

Assessment of Remedial Options for Sustainable Operation of the Mirny Mine

The Mirny Mine is located in the northern Russia, where arctic conditions are present year-round. It is a large, open-pit and underground diamond mine with an open-pit depth of approximately 500 m below ground surface and a current depth of the underground mine workings of approximately 900 m below ground surface.

From the ground surface, shallow geologic units with approximately 350 m thickness are generally under permafrost conditions. The key water-producing unit is C12ic. This unit is at a depth of 237 to 515 m below ground. It consists of limestone with extensive sets of fractures and has high salinity. The aquifer

is the main source of groundwater to the open pit and underground workings. The mine is currently flooded because of the failure of the crown pillar. Studies were conducted to assess the options of remediating the flooded underground mines. This paper assesses three options, including active dewatering, grouting, and freezing. A trade-off study of these three options was further conducted, which assessed the following aspects:

1. Has the alternative been conducted on a similar scale at other mines?
2. Is the alternative logistically feasible?
3. What are the risks for each alternative?

Bewertung von Sanierungsoptionen für einen nachhaltigen Betrieb des Bergwerks Mirny

Das Bergwerk Mirny befindet sich im Norden Russlands, wo ganzjährig arktisches Klima herrscht. Es handelt sich um eine große Diamantenmine im Tage- und Tiefbau, mit einer Teufe des Tagebaus von ca. 500 m unter der Erdoberfläche und einer aktuellen Teufe des Tiefbaus von ca. 900 m unter der Erdoberfläche.

An der Erdoberfläche befinden sich flache geologische Schichten mit ca. 350 m Mächtigkeit, im Normalfall unter Permafrostbedingungen. Die wichtigste wasserführende Schicht ist C12ic. Diese Schicht befindet sich in einer Teufe von 237 bis 515 m. Sie besteht aus einem Kalkstein mit ausgedehnten Kluftsystemen und weist einen hohen Salzgehalt auf. Dieser Grundwasserleiter ist die Hauptquelle des Grundwassers, welches in den Tagebau und den

unterirdischen Grubenteil eintritt. Das Bergwerk ist derzeit aufgrund des Versagens des horizontalen Sicherheitspfeilers geflutet. Es wurden Studien durchgeführt, um die Möglichkeiten der Sanierung der gefluteten Grube zu bewerten. In diesem Artikel werden drei Methoden, darunter aktive Entwässerung, Verpressen und Einfrieren, bewertet. Des Weiteren wurde eine Trade-Off Analyse dieser drei Methoden durchgeführt, in der die folgenden Aspekte bewertet wurden:

1. Wurde die Methode in ähnlichem Umfang in anderen Bergwerken durchgeführt?
2. Ist die Methode logistisch machbar?
3. Was sind die Risiken der jeweiligen Methode?

1 Introduction

The Mirny Mine (Figure 1) is located in northern Russia, where arctic conditions are present year-round. It is a diamond mine operation that started in 1957 as an open pit. The surface diameter of the mine is approximately 1,200 m, as shown in Figure 2. The depth of the final open pit is approximately 525 m below ground surface, or -190 m absolute mark (m abs.). Figure 2 also shows the groundwater flow model domain, the locations of two groundwater injection sites, and the topography within the groundwater flow model domain.

Below the permafrost layer, a confined aquifer was encountered during mining of the lower portion of the open pit. The top elevation of the confined aquifer ranges from 25 to 65 m abs. The

1 Einleitung

Das Bergwerk Mirny befindet sich im Norden Russlands, wo ganzjährig arktisches Klima herrscht (Bild 1). Das Bergwerk ist eine Diamantenmine, welche im Jahr 1957 als Tagebau begonnen wurde. Der Oberflächendurchmesser des Tagebaus beträgt etwa 1.200 m, wie in Bild 1 dargestellt. Die Teufe des endgültigen Tagebaus liegt bei ca. 525 m unter Geländeoberfläche, bzw. bei -190 m über Normalnull (m über NN). Bild 2 zeigt auch das Gebiet des Grundwasserströmungsmodells und dessen Topografie sowie die Standorte von zwei Grundwasserinjektionsstellen.

Unterhalb der Permafrostschicht wurde beim Abbau des unteren Teils des Tagebaus ein gespannter Grundwasserleiter angetroffen. Die Oberkante des gespannten Grundwasserleiters liegt

bottom elevation of the confined aquifer ranges from -180 to -120 m abs. The groundwater head of the aquifer ranges from 212 to 247 m abs., which is approximately 200 m higher than the top of the aquifer. The transmissivity of the aquifer ranges from 60 to 120 m^2/day .

After the completion of the open-pit operation, the mine transitioned to underground mining. The underground mine workings have been flooded since 2017 because of the failure of the crown pillar and the inflow of water from the open pit to the underground workings. Prior to the flooding of the mine, the pumping rate from the open pit was approximately $1,200 \text{ m}^3/\text{h}$. The water that was pumped from the open pit was injected into the groundwater system, as shown in Figure 2.

2 Hydrogeologic conditions

The figures 3 and 4 schematically show the major groundwater components that control the dewatering rates. These components include the lithology, geologic structures, recharge, groundwater extraction, groundwater reinjection, open pit, and underground workings.

As shown in the figures 3 and 4, the geologic units are from the Quaternary sediment (top) to Archaea-Lower Proterozoic basement rock (bottom). The geologic units are generally horizontal surrounding the kimberlite pipe. The key geologic units from the ground surface to the depth at the mine include the following:

1. C3hl, C2mr, and C2mt: These units exist across the mine area, with a thickness of approximately 400 m. Itasca assumes that these units are under permafrost conditions and have low permeability.

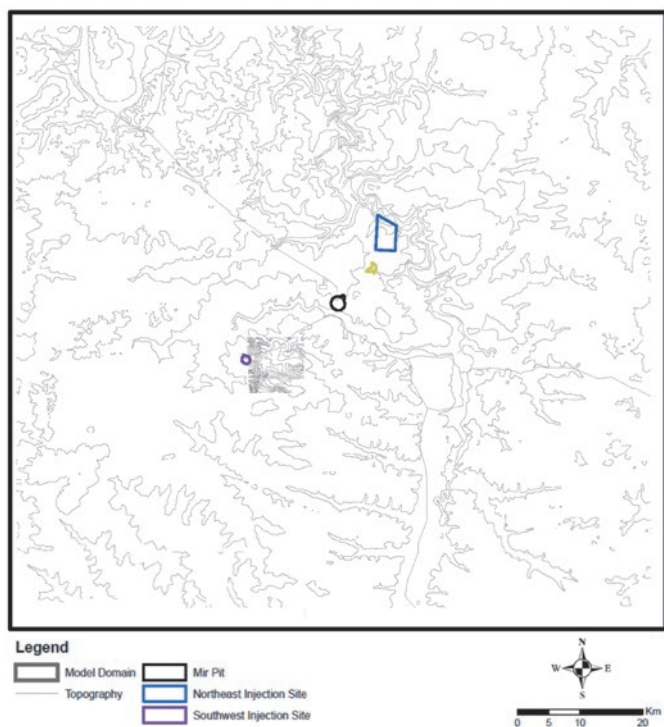


Fig. 2. Base map showing the location of the mine and injection sites. Bild 2. Übersichtskarte mit der Lage des Bergwerks und der Injektionsstellen. Source/Quelle: Itasca



Fig. 1. The Mirny Mine. // Bild 1. Das Bergwerk Mirny. Photo/Foto: Itasca

zwischen 25 und 65 m über NN und die Unterkante des gespannten Grundwasserleiters reicht von -180 bis -120 m über NN. Die Grundwasserhöhe des Grundwasserleiters reicht von 212 bis 247 m über NN und liegt damit ca. 200 m höher als die Oberkante des Grundwasserleiters. Die Transmissivität des Grundwasserleiters liegt im Bereich von 60 bis 120 m^2/Tag .

Nach dem Beenden des Tagebaubetriebs wurde das Bergwerk auf Tiefbau umgestellt. Die untertägigen Grubenbereiche sind seit 2017 aufgrund des Versagens des horizontalen Stützpfeilers und des Zuflusses von Wasser aus dem Tagebau in das Grubengebäude geflutet. Vor der Flutung des Bergwerks betrug die Förderrate des Wassers aus dem Tagebau ca. $1.200 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Wasser, das aus dem Tagebau gepumpt wurde, wurde in das Grundwassersystem injiziert, wie in Bild 2 dargestellt.

2 Hydrogeologische Zustände

Die Bilder 3 und 4 zeigen schematisch die wichtigsten Grundwasserkomponenten, welche die Entwässerungsraten steuern. Zu diesen Komponenten gehören die Lithologie, die geologischen Strukturen, die Grundwasseranreicherung, die Grundwasserabnahme sowie die Grundwasserinjektion des Tage- und des Tiefbaus.

Wie in den Bildern 3 und 4 dargestellt, umfassen die geologischen Schichten quartäres Sediment (oben) sowie archaisch-niederproterozoisches Grundgebirge (unten). Die geologischen Schichten liegen im Allgemeinen horizontal und umgeben den Kimberlit-Erzkörper. Die wichtigsten geologischen Schichten von der Tagesoberfläche bis zur maximalen Teufe des Bergwerks sind die Folgenden:

1. C3hl, C2mr, und C2mt: Diese Schichten sind im gesamten Areal des Bergwerks vorhanden und haben eine Mächtigkeit von etwa 400 m. Itasca geht davon aus, dass diese Schichten unter Permafrostbedingungen liegen und eine geringe Durchlässigkeit aufweisen.
2. C12ic/MIBK: Diese Schicht ist der Hauptgrundwasserleiter des Grubenbereichs und stellt die Hauptquelle des Grundwassers dar, das in das Bergwerk eintritt. Die Daten deuten darauf hin, dass der gespannte Grundwasserleiter durchgängig ist und eine variierende Mächtigkeit aufweist. Die interpolierte Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist in Bild 4 dargestellt. Der Grundwasserleiter ist inhomogen. Außerdem wird das

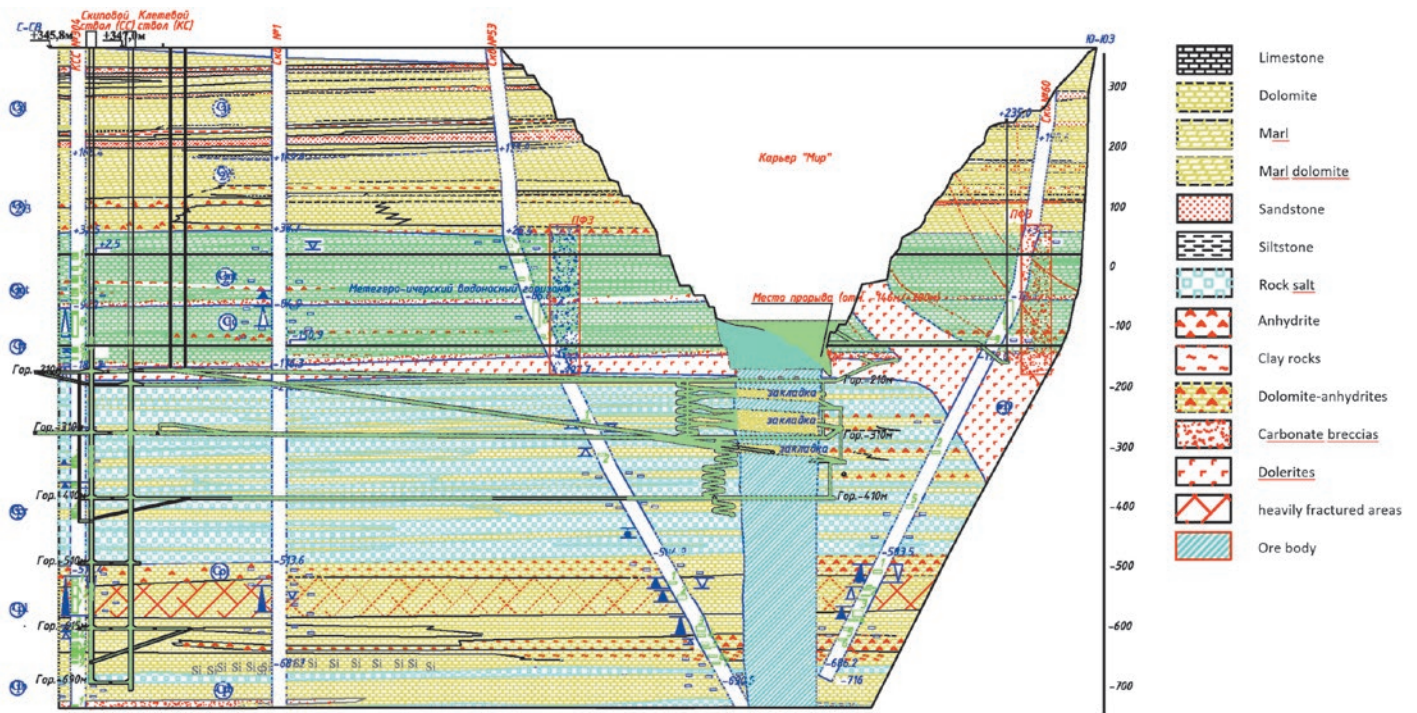


Fig. 3. Geologic settings of the mine in cross section. // Bild 3. Geologische Verhältnisse des Bergwerks im Querschnitt. Source/Quelle: Itasca

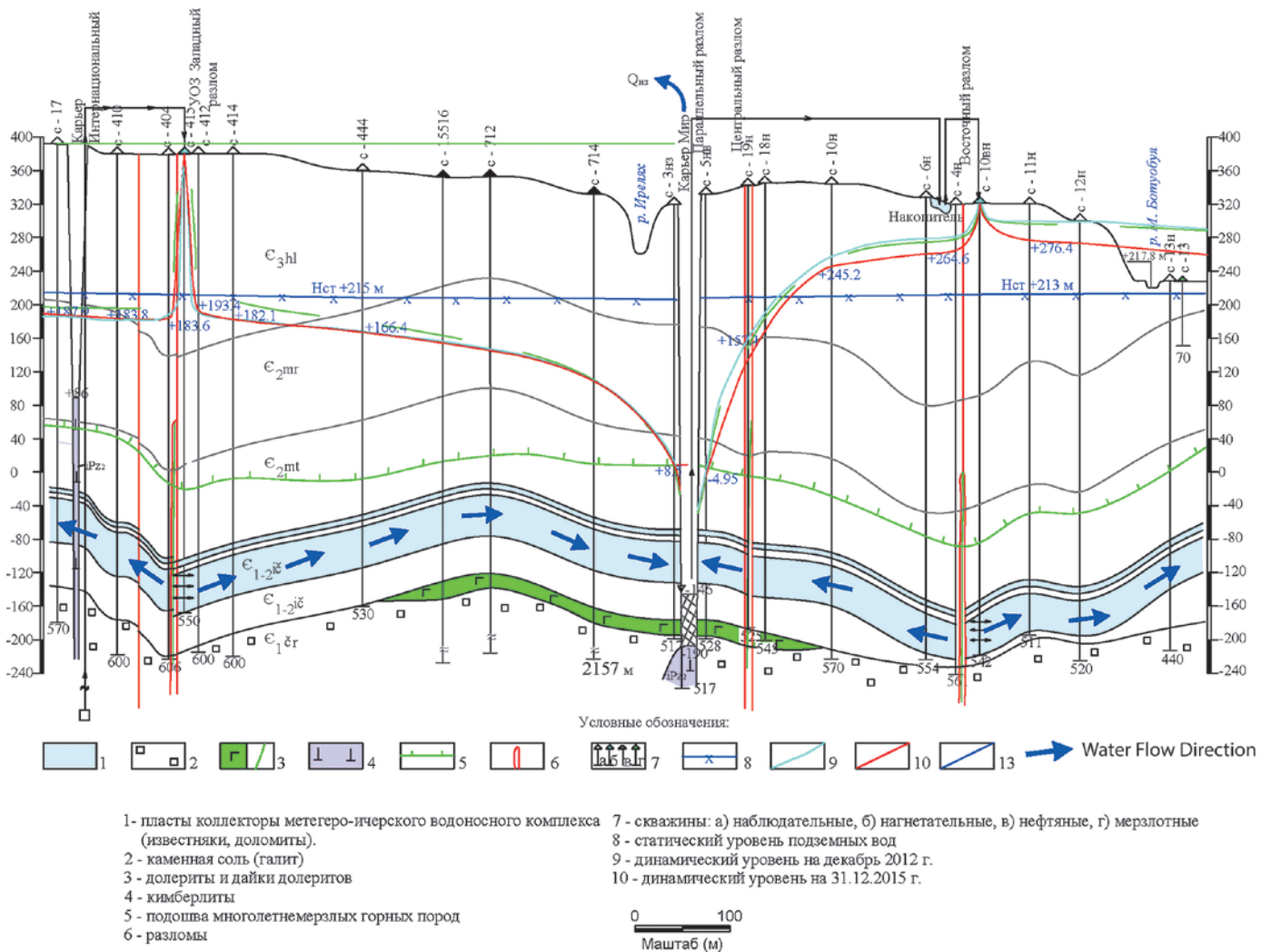


Fig. 4. Main components of the conceptual hydrogeologic model.

Bild 4. Hauptkomponenten des konzeptionellen hydrogeologischen Modells. Source/Quelle: Itasca

2. C12ic/MIBK: This unit is the main aquifer of the mine area, and it provides the main source of groundwater that seeps into the mine. Data suggests that the confined aquifer is continuous with varying thickness. The interpolated thickness of the aquifer is shown in figure 4. The aquifer is not homogenous. In addition, as shown in figure 4, the existence of different hydrogeologic zones, probably divided by faults, is also supported by the pumping rates of different dewatering (Figure 12). The pumping tests and measured groundwater levels also indicate that the aquifer is pressurized with more than 2 MPa of water pressure. For the recommission of the mine, it is critical to reduce the pressure head of the confined aquifer and the seepage to the open pit and underground workings.
3. C1cr, C1ol, and C1tb: These units have a much lower permeability than the aquifer.
4. Lower aquifer: Limited information is available regarding this unit. Available information suggest that the lower aquifer has a relatively lower hydraulic conductivity (K) value than that of the MIBK aquifer.
5. Basement rock: It is assumed that the geologic unit below the lower aquifer has a very low permeability.
6. Kimberlite and halo zone: The kimberlite unit is considered to be less permeable than the aquifer. However, the halo zone is simulated as a highly permeable unit.

As also illustrated in figure 4, prior to the mine flooding, the water in the pit was pumped from the open pit through a sump pump. The water was reinjected to the same aquifer in the injection field.

There are four confirmed faults in the vicinity of the mine, all of which have a north-south strike direction: West, Parallel,

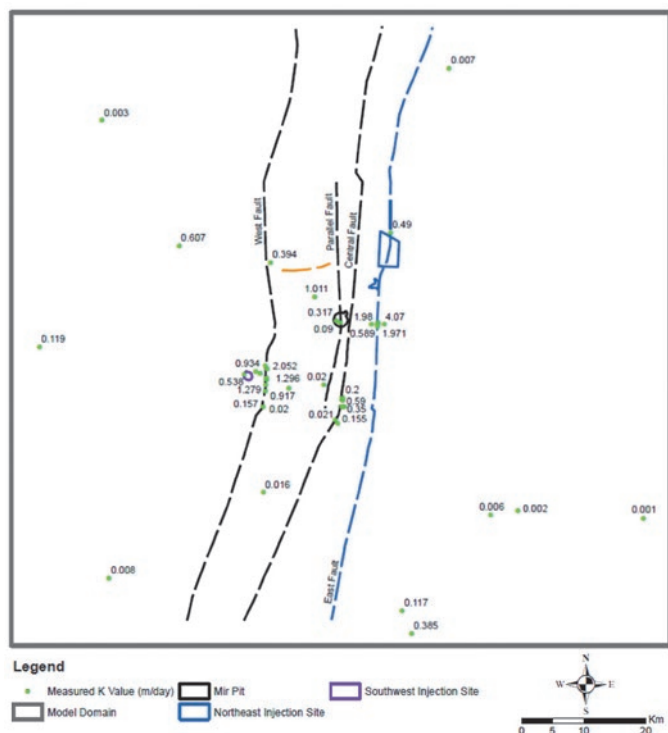


Fig. 5. Distribution of measured hydraulic conductivity values.
Bild 5. Verteilung der gemessenen hydraulischen Leitfähigkeit.
Source/Quelle: Itasca

Auftreten unterschiedlicher hydrogeologischer Zonen, die wahrscheinlich durch Störungen unterteilt sind, wie in Bild 4 gezeigt, auch durch die Förderraten der verschiedenen Entwässerungen (Bild 12) bekräftigt.

Die Pumpversuche und die gemessenen Grundwasserstände zeigen ebenfalls, dass der Grundwasserleiter mit mehr als 2 MPa Wasserdruck unter Spannung steht. Für die Wiederinbetriebnahme des Bergwerks ist es entscheidend, die Druckhöhe des gespannten Druckwasserleiters und die Zutritte im Tagebau und im Tiefbau zu reduzieren.

3. C1cr, C1ol, und C1tb: Diese Schichten haben eine viel geringere Permeabilität als der Grundwasserleiter.
4. Unterer Aquifer: Über diese Schicht sind nur begrenzte Informationen verfügbar. Die vorhandenen Informationen deuten darauf hin, dass der untere Grundwasserleiter einen niedrigeren Wert für die hydraulische Leitfähigkeit (K) als der MIBK-Grundwasserleiter aufweist.
5. Grundgebirge: Es wird davon ausgegangen, dass diese Schicht unterhalb des unteren Aquifers eine sehr geringe Durchlässigkeit aufweist.
6. Kimberlit und Halokline: Die Kimberlit-Schicht wird als weniger durchlässig als der Grundwasserleiter eingestuft. Die Halokline wird jedoch als hoch durchlässige Schicht simuliert.

Wie auch in Bild 4 dargestellt, wurde vor der Flutung der Grube das Wasser durch eine Schachtpumpe aus dem Tagebau gepumpt. Das Wasser wurde in den gleichen Grundwasserleiter im Injektionsfeld reinjiziert.

Es gibt vier bestätigte Störungen in der Nähe des Bergwerks, die alle eine Nord-Süd Streichrichtung aufweisen: West-, Parallel-, Zentral- und Oststörung (Bild 5). Aquifertests wurden in verschiedenen offenen Bohrlöchern, die sich im gesamten Bergwerk sowohl in der C12ic-Schicht als auch im unteren Aquifer befinden, durchgeführt. Die K-Werte in der C12ic-Schicht reichen von 1×10^{-3} bis 4.1 m/d. Die K-Werte in der Nähe des Bergwerks sind allgemein höher (Bild 5). Wie auch in Bild 5 dargestellt, sind die K-Werte in der Nähe der Oststörung generell höher als in anderen Bereichen, was darauf schließen lässt, dass entlang dieser Störung eine Zone mit hohen hydraulischen Leitfähigkeiten existieren könnte.

Die Entwässerung im Grubenbereich wurde zunächst durch Grundwasserentnahme aus Entwässerungsbrunnen um den Tagebaubereich und Versickerung in den Tagebau erreicht. Die Versickerung im Bergwerk begann ungefähr im Jahr 1977. Die Grundwasserförderung aus aktiven Entwässerungsbrunnen erfolgte von 1978 bis 1988. Nach 1988 hörten die Entwässerungsbrunnen auf zu pumpen, da sie durch Verpressmaterial blockiert waren. Nach Beendigung der aktiven Entwässerung versickerte das Grundwasser in den Tagebau und wurde über Pumpstationen abgepumpt. Die maximale Förderrate beträgt ca. 1,400 m³/h.

3 Konzept der aktiven Entwässerung

Eine der Sanierungsmöglichkeiten ist die aktive Entwässerung in Kombination mit der unterirdischen Drainage. Der schematische Grundwasserzustand bei aktiver Entwässerung ist in Bild 6 dargestellt.

Das Ziel der Grubenentwässerung ist es, trockene Arbeitsbedingungen zu gewährleisten. Wie in Bild 6 dargestellt, kann die

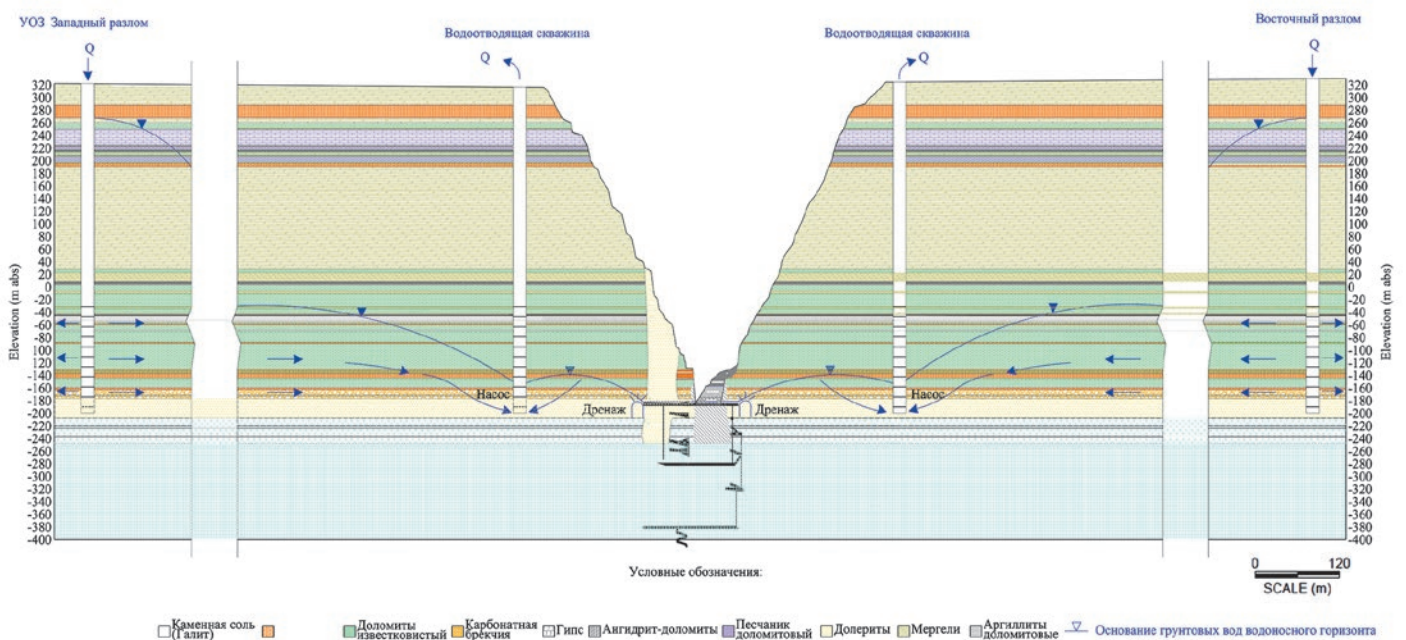


Fig. 6. Schematic of active dewatering system. // Bild 6. Schematische Darstellung des Entwässerungssystems. Source/Quelle: Itasca

Central, and East Faults (Figure 5). Aquifer tests were conducted in various open boreholes located throughout the mine in both the C12ic and the lower aquifer. K values in the C12ic unit range from 1×10^{-3} to 4.1 m/d . The K values are generally higher closer to the mine (Figure 5). As also shown in figure 5, the K values near the East Fault are generally higher than those in other areas, which suggests that a high-K zone may exist along this fault.

The dewatering in the mine area was initially achieved through groundwater extraction from dewatering wells around the open-pit area and seepage into the open pit. The seepage to the mine started in approximately 1977. Groundwater pumping from active dewatering wells occurred from 1978 to 1988. After 1988, the dewatering wells stopped pumping because of clogging by the grouting materials. After the cessation of the active dewatering, the groundwater was allowed to seep to the open pit and was pumped out through pumping stations. The maximum pumping rate is approximately $1,400 \text{ m}^3/\text{h}$.

3 Concept of active dewatering

One of the remediation options is through active dewatering in combination of the underground drainage. The schematic groundwater condition under active dewatering is illustrated in figure 6.

The objective of mine dewatering is to maintain dry working conditions. As illustrated in figure 6, the active dewatering may combine a set of large-diameter pit-perimeter dewatering wells that are drilled from the ground surface to the bottom of the aquifer and drainage holes from the underground workings. The pit-perimeter dewatering wells will intercept water in the aquifer and reduce the pressure behind the pit slope. However, because the large dewatering wells can only lower the groundwater head to the positive suction head of the pumps, there will be low-pressure residual groundwater between the dewatering wells and

aktive Entwässerung eine Reihe von Grubenrandentwässerungsbrunnen mit großem Durchmesser, die von der Bodenoberfläche bis zur Sohle des Grundwasserleiters gebohrt werden, und Entwässerungsbohrungen aus untertägigen Strecken kombinieren. Die Grubenrandentwässerungsbrunnen nehmen das Wasser im Grundwasserleiter auf und reduzieren den Druck hinter der Grubenböschung. Da die großen Entwässerungsbrunnen die Grundwasserhöhe jedoch nur bis zur positiven Wassersäule der Pumpen absenken können, wird es zwischen den Entwässerungsbrunnen und der Grubenwand und dem Grubenkomplex ein Restgrundwasser mit niedrigem Druck geben. Dieses Restgrundwasser kann durch ein unterirdisches Drainagesystem mit gezielten Bohrungen in dem Abschnitt des Grundwasserleiters zwischen den Entwässerungsbrunnen und der Grube abgefangen werden. Die Kombination aus Grubenrandentwässerungsbrunnen und dem unterirdischen Drainagesystem wird ein effizientes Entwässerungssystem bilden.

Das Bergwerk hat eine erfolgreiche Grundwassereinleitung von Sole aufgebaut, die aus dem Tagebau gepumpt wird. Ein Teil des injizierten Wassers wird auf der Grundlage der Wasserstand-Gradienten und der großen Wassermengen in Richtung Tagebau zurück in die Grube fließen, wie in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Das Grundwassermodell wurde verwendet, um das Pumpen und Einleiten von Wasser zu simulieren.

4 Entwicklung eines Grundwasserströmungsmodells für die Entwässerungsvorhersage

Das Grundwasserströmungsmodell wurde konstruiert, um den Entwässerungsbedarf vorherzusagen. Der numerische Code MINEDW wurde von Itasca entwickelt, um speziell 3D-bergbaubezogene Grundwasserflussprobleme mit der Finite-Elemente-Methode zu lösen.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Diskretisierung des 3D-Grundwasserströmungsmodells. Das Modell simuliert die geologischen

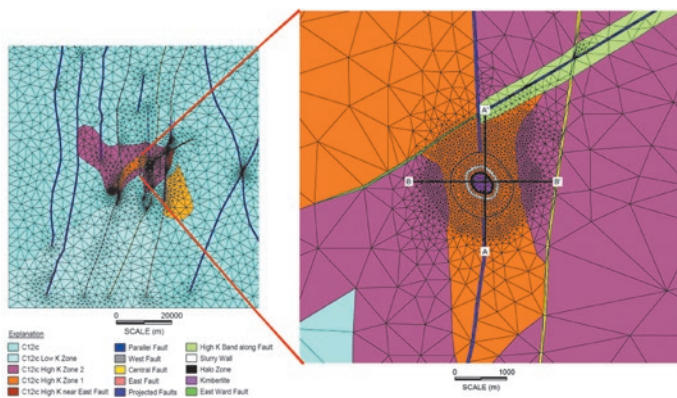


Fig. 7. Model discretization and geologic units in the aquifer layer. Bild 7. Modelldiskretisierung und geologische Schichten in der Aquifer-Schicht. Source/Quelle: Itasca

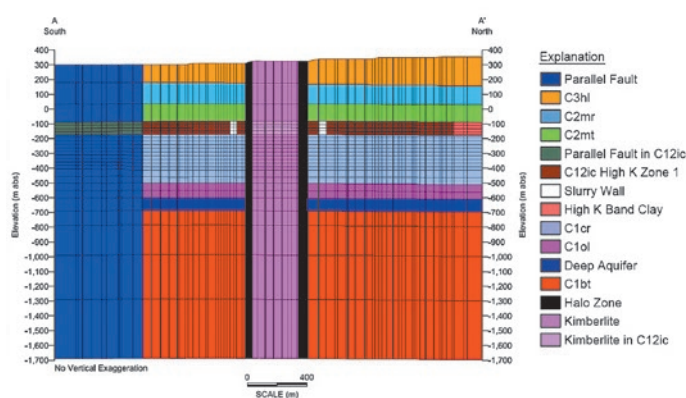


Fig. 8. Geologic units in north-south cross section. Bild 8. Geologische Einheiten im Nord-Süd Profil. Source/Quelle: Itasca

the pit wall and mine workings. This residual groundwater can be intercepted by an underground drainage system with drill holes targeted to the section of aquifer between the dewatering wells and the pit. The combination of pit-perimeter dewatering wells and the underground drainage system will provide an efficient dewatering system.

The mine has implemented a successful groundwater injection of brine water pumped from the open pit. A portion of the injected water will flow back to the pit based on the groundwater head gradient toward the open pit and the large water volumes, as illustrated in the figures 4 and 5. The groundwater model was used to simulate the pumping and injection of water.

4 Development of a groundwater flow model for the dewatering prediction

The groundwater flow model was constructed to predict the dewatering requirement. The numerical code MINEDW was developed by Itasca, to specifically solve 3D mining-related groundwater flow problems using the finite-element method.

The figures 7 and 8 show the discretization of the 3-D groundwater flow model. The model simulates the geologic setting, regional faults, open pit, and injection fields. Because the underground mine workings are flooded with water, they are not simulated in the model.

The model was calibrated to pre-mining and hydrogeologic condition during mining. Figure 9 shows that the simulated groundwater levels closely agree with the measured groundwater levels.

Using the simulated groundwater levels from the steady-state simulation as the initial groundwater levels, transient model calibrations were conducted. The simulation period for the transient calibration was from 1977 to 2017.

For the presentation of the hydrographs, the 82 monitoring wells with measured groundwater levels were grouped into seven clusters based on their locations and depths, as shown in figure 10. Only the measured and simulated groundwater levels in the mining area and northeast injection area are presented in this paper, as shown in the figures 11 and 12, respectively. The model calibration suggests that approximately 30 % of the injected

Bedingungen, regionale Störungen, den Tagebau und die Injektionsbereiche. Da der untertägige Grubenbereich geflutet ist, wird er im Modell nicht simuliert.

Das Modell wurde auf den hydrogeologischen Zustand vor den Bergbauarbeiten sowie während der Abbautätigkeit kalibriert. Bild 9 zeigt eine gute Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Grundwasserstände.

Unter Verwendung der simulierten Grundwasserstände aus der stationären Simulation als anfänglichen Grundwasserspiegel wurden transiente Modellkalibrierungen durchgeführt. Der Simulationszeitraum für die transiente Kalibrierung war von 1977 bis 2017.

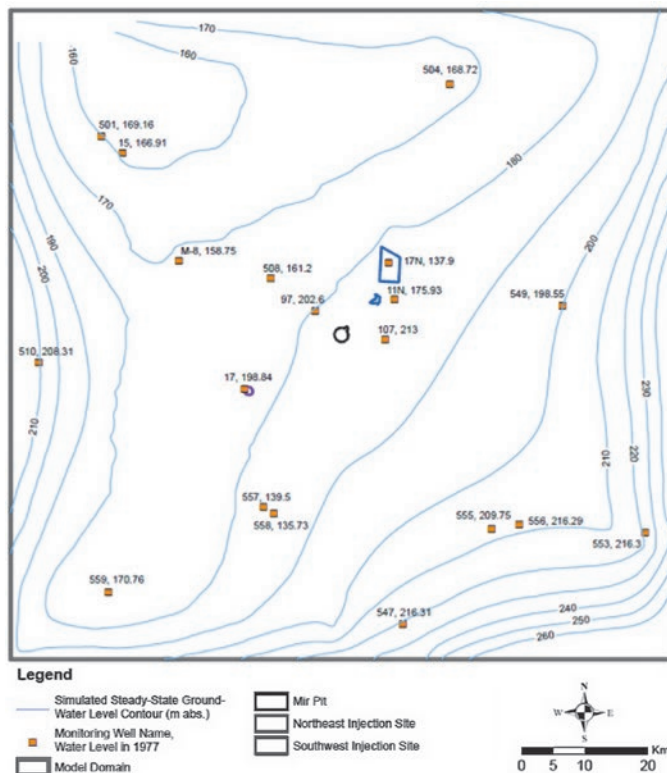


Fig. 9. Simulated and measured pre-mining groundwater levels under steady-state conditions. // Bild 9. Simulierte und gemessene Grundwasserstände vor dem Bergbau unter Steady-State-Bedingungen. Source/Quelle: Itasca

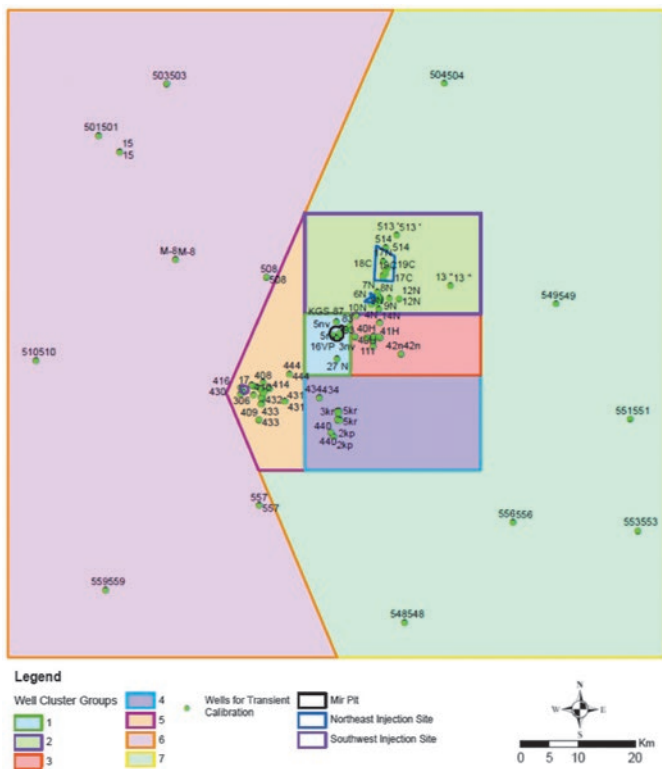


Fig. 10. Spatial distribution of the clusters of monitoring wells.
 Bild 10. Räumliche Verteilung der Cluster von Observationsbrunnen.
 Source/Quelle: Itasca

Für die Darstellung der Hydrographen wurden die 82 Überwachungsbrunnen mit gemessenen Grundwasserspiegeln in sieben Cluster basierend auf ihren Standorten und Teufen gruppiert (Bild 10). Nur die gemessenen und simulierten Grundwasserstände im Bergbau- und im nordöstlichen Injektionsgebiet sind in diesem Bericht (Bilder 11, 12) dargestellt. Die Modellkalibrierung legt nahe, dass etwa 30 % des injizierten Wassers in den Tagebau und in den Tiefbau zurückgeführt werden.

Es wurden prognostizierende Simulationen durchgeführt, um den Pumpbedarf für den zukünftigen Bergbau abzuschätzen, mit dem Ziel, das Bergwerk so „trocken“ wie möglich – und wirtschaftlich machbar – zu erhalten.

Zwei Entwässerungsszenarien wurden simuliert, um die Anzahl der Entwässerungsbrunnen abzuschätzen, die erforderlich sind, um den Zufluss zum Tagebau und zum Tiefbau zu minimieren.

Bild 13 zeigt die vorhergesagte Entwässerungs- und Abflussrate für das Entwässerungsszenario mit fünf Entwässerungsbrunnen. In diesem Szenario beträgt die Gesamtpumprate der fünf Entwässerungsbrunnen ca. 1.400 m³/h, und die Versickerungsrate zum Entwässerungssystem beträgt ca. 600 m³/h. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Entwässerungsbrunnen nicht ausreichen, um die Versickerung in den Tagebau und die unterirdischen Arbeiten wegen des hohen Zuflusses in das unterirdische Entwässerungssystem zu reduzieren.

Bild 14 zeigt die vorhergesagte Entwässerungs- und Abflussrate für das Entwässerungsszenario mit zehn Entwässerungsbrunnen. In diesem Szenario beginnt die Gesamtpumprate der zehn Entwässerungsbrunnen bei ca. 3.000 m³/h und sinkt innerhalb von neun Monaten auf 1.800 m³/h, und die Versickerungsrate zum Entwässerungssystem beginnt bei ca. 600 m³/h und sinkt innerhalb von neun Monaten auf 300 m³/h. Daher reicht die Kombination von zehn Entwässerungsbrunnen und dem untertägigen Entwässerungssystem aus, um den Grundwasserzufluss in den Tagebau und den untertägigen Grubenbereich innerhalb von sechs Monaten nach Inbetriebnahme zu steuern, da das Pumpwerk im untertägigen Bereich eine höhere Pumpleistung als 300 m³/h hat.

water is predicted to recirculate back to the pit and underground workings.

Predictive simulations were conducted to estimate the pumping requirements for future mining, with the goal of maintaining as “dry” a mine as is reasonably possible – and economically feasible.

Two dewatering scenarios were simulated to estimate the number of dewatering wells required to minimize the seepage to the open pit and underground workings.

Figure 13 shows the predicted dewatering rate and drainage rate for the dewatering scenario with five dewatering wells. Under this scenario, the total pumping rate from these five dewatering wells is approximately 1,400 m³/h, and the seepage rate to the drainage system is approximately 600 m³/h. These results suggest that the dewatering wells are not sufficient to reduce the seepage to the open pit and underground workings because of the high inflow to the underground drainage system.

5 Kostenschätzung für Grundwassermanagement-Methoden

Für die folgenden Wasserhaltungsmethoden wurden eine Trade-off Analyse und eine relative Kostenschätzung für den Zeitraum, nachdem die überfluteten Bereiche trocken gepumpt wurden, durchgeführt:

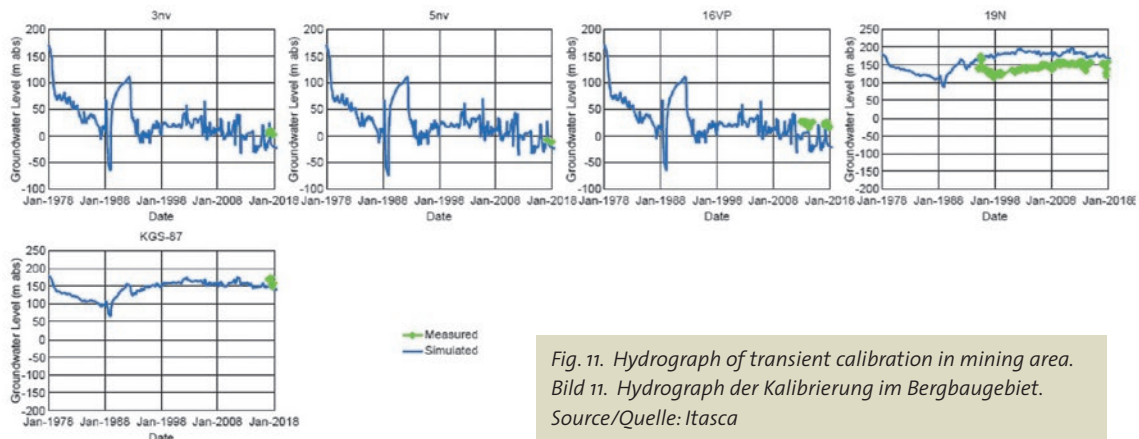


Fig. 11. Hydrograph of transient calibration in mining area.
 Bild 11. Hydrograph der Kalibrierung im Bergbaugebiet.
 Source/Quelle: Itasca

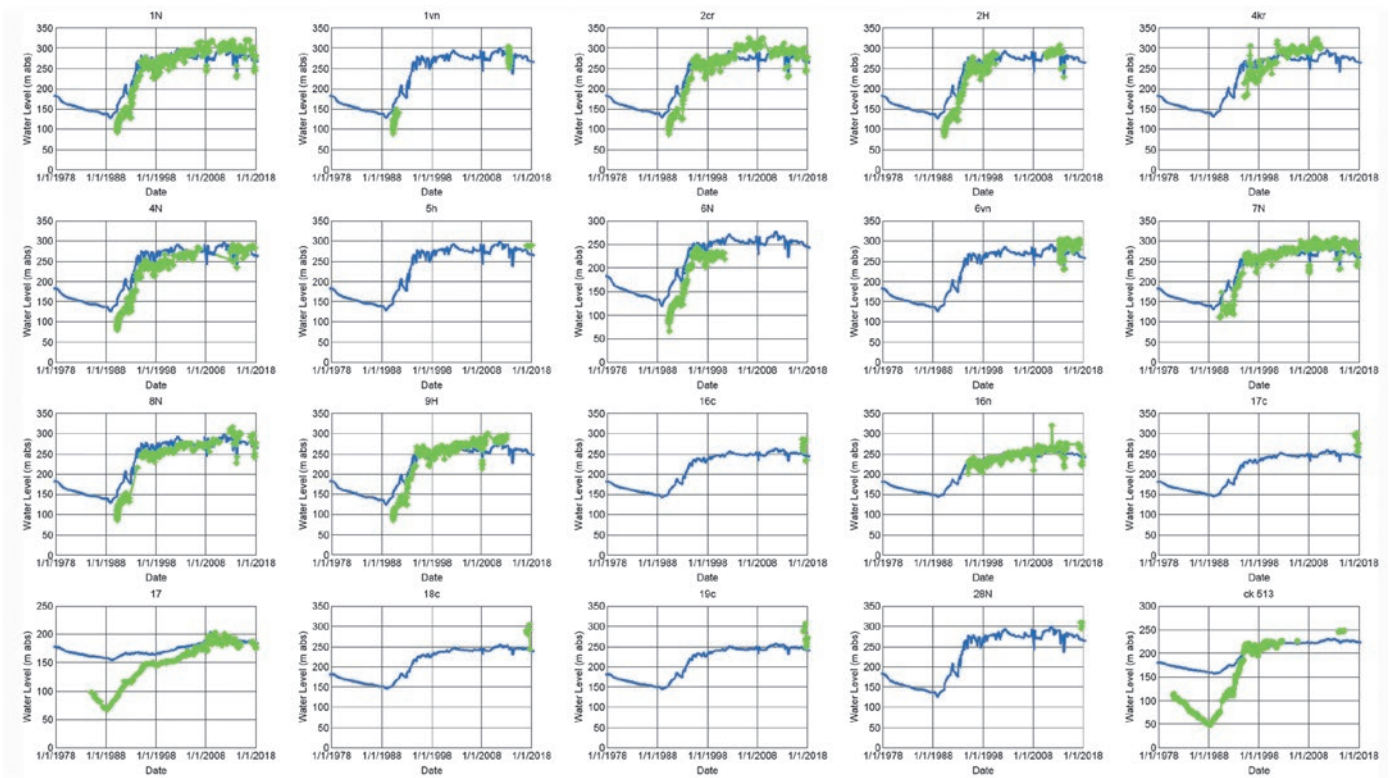


Fig. 12. Hydrograph of transient calibration in northeast injection area.
 Bild 12. Hydrograph der Kalibrierung im nordöstlichen Injektionsbereich. Source/Quelle: Itasca

Figure 14 shows the predicted dewatering and drainage rate for the dewatering scenario with ten dewatering wells. Under this scenario, the total pumping rate from these ten dewatering wells begins at approximately 3,000 m³/h and decreases to 1,800 m³/h within nine months, and the seepage rate to the drainage system begins at approximately 600 m³/h and decreases to 300 m³/h within nine months. Therefore, the combination of ten dewatering wells and the underground drainage system is sufficient to manage the groundwater inflow to the open pit and underground workings within six months after they are in operation because the pumping station in the underground workings has a higher pumping capacity than 300 m³/h.

1. Konventionelle Pumpbrunnenentwässerung.
2. Barriere basierend auf einem Verpresskörper.
3. Barriere basierend auf dem künstlichen Gefrierverfahren.

Diese Ansätze und Kosten werden als „High-Level“ bezeichnet und nur zur Beschreibung des Konzepts, die damit verbundenen Probleme und die Vor-/Nachteile für jeden Ansatz vorgestellt.

Relative Kostenschätzungen für alle Methoden wurden auf der Grundlage der Kosten der herkömmlichen Entwässerungsmethode mit Pumpbrunnen bereitgestellt.

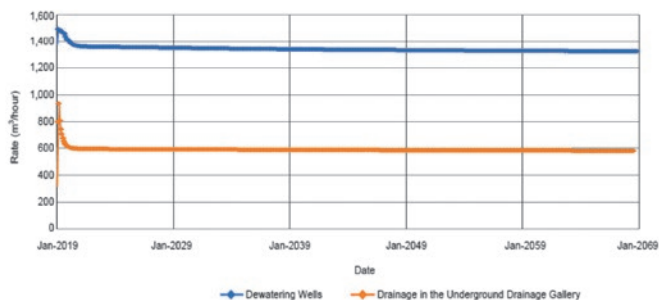


Fig. 13. Predicted dewatering rates from dewatering wells and drainage gallery under five dewatering wells scenario. // Bild 13. Vorausgesagte Entwässerungsraten von Entwässerungsbrunnen und Entwässerungstollen in einem Modell mit fünf Entwässerungsbrunnen. Source/Quelle: Itasca

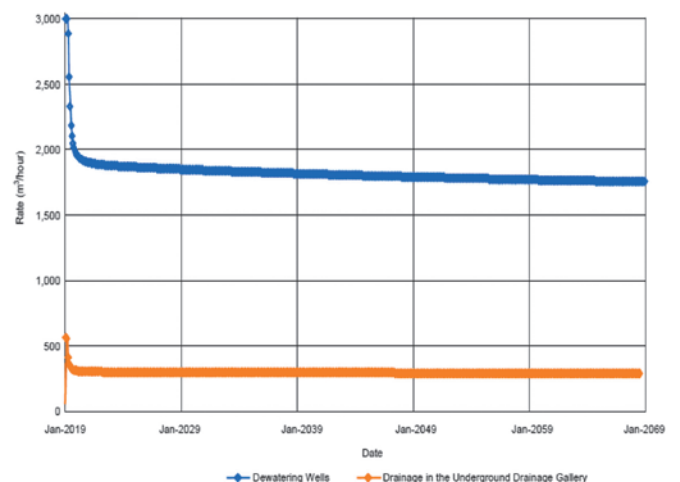


Fig. 14. Predicted dewatering rates from dewatering wells and drainage gallery under ten dewatering wells scenario. // Bild 14. Vorausgesagte Entwässerungsraten von Entwässerungsbrunnen und Entwässerungstollen in einem Modell mit zehn Entwässerungsbrunnen. Source/Quelle: Itasca

5 High-level cost estimate for groundwater management options

A high-level trade-off analysis and an order of magnitude relative cost estimate was conducted for the following groundwater management options after the flooded underground workings are pumped dry:

1. Conventional pumping well dewatering control.
2. Barrier wall using a grout curtain.
3. Barrier wall using artificial ground freezing.

These approaches and costs are termed “high-level” and are presented only to describe the concept, associated issues, and advantages/disadvantages for each approach.

Relative cost estimates for all options were provided based on the costs of the conventional pumping well dewatering control method.

5.1 Conventional pumping well dewatering control

Conventional pumping wells are the traditional method of dewatering high-transmissivity zones at mining projects. Past operations at the Mirny Mine were successful in keeping the mine dewatered using pumping wells, and the system failed due to grout interception within the pumping well system. The proposed approach under this option would be to install several large-diameter dewatering wells. For cost estimation purposes, it is assumed that none of the existing pumping wells are operational.

The estimate assumptions for the dewatering aspects are as follows:

1. Each well will be drilled at a 500 mm bore and can pump at 300 m³/h.
2. Each well will require electrical power of 1,500 kWh per well.
3. The annual maintenance and power cost of the wells are included.
4. A total of twelve dewatering wells are included in this cost estimate. For dewatering operations, ten wells will be operational, and two dewatering wells will be in reserve or undergoing maintenance.
5. The cost for the underground drainage to remove the residual water within the aquifer is not included.
6. The cost does not include surface preparation and disposal.

In the following comparison the estimated costs of the pumping well method will be used as reference value to give relative cost estimations for the other presented methods.

5.2 Grout curtain

An expert on grout was contacted for consultations on this trade-off study. The installation of an engineered grout curtain in the subsurface would consist of drilling from the surface into a cylindrical zone surrounding the ore body and injecting impermeable grout that would seal preferential flow features, such as open joints. This injected grout wall would have to be continuous with few gaps and would require a significant amount of drilling. Further compounding the problem, the subsurface groundwater is of a high salinity (100 to 260 g/l) and low temperature (−3 °C), which would require a special-

5.1 Konventionelle Pumpbrunnenentwässerung

Herkömmliche Pumpbrunnen sind die traditionelle Methode zur Entwässerung hochtransmissiver Zonen bei Bergbauprojekten. Pumpbrunnen zur Entwässerung wurden im Bergwerk Mirny bereits erfolgreich angewendet, bis das Pumpbrunnensystem durch den Eintritt von Verpressmaterial ausgefallen ist. Der vorgeschlagene Ansatz im Rahmen dieser Option wäre die Installation mehrerer Entwässerungsbrunnen mit großem Durchmesser. Für die Kostenschätzung wird davon ausgegangen, dass keiner der vorhandenen Pumpbrunnen betriebsbereit ist.

Die Schätzungen für die Entwässerungskosten basieren auf folgenden Annahmen:

1. Jeder Brunnen wird in einer 500 mm-Bohrung gebohrt und kann mit 300 m³/h pumpen.
2. Jeder Brunnen benötigt eine elektrische Leistung von 1.500 kWh pro Brunnen.
3. Die jährlichen Wartungs- und Stromkosten der Brunnen sind inbegriffen.
4. Insgesamt sind zwölf Entwässerungsbrunnen in dieser Kostenschätzung enthalten. Für den Entwässerungsbetrieb werden zehn Brunnen in Betrieb sein, und zwei Entwässerungsbrunnen werden in Reserve oder in Wartung sein.
5. Die Kosten für die unterirdische Entwässerung, um das Restwasser im Grundwasserleiter zu entfernen, sind nicht enthalten.
6. Die Kosten beinhalten nicht die Oberflächenvorbereitung und -entsorgung.

Im folgenden Vergleich werden die geschätzten Kosten der Pumpbrunnenmethode als Referenzwert verwendet, um relative Kostenschätzungen für die anderen dargestellten Methoden zu geben.

5.2 Verpressung

Ein Experte für Verpressen und Zementinjektionen wurde beratend zu dieser Trade-off-Analyse kontaktiert. Für die Installation eines Verpressrings im Untergrund würde von der Oberfläche aus in einen zylindrischen Bereich um den Erzkörper gebohrt werden, um undurchlässiges Verpressmaterial zu injizieren, das Wasserwegsamkeiten wie offene Klüfte, abdichten würde. Dieser injizierte Verpresskörper müsste bis auf wenige Lücken kontinuierlich sein und würde daher eine erhebliche Menge an Bohrungen erfordern. Eine weitere Schwierigkeit für dieses Verfahren sind die hohe Salinität des Grundwassers (100 bis 260 g/l) und die niedrigen Temperaturen von −3 °C, was spezielles salzwasserbeständiges Verpressmaterial erfordert, das bei niedrigen Temperaturen abbindet. Des Weiteren hätte die Wiederaufnahme der Entwässerung des Bergwerks die Folge, dass der Grundwasserfluss vom Grundwasserleiter zum Tagebau eine Situation erhöhter Grundwassergeschwindigkeiten schafft, was erfordert, dass der Verpresskörper schnell verfestigt, um Auswaschungen zu verhindern. Die Geschwindigkeit des Grundwassers in der vorgeschlagenen Verpresszone ist unbekannt und wahrscheinlich aufgrund bevorzugter Strömungswege und heterogener Bedingungen im Grundwasserleiter variabel.

ized grout material that is resistant to saltwater and that will solidify under low temperatures. Furthermore, groundwater flow from the aquifer to the open pit will create a situation of elevated groundwater velocities when the dewatering of the mine resumes, which requires that the engineered grout gains strength rapidly to prevent washout. The velocity of groundwater in the proposed grouting zone is unknown and is likely variable due to preferential flow pathways and heterogeneous conditions in the aquifer.

The cost of placement of a precision grout curtain across the transmissive aquifer layers at the mine was calculated based on two driving factors: First drilling costs and second grouting costs. Because the mine is flooded and access to the targeted grouting zone is constrained to the ground surface, the cost estimate was made based on the assumption that drilling will be conducted from the ground surface at an angle of 50°. Additional assumptions for the cost estimate are summarized below:

1. Grout would be injected from surface boreholes that would be located in a ring around the surface pit.
2. The spacing of boreholes within the grout barrier should be no less than 2 m. All boreholes are non-branched and are angled into the grout zone from the surface.
3. To ensure sufficient penetration and coverage, Itasca's cost estimates assume that a triple ring of grout injection holes will be required and that the grout barrier should be at least 6 m thick.
4. The grout wall will be placed in a cylindrical shape, centered on the ore body and having a 300 m diameter. The grout cylinder would extend and penetrate across the entire transmissive aquifer zone.

Based on the above assumptions, a total of 1,413 surface boreholes would have to be drilled. If wedged and branching boreholes are constructed, the drilling costs could be reduced by as much as 33% or more; however, the time for drilling will be prolonged.

Grouting costs, including time and materials, are difficult to estimate due to the likely need for an advanced grout composition. Traditional cement-based grout barrier installations are cheaper than saline-resistant grout, which is capable of rapidly solidifying at low temperature. Assuming that the surface area of the grout barrier is 132,000 m², the costs for grout materials and installation labor were estimated for a single wall construction (2 m thick) and for a triple wall construction.

In comparison to the pumping well method the initial cost of the grout curtain are 6.5 times higher. However, the annual maintenance costs would be negligible.

5.3 Artificial ground freezing

Artificial ground freezing is a technique through which portions of the subsurface are frozen by circulating refrigerants within boreholes drilled into an area of high water production. An expert was consulted to develop the high-level cost estimate. The cost estimate was developed based on the following assumptions:

1. Installation of the freeze wall will be conducted using ground-surface drilling methods.
2. The freeze wall will extend from -50 to -190 m abs.

Die Kosten für die Platzierung eines Verpresskörpers über die transmissiven Grundwasserschichten im Bergwerk wurden auf der Grundlage von zwei Faktoren berechnet: Erstens Bohrkosten und zweitens Verpresskosten. Da das Bergwerk überflutet ist und der Zugang zur Verpresszone auf die Oberfläche beschränkt ist, erfolgte die Kostenschätzung unter der Annahme, dass Bohrungen von der Geländeoberfläche aus in einem Winkel von 50° durchgeführt werden. Weitere Annahmen für die Kostenschätzung sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Das Verpressmaterial würde aus Oberflächenbohrungen injiziert, die sich in einem Ring um den Tagebau befinden würden.
2. Der Abstand der Bohrungen innerhalb des Verpresskörpers sollte nicht weniger als 2 m betragen. Die Bohrungen sind nicht verzweigt und werden von der Oberfläche in die Verpresszone gewinkelt.
3. Um eine ausreichende Durchdringung und Abdeckung zu gewährleisten, geht Itasca's Kostenschätzung davon aus, dass ein dreifacher Ring von Verpressinjektionslöchern erforderlich sein wird, damit der Verpresskörper mindestens 6 m mächtig sein wird.
4. Der Verpresskörper wird in einer zylindrischen Form platziert und mit einem Durchmesser von 300 m um den Erzkörper zentriert. Der Verpresszylinder würde sich über die gesamte transmissive Aquiferzone ausdehnen und diese durchdringen.

Auf der Grundlage der oben genannten Annahmen müssten insgesamt 1.413 Oberflächenbohrungen gebohrt werden. Wenn Verzweigungsbohrungen verwendet werden, könnten die Bohrkosten um bis zu 33% oder mehr gesenkt werden. Dies würde den Erstellungszeitraum für die Bohrungen jedoch verlängern.

Verpresskosten einschließlich Zeit und Material sind aufgrund des wahrscheinlichen Bedarfs einer speziellen Zusammensetzung des Verpressmaterials schwer abzuschätzen. Herkömmliche zementbasierte Verpressmaterialien sind billiger als salineresistente, die auch bei niedrigeren Temperaturen schnell abbinden. Unter der Annahme, dass die Oberfläche der Verpressbarriere 132.000 m² beträgt, wurden die Kosten für Verpressmaterialien und Montagearbeiten für eine einwandige Konstruktion (2 m dick) und für eine dreifache Wandkonstruktion geschätzt.

Im Vergleich zur Pumpbrunnenmethode sind die Anfangskosten des zylindrischen Verpresskörpers 6,5-mal höher. Die jährlichen Wartungskosten wären jedoch vernachlässigbar.

5.3 Künstliches Gefrierverfahren

Das künstliche Gefrierverfahren des Bodens ist eine Technik, bei der Teile des Untergrunds durch zirkulierende Kältemittel in Bohrlöchern eingefroren werden und so den Wasserfluss im Gestein unterbinden. Zur Aufstellung der Kostenschätzung wurde ein anerkannter Experte hinzugezogen. Die Kostenschätzung wurde auf der Grundlage folgender Annahmen entwickelt:

1. Die Herstellung des Gefrierkörpers wird mit Bohrungen von der Geländeoberfläche durchgeführt.
2. Der Gefrierkörper erstreckt sich von -50 bis -190 m u. NN.
3. Der Gefrierkörperdurchmesser beträgt 300 m. Der Durchmesser könnte die Kosten erheblich beeinflussen und kann aufgrund des Ausdehnungsfaktors von Wasser beim Gefrieren geotechnische Auswirkungen haben.

3. The freeze wall diameter is 300 m. The diameter could significantly affect the cost and may have geotechnical effects due to the expansion factor of water when freezing.
4. Potassium formate brine compositions have an effective operational lower limit of $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ and would be an efficient refrigerant fluid choice. A brine-cooled ground-freezing operation would be performed by recirculating brine through the subsurface and a surface chilling plant. Liquid nitrogen can also be used, but it is more expensive than potassium formate.

Costs associated with ground-freezing operations are composed of several components:

1. drilling-related costs;
2. well head infrastructure costs;
3. freezing infrastructure related costs, including refrigeration compressors;
4. initial power costs; and
5. operational and maintenance costs.

The following assumptions were used for the estimate of drilling and well head infrastructure costs:

1. The spacing of 50° angled surface boreholes needs to be at least 2 m in the aquifer where the wall is to be constructed.
2. For a freeze wall of 300 m in diameter, 471 boreholes will be drilled with a total length of 258,000 m.
3. The well head infrastructure cost is estimated per well.

The following assumptions were used to estimate the cost of power and compressors:

1. Refrigeration compressors come as modular units with a fixed capacity of 250 t (at $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$).
2. Construction of a freeze wall will take three years or more to be fully operational.
3. After an initial period of three years, the cost of electrical power will be one-third of the initial power cost, as power will be used to maintain the wall instead of for active freezing.

The ground freezing expert estimates that a refrigeration unit capacity of 0.04 t/m (at $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) is enough to achieve ground freezing in a reasonable time span. Given the dimensions of the freeze wall and the spacing of the boreholes (2 m), Itasca has estimated that a total refrigeration capacity of 10,300 t (at $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) would be required. Based on the above-listed assumptions, the following costs are estimated:

1. 41 modular refrigeration units are required.
2. The power demand for the operation ranges from 30.5 to 45 MW for initial freezing operations.
3. After three years, the total cost for power and maintenance is approximately one-third of the initial cost.

Typical refrigeration compressors come as modular units mounted on skids with a fixed capacity of 250 t per unit. Thus, a total of 41 of these modular compressor skids would be required. Each skid requires 1,000 hp to operate. The total minimum power demand for this refrigeration capacity would be 41,000 hp, or 30.5 MW, although power utilization could be

4. Kalium-Solezusammensetzungen haben eine effektive operative Untergrenze von $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und wären eine effiziente Kältemittelflüssigkeit. Solegekühltes Gefrieren würde durch Zirkulation der Sole im Untergrund und eine Kühlanlage an der Oberfläche durchgeführt werden. Flüssiger Stickstoff kann verwendet werden, ist jedoch teurer als Kaliumformat.

Die Kosten für das künstliche Gefrierverfahren setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen:

1. Bohrkosten,
2. Bohrungs- und Brunnenkopf-Infrastrukturkosten,
3. Gefrierinfrastrukturkosten einschließlich Kältekompressoren,
4. anfängliche Stromkosten und
5. Betriebs- und Wartungskosten.

Für die Schätzung der Bohr- und Brunnenkopfinfrastrukturkosten liegen folgende Annahmen zugrunde:

1. Der Abstand der 50° abgewinkelten Oberflächenbohrungen muss mindestens 2 m betragen und die Bohrungen müssen bis in den Grundwasserleiter reichen, der gefroren werden soll.
2. Für einen Gefrierkörper von 300 m Durchmesser werden 471 Bohrlöcher mit einer Gesamtlänge von 258.000 m abgeteuft.
3. Die Kosten für die Bohrungsinfrastruktur werden pro Bohrung geschätzt.

Die folgenden Annahmen wurden verwendet, um die Kosten für Strom und Kompressoren zu schätzen:

1. Kältekompressoren kommen als modulare Einheiten mit einer festen Kapazität von 250 t (bei $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$).
2. Die Entwicklung der künstlichen Gefrierwand wird drei oder mehr Jahre dauern, um voll funktionsfähig zu sein.
3. Nach zunächst drei Jahren werden die Kosten für die elektrische Energie nur noch ein Drittel der anfänglichen Stromkosten betragen, da der Strom für die Aufrechterhaltung des Gefrierkörpers anstelle des aktiven Einfrierens verwendet wird.

Der Gefrierexperte schätzt, dass eine Kälteanlagenkapazität von 0,04 t/m (bei $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) ausreicht, um das Gefrieren des Bodens in einem angemessenen Zeitraum zu erreichen. Angesichts der Abmessungen des Gefrierkörpers und des Abstands der Bohrlöcher (2 m) schätzt Itasca, dass eine Gesamtkältekapazität von 10.300 t (bei $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$) erforderlich wäre. Basierend auf den oben aufgeführten Annahmen werden folgende Kosten geschätzt:

1. 41 modulare Kälteanlagen sind erforderlich.
2. Der Strombedarf für den Betrieb liegt zwischen 30,5 und 45 MW für den anfänglichen Gefrierbetrieb.
3. Nach drei Jahren betragen die Gesamtkosten für Strom und Wartung etwa ein Drittel der anfangs anfallenden Kosten.

Typische Kältekompressoren kommen als modulare Einheiten mit einer festen Kapazität von 250 t pro Einheit. Somit wären insgesamt 41 dieser modularen Kompressoreinheiten erforderlich. Jede Einheit benötigt 1.000 PS, um zu arbeiten. Der Gesamtleistungsbedarf für diese Kälteleistung würde 41.000 PS oder 30,5 MW betragen, obwohl die Leistungsausnutzung bis zu 45 MW betragen könnte. Nach der Entstehung des Gefrierkörpers sinkt der laufende Strombedarf auf nur noch ein Drittel des ursprünglichen Bedarfs.

as high as 45 MW. After the freeze wall is created, ongoing electrical demand falls to as low as one-third of the initial demand.

In comparison to the pumping well method the initial cost of the artificial ground freezing method is seven to eight times higher, while the annual costs for the first three years are still twice as high. After the third year the annual costs for the artificial freezing method are reduced to only 50% of the annual costs of the pumping well dewatering method.

5.4 Trade-Off Comparison

The following findings are based on Itasca's project experience:

1. Dewatering using pumping wells has been successfully implemented on similar scales for many mining projects worldwide. However, freeze and grout barriers have not been implemented on the scale that would be required at the Mirny Mine.
2. For the initial three years, the power requirements for the freezing wall range from 30 to 45 MW.
3. It is uncertain if the grout material will work under the conditions of high salinity and low temperature present in the transmissive aquifer. An extensive study would be required to define compatible grout compositions.
4. Given that there is no operational experience from other similar-scale mining operations for both grouting and freeze walls, the risks of these two alternatives are higher in comparison to the dewatering wells.
5. High-pressure grouting and ground freezing may have geotechnical consequences for the pit slope and underground workings. Both activities may act to increase groundwater pore pressures and may induce unwanted geomechanical stress.
6. In contrast, active dewatering using pumping wells will reduce the pore pressure behind the pit slopes and near the underground workings, which will increase their stability.
7. Active dewatering using pumping wells may reduce the gas buildup within the underground mine workings and reduce the associated risks.

It should be noted that the cost estimate and trade-off comparison presented here is a high-level estimate and is not a detailed study. Although Itasca has consulted with leading experts on both grout and freeze wall barriers, the presented costs should be considered as low-confidence-level estimates and for comparison only. Many factors will affect the costs that may not be included in the cost estimate.

6 Findings and conclusions

In summary, a groundwater flow model was constructed to incorporate the understanding of the conceptual hydrogeologic model of the mine site, geologic settings, and dewatering and injection history. The model was calibrated to measured groundwater levels and dewatering rates. The calibrated model was used to predict groundwater dewatering requirements. A high-level trade-off analysis and cost estimate of different management alternatives of groundwater was conducted.

Im Vergleich zur Pumpbrunnenmethode sind die Anfangskosten des künstlichen Gefrierverfahrens 7- bis 8-mal höher, während die jährlichen Kosten für die ersten drei Jahre immer noch doppelt so hoch sind. Nach dem dritten Jahr werden die jährlichen Kosten für die künstliche Gefriermethode auf nur noch 50% der jährlichen Kosten der Entwässerungsmethode für Pumpbrunnen gesenkt.

5.4 Trade-off-Analyse

Die folgenden Ergebnisse basieren auf Itasca's Projekterfahrung:

1. Die Entwässerung mit Pumpbrunnen wurde bei vielen Bergbauprojekten weltweit erfolgreich in ähnlicher Größenordnung umgesetzt. Frost- und Injektionsbarrieren wurden jedoch bisher nicht in dem Umfang umgesetzt, der im Bergwerk Mirny erforderlich wäre.
2. In den ersten drei Jahren liegt der Leistungsbedarf für das Gefrierverfahren zwischen 30 und 45 MW.
3. Es ist ungewiss, ob das Injektionsmaterial unter den Bedingungen eines hohen Salzgehalts und niedrigen Temperaturen im transmissiven Grundwasserleiter funktionieren wird. Eine umfassende Studie wäre erforderlich, um kompatible Injektionszusammensetzungen zu definieren.
4. Da es keine Betriebserfahrung aus anderen ähnlichen Bergbaubetrieben sowohl für die Verpressmethode als auch für das Gefrierverfahren gibt, sind die Risiken dieser beiden Alternativen höher als die auf den Entwässerungsbrunnen basierenden.
5. Hochdruckverpressinjektionen und das Gefrierverfahren können geotechnische Folgen für die Böschungen des Tagebaus und die untertägige Infrastruktur haben. Beide Aktivitäten können dazu führen, dass der Porendruck im Grundwasser erhöht wird und unerwünschte geomechanische Belastungen auftreten.
6. Im Gegensatz dazu wird eine aktive Entwässerung mit Pumpbrunnen den Porendruck hinter den Böschungen des Tagebaus und in der Nähe der untertägigen Infrastrukturen reduzieren, was zu einer erhöhten Stabilität führt.
7. Eine aktive Entwässerung mit Pumpbrunnen kann die Gasansammlungen im Grubengebäude reduzieren und die damit verbundenen Risiken verringern.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der hier vorgestellten Kostenschätzung und Trade-off-Analyse um eine Schätzung und keine detaillierte Studie handelt. Obwohl Itasca sich mit führenden Experten sowohl zu Verpressinjektionen als auch zu Gefrierverfahren beraten hat, sollten die dargestellten Kosten als Schätzungen mit geringem Konfidenzniveau und nur zum Vergleich betrachtet werden. Viele Faktoren, die möglicherweise nicht in der Kostenschätzung enthalten sind, beeinflussen die Kosten zusätzlich.

6 Ergebnisse und Resümee

Zusammenfassend wurde ein Grundwasserströmungsmodell erstellt, welches das konzeptionelle hydrogeologische Modell des Bergwerks, geologische Gegebenheiten und die Entwässerungs- und Injektionshistorie beinhaltet. Das Modell wurde an gemessenen Grundwasserständen und Entwässerungsraten kalibriert.

The primary conclusions of the groundwater flow model include the following:

1. The groundwater flow model is reasonably calibrated to the measured groundwater levels under both steady-state and transient conditions.
2. The groundwater flow model calibration suggests the following:
 - a. The aquifer is heterogeneous with different K zones.
 - b. Except for the East Fault, most of the other faults are considered to be less permeable than the surrounding bedrock.
 - c. There are permeable bands along the East Fault.
3. The previously installed grout curtain is considered to be less permeable than the in-situ rock.
4. The installation of ten dewatering wells along the perimeter of the pit is sufficient to intercept most of the water in the aquifer and the recirculated water from the injection fields with the following assumptions:
 - a. It will take less than nine months to dewater the aquifer.
 - b. The pumping capacity of each well is 300 m³/h, with a total initial pumping rate of 3,000 m³/h, which decreases to 1,750 m³/h within nine months.
 - c. The dewatering rates from the underground drainage gallery start at 560 m³/h and then decrease to 290 m³/h within nine months.
5. Approximately 30 % of the injected water is predicted to recirculate back to the pit and underground workings.

The trade-off analysis suggests that active dewatering is more reliable and feasible than the freezing wall or grout curtain.

Acknowledgement

The authors would like to thank Steve Phillips for the discussion of the grouting option, Greg Newman for the discussion of the freezing option, and engineers from Alrosa for their support and comments.

Authors / Autoren

Houmao Liu, Ph.D., Itasca Denver, Inc., Lakewood, Colorado/USA, Dr. Lothar te Kamp and Dipl.-Ing. Ivan Akinshin, Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen/Germany, Alexey Kulminskiy and Maxim Tishkov, Institute Yakutniproalmaz, PJSC Alrosa, Mirny/Russia

Das kalibrierte Modell wurde zur Vorhersage des Entwässerungsbedarfs der Grube verwendet. Es wurden eine Trade-off-Analyse und Kostenabschätzung verschiedener Wasserhaltungsmethoden durchgeführt.

Zu den wichtigsten Schlussfolgerungen des Grundwasserströmungsmodells gehören die folgenden Aspekte:

1. Das Grundwasserströmungsmodell ist sowohl unter stationären als auch unter transienten Bedingungen ausreichend auf die gemessenen Grundwasserstände kalibriert worden.
2. Die Ergebnisse des Grundwasserströmungsmodells zeigen:
 - a. Der Grundwasserleiter ist heterogen mit verschiedenen K-Zonen.
 - b. Mit Ausnahme der Oststörung gelten die meisten anderen Störungen als weniger durchlässig als das umgebende Grundgestein.
 - c. Es gibt durchlässige Bereiche entlang der Oststörung.
3. Die durch Injektion erzeugten Verpresskörper gelten als weniger durchlässig als das umgebende Gebirge.
4. Die Installation von zehn Entwässerungsbrunnen entlang des Umfangs der Grube reicht aus, um den größten Teil des Wassers im Grundwasserleiter und das umlaufende Wasser aus den Injektionsfeldern mit folgenden Annahmen abzufangen:
 - a. Es wird weniger als neun Monate dauern, um den Grundwasserleiter zu entwässern.
 - b. Die Förderleistung jedes Brunnens beträgt 300 m³/h, mit einer anfänglichen Gesamtpumpleistung von 3.000 m³/h, die innerhalb von neun Monaten auf 1.750 m³/h absinkt.
 - c. Die Entwässerungsraten aus dem unterirdischen Entwässerungstollen beginnen bei 560 m³/h und sinken dann innerhalb von neun Monaten auf 290 m³/h.
5. Der Prognose nach werden ungefähr 30 % des injizierten Wassers wieder in den Tagebau und den Tiefbau reinjiziert.

Die Trade-off-Analyse legt nahe, dass eine aktive Entwässerung zuverlässiger und besser durchführbar ist als das Gefrierverfahren oder die Verpressinjektion.

Danksagung

Die Autoren danken Steve Phillips für die Diskussion der Verpressmethode, Greg Newman für die Diskussion der Gefriermethode und den Ingenieuren von Alrosa für ihre Unterstützung und Kommentare.