

Simulation eines Abbaubereiches in der flachen Lagerung im Kalibergbau der K+S Gruppe

Mit dem Discrete Event Simulator ARENA ist ein Simulationsmodell zur Simulation und Optimierung eines Abbaubereiches der flachen Lagerung im Kalibergbau der K+S Gruppe erarbeitet worden. Dieser Beitrag beschreibt im Rahmen der Plausibilitätsprüfung des Modells die Leistungsoptimierung eines 3-Streckenvortriebes zum Aufschluss eines neuen Abbaufeldes im Werra-Revier. Dabei werden Parametereingabe, Simulation, Ergebnisausgabe und Auswertung vorgestellt. Aus den Ergebnissen der Simulationsläufe wird ein leistungsoptimiertes Auffahrverfahren ermittelt, dessen Leistungsdaten aus der Simulation mit den tatsächlich erbrachten Leistungen nach Ergebnisumsetzung verglichen werden.



Dr. Christoph Ganzer
Grubenwirtschaftsingenieur
Funktionsbereich Bergbau
K+S Aktiengesellschaft, Kassel

Einführung

Nach der VDI-Richtlinie 3633 ist „Simulation das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um Erkenntnisse zu erlangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“. Die dynamische Simulation (ereignisorientierte Simulation) im Bergbau der K+S nahm unter dieser Definition ihre Anfänge 1999 in der UTD Zielitz. Dort wurde erfolgreich die Einlagerungskapazität der UTD in Abhängigkeit von der Schachtkapazität der Grube simuliert. Dabei bestach die Simulation insbesondere durch die

schnelle Kapazitätsberechnung komplexer Arbeitsabläufe bei Veränderung der Schichtzeiten, des Personaleinsatzes und der Auslastung der Transportgeräte, sodass auf Grundlage der Simulationsläufe im Nachgang der Simulation eine nachhaltige Optimierung der Arbeitsabläufe in der UTD vorgenommen wurde. Nach diesem Erfolg wurden weitere Anwendungsfälle für den Einsatz einer Simulation diskutiert und die Ausgangsbasis zur Entwicklung eines Simulationsprojektes geschaffen. Die Struktur dieses Projektes lässt sich anhand des Phasenmodells in

der Abbildung 1 verfolgen und wird im weiteren Verlauf anhand dieses Modells beschrieben. [1]

Simulationsprojekt

Phase 0 – Problemstellung, Problemanalyse, Kostenanalyse

Im Juni 2000 wurde überlegt, welche Prozesse in den Grubenbetrieben bei K+S simulationswürdig seien, um weiteres Optimierungspotenzial in den Arbeitsprozessen aufzudecken. Bei der Prozesskette der Gewinnung beginnend, blieben z.B. folgende Fragestellungen

- Sind die Prozessabläufe der Gewinnung optimal ausgelegt?
- Ist der Personal- und Maschineneinsatz optimal gestaltet?
- Ist der Abbauzuschnitt optimal dimensioniert?
- Ist die Reviergröße optimal ausgelegt?
- Sind die Lagerstättenverhältnisse optimal ausgenutzt?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Schichtmodelle auf Kapazitäten?
- Welche Auswirkung haben die Wechselwirkungen dieser Parameter aus diesen Problemstellungen auf die Kapazitäten?

Der Gewinnungsprozess in der flachen Lagerung im Kalibergbau ist ein Gewinnungszyklus mit acht sich bedingenden Teilzyklen (Abb. 2): (1) Sprengen über Schichtwechsel, (2) Laden und Transportieren des Haufwerks, (3) Maschinelles Berauben der Firste und der Stöße, (4) Ankern der Firste, (5) Großlochbohren, (6) Sauberladen, (7) Sprenglochbohren, (8) Laden der Sprengbohrlöcher,

(1) Sprengen über Schichtwechsel. Diese Teilzyklen müssen nacheinander in einem Arbeitsprozess in

jeder Strecke abgearbeitet werden. Ein Revier besteht aus drei bis fünf Kippstellen. Eine Kippstelle ist der zentrale Förderpunkt eines Streckensystems von neun bis 13 Abbaustrecken (Abb. 3).

Die Simulationswürdigkeit begründet sich in der Komplexität des Gewinnungsprozesses. Die Komplexität zeigt sich dort bei den Auswirkungen der Wechselwirkungen der Parameter bei den sich bedingenden Tätigkeiten in den Teilprozessen des Gewinnungszyklus. Weitere die Simulation erfordernde Faktoren sind das Fehlen analytischer mathematischer Modelle, schneller Variantenberechnungen und Alternativbetrachtungen, einer schnellen Generierung von Ergebnissen sowie eines günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis einer Simulation. Auf Grund mangelnder Eigenkapazität bei K+S zur Programmierung eines Simulationsmodells wurde der Auftrag fremdvergeben. Mit der UTD-Simulation als Referenz empfahl sich die SAT Simulations- und Automations-Technologie GmbH aus Freiburg i.B. (SAT GmbH) für ein Nachfolgeprojekte bei K+S. In einem Kick-Off-Meeting wurde ein gemeinsames Projektteam zur Bearbeitung gebildet.

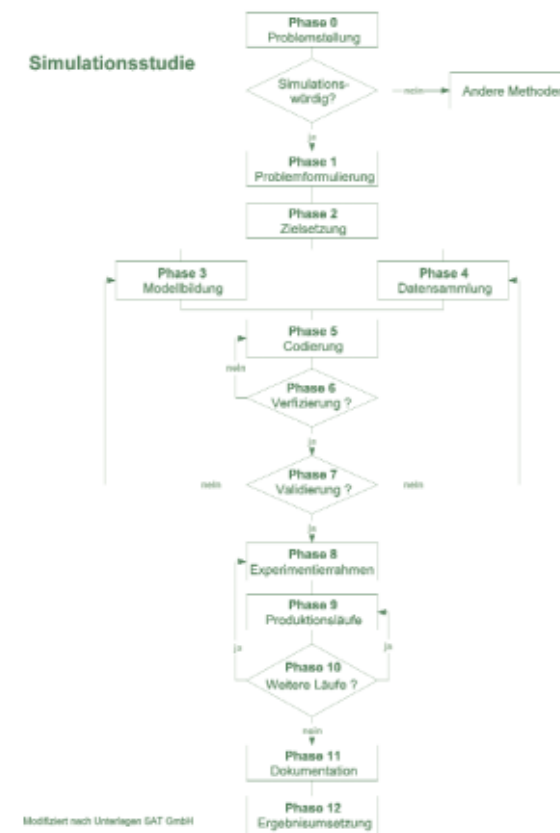


Abb. 1: Phasen einer Simulationsstudie / Phases of a simulation study

Phase 1 – Problemformulierung

Die Aufgabe war die Modellierung eines „virtuellen Reviers“, welches über Parameterkonfiguration (EXCEL-Datenblätter) die Abbildung jedes real existierenden Reviers ermöglicht. Unter Variation der geometrischen Aufstellung der



Abb. 2: Gewinnungszyklus / Production cycle

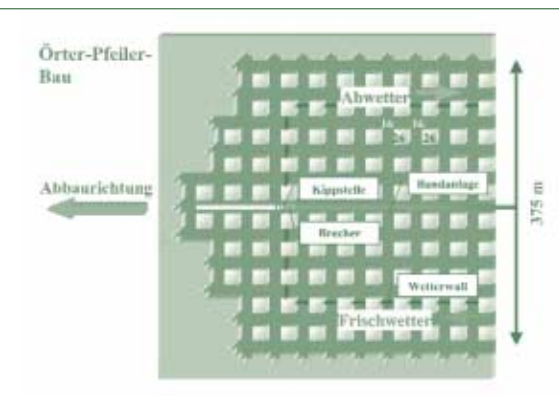


Abb. 3: Abbaufahren / Mining method

Kippstellen eines Reviers, des Maschineneinsatzes, der Maschinenbelegung sowie der Maschinenparameter sollen die organisatorischen Arbeitsabläufe unter Beachtung einer definierten Förderrate, des Beschäftigungsgrades und des Maschinenauslastungsgrades simuliert und optimiert werden.

Phase 2 – Zielsetzung

Durch die Parametrisierung sollte es möglich sein, verschiedene Szenarien aus der Problemstellung zu simulieren. Die Simulation soll die Auswirkungen von leistungsverzehrenden Störgrößen ermitteln. Die Ergebnisse der Simulationsläufe sind dabei die Ausgangsbasis für einen leistungsorientierten Optimierungsansatz.

Phase 3 – Modellbildung

In dieser Phase wurde ein konzeptuelles Modell inkl. Modelllogik erstellt, das aus einer Reihe von mathematischen und logischen Beziehungen des Systems und seinen Komponenten besteht. Der Gewinnungsprozess wurde in einem Flowchart dargestellt und die sich bedingenden Tätigkeiten miteinander verknüpft. Die physikalischen Größen wurden in ihren mathematischen Beziehungen parametrisiert (mathematische Gleichungen). Dazu wurde auf der Grundlage der maschinen- und abbaubedingten Parameter eine Berechnungsgrundlage geschaffen, mit der der Programmierer die logischen Verknüpfungen im Modell erstellen konnte. [3] Dabei wurde zunächst von der SAT GmbH ein einfaches Modell generiert, das allmählich zu seiner gewünschten Komplexität entwickelt wurde. Dies wird insbesondere durch die Anzahl von 34 Modellversionen, die zwischen Januar 2001 und Oktober 2002 erzeugt worden sind, veranschaulicht.

Bei den Ausfallwahrscheinlichkeiten der Großgeräte werden die zwei häufigsten Ausfalltypen bei K+S abgebildet:

(a) Die Ausfälle vor Ort werden durch die Zeit zwischen zwei Ausfällen (TimeBetweenFailure) und der Reparaturzeit (TimeToRepair) charakterisiert. Das Gerät fällt vor Ort aus, wird vor Ort im Beisein des Bedieners repariert und steht mit Bediener nach der Reparatur dem System wieder zur Verfügung.

(b) Die Ausfälle bis Schichtende werden durch die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Schicht charakterisiert. Das Gerät fällt aus, wird zum Wartungsplatz befördert und dort instand gesetzt. Der Bediener steht dem System nach der Fahrt zum Wartungsplatz, das Gerät dem System zur nächsten Schicht wieder zur Verfügung.

Die Großgeräte sind anhand der Reparaturberichte unter diesen Gesichtspunkten einer Störfallanalyse unterzogen worden [4]. Auf dieser Grundlage konnte die SAT GmbH für jedes Großgerät eine spezifische Ausfallwahrscheinlichkeit über eine Verteilungsfunktion ermitteln. Im gleichen Erhebungszeitraum wurde anhand der Revierberichte und Übergabeprotokolle der Erfolg der Sprengarbeiten analysiert. Da Abbaustrecken nur über Schichtwechsel gesprengt werden dürfen, hat ein Versagen der Zündanlage einen Förderausfall in dieser Strecke und die Sperrung des Ortes

Phase 4 – Datensammlung

Die Modellbildung und die Datensammlung sind zwei zeitgleich verlaufende Prozesse. Die Datensammlung bei K+S ist sehr frühzeitig begonnen worden und erstreckte sich über einen Zeitraum von 3 Quartalen im Jahr 2000.

Die Datensammlung hat zum Ziel, möglichst eine genaue Inputdatenbasis für das Modell zu liefern. Um ein möglichst realitätsnahes virtuelles Reviermodell zu erzeugen, sind reale Daten aus der Revierhistorie zu erheben. Dazu gehören alle Tätigkeitsdauern wie z.B. die Zeitdauer eines Ladespiels eines Laders, das sich aus der Lade- und Kippzeit sowie aus der Transportzeit für das Fahren zur Kippstelle und zurück zum Haufwerk zusammen-

setzt (siehe auch Phase 5 Modellcodierung). Einige Realdaten wurden in eine Verteilungsfunktion und/oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen überführt, mit denen im Modell Ausfallwahrscheinlichkeiten der Großgeräte, Zündversagen der Sprenganlagen und die generell zeitlich streuende Tätigkeitsdauer berücksichtigt werden.

Bei den Ausfallwahrscheinlichkeiten der Großgeräte werden die zwei häufigsten Ausfalltypen bei K+S abgebildet:

(a) Die Ausfälle vor Ort werden durch die Zeit zwischen zwei Ausfällen (TimeBetweenFailure) und der Reparaturzeit (TimeToRepair) charakterisiert. Das Gerät fällt vor Ort aus, wird vor Ort im Beisein des Bedieners repariert und steht mit Bediener nach der Reparatur dem System wieder zur Verfügung.

(b) Die Ausfälle bis Schichtende werden durch die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Schicht charakterisiert. Das Gerät fällt aus, wird zum Wartungsplatz befördert und dort instand gesetzt. Der Bediener steht dem System nach der Fahrt zum Wartungsplatz, das Gerät dem System zur nächsten Schicht wieder zur Verfügung.

Die Datensammlung hat zum Ziel, möglichst eine genaue Inputdatenbasis für das Modell zu liefern. Um ein möglichst realitätsnahes virtuelles Reviermodell zu erzeugen, sind reale Daten aus der Revierhistorie zu erheben. Dazu gehören alle Tätigkeitsdauern wie z.B. die Zeitdauer eines Ladespiels eines Laders, das sich aus der Lade- und Kippzeit sowie aus der Transportzeit für das Fahren zur Kippstelle und zurück zum Haufwerk zusammen-

bis zur nächsten Schicht zur Folge. Ein Abbrechen der Kanone oder der Schleppen hat Förderverlust und Mehraufwand durch Nachbohren zur Folge. Die Wahrscheinlichkeit für das Versagen der Zündung, für das Abbrechen der Kanone und für das Abbrechen der Schleppen wird im Modell berücksichtigt. Jede Zeitdauer für Tätigkeiten wird über einen Faktor beeinflusst. Der Faktor ist eine Zufallsgröße aus einer triangularen Verteilung, die über Parameter eingestellt werden kann. Zum Beispiel errechnet sich die Zeit für das Berauben aus der zu beraubenden Fläche [m²] und der Beraubeleistung [m²/min]. Die Beraubeleistung ist ein Durchschnittswert. Über diese Funktion wird der mal schlechteren oder besseren Beraubeleistung pro Schicht über einen längeren Simulationszeitraum Rechnung getragen.

Phase 5 – Modellcodierung

In dieser Phase wird das konzeptuelle Modell aus Phase 3 in ein Computermodell überführt. Das Simulationssystem zur Analyse der dynamischen Prozesse besteht aus zwei Teilen, einer MICROSOFT-EXCEL-Tabelle, in der sowohl die Inputdaten (Front-End) eingegeben als auch die Ergebnisdaten (Back-End) ausgegeben werden, und einer ROCKWELL Software ARENA 5.0 STANDARD EDITION Modelldatei (.doe) samt Hilfsdateien.

Diese Trennung der Daten-Ein-/Ausgabe von der Simulationssoftware hat den Vorteil, dass die Parametereingabe unter der bekannten EXCEL-Oberfläche gesteuert werden kann. An dieser Stelle ist der Aus- und Weiterbildung und der Akzeptanz der Simulation Rechnung getragen worden. Zukünftige Bediener des Modells, insbesondere bei der Nutzung des Modells durch

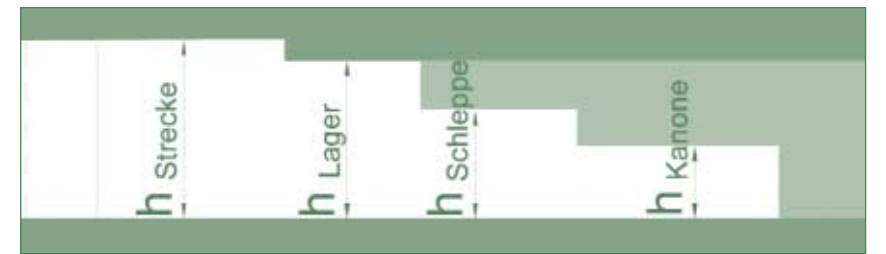


Abb. 5: Streckenquerschnitt / Cross-section

andere Standorte der flachen Lagerung, bedürfen so nur einer Einweisung im Umgang mit den Parametern in EXCEL und nicht einer aufwendigen Schulungsmaßnahme im Programmieren von Simulationsmodellen in ARENA.

Nach der Parametereingabe in EXCEL wird über einen Schalter die Simulation gestartet. Dabei werden im Hintergrund zunächst alle Parameter aus der EXCEL-Tabelle an das Modell im ARENA-Simulator übergeben. Auf der ARENA-Oberfläche wird das Modell in Form eines Abbaurasters graphisch erzeugt und die Animation des Abbaus gezeigt. Die während des Simulationslaufes erzeugten Daten im Modell werden dabei im Hintergrund fortlaufend in die EXCEL-Datei geschrieben. Die EXCEL-Datei besteht aus mehreren Datenblättern (Abb. 4), die Blätter (1) bis (8) dienen der Eingabe, die Blätter (8) bis (12) dienen der Ausgabe der Ergebnisse, wobei dem Blatt (8) durch Ein- und Ausgabe eine Doppelfunktion zukommt. Im Folgenden sind dies:

- (1) Hauptseite • technische Grundparameter
- (2) Personal • Anzahl der Mitarbeiter pro Schicht und Qualifikation
- (3) Schichten • Arbeitszeiten
- (4) Maschinen • Wartungsplan und räumliche Maschinenbindung
- (5) Entfernung • Entfernungen im Revier
- (6) Kippstelle 1 • ... Kippstelle n Geometrische Kippstellenparameter

- (7) K1 Layout • ... KnLayout Abbau-blockfeine Parametrisierung für jede Kippstelle
- (8) Übergabe 1a • Startzustand der Strecken und Streckenstatus bei Schichtende
- (9) Gantt1a • Zeitliche Darstellung der Tätigkeiten von Personal und Maschinen
- (10) Strecken1a • Zeitliche Darstellung der Streckenbelegung
- (11) Ergebnis1a • Schichtweise Ergebnisausgabe mit Gesamtergebnis des Simulationslaufes
- (12) Auswertung • Zusammenfassung der Gesamtergebnisse der Replikationsläufe

Dateneingabe

(1) Hauptseite – Auf der Hauptseite werden die technischen Grundparameter eingegeben. Zunächst werden die Stopp-Mechanismen für den Simulationslauf festgelegt. Hier

IK	6.6 m	Abschlaglänge der Kanone
bK	6.5 m	Breite der Kanone
hK	3.5 m	Maximale Höhe der Kanone
IS	6.8 m	Abschlaglänge der Schleppen (und Firste)
hS	3.5 m	Maximale Höhe der Schleppen
minH	2.3 m	Technische Mindesthöhe
lhF	7.0 m	Abschlaglänge der hohen Firste (Versatz und Stunsalz)
aKaSi	11.0 m	Schleppen erst über dieser Kanonentiefe

Tab. 1: Parameter zur Bestimmung des Bohrfeldes / Borehole spacing parameter



Abb. 4: Hauptseite der EXCEL-Datei / Main sheet in EXCEL file

Lagermächtigkeit	Bauhöhe	Hohe Firste Versatz	Hohe Firste Nutzsatz	Bemerkungen
1 < Mindesthöhe	= Mindesthöhe	Keine	Keine	alles Nutzsatz o. Versatz
2 > Mindesthöhe < max. Schleppenhöhe	= Lagerhöhe	Keine	Keine	alles Nutzsatz
3 > Mindesthöhe < max. Schleppenhöhe	> Lagerhöhe	Ja	Keine	K+S Nutzsatz HoFi Versatz (getrennt sprengen)
4 > max. Schleppenhöhe	= Lagerhöhe	Keine	Ja	alles Nutzsatz
5 > max. Schleppenhöhe	> Lagerhöhe	Ja	Ja	K+S+HoFiN Nutzsatz, HoFiV Versatz (getrennt sprengen)

Tab. 2: Bedingungen für das Bauen der Hohen Firste / Condition for high roof mining

kann die Simulation nach Erreichen von x Schichten oder nach Abbau von x Abbaureihen gestoppt werden. Der Ausgabeumfang der Ergebnisse kann variiert werden.

Es sind ferner die Maschinendaten auf dieser Seite einzugeben. Die Maschinen sind nach Typ, Anzahl, Leistung und der o.g. Ausfallwahrscheinlichkeit parametrisiert. Die Parametrisierung erlangt dabei stellenweise einen sehr hohen Detaillierungsgrad. Dies soll am Beispiel der Bestimmung des Bohrfeldes verdeutlicht werden.

Das Bohrfeld beschreibt die geometrischen Größen eines Abschlags (s. Tabelle 1). Wenn hier die Abschlaglänge der Kanone (z.B. 6,60 m) kürzer als die Bohrlänge bei den Maschinenparametern für den Sprenglochbohrwagen (z.B. 7,00 m) angegeben wird, differiert das gesprengte Haufwerk unter Berücksichtigung dieses Abschlagwirkungsgrades um

6 % von der abgebohrte Salzmenge. Durch die abbaubedingten Parameter wie Lagermächtigkeit und Bauhöhe sowie Technische Mindesthöhe und Maximale Schleppenhöhe werden fünf Abbauparameter für das Gewinnen der Hohen Firste bei der Simulation mit Auswirkungen auf Bohraufwand und Haufwerksförderung unterschieden (s. Tabelle 2). Nachfolgend werden zwei dieser Varianten beschrieben.

Für die Variante 1 gilt: wenn die Lagermächtigkeit kleiner als die Mindesthöhe ist, dann ist die Bauhöhe gleich Mindesthöhe und es wird weder im Nutzsatz noch im Versatz eine Hohe Firste gebaut.

Für die Variante 3 gilt: wenn die Lagermächtigkeit größer als die Mindesthöhe und kleiner als die maximale Schleppenhöhe ist, dann ist die Bauhöhe gleich Lagerhöhe. Kanone und Schleppen werden im

Nutzsatz, die Hohe Firste im Versatz gebaut. Der Versatz wird dabei nicht zur Kippstelle gefahren, sondern an das nächstgelegene Ende der Basisstrecke, die Verweilzeit zum Kippen ist parametrisiert und bietet somit die Möglichkeit, längere Versatzwege für den Lader abzubilden (Abb. 5).

Der Parameter aKaSi Schleppen erst über dieser Kanontiefe lässt hier die Kanone um 11 m den Schleppen voreilen. Ein Überholen der Kanone durch die längere Abschlaglänge der Schleppen ist nicht möglich. Bei Erreichen der Kanontiefe wird der Schleppenvortrieb gestundet, bis mindestens wieder ein Voreilen der Kanone von 11 m erreicht ist.

Die Tabelle 3 repräsentiert die durchschnittlich zu bohrende Anzahl von Sprengbohrlöchern in den Abschnitten Kanone, Kanone nachbohren, linke und rechte Schleppe, Schleppe nachbohren, Firste sowie Hohe Firste im Hartsalz für eine Streckenbreite von 16 m in Abhängigkeit unterschiedlicher Streckenhöhen. Die SAT GmbH hat auf dieser Grundlage Formeln entwickelt, die in Abhängigkeit unterschiedlicher Salzarten und Streckenquerschnitte die zu bohrenden Sprengbohrlöcher berechnen.

Beim Ankeren z.B. wird der Einfluss sicherheitsrelevanter Parameter auf den Gewinnungszyklus deutlich. Die Parameter minimaler Abstand der letzten Ankerreihe zu den Schleppen/Hohen Firsten (nach dem Ankeren) und der maximale zugelassene ankerfreie Abschnitt vor den Schleppen bestimmen den Beraubeaufwand je nach Abstandsangabe. Beim Berauben ist die Gültigkeitsdauer der Erstfreigabe anzugeben. Dieser Parameter bewirkt bei einer längeren über diesen Zeitraum dauernden Nichtbelegung der Strecke eine vom Streckenzustand

Streckenbreite 16 m								
Strecken höhe	Abschnitt	K	Kn	li. S	re. S	Sn	Fi.	ho.Fi.
	2.5	33	33	20	20	11		
	3.0	34	34	20	20	11		
	3.5	36	36	20	20	11		
	4.5	36	36	20	20	11		16
	5.5	36	36	20	20	11		32
	6.5	36	36	20	20	11		48
	7.5	36	36	20	20	11		64

Tab. 3: Anzahl Sprengbohrlöcher im Hartsalz / Amount of drill holes in hard rock salt

unabhängige Neuberaubung und neue Erstfreigabe der Strecke.

(2) Personal – Auf diesem Blatt wird die Belegschaft für jede Schicht festgelegt. Die Qualifikation in der Bedienung der Großgeräte wie Sauberlader, Großlochbohrwagen, Sprenglochbohrwagen, Lader, Berauber, Ankerbohrwagen, sowie Sprengstoffladefahrzeug kann den Bergleuten prozentual zugeordnet werden. Z.B. kann einem sehr guten Laderfahrer ein Leistungsfaktor von 120 % zugeschrieben werden. Sollte der zum Sprenglochbohren weniger qualifizierte Laderfahrer allerdings vom System zum Sprenglochbohren eingesetzt werden, kann diese Nebentätigkeit mit einem Leistungsfaktor von z.B. 60 % bewertet werden. Über die Beurteilung der Haupt- und Nebentätigkeiten eines jeden Bergmanns im virtuellen Revier kann die Tätigkeitsdauer beeinflusst werden.

(3) Schichten – In diesem Bereich werden Ein- und Ausfahrzeiten sowie die Schicht- und Pausenzeiten eingegeben und somit die produktive Schichtzeit festgelegt. Es können auch mehr als drei unterschiedliche Schichten definiert werden. Über eine Schichtfolge können diese Schichten vielfältig kombiniert werden, sodass nahezu jedes Schichtsystem abgebildet werden kann.

(4) Maschinen – Hier können u.a. Wartungspläne für die Großgeräte aufgestellt werden und Lader an einzelne Kippstellen gebunden werden. Die Wartungspläne ermöglichen das Herausnehmen von Geräten nach entsprechenden Wartungsintervallen für die Wartung am Wartungsplatz. Die Dauer beläuft sich über eine Schicht. Dieser Parameter ermöglicht auch die Simulation von Streckenvortrieben mit langen Fahr-

wegen. Dabei kann z.B. durch Einsatz eines 2. Laders nach Erreichen einer entsprechenden Auffahrungslänge der Einfluss auf die Förderkapazität simuliert werden. Dazu wird der 2. Lader über 70 Schichten gewartet und erst mit der 71 Schicht eingesetzt.

(5) Entfernungen – Insbesondere bei der Simulation eines Reviers mit mehreren Kippstellen sind die Entfernungen für das Umsetzen der Maschinen von einer Kippstelle zur nächsten mit Fahrzeiten verbunden. Diese Fahrzeiten bremsen den Gewinnungszyklus. Einstellbar sind die Entfernungen über eine Matrixstruktur zwischen den Kippstellen, dem Revier- und Wartungsplatz.

(6) Kippstelle 1 ... Kippstelle n – Für jede Kippstelle wird ein Datenblatt erzeugt. Hier werden die geometrischen Abbaugrößen wie z.B. Anzahl der Strecken, Lage der Bandstrecke, Anzahl der Abbaureihen, Rastermaß und Dichte des Salzes festgelegt. Mit diesen Grundeinstellungen für jede Kippstelle wird über einen Button auf der Hauptseite ein neues EXCEL-Blatt, s. Pkt. (7), erzeugt.

(7) K1Layout ... KnLayout – Auf diesem Datenblatt werden die abbaublockfeinen Parameter wie Vertaubungszonen, Verhiebrichtungen, Geschwindigkeitsfaktoren, Wertstoffgehalte, Mächtigkeiten, Bauhöhen sowie Strecken-, Band-, Basis- und Durchhiebbreiten für jede Kippstelle eingetragen. Dabei werden für jede Thematik die Abbaublöcke der Kippstelle dargestellt, in denen die Einzelwerte für jeden Block eingetragen werden können. Mit diesen abbaublockfeinen Einstellungen ist es möglich, Reviere unterschiedlicher Abbauverhältnisse darzustellen und die Simulationsgenauigkeit zu erhöhen (Abb. 6).

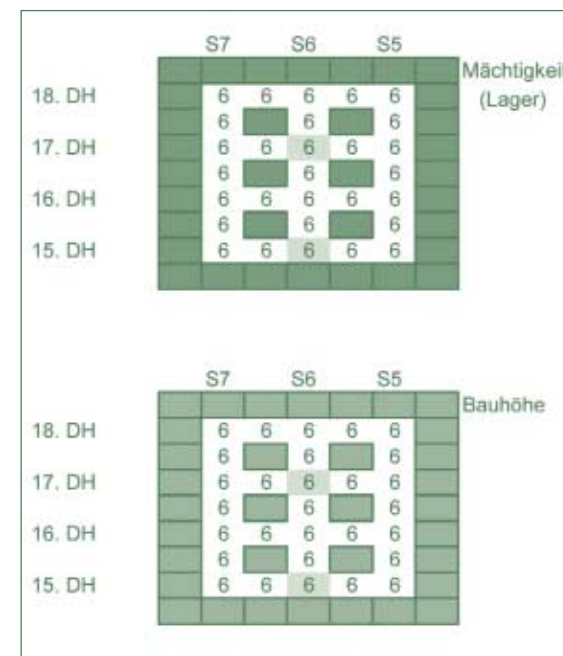


Abb. 6: Auszug aus dem Kippstellen-Layout der EXCEL-Datei / Part of a layout of the dumping area in the EXCEL-file

(8) Übergabe 1a – Das Datenblatt ist inhaltlich an die Übergabeprotokolle der Reviere angepasst. Mit der Startaufstellung kann jeder beliebige Startzustand einer Strecke abgebildet werden.

Starten des Simulationslaufes

Mit der Startaufstellung ist die Eingabe der Daten im EXCEL-Blatt beendet und es kann die Simulation auf der Hauptseite über den Button „Modell erzeugen“ gestartet werden (Abb. 4). Bei dieser Aktion werden das Modell im ARENA Simulator erzeugt und alle Eingabedaten an das Modell übergeben.

Simulation und Animation

Nach dem Aufbau der Startaufstellung der Kippstelle(n) beginnt die Simulation des Abbaus, der sich anhand der Animation verfolgen lässt. Die Abbildung 7 zeigt die Animation zum Zeitpunkt nach 7 Schichten. Mit jedem Ansatzort im Revier ist genau eine aktuelle Aktion im Modell verbunden. Diese Ak-

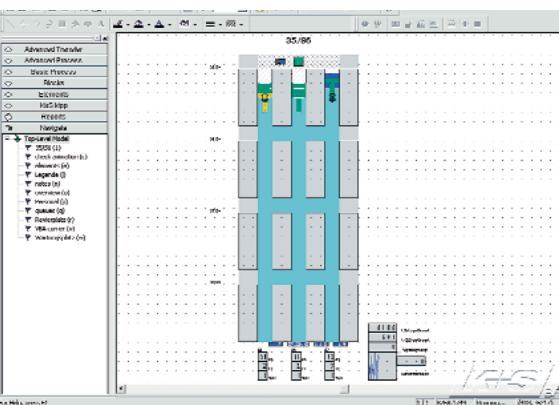


Abb. 7: Modell in ARENA / ARENA model

tionen warten in einer Liste anstehender Aufträge, bis sie ausgeführt werden. Dazu sind meist ein Mann und eine Maschine notwendig, die diese Aktion ausführen. Ist die Aktion ausgeführt, erzeugen sie eine (oder mehrere) Nachfolgeaktionen, die wieder in die Liste der Aufträge gestellt werden. Die gesamte Ablauflogik ist so auf das Ausführen von Aktionen und deren Nachfolgeaktionen zurückzuführen. Die Reihenfolge der Aktionen richtet sich nach dem Gewinnungszyklus. Ist eine Aktion ausgeführt, wird die nächste Aktion der Liste ausgeführt, am Ende der Liste beginnt der Zyklus wieder von vorn. [2]

Auf dem Bildschirm lassen sich neben dem aktuellen Streckenzustand auch die aktuellen Kenndaten für gefördertes Rohsalz, K₂O-Ausbringen sowie die Tagestonnage als



Abb. 8: Legende und Farbcode der Animation / Animation legend and colour code

Kennzahl und auch als Plot ablesen. Des Weiteren werden Simulationstage, Schichtzeit, Schichtdauer in Minuten und die aktuelle Schicht angezeigt. Für jede Strecke werden der Vortriebsstand, die Produktionsschichten seit Erstfreigabe sowie die Haufwerksmenge in der Strecke angezeigt. Zur visuellen Unterscheidung der Maschinen und der Streckenzustände sind diese farblich und symbolisch codiert (Abb. 8).

Datenausgabe

Während des Simulationslaufes werden die Ergebnisse in die EXCEL-Datei geschrieben. Der Umfang der Ergebnisübertragung nach EXCEL kann zugunsten der Rechengeschwindigkeit auf der Hauptseite eingeschränkt werden. Zur statistischen Absicherung bei wahrscheinlichkeitsbehafteten Eingabedaten ist es notwendig, mehrere Simulationsläufe (Replikationen) ohne Veränderung der Eingangsparameter durchzuführen (Kennzeichnung der Datenblätter mit Kleinbuchstaben).

(8) Übergabe 1a – Nach jeder Schicht wird der Status für jede Strecke in das Blatt Übergabe 1a geschrieben.

(9) Gantt1a – In jeder Schicht werden in einstellbaren Zeitintervallen alle Maschinen über horizontale Balken in einem Gantt-Chart dargestellt. Der Einsatzort der Maschinen lässt sich im Balkendiagramm ablesen. Die gleiche Art der Darstellung wird für die Beschäftigung der Belegschaft verwendet. Neben der graphischen Darstellung lassen sich Beschäftigung der Belegschaft und Auslastung der Maschinen in Zahlenwerten ablesen.

(10) Strecken1a – In diesem Gantt-Chart lässt sich die Streckenauslastung anhand der Maschi-

nenbelegung in den Strecken ablesen.

(11) Ergebnis1a – Für jede abgelaufene Schicht werden auf diesem Blatt die erbrachten Leistungen geschrieben. Dies sind zusammenfassend die Revierleistung (z.B. Reviertonnage und Bohrmeter), Maschineneinzelleistungen (z.B. Fahrzeit, Einsatzzeit und gebohrte Sprengbohrlöcher der Sprenglochbohrwagen), Beschäftigung des Personals (z.B. Arbeit, kein Auftrag und keine Maschine in [h] für den Bohrhauer1) und der Personalaufwand in den Tätigkeiten (z.B. Haufwerk Laden und Bohren in [h]). Nach Ende des Simulationslaufes wird eine Ergebniszusammenfassung angehängt.

(12) Auswertung – Am Ende der Simulation werden hier die Ergebniszusammensetzungen der einzelnen Replikationen zusammengetragen und statistisch ausgewertet. Den Ergebnissen sind im EXCEL-Blatt Namen zugewiesen. Dieses bietet den Vorteil, grubenspezifische Kennzahlen, Kennlinien und Kostentabellen erstellen zu können.

Phase 6 – Modellverifizierung

In dieser Phase muss geprüft werden, ob das konzeptionelle Modell bzgl. der Prozesslogik konsistent in das Computermodell überführt worden ist, bzw. ob der Gewinnungszyklus in den Strecken richtig abgebildet und programmiert wird. Hier ist die Sorgfalt des Programmierers gefragt, permanent die Modelllogik auf den Prüfstein zu stellen. Die Fehlersuche, das sog. Debugging, begleitet nicht nur der Programmierer von der SAT GmbH während der gesamten Modellphase, sondern auch das K+S-Team. In einem sehr frühen Modellstadium wurde die Modelllogik anhand

eines Ablaufschemas geprüft. ARENA bietet hier die Möglichkeit, nach jeder Task das Modell anzuhalten, um den Modellzustand (Streckenzustand, Leistungsdaten etc.) zu überprüfen. So wurden die zu erwartenden Simulationsergebnisse anhand der Eingangsdaten berechnet und mit den erzielten Simulationsergebnissen verglichen und verifiziert. Der Aufwand des Debuggings zeigt sich insbesondere in der hohen Anzahl der Modellversionen.

Parameter	Simulation	Realität	Δ
Fördermenge	307.000 t	406.000 t	24%
Bohrmeter/1000t	877 m	1062 m	17%
Firstanker	47 St	51,5 St	8%
Loch/1000t	131 St	159 St	17%

Tab. 4: Simulationsergebnisse Revier 5 / Simulation results of area 5

Phase 7 – Modellvalidierung

Unter Validierung wird die Prüfung und Sicherstellung von einer hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Realität verstanden. Mit dieser Phase schließt der jeweilige Prüfprozess ab. Kann das Modell nicht validiert werden, sind die Ursachen in den Phasen 3 bis 6 zu suchen. Hierbei begleitet das Simulationsteam die Frage nach der Abbildungsgenauigkeit des Modells. Schwierig gestaltete sich die Abwägung zwischen zu rechtfertigendem Aufwand zur Verbesserung des Modells und zu erzielendem Effekt.

Die Modellvalidierung wurde an zwei Beispielen mit unterschiedlichen Ergebnissen in 2001 vorgenommen, (a) Revier 5, 3-Kippstellenbetrieb und (b) Revier 35, 3-Strecken-vortrieb in Richtung UB-Süd. (a) Das Revier 5 im Grubenbetrieb Werra Standort HW stellt für das Projekt das Simulationsrevier dar. Die Differenz der realen Kennzahlen zu denen aus der Simulati-

on ermittelten ließ eine Validierung nicht zu. In der Tabelle 4 ist ein Auszug der Werte vergleichend gegenübergestellt. Die Ursachen wurden analysiert und in der Komplexität der Aufgabe begründet. Im Nachgang der Validierung wurde eine 2. Projektphase angeschlossen, in der Ergänzungen und Verfeinerungen hinsichtlich Modelllogik und Abbildungsgenauigkeit vorgenommen wurden. Dieser Modellstatus ist zur Zeit in der Validierungsphase.

(b) Das Revier 35, der 3-Strecken-vortrieb in Richtung Unterbreizbach-Süd, ist mit der Komplexität des Simulationsreviers mit seinen 3 Kippstellen und ca. 30 Strecken nicht zu vergleichen. Simulationsbasis war der Ist-Zustand des Reviers mit einem Maschinensatz und gleich gut qualifiziertem Personal einer 3-schichtigen 3er-Belegung. Simulationsziel war, die über 40 Wochen dokumentierte reale Vortriebsleistung des Streckensystems von 15 m/Woche mit der Simulation zu erreichen. Nach 5 Replikationsläufen wurde eine durchschnittliche Vortriebsleistung von 15,5 m/Woche erzielt, das einem Δ von 3 % in der Abweichung zur realen Vortriebsgröße entspricht. Mit diesem Ergebnis ist das Modell für die Simulation von Prozessen im Revier 35 validiert worden und erfüllte damit die Voraussetzung für einen leistungsorientierten Optimierungsansatz mittels Simulation.

Phase 8 – Experimentierahmen

Der Entwurf des Experimentierahmens richtet sich nach den Simu-

Schichtsystem	Streckenvortrieb [m]	Arbeitsaufwand [MS]	Leistung [m/Wo]	[m/1000t]
5x3+1	171	462	15,5	4,6
6x2	170	370	14,8	5,7

Tab. 5: Simulationsergebnisse zur Variation Schichtzeiten / Simulation results in dependency of variation of shift time

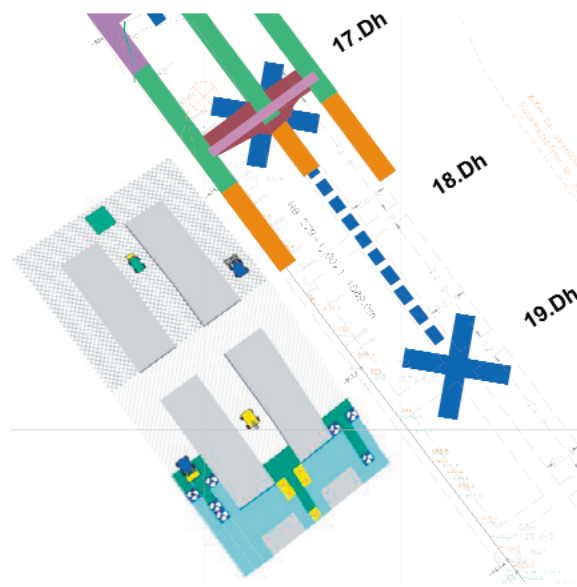


Abb. 9: Riss Revier 35 – 3-Strecken-vortrieb in Richtung Unterbreizbach-Süd / Mine map of area 35 – 3-gallery drifting system to South of Unterbreizbach

lationszielen. Simulationsläufe selbst sind keine Optimierungsläufe. Erst durch eine schrittweise Variation der Eingangsparameter und der daraus resultierenden Ergebnisse aus den Läufen kann durch die Wahl geeigneter Auswertemethoden eine Optimierung durchgeführt werden. In Abhängigkeit der Simulationsergebnisse und deren Interpretation wird es unter Umständen notwendig, den Experimentierahmen zu modifizieren, in dem weitere Simulationsläufe hinzugenommen oder andere gestrichen werden. Dabei werden die Phasen 8 bis 10 durchaus öfters durchlaufen.

Der Experimentierahmen zur Optimierung der Vortriebsleistung des 3-Strecken-vortriebs in Richtung UB-Süd umfasste die Variation der (a) Schichtzeiten und des (b) Umstellrasters der Kippstellen.

Phase 9 – Produktionsläufe

(a) Variation der Schichtzeiten – Das

bestehende Schichtsystem von fünf 3-schichtigen Werktagen plus die Samstag Frühschicht (5x3+1) wurde dabei mit einem Schichtsystem von sechs 2-schichtigen Werktagen verglichen. Der Vergleich in Tabelle 5 zeigt deutlich einen schnelleren Vortrieb für das 5x3+1-Schichtsystem unter nachteiligem Arbeitsaufwand. Bei einem kostenoptimierten Ansatz wäre hier das 6x2-Schichtsystem favorisiert gewesen.

(b) Variation der Umstellraster der Kippstellen – Das Umstellraster

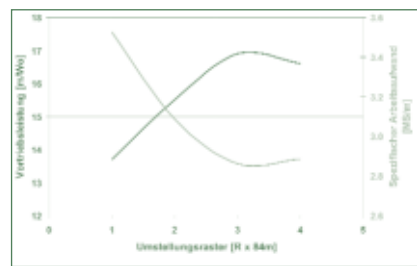


Abb. 10: Vortriebsleistung und Spezifischer Arbeitsaufwand in Abhängigkeit des Umstellrasters / Drifting performance and specific work expenditures as a function of the relocation pattern

einer Kippstelle umfasst den von einer gemeinsamen Basisstrecke aus gerichteten Abbau der ihr zugeordneten Strecken und Durchhiebe. Bei einem Umstellraster von 2R wird die Kippstelle nach dem Abbau von 2 Durchhieben (Abbauzeilen) in die neue Basisstrecke umgesetzt. Die Abbildung 9 zeigt dies in einer risslichen Darstellung zum Vergleich mit einer projizierten Momentaufnahme aus der Animation. Bei einem Umstellraster von 3R wird vor der Umstellung noch zusätzlich eine Abbauzeile mehr abgebaut. Die Parameter dazu wurden auf dem EXCEL-Blatt K1Layout entsprechend angepasst. Dabei wurden Umstellraster von 1R bis 4R simuliert (Abb. 10). Die Analyse der Ergebnisse und die graphische Auswertung zeigen beim Umstellraster 3R ein deutli-

ches Optimum. Ein Vergleich in Tabelle 6 zeigt bei der Abbauvariante 3R eine 5%ige Aufwandreduzierung bei gleichzeitiger 9%iger Leistungssteigerung gegenüber der bisherigen Umsetzung der Kippstelle nach 2 Abbaurastern. Die Aufwandsreduzierung ist u.a. durch den geringeren Auffahrungsaufwand im Bereich der Kippstelle erklärbar (weniger aufzufahrende Kippstellen pro Jahr).

Phase 10 – weitere Simulationsläufe
Durch die langen Pfeiler des aufzufahrenden Streckensystems ergeben sich insbesondere bei der 3R Kippstellenumsetzung lange Förderwege für den Lader. Darum wurde der Einsatz eines 2. Laders ab der 70. Schicht simuliert (s. Pkt. [4] Maschinen). Dies hatte erwartungsgemäß eine Kapazitätssteigerung zur Folge. Dieses Ergebnis lässt sich aber auf Grund der Streckenverhältnisse und Förderung des Haufwerks aus einer Strecke auf nur eine Kippstelle betrieblich nicht umsetzen. Dieses Beispiel zeigt die Möglichkeiten auf, die die Simulation hinsichtlich Computerexperimenten bietet. So können ohne großen Zeit- und Kostenaufwand auch Varianten simuliert werden, die mit konventionellen Methoden u.U. verworfen worden wären.

Phase 11 – Programmdokumentation und Ergebnisbericht
Die Bedienung der Systemkomponenten unter EXCEL und ARENA sowie der Aufbau der Programmlogik in ARENA sind durch die SAT GmbH dokumentiert worden.

Jedes Simulationsprojekt muss dokumentiert werden. Ein- und Ausgabeparameter müssen nachvollziehbar sein. Als hilfreich erweist sich beim Entwurf und der Fortführung des Experimentier-

	2R	3R	Δ
Spezifischer Arbeitsaufwand [MS/m]	2,70	2,57	-5%
Vortriebsleistung [m/Wo]	15,5	16,9	+9%

Tab. 6: Simulationsergebnisse zur Variation des Umstellrasters / Simulation results in dependency of variation of relocation pattern

rahmens bei weiteren Simulationsläufen die Aufstellung einer Matrixstruktur mit allen Eingabeparametern und Ergebnissen von jedem Simulationslauf.

Phase 12 – Ergebnisumsetzung
Nach Prüfung der Erwartungswerte aus der Simulation entschied sich der Standort HW auf Umsetzung der Ergebnisse und Verlängerung des Umstellrasters um ein Raster (Abb. 11). Die Zielvorgabe für das Revier 35 wurde von 15 m/Woche aufzufahrendem Streckensystem auf 18 m/Woche erhöht. Damit ergab sich folgende Auffahrungssituation:

- Letzte 2R-Auffahrung vom 17.DH bis zum 19.DH – 02. Okt. 01 bis 23. Jan. 02
- Erste 3R-Auffahrung vom 19.DH bis zum 22.DH – 02. Feb. 02 bis 20. Mai 02

	2R	3R	Δ
Spezifischer Arbeitsaufwand [MS/m]	2,72	2,24	-18%
Vortriebsleistung [m/Wo]	15,1	17,9	+19%

Tab. 7: Auffahrungsergebnis – Leistungsvergleich der Umstellraster/ Drifting rate – performance comparison of relocation pattern

Ein Vergleich der Auffahrungszeiträume zeigt Tabelle 7. Mit der Änderung des Umstellrasters von 2R auf 3R wurden 18 % weniger Mannschichten pro Meter Streckensystem aufgewendet und die Auffahrungslänge des Streckensystems um 19 % pro Woche gesteigert [5].

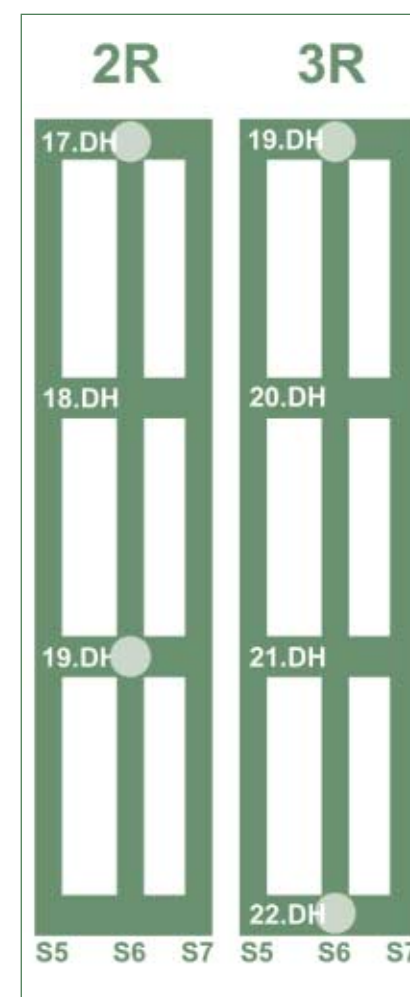


Abb. 11: Umstellraster der Kippstellen / Relocation pattern of dumping area

Fazit
Dieses Validierungsbeispiel zeigt, dass bereits während der Entwicklung des Simulationsmodells Ergebnisse aus der Simulation zur Optimierung des 3-Strecken-vortriebs erfolgreich eingesetzt werden konnten. Die prognostizierte Vortriebsleistung ist dabei im späteren Betrieb noch übertroffen worden (s. Tabelle 8). Ähnlich verhielt es sich beim spezifischen Arbeitsaufwand (s. Tabelle 9). Die verbrauchten Mannschichten pro Woche waren dabei weit geringer als die prognostizierten aus der Simulation.

Die Differenzen zwischen den Simulationswerten und realen Betriebsergebnissen können als Simulationsgenauigkeit interpretiert werden.

Der hohen Genauigkeit in der Vortriebsleistung steht hier aber eine größere Differenz im spezifischen Aufwand gegenüber. Der Grund hierfür könnte in der Steigerlogik des Modells liegen. Das Modell arbeitet eine Liste von Aufträgen der Reihe nach ab. Der Steiger im realen Revier steht im permanenten Entscheidungsprozess, seine Mannschaft von Situation zu Situation effektiv einzusetzen. Er bedenkt die Konsequenzen seiner Entscheidung für die nachfolgenden Arbeitsprozesse nicht nur in Konsequenz auf seine Schicht sondern auch auf die nachfolgende(n) Schicht(en). Dies kann das Modell noch nicht leisten.

Vielmehr gilt es Abbildungsschärfen zu erkennen, zu untersuchen und ggf. die Ergebnisse zu relativieren. Die Simulation ist ein Planungswerkzeug, das nach Einsatz und Anwendung der Ergebnisse wie jedes Projekt einer Nachkontrolle unterzogen werden muss. Im Ergebnis der Nachkontrolle sollte ggf. eine Modifizierung des Planungswerkzeuges stattfinden und somit auch eine am Bedarf und Aufwand orientierte Weiterentwicklung des Simulationsmodells erfolgen.

Ausblick
Ziel ist es, das Simulationsprojekt soweit abzuschließen, dass das Modell entsprechend der Aufgabenstellung validiert werden kann. Mit dem validierten Modell wird eine Anwendung des Modells in den Grubenbetrieben der flachen Lagerung, Werke Zielitz und Neuhof-ellers, möglich. Ein Sonderprojekt ist zwischenzeitlich im Grubenbetrieb Zielitz erfolgreich simuliert worden und damit auch die Anwendung des Modells auf einem anderen Standort unter entsprechender Modifizierung gelungen.

	SIM-Genauigkeit			
	SIM	Real	Δ	
Vortriebsleistung	2R	15,5	15,1	3%
	3R	16,9	17,9	6%
	Δ	9%	19%	

Tab. 8: Vortriebsleistung [m/Wo]/Drifting performance [m/we]

Der in der Vergangenheit bereits durchgeführte K+S interne Workshop für die Grubenplaner soll mit der Übertragbarkeit des Modells auf

	SIM-Genauigkeit			
	SIM	Real	Δ	
Spez. Arbeitsaufwand	2R	2,70	2,72	0%
	3R	2,57	2,24	13%
	Δ	5%	18%	

Tab. 9: Spezifischer Arbeitsaufwand [MS/m]/Specific work expenditures [ms/m]

die Schwesterwerke fortgesetzt werden. Ziel des Workshops soll die Einführung und Anwendung des Modells unter Beachtung der standortspezifischen Abbaubedingungen sein. Mit dieser Vorgehensweise wird sich die Simulation mit zunehmendem Umfang ihrer Anwendungen als Werkzeug der Grubenplanung entwickeln und helfen, Arbeitsabläufe in der Gewinnung zu optimieren.

Quellen
[1] Adelsberger H.H., Grundlagen der Simulations-Technologie; Essen, 2001
[2] Messerle F., Programmdokumentation; Version 2.1, 2002
[3] Lecybil S., Berechnungen des Produktionszyklus; Werk Werra
[4] Keienburg D., Störfallanalyse Großgeräte; Werk Werra
[5] Licht R., Revierbericht Revier 35; Werk Werra