

Martine Paradis, David Lyon,  
Frederic Gauthier, Benoit Ouellet,  
Eric Desaulniers, Ann Lamontage,  
Kevin Morin

# Responsible Development: Matawinie Mining Project Model

Nouveau Monde Graphite (NMG), Saint-Michel-des-Saints, Québec/Canada, has put forward innovative design criteria related to its carbon-neutral vision, the reduction of its environmental footprint and the integration of reclamation to develop the Matawinie mining project, a world-class graphite deposit, which fits into its host environment. With graphite playing an important role in the electrification of transportation thanks to lithium-ion batteries, NMG plans to deploy an all-electric fleet for its mining operations – a first for an open-pit project. All equipment normally running on natural gas or diesel will be powered

by batteries or electricity. Design at the mining engineering level requires the participation of several partners and the adaptation of traditional models. NMG's other innovative approach is the management of filtered and desulphurized mine tailings without a dam through co-disposal in a stockpile and in the pit. This model integrates mine reclamation into the fundamental and initial design criteria. The sulphurized tailings will be disposed in cells constructed from the waste rock. The desulphurized tailings will then be used to encapsulate the waste rock to minimize risks associated with the generation of acid mine drainage (AMD).

## Verantwortungsvolle Entwicklung am Beispiel des Matawinie Bergbau-Projekts

Das Unternehmen Nouveau Monde Graphite (NMG) aus Saint-Michel-des-Saints in Québec/Kanada, hat innovative Designkriterien zur Entwicklung des Matawinie-Bergbauprojekts auf einer Graphitlagerstätte von Weltklasse vorgelegt, um seine Visionen von Klimaneutralität, Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks und der Integration der Rekultivierung in die umgebende Natur zu realisieren. Da Graphit ein wichtiger Bestandteil bei der Produktion von Lithiumionenbatterien ist und somit eine wichtige Rolle bei der Elektrifizierung von Transportmitteln spielt, plant NMG in seinen Bergwerksbetrieben den Einsatz eines vollelektrischen Fuhrparks – eine Premiere für ein Tagebauprojekt. Sämtliche Geräte, die sonst mit Erdgas oder Diesel angetrieben werden, sollen zukünftig batterie- oder strombetrieben sein. Design auf dem Ni-

veau der Bergbautechnik bedarf der Beteiligung mehrerer Partner und der Anpassung traditioneller Modelle. Eine weitere innovative Herangehensweise der NMG liegt in der Handhabung von gefilterten und entschwefelten Aufbereitungsrückständen ohne Dammbauwerke durch gemeinsame Deponierung auf einer Halde und in der Grube. Dieses Modell integriert die Rekultivierung des Bergwerks bereits in die Grundlagen der Entwurfsplanung. Die schwefelhaltigen Aufbereitungsrückstände sollen in Becken deponiert werden, die aus Abraum hergestellt werden. Die entschwefelten Aufbereitungsrückstände sollen dann zur Einkapselung des Abraums und der schwefelhaltigen Aufbereitungsrückstände genutzt werden, um Risiken im Zusammenhang mit saurem Grubenwasser (Acid Mine Drainage – AMD) zu vermeiden.

### 1 Introduction

Nouveau Monde Graphite (NMG), Saint-Michel-des-Saints, Québec/Canada, owns 100% interest in the Matawinie graphite property located in Saint-Michel-des-Saints, 150 km north of Montréal, Québec (Figure 1). Totalling 319 mining claims over 17,585 ha, the property has demonstrated exceptional potential due to its significant high-purity mineral reserve and low-cost operational model. Skilled workforce, high-quality infrastructure, including paved roads and hydroelectricity, as well as the dynamic regional business ecosystem provide a robust milieu for the development of the project.

The primary mission of NMG is to become a leading producer of graphite, anode material for Li-ion batteries and other value-added graphite products, while having the low-

### 1 Einleitung

Das Unternehmen Nouveau Monde Graphite (NMG) mit Sitz in Saint-Michel-des-Saints in Québec/Kanada, ist alleiniger Eigentümer der Matawinie-Graphitkonzession. Die Lagerstätte befindet sich in Saint-Michel-des-Saints, 150 km nördlich von Montréal (Bild 1). Durch die hochreinen Mineralreserven in dem aus 319 Grubenfeldern mit 17.585 ha bestehenden Konzessionsgebiet und in Verbindung mit dem kostengünstigen Betriebsmodell hat das Projekt ein außergewöhnliches Potential. Gut ausgebildete Arbeitskräfte, eine hochqualitative Infrastruktur mit asphaltierten Straßen und die Energieversorgung aus Wasserkraft in Verbindung mit dem dynamischen regionalen Geschäftsumfeld bieten eine solide Grundlage für die Entwicklung des Projekts.



Filtering the mine tailings keeps the water in the plant and it thus may be re-used in the process. If water quality causes loss of recovery, then the water will be treated for recirculation, minimizing its release into the environment and need of fresh water. For water containment structures as collecting basin, they will be dug.

The approach leading to the choice of managing the waste rock and the tailings by in pit and on land co-disposal has been studied through a decision-making process and is presented in the Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) (1).

One of the important conclusions related to the choice of tailings and waste rock management is that NMG will not build any infrastructure that poses a security risk to community or surrounding environment. Concerns were raised during the public consultation and were addressed by NMG to respect the best practice and the best technology available.

The three pillars of sustainable development were considered in the choice of the mine waste management strategy – environment, economy, and society – in addition to the technical and economic aspects. The following basic criteria were considered:

- minimize the project footprint;
- optimize water management;
- avoid or even eliminate water retention with dams;
- minimize the area to be covered; and
- minimize the number of stockpiles to facilitate water management.

In addition to the site selection studies and tailings management alternatives, the design of the infrastructures related to the management of tailings were carried out to include best practices and up-to-date standards concerning the management of mine waste and to limit the generation of acidity during operation. To this end, the new standard of the Global Industry Standard on Tailings Management has just been published (<https://globaltailingsreview.org/>) and the concept at NMG is consistent with the objectives of this standard, including principle 5: “Develop a robust design that considers the knowledge base and minimizes the risk of disruption to people and the environment at all stages of the life cycle of the tailings facility, including closure and post-closure”.

## 2.1 Characterization of mine materials, a first critical step

To select design criteria based on a sustainable and technical approach, an important initial step is to understand the type of materials the mine will have to manage, and what are the potential environmental issues. An exhaustive materials characterization was done for Matawinie project. The material characterization is also a critical step leading to water-quality modelling. After optimization of the co-disposal scenario based on available information, initial predictions of future water quality from full-scale co-disposal at the Matawinie Project can be made.

Based on thousands of samples, total sulphur averages of ore and waste rock of Matawinie project is approximately 2.5%. Geochemical analyses were performed on the five different lithologies (Graphitic Paragneiss ore, Mixed Paragneiss, Biotite

Die Herangehensweise, die zur Wahl der gemeinsamen Entsorgung von Abraum und Aufbereitungsrückständen in Gruben oder Halden geführt hat, wurde in einem Entscheidungsprozess geprüft und in der „Einschätzung der ökologischen und sozialen Auswirkungen“ (Environmental and Social Impact Assessment, ESIA) dargelegt (1).

Eine wichtige Schlussfolgerung in Bezug auf die Handhabung von Aufbereitungsrückständen und Abraum ist, dass NMG keine Infrastruktur aufbauen wird, welche die Sicherheit der Bevölkerung oder Umwelt gefährden könnte. Diesbezügliche Bedenken wurden bei der öffentlichen Anhörung geäußert und von NMG aufgenommen, um die besten verfügbaren Verfahren und Technologien einzusetzen.

Zusätzlich zu den technischen und wirtschaftlichen Aspekten, wurden bei der Wahl der Abfallwirtschaft der Betriebe die drei Säulen umweltfreundlicher Entwicklung – Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft – berücksichtigt. Die folgenden Grundkriterien wurden betrachtet:

- Minimierung des Fußabdrucks des Projekts,
- Optimierung des Wassermanagements,
- Vermeidung oder Eliminierung von Wasserrückhaltung durch Dämme,
- Minimierung des beaufschlagten Geländes und
- Minimierung der Anzahl an Halden, um das Wassermanagement zu erleichtern.

Neben den Studien zur Standortwahl und zu Alternativen zum Umgang mit Aufbereitungsrückständen, wurde das Design der Infrastruktur bezüglich des Umgangs mit Aufbereitungsrückständen so erstellt, dass die besten Verfahren und die neuesten Standards im Rahmen der Abfallentsorgung im Bergbau angewandt und die Erzeugung von Säure während des Betriebs reduziert wird. Dazu wurde erst kürzlich der neue „Globale Industriestandard für das Management von Aufbereitungsrückständen“ veröffentlicht (<https://globaltailingsreview.org/>) und das Konzept der NMG stimmt mit den Zielen dieses Standards einschließlich Leitsatz 5 überein: „Entwicklung eines robusten Designs unter Berücksichtigung des Grundlagenwissens und Minimierung des Risikos von Störungen für Mensch und Umwelt in allen Phasen der Einrichtung der Anlage zur Deponierung der Aufbereitungsrückstände, einschließlich der Schließungs- und Nachbetriebsphase.“

## 2.1 Charakterisierung von Gesteinsmaterial, ein erster entscheidender Schritt

Um Entwurfskriterien auf der Grundlage eines nachhaltigen und technischen Ansatzes auszuwählen, besteht ein wichtiger erster Schritt darin, die Art der Materialien zu kennen, die das Bergwerk handhaben muss und welche potentiellen Umweltprobleme vorliegen. Für das Matawinie-Projekt wurde eine umfassende Materialcharakterisierung durchgeführt. Die Materialcharakterisierung ist auch ein entscheidender Schritt, der zur Modellierung der Wasserqualität führt. Nach der Optimierung des Szenarios zur Deponierung basierend auf den verfügbaren Informationen, können erste Prognosen bezüglich der zukünftigen Wasserqualität im Matawinie-Projekt getroffen werden.

Basierend auf tausenden Proben beträgt der Schwefelgehalt von Erz und Nebengestein im Matawinie-Projekt durchschnitt-



Paragneiss, Charnockite and Meta-Gabbro) encountered on the Matawinie property owned by NMG and on the two types of tailings (“desulphurized” or “NAG” tailings and “sulphurized” or “PAG” tailings) that will be generated by the mine. Initial characterizations suggested that the Graphitic Paragneiss ore and the PAG have the highest sulfur content, mostly as pyrrhotite. Column test results confirmed that Graphitic Paragneiss and PAG tailings are Acid Rock Drainage (ARD) generating (2).

Matawinie Graphite laboratory-based kinetic tests were compared with more than 600 kinetic rates in the International Kinetic Database (IKD) from around the world (<http://www.mdag.com/ikd.html>). The measured rates of sulphate production and of copper-zinc leaching are average to low within their respective pH ranges.

Based on laboratory kinetic tests, most of net-acid-generating rock has lag times of several years to decades; PAG tailings have a lag time of months; and NAG tailings will not be net acid generating. These lag times are much longer or non-existent if exposure to oxygen is substantially reduced, which is a key part of ML-ARD<sup>1</sup> control.

## 2.2 Combine best practices and innovation to set objectives

Based on the material characterization, NMG has developed a control plan for ML-ARD. NMG will desulphurized the tailings to produce two streams. The NAG tailings will have a low content of sulphide minerals, primarily pyrrhotite and pyrite, while PAG tailings will contain elevated levels of sulphide. The innovative co-disposal scenario for Matawinie include strategic co-placement of waste rock and tailings.

Matawinie PAG tailings will be placed in physically distinct cells embedded in waste rock and filtered NAG tailings. The design of these cells and surrounding materials will be optimized to minimize risk of ML-ARD effluent, using a new model that overcomes the shortcomings of existing and past models. The co-disposal plan incorporates both, first progressively backfilling the pit as it is mined over 25 years (3) and second an adjacent and continuous above-grade pile (1, 4, 5, 6, 7). The co-disposal aims to minimize the production of ML-ARD in the waste rock pile and at the same time safely dispose the dewatered mine tailings (8). The final goal is to facilitate the final closure of the mine site.

The PAG and waste rock would be net acid generating after different lag times if fully and continuously exposed to air. Because there are three materials being co-disposed with one being net neutralizing, additional options to the design are available to minimize air entry and sulphide oxidation. The basic co-disposal design is a three-dimensional series of relatively small depositional areas for PAG tailings in cells, surrounded on the sides and bottom by berms made of waste rock, in turn all encapsulated by NAG tailings. The design criteria of the co-disposal technique aim to promote long-term physical and geochemical stability of mine

lich 2,5%. In den fünf Lithologien, die auf dem Matawinie-Konzessionsgebiet von NMG gefunden wurden (graphithaltiger Paragneiss, Paragneis, Biotit-Paragneis, Charnockit und Meta Gabbro) und mit zwei Arten von Aufbereitungsrückständen (entschwefelte oder „NAG“-Aufbereitungsrückstände und schwefelhaltige oder „PAG“-Aufbereitungsrückstände), die von dem Betrieb erzeugt werden, wurden geochemische Analysen durchgeführt. Erste Charakterisierungen ergaben, dass graphithaltiger Paragneis und PAG den höchsten Schwefelgehalt haben, hauptsächlich in Form von Pyrrhotin. Ergebnisse von Säulenprüfungen bestätigten, dass graphithaltiger Paragneis und PAG-Aufbereitungsrückstände saure Gesteinsentwässerung (Acid Rock Drainage – ARD) verursachen (2).

Im Labor durchgeführte kinetische Tests mit Graphit aus Matawinie wurden mit über 600 kinetischen Messungen aus der ganzen Welt in der „Internationalen Kinetischen Datenbank“ verglichen (<http://www.mdag.com/ikd.html>). Die gemessenen Mengen an Sulfat-Produktin und Kupfer-Zink-Laugen waren durchschnittlich bis niedrig im jeweiligen pH-Bereich.

Basierend auf im Labor durchgeführten kinetischen Tests haben die meisten säurebildenden Gesteine eine Verzögerungszeit von mehreren Jahren bis hin zu Jahrzehnten. PAG-Aufbereitungsrückstände haben eine Verzögerungszeit von einigen Monaten, NAG-Aufbereitungsrückstände sind nicht säurebildend. Diese Verzögerungszeiten sind bei erheblicher Reduzierung der Sauerstoffaussetzung weitaus länger oder nicht existent, was ein wichtiger Teil der ML-ARD<sup>1</sup>-Kontrolle ist.

## 2.2 Kombination von bester Vorgehensweise und Innovationen zur Festlegung der Ziele

Auf der Grundlage der Materialcharakterisierung hat NMG einen Plan zur Kontrolle für die ML-ARD entwickelt. NMG wird die Aufbereitungsrückstände entschwefeln, sodass zwei Ströme entstehen. Die NAG-Aufbereitungsrückstände haben einen geringen Gehalt an Sulfiden, in erster Linie Pyrrhotin und Pyrit, während die PAG-Aufbereitungsrückstände erhöhte Sulfidwerte enthalten. Das innovative Szenario zur gemeinsamen Deponierung für Matawinie umfasst die strategische gemeinsame Deponierung von Abraum und Aufbereitungsrückständen.

Die PAG-Aufbereitungsrückstände aus Matawinie werden in physikalisch unterschiedlichen Becken platziert, die in Abraum und gefilterten NAG-Aufbereitungsrückständen eingebettet sind. Das Design dieser Becken und der umgebenden Materialien wird optimiert, um das Risiko von ML-ARD-Abwässern zu minimieren, indem eine neue Ausführung verwendet wird, welche die Unzulänglichkeiten bestehender und früherer Ausführungen vermeidet. Der Plan zur gemeinsamen Entsorgung sieht sowohl eine schrittweise Verfüllung der Grube während des Abbaus über 25 Jahre vor (3) als auch eine angrenzende und kontinuierliche oberirdische Halde (1, 4, 5, 6, 7). Ziel der gemeinsamen Entsorgung ist es, die Produktion von ML-ARD in der Halde zu minimieren und gleichzeitig die entwässerten Aufbereitungsrückstände sicher zu entsorgen (8). Das

<sup>1</sup> ML-ARD is an acronym for Metal Leaching and Acid Rock Drainage or, more simply, inorganic water contamination. In Canada, the major reference for the assessment and the prediction of ML-ARD is Price (2009), which has been referenced and used in several past studies for the Matawinie Project (SNC Lavalin, 2019).

<sup>1</sup> ML-ARD ist ein Akronym für „Metal Leaching and Acid Rock Drainage“ (Metalllaugung und saure Gesteinsentwässerung) oder, einfacher ausgedrückt, die anorganische Verschmutzung von Wasser. In Kanada ist Price (2009) die größte Quelle für die Einschätzung und Prognose von ML-ARD, auf die sich viele frühere Studien für das Matawinie-Projekt beziehen (SNC Lavalin, 2019).

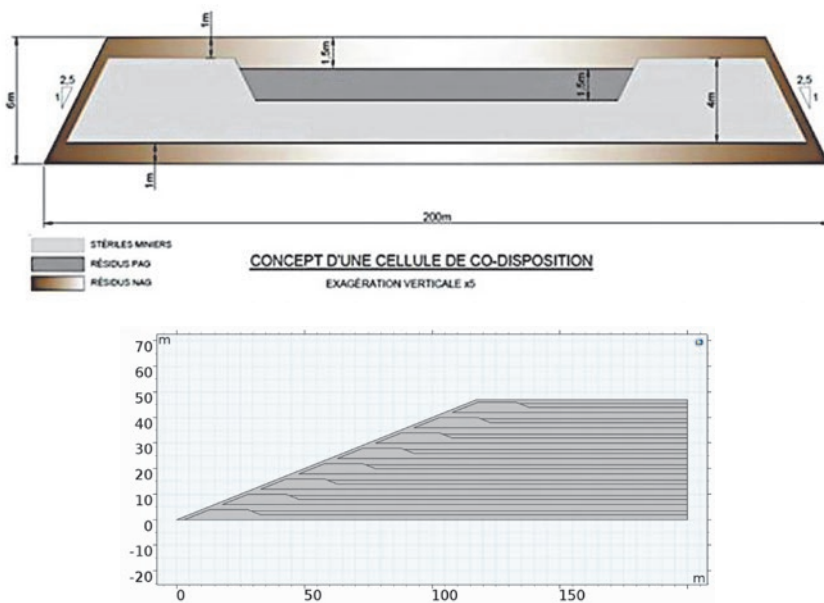


Fig. 2a/b. Conceptual 1-D design of NMG co-disposal design.  
Bild 2a/b. Entwurf der NMG-Gemeinsamdeponierung. Source/Quelle: NMG

waste, including minimizing aqueous metals concentrations if water draining through and from the material.

The conceptual design of a co-disposal cell is shown in figure 2. Each cell is composed of a pile of waste rock with a thickness of 4 m, a PAG tailings layer over a thickness of 1.5 m, and a thickness of NAG tailings of 1.5 m above the PAG tailings and of 1 m above the waste rock as covers on top. These filtered tailings will be transported by conveyor or truck, deposited, spread, and compacted to form a water-unsaturated tailings layer, producing a stable pile usually requiring no retention structures such as dams. The bottom of figure 2a and 2b shows the geometry of the 2-D model for the simulations.

The primary objectives of co-disposal of tailings and waste rock at the Matawinie project are:

- to minimize air entry and subsequent ARD generation within the co-disposed materials;
- to minimize water entry and flow through the co-disposed materials; and
- to prevent ARD release at the outer boundaries of the co-disposal area.

Under some conditions, minimization of air entry can entail maximum water entry. Therefore, optimization will identify the best balance between the two to prevent ML-ARD release from the outer boundaries of the co-disposal area.

### 2.3 Modelling ARD complexity

An important key-design is to not underestimate ML-ARD chemical reactions area and to capture this complexity in the prediction model.

In ARD prediction, many models simulate air entry into the mined materials based on diffusion, which is the absolute slowest rate that could exist. In contrast, there are many processes operating in full-scale co-disposal that would cause substantially

Endziel besteht darin, die endgültige Schließung des Bergwerksgeländes zu erleichtern.

PAG und Abraum bilden bei vollständiger und kontinuierlicher Luftaussetzung nach unterschiedlichen Verzögerungszeiten Säuren. Da drei Materialien gemeinsam entsorgt werden, von denen eines neutralisierend wirkt, erschließen sich weitere Designoptionen zur Minimierung von Lufteintritt und sulfidischer Oxidation. Der grundlegende Entwurf zur gemeinsamen Entsorgung basiert auf einer dreidimensionalen Aneinanderreihung relativ kleiner Entsorgungsflächen für PAG-Aufbereitungsrückstände in Becken, deren Seiten und Grundflächen aus Abraum mit eingeschlossenen NAG-Aufbereitungsrückständen bestehen. Die Designkriterien dieses Deponierungsverfahrens zielen auf eine langfristige Verbesserung der physikalischen und geochemischen Stabilität des Abraums ab, einschließlich der Minimierung wasserhaltiger Metallkonzentrationen bei Grubenwasser, das durch das Material fließt oder aus dem Material herausicksert.

Bild 2 zeigt den Entwurf eines Beckens für die gemeinsame Entsorgung. Jedes Becken besteht aus einem Abraum-Damm mit einer Höhe von 4 m, einer 1,5 m dicken Schicht aus PAG-Aufbereitungsrückständen und einer Schicht aus NAG-Aufbereitungsrückständen als Abdeckung mit einer Höhe von 1,5 m über den PAG-Aufbereitungsrückständen und 1 m über dem Abraum. Die gefilterten Aufbereitungsrückstände werden per Förderband oder Truck transportiert, abgeladen, verteilt und verdichtet, um eine trockene Schicht aus Aufbereitungsrückständen zu formen, die eine stabile Halde bildet, welche eigentlich keine Begrenzungen wie Dämme zur Stabilisierung benötigt. Der untere Teil der Bilder 2a und 2b zeigt die Geometrie des 2D-Modells für die Simulationen.

Die Hauptziele der gemeinsamen Entsorgung von Aufbereitungsrückständen und Abraum im Matawinie-Projekt sind:

- die Minimierung von Lufteintritt und daraus resultierend saure Gesteinsentwässerung (ARD) innerhalb der gemeinsam entsorgten Materialien,
- die Minimierung von Wassereintritt und -abfluss durch gemeinsam entsorgte Materialien und
- die Prävention von ARD-Freisetzung an den äußeren Grenzen der Deponieflächen.

Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Minimierung des Lufteintritts zu steigendem Wassereintritt führen. Daher wird die Optimierung das beste Verhältnis der beiden Variablen identifizieren, um die Freisetzung von ML-ARD an den äußeren Grenzen der Deponierungsflächen zu vermeiden.

### 2.3 Modellierung der ARD-Komplexität

Ein wichtiges Designelement ist, den Bereich der chemischen ML-ARD Reaktionen nicht zu unterschätzen und diese Komplexität im Prognosemodell zu erfassen.

Bei der ARD-Prognose simulieren mehrere Modelle den Lufteintritt in die abgebauten Mineralien auf Basis der Diffusion, welche die langsamste ist. Im Gegensatz dazu gibt es viele Prozesse, die in

more air to enter. These could cause substantially more ARD generation and transport. Models typically simulate water entry and water movement based on capillary-tension unsaturated flow. Based on separate simulations of air and water using separate sets of equations, the oxidation of sulphide minerals is then calculated using a third set of equations.

A simple reason why this approach is less reliable is because each phase (air, water, or solid minerals) affects the other two phases, sometimes in major ways. These effects can be synergistic (accelerating some processes) and antagonistic (slowing some processes) in mined materials. Therefore, they should not be simulated separately. Some idea of the true complexity – not including sulphide minerals – is presented in Tindall et al. (9). Existing models for mined materials do not simulate this complexity.

When air is initially transported by very slow diffusion into mined materials with sulphide minerals, these minerals consume the oxygen. By consuming the oxygen, the minerals create a partial vacuum, which draws in more oxygen faster than predicted by diffusion and accelerates the ARD production. Next, the oxidation of these sulphide minerals removes oxygen (O) from the gas phase and removes water (H and O) from the aqueous phase. They do this by forming secondary minerals containing OH (like iron oxyhydroxides minerals),  $\text{SO}_4$  (sulphate minerals like alunite), and water-of-crystallization (minerals like gypsum). The removal of oxygen creates a partial vacuum drawing in more air. The removal of water from the aqueous phase changes the matric suction of the unsaturated water,

der vollflächigen gemeinsamen Deponierung stattfinden, die wesentlich mehr Luft eindringen lassen würden. Diese könnten deutlich mehr ARD-Entstehung und -Bewegung verursachen. Die Modelle simulieren in der Regel Wassereintritt und Wasserbewegung auf der Grundlage der ungesättigten Strömung der Kapillarspannung. Basierend auf separaten Simulationen von Luft und Wasser unter Verwendung separater Gleichungen wird die Oxidation von Sulfiden dann mit einem dritten Satz von Gleichungen berechnet.

Ein einfacher Grund, warum dieser Ansatz weniger zuverlässig ist, liegt darin, dass jede Phase – Luft, Wasser oder feste Mineralien – die anderen beiden Phasen beeinflusst, manchmal in großem Maß. Diese Effekte können synergetisch (Beschleunigung einiger Prozesse) und antagonistisch (Verlangsamung einiger Prozesse) in abgebauten Materialien sein. Daher sollten sie nicht separat simuliert werden. Eine Vorstellung von wahrer Komplexität – ohne Sulfide miteinzubeziehen – wird in Tindall et al. vorgestellt (9). Vorhandene Modelle für abgebaute Materialien simulieren diese Komplexität nicht.

Wenn Luft zunächst durch sehr langsame Diffusion in abgebaute Materialien mit Sulfiden transportiert wird, verbrauchen diese Mineralien den Sauerstoff. Durch den Verbrauch des Sauerstoffs erzeugen die Mineralien ein Teilvakuum, das schneller Sauerstoff anzieht als durch Diffusion vorhergesagt und die ARD-Entstehung wird beschleunigt. Als nächstes entfernt die Oxidation dieser Sulfide den Sauerstoff (O) aus der Gasphase und Wasser (H und O) aus der wasserhaltigen Phase. Dies geschieht, indem sekundäre Mineralien gebildet werden, die OH (wie Eisenhydroxid-Mineralien),  $\text{SO}_4$  (Sulfate wie Alunit) und Kristallwasser (Mineralien wie Gips) enthalten. Die

causing changes in water movement. And the creation of secondary minerals with relatively large molar volumes – from the extra O and H from air and water – means these secondary minerals swell and “break apart”, e.g., Jerz and Rimstidt (10). As a result, the linked gas-water-solid processes summarized here can modify ARD processes to higher levels than predicted by current models.

Also, coarse waste rock is assumed in models have capillarity and matric suction, to very high levels not found in sands and silts. This keeps coarse waste rock from theoretically transmitting water. Above a certain site-specific particle size, the coarse waste rock does not have capillary tension, but instead transmits water and air rapidly like an open pipe. This is opposite to the common models for mined materials but is important because it can change results. Waste rock that was thought to be relatively non-transmitting of water based on existing models can become conduits after fully constructed at a site.

Although these gas-water-solid interactions are complex, a model has been created for Matawinie’s innovative co-disposal. The many synergistic and antagonistic effects of the complex interactions of air, water, and solid minerals in sulphide mined materials have not been simulated in detail before 2019. In 2019, the pure-research branch of the federal government, the National Research Council Canada (NRC), recognized the importance of more reliable simulations of co-disposal of mined materials and of mine disposal in general. NRC has already modelled air-water-solid interactions and oxidation-heat-convection interactions in waste rock (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17). A major objective of NRC is to collaborate with Canadian companies. Its mission is “To have an impact by advancing knowledge, applying leading-edge technologies, and working with other innovators to find creative, relevant and sustainable solutions to Canada’s current and future economic, social and environmental challenges.”

NMG is committed to innovative mining and processing at Matawinie and has agreed to collaborate with NRC to apply its new, state-of-the-art model to Matawinie co-disposal. According to NMG, this will be the first time a truly complex, multi-phase model will be applied to mined materials. Based on information above, the company expects this to be “pessimistic” yet “realistic” relative to existing models. Ongoing work involves laboratory measurements and on-site testing for important site-specific input values.

### 2.3.1 Modelling to optimize the design

The modeling was planned in two phases. Phase 1 covered initial oxygen transport/consumption and sulphide oxidation reaction rate (acid rock drainage generation and aqueous concentration) modeling. A scenario was modeled by the NRC for on-land co-disposition consisting of NAG tailings (acting as the primary shield against oxygen entry), PAG tailings, and waste rock; and a second scenario with the configuration of NAG tailings over waste rock as the above-water-table portion of a pit backfill. The 1-D modeling simulated oxygen diffusion/convection and consumption by sulphide-mineral oxidation and heat transfer in the tailings to estimate the oxygen concentration and temperature profiles in-

Entfernung von Sauerstoff erzeugt ein partielles Vakuum, das mehr Luft anzieht. Die Entfernung von Wasser aus der wasserhaltigen Phase verändert die Matrix-Absaugung des ungesättigten Wassers und führt zu Veränderungen in der Wasserbewegung. Die Bildung von Sekundärmineralien mit relativ großen Molvolumen – aus dem zusätzlichen O und H aus Luft und Wasser – bedeutet, dass diese Sekundärmineralien anschwellen und „auseinanderbrechen“ (siehe z.B. Jerz und Rimstidt (10)). Dadurch können die gesamten verlinkten Prozesse der Gas-Wasser-Feststoffe die ARD-Prozesse auf ein höheres Niveau verändern, als von aktuellen Modellen vorhergesagt.

Auch die von Modellen in grobem Nebengestein angenommene Kapillarspannung und Matrix-Ansaugung konnte in Sand und Schlamm nicht nachgewiesen werden. Dadurch ist grobes Nebengestein theoretisch nicht zur Wasserübertragung fähig. Oberhalb einer bestimmten ortsspezifischen Partikelgröße hat das grobe Nebengestein keine Kapillarspannung, sondern überträgt stattdessen Wasser und Luft so schnell wie ein offenes Rohr. Dies steht im Gegensatz zu den gängigen Modellen für abgebaute Materialien, ist jedoch von großer Bedeutung, da es die Ergebnisse ändern kann. Nebengestein, von dem auf der Grundlage bestehender Modelle angenommen wurde, dass es relativ wenig Wasser überträgt, kann nach vollständiger Verarbeitung an einem Standort wasserleitend werden.

Obwohl diese Wechselwirkungen von Gas-Wasser-Feststoffen sehr komplex sind, konnte ein Modell für die innovative Art der Deponierung verschiedener Materialien in Matawinie erstellt werden. Die vielen synergetischen und antagonistischen Effekte der komplexen Wechselwirkungen von Luft, Wasser und festen Mineralien in abgebauten sulfidischen Materialien wurden vor 2019 nicht im Detail simuliert. Im Jahr 2019 erkannte der rein wissenschaftliche Zweig der Regierung, das National Research Council Canada (NRC), die Bedeutung zuverlässigerer Simulationen der gemeinsamen Entsorgung von abgebauten Materialien und der Entsorgung im Bergbau im Allgemeinen. Das NRC hat bereits Wechselwirkungen von Luft-Wasser-Feststoffen und Oxidations-Wärmeströmung in Nebengestein modelliert (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17). Ein wichtiges Ziel des NRC ist die Zusammenarbeit mit kanadischen Unternehmen. Seine Aufgabe ist es, „durch die Weiterentwicklung von Wissen, die Anwendung modernster Technologien und die Zusammenarbeit mit anderen Innovatoren, kreative, relevante und nachhaltige Lösungen für die aktuellen und zukünftigen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Herausforderungen Kanadas zu finden.“

Das Unternehmen NMG engagiert sich für innovative Verfahren zum Abbau und zur Aufbereitung in Matawinie und hat sich bereit erklärt, mit dem NRC zusammenzuarbeiten, um sein neues, hochmodernes Modell der gemeinsamen Entsorgung in Matawinie anzuwenden. NMG zufolge wird dies das erste Mal sein, dass ein wirklich komplexes, mehrphasiges Modell bei abgebauten Materialien angewendet wird. Basierend auf den vorgenannten Informationen erwartet das Unternehmen, dass dies „pessimistisch“ aber „realistisch“ im Vergleich zu bestehenden Modellen sein wird. Laufende Arbeiten umfassen Labormessungen und Tests vor Ort zur Ermittlung wichtiger, ortsspezifischer Eingabewerte.

### 2.3.1 Erstellen eines Modells zur Optimierung des Designs

Die Modellierung wurde in zwei Phasen geplant. Phase 1 umfasste den anfänglichen Sauerstofftransport- bzw. -verbrauch und die Reaktionsgeschwindigkeit der Sulfid-Oxidation (ARD und wässri-



side the tailings (5, 6). At the end of the first phase, models were enhanced to include two-dimensional evaluation of site-specific waste pile designs proposed by NMG. All the results of NRC model are integrated into design criteria, are helpful to use as a decision-making tool for deposition plan parameters and will be used to follow onsite behaviour of the Co-Disposal Storage Area.

The 2-D simulations include water infiltration flow, oxygen diffusion/convection and consumption by oxidation reactions and heat transfer in the co-disposition cell to get the oxygen concentration profile and subsequent acid rock drainage (ML-ARD) generation rate – in these simulations, represented by the sulphate generation rate – within the co-disposal cells. The primary objective is to provide design criteria for minimizing air entry and subsequent ARD generation within the co-disposition cells. The simulations were conducted using the COMSOL Multiphysics® software (COMSOL, 5.4).

The results of oxygen consumption rate from the parametric studies reflect the sulfide oxidation reaction rate in some potential configurations and conditions in one part of the co-disposal design at NMG (7, 18). Some findings of the NRC modelling are as follows:

- The co-disposal concept in general can reduce sulfide oxidation reaction rates compared with a mixed (un-desulfurized) tailing covering waste rock piles.
- Water saturation of the tailings has the biggest influence on the co-disposal design.
- Thickness of the tailings has bigger influence when tailings have lower saturation.
- When water saturation in the tailings layer is kept above 80%, the NAG tailings layer can greatly reduce oxidation reactions inside the PAG tailings and the waste rock.
- Due to the top layer's oxygen blocking effect, the oxygen cannot reach the majority of PAG tailings inside the pile.
- Oxygen level in the layers beneath the top cell is close to zero, meaning little to no sulphide oxidation occurs in the underlying layers.
- The highest simulated temperature rise due to sulfide oxidation reactions is about 15 to 20 °C. Therefore, substantial self-heating and spontaneous combustion are not predicted in the co-disposal scenarios.
- Unlike the layers of co-disposal cells underneath the top surface of the pile, the water saturation level inside the NAG tailings on the outer slope plays a critical role on blocking oxygen ingress into the waste rock.
- When water saturation in the tailings layer is below 80%, oxidation reaction rate increases with lowering water saturation.
- Increasing the thickness of the tailings layer can reduce overall oxidation reaction rate.

### 2.3.2 Identify risk and issues from the start

The more issues addressed from the early stage of the engineering studies lead to more reliable mitigation measures in design criteria, and thus mainly avoid these issues during operations or at closure. One important design criterion different from past mining experiences is that the NMG design prevents ML-ARD during the Life-of-Mine (LOM). Following the ESIA (1) and Feasibil-

ge Konzentration). Vom NRC wurde ein Szenario für die gemeinsame Deponierung von NAG-Aufbereitungsrückständen – als erste Barriere gegen Sauerstoffeintritt – PAG-Aufbereitungsrückständen und Abraum sowie ein zweites Szenario mit der Konfiguration von NAG-Aufbereitungsrückständen über Abraum als der Teil über den wasserführenden Schichten einer Grubenverfüllung an Land modelliert. Das 1D-Modell simulierte Sauerstoffdiffusion, -konvektion und -verbrauch durch Sulfid-Mineraloxidation und Wärmeübertragung in den Aufbereitungsrückständen, um die Sauerstoffkonzentration und Temperaturprofile innerhalb der Aufbereitungsrückstände abzuschätzen (5, 6). Am Ende der ersten Phase wurden die Modelle um eine zweidimensionale Bewertung standortspezifischer Designs der Halden erweitert, die von NMG vorgeschlagen wurden. Alle Ergebnisse des NRC-Modells sind in die Designkriterien integriert und dienen als Entscheidungsgrundlage für die Entsorgungsplanung sowie zur Überwachung des Verhaltens der Deponierung vor Ort.

Die 2D-Simulationen umfassen Wasserinfiltrationsdurchfluss, Sauerstoffdiffusion, -konvektion und -verbrauch durch Oxidationsreaktionen und Wärmeübertragung im gemeinsamen Deponiebereich, um das Sauerstoffkonzentrationsprofil und die daraus folgende Erzeugungsrate von saurer Gesteinsentwässerung (ML-ARD) – in diesen Simulationen dargestellt durch die Sulfat-Erzeugungsrate – innerhalb der gemeinsamen Entsorgungsbecken zu erreichen. Das Hauptziel ist es, Designkriterien für die Minimierung des Lufteintritts und der anschließenden ARD-Erzeugung innerhalb der gemeinsamen Entsorgungsbecken zu schaffen. Die Simulationen wurden mit der COMSOL Multiphysics®-Software (COMSOL, 5.4) durchgeführt.

Die Ergebnisse der Sauerstoffverbrauchsrate aus den parametrischen Studien spiegeln die Sulfid-Oxidationsreaktionsrate in einigen potentiellen Konfigurationen und Bedingungen in einem Teil des gemeinsamen Entsorgungsdesigns bei NMG wider (7, 18). Einige Ergebnisse des NRC-Modells lauten wie folgt:

- Allgemein kann das gemeinsame Entsorgungskonzept die Reaktionsraten der sulfidischen Oxidation im Vergleich zu nicht-entschwefelten Aufbereitungsrückständen reduzieren, welche die Abraumhalden abdecken.
- Die Wassersättigung der Aufbereitungsrückstände hat den größten Einfluss auf das gemeinsame Entsorgungsdesign.
- Die Dicke der Aufbereitungsrückstände hat größeren Einfluss, wenn die Rückstände eine geringere Sättigung haben.
- Wenn die Wassersättigung in der Schicht der Aufbereitungsrückstände über 80% gehalten wird, kann die Schicht aus NAG-Aufbereitungsrückständen die Oxidationsreaktionen innerhalb der PAG-Aufbereitungsrückstände und des Abraums stark reduzieren.
- Aufgrund der sauerstoffblockierenden Wirkung der obersten Schicht kann der Sauerstoff die Mehrheit der PAG-Aufbereitungsrückstände im Inneren der Halde nicht erreichen.
- Der Sauerstoffgehalt in den Schichten unterhalb des oberen Beckens liegt nahe Null, was bedeutet, dass in den darunter liegenden Schichten wenig bis gar keine Sulfid-Oxidation auftritt.
- Der höchste simulierte Temperaturanstieg durch Sulfid-Oxidationsreaktionen beträgt etwa 15 bis 20 °C. Daher sind in den gemeinsamen Entsorgungsszenarien weder erhebliche Selbsterhitzung noch spontane Verbrennung vorhergesagt.



ity study (19), one concern coming from that objective is the time delay in placing tailings and waste rock in the co-disposal area.

Kinetic testing has shown that Matawinie samples with elevated Effective Neutralization Potential (ENP) would remain near neutral for years during active oxidation. On the other hand, samples with virtually low or no ENP, including the sulphurized PAG tailings, would become acidic a certain lag time after mining and processing. The acidity released by these lag materials in the co-disposal area would consume ENP in surrounding materials, shortening their lag times. In effect, this creates a complex cascading geochemical trend of onset of ARD within the co-disposal area.

Except for the desulphurized NAG tailings, the other mined materials will be mostly net acid generating and capable of releasing ARD after various "lag times". However, this would happen only if the materials were already acidic when placed in the co-disposal area and/or significant amounts of air continued to flow into the co-disposed materials after placement, which will be minimized by the optimization of Matawinie Co-Disposal Design.

The delay and scenarios have been modeled (1, 3, 4, 7). A delay to place waste rock and tailings in the co-disposal area are considered for the full-scale deposition plan of the Co-disposal Stockpiles and In-Pit Facility to prevent probability that the residual water draining from the co-disposal area will be ARD.

## 2.4 Testing technologies

In addition to establishing models for design criteria, NMG has been operating a demonstration plant since Q4-2018 in Saint-Michel-des-Saints to qualify products and establish a sale record, test, and improve processes for optimised production, recruit, and train employees ahead of commercial operations.

Through its demonstration operations, NMG can validate its process for desulphurisation of tailings, collects geochemical and geotechnical data and to complete the construction of a co-disposal experimental cell through a collaborative partnership with Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).

Field scale experimental cells were installed on the Matawinie property to calibrate the parameters about performance of the co-disposal design primary Objectives Design including prevent sulfide oxidation and mine water contamination. Four tests' cells were installed:

1. an experimental co-disposal cell, made up of mine waste rock, NAG tailings and PAG tailings with the aim to simulate, on a field scale, the co-disposal scenario allowing the sulphide oxidation process to be delayed pending the construction;
2. two experimental field cells composed respectively of sulphide concentrate (PAG) and desulphurized tailings (NAG), built to study their geochemical behavior under real conditions; and
3. an experimental field cell, made up of waste rock (natural grain size), also to study their geochemical behavior under real conditions (20).

The following equipment was used for the instrumentation of the experimental cells; probes to measure the suction (Irrometer Watermark), the volumetric water content (TEV) and temperature (type 5TM from Decagon, type Terros 12) as well as the

- Im Gegensatz zu den Schichten der gemeinsamen Entsorgungsbecken unterhalb der Oberseite der Halde spielt der Wassersättigungsgrad innerhalb der NAG-Aufbereitungsrückstände am äußeren Hang eine entscheidende Rolle bei der Blockierung des Sauerstoffeintritts in das Nebengestein.
- Wenn die Wassersättigung in der Schicht aus Aufbereitungsrückständen unter 80 % liegt, steigt die Oxidationsreaktionsrate mit sinkender Wassersättigung.
- Die Erhöhung der Dicke der Schicht aus Aufbereitungsrückständen kann die gesamte Oxidationsreaktionsrate reduzieren.

### 2.3.2 Risiken und Probleme von Anfang an identifizieren

Die vielen Probleme, die in der frühen Phase der Ingenieurstudien aufgezeigt wurden, führten zu zuverlässigeren Vorbeugungsmaßnahmen im Rahmen der Entwurfskriterien, wodurch Probleme während des Betriebs oder bei Schließung meist vermieden werden. Ein wichtiges Designkriterium, das sich von früheren Bergbauerfahrungen unterscheidet, ist, dass das NMG-Design ML-ARD während des Betriebs des Bergwerks (life of mine, LOM) verhindert. Der ESIA- (1) und der Feasibility-Studie (19) folgend ergeben sich Bedenken, die aus der zeitlichen Verzögerung bei der Deponierung von Aufbereitungsrückständen und Abraum im gemeinsamen Entsorgungsbereich resultieren.

Kinetische Tests haben gezeigt, dass Matawinie-Proben mit erhöhtem effektiven Neutralisationspotential (ENP) während der aktiven Oxidation jahrelang nahezu neutral bleiben würden. Andererseits würden Proben mit praktisch niedriger oder gar keiner ENP, einschließlich der geschwefelten PAG-Aufbereitungsrückstände, nach dem Abbau und der Verarbeitung mit einer gewissen Verzögerungszeit sauer werden. Der Säuregehalt dieser verzögerten Materialien im gemeinsamen Entsorgungsbereich würde ENP in umliegenden Materialien verbrauchen und ihre Verzögerungszeiten verkürzen. Dies führt zu einem komplexen geochemischen Trend zu Beginn der ARD im gemeinsamen Entsorgungsbereich.

Abgesehen von den entschwefelten NAG-Aufbereitungsrückständen werden die anderen abgebauten Materialien meist säurebildend und in der Lage sein, die ARD nach verschiedenen „Verzögerungszeiten“ freizusetzen. Dies würde jedoch nur geschehen, wenn die Materialien bereits sauer waren, wenn sie im gemeinsamen Entsorgungsbereich platziert wurden und/oder nach der Platzierung weiterhin erhebliche Luftmengen in die gemeinsam entsorgten Materialien strömen, was von der Eintrittswahrscheinlichkeit her durch die Optimierung des Designs zur Gemeinsamdeponierung in Matawinie minimiert wird.

Diese Verzögerung und die Szenarien wurden modelliert (1, 3, 4, 7). Für die umfassende Deponierungsplanung des Bergwerks wird eine Verzögerung beim Versetzen von Abraum und Aufbereitungsrückständen in der gemeinsamen Deponie in Betracht gezogen, um zu verhindern, dass das Restwasser, das aus der Deponie abfließt, aus ARD besteht.

## 2.4 Untersuchungsmethoden

Neben der Erstellung von Modellen für Designkriterien betreibt NMG seit dem 4. Quartal 2018 in Saint-Michel-des-Saints eine Versuchsanlage, um Produkte zu qualifizieren und einen Verkaufsverlauf zu erstellen, Prozesse für eine optimierte Produktion zu testen und zu verbessern sowie Mitarbeiter vor dem Start des

oxygen concentration (APOGEE), have been fitted beforehand on three supports (CO-1, CO-2 and CO-3), which have been set up in the co-disposal cell. The configuration and positions of the probes are shown in figure 3.

In addition to the instrumentation, leachate collections are carried out regularly at the outlet of each drain, to determine the chemical composition of the percolation water. Monitoring the evolution of these chemical parameters over time will provide information on the geochemical behavior of materials inside cells.

### 3 Deploying an all electric mining fleet

In line with its sustainability commitment, NMG is advancing the procurement of an all-electric fleet powered by renewable hydroelectricity to spearhead a more environmentally friendly mining model and to greatly facilitate achieving a carbon-neutral sourcing alternative for original equipment manufacturers (OEM) and battery producers. In addition, this project represents an opportunity to build a mine as a "global technology showcase" located only 2 h north of Montreal.

#### 3.1 The starting line of all-electric NMG initiative

To start this initiative, NMG assembled a "Task Force Committee" (TFC) consisting of world-class engineering and OEM partners. The TFC's mandate was to brainstorm ideas and alternatives for the all-electric concept, investigate the maturity of the possible technologies, calculate the Capex and Opex impacts on a preliminary basis, and make recommendations. NMG and its TFC partners worked in open collaboration with each other to serve the common interest of assisting NMG with the implementation of a more environmentally friendly mining operation.

At first, the mandate was to examine the impact of converting the Matawinie mine operation to an all-electric project at the pre-feasibility level. NMG and DRA-METCHEM published a Pre-Feasibility Study (PFS) in December 2017, which considered a conventional mining method with a diesel fleet. This investigation entailed examining possible all-electric solutions that could be feasibly implemented in time for the start of mining opera-

kommerziellen Betriebs zu rekrutieren und zu qualifizieren.

Durch ihren Demonstrationsbetrieb kann NMG sein Verfahren zur Entschwefelung von Aufbereitungsrückständen validieren, geochemische und geotechnische Daten sammeln und den Bau einer experimentellen Deponie für eine gemeinsame Entsorgung durch eine Zusammenarbeit mit der Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) abschließen.

Auf dem Matawinie-Gelände wurden Versuchsbecken im Feldmaßstab einschließlich Maßnahmen zur Vermeidung von sulfidischer Oxidation und Grubenwasserkontamination installiert, um die Parameter über die Leistung des gemeinsamen Entsorgungsdesigns zu kalibrieren. Vier Testbecken wurden installiert:

1. ein Versuchsbecken für gemeinsame Entsorgung, das aus Abraum, NAG- und PAG-Aufbereitungsrückständen besteht, mit dem Ziel, im Feldmaßstab das gemeinsame Entsorgungsszenario zu simulieren, das es ermöglicht, den Sulfid-Oxidationsprozess bis zum Bau zu verzögern,
2. zwei experimentelle Versuchsbecken, die aus Sulfidkonzentrat (PAG) bzw. entschwefelten Aufbereitungsrückständen (NAG) bestehen, die gebaut wurden, um ihr geochemisches Verhalten unter realen Bedingungen zu untersuchen und
3. ein Versuchsfeldbecken, bestehend aus Abraum mit natürlicher Kornverteilung zur Untersuchung des geochemischen Verhaltens unter realen Bedingungen (20).

Die folgende Ausrüstung wurde für die Instrumentierung der Versuchsbecken verwendet: Sonden zur Messung der Absaugung (Irrrometer Watermark), des Volumenwassergehalts (TEV) und der Temperatur (Typ 5TM von Decagon, Typ Terros 12) sowie der Sauerstoffkonzentration (APOGEE) wurden zuvor an drei Stützen (CO-1, CO-2 und CO-3) montiert, die im gemeinsamen Entsorgungsbecken eingerichtet wurden. Die Konfiguration und die Positionen der Sonden sind in Bild 3 dargestellt.

Zusätzlich zur Instrumentierung werden regelmäßig Sickerwassersammlungen am Auslass jedes Abflusses durchgeführt, um die chemische Zusammensetzung des Sickerwassers zu bestimmen. Die Überwachung der Entwicklung dieser chemischen Parameter im Lauf der Zeit wird Informationen über das geochemische Verhalten der Materialien in den Becken liefern.

Die Überwachung der Entwicklung dieser chemischen Parameter im Lauf der Zeit wird Informationen über das geochemische Verhalten der Materialien in den Becken liefern.

### 3 Einsatz eines vollelektrischen Fuhrparks

Im Einklang mit dem Einsatz für Nachhaltigkeit treibt NMG die Beschaffung eines vollelektrischen Fuhrparks voran, der mit erneuerbarer Energie aus Wasserkraft angetrieben wird, um Vorreiter für eine umweltfreundlichere Art des Bergbaus zu werden und es deutlich zu vereinfachen, eine klimaneutrale Alternative der Beschaffung für maschinentechnische

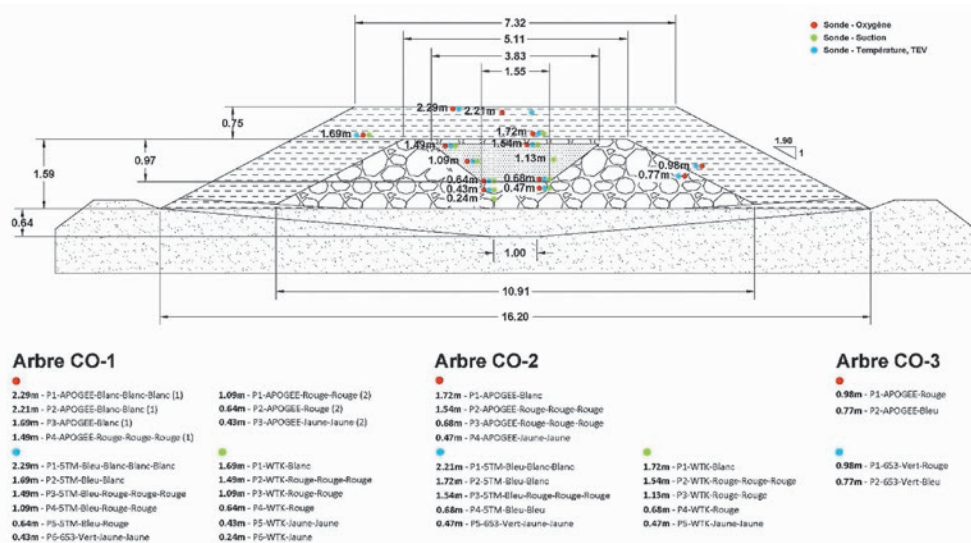


Fig. 3. As-built experimental test-cell.

Bild 3. Bestandszeichnung des experimentellen Testbeckens. Source/Quelle: NMG

tions and to better understand the resulting Capex and Opex impact on the project. The partners were ABB (Mine & Plant Electrification & Automation, EV Charging), MEDATECH Engineering (Mobile Equipment Electrification), DRA-Metchem (Mining Engineering & Design), SNC Lavalin (Tailings and Waste Rock Management) and Doppelmayr (RailCon & RopeCon Conveyors). The cutting-edge expertise of the members of the TFC group and their determination to lay the foundations necessary for the validation of the current approach.

The TFC identified seven possible all-electric alternatives to bring ore and waste rocks out of the open pit, to be compared to the PFS scenario of using a diesel fleet to bring ore to a crusher located near the processing plant (off-pit crushing). A comparative analysis – decisional maturity matrix – was performed on all alternatives, which led the TFC to shortlist the following three all-electric solutions that were evaluated to be similar in terms of ranking and considered most appropriate:

1. off-pit crushing with an all-electric fleet;
2. in-pit crushing with a “hybrid” solution that combines the Rail-Con® technology and an all-electric fleet;
3. in-pit crushing with all-electric mining truck fleet for hauling waste and ore to their respective destinations.

The proposed co-disposal of tailings and waste rock is a fully integrated solution within the all-electric framework and contributes to limiting the project’s environmental footprint. Once the final fleet is assembled, the co-disposal management will also have to be adapted to the specific constraints of the equipment and mining operations.

The total mine-wide electrical demand of an all-electric Matawinie mining concept would be 120 kV (<https://www.hydro-quebec.com/projets/raccordement-nmg/>). The success of this all-electric transformation process within an optimal budget and schedule will depend on the participation of mobile equipment OEM. Some of the required mining equipment, e.g., electric excavators, are already in a commercial state and will require very few modifications.

### 3.2 All-electric mine passes the Feasibility Study milestone

Efforts of the TFC led NMG to further refine elements of mining engineering. The Feasibility Study (FS) NI43101 confirmed that the mine would be an all-electric operation, including ore extraction and hauling (19).

Based on the work carried out in the FS, the mine will be using an all-electric mobile equipment fleet, consisting of electric battery-driven mining trucks, battery-driven front-end loaders, cable reel excavators and bulldozers, and battery-driven service vehicles (Table 1). E-houses and charging stations will be provided and will require re-location at various intervals during the mine life. The heavy vehicles will be powered by batteries, which will be charged by mobile EV charging stations. Most of the charging stations will be moved as required by the development of exploitation. It was concluded that for the Matawinie project, the following all-electric operation scheme was appropriate with waste rocks (0 to 750 mm) to be transported from the pit to the co-disposal storage facility by electric haul trucks,

nische Ausrüster und Batteriehersteller zu erreichen. Darüber hinaus bietet dieses Projekt die Möglichkeit, ein Bergwerk als „globales Technologie-Schaufenster“ nur zwei Stunden nördlich von Montréal zu bauen.

### 3.1 Der Start einer vollelektrischen NMG-Initiative

Um diese Initiative zu starten, hat NMG eine Arbeitsgruppe (Task Force Committee – TFC) zusammengestellt, die aus erstklassigen Ingenieur- und Erstausrüster-Partnern besteht. Der Auftrag der TFC bestand darin, Ideen und Alternativen für das vollelektrische Konzept auszutauschen, den Reifegrad der möglichen Technologien zu untersuchen, die Auswirkungen auf Kapital- und Betriebsaufwand vorläufig zu berechnen und Empfehlungen abzugeben. NMG und seine TFC-Partner arbeiteten offen zusammen, um im gemeinsamen Interesse die Umsetzung eines umweltfreundlicheren Bergbaubetriebs bei NMG zu unterstützen.

Zunächst galt es, die Auswirkungen der Umwandlung des Betriebs Matawinie in ein vollelektrisches Projekt auf der Vorstufe der Realisierbarkeit zu untersuchen. NMG und DRA-METCHEM veröffentlichten im Dezember 2017 eine Pre-Feasibility-Studie (PFS), in der eine konventionelle Abbaumethode mit einer Dieselflotte betrachtet wurde. Diese Studie beinhaltete die Untersuchung möglicher vollelektrischer Lösungen, die rechtzeitig zum Beginn des Abbaus durchführbar sein könnten, um die sich daraus ergebenden Auswirkungen von Kapital- und Betriebsaufwand auf das Projekt besser zu verstehen. Die Partner waren ABB (Mine & Plant Electrification & Automation, EV Charging), MEDATECH Engineering (Mobile Equipment Electrification), DRA-Metchem (Mining Engineering & Design), SNC Lavalin (Tailings and Waste Rock Management) und Doppelmayr (RailCon & RopeCon Conveyors). Das Know-how der Mitglieder der TFC-Gruppe und ihre Entschlossenheit legten den nötigen Grundstein für die Bewertung des aktuellen Ansatzes.

Die TFC identifizierte sieben mögliche vollelektrische Alternativen, um Erz und Abraum aus dem Tagebau zu bringen, die mit dem PFS-Szenario auf Basis eines Dieselfuhrparks verglichen werden sollten, um das Erz zur Zerkleinerung zu einem Brecher in der Nähe der Aufbereitungsanlage zu bringen (Off-Pit-Zerkleinerung). Eine vergleichende Analyse – Entscheidungsreifematrix – wurde für alle Alternativen durchgeführt, was dazu führte, dass das TFC die folgenden drei vollelektrischen Lösungen in die engere Auswahl nahm, die hinsichtlich ihrer Rangfolge als ähnlich bewertet und als am besten geeignet erachtet wurden:

1. Zerkleinerung außerhalb des Tagebaus mit einem vollelektrischen Fuhrpark,
2. Zerkleinerung innerhalb des Tagebaus mit einer Hybrid-Lösung, welche die Rail-Con®-Technologie mit einer vollelektrischen Flotte kombiniert,
3. Zerkleinerung innerhalb des Tagebaus mit vollelektrischem Lkw-Fuhrpark für den Transport von Abraum und Erz zu ihren jeweiligen Bestimmungsorten.

Die vorgeschlagene gemeinsame Deponierung von Aufbereitungsrückständen und Abraum ist eine vollständig integrierte Lösung innerhalb der vollelektrischen Rahmenbedingungen und trägt zur Begrenzung des ökologischen Fußabdrucks des Projekts



Equipment Type	Qty.	Operation	Equipment Details	% of Fleet GHG Emissions
Production Excavator	2	Main Production	70-90 Tonne Class	8.34%
Production Drill	3	Main Production	Cable Electric, 4-8-inch dia. Bore	14.29%
Hauling	12	Main Production	Equivalent of > 60 Tonne Payload Capacity	34.62%
Tailings Haulage	5	Main Production	Equivalent of > 60 Tonne Payload Capacity	14.43%
Wheel Loader	2	Main Production	Fleet Match for Haul Truck	6.41%
Tracked Dozer	2	Auxiliary	40 Tonne Class	6.41%
Tracked Dozer	2	Auxiliary	30 Tonne Class	4.58%
Grader	2	Auxiliary	12-14 ft blade	1.10%
Aux. Excavator	4	Auxiliary	45 - 55 Tonne Class	7.33%
Water Truck	2	Auxiliary	Off-Highway Vocational Class 8 Truck	0.55%
Loader	2	Operation Support	3.20-7.40 M <sup>3</sup> bucket capacity	0.55%
Tow Haul Truck	1	Operation Support	Off-Highway Vocational Class 8 Truck	0.18%
Pump	2	Operation Support	Dewatering Pump	0.88%
Tower Light	4	Operation Support	Remote Work Light	0.11%
Light Trucks	6	Maintenance Support	Class 2b Pick-up Truck	0.22%

Table 1. Feasibility study diesel base case – estimated % of fleet Greenhouse Gas (GHG) emissions. // Tabelle 1. Feasibility-Studie – Vergleich zu Diesel – geschätzte Prozentwerte der Treibhausgasemissionen des Maschinenparks. Source/Quelle: NMG

both NAG and PAG tailings to be transported from their respective stockpiles by electric haul trucks, backfill material to be transported to the pit by electric haul trucks and run-of-mine ore (0 to 750 mm) to be transported by electric haul trucks to electrically crushers.

At this step, it was identified that maintenance intervals of a battery-electric mobile fleet are uncertain due to a general lack of reference data available in the industry. The next step should focus on negotiations with selected mobile equipment OEM to be partners with NMG in the transformation process. The FS also identify that all-electric mining equipment is on the critical path of the project; however, this activity could be by-passed using diesel equipment. Following the FS Study, NMG has formally committed with the government authorities of the Province of Quebec to operate its Matawinie mine as an all-electric operation within the first five years of commercial production. This corresponds in fact to the availability of some mining equipment, in their diesel-hybrid status, all-electric prototype in the pre-commercial or commercial phase, to the progressive electrification of all the equipment of the NMG mining fleet planned for the project.

As a result, the mine sequence and the methods used to extract and transport materials are strategic as to mitigate and minimize environmental and social impacts on the surrounding communities. This was achieved by incorporating the following aspects into the project design criteria as minimizing the volume of ex-pit waste rocks, maximizing haulage in-pit by conserving access be-

bei. Sobald die endgültige Flotte zusammengestellt ist, muss auch das Entsorgungsmanagement an die spezifischen Einschränkungen der Ausrüstung und des Bergbaus angepasst werden.

Der betriebsseitige Gesamtbedarf eines vollelektrischen Bergbaukonzepts in Matawinie würde 120 kV (<https://www.hydro-quebec.com/projets/raccordement-nmg/>) betragen. Der Erfolg dieses vollelektrischen Transformationsprozesses innerhalb eines optimalen Budgets und Zeitplans hängt von der Teilnahme von Erstausrüstern von mobilen Geräten ab. Einige der erforderlichen Bergbauausrüstungen, z.B. elektrische Bagger, sind bereits marktüblich und erfordern nur sehr wenige Anpassungen.

### 3.2 Das vollelektrische Bergwerk erreicht den Meilenstein der Feasibility-Studie

Die Bemühungen der TFC veranlassten NMG, Elemente der Bergbautechnik weiter zu verfeinern. Die Feasibility-Studie (FS) NI43101 bestätigte, dass es sich bei dem Bergwerk einschließlich Erzgewinnung und Transport, um einen vollelektrischen Betrieb handeln würde (19).

Basierend auf den Ausführungen der FS wird der Bergwerksbetrieb einen vollelektrischen, mobilen Maschinenpark einsetzen, der aus elektrischen batteriebetriebenen Trucks, batteriebetriebenen Fahrladern, Seilbaggern und Planiertrauben sowie batteriebetriebenen Servicefahrzeugen besteht (Tabelle 1). E-Häuser und Ladestationen werden zur Verfügung gestellt und müssen während des Bergwerksbetriebs in verschiedenen Abständen versetzt werden. Die schweren Fahrzeuge werden mit Batterien angetrieben, die von mobilen EV-Ladestationen aufgeladen werden. Die meisten Ladestationen werden je nach Entwicklung des Abbaus umgesetzt. Für das Matawinie-Projekt war schlussendlich das folgende vollelektrische Betriebsschema geeignet: Transport von Nebengestein (0 bis 750 mm) von der Grube zum Entsorgungslager mit Elektro-Truck, Transport von sowohl NAG- als auch PAG-Aufbereitungsrückständen von ihren jeweiligen Halden mit Elektro-Trucks, Transport von Verfüllmaterial mit elektrischen Trucks in die Grube und Transport von Fördererz (0 bis 750 mm) mit Elektro-Trucks zu elektrischen Brechern.

In diesem Stadium stellte sich heraus, dass Wartungsintervalle eines batterieelektrischen mobilen Maschinenparks aufgrund eines allgemeinen Mangels an Referenzdaten in der Branche nicht verfügbar sind. Der nächste Schritt sollte sich auf Verhandlungen mit ausgewählten Erstausrüstern von mobilen Geräten konzentrieren, um mit NMG im Transformationsprozess zusammenzuarbeiten. Die FS bestätigt auch, dass sich die vollelektrische Bergbauausrüstung auf dem kritischen Weg des Projekts befindet. Dies könnte jedoch mit einer Dieselausrüstung umgangen werden. Im Anschluss an die FS hat sich NMG gegenüber den Regierungsbehörden der Provinz Québec offiziell verpflichtet, ihr Bergwerk Matawinie in den ersten fünf Jahren der kommerziellen Produktion als rein elektrischen Betrieb zu betreiben. Dies entspricht der tatsächlichen Verfügbarkeit einiger Bergbauausrüstungen mit Diesel-Hybrid-Status, einem vollelektrischen Prototyp in der Erprobungsphase oder markteingeführt sowie der fortschreitenden Elektrifizierung aller für das Projekt geplanten Ausrüstungen des NMG-Bergbaumaschinenparks.

Infolgedessen sind die Abbaufolge und die Abbaumethoden zur Gewinnung und zum Transport von Materialien strategisch ausgelegt, um die ökologischen und sozialen Auswirkungen auf



tween phases throughout the LOM when possible and design of haulage routes to consider the placement of battery charging stations to increase productivity and higher efficiency haulage.

### 3.3 Keep going to the final objective

To achieve this all-electric objective, NMG has assembled an internal high-level technical team, bringing together specialists in the electrification of heavy equipment and mine planning sectors, as part of its Owner's Team group, specifically dedicated to the planning and management of this project relating to the electrification of its mining fleet.

The objective of this team has been to deploy the technology in a timely manner meeting the guidelines set out by the decree. This means demonstrable progress towards a 100% electric mine must be achieved year after year. To do this while respecting the risks of deploying the new technologies, the team has established a deployment strategy.

#### 3.3.1 Find the quick wins first

Without question the light vehicle fleet including light trucks, buses and Class 8 vocational machines are the quick wins today for the mining operation (Figure 4). Lighter duty cycles and smaller energy storage capacities allow for depot charging overnight and between shifts. The infrastructure needed for charging is well established and can be copied from bus fleet operators. This equipment has a small impact on the total site energy demand, and it allows us to establish the change management principals for the operation early.

For the larger equipment hurdles still do exist. Firstly, capex is still very high for off-highway electrification technologies as they are at the early stages of commercial deployment. Also, there is an ongoing debate as to which technology will be the optimum energy storage medium lithium batteries versus fuel cell (H2) for heavy mining applications.

Some quick wins still do exist in the larger production fleet. Although less flexible than trucks, conveyors are the most energy efficient device for material transport. Furthermore, grid connected cable equipment such as excavator and production drills have

die umliegenden Gemeinden zu minimieren. Dies wurde erreicht, indem die folgenden Aspekte in die Projektplanungskriterien aufgenommen wurden: die Minimierung des Volumens von Abraum außerhalb des Tagebaus, die Maximierung des Transports innerhalb des Betriebs durch die Erhaltung des Zugangs zwischen den Phasen im gesamten Tagebau, wenn möglich, und die Gestaltung von Transportrouten, um die Positionierung von Batterieladestationen zu berücksichtigen, die Produktivität zu erhöhen und die Transporteffizienz zu erhöhen.

### 3.3 Bis zum Endziel durchhalten

Um das Ziel des vollständigen Elektrobetriebs zu erreichen, hat NMG ein internes hochrangiges technisches Team zusammengestellt, das Spezialisten für die Elektrifizierung von schweren Geräten und aus dem Bereich der Bergbauplanung als Teil seiner Eigentümergruppe zusammenbringt. Diese widmen sich speziell der Planung und Verwaltung des Projekts der Elektrifizierung des Bergbaumaschinenparks.

Ziel war es, die Technologie zeitnah und entsprechend den in der Verordnung festgelegten Leitlinien einzusetzen. Das bedeutet, einen sichtbaren Prozess zur Umgestaltung zum vollständig elektrisch betriebenen Tagebau zu realisieren. Um dies unter Berücksichtigung der Risiken des Einsatzes neuer Technologien zu tun, hat das Team eine Einsatzstrategie entwickelt.

#### 3.3.1 Die schnellen Erfolge zuerst finden

Ohne Frage führt die Elektrifizierung der Fahrzeuge des leichten Fuhrparks wie LKW, Busse und Maschinen der Klasse 8 heute zu schnellen Erfolgen in Bergbaubetrieben bei gleichzeitig geringem Aufwand (Bild 4). Geringere Auslastungsgrade und kleinere Energiespeicherkapazitäten ermöglichen das Laden im Depot über Nacht und zwischen den Schichten. Die für die Aufladung erforderliche Infrastruktur ist gut etabliert und kann von Betreibern von Busfuhrparks abgeschaut werden. Diese Ausrüstung hat einen geringen Einfluss auf den gesamten Energiebedarf des Betriebs und ermöglicht es, frühzeitig die Prinzipien des Veränderungsmanagements für den Betrieb zu etablieren.

Für die größeren Geräte gibt es noch Hürden. Erstens ist der Kapitalkaufwand für geländegängige Elektrifizierungstechnologien immer noch sehr hoch, da sie sich noch in den frühen Stadien der kommerziellen Einführung befinden. Außerdem gibt es eine anhaltende Debatte darüber, welche Technologie das optimale Energiespeichermedium – Lithium-Batterien oder Brennstoffzelle (H2) – für schwere Bergbaumaschinen sein wird.

In einem größeren Produktionsmaschinenfuhrpark gibt es dennoch einige „quick wins“. Obwohl sie weniger flexibel sind als Trucks, stellen Förderbänder die energieeffizientesten Geräte für den Materialtransport dar. Darüber hinaus haben netzgekoppelte, kabelgebundene Bagger und Bohrgeräte eine lange Geschichte im Bergbau. Sowohl Förderbänder als auch kabelgebundene Anlagen werden im Rahmen der frühen Anwendungsstrategie für den Standort Matawinie fortgeführt.

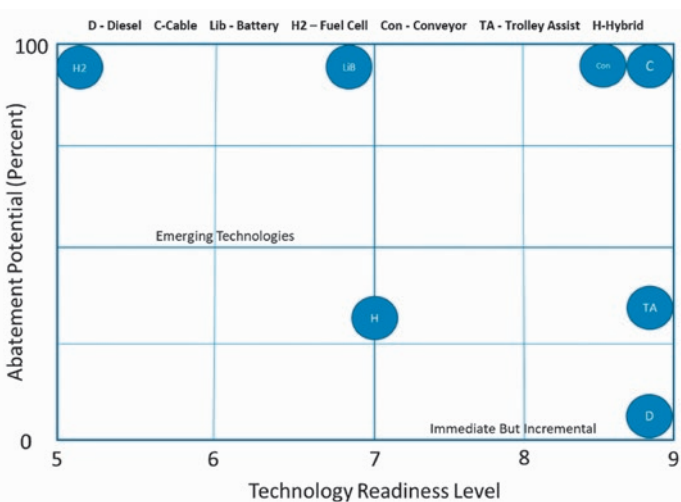


Fig. 4. Technology readiness of electric technologies. Bild 4. Technologiereife von Elektrotechnologien. Source/Quelle: NMG

#### 3.3.2 Dynamische Bereitstellung und Verteilung

Der Prozess, der zum Übergang von Dieselbetrieb auf Elektrobetrieb führt, wird Teil einer stufenweisen Herangehensweise sein, welche die Technologie zunehmend im Rahmen der Kom-



These telematics and dispatch technologies are critical to the transition from diesel where removing these machines piece by piece is cost prohibitive. The infrastructure required for an electric or fuel cell electric fleet is very costly, and as such these systems should be deployed in greater numbers.

After several iterations of the mine plan, it was discovered that the waste rock and tailings management strategy and the deployment strategy for the all-electric trucking fleet was intrinsically linked. Using the hauling roads established in the mine planning exercise the technical team was able to study the total material movement and the work rate – or energy required to move the material – over the first ten years of operation.

Results determined that by dynamically dispatching the trucking fleet Matawinie mine could extend its autonomy by harnessing gravity and moving waste materials back into the pit. The activity of sending an ore truck back to the pit with waste material requires careful planning but it results in reducing the average work rate of the fleet and thus improving the autonomy of each individual truck. According to this internal study, the opportune timing for the conversion of the all-electric trucking fleet is targeted for year 4 as depicted in 3.

### 3.3.3 Partner for proof of concept

Sensitivity analysis of the dynamic dispatch model identified several areas of interest that required confirmation from third party analysis. It was determined that changes in ambient temperature, road conditions, perisitic loads such as air conditioning the cabin could have an impact on the production availability of the battery electric fleet if not considered carefully.

Die Ergebnisse zeigten, dass das Matawinie-Bergwerk durch dynamisches Einsetzen des Fuhrparks seine Autonomie erweitern könnte, indem es sich die Schwerkraft zunutze macht und Abfallstoffe zurück in die Grube verschiebt. Einen Truck mit Abfallmaterial zurück in die Grube zu schicken, erfordert sorgfältige Planung, führt aber dazu, dass das durchschnittliche Arbeitstempo des Fuhrparks reduziert und somit die Autonomie jedes einzelnen Lkw verbessert wird. Laut dieser internen Studie ist der geeignete Zeitpunkt für den Umbau des vollelektrischen Truck-Fuhrparks für das vierte Jahr vorgesehen, wie in 3 dargestellt wird.

### 3.3.3 Partner für den Konzeptnachweis

Bei der Sensitivitätsanalyse des dynamischen Einsatzmodells wurden mehrere Interessensgebiete identifiziert, die eine Bestätigung durch eine Analyse Dritter erforderten. Es wurde festgestellt, dass sich Änderungen der Umgebungstemperatur und der Straßenverhältnisse sowie perisitische Belastungen wie das Klimatisieren der Kabine auf die Produktionsverfügbarkeit des batteriebetriebenen Fuhrparks auswirken könnten, wenn sie nicht sorgfältig berücksichtigt werden.

Um diese betrieblichen Risiken zu verstehen und weitere mögliche Ungereimtheiten aufzuzeigen, die durch den Betrieb eines elektrischen Fuhrparks entstehen, wurde ein Konzeptnachweisprojekt eingeleitet (Bild 6). NMG arbeitete gemeinsam mit dem Innovative Vehicle Institute (IVI), Propulsion Québec und dem NRC in Zusammenarbeit mit Adria Power Systems, Dana TM4 und Fournier et Fils zusammen, um ein neues elektrisches Antriebssystem mit Infrastruktur zur Schnellaufladung zu entwickeln und zu testen, das an schwere Fahrzeuge im Tagebau ange-

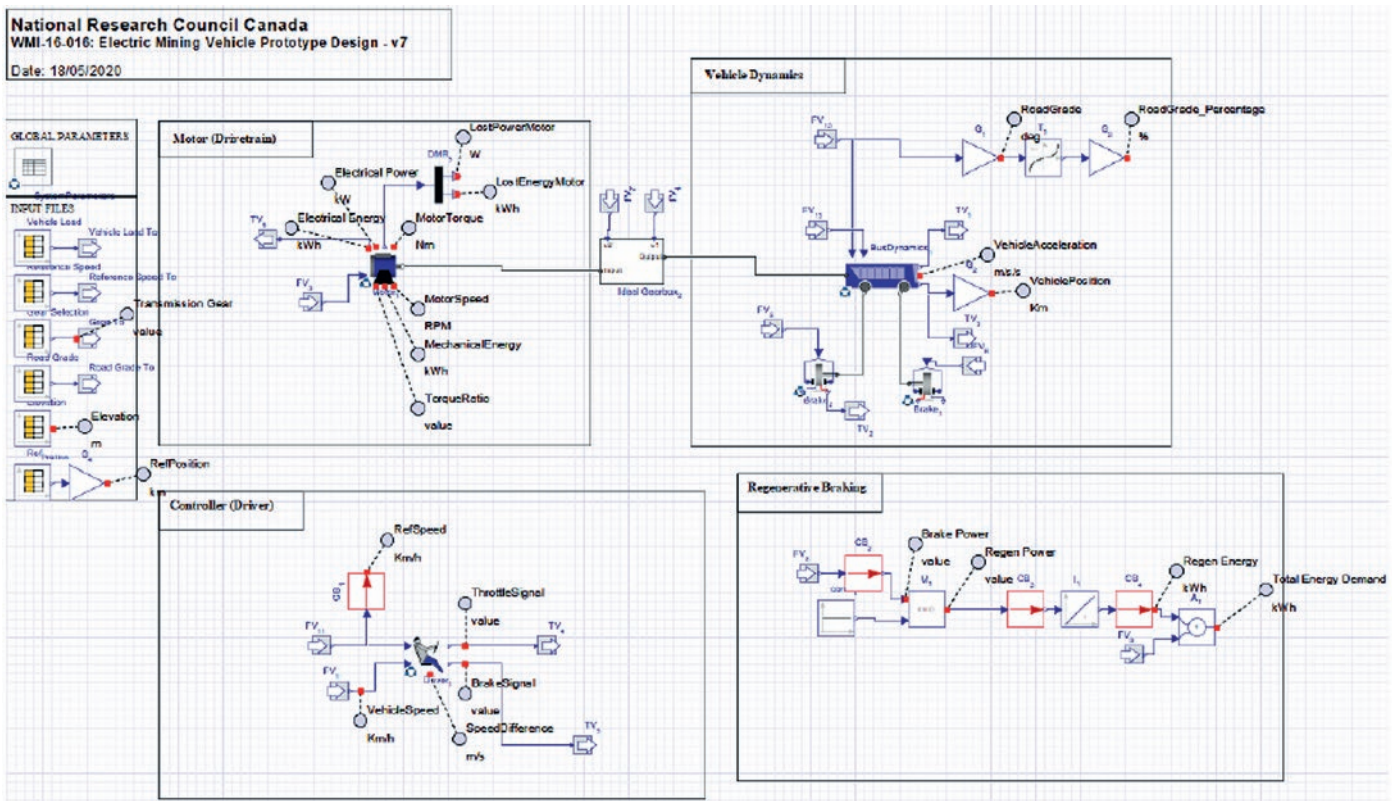


Fig. 6. NRC-CNRC electric mining vehicle simulation model.

Bild 6. NRC-CNRC-Simulationsmodell eines Elektro-Bergwerksfahrzeugs. Source/Quelle: NMG



In order to understand these operational risks further and uncover any additional unknowns posed by operating an electric fleet, a proof of concept project was initiated (Figure 6). NMG partnered with the Innovative Vehicle Institute (IVI), Propulsion Québec and the National Research Council of Canada (NRC), in collaboration with Adria Power Systems, Dana TM4, Fournier et Fils to develop and test a new electric propulsion system with a rapid recharging infrastructure adapted to heavy vehicles in the open-pit mining industry. The project consists of converting a Western Star XD6900 to battery electric for test in real world conditions. The prototype is expected to make its first real-world test runs as early as spring 2022 at a Fournier et Fils quarry and at the NMG site.

As part of the program the battery lab at NRC provided a detailed simulation analysis of the electric XD6900, which the technical team is using to confirm internal analysis and strengthen the argument for the feasibility of the technology. Furthermore, the study identified some areas which will need further analysis and confirmation during the real world testing in 2022. Things like operator input to regenerative braking could effect simulation results. Road conditions are a further area of investigation, which have a seasonal effect on vehicle performance.

### 3.3.4 Matawinie, an international showcase

With third party confirmation for the feasibility of a battery electric solution in hand, NMG launched in the fall of 2020 an international call for pre-qualification to advance the procurement of its initial 60-vehicle fleet. New interest was received from the marketplace and has extended the analysis to include fuel cell equipment. The infrastructure analysis is ongoing both for the total fleet power demanded and to understand the nuances of running fuel cell equipment in parallel to quickly add very low carbon emission equipment without requiring increases from the hydro company as the project progresses.

NMG expect to be making agreements with major suppliers in 2021 that can share the burden of switching to an all-electric solution. Partners with the ability to support the project with an initial diesel fleet and a plan to replace the same fleet with an all-electric solution are at an advantage.

## 4 Conclusion

Sustainability was embedded in the Matawinie project by taking into consideration important environmental parameters in the initial design criteria to mitigate issues during operations or at closure.

One critical criterion is that the NMG design minimizes ML-ARD during the LOM. Based on the material characterization, NMG has developed a control plan for ML-ARD. The innovative co-disposal scenario for Matawinie includes strategic co-placement of waste rock and tailings.

NMG has put forward the operation of its mine with an all-electric approach that will considerably help to achieve carbon neutrality of its operation. NMG has formally committed with the government authorities of the Province of Quebec to operate its Matawinie mine as an all-electric mode within the first five years of commercial production. This corresponds in fact to the availability of some mining equipment, in their diesel-hybrid status,

passt ist. Das Projekt besteht darin, einen Western Star XD6900 so umzurüsten, dass er batteriebetrieben wird, um ihn unter realen Bedingungen zu testen. Der Prototyp soll bereits im Frühjahr 2022 seine ersten realen Testfahrten in einem Steinbruch von Fournier et Fils und am NMG-Standort durchführen.

Im Rahmen des Programms lieferte das Batterielabor des NRC eine detaillierte Simulationsanalyse des elektrischen XD6900, mit der das technische Team die interne Analyse bestätigt und das Argument für die Umsetzbarkeit der Technologie verstärkt. Darüber hinaus wurden in der Studie einige Bereiche identifiziert, die während der Tests im Jahr 2022 einer weiteren Analyse und Bestätigung bedürfen. Faktoren wie das Verhalten des Gerätebetreibers beim regenerativen Bremsen könnten sich auf Simulationsergebnisse auswirken. Ein weiteres Untersuchungsgebiet sind Fahrbahnverhältnisse, die saisonale Auswirkungen auf die Fahrzeugleistung haben.

### 3.3.4 Matawinie, ein internationales Vorzeigeprojekt

Mit der Bestätigung der Umsetzbarkeit einer batterieelektrischen Lösung durch Dritte startete NMG im Herbst 2020 einen internationalen Aufruf zur Präqualifizierung, um die Beschaffung seines anfänglich aus 60 Fahrzeugen bestehenden Maschinenparks voranzutreiben. Der Markt zeigte neues Interesse und hat die Analyse um eine Brennstoffzellenausrüstung erweitert. Die Analyse der Infrastruktur ist sowohl für die geforderte Gesamtleistung des Fuhrparks als auch für das Verständnis der feinen Unterschiede beim Betrieb einer Brennstoffzellenausrüstung im Gange, um schnell Geräte mit geringem Emissionsausstoß ergänzen zu können, ohne während des Fortschreitens des Projekts eine Erhöhung der Energie aus Wasserkraft zu benötigen.

NMG geht davon aus, dass sie im Jahr 2021 Vereinbarungen mit großen Lieferanten treffen werden, um sich die Kosten des Umstiegs auf eine vollelektrische Lösung teilen zu können. Partner, die das Projekt mit einer ersten Dieselflotte unterstützen können, und der Plan, dieselbe Flotte durch eine vollelektrische Lösung zu ersetzen, sind von Vorteil.

## 4 Fazit

Durch die Einarbeitung wichtiger Umweltparameter in die Entwurfsplanung wurde die Nachhaltigkeit im Matawinie-Projekt berücksichtigt, sodass Probleme während des Betriebs oder bei der Schließung verringert werden können.

Ein wichtiges Kriterium ist, dass das NMG-Design die ML-ARD während des gesamten Bergwerksbetriebs minimiert. Basierend auf der Materialcharakterisierung hat NMG einen Kontrollplan für die ML-ARD entwickelt. Das innovative Deponierungssystem für Matawinie umfasst die strategische gemeinsame Entsorgung von Abraum und Aufbereitungsrückständen.

NMG hat den vollelektrischen Betrieb seines Bergwerks vorgestellt, was in erheblichem Umfang zur Klimaneutralität des Betriebs beitragen wird. NMG hat sich gegenüber den Regierungsbehörden der Provinz Québec offiziell verpflichtet, sein Bergwerk Matawinie innerhalb der ersten fünf Produktionsjahre zum vollelektrischen Betrieb zu entwickeln. Dies entspricht der tatsächlichen Verfügbarkeit einiger Bergbauausrüstungen mit Diesel-Hybrid-Status, einem vollelektrischen Prototyp in der vorkommerziellen oder kommerziellen Phase und der fortschrei-



all-electric prototype in the pre-commercial or commercial phase and to the progressive electrification of all the equipment of the NMG mining fleet planned for the project.

Best practices and an innovative approach from the start of the project are proactive ways to reduce the environmental liability of the Matawinie project. As a result, the mine design criteria used by NMG are strategic to mitigate and minimize environmental and social impacts on the municipality of Saint-Michel-des-Saints and surrounding communities in a perspective aiming at a carbon-neutral project with the highest environmental standards.

## References / Quellenverzeichnis

(1) SNC-Lavalin (2019a): *Projet Matawinie – Étude d’impact environnemental et social. Étude d’impact sur l’environnement déposée au ministre de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.* Saint-Michel-des-Saint, Québec, Canada. No. 3211–16–019.

(2) Lord, V.; Plante, B.; Demers, I.; Paradis, M. (2020): *Geochemical characterization of sulfurized tailings and waste rock of a graphite mine.* 24th International Conference on Tailings and Mine waste. 15–18 November 2020.

(3) Lamont and MDAG: *Prédiction de la qualité des eaux dans la fosse et effets sur le milieu récepteur sous différentes conditions.* Projet Matawinie Saint-Michel-des-Saints, Québec. 20 janvier 2020.

(4) SNC Lavalin (2019b): *Annexe E, Simulations numériques dans le cadre de l’ingénierie de faisabilité pour la gestion des résidus et stériles miniers.* Projet Matawinie, Saint-Michel-des-Saints, Plan de réaménagement et de restauration pour le site du projet mini-er Matawinie. Report for Nouveau Monde Graphite, October 2019.

(5) National Research Council Canada: *Part I: Modeling study of NMG’s Co-disposal of NAG+PAG and Waste Rock.* 20 janvier 2020.

(6) National Research Council Canada: *Part II: Modeling study of NMG’s Backfill Concept of NAG and Waste Rock,* 20 janvier 2020.

(7) National Research Council Canada: *Modeling of Co-disposal Concepts for Design Criteria,* July 30th, 2020, N/d: NRC-EME-56150 Technical Report.

(8) Lamontagne, A.; Lefebvre, R.; Poulin, R.; Leroueil, S. (1999): *Modeling of acid mine drainage physical processes in a waste rock pile with layered co-mingling.* 52nd Canadian Geotechnical Conference, 25–27 October, Saskatchewan.

(9) Tindall, J. A.; Kunkel, J. R.; Anderson, D. E. (1999): *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers.* Prentice Hall, New Jersey/USA.

(10) Jerz, J. K., Rimstidt J. D. (2003): *Efflorescent iron sulfate minerals: Paragenesis, relative stability, and environmental impact.* *American Mineralogist*, 88, p. 1919–1932. DRA-Metchem. 2018. Updated Technical Pre-Feasibility Study Report for the Matawinie Graphite Project. Prepared for Nouveau Monde Graphite. [NI 43-101]: pp. 367.

(11) Liu, Z.-S.; Huang, C.; Ma, L.; Morin, K. A.; Aziz, M.; Meints, C. (2017): *Observations and explanations from the monitoring data of Equity Silver Mine, Canada.* 9th Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage, pp 146–155, 20–23 November 2017, Burnie, Tasmania.

(12) Liu, Z.-S., Huang, C.; Ma, L.; Dy, E.; Xie, Z.; Tufa, K.; Fisher, E.; Zhou, J.; Morin, K.; Aziz, M.; Meints, C.; O’Kane, M.; Tallon, L. (2018a): *Rate-control quotient of mineral dissolution from waste rock dumps.* 41st Annual BC Mine Reclamation Symposium, Williams Lake, British Columbia, Canada. 17–20 September 2020.

tenden Elektrifizierung aller für das Projekt geplanten Geräte des NMG Bergbaumaschinenparks.

Die Anwendung neuester Technologien in Verbindung mit einem innovativen Planungsansatz sind proaktive Wege, um die Umweltbelastung des Matawinie-Projekts zu verringern. Die von NMG angewandten Kriterien für die Bergbauplanung wurden strategisch so gewählt, dass die ökologischen und sozialen Auswirkungen auf die Gemeinde Saint-Michel-des-Saints und die umliegenden Gemeinden minimiert werden, um ein klimaneutrales Projekt mit höchsten Umweltstandards zu realisieren.

(13) Liu, Z.-S.; Huang, C.; Ma, L.; Dy, E.; Xie, Z.; Aziz, M.; Meints, C.; Morin, K.; O’Kane, M.; Tallon, L. (2018b): *Experimental models of metal leaching for scaling-up to the field.* CIM 2018 Convention, Presentation 2188, Vancouver, British Columbia, Canada, 6–9 May, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

(14) Liu, S.; Ma, L.; Dy, E.; Xie, Z.; Tufa, K.; Fisher, E.; Zhou, J.; Morin, K.; Aziz, M.; Meints, C.; O’Kane, M.; Tallon, L. (2019): *The Characteristic Properties of Waste Rock Piles in Terms of Metal Leaching.* In: *Journal of Contaminant Hydrology* 226. August 2019.

(15) Ma, L.; Huang, C.; Liu, S.; Morin, K. A. (2018): *Pile scale models for ARD prediction - case study on Equity Silver Mine.* Tailings and Mine Waste ’18, Keystone, Colorado, USA, 30 September–2 October 2018.

(16) Ma, L.; Huang, C.; Liu, Z.; Morin, K.; Aziz, M.; Meints, C. (2019a): *Machine learning on the correlation between weather condition and seepage rate: a case study on 20 years monitoring data from a waste rock dump.* 42nd British Columbia Annual Mine Reclamation Symposium, 16–19 September, Kimberley, British Columbia, Canada.

(17) Ma, L.; Huang, C.; Liu, Z.-S.; Morin, K. A.; Aziz, M.; Meints, C. (2019b): *Prediction of Acid Rock Drainage and Metal Leaching in Waste Rock Piles. Part 1: Water Film Model for Geochemical Reactions and Application to a Full-scale Case Study.* In: *Journal of Contaminant Hydrology*, 220, pp 98–107.

(18) Huang, C.; Ma, L.; Zhong-Sheng, S.; Eben Dy L.; Tufa, K.; Fisher, E.; Zhou, J. J.; Goulet M.; Paradis, M.; Morin, K. (2020): *Gas Transport inside Co-disposal of Desulfurized Tailings and Sulfidic Waste Rocks.* 24th International Conference on Tailings and Mine Waste. 15–18 November 2020.

(19) DRA-Metchem (2018): *Updated Technical Pre-Feasibility Study Report for the Matawinie Graphite Project.* Prepared for Nouveau Monde Graphite. [NI 43-101]: pp 367.

(20) URSTM (2021): *Construction de cellules expérimentales au site minier Matawinie de Nouveau Monde Graphite.* PU-2020-02-1318 Rapport Final. Janvier 2021.

## Authors / Autoren

Martine Paradis M.Sc., David Lyon B.Sc., Frederic Gauthier, Benoit Ouellet and Eric Desaulniers M.Sc., Nouveau Monde Graphite, Saint-Michel-des-Saints, Québec/Canada, Ann Lamontage Ph.D., Lamont, Lac-Beauport, Québec/Canada, Kevin Morin Ph.D., Minesite Drainage Assessment Group, Surrey, British Columbia/Canada