

## Das europäische Horizon 2020 - Projekt Real-Time-Mining

**Jörg Benndorf**

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie

### **ZUSAMMENFASSUNG:**

*Moderne Sensorik, Modellierungs- und Optimierungsmethoden im Rohstoffgewinnungsprozess liefern Daten in "Echtzeit" und bieten Entscheidungsassistenz in der Betriebssteuerung und Kurzfristplanung. In den vergangenen Jahren wurden sogenannte „Closed-Loop-Ansätze“ entwickelt, um diese Informationen in Kombination mit moderner Datenverarbeitungstechnologie für eine verbesserte Produktionssteuerung in der Rohstoffgewinnung nutzbar zu machen. Der Beitrag stellt ein Projekt vor, das sich genau dieser Entwicklung widmet, das im Europäischen Rahmenprogramm Horizon 2020 geförderte Projekt Real-Time Mining. Der Fokus des Projektes liegt auf der Gewinnung bergbaugeologisch komplexer Lagerstätten unter Anwendung hoch-selektiver Gewinnungsszenarien. Der Aufbau des Projektes, das Projektziel, die einzelnen Arbeitspakete und Schlüsseltechnologien werden kurz dargestellt. An zwei ausgewählten Beispielen wird auf zwei Hauptkomponenten von Real-Time Mining, die Aktualisierung der Lagerstättenmodelle unter Einbeziehung von Online-Sensorik und die Optimierung der Entscheidungsfindung im Produktionsprozess näher eingegangen.*

### **ABSTRACT:**

*Advanced data acquisition and process modelling technology provide "real-time" data and decision support capacity for different aspects of the resource extraction process. Closed-loop approaches have recently been applied to utilize this information in combination with advanced computing technology for improved production control in mineral resource extraction. This contribution introduces to the Horizon 2020 project Real-Time Mining, which develops this technology specifically for complex deposit and highly selective mining settings. The concept of the project, the objective, work package structure and key enabling technologies are described briefly. Two selected examples focus on the application of the two main constituents of closed-loop concepts, data assimilation and optimization.*

## 1 Einleitung

Der Informations- und Prozessfluss entlang der Wertschöpfungskette in der Rohstoffgewinnung, von der Datenerhebung während der Exploration bis hin zur Auslieferung eines veredelten Produktes, erfolgt typischerweise diskontinuierlich in zeitlichen Perioden von Wochen, Monaten bis hin zu Jahren. Oftmals weichen dann tatsächliche Produktionsleistungen und Produktqualitäten in der Realität von vorhergesagten Erwartungen ab. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die Unsicherheit im Wissen über die Lagerstätte, speziell über deren inhärente räumliche Verteilung der Materialeigenschaften aufgrund begrenzter Explorationsaktivitäten. Mit dem Ziel eines periodischen Abgleiches zwischen Vorhersage und Realität werden in vielen Unternehmen, im Rahmen der sogenannten Reconciliation, die der Vorhersage zugrundeliegenden Vorratsmodelle angepasst. Je nach Unternehmen erfolgt dieser Abgleich diskontinuierlich in monatlichen, quartalsweisen oder jährlichen Intervallen.

Mit dem Kick-Off Meeting im April 2015 in Delft (NL) begannen die Forschungsarbeiten im Rahmen des durch das Europäische Rahmenprogramm Horizon 2020 geförderten Projektes Real-Time Mining. Das Ziel von Real-Time Mining ist die Integration von sensorgestützten Monitoring-Systemen in die Gewinnung komplexer Erzlagerstätten, die gekoppelt mit Echtzeit-Datenanalyse und Aktualisierung des Ressourcenmodells sowie intelligenter Entscheidungsoptimierung die Betriebsführung unterstützen sollen. Das Konzept kann somit zu einem Paradigmenwechsel von einer bisher diskontinuierlichen auf eine zukünftig kontinuierliche Prozessüberwachung und Qualitätssteuerung in der hochselektiven Gewinnung von Lagerstätten beitragen (Abbildung 1). Im Vordergrund stehen dabei die Steuerung und Optimierung von Gehalten und weiteren relevanten Charakteristika des gewonnenen Rohstoffes in Stoffströmen entlang der gesamten Prozesskette von Erkundung, Extraktion, bergbauliche Logistik bis zur Zerkleinerung.

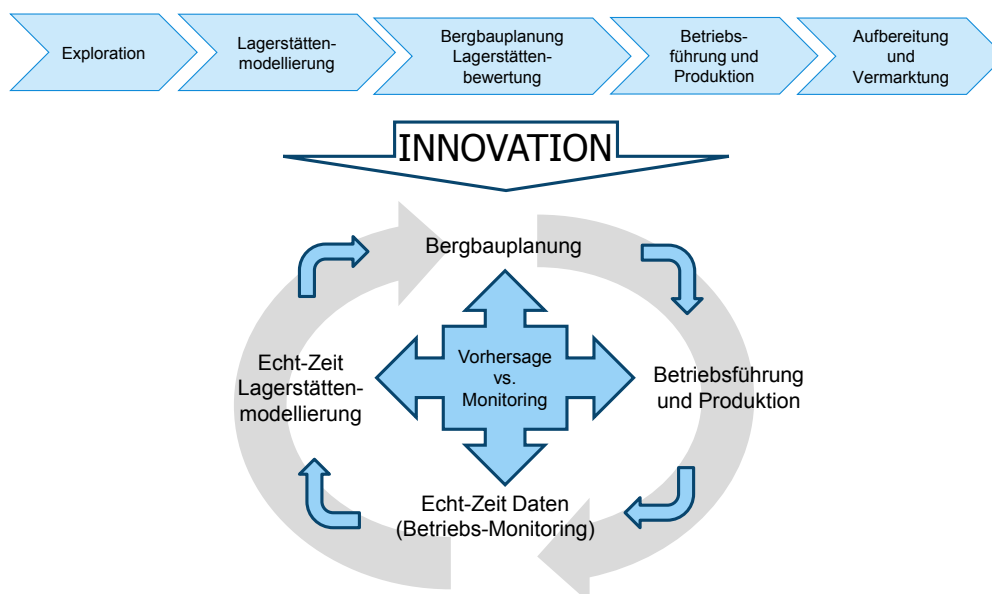


Abb. 1: Real-Time Mining Konzept.

Das interdisziplinäre Projekt integriert Forschung und Entwicklung in den Bereichen sensorgestützte Materialerkennung, Sensoren zur Erfassung von Leistungsindikatoren von Gewinnungsmaschinen, untertägige Navigation, Prozesssimulation der untertägigen Gewinnung, Optimierung der Betriebsführung sowie Echtzeit-Lagerstättenmodellierung. Die Hypothese des Projektes ist: „Das

***Rohstoffausbringen entlang der Wertschöpfungskette kann durch den Übergang von einem diskontinuierlichen zu kontinuierlichem Prozess Monitoring mit einhergehender Steuerung signifikant gesteigert werden***. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sollen so zur Verbesserung der Prozess- und Energieeffizienz, Erhöhung des Nutzungsgrades natürlicher Ressourcen sowie zur Verringerung der Umweltauswirkung durch eine frühzeitige Eliminierung von Nebengestein aus der Prozesskette beitragen.

Das Real-Time Mining Konsortium besteht aus dreizehn europäischen Partnern aus fünf Ländern und wird durch das Ressource Engineering Institut der Technischen Universität in Delft koordiniert. Neben der TU Delft sind folgende Partner in Real-Time Mining involviert: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Imperial College of Science, Technology and Medicine London; Associacao do Instituto Superior Tecnico para a Investigacao e Desenvolvimento Lissabon; Nederlands Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek-TNO; Geovariances, Dassault Systems GEOVIA Ltd.; LSA-Laser Analytical Systems & Automation GmbH; XGraphic Ingenieurgesellschaft mbH, SonicSampDrill BV; Technische Universität Bergakademie Freiberg; Spectral Industries B.V. und Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik.

Das Institut für Markscheidewesen und Geodäsie in Freiberg koordiniert dabei die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur schnellen Integration der Sensordaten in sogenannte Grade-Control- und Lagerstättenmodelle.

## **2 Real-Time Mining: Ziele und Konzepte**

Real-Time Mining entwickelt einen innovativen gesamtheitlichen Ansatz, der einen Paradigmenwechsel von einer diskontinuierlichen periodischen Prozesssteuerung zu einem kontinuierlichen Prozess- und Qualitätsmanagementsystem in der Gewinnung mineralischer Rohstoffe unterstützt. Zentraler Kern des Real-Time Mining Ansatzes ist eine Echtzeit-Feedbackschleife, welche die während der Gewinnung und Aufbereitung von Erzen erfassten Online-Daten Produktionsdaten, im speziellen Daten bezüglich der Rohstoffqualität, schnell in ein sequentiell aktualisierbares Vorratsmodell integriert. Dies ermöglicht eine schnelle Reaktion auf Veränderungen und eine damit einhergehende Optimierung von Entscheidungen im Zusammenhang mit der kurzfristigen Planung und Produktionssteuerung. Die Entwicklung eines derartigen gesamtheitlichen Ansatzes für die Rohstoffgewinnung erfordert die Weiterentwicklung und Integrierung mehrerer unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen zu einem kohärenten Prozess-Monitoring-, Modellierungs- und Optimierungskonzept. Die wichtigsten zu integrierenden Komponenten sind dabei:

- eine Technologie zur Online-Positionierung von Maschinen und Georeferenzierung der erfassten Sensordaten (untertägige Positionierung),
- Verfahren zur sensorgestützten berührungslosen Materialcharakterisierung,
- Sensorik zur Erfassung materialabhängiger Geräteparametern zur Nutzung von Ableitung von Gesteinseigenschaften (ähnlich dem „Monitoring while Drilling“)
- Algorithmen zur schnellen Integration von Sensordaten in Vorhersagemodelle und
- Verfahren zur schnellen Optimierung der Kurzfristplanung und Produktionssteuerung.

Notwendige Schlüsseltechnologien, um Daten dabei effektiv verwalten und relevante Informationen extrahieren zu können, ist das BigData-Management und die Visualisierung (Buttgereit u.a., 2016).

Insbesondere die Integration sämtlicher heterogener Disziplinen in einen zusammenhängenden Gesamtprozess bietet große technologische Herausforderungen. Die verschiedenen Arbeitspakete und der Datenfluss zwischen den einzelnen Systemkomponenten sind in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

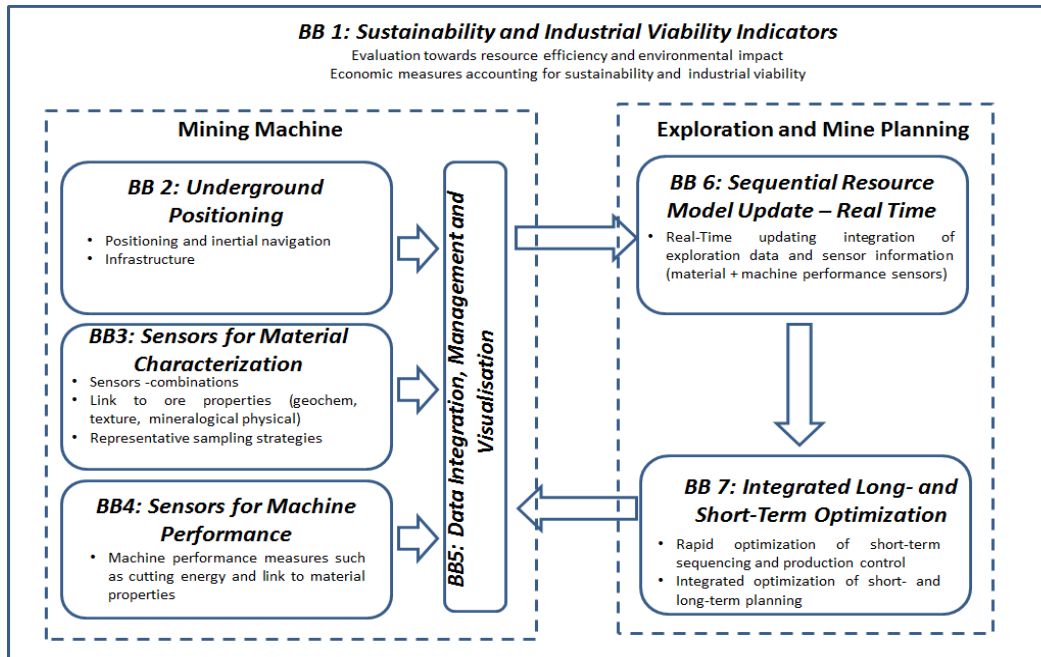


Abb. 2: Darstellung der verschiedenen Komponenten von Real-Time Mining und dem Datenfluss zwischen den verschiedenen Arbeitspaketen.

Die Arbeitspakete oder Building Blocks (BB) des Projektes sind in zwei größere Bereiche geteilt, die Gewinnungsmaschine oder das Gewinnungssystem sowie die Modellierungs- und Planungskomponente (Abbildung 2). Daten, die vom Gewinnungssystem erfasst werden, betreffen zum Ersten die Position der Datenerfassung (BB2 Underground Positioning), zum Zweiten Materialcharakteristika, wie z.B. den Erzgehalt oder Anteile von Mineralen, die durch Kombinationen verschiedener Sensoren berührungslos erfasst werden sollten (BB3 Sensors for Material Characterisation) und zum Dritten Geräteparameter, die mit Gesteinscharakteristika in Verbindung gebracht werden können (BB4 Sensors for Machine Performance). In der Modellierungs- und Planungskomponente sollen diese erfassten Daten schnell in Vorhersagemodelle der Erzgehalte und Mineralogie integriert werden (BB6 Sequential Resource Model Updateing). Im nächsten Schritt soll auf der Basis der dadurch verfügbaren aktuellen Vorhersagemodelle eine Entscheidungsassistenz zur Betriebsführung und Kurzfristplanung erfolgen (BB7: Integrated Long- and Short-Term Planning). Den Kern des Projektes bildet die zentrale Datenverwaltung und die Visualisierung (BB5 Data Integration, Management and Visualisation). Der Informationsfluss ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete des Projektes kurz erläutert.

### ***Nachhaltigkeitsindikatoren (BB1)***

Um quantifizierbare Ergebnisse der im Rahmen des Projekts durchgeführten Maßnahmen erhalten zu können, werden verschiedene Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit und industriellen Durchführbarkeit benötigt. Der Fokus liegt insbesondere auf den Bereichen Sicherheit, Wirtschaftlichkeit sowie Realisierbarkeit und Entwicklungsfähigkeit.

### ***Untertägiges Positionierungssystem (BB2)***

Ein Kernpunkt zur Erreichung der Projektziele ist die Kenntnis der aktuellen Position der eingesetzten Geräte, Maschinen und Materialien, um eine Georeferenzierung der Online-Daten zu gewährleisten. Im Rahmen des Projekts wird dazu ein untertägiges Positionierungssystem entwickelt und entsprechende Machbarkeitsstudien unter Realbedingungen durchgeführt. Die besonderen Herausforderungen sind hier vor allem die besonderen Anforderungen an die eingesetzte Sensorik wie auch die Datenkommunikation untertage.

### ***Sensorgestützte Materialerkennung (BB3)***

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung neuer Verfahren zur sensorgestützten Materialerkennung. Durch die Kombination verschiedener Sensoren und multivariaten Auswertungen dieser sollen wichtige Informationen für die Online-Überwachung und die Prozessoptimierung geliefert werden. Beispiele sind die automatisierte Stoßkartierung unter Nutzung verschiedener Bild- oder Punktsensoren oder die kontinuierliche Erfassung von Materialcharakteristika auf dem Förderband (BB3). Sämtliche Informationen werden außerdem für die Weiterverarbeitung (BB6, BB7) bzw. die Visualisierung (BB5) mit der zugehörigen räumlichen Position (BB2) versehen.

### ***Sensorgestützte Maschinenüberwachung (BB4)***

Zur Optimierung des Gesamtprozesses können auch aktuelle Leistungsdaten der eingesetzten Bohrgeräte oder Schneidmaschinen einen wichtigen Beitrag leisten. Diese können in Bezug zu Gesteinseigenschaften gesetzt werden und somit zur Vorhersage wichtiger gewinnungs- und aufbereitungsrelevanter Merkmale des Förderstromes beitragen. In BB4 werden dazu Verfahren auf Basis verschiedener Sensorkombinationen, wie Dehnungsmessstreifen, Infrarotkameras, Beschleunigungssensoren wie auch akustischer Emission, untersucht.

### ***Datenintegration, -management und Visualisierung (BB5)***

BB5 bildet das zentrale Modul des Projektes. Zum einen müssen hier die enormen Datenmengen aus den o.g. Arbeitspaketen verarbeitet, aufbereitet und gespeichert sowie entsprechende Schnittstellen bereitgestellt werden. Zum anderen wird im Rahmen von BB5 das Visualisierungscockpit zur 3D-Darstellung entwickelt, das neben den aktuellen Geometrie- und Sensordaten auch die aus BB6 und BB7 resultierenden Optimierungen darstellt.

### ***Echtzeit-Lagerstättenmodellierung (BB6)***

Einer der Kernpunkte im Real-Time Mining Konzept ist die Möglichkeit, aktuelle Sensordaten, die im Rahmen des Extraktionsprozesses gewonnen wurden, in „Echtzeit“ auszuwerten und für die Optimierung des Lagerstättenmodells zu nutzen. Im Rahmen von BB6 werden dazu geostatistische Methoden entwickelt, welche als Eingabe die in BB3 gewonnenen Materialinformationen und die Maschinendaten aus BB4 erhalten. Das Ergebnis von BB6 dient dann als Input zur Optimierung des Gewinnungsprozesses in BB7.

### ***Optimierung der Betriebsführung (BB7)***

Das Ziel von BB7 ist die Berechnung und Analyse des Optimierungspotentials durch die Integration von „Echtzeit“-Daten des Gewinnungsprozesses in die Verfahren zur Planung und Produktionskontrolle des Bergwerks. Im Fokus stehen dabei Entscheidungen in der Produktionsteuerung, wie z.B. die Klassifizierung eines Abbaublockes in Bergematerial oder Erz vom Typ 1, 2 oder 3, die Optimierung der Gewinnungsreihenfolge oder die logistische Materialflussteuerung und Haldenwirtschaft. Um also den Kreis, wie im unteren Teil von Abbildung 2 dargestellt, schließen zu können, wird das Ergebnis von BB7 als aktuelles Lagerstättenmodell in BB5 verwendet und die Abweichungen und Möglichkeiten zur Optimierung des Gesamtprozesses sowie entsprechende Entscheidungshilfen im Visualisierungscockpit dargestellt.

### ***Integration und Demonstration (BB8)***

Das Ziel des Gesamtprojektes ist eine Entwicklung des Real-Time Mining Systems, ausgehend von einem Konzept zu einem ganzheitlichen System, dessen Funktionalität und dadurch erzielbare Vorteile unter industrieähnlichen Bedingungen demonstriert werden können. Die Demonstration der Systemkomponenten/des Gesamtsystems wird unter nahezu Realbedingungen im Forschungs- und Lehrbergwerk „Reiche Zeche“ in Freiberg sowie im Kupfertiefbau „Neves Corvo“, Portugal, durchgeführt. Im Rahmen einer prototypischen Entwicklung soll in Freiberg auch die Integration der Projektergebnisse in das Konzept einer integrierten Gruben- und Sicherheitswarte gezeigt werden.

## **3 Ausgewählte Fallstudien aus dem Projekt**

Anhand von zwei Beispielen sollen die Konzepte im Arbeitspaket 6 (Echtzeit-Lagerstättenmodellierung) und 7 (Optimierung der Betriebsführung) näher erläutert werden.

### ***3.1 Schnelle Aktualisierung des Lagerstättenmodells unter Nutzung von Sensordaten***

Die schnelle Rückführung von Sensordaten in Lagerstätten- oder sogenannte “Grade Control” Modelle verspricht eine merkliche Verbesserung der Vorhersagbarkeit von Gehalten und Qualitäten und kann somit zu einer verbesserten Prozesssteuerung beitragen. Die Herausforderung dabei ist die Integration verschiedener Datentypen, Datengenauigkeiten und Datenmengen. So müssen z.B. ungenauere Sensordaten, die räumlich oder zeitlich sehr dicht vorliegen, mit genauen Laboranalysen aus Explorationsbohrungen in Verbindung gebracht werden. Eine weitere Herausforderung ist, dass trotz installierter Materialverfolgungssysteme auf dem Förderband gemessene Sensorwerte nicht eindeutig dem Ursprungsort des Materials zugeordnet werden können. So kann der Förderstrom eine Mischung aus zwei Abbaubereichen darstellen, welche gleichzeitig gefördert werden.

Um diese Herausforderungen zu lösen, wurden verschiedene methodische Ansätze zur schnellen Aktualisierung der Geometrie erzhaltiger Schichten sowie der räumlichen Verteilung von Wertstoff- und Schadstoffgehalten untersucht. Einen sehr attraktiven Ansatz bietet die Anwendung von Kalman-Filter-Methoden, welche aus der System- und Steuerungstheorie stammen und viele Anwendungen in der Ozeanographie, Meteorologie und Geohydrologie fanden (z.B. Kalman, 1960;

Evensen, 2009). Diese Methoden sind der dem Markscheider bekannten sequentiellen Ausgleichung sehr ähnlich und so konzipiert, dass Parameter eines dynamischen Systems kontinuierlich aktualisiert werden können, sobald neue Daten inklusive Angaben zur Genauigkeit zur Verfügung sind.

Die Nutzung dieser Methoden für Anwendungen in der Rohstoffindustrie, speziell zur sensorgestützten Aktualisierung von Lagerstättenmodellen, wurde von Benndorf (2015) vorgeschlagen. Eine numerische Untersuchung zur Nutzung des Kalman-Filters und des Ensemble-Kalman-Filters anhand eines einfachen 2D-Datensatzes deutete Verbesserungen von bis 40% in der Vorhersage an. Wambeke und Benndorf (2015) erweiterten das Konzept und demonstrierten die Fähigkeit der Methodik, Messungen an einem Förderstrom in das Lagerstättenmodell zu integrieren, welche eine Mischung von Materialien aus verschiedenen Abbaubereichen repräsentieren. Die konkrete Anwendung im Goldbergbau (Wambeke u.a., 2017) zeigte, dass Daten aus der Aufbereitung (Kugelmühle) direkt in das „Grade Control“- oder Qualitätsmodell integriert werden können, was zu einer Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit geometallurgischer Attribute von etwa 20% bis 30% führt. Yüksel u.a. (2017) konnte Genauigkeitsverbesserungen in gleicher Größenordnung bei der Anwendung im Braunkohlebergbau feststellen, indem Online-Aschegehalt Daten in das Kohlequalitätsmodell integriert wurden. In beiden Fällen ist zu erwähnen, dass die Verbesserung erzielt werden konnte, ohne zusätzlich zu den ohnehin im operativen Betrieb erfassten Daten zusätzliche Informationen zu erfassen.

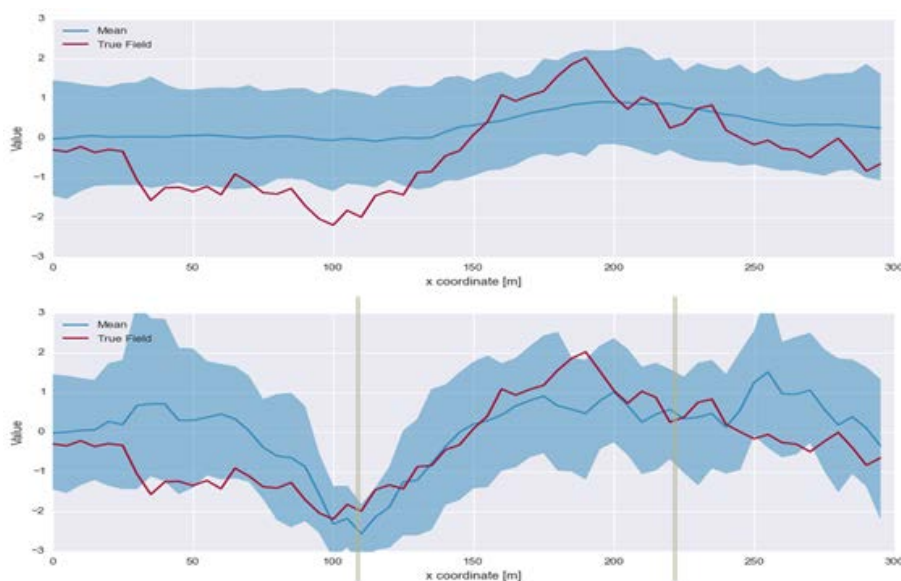


Abb. 3: Schnittliche Darstellung von Gehaltsvorhersagen an Stoßprofilen vor der Aktualisierung (a priori - oben) und nach der Aktualisierung (a posteriori - unten) nach Wambeke und Benndorf, 2015.

Ein Beispiel zur Aktualisierung des Lagerstättenmodells unter Nutzung von Sensordaten entlang eines Stoßprofils ist in Abbildung 3 dargestellt. Der obere Schnitt zeigt das *a priori* Modell, der untere Schnitt zeigt das aktualisierte *a posteriori* Modell. Dargestellt ist der wahre aber unbekannte Wert (rote Linie), die Vorhersage (blaue Linie) und deren 90% Vertrauensintervall (hellblau schattierter Bereich). An den Profilbereichen 110 und 220 wurde Rohstoff im Verhältnis 2:1 gewonnen, der auf einem Förderband gemischt und durch einen Sensor charakterisiert wurde. Es ist zu erkennen, dass die Vorhersage im Profilbereich 110 deutlich angepasst wurde. Ebenso ist eine deutliche Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit sichtbar, was nicht nur den gewonnenen Block betrifft, son-

den sich auch auf benachbarte Blöcke auswirkt, die in der Zukunft zu gewinnen sind. Im Bereich 220 ist ein ähnlicher Effekt, jedoch nicht so ausgeprägt, zu beobachten.

### 3.2 Optimierung der Kurzfristplanung

Entscheidungen in der Produktionssteuerung von Rohstoffgewinnungsbetrieben sind u.a. hinsichtlich der zeitlichen Reihenfolge der Gewinnung von Abbaublöcken, der geplanten Förderleistung je Betriebspunkt, der Bunker- oder Haldenwirtschaft zu treffen. Beispielsweise gilt es, den Geräteeinsatzplan und die effektive Gewinnungsleistung einzelner Geräte so zu planen, dass der Förderstrom („Run of Mine Ore“ oder ROM Ore) der gewünschten Menge und Qualitätsanforderung verschiedener Attribute entspricht. Zu betrachtende Randbedingungen sind dabei die Verfügbarkeit und Greifbarkeit verschiedener Erz- und Bergeblöcke in den einzelnen Gewinnungspunkten oder Arbeitsebenen, technische Verfügbarkeiten und Kapazitäten der Geräte, die Nachfrage nach verschiedenen ROM Produkten verschiedener Kunden oder verfügbare Kapazitäten in Bunkern oder auf Halden.

Um derartige komplexe Fragestellungen zu beantworten, kommen in der Praxis oftmals Methoden der mathematischen Optimierung, z.B. Lineare Optimierung, Diskrete Optimierung oder Dynamische Optimierung, zum Einsatz. Diese formulieren das Optimierungsproblem als Extremwertaufgabe  $J$  mit Randbedingungen  $G$ , welche als Funktion der Entscheidungsvariablen  $x_i, i=1, \dots, n$  formuliert werden.

$$\begin{array}{ll} \text{Max/Min} & J = f(x_1, \dots, x_n) \\ \text{s.t.} & G(x_1, \dots, x_n) \\ \text{mit} & x_i \geq 0 \text{ für } i=1, \dots, n \end{array}$$

Für praktische Anwendungen mit einer sehr großen Anzahl für Entscheidungen und z.T. nicht-lineare Randbedingungen erreichen diese Methoden hinsichtlich der rechentechnischen Effizienz ihre Grenzen. Eine Alternative bietet die sogenannte Simulationsbasierte Optimierung (z.B. Gosavi, 2014). Unter Nutzung von generellen Vorwärtssimulatoren, z.B. von Diskreten-Event-Simulation (DES) eines Förderprozesses, wird für eine gegebene Auswahl von Entscheidungsvariablen der Wert einer komplexen Zielfunktion  $J$  ermittelt. Durch iteratives Anpassen der Entscheidungsvariablen, gekoppelt mit der Bewertung der entsprechenden Zielfunktion, können unter Anwendung sogenannter meta-heuristischer Verfahren, wie Simulated Annealing oder Genetischer Algorithmen, schnell sehr gute Lösungen gefunden werden, die nahe dem Optimum sind (Abbildung 4).



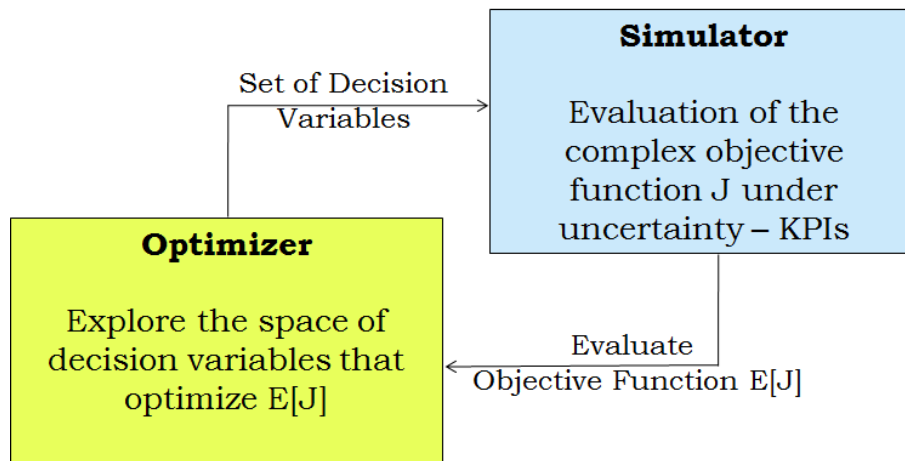


Abb. 4: Das Konzept der Simulationsbasierten Optimierung (nach Gosavi, 2014).

Eine Anwendung dieses Konzeptes zur Optimierung in der Betriebsführung wurde in den Studien von Shishvan und Benndorf (2016) sowie Mollema (2015) dokumentiert. Unter Anwendung der DES wurde ein Förderprozess mit sechs Gewinnungspunkten, zwei Verkippungspunkten für Berge- oder Abraummaterial sowie ein Mischbett nachstellt, welche durch ein Netzwerk von Förderbändern verbunden sind. In der Zielfunktion  $J$  werden für einen gegebene Förderplan (Entscheidungsvariablen) Tagesleistungen hinsichtlich Fördermengen und Gehalt des geförderten Erzes (in Abbildung 5 – „Garde“) evaluiert. Weichen Menge oder Gehalt von Zielvorgaben ab, wird die Zielfunktion mit Vertragsstrafen belastet (Abbildung 5).

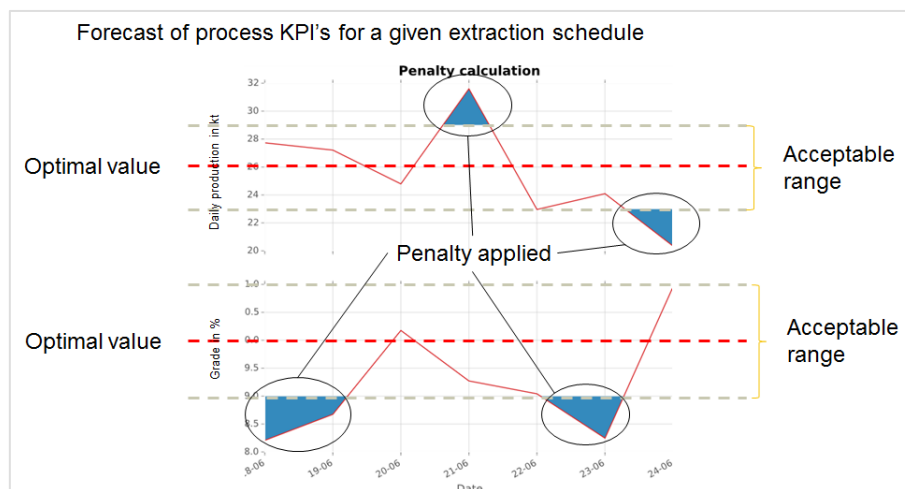


Abb. 5: Evaluierung eines Förderplanes hinsichtlich zu erwartender Tonnagen und Gehalten

Für die iterative Optimierung des Förderplanes wurde eine hybride Lösung aus einer Kombination von Genetischen Algorithmen zur globalen Optimierung und Simulated Annealing zur lokalen Optimierung entwickelt. Etwa 500 Iterationsschritte von insgesamt etwa  $10^{35}$  möglichen Kombinationen waren ausreichend, um Vertragsstrafen in einen anfänglich manuell erstellten Förderplan um 55% zu reduzieren (Abbildung 6).

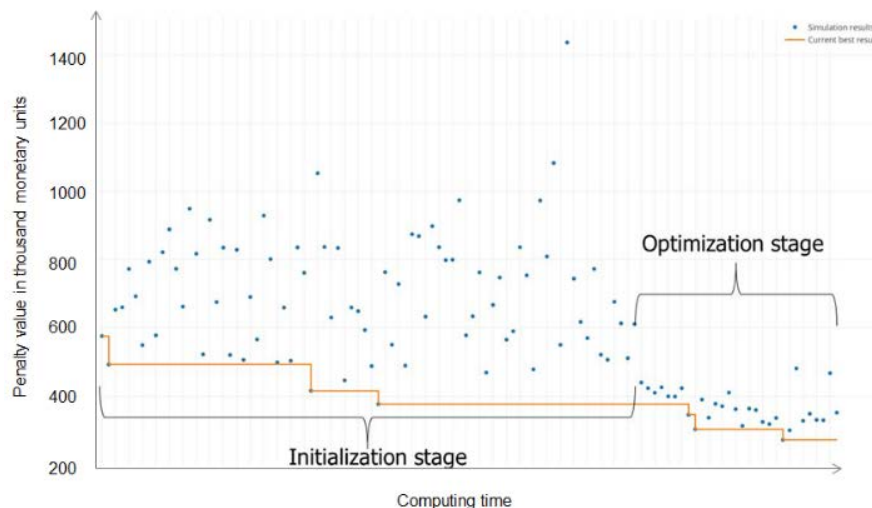


Abb. 6: Ergebnis der Simulationsbasierten Optimierung eines Förderplanes (nach Mollema 2015).

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel von Real-Time Mining ist die Entwicklung eines gesamtheitlichen Ansatzes für eine effektive Qualitätskontrolle zur Maximierung des Ressourcenpotentials entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Dies wird durch die Integration von sensorgestützten Monitoring-Systemen in die Gewinnung komplexer Lagerstätten erreicht, die gekoppelt mit Echtzeit-Datenanalyse und Aktualisierung des Ressourcenmodells sowie intelligenter Entscheidungsoptimierung die Betriebsführung unterstützen. In dieser Arbeit wurden die grundlegenden Konzepte von Real-Time Mining vorgestellt und insbesondere auf die Echtzeit-Aktualisierung des Lagerstättenmodells sowie auf die Optimierung der Betriebsführung eingegangen.

Aktuell ist etwa die Hälfte der Projektlaufzeit verstrichen. Nach der initialen Abstimmung und den grundlegenden Arbeiten steht derzeit die methodische und technische Entwicklung in allen Arbeitspaketen im Vordergrund.

Im Rahmen des Projekts wird eine Entwicklung bis hin zum Technologie-Reifegrad (TRL) 6 angestrebt. Die Funktionalität der verschiedenen Komponenten sowie des gesamten Ansatzes soll durch prototypische Demonstration in einer realen Einsatzumgebung nachgewiesen werden. Dafür stehen das Forschungs- und Lehrbergwerk „Reiche Zeche“ in Freiberg sowie das Kupfer-Bergwerk Neves-Corvo in Portugal zur Verfügung. Die Veröffentlichung der ersten Ergebnisse des Demonstrators sind Ende des Jahres 2018 vorgesehen.

Für die Zukunft bieten insbesondere neue Hardware-Technologien vielfältige Möglichkeiten für innovative Erweiterungen des Konzepts, z.B. des Visualisierungscockpits in BB5. Beispielsweise ist durch den Einsatz von Augmented Reality durch Virtual-Reality-Brillen eine immersive Exploration der 3D-Daten möglich. Dadurch können die relevanten Entscheidungsprozesse noch intuitiver gestaltet werden. Diese Ansätze bieten daher interessante Möglichkeiten für weitere Arbeiten und etwaige Folgeprojekte.

## FÖRDERHINWEIS

Das Projekt "Real-Time Mining" wird im Rahmen des Innovationsprogrammes Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Fördernummer 641989 gefördert.

## LITERATURSTELLEN

Benndorf, J.; Buxton, MWN.; Nienhaus, K.; Rattmann, L.; Korre, A.; Soares, A.; DeJong, A.; Jeannee, N.; Graham, P.; Buttgereit, D.; Gehlen, C.; Eijkelkamp, F.; Mischo, H.; Sandtke, M. and Wilsnack, T. (2015). Echtzeit-Bergbau - Umzug in ein kontinuierliches Prozessmanagement in der Rohstoffgewinnung. In den Proceedings der 3. Internationalen zukünftigen Bergbau-Konferenz. Sydney: AUSIMM.

Benndorf J. (2015). Making use of online production data: Sequential updating of mineral resource models. *Mathematical Geosciences*, 47 (5), 547-563, DOI: 10.1007/s11004-014-9561-y.

Buttgereit, D.; Bitzen, S.; Benndorf, J. and Buxton, M. (2016). Real-Time Mining: Grade Monitoring and Control Cockpit. Tagungsband zum AKIDA 2016, pp.: 49-60.

Evensen, G. (2009). *Data assimilation – The ensemble Kalman filter*, 2nd ed: Springer, Berlin.

Gosavi, A. (2014). *Simulation-Based Optimization: Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning*, Second edition. Springer, New York.

Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, 82 (Series D), 35-45.

Mollema, D.J. (2015). Investigation into simulation based optimization of a continuous mining operation. MSc-Thesis at the Section of Resource Engineering, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. [www.repository.tudelft.nl](http://www.repository.tudelft.nl).

Shishvan, M.S. and Benndorf, J. (2016). The effect of geological uncertainty on achieving short-term targets: A quantitative approach using stochastic process simulation. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(3), 259-264.

Wambeke, T. and Benndorf, J. (2015). Data assimilation of sensor measurements to improve production forecast in resource extraction. In H. Schaeben, R. Tolosana Delgado, KG van den Boogaart & R. van den Boogaart (Eds.), *Proceedings of the 17th annual conference of the international association for mathematical geosciences, IAMG2015* (pp. 236-245). Houston: IAMG.

Wambeke, T.; Ketelaar, P.; Benndorf, J. and Peattie, R. (2017). Real-time updating of the geomet model based on ball mill performance measurements: A case study at the Tropicana mine. Presentation at the 2017 SME annual meeting in Denver, Co.

Yüksel, C.; Thielemann, T.; Wambeke, T. and Benndorf, J. (2016). Real-Time Resource Model Updating for Improved Coal Quality Control Using Online Data. *International Journal of Coal Geology*, available online, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2016.05.014>.