

# Shaft sinking experience in Athabasca Basin and geoscientific investigations for future shafts

## Erfahrungen mit Schachtabteufung im Athabasca Becken und geowissenschaftliche Erkundungen für zukünftige Schächte

Shaft sinking through solid rock, which contains little or no water, poses little difficulty. However, when loose, water-bearing strata have to be contended with, water control measures and pumping facilities are needed. Shaft sinking in the Athabasca Basin requires sinking through water bearing sandstone which can be highly fractured. Intersection of local zones of extensive fracturing results in the potential for high water inflows with hydrostatic pressures of up to 5 MPa. Typically cementitious grouting is carried out ahead of each shaft sinking interval as a water control strategy. Shaft sinking performance which can be quantified in terms of rate of advance is highly dependent on the days spent at each interval grouting before sinking can advance to the next interval. This paper presents the shaft sinking experience in Athabasca Basin and how some of this is translated into geoscientific investigations for future shafts. A comparison of geoscientific data collected from future shafts at McArthur River and other Cameco Corporation operations and project sites. The paper concludes with the strategies for better integration of hydrogeological, geotechnical and geophysical data.

### 1 Introduction

The Athabasca Basin covers approximately 100,000 km<sup>2</sup> in Northern Saskatchewan and Northwestern Alberta [7]. The Athabasca Basin consists of sedimentary rocks of the Athabasca Group, which are primarily composed of quartz arenite, although minor conglomerate, mudstone and dolomite components are also present within the basin. Rocks of the Athabasca Group unconformably overlie Precambrian basement, in which the remnants of the paleoweathering profile can be up to 50 m thick. Unconformity type deposits in the Athabasca Basin are some of the world's largest high grade uranium resources and represent the only uranium currently produced within Canada [4].

Two of the primary challenges in mining the unconformity type deposits in Athabasca Basin are the control of groundwater and the ground support in areas of weak rock mass and major faulting structures. Hydraulic conductivity in the vicinity of the orebody is controlled largely by the presence of open fractures. The sandstone and the unconformity are known areas where water in significant quantities is present with hydrostatic pressures of up to 5 MPa dependent on depth. These areas can produce

*Schachtbau im standfesten Gebirge, das wenig oder kein Bergwasser aufweist, bereitet geringe Schwierigkeiten. Wenn jedoch lockere, wasserführende Schichten angetroffen werden, sind Wasserhaltungsmaßnahmen und Pumpeinrichtungen erforderlich. Beim Schachteufen im Athabasca Becken werden wasserführende Sandsteine angetroffen, die stark zerlegt sein können. Lokale Verschnitte zwischen hoch zerlegten Zonen können zu starken Wasserzutritten mit Drücken bis zu 5 MPa führen. In der Regel werden Zementinjektionen vor jedem Abteufschritt ausgeführt, um die Wasserzutritte zu minimieren. Die Teufleistung hängt sehr stark von der Zeit ab, die für die Injektion benötigt wird, bevor der nächste Ausbruchsritt gemacht werden kann. Dieser Beitrag behandelt die Erfahrungen mit Schachtabteufen im Athabasca Becken, und wie ein Teil dieser Erfahrung in geowissenschaftliche Erkundungen für künftige Schächte einfließt. Geowissenschaftliche Daten von künftigen Schächten bei der McArthur River Mine und anderen Cameco Corporation Betrieben und Projekten werden verglichen. Der Beitrag schließt mit Strategien für eine bessere Integration von hydrogeologischen, geotechnischen und geophysikalischen Daten.*

### 1 Einleitung

Das Athabasca Becken erstreckt sich in Nord Saskatchewan und Nord Alberta über ca. 100.000 km<sup>2</sup> [7]. Das Becken ist aus Sedimentgesteinen der Athabasca Serie aufgebaut, das vorwiegend aus Quarzarenit besteht, mit geringen Einschaltungen von Konglomeraten, Schluffsteinen und Dolomitkomponenten. Die Gesteine der Athabasca Serie überlagern diskordant das präkambrische Grundgebirge, in dem die Reste der Paläoverwitterung bis zu 50 m stark sein können. Diskordante Ablagerungen im Athabasca Becken zählen zu den weltgrößten hochwertigen Uranvorkommen und sind das einzige derzeit abgebaute Uran in Kanada [4].

Zwei der größten Herausforderungen beim Abbau der diskordanten Ablagerungen im Athabasca Becken sind die Beherrschung des Bergwassers und der Ausbau in Zonen mit geringer Gebirgsqualität und größeren Störungen. Die hydraulische Durchlässigkeit in der Nähe des Erzkörpers wird im Wesentlichen durch offene Trennflächen bestimmt. Der Sandstein und die Diskordanz sind bekannt dafür, dass Bergwasser in großer Menge und mit Drücken bis 5 MPa vorhanden ist. Diese Bereiche können signifikante Ströme im darüberliegenden Sandstein bewirken,

significant flows in the overlying sandstone, which is approximately 500 metres thick in the McArthur River area.

The developments of shafts in the Athabasca Basin have attempted to minimize the amount of water that can be encountered during development through extensive cementitious grouting ahead of the excavation. Three shafts have been completed at the McArthur River operation in the late 1990s and one at the Cigar Lake deposit in the 1980s. To mitigate the risk of water inflows during the process of shaft sinking and for long-term maintenance, the existing practice was to drill cementitious grout covers ahead of the development. In 2006, during the sinking of Shaft No. 2 at Cigar Lake project, adverse geotechnical and hydrogeological conditions were encountered around 400 m depth. Extensive time was spent grouting at this depth, however, loss of control in the standpipe of one of the grout holes resulted in flows up to 350 m<sup>3</sup>/h, overwhelming the available pumping capacity. This resulted in flooding of the shaft.

This paper presents a review of the lessons learned from the shaft sinking experience in Athabasca Basin. A rationale for more rigorous pilot hole testing for shafts is argued. The paper also provides details of the past shaft sinking experience at McArthur River. Geoscientific investigation for new planned shafts is also presented.

die im McArthur River Bereich Mächtigkeiten von ungefähr 500 m aufweist.

Beim Abteufen von Schächten im Athabasca Becken sollte der Wasserzufluss in den künftigen Abbaubereich durch vorausseilende Zementinjektionen minimiert werden. Drei Schächte wurden im McArthur River Revier in den späten 1990ern errichtet und einer im Cigar Lake Revier in den 1980ern. Um das Risiko von Wassereintrüben während des Schachtteufens und des langzeitlichen Abbaubetriebs zu minimieren, war es gängige Praxis, Zementinjektionsschirme dem Vortrieb voraus zu installieren. 2006 wurden während des Abteufens von Schacht Nr. 2 am Cigar Lake Projekt in rund 400 m Tiefe ungünstige geotechnische und hydrogeologische Bedingungen angetroffen. Viel Zeit wurde für die Injektion aufgewendet, durch den Verlust der Kontrolle über eines der Standrohre einer Injektionsbohrung, kam es zu einem Zufluss von bis zu 350 m<sup>3</sup>/h, der die Kapazität der Pumpen überstieg. Dies führte zu einem Fluten des Schachtes.

In diesem Beitrag werden die Lehren aus dem Schachtteufen im Athabasca Becken dargestellt. Vernunftgründe sprechen für ein intensiveres Untersuchungsprogramm von Pilotbohrungen für Schächte. Der Beitrag zeigt Details der Schachtteuferfahrung im McArthur River Revier sowie die geowissenschaftliche Erkundung für zukünftig geplante Schächte.



MAPEI GmbH Austria, Fräuleinmühle 2, A-3134 Nußdorf ob der Traisen  
utt.mapei@mapei.at, www.utt-mapei.com



[www.utt-mapei.com](http://www.utt-mapei.com)





- Produkte für die Tunnelinstandsetzung und den Tunnelbau
- Alkalifreie Beschleuniger für Nassspritzbeton

- Bauchemische Produkte für den Maschinenvortrieb
- Epoxidharzsysteme

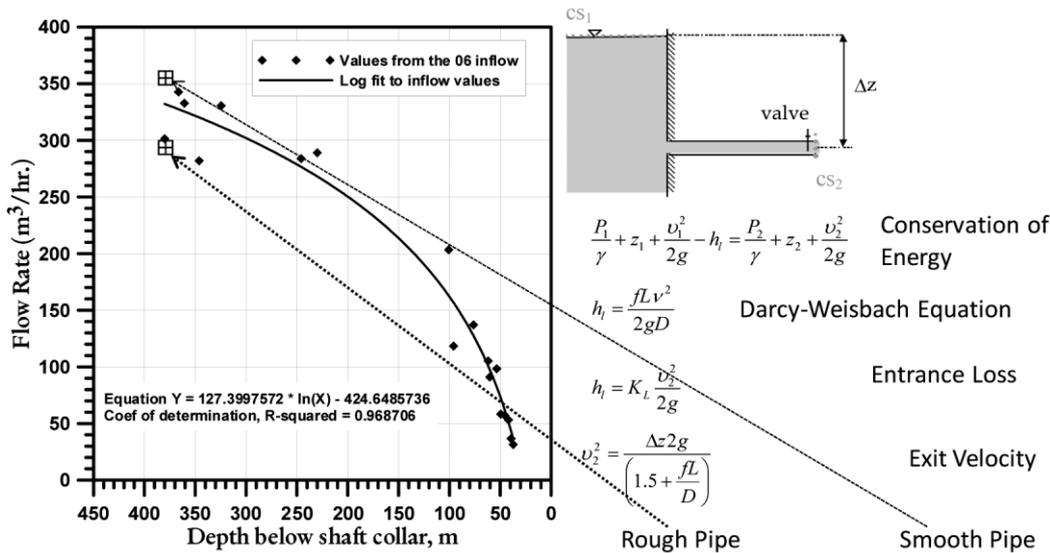


Fig. 1. Inflow data from shaft #2 at Cigar Lake project  
 Bild 1. Daten des Wasserzuflusses bei Schacht Nr. 2 des Cigar Lake Projekts

**2 Rational for more rigorous pilot hole testing**

The standard geotechnical practice for shaft investigation in the Athabasca Basin was to drill one or more pilot holes and document the geotechnical properties of the cored hole such as rock strength, fractures per metre, joint infilling and joint aperture. Additional geotechnical testing such as caliper testing, computed density, apparent porosity, sonic wave testing and compressive strength testing has also been carried out.

The major component of the hydrogeological investigations is downhole packer testing to determine the bulk horizontal hydraulic conductivity over a given shaft interval. The key objective of the hydrogeological investigations has been to identify the potential zones of high groundwater inflows, which would have significant impact on shaft sinking methodologies and costs.

In 2006, during sinking of the Shaft No. 2 at Cigar Lake project, adverse geotechnical and hydrogeological conditions were encountered after 350 m depth. One of 16 initial grout holes in grout cover #8 intersected a sand filled structure that produced approximately 1,000 to of sand into the shaft bottom. The sand was removed via a sinking bucket and over four months were spent attempting to flush and grout this sand bearing structure. A decision was made to employ ground freezing methods to consolidate this area to allow shaft advance. Shortly after this change in plan, collar security at one of the standpipes was lost, and the shaft was quickly flooded. Figure 1 shows the amount of water that entered the shaft through the standpipe. On the same figure a theoretical calculation for a pipe with the same dimensions and characteristics as of the standpipe, connected to a water reservoir is also shown. It is interesting to note that the flows estimated from this calculation match those observed in the shaft. This observation is indicative of the potential of the sandstone formation to produce large quantities of water in a very short interval of time.

The pilot hole for this shaft was not able to discover these adverse geological and hydrological conditions in either the geotechnical drilling or in the bulk hydraulic con-

**2 Argumente für ausgedehnteres Untersuchungsprogramm bei Pilotbohrungen**

Die übliche Praxis der Schachterkundung im Athabasca Becken bestand im Abteufen von einem oder mehreren Pilotbohrlöchern und einer Aufnahme der geotechnischen Eigenschaften der Bohrkerns wie Gesteinsfestigkeit, Trennflächendichte, Füllung, und Öffnung. Zusätzlich wurden geotechnische Tests wie Kaliberlog, errechnete Dichte, scheinbare Porosität, Durchschallung und Druckfestigkeitsprüfungen durchgeführt.

Der Hauptteil der hydrogeologischen Untersuchungen besteht aus Wasserabpressversuchen im Bohrloch, um die horizontale Durchlässigkeit für die einzelnen Schachtabschnitte zu bestimmen. Das wesentliche Ziel der hydrogeologischen Untersuchungen war, Zonen mit einem Potenzial für hohe Wasserzutritte zu identifizieren, die einen großen Einfluss auf das Schachtteufverfahren und die Kosten haben.

2006 wurden beim Schachtteufen des Schachtes Nr. 2 des Cigar Lake Projektes in 350 m Tiefe ungünstige geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse angetroffen. Eines der ersten 16 Injektionsbohrlöcher des Injektionsschirms Nr. 8 durchörterte eine sandgefüllte Struktur, wodurch es zu einem Zutritt von rund 1.000 t Sand in der Schachtsohle kam. Der Sand wurde mittels eines Greifers entfernt, und danach über vier Monate versucht, die Sand führende Schicht zu spülen und zu injizieren. Schließlich wurde beschlossen, ein Gefrierverfahren einzusetzen, um den Bereich zu konsolidieren und ein weiteres Abteufen zu ermöglichen. Kurz nach dieser Planänderung versagte eine Manschette an einem der Standrohre, was zu einem raschen Fluten des Schachtes führte. Bild 1 zeigt den Wasserzufluss zum Schacht durch das Standrohr. Im selben Bild wird eine theoretische Berechnung für ein Rohr gleicher Dimension und Charakteristik wie das Standrohr gezeigt, das mit einem Reservoir verbunden ist. Die Berechnung zeigt gute Übereinstimmung mit den beobachteten Wasserzutritten in den Schacht. Dies zeigt das Potenzial der Sandstein-

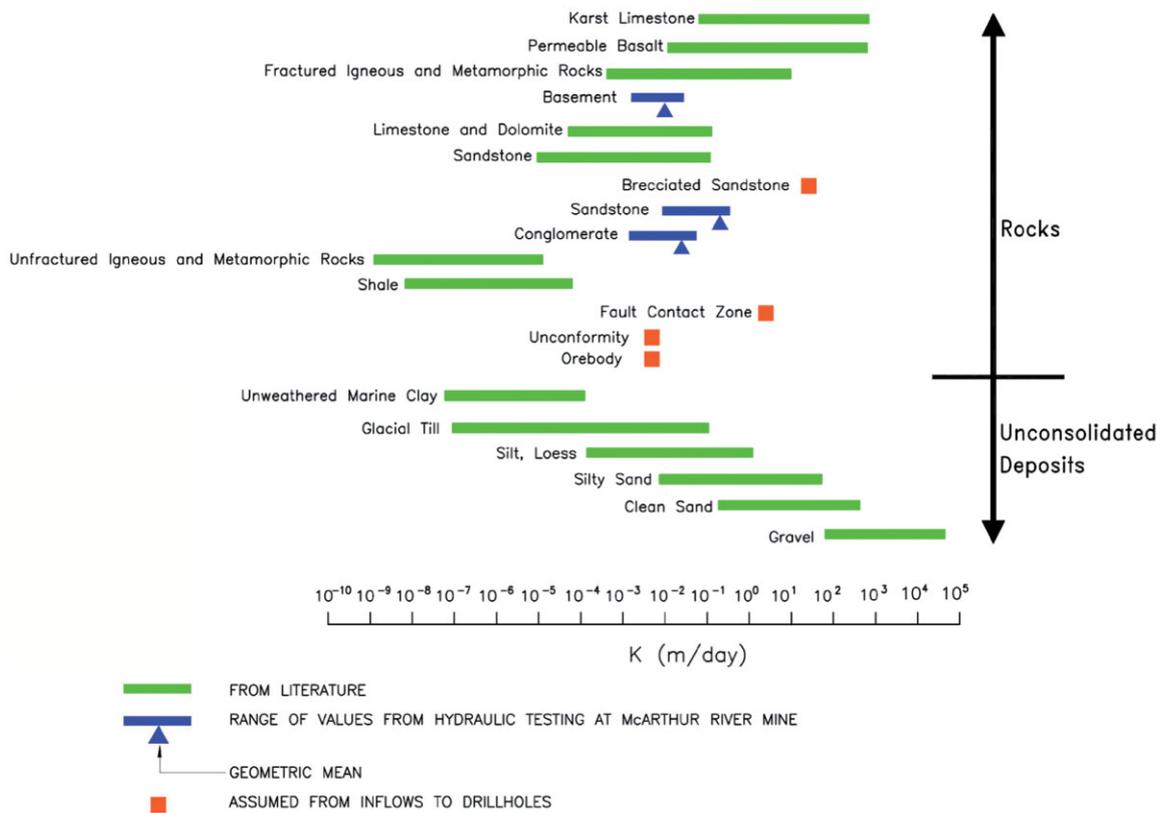


Fig. 2. Hydraulic conductivities of various hydrogeologic units at McArthur River Mine [3]  
 Bild 2. Hydraulische Durchlässigkeitswerte unterschiedlicher hydrogeologischer Einheiten bei der McArthur River Mine [3]

ductivity testing. This leads one to conclude that although four shafts were sunk successfully with the information collected from similar pilot holes, there might be instances where the information collected may not be sufficient. Therefore, the use of other means for testing the bulk hydraulic properties of the rock mass, and detecting adverse structures near the shaft but outside pilot hole are required to increase the chances of future successes.

### 3 Geoscientific investigation of future shafts at McArthur River Operation

The McArthur River Operation is an underground uranium mine located in the eastern part of the Athabasca Basin in northern Saskatchewan, Canada. McArthur River Operation mines high grade uranium ore using a unique non-entry raisebore mining method. The ore is ground and processed as slurry underground and pumped to surface where it is loaded into special containers and shipped to Key Lake for milling. Three shafts have been successfully completed at McArthur River. As part of the McArthur River life-of-mine capital projects, up to two additional shafts are being considered in the coming years. The following sections discuss the general hydrogeological setting of the site, previous shaft sinking experience at the site, and geoscientific investigation for the future shafts.

#### 4 Hydrological setting

The upper bedrock at McArthur River consists of 480 to 560 m of Athabasca Group sandstones which uncon-

formation, in kurzer Zeit große Wassermengen zu produzieren.

Durch das Pilotbohrloch in diesem Schacht konnten die ungünstigen geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse weder durch die Bohrung selbst noch durch die hydraulischen Tests aufgeschlossen werden. Das führt zu dem Schluss, dass obwohl bereits vier Schächte auf Basis der Information ähnlicher Bohrlöcher erfolgreich abgeteufte wurden, die Möglichkeit besteht, dass die Information nicht ausreicht. Daher sind andere Methoden zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit des Gebirges und der Erkundung von ungünstigen Strukturen nahe dem geplanten Schacht, aber außerhalb des Pilotbohrlochs notwendig, um die Erfolgsaussichten für künftige Projekte zu erhöhen.

### 3 Geowissenschaftliche Erkundung für künftige Schächte im McArthur River Revier

Bei der McArthur River Mine handelt es sich um einen untertägigen Uranerzabbau im östlichen Teil des Athabasca Beckens im nördlichen Saskatchewan in Kanada. Hier wird hochwertiges Uranerz durch ein einzigartiges Raisebore-Verfahren gewonnen, das ein Betreten nicht erfordert. Das Erz wird untertage gebrochen und zu Slurry verarbeitet, zur Oberfläche gepumpt und in Spezialcontainern nach Key Lake zum Mahlen transportiert. Als Teil der zukünftigen Entwicklung der McArthur River Mine werden bis zu zwei zusätzliche Schächte in den nächsten Jahren in Erwägung gezogen. Die folgenden Abschnitte behandeln die grundsätzlichen hydrogeologischen Ver-

formably overlie crystalline Archean and Aphebian basement rocks. The mineralization at the McArthur River Operation is associated with a major thrust fault zone known as the P2 fault, and the majority of the mineralization occurs in a southeast-dipping thrust at the contact between the Athabasca Sandstone and underlying basement rocks. The thrusting has resulted in a large wedge of basement rock overhanging the younger sandstone along the P2 Fault [5].

Six major hydrostratigraphic units have been defined during the hydrogeological investigations. From stratigraphically highest to the lowest, these include: (1) Overburden, (2) Sandstone (MFd, to MFa), (3) Fanglomerate (and/or conglomerate) with a basal paleo-weathered zone, (4) Unconformity, (5) Mineralised zone, and (6) Basement rocks. Figure 2 shows interpreted hydraulic conductivity values from a large number of drill stem tests for the various hydrogeologic units relative to “typical” ranges of hydraulic conductivity for various geologic materials, both unconsolidated and consolidated. This figure provides a useful reference for the range of hydraulic conductivity for a given material type and puts the hydrogeologic conditions at McArthur River in a global context.

### 5 Shaft sinking performance at McArthur River Operation

Relative shaft sinking performance in terms of time required to sink at a certain depth, for the three shafts sunk at McArthur River is shown in Figure 3. On the same figure hydraulic conductivity data collected in shaft pilot holes for these shafts is also presented. From this figure it can be observed, that least amount of time was required to sink Shaft No. 3 when compared to Shafts Nos. 1 and 2. It can also be observed that time required to sink at a particular depth is closely related to the time spent in completing the grout cover at different depths. Shaft No. 2 required three more months when compared to Shaft No. 1 and five more months when compared to Shaft No. 3. It is also evident that the reason for poor performance in Shaft No. 2 was due to difficult and extended grout covers that needed to be completed.

Comparison of hydraulic conductivity data to shaft performance indicates that although high hydraulic conductivity values were measured in the first 10 m of depth, extensive grout covers were not required. This is due to low hydrostatic conditions at relatively shallow depths. Hydraulic conductivity values from Shaft No. 3 pilot hole indicate that at most depths, measured values were in between those measured for Shafts Nos. 1 and 2. However there is little or no variation in values with depth, especially after 150 m. As mentioned earlier that Shaft No. 3 proved to be the least problematic of all shafts sunk to date.

The poor performance of Shaft No. 2 in terms of time required was related to the grouting difficulties, which can be correlated with higher permeability readings from the shaft pilot hole. This leads one to conclude that the performance of sinking is somewhat correlated to the hydraulic conductivity values and its variation with depth. However, it has also been observed that time spent grouting at a particular depth is also a function of presence or absence of sand in the inflow water. Grout covers #8 and #9 in Shaft No. 2 were particularly difficult, as on three oc-

hältnisse des Gebiets, bisherige Erfahrung mit Schachtteufen und die geowissenschaftliche Erkundung zukünftiger Schächte.

### 4 Hydrologische Verhältnisse

Beim McArthur River Gebirge handelt es sich um 480 bis 560 m mächtigen Athabasca Sandsteine, die diskordant kristallines archaisches und proterozoisches Grundgebirge überlagern. Die Mineralisierung im McArthur River Revier ist an eine Überschiebungsbahn, bekannt als P2 Störung, gebunden und die hauptsächlichliche Anreicherung von Erz liegt an einer Südost fallenden Überschiebung am Kontakt zwischen dem Athabasca Sandstein und dem darunter liegenden Grundgebirge. Die Überschiebung hat zu einem großen Grundgebirgskeil geführt, der über die jüngeren Sandsteine entlang der P2 Störung geschoben wurde [5].

Sechs übergeordnete hydrostratigrafische Einheiten konnten während der hydrogeologischen Erkundung unterschieden werden. Diese sind, vom stratigrafisch höchsten zum niedrigsten: (1) Überlagerung, (2) Sandstein (MFd bis MFa), Fanglomerat (und/oder Konglomerate, mit einer basalen Paläoverwitterungszone, (4) Diskordanz, (5) mineralisierte Zone, und (6) Grundgebirge. Bild 2 zeigt interpretierte hydraulische Durchlässigkeitswerte aus einer großen Anzahl von Drill-Stem-Tests für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten und einen Vergleich mit „typischen“ Bereichen hydraulischer Durchlässigkeit für unterschiedliche unkonsolidierte und konsolidierte geologische Materialien. Diese Abbildung stellt eine brauchbare Referenz für den Bereich der hydraulischen Durchlässigkeit für unterschiedliche Materialien dar und zeigt die hydrogeologischen Verhältnisse am McArthur River Revier in einem größeren Zusammenhang.

### 5 Schachtteufleistung bei der McArthur River Mine

Bild 3 zeigt die relative Teufleistung in Bezug zur benötigten Zeit für das Abteufen in einer bestimmten Tiefe für die drei bei der McArthur River Mine abgeteufte Schächte. Im selben Bild sind auch die aus den Pilotbohrungen die-

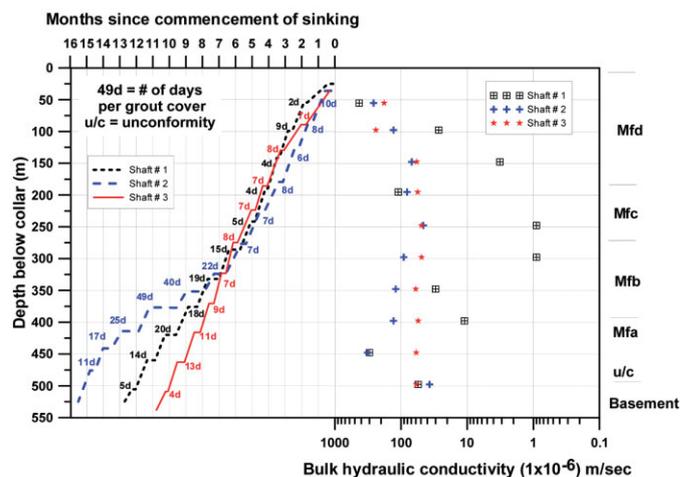


Fig. 3. Relative shaft sinking performance at McArthur River shafts [1]

Bild 3. Relative Schachtteufleistung bei den Schächten des McArthur River Projekts [1]

casions during cover #8, grout holes encountered flows of 75-100 m<sup>3</sup>/h with one strong flow accompanied by sand.

This is in contrast to grout covers #10 and #11, which were also in higher permeability areas with flows up to 50 m<sup>3</sup>/h but with an absence of sand in the flows. The absence of sand at these locations can be due to increased silicification of sandstone with depth observed at McArthur River and is indicative of the increased local rock strength. The lack of free flowing sand in fractures lead to less complicated grouting but extended grout times were still necessary although less than those required for #8 and #9 covers. Therefore it can be concluded that the higher hydraulic conductivity values, and its variation with depth, are not the only indicators of anticipated shaft sinking performance. The detection of the presence of unconsolidated sand layers with depth might also be an important factor [1].

## 6 Geoscientific techniques applied at McArthur River

A series of geotechnical, geophysical and hydrogeological techniques were used in the determination of the future location for a potential new shaft(s) at McArthur River Operation. A total of six holes for two shafts were drilled in two drilling campaigns, one in 2008 and the other in 2010. Depending on the potential use of the shaft as a ventilation shaft or service shaft, the length of the pilot holes were varied from 650 m in length to 750 m in length. In addition, a larger diameter HQ sized hole (48.0 mm) was

ser Schächte gewonnenen hydraulischen Durchlässigkeiten dargestellt. Es zeigt sich, dass die geringste Zeit für das Abteufen von Schacht 3 im Vergleich zu Schächten 1 und 2 gebraucht wurde. Es zeigt sich auch, dass die Zeit für das Abteufen in einer gewissen Teufe eng mit dem Zeitaufwand für die Herstellung des Injektionsschirms in verschiedenen Teufen zusammenhängt. Für Schacht Nr. 2 wurden drei Monate mehr benötigt als für Schacht Nr. 1, und fünf Monate mehr als für Schacht Nr. 3. Es ist offensichtlich, dass die geringe Leistung bei Schacht Nr. 2 auf die umfangreichen und schwierig durchzuführenden Injektionsschirme zurückzuführen ist.

Der Vergleich der hydraulischen Durchlässigkeit mit der Teufleistung zeigt, dass trotz der hohen Durchlässigkeit in den ersten 10 m keine umfangreichen Injektionsmaßnahmen erforderlich waren, was auf die geringen Wasserdrücke in dieser Tiefe zurückzuführen ist. Die Durchlässigkeitswerte des Pilotbohrlochs des Schachtes Nr. 3 zeigen, dass die Durchlässigkeiten in fast allen Tiefen zwischen jenen der Schächte Nr. 1 und Nr. 2 lagen. Allerdings gibt es nur geringe Unterschiede der Werte über die Tiefe, insbesondere für Teufen über 150 m. Wie bereits erwähnt, hat sich Schacht Nr. 3 als der unproblematischste aller bisher abgeteuften Schächte herausgestellt.

Die geringe Leistung bei Schacht Nr. 2 hing mit Schwierigkeiten bei der Injektion zusammen, die in Zusammenhang mit den bei der Pilotbohrung gemessenen höheren Durchlässigkeiten stehen. Dies kann zu dem Schluss führen, dass die Teufleistung mit der Durchlässig-

**ROCKMORE INTERNATIONAL**  
Rock Drilling Tools

**Rockmore International GmbH**  
Gussstahlwerkstrasse 21  
A-8750 Judenburg Austria  
Tel. +43 3572 86 300  
Fax +43 3572 84 179  
austria@rockmore-intl.com

The advertisement features a central image of a large red drill bit with a cutting edge. In the background, two workers in high-visibility yellow jackets and red hard hats are working in a mine. A globe is positioned in the upper left, and a technical drawing of a shaft is visible in the lower left corner.

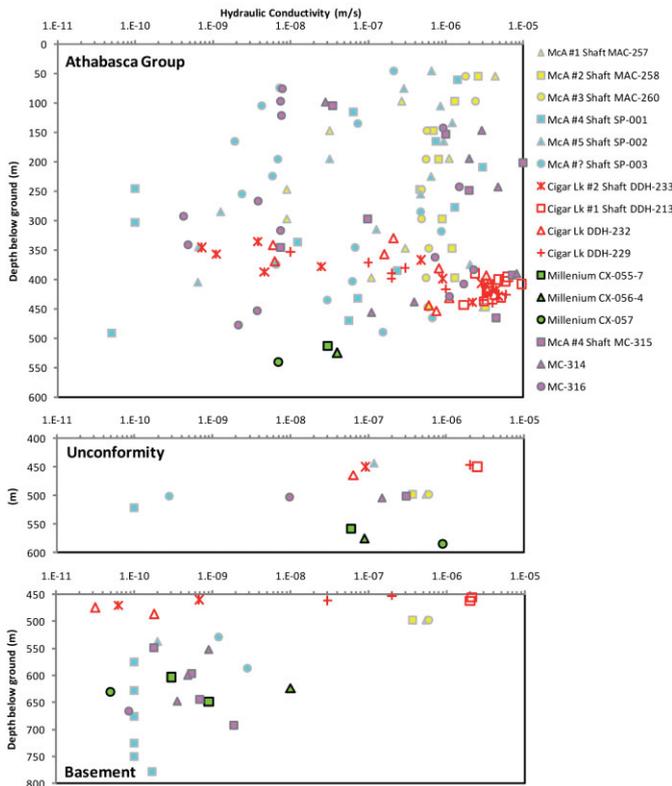


Fig. 4. Hydraulic conductivity in Athabasca sandstone, unconformity and basement rock for various shaft pilot holes [8]  
 Bild 4. Hydraulische Durchlässigkeiten im Athabasca Sandstein, Diskordanz und Grundgebirge für verschiedene Pilotbohrungen [8]

drilled to ensure that the required vertical alignment of the hole could be achieved, within a 5 m diameter vertical cylinder and that desired geophysical tools could be run down hole. The triple tube method was utilized during the 2010 drill campaign to hold core runs, minimize driller disturbance of the core while drilling, and minimize the creation of mechanical breaks during handling. The geotechnical engineers were able to log the core at the drill site, the results of which, provided an over all rise in the RQD and total core recovered when comparing shaft pilot hole data between 2010 to 2008.

The following geotechnical, geophysical, and hydrological techniques were used:

- Geotechnical core logging and analysis
- Rock mass characterization, fracture spacing, joint set number, and infill type of discontinuities
- Core photographs
- Intact rock strengths testing and weathering
- Hydraulic injections testing with single down hole packer or double packer
- Initial temperature and pressure profiles with multi-port monitoring (on select holes)
- Groundwater geochemistry
- Down-hole geophysical logs including: caliper, acoustics, temperature, resistivity, full waveform sonics, and natural gamma).

The acoustic televiewer provided highly valuable orientation of major structures and joints that would not be possible to determine with a vertical hole. Full waveform son-

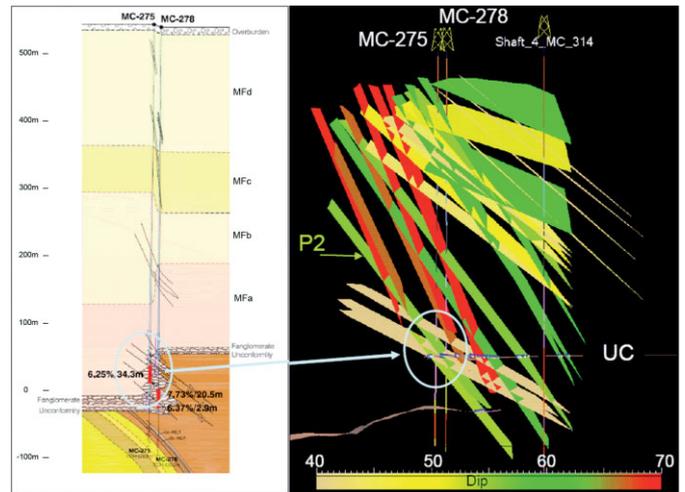


Fig. 5. Initial geological interpretation (left) compared with seismic imaging and modelling of major structures around exploration and potential shaft pilot holes [2]  
 Bild 5. Ursprüngliche geologische Interpretation (links) im Vergleich zur seismischen Aufnahme und der Modellierung von übergeordneten Strukturen um Erkundungs- und potenzielle Schachtpilotbohrlöcher [2]

keit und deren Variation über die Tiefe korreliert. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass der Zeitaufwand für die Injektion in einer bestimmten Tiefe auch davon abhängt, ob das zuströmende Wasser Sand enthält. Die Injektionsschirme Nr. 8 und Nr. 9 in Schacht Nr. 2 stellten sich als besonders schwierig heraus, da bei Injektionsschirm Nr. 8 bei drei Gelegenheiten durch die Injektionslöcher Wasserzuflüsse von 75 bis 100 m<sup>3</sup>/h festgestellt wurden, bei einem Injektionsschirm mit zusätzlich starkem Sandeintritt.

Zum Unterschied wurden bei den Injektionsschirmen Nr. 10 und Nr. 11 in ebenfalls höher durchlässigem Material Zuflüsse von bis zu 50 m<sup>3</sup>/h gemessen, allerdings ohne Sandeintritt. Der fehlende Sandzutritt in diesen Bereichen kann auf eine im McArthur River Revier höhere Verkieselung des Sandsteins mit zunehmender Tiefe zurückgeführt werden und zeigt sich auch in lokal höherer Gesteinsfestigkeit. Die Abwesenheit von fließendem Sand in Trennflächen führte zu weniger aufwändigem Injizieren, jedoch immer noch langen Injektionszeiten, allerdings geringeren, als bei Schirmen Nr. 8 und Nr. 9. Daraus kann geschlossen werden, dass die höheren Durchlässigkeitswerte und deren Variation über die Tiefe nicht die einzigen Einflussfaktoren auf die Teufleistung sind. Das Auftreten von unkonsolidierten Sandschichten könnte ebenso ein bedeutender Einflussfaktor sein.

## 6 Beim McArthur River Revier verwendete geowissenschaftliche Methoden

Eine Reihe geotechnischer, geophysikalischer und hydrogeologischer Methoden wurden beim McArthur River Revier für die Bestimmung der Lage zukünftiger Schächte eingesetzt. In Summe wurden für zwei Schächte sechs Bohrungen in zwei Kampagnen abgeteuft, eine 2008 und die andere 2010. Je nach Zweck des Schachtes als Lüftungsschacht oder Serviceschacht wurde die Länge der Pilotbohrungen zwischen 650 und 750 m variiert. Zusätz-

ics supplemented intact rock strength measurements, testing was required to calibrate this interpretation. The use of the electrical methods such as resistivity and spontaneous potential was limited in providing differential down-hole measurements between holes. The use of a spinner tool and heat-pulse had minimal success as only minor flows could be generated in the hole.

The shaft mapping available from Shaft No. 1 was used to confirm data gathered in the new shaft pilot hole core logs such as: sandstone joint orientations, spacing, staining and filling, aperture, and this also provided an estimate of inflow in some cases [8]. Minor instability was noted at the unconformity, as well as the presence of the dominate north-south joint set in the basement rocks. Positive correlation was developed between previous shaft mapping, approximately 1 kilometre south of the six shaft pilot holes, and geotechnical core logging. This correlation demonstrated that with the dominate north-south dilated set J3 with a spacing of around 1.5 metres, and the east-west vertical J3 with a spacing of approximately 4.0 metres was consistent through the mine property. Therefore any new shaft or shafts are likely to intersect at least three hematite stained, and highly hydraulically conductive sub-vertical faults in the sandstone [8]. This structural interpretation provided for a future grouting target.

lich wurde eine Bohrung vom Kaliber HQ (48 mm) abgeteuft, um sicherzustellen, dass die erwünschte Vertikalität der Bohrung (innerhalb eines vertikalen Zylinders mit 5 m Durchmesser) erreicht werden konnte, und dass die gewünschten geophysikalischen Tests durchgeführt werden konnten. Ein Dreifachkernrohr wurde während der Kampagne 2010 eingesetzt, um Kerne zu gewinnen, zur Minimierung der Kernschädigung durch das Bohren und Minimierung von mechanischen Brüchen während der Handhabung. Die geotechnischen Ingenieure konnten die Bohrkerne an der Bohrstelle aufnehmen, was im Vergleich zu den Bohrkampagnen zwischen 2008 und 2010 zu höheren RQD Werten und höherem Kerngewinn führte.

Folgende geotechnische, geophysikalische und hydrologische Methoden wurde angewandt:

- Geotechnische Bohrkernaufnahme und Analyse,
- Gebirgscharakterisierung, Trennflächenabstände, Anzahl an Klufscharen und Art der Trennflächenfüllung,
- Bohrkernfotos,
- Bestimmung der Gesteinsfestigkeit und der Verwitterung,
- Wasserabpressversuche mit Einfach- und Zweifachpacker,
- Temperatur- und Druckprofile mit Mehrfachaufnehmern an ausgewählten Bohrlöchern,
- Wasserchemie,

PENELL GmbH  
Bahnhofstrasse 32  
D-64372 Ober-Ramstadt  
☎ +49.(0)6154.6251-0  
Fax +49.(0)6154.51269  
E-Mail info@penell-gmbh.de



SYNCHRO PLUS Ges.m.b.H.  
Oberallach 2  
A-9852 Trebesing (K)  
☎ +43.(0)664.2008440  
Fax +43.(0)4732.37044  
E-Mail info@synchro-plus.eu

## Wir sind IHR PARTNER in Fragen der Elektroversorgung.

Lösungsvorschläge - nach Ihrer Aufgabenstellung - Planung, Beratung sowie der Verkauf von

- Kabelsystemen & Konfektionierung
- Schaltanlagen
- Erdungsanlagen
- Beleuchtungsanlagen
- Klima- und Haustechnik
- z. B.: - Telefon- und Rufanlagen
- Antennenanlagen
- Elektronikbauteilen

gehören zu unserem Liefer- und Leistungsprogramm.

Wir haben umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Elektroprojektierung, z.B. in den folgenden Bereichen:

- Tunnel-, Hoch- und Tiefbau
- NS- und MS-Schaltanlagen bis 42 kV
- Aggregate und Notbeleuchtung
- Industrieanlagen, Überwachungsanlagen
- Schulen, Freizeit- und Sportstätten
- Krankenhäuser

Gerne unterbreiten wir Ihnen ein unverbindliches Angebot und stellen unsere Leistungsfähigkeit unter Beweis.

**Nutzen Sie unseren 24h-Lieferservice. Ein Notdienst ist auch an Sonn- und Feiertagen für Sie bereit.**

SYNCHRO PLUS GmbH  
Montageplatz  
D-03130 Haidemühl  
☎ (035751) 15345  
Fax (035751) 15346  
E-Mail synchro.plus@t-online.de  
Internet www.synchroplus.de

Unsere Monteure sind sofort vor Ort einsetzbar mittels eigener Meß-, Vulkanisations- und Spulwagen.  
Unsere Monteure sind spezialisiert und qualifiziert in den Bereichen Niederspannung, Mittel- und Hochspannung und LWL.  
Genauere Informationen über uns und unser Leistungsspektrum finden Sie auf unserer Internetseite.

**Unser Bereitschaftsdienst steht Ihnen auch an Sonn- und Feiertagen zu Ihrer Verfügung.**



### Energietechnik & Montagen

- von 1 kV bis 330 kV
- Kabel · Leitungen · Fernmelde · LWL
- Muffen · Endverschlüsse · Verlegung
- Vulkanisation · Mantelreparaturen
- Steckermontagen · Cadweld-Muffen
- Prüfungen · Fehlerortungen

With detailed geotechnical core logging, hematite stained joints, and vuggy (voids) quartz in joints are identifiable in sub-vertical fractures that do correlate with increased hydraulic conductivity [8]. Joint staining and quartz growth in joints indicate a significant inflow potential [9].

When only hydraulic conductivity values are compared to among all other shaft pilot holes tested in the Athabasca Basin (Figure 4), it is not easy to correlate successful holes from previous shaft sinking projects with respect to grouting campaigns or geotechnical stability. Hydraulic conductivity values obtained through packer testing can vary several orders of magnitude and yet have similar bulk grouting or bulk geotechnical properties. The recognition of fine sand filled fractures and other geotechnical structures such as vertical, stained faults are much more significant to the shaft sinking performance.

The application of seismic techniques such as cross hole and side scan allows for triangulation of (potentially water bearing) structures as 2D images. When successfully applied, side scan and cross hole surveys provide more than 100 metres of visualization, which covers the typical area of concern around a shaft pillar (Figure 5). In ideal conditions, cross hole and side scan enhance geotechnical, hydrological, and structural geology interpretation but does not replace any of the methods for identifying areas of adverse geology and hydrogeology. The field and processing cost for side scan or cross hole technique is in the order of 500,000 US\$ and takes many months of initial processing, and much more time to interpret and produce the reflector planes.

### 7 Corporate standard for pre-shaft sinking geoscientific investigations

A corporate standard for pre-shaft sinking geoscientific investigations was created in the year 2009 for Cameco Corporation shafts that are to be sunk in the Athabasca Basin. This standard used the key learnings presented in this paper and applies to shafts excavated by the drill and blast method using cementitious grout covers and does not include shafts frozen by artificial ground freezing.

### 8 Conclusions

The most effective techniques identified for hydrological and geotechnical assessments are:

- Triple-tube coring, producing more complete core recovery with unconsolidated material,
- Detailed geotechnical logging of joint staining and surface conditions, and vuggy quartz in sub-vertical fractures,
- Correlation between previous shaft mapping and geotechnical logging,
- Acoustical methods to determine orientation of joints and major structures,
- Full waveform sonics for intact rock strength.

The use of seismic cross hole and side scan techniques may not be affordable for all shaft pilot hole projects due to field and processing costs, as well as time to complete processing and interpretation. For similar costs, additional

- Geophysikalische Aufnahmen, wie Kaliberlog, Akustik, Temperatur, Widerstand, Full Waveform sonic log, und Gammalog.

Der akustische Televiever erlaubte die Bestimmung der Orientierung von bedeutenderen Strukturen, die sonst bei einem vertikalen Bohrloch mit Bohrkernmarkierung nicht festgestellt werden könnten. Full Waveform Sonic ergänzte die Druckfestigkeitsbestimmung des Gesteins, wobei für die Kalibrierung eigene Tests erforderlich waren. Die Verwendung von elektrischen Methoden wie Widerstandsmessung und Potenzialmessung war beschränkt auf differenzielle Messungen zwischen den Bohrlöchern. Die Verwendung eines Propellers und Temperaturimpulses brachte nur geringe Erfolge, da nur geringe Fließgeschwindigkeiten im Bohrloch erzeugt werden konnten.

Die Kartierung des Schachtes Nr. 1 wurde verwendet, um Ergebnisse aus den Bohrkernaufnahmen der Pilotbohrung des neuen Schachtes zu bestätigen: Kluftorientierungen im Sandstein, Trennflächenabstände, Verfärbung und Füllung, Öffnung, was auch in einigen Fällen zur Abschätzung des Wasserzuflusses verwendet werden konnte [8]. Untergeordnete Instabilität wurde an der Diskordanz festgestellt und auch die dominierende N-S orientierte Kluftschar im Grundgebirge. Eine positive Korrelation konnte zwischen der vorhergehenden etwa 1 km südlich der sechs Pilotbohrungen durchgeführten Schachtkartierung und der geotechnischen Bohrkernaufnahme hergestellt werden. Es zeigte sich, dass die dominierende N-S orientierte Kluftschar J3 mit einem Trennflächenabstand von ungefähr 1,5 m und die O-W orientierte vertikale Kluftschar mit einem Trennflächenabstand von zirka 4 m sich über das ganze Revier erstrecken. Daher wird jeder neue Schacht im Revier zumindest drei Hämatit belegte und hydraulisch hochdurchlässige subvertikalen Störungen im Sandstein durchörtert [8]. Diese Interpretation der Struktur erlaubte eine Injektionsstrategie für künftige Projekte zu entwickeln.

Die detaillierte Bohrkernaufnahme zeigte, dass Hämatit belegte Trennflächen und Kluftquarz in Trennflächen, die in subvertikalen Trennflächen angetroffen werden mit erhöhter Durchlässigkeit in Zusammenhang gebracht werden können [8]. Kluftbestege und Quarzwachstum in Trennflächen zeigen ein erhöhtes Wasserzutrittspotenzial [9].

Wenn nur die hydraulischen Durchlässigkeitswerte aller Schachtpilotbohrungen im Athabasca Becken verglichen werden, ist es schwierig Rückschlüsse von erfolgreichen Bohrungen in Bezug zu Injektionserfolg oder geotechnischer Stabilität herzustellen. Das Vorhandensein von Sand gefüllten Klüften und anderen geotechnischen Strukturen wie vertikale, belegte Störungen ist wesentlich bedeutender für die Teufleistung.

Mithilfe seismischer Methoden wie Cross-hole Seismik und Side-Scan Sonar kann eine Triangulierung von (potenziell Wasser führenden) Strukturen als 2D Bild erzeugt werden. Im Fall erfolgreicher Anwendung erlauben Cross hole und Side scan Sonar Methoden eine Visualisierung von mehr als 100 m, was den typischen Bereich von Interesse um einen Schacht abdeckt (Bild 5). Im Idealfall können Cross hole und Side scan Methoden die Interpretation von geotechnischen, hydrologischen und

geotechnical holes may be drilled, interpreted, and grouted to increase geotechnical stability and reduce fracture flow.

The use of down-hole packer testing as a sole determinant for engineering design or predictive tool for grout acceptance rates is not likely to be successful for all sites. There are significant challenges in correlating hydrogeological and geotechnical testing and observations made during shaft pilot hole drilling and predicting shaft sinking problems. Multiple geoscientific observations in core logging and down-hole techniques are required to assure successful shaft sinking.

## References

- [1] *Beattie, D., Bashir, R. & Hatley, J.*: Impact of Geotechnical and Hydrogeological Parameters Upon Shaft Sinking Performance in the Athabasca Basin Canada. IMWA Journal, 2008.
- [2] Cameco: McArthur River Shaft No. 4 Borehole Seismic Project: Preliminary Results. Internal presentation, 2010.
- [3] HCI: Active Depressurising of Zone 4 Orebody at McArthur River Mine. Preliminary Report. Findings of Preliminary Ground-Water Flow Model. Hydrologic Consultants, Inc. of Colorado, 2005.
- [4] *Jefferson, C.W., Thomas, D.J., Gandhi, S.S., Ramaekers, P., Delaney, G., Brisbin, D., Cutts, C., Portella, P. & Olsen, R.A.*: Unconformity-associated Uranium Deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. In Jefferson and Delaney (eds.): EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration and TECHNOlogy of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. pp. 23–67. Geological Survey of Canada, Bulletin 588, 2007.
- [5] *Bashir, R. & Hatley, J.*: Inflows in Uranium Mines of Northern Saskatchewan: Risks and Mitigation. Uranium 2010, 3rd International Conference on Uranium, Volume 1, pp 207–226.
- [6] *Ramaekers, P.*: Stratigraphy and Tectonic History of the Athabasca Group (Helikian) of Northern Saskatchewan. In: Summary of Investigations 1980, Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Mineral Resources, Miscellaneous Report 80-4, pp. 99–106.
- [7] SGS: Geology, and Mineral and Petroleum Resources of Saskatchewan. Saskatchewan Industry and Resources. Miscellaneous Report. Saskatchewan Geological Survey, 2003.
- [8] SRK Consulting: McArthur River: 2010 Shaft Pilot Hole Program. Report, prepared for Cameco Corporation, 2011.
- [9] *Thomson, J., Hawkes, C., Bashir, R., Milne, D., & Klemmer, S.*: Rock Mass Properties Influencing Groundwater Flow Potential for Shaft Sinking. Poster presentation of study results. Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, 2010.



James F. Hatley  
Cameco Corporation  
2121-11th Street West  
Saskatoon, SK, S7M 1J6  
Canada  
James\_Hatley@cameco.com



Rashid Bashir  
Golder Associates  
1721 8th Street East,  
Saskatoon, SK, S7H 0T4  
Canada  
Rashid\_Bashir@golder.com

strukturgeologischen Fragestellungen unterstützen, ohne die Methoden zu ersetzen, um Bereiche ungünstiger geologischer oder hydrogeologischer Verhältnisse zu identifizieren. Die Kosten für Cross hole und Side scan Feldaufnahmen und Auswertung liegen in der Größenordnung von 500.000 US\$. Mehrere Monate dauern die erste Auswertung und noch länger die Interpretation und das Ermitteln der Reflektorflächen.

## 7 Firmenstandard für die geowissenschaftliche Erkundung vor dem Schachtbau

2009 wurde ein Firmenstandard für die geowissenschaftliche Erkundung von Schachtbauten der Cameco Corporation im Athabasca Becken geschaffen. Dem Standard liegen die Erfahrungen zugrunde, die in diesem Beitrag dargestellt wurden, und betrifft Schächte, die im Sprengverfahren und mit Zementinjektionsschirmen hergestellt werden. Nicht betroffen sind Schächte, bei denen das Gefrierverfahren angewandt wird.

## 8 Schlussfolgerungen

Als effektivste Methoden für die hydrologische und geotechnische Beurteilung haben sich herausgestellt:

- Dreifachkernrohrbohrung, die höheren Kerngewinn in schlechtem Gebirge ermöglicht,
- Detaillierte geotechnische Aufnahme von Kluffbestegen und Oberflächenbeschaffenheit sowie Quarzanreicherungen in subvertikalen Trennflächen,
- Korrelation von früheren Schachtdokumentationen und geotechnischen Bohrkernaufnahmen,
- Akustische Methoden zur Bestimmung von Klufforientierungen und anderer geologischer Strukturen,
- Full Waveform Sonic für die Bestimmung der Gesteinsfestigkeit.

Cross Hole Seismik und Side Scan Technik ist für die routinemäßige Anwendung wegen der Aufnahme- und Auswertungskosten zu teuer und braucht zusätzlich für die Auswertung erhebliche Zeit. Zu vergleichbaren Kosten können zusätzliche Erkundungsbohrungen abgeteuft und injiziert und die Ergebnisse interpretiert werden, um die Stabilität zu erhöhen und den Wasserzufluss durch Klüfte zu reduzieren.

Die Anwendung von Bohrlochpackertests als einzige Grundlage für die technische Planung oder die Vorhersage der Injektionsgutaufnahme führt nur in seltenen Fällen zum Erfolg. Die Korrelation von hydrogeologischen und geotechnischen Untersuchungen während der Pilotbohrungen und der Vorhersage von Problemen während des Schachtabteufens ist eine große Herausforderung. Eine Anzahl von geowissenschaftlichen Beobachtungen bei der Bohrkernaufnahme und Bohrlochversuche sind erforderlich, um erfolgreiches Schachtabteufen zu ermöglichen.