsgrenze für Weitungen in der Nähe zur Ausrichtung in den Algorithmus integriert, wodurch be-

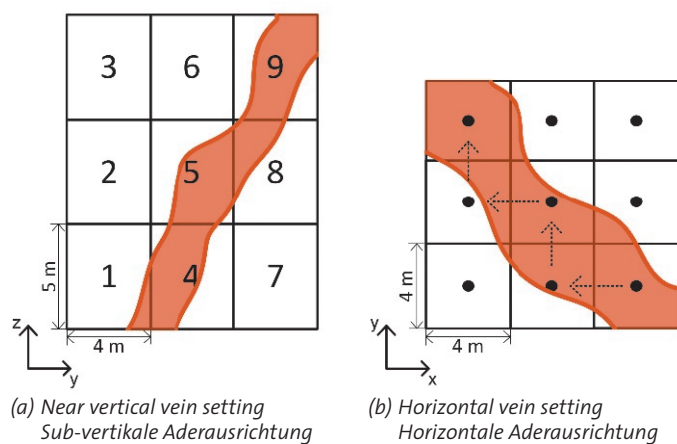


Fig. 7. Problematic vein setting. // Bild 7. Problematische Aderausrichtung.

comparison to the manual design indicating the low occurrence of the problematic scenarios. Apart from the design drawbacks, no scheduling tool was developed, decreasing the accuracy of the NPV calculation. The latter is based on the grade tonnage distribution, in line with the in literature accepted approach of Lane (2).

7 Conclusion

The main advantage of the developed tool is the fully automated repetitive generation of underground mine designs in three to four hours based on a block model with 3.8 million blocks on a standard workstation. The rapid computation of different mine designs without manual interference preserves human resources and impedes the inclusion of manual deviations, allowing a direct comparison of varying strategic and financial parameters, including the identification of the optimum cut-off grade. Since the algorithm produces realistic designs for the Björkdal Gold Mine, a test on similar deposit types is advised to prove the general applicability of the developed tool for long-term strategic planning, in particular in the course of preliminary economic assessments or scoping studies to rapidly evaluate various scenarios.

References / Quellenverzeichnis

- (1) Hall, B.: Cut-off Grades and Optimising the Strategic Mine Plan. Spectrum 20, 2014. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Carlton, Australia.
- (2) Lane, K. F.: Choosing the optimum cut-off grade. Colorado School of Mines Quarterly 59 (4), 1964, pp 811–829.
- (3) Lane, K. F.: The Economic Definition of Ore – Cut-off Grades in Theory and Practice. Mining Journal Books, 1988, London/United Kingdom.
- (4) Hall, B. E.: How mining companies improve share price by destroying shareholder value. In: Proceedings CIM Mining Conference and Exhibition, 2003, pp. 1–17.
- (5) Poniewierski, J.; Hall, B.: Break-even is broken. AusIMM Bulletin (Jun 2016).
- (6) Poniewierski, J.: Negatively geared ore reserves – a major peril of the break-even cut-off grade. In: Project Evaluation Conference, 2016, pp. 236–247.
- (7) Alford, C.; Brazil, M.; Lee, D. H.: Optimisation in underground mining. In: Handbook of operations research in natural resources. Springer, 2007, pp. 561–577.
- (8) Alford, C.; Hall, B.: Stope optimisation tools for selection of optimum cut-off grade in underground mine design. In: Proceedings of project evaluation conference, 2009, Melbourne/Australia, pp. 137–144.
- (9) Poniewierski, J.; MacSparran, G.; Sheppard, I.: Optimisation of cut-off grade at Mount Isa Mine Limited's Enterprise mine. Mine Planning and Equipment Selection, 2003, pp 531–538.
- (10) Broman, C.; Billström, K.; Gustavsson, K.; Fallick, A.: Fluid inclusions, stable isotopes and gold deposition at Björkdal, northern Sweden. Mineralium Deposita 29 (2), 1994, pp 139–149.
- (11) Dowd, P.: Björkdal gold-mining project, northern Sweden. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. Vol. 7, 1996, pp. A149–A163.
- (12) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik 1 (1), 1959, pp 269–271.
- (13) Bauer, R.; Delling, D.; Sanders, P.; Schieferdecker, D.; Schultes, D.; Wagner, D.: Combining hierarchical and goal-directed speed-up techniques for Dijkstra's algorithm. Journal of Experimental Algorithmics 15, 2010. 2.3:2.1–2.3:2.31.

dingt bauwürdiges Erz ausgelassen wird. Zudem ist im Vergleich zum Stope Optimiser der Zugang zu Weitungen auf die Ausrichtungsebene fixiert. Dadurch werden potentiell wirtschaftliche Weitungen mit der Ausrichtung auf einer anderen Teufenlage verdünnt oder ausgeschlossen.

Obwohl die dargestellten Nachteile eventuell in der Inklusion von Tonnage mit niedrigem Erzgehalt oder im Verlust von Erz resultieren, zeigt die Validierung dennoch erhöhte Tonnage bei höherem Erzgehalt, insbesondere im Vergleich zum manuellen Design. Dies verdeutlicht die geringe Auftretswahrscheinlichkeit der dargestellten Schwächen. Da kein Abbauplanungstool für den Algorithmus entwickelt wurde, erhöht sich die Ungenauigkeit der Kapitalwertberechnung. Diese basiert auf der Erzgehalt/Tonnagen-Verteilung in Anlehnung an den aus der Literatur bekannten Ansatz von Lane (2).

7 Fazit

In diesem Artikel ist eine innovative algorithmusbasierte Lösung für die Identifikation und Optimierung untertägiger Bauwürdigkeitsgrenzen vorgestellt worden. Der größte Vorteil des entwickelten Algorithmus ist die vollautomatisierte schnelle iterative Generierung von Grubenmodellen in drei bis vier Stunden auf einem Standardcomputer. Diese automatisierte Grubenmodellierung schont einerseits Ressourcen und verhindert andererseits den Einfluss manueller Abweichungen, sodass ein direkter Vergleich verschiedener strategischer und finanzieller Parameter möglich wird. Der Algorithmus kann insbesondere bei wirtschaftlichen Erstbewertungen oder bei vorläufigen Machbarkeitsstudien eingesetzt werden, um schnell verschiedene Szenarien zu evaluieren.

Der vorgestellte Algorithmus hat sich unter realen Bedingungen bewährt, indem realistische Grubendesigns für das Goldbergwerk Björkdal generiert worden sind. Als Nächstes wird ein Test in einer ähnlichen Lagerstätte empfohlen, um die generelle Anwendbarkeit für die strategische Langzeitplanung zu prüfen.

Authors / Autoren

Kian Will M. Sc. MBA, Strategic Sourcing Manager Basic Chemicals, Covestro Deutschland AG, Leverkusen/Germany, Silja Vendla M. Sc., Senior Process and Product Technologist, Tata Steel IJmuiden B. V., IJmuiden/Netherlands