

Aufbau eines komplexen 3D-Lagerstättenmodells einer Braunkohlenlagerstätte unter Nutzung geostatistischer Simulationsverfahren – Von den Rohdaten zum Modell

Dipl.-Geoinf. André John, Freiberg*

Das aktuell übliche Vorgehen bei der Modellierung der Geometrie von Kohleflözen und Kohlequalitätsparametern basiert auf der Anwendung einfacher interpolierender Ansätze, wie z.B. Kriging. Obwohl diese Methoden in der Regel lokal den besten Schätzer liefern, repräsentieren sie global einen Glättungseffekt. Das bedeutet, dass die Häufigkeit des Auftretens von kleinen Werten überschätzt und die von großen Werten unterschätzt wird. Die Anwendung von Grenzwerten führt demnach zu verzerrten Aussagen über die Lagerstätte, da die Streuung eines Parameters global unterschätzt wird.

Weiterhin bieten Interpolatoren keine Möglichkeit, realistische Genauigkeitsmaße abzuleiten [1], da z.B. die Kriging-Varianz, welche zur Ableitung der Vorhersagegenauigkeit genutzt werden kann, im Wesentlichen nur aus dem Variogramm sowie der Dichte und der räumlichen Anordnung der zur Schätzung herangezogenen Stützpunkte bestimmt wird. Die Datenwerte an den Stützstellen gehen dabei nicht direkt in die Berechnung ein.

Moderne Vorhersageverfahren auf Basis geostatistischer Simulationsverfahren bieten den Vorteil, dass die natürliche Variabilität der spezifischen Lagerstätten-

*Dipl.-Geoinf. André John
TU Bergakademie Freiberg
Fakultät für Geowissenschaften,
Geotechnik und Bergbau
Institut für Markscheidewesen und Geodäsie
Reiche Zeche
Fuchsmühlenweg 9
09599 Freiberg
Tel.: 03731/393591
Fax: 03731/393601
E-Mail: andre.john@mabb.tu-freiberg.de
Internet: www.tuz-freiberg.de



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



INNOVATIVE BRAUN-
KOHLEN INTEGRATION
IN MITTELDEUTSCHLAND



attribute und die daraus resultierenden Unsicherheiten lokaler Vorhersagen berücksichtigt werden. Geostatistische Simulationsverfahren liefern im Gegensatz zu Kriging-Interpolatoren nicht nur eine „beste“ Schätzung, sondern beliebig viele gleichwahrscheinliche Modelle, wobei jedes Modell als ein mögliches Szenario angesehen werden kann. Jedes Modell ist dabei stützpunkttreu und reproduziert das Histogramm und Variogramm der Explorationsdaten. Dadurch lässt sich die Variabilität der Werte am unbeprobten Ort ermitteln und eine Aussage über die Sicherheit angeben, mit der ein Parameter einen bestimmten Wert annimmt.

Die prinzipielle Eignung von Verfahren der bedingten Simulation zur Modellierung der form- und qualitätsbeschreibenden La-

gerstättenmerkmale einer Braunkohlenlagerstätte wurde bereits in verschiedenen Forschungsarbeiten aufgezeigt [2,3,4,5]. Diese Fallstudien zur Anwendbarkeit der geostatistischen Simulation im Braunkohlenbergbau beschränkten sich jedoch alle auf ausgewählte Kohleflöze und Kohlequalitätsparameter in räumlich beschränkten Teilbereichen existierender Abbaufelder. Erstmals sollen nun die wesentlichen geometrischen und qualitativen Lagerstättenparameter eines kompletten Abbaufeldes simuliert und zu einem komplexen 3D-Modell der gesamten Lagerstätte zusammengesetzt werden.

Der Aufbau eines solchen Modells erfolgt zweckmäßigerweise in 3 Teilschritten:

- Modellierung der Lagerstättengeometrie (Strukturmodell)
- Modellierung der Qualitätsparameter (Qualitätsmodell)
- Zusammenfügen der Modelle (3D-Gesamtmodell)

Der prinzipielle Ansatz zum Aufbau dieser Modelle, sowie die potentiellen Datenquellen und ihre notwendige Vorverarbeitung sollen nachfolgend beschrieben werden.

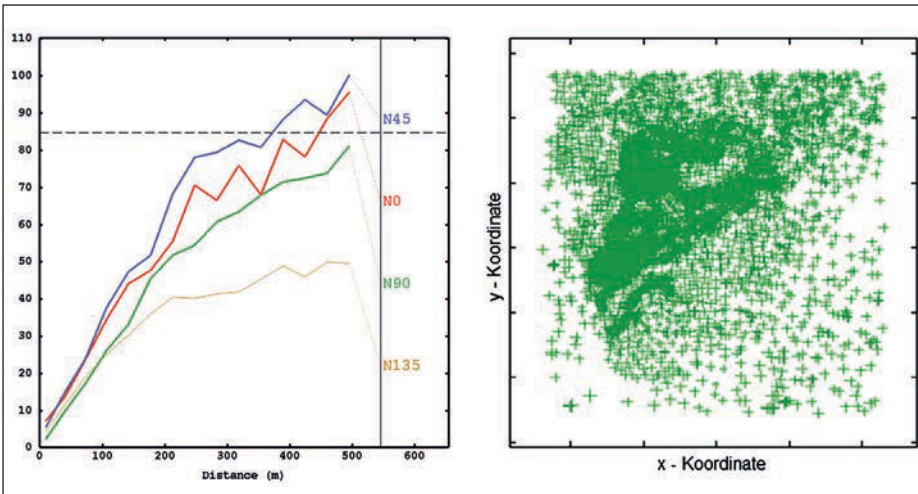
Von den Rohdaten zum Modell – Die Prozesskette

Für die Modellierung beliebiger Lagerstättenparameter mit Hilfe geostatistischer Simulationsverfahren sind verschiedene Prozessschritte durchzuführen, welche sich in folgende Kategorien einteilen lassen:

- Datenanalyse
- Datenvorverarbeitung
- Modellierung der räumlichen Struktur
- Simulation
- Validierung der Ergebnisse

1. Datenanalyse

Der Weg von den Rohdaten zum Modell beginnt mit einer intensiven Analyse der Rohdaten, da ein gutes Verständnis der Daten unerlässlich für die Anwendung geostatistischer Verfahren und die Durchführung von vertrauenswürdigen Schätzungen ist. Für die Analyse nutzt man dabei die gängigen Werkzeuge der beschreibenden Statistik, wie z.B. Histogramm, Streudiagramm, Variogramm. Die Datenanalyse bildet die Grundlage für die Beurteilung der Notwendigkeit einer Vor-



1 Erkennung von Trends in experimentellen Variogrammen (li.) und unregelmäßige Verteilung der Probepunkte im Untersuchungsgebiet (re.)

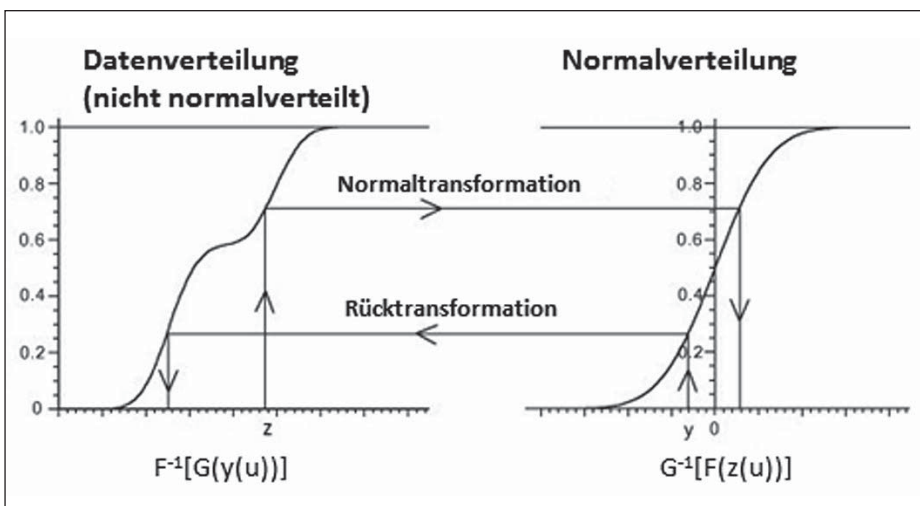
verarbeitung der Rohdaten, damit sichergestellt werden kann, dass keine der notwendigerweise zu treffenden Annahmen für die Anwendung der Geostatistik verletzt wird. D.h. die Rohdaten werden hinsichtlich der statistischen Datenverteilung analysiert, sowie auf mögliche Trends, Ausreißer oder Clusterungen durch eine bevorzugte Probenahme überprüft.

2. Datenvorverarbeitung

In den wenigsten Fällen sind die Probedaten eines Untersuchungsgebietes regelmäßig über dessen Fläche verteilt. Ein Grund hierfür ist eine bevorzugte Probenahme in besonders interessanten Lagerstättenbereichen, aufgrund von Kenntnissen aus der Vorerkundung des Untersuchungsgebietes. Da geostatistische Simulationsverfahren unter anderem auch die statistische Verteilung der Daten reproduzieren, ist es jedoch zwingend notwendig, dass diese Verteilung repräsentativ für das Untersuchungsgebiet ist, um Schätzungen nicht zu verzerren. Dies erreicht man z.B. durch eine Gewichtung

der Probepunkte in Abhängigkeit der Entfernung zu anderen Probepunkten. Diese Technik wird auch als Entclustering bezeichnet. Die Gewichtung verändert dabei nur den Einfluss einzelner Punkte auf die Gesamtstatistik und nicht die Werte der Punkte selbst. Mögliche Ansätze für eine Entclustering wie z.B. die Polygonmethode oder das Zellenentclusteringverfahren sind ausführlich in der Literatur beschrieben [7,8,9]. Bild 1 (re.) zeigt ein Beispiel für eine unregelmäßige Probenahme im Untersuchungsgebiet.

Die Nutzung Gaußscher Simulationsverfahren macht es darüber hinaus erforderlich, dass die Daten der zu untersuchenden Variablen normalverteilt vorliegen. In der Praxis ist dies jedoch nur sehr selten der Fall, so dass die Ausgangsdaten vor der Simulation in eine Normalverteilung $N(0,1)$ transformiert werden müssen. Die Ergebnisse der Simulation werden anschließend wieder zurücktransformiert, so dass sie die Verteilung der Ausgangsdaten reproduzieren. Möglichkeiten diese Transformation durchzuführen werden z.B. in



2 Transformation der Daten in eine Normalverteilung

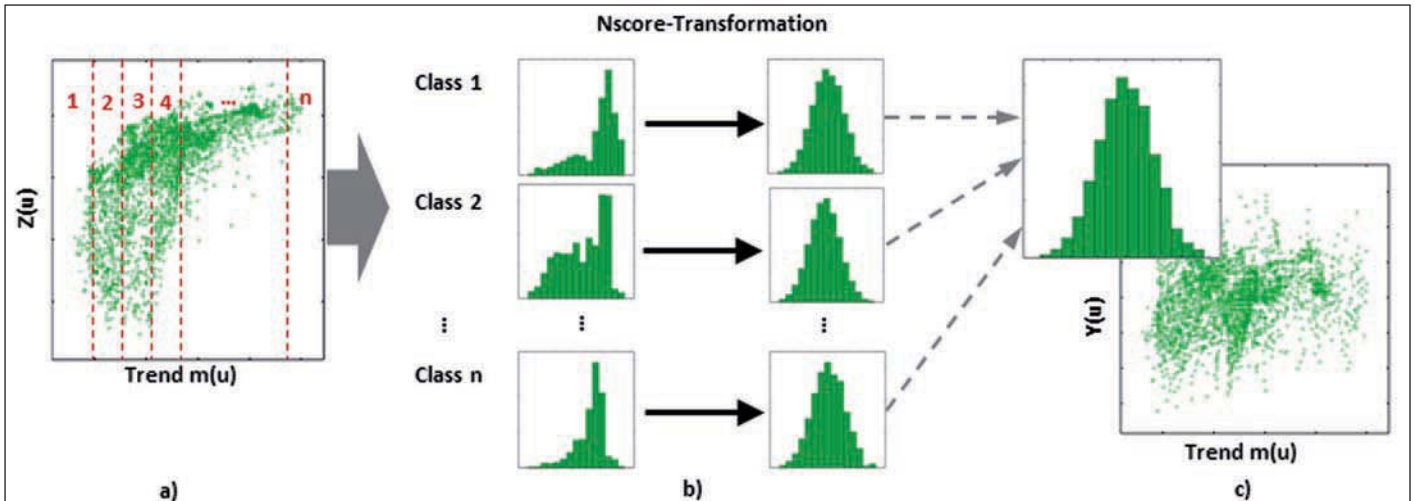
[1,7,11,12] ausführlich beschrieben. Bild 2 zeigt das Prinzip der sogenannten Normal-Score-Transformation.

Eine weitere Voraussetzung für eine regelkonforme Anwendung geostatistischer Simulationsverfahren ist die Korrektheit der getroffenen Stationaritätsannahme, da eine Verletzung dieser Annahme eine sachgerechte Anwendung dieser Methoden verhindert. Eine Verletzung der Stationaritätsannahme wird z.B. durch das Auftreten eines Trends in den Daten verursacht. Durch die Berechnung von experimentellen Variogrammen lassen sich Trends jedoch gut erkennen. Da diese mit zunehmendem Abstand keinen Schwellenwert erreichen, bzw. nach Erreichen eines Schwellenwertes erneut ansteigen. Bild 1 (li.) zeigt anisotrope experimentelle Variogramme eines trendbehafteten Lagerstättenmerkmals.

Wurde ein Trend identifiziert, muss eine Entscheidung über dessen Behandlung getroffen werden. Der einfachste Ansatz ist die Vernachlässigung der Trendkomponente. Dies ist möglich, wenn sich die Trendkomponente erst nach Überschreiten eines Mindestabstandes bemerkbar macht, da in diesem Fall für die Schätzung eines unbekanntes Punktes ohnehin nur Probedate verwendet werden, welche in einem Abstand kleiner als die Reichweite zu diesem Punkt liegen [10], d.h. durch eine geeignete Wahl der Größe der lokalen Suchnachbarschaft kann der Einfluss der Trendkomponente auf die Interpolations- bzw. Simulationsergebnisse eliminiert werden.

Eine 2. Möglichkeit ist die Zerlegung der untersuchten Variable in eine Trendkomponente und dem Residuum. Dabei sollte sichergestellt werden, dass die Trendkomponente möglichst unabhängig vom Residuum ist, d.h. die Kovarianz zwischen beiden sollte nahe bei null liegen, um künstliche Artefakte in den Ergebnissen zu vermeiden [9]. Im weiteren Verlauf der Modellierung wird dann zunächst nur noch das Residuum betrachtet und erst am Ende wird die Trendkomponente wieder hinzugefügt. Dieser Ansatz kann jedoch dazu führen, dass unerwünschte Ergebnissen entstehen, wie z.B. das Auftreten von negativen Werten für Lagerstättenmerkmale deren Wertebereich auf positive Werte beschränkt ist. Derartige Effekte müssen dann nachträglich korrigiert werden.

Der 3. Ansatz erlaubt eine Berücksichtigung des Trends über eine schrittweise bedingte Normaltransformation [11], d.h. der Trend wird eliminiert über den i.d.R. für die Anwendung Gaußscher Simulationsverfahren notwendigen Schritt der Transformation der Daten in eine Normalverteilung.



3 Berücksichtigung des Trends über eine schrittweise bedingte Normaltransformation

Bild 3 zeigt den Ablauf einer solchen schrittweisen Transformation der Daten. Dabei erfolgt im ersten Schritt eine Einteilung der Daten der Zufallsvariable $Z(u)$ in n Klassen bedingt an die Trendkomponente $m(u)$. Im Anschluss wird für jede der n Klassen eine Normal-Transformation der zugehörigen Datenpunkte durchgeführt. Als Ergebnis erhält man letztlich einen, vom Trend unabhängigen, normalverteilten Datensatz $Y(u)$. Eine Einschränkung dieses Verfahrens ist der erforderliche Datenumfang. Dieser muss ausreichend groß sein, damit eine hinreichende Anzahl von Klassen ($n > 5$) mit ausreichender Anzahl von Datenpunkten gebildet werden kann, um letztlich zuverlässige Verteilungen zu erhalten.

Für die beiden zuletzt genannten Ansätze ist ein Modell des Trends notwendig. Die Idee dabei ist es, ein Modell zu generieren, welches die großräumigen Strukturen im Untersuchungsgebiet beschreibt, so dass das resultierende Residuum die Stationaritätsbedingung erfüllt. Ein Trendmodell sollte i.d.R. ein relativ glattes Modell sein, welches sich durch mehr oder

weniger komplexe Interpolations- bzw. Extrapolationsverfahren aus den zur Verfügung stehenden Daten erstellen lässt. Gute Ergebnisse lieferte in verschiedenen Untersuchungen eine 2-stufige Trendmodellierung, bei der zunächst aus den Daten ein erstes Trendmodell mit Hilfe von Verfahren wie z.B. Kriging für den Mittelwert oder Inverse-Distanz-Wichtung generiert wird und anschließend erfolgt eine Glättung dieses Modells mit Hilfe eines „Moving Average“-Ansatzes. Bild 4 zeigt an einem Beispiel die einzelnen Stadien der Trendmodellierung beginnend mit den zur Verfügung stehenden Daten.

Neben diesem Ansatz sind jedoch auch andere Ansätze für die Modellierung von Trendmodellen anwendbar [9,11]. Die konkrete Wahl einer Methode und ihrer Parameter bleibt letztlich immer eine subjektive Entscheidung, welche mit Hilfe von Expertenwissen und kompetenter Interpretation der Daten getroffen werden sollte [11].

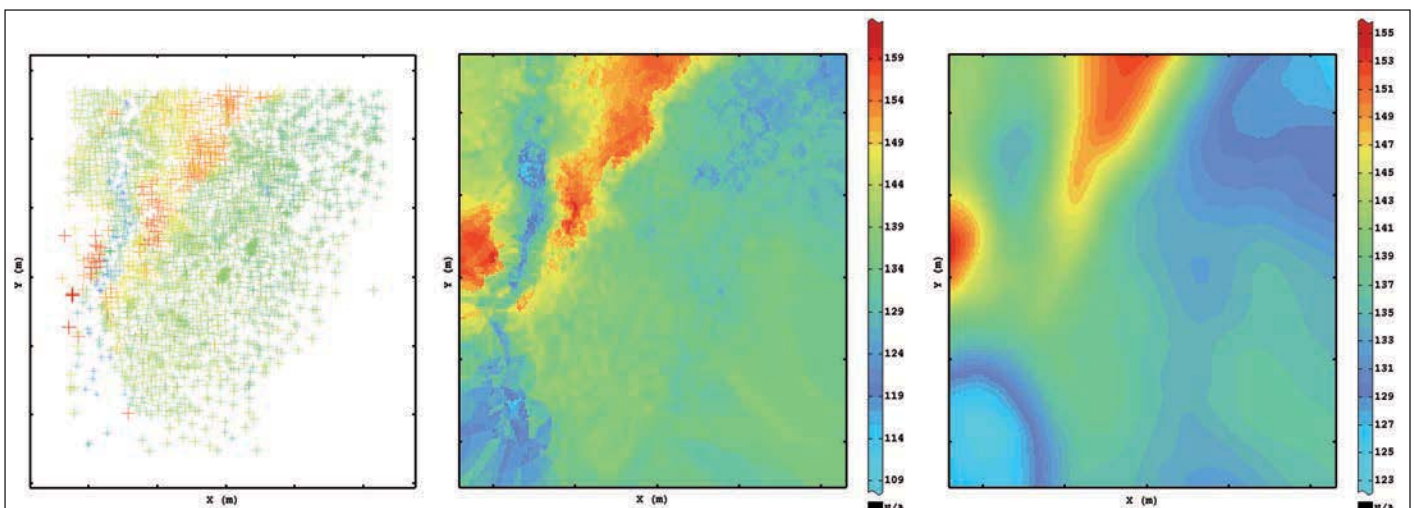
3. Modellierung der räumlichen Struktur

Am Ende der Datenvorverarbeitung liegt

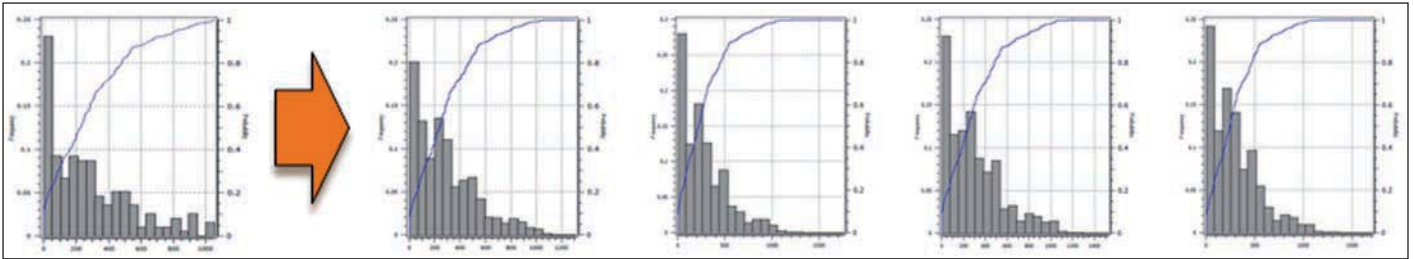
ein repräsentativer normalverteilter Datensatz vor. Dieser bildet nun die Grundlage für die Modellierung der räumlichen Struktur, welche später durch die Simulation reproduziert werden soll. Die räumliche Struktur eines Lagerstättenmerkmals kann mit Hilfe von Variogrammen bzw. Kreuzvariogrammen beschrieben werden. Dafür werden zunächst die diskreten experimentellen Variogramme bzw. Kreuzvariogramme berechnet. Diese geben die mittlere Streuung der Differenzen zwischen Zufallsvariablen mit Abstandsvektor h an und sind somit ein Maß für den räumlichen Zusammenhang dieser Variablen. Anschließend werden dann zulässige Modelle an diese diskreten experimentellen Variogramme bzw. Kreuzvariogramme angepasst. Der Modellierungsprozess ist z.B. in [7] detailliert beschrieben.

4. Simulation

Wenn dann ein zulässiges Regionalisierungs- bzw. Ko-Regionalisierungsmodell angepasst wurde, kann die eigentliche Simulation durchgeführt werden. Aufgrund

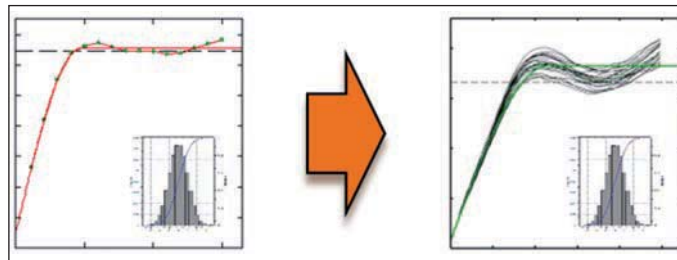


4 Modellierung eines Trends



5 Reproduktion des Histogramm

der großen räumlichen Ausdehnung typischer Braunkohlenlagerstätten, sowie der großen Anzahl interessierender Lagerstättenmerkmale ist hierfür ein besonders effizientes Simulationsverfahren notwendig. Aus diesem Grund wird für die Simulation der hinsichtlich der rechentechnischen Effizienz der optimierte sequentielle parametrische Ansatz in Form des



6 Reproduktion des Variogramm und Histogramm (Normalverteilung)

Verfahrens der generalisierten sequentiellen Gaußschen Simulation (GSGS) [6] empfohlen. Dieses Verfahren beruht auf der Ausnutzung der gemeinsamen lokalen Nachbarschaft eng beieinander liegender Rasterpunkte, indem Gruppen von benachbarten Punkten gemeinsam simuliert werden. Charakteristisch für Braunkohlenlagerstätten ist außerdem die ausgeprägte Korrelation zwischen verschiedenen form- sowie qualitätsbeschreibenden Lagerstättenmerkmalen. Aus diesem Grund wurde das Verfahren der generalisierten sequentiellen Gaußschen Simulation zu einem Ko-Simulationsverfahren (CoGSGS) erweitert. Damit wurde die Möglichkeit geschaffen, diese Zusammenhänge im Simulationsprozess zu berücksichtigen, indem die Nutzung von Sekundärvariablen ermöglicht wird. In Abhängigkeit der spezifischen Lagerstättenmerkmale kommen also einfache Simulations- (GSGS) oder Ko-Simulationsverfahren (CoGSGS) zum Einsatz.

Beide Verfahren (GSGS/CoGSGS) wurden als Plug-in für die frei verfügbare und quelloffene Software SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software) unter Nutzung einer Parallelisierungsstrategie implementiert, welche mit Hilfe von OpenMP umgesetzt wurde.

5. Validierung der Ergebnisse

Abgeschlossen wird der Simulationsprozess durch eine Validierung der Simulationsergebnisse, d.h. zunächst wird überprüft, ob die normalverteilten Simulationsergebnisse das Variogramm und das normalverteilte Histogramm der Daten reproduzieren. Anschließend erfolgt die Rücktransformation der Simulationsergebnisse in die originale Datenverteilung. Und zum Schluss erfolgt die Überprüfung

der Reproduktion der als statistisch repräsentativ bestimmten originalen Datenverteilung (Bilder 5 und 6).

Modellierung der Lagerstätteengeometrie

Die Generierung eines komplexen 3D-Strukturmodells kann durch die Zerlegung des Problems in einfachere 2D-Teilprobleme deutlich vereinfacht werden. Das bedeutet, es werden nur Flächen bzw. Mächtigkeiten modelliert, aus denen dann die 3D-Strukturmodelle zusammengesetzt werden. Die Problematik dieses Vorgehens liegt jedoch darin, dass die Plausibilität der logischen Beziehungen zwischen den, unabhängig voneinander, modellierten geologischen Flächen bzw. Schichten bei der Zusammensetzung des 3D-Strukturmodells sichergestellt werden muss und gegebenenfalls Widersprüche aufgelöst werden müssen.

Für die Beschreibung der Geometrie einer geologischen Schicht sind maximal 2 der 3 geometrischen Merkmale zu modellieren. Das 3. Merkmal kann dann jeweils rechnerisch abgeleitet werden

- Hangende - Liegende = Schichtmächtigkeit
- Hangende - Schichtmächtigkeit = Liegende
- Liegende + Schichtmächtigkeit = Hangende

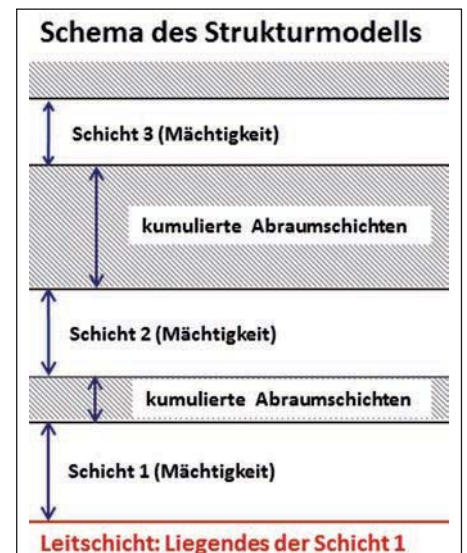
Mit Hinblick auf die Vermeidung von Widersprüchen in den logischen Beziehungen der Schichtgrenzen, sind die beiden zuletzt genannten Möglichkeiten jedoch zu bevorzugen, da hier Inkonsistenzen zwischen den räumlichen Verläufen des Hangenden und Liegenden ausgeschlossen werden können. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Mächtigkeit einer Schicht niemals negativ ist und somit auch keine Über-

schnedungen von Hangenden und Liegenden auftreten können.

Betrachtet man nun jedoch ein 3D-Strukturmodell mit mehreren geologischen Schichten, so kann dieser Ansatz immer noch dazu führen, dass Inkonsistenzen zwischen den räumlichen Verläufen verschiedener geologischer Schichten auftreten, vor allem dann, wenn

diese räumlich eng beieinander liegen. Mit Hinblick auf die Generierung eines widerspruchsfreien 3D-Strukturmodells ist daher, bei enger Nachbarschaft der interessierenden Schichten, ein Ansatz zu wählen, bei dem der räumliche Verlauf möglichst weniger Leitschichten modelliert wird. Dazu werden dann die Mächtigkeiten aller relevanten Schichten, sowie die kumulierten Mächtigkeiten aller Zwischenschichten modelliert. Ausgehend von den als geeignet ausgewählten Leitschichten, werden dann alle anderen Grenzflächen rechnerisch durch Addition bzw. Subtraktion von Mächtigkeiten ermittelt.

Bild 7 zeigt schematisch, wie auf diese Weise ein Modell aufgebaut werden kann. Die Schwierigkeit bei dieser Vorgehensweise liegt nun in der Bestimmung einer geeigneten Anzahl von Leitflächen. Wenige Leitflächen führen aufgrund der Varianzfortpflanzung dazu, dass mit zu-



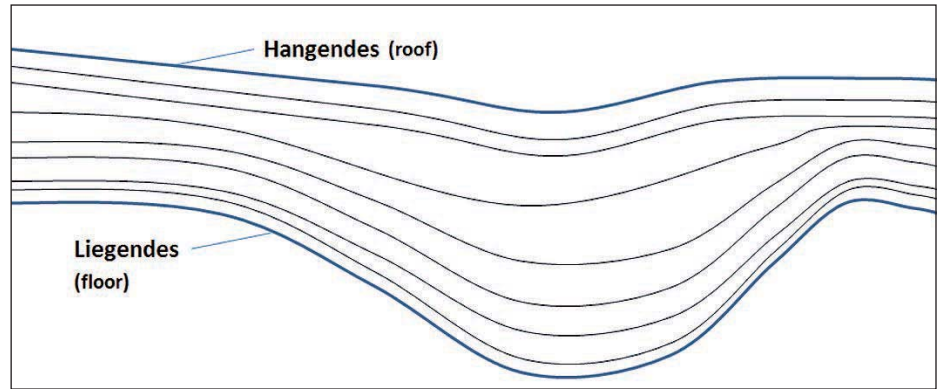
7 Konstruktion eines 3D-Strukturmodells

nehmendem Abstand von der Leitfläche sind die Lagefehler der Schichten erhöhen. Viele Leitflächen erhöhen dagegen das Risiko der Überschneidungen von benachbarten Schichten, was dann wiederum eine nachträgliche Bearbeitung der Ergebnisse notwendig macht. Es gilt also, in Abhängigkeit der verfolgten Ziele, einen geeigneten Kompromiss zu finden.

Des Weiteren müssen unter Umständen auch auftretende Besonderheiten der untersuchten Lagerstätte berücksichtigt werden. So können beispielsweise einzelne geologische Schichten unter anderem dadurch gekennzeichnet sein, dass sie sich lokal in 2 oder mehr Teilschichten aufspalten, welche durch sogenannte Zwischenmittel getrennt sein können. Für diese Fälle sollte jede Teilschicht als eine unabhängige geologische Schicht betrachtet und modelliert werden. Das bedeutet, dass die ungespaltenen Bereiche solcher Schichten in die Anzahl auftretender Teilschichten aufgeteilt und durch Nullmächtigkeiten der Zwischenmittel beschrieben werden können. Ein weiteres zu berücksichtigendes Phänomen ist das Auftreten von Störungen, welche die natürliche Lagerung der geologischen Schichten beeinflussen haben. So kann es beispielsweise Bereiche geben, in denen einzelne geologische Schichten, z.B. aufgrund von Erosion, nicht mehr in der natürlichen Schichtfolge vorhanden sind. Hier ist es zumeist sinnvoll, zunächst den ungestörten Zustand der Lagerstätte, sowie unabhängig davon den Verlauf der Störfläche zu modellieren. Anschließend wird dann der ungestörte Verlauf der Lagerstätte mit der modellierten Fläche der Störung verschnitten, was im Ergebnis zu Strukturmodellen führt, welche die auftretenden Störungen berücksichtigen. Die Abwesenheit einzelner Schichten bzw. Teilschichten wird grundsätzlich durch Nullmächtigkeiten modelliert. Dies führt dazu, dass im Geometriemodell der Lagerstätte an allen Punkten des Simulationsgitters immer alle möglichen geologischen Schichten, bzw. Teilschichten vorliegen. Die Verläufe der Grenzflächen (Hangendes und Liegendes) nicht vorhandener geologischer Schichten entsprechen dann dem Verlauf einer benachbarten Schicht.

Modellierung der Qualitätsparameter

Für die Generierung des 3D-Kohlequalitätsmodells wird das komplexe 3D-Problem ebenfalls in leichter zu modellierende 2D-Teilprobleme zerlegt. Grundsätzlich ist die Modellierung von Qualitätsparametern nur für die anstehenden Kohleflöze notwendig. Diese werden hierfür in eine definierte Anzahl von Teilschichten, so genannte Peels, zerlegt. Die Aufteilung



8 Aufteilung eines Kohleflözes in Teilschichten (Peels)

erfolgt dabei in Anlehnung an das Beprobungsschema der Bohrkerns, welches i.d.R. eine intensivere Beprobung in den Randbereichen der Kohleflöze vorsieht, um der durch die Genese bedingten erhöhten Verunreinigung in diesen Bereichen Rechnung zu tragen. Bild 8 zeigt schematisch die Aufteilung eines Kohleflözes. Durch diesen Ansatz wird die Struktur natürlich auftretender Variabilitäten der Rohstoffqualitätsparameter bestmöglich reproduziert, da dieser Ansatz die Tatsache berücksichtigt, dass die vertikale Variabilität der Rohstoffparameter innerhalb eines Kohleflözes deutlich höher ist als die horizontale Variabilität. Die Charakteristik eines Qualitätsparameters ist damit innerhalb der einzelnen Teilschichten/Peels vergleichbar. Die Simulation der Qualitätsparameter innerhalb der definierten Teilschichten kann dabei unabhängig von benachbarten Teilschichten oder auch in Abhängigkeit dieser durchgeführt werden. Im 2. Fall sind die Qualitätsparameter der benachbarten Teilschichten als Sekundärvariablen zu nutzen. Darüber hinaus sollten natürlich auch signifikante Kreuzkorrelationen zwischen den verschiedenen Qualitätsparametern bei der Simulation der Teilschichten berücksichtigt werden. Ein Beispiel aus dem Braunkohlenbergbau ist z.B. der starke Zusammenhang zwischen Aschegehalt und Heizwert.

Dieses Vorgehen setzt jedoch grundsätzlich voraus, dass die Qualitätswerte der analysierten Bohrkerns während der Datenvorverarbeitung auf die definierten Teilschichten umgerechnet werden, d.h., den definierten Peels werden an den Stützstellen gewichtete Mittelwerte zugewiesen, welche aus den betreffenden analysierten Bohrkernintervallen berechnet werden.

Erstellung des 3D-Gesamtmodells

Nach der Modellierung der Lagerstättengeometrie und der Qualitätsmerkmale der Rohstoffschichten, liegt jeweils eine Anzahl von n Strukturmodellen und n Qualitätsmodellen je Qualitätsmerkmal

vor. Die Kombination aller n Realisierungen der Lagerstättengeometrie mit jeweils allen n Realisierungen der einzelnen Qualitätsmerkmale würde zu n^2 kombinierten Modellen je Qualitätsmerkmal führen. Dieser Datenumfang ist in der Praxis jedoch nur schwer handhabbar, so dass die Anzahl der möglichen Kombinationen zwischen den simulierten Geometrien und Qualitäten beschränkt werden sollte. Hier gilt es, wieder in Abhängigkeit mit den verfolgten Zielen einen geeigneten Kompromiss für die Anzahl der resultierenden Gesamtmodelle zu finden.

Datenquellen

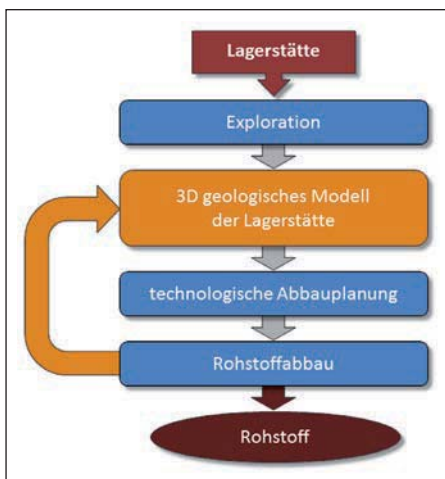
Die simulierten Ergebnisse der einzelnen Lagerstättenmerkmale hängen signifikant von den verfügbaren Daten, also dem Erkundungsstand im Untersuchungsgebiet ab. Ein relativ dichtes Netz an Erkundungsdaten für die geometrie- und qualitätsbeschreibenden Parameter ist eine Voraussetzung für die sinnvolle Anwendung geostatistischer Verfahren. Daher sollten möglichst viele Datenquellen genutzt werden. Neben der Anwendung moderner Verfahren, wird es daher in der Zukunft vor allem auch um eine bessere Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Informationsquellen gehen. Das bedeutet zu einer optimalen Nutzung aller Explorationsdaten, sowie einen Rückfluss von Informationen aus dem Produktionsprozess (Bild 9).

Die wichtigste Datenbasis der Modellierung sind die Daten aus der Bohrerkundung. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des verwendeten Bohrverfahrens (z.B. Spülkernbohrung, Trockenkernbohrung) und in der Anzahl der bestimmten Parameter (Erkundungsbohrung, Qualitätsbohrung). Die sogenannten Erkundungsbohrungen beinhalten nur Informationen über die geologische Schichtfolge und deren Geometrie. Qualitätsbohrungen liefern darüber hinaus auch Informationen über verschiedene Qualitätsparameter des Rohstoffes im Untersuchungsgebiet.

Für den Fall, dass eine Bohrung nicht oder nicht durchgehend gekernt wurde

oder ein hoher Kernverlust vorliegt, können Messkurven aus geophysikalischen Bohrlochmessungen als Kovariablen für die Simulation genutzt werden, um Unsicherheiten in der Vorhersage durch fehlende Bohrdaten zu reduzieren.

Häufig sind in Untersuchungsgebieten auch Daten von Verfahren der Oberflächengeophysik verfügbar. Diese liefern profil- oder flächendeckende, z.T. auch dreidimensionale Aussagen zum petrographischen Aufbau des Untergrundes, sowie zur Lage und Verbreitung geologischer Strukturelemente. Die geophysikalischen Verfahren liefern dabei jedoch nur indirekte Aussagen, da sie auf den Veränderungen physikalischer Parameter (Dichte, elektrische Leitfähigkeit u.a.) beruhen. Ein häufig angewandtes Verfahren ist die Gravimetrie. Dieses Verfahren ermittelt die Dichteunterschiede zwischen einzelnen Sedimenten, wodurch sich Schichtkomplexe abbilden lassen, welche eine gegenüber dem umgebenden Gebirge höhere (z.B. Geschiebemergel) oder geringere (z.B. Kohle) Dichte aufweisen. Anwendung findet das Verfahren z.B. bei der Erkundung von Erosionsgrenzen, Sattel- und Muldenstrukturen oder Mächtigkeitsschwankungen im Flözbereich. Gravimetrische Messungen sind daher ebenfalls gut geeignet, um Kovariablen für die Simulation der Lagerstätteengeometrie bereitzustellen.



9 Informationsfluss in einem Lagerstättenmanagementsystem

Während der laufenden Abbautätigkeit werden zu Kontrollzwecken in regelmäßigen Abständen die räumlichen Verläufe der kohleführenden Schichten am Stoß eingemessen (Stoßkartierung). Die Einbeziehung dieser Messungen in die Modellierung erhöht lokal die Dichte der zur Verfügung stehenden Geometriedaten, und dies kann zu signifikanten Verbesserungen des Strukturmodells im Umfeld der neu gewonnenen Daten führen. Diese Daten können, neben den Daten der Bohrerkundung, ebenfalls als Primärdaten ge-

nutzt werden und ermöglichen eine stetige Aktualisierung des Strukturmodells.

Aktuelle Forschungen beschäftigen sich darüber hinaus mit der in Echtzeit durchgeführten qualitativen Analyse von Rohstoffen am Gewinnungsgerät. Die Ergebnisse solcher Analysen sind jedoch gegenwärtig hinsichtlich ihrer Güte nicht mit einer Labor-Analyse vergleichbar. Eine Verwendung dieser Daten als Kovariable (Sekundärinformation) bei der Modellierung der Kohlequalitäten kann jedoch zukünftig möglicherweise dabei helfen die Genauigkeit der Qualitätsmodelle zu erhöhen.

Der Mehrwert der unsicherheitsbasierten Lagerstättenmodellierung

Die prinzipielle Aufgabe der Lagerstättenmodellierung ist die Voraussage des Verlaufs interessierender Parameter aus den zur Verfügung stehenden Daten der Stützstellen der Lagerstätte. Traditionelle Modellierungsverfahren, wie z.B. das Kriging, nutzen Interpolatoren zur Erzeugung von Lagerstättenmodellen. Im Rahmen bergbaulicher Entscheidungsfindungen können diese Modelle für verschiedene Aufgaben, wie z.B. für die Bestimmung globaler Reserven, durchaus ausreichend sein. Jedoch gibt es auch zahlreiche Aufgaben, bei denen die Unsicherheit der Vorhersage, sowie die lokalen Schwankungen eines Merkmals von Interesse sind. Dies betrifft im Besonderen Aufgaben, die mit kapital- und kostenintensiven Entscheidungen einhergehen. Eine Bewertung der Risiken solcher Entscheidungen lässt sich mit Hilfe des Ansatzes der Transferfunktion durchführen.

Das Konzept der Transferfunktionen [13] beruht auf der Anwendung einer Funktion auf alle generierten Lagerstättenrealisationen. Diese Funktion beschreibt dabei einen spezifischen Projektindikator, wie z.B. einen spezifischen Abbauplan. Dadurch erhält man eine bestimmte Anzahl von Werten für den untersuchten Projektindikator. Diese diskreten Werte approximieren dann eine Verteilungsfunktion, durch welche sich Projektrisiken beschreiben lassen.

Wenn die Unsicherheit in der Vorhersage selbst von Interesse ist, dann können die lokalen Unterschiede zwischen den einzelnen Lagerstättenrealisationen als Maß für die Unsicherheit in der Vorhersage interpretiert werden. Beschrieben wird diese Unsicherheit durch die bedingte Varianz, bzw. bedingte Standardabweichung, welche sich leicht aus den simulierten Realisationen ermitteln lassen.

Traditionelle Ansätze der Abbauplanung basieren auf einem interpolierten Modell der Lagerstätte und können daher die Beschreibungsunsicherheiten der

räumlichen Verteilung der Lagerstättenmerkmale nicht berücksichtigen. Dieses Defizit kann jedoch durch den Einsatz von Methoden der mathematischen Optimierung behoben werden. Ansätze zur Abbauplanungsoptimierung unter Berücksichtigung der Vorhersageunsicherheiten werden z.B. in [14] vorgestellt.

Schlussbemerkung

Die präsentierten Verfahren und Ergebnisse sind im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Integriertes Lagerstättenmanagement“ aus dem Wachstumskern „Innovative Braunkohlenintegration in Mitteldeutschland – ibi“ entstanden, welches durch das BMBF gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] A. G. Journel und C. J. Huijbregts. Mining geostatistics: Academic Press, London, 1978
- [2] A. Hoberg. Geostatistische Simulation der Hauptflöze im Baufeld Schwerzau. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, 2009.
- [3] S. Schmidt. Fallstudie zur geostatistischen Simulation von Kohlequalitätsparametern in einem ausgewählten Lagerstättenbereich im Tagebau Profen, Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, 2004.
- [4] A. Wogawa. Geostatistische Simulation ausgewählter Kohlequalitätsparameter im Baufeld Schwerzau. Studienarbeit, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, Freiberg, 2010.
- [5] J. Benndorf. Nutzung der geostatistischen Simulation zur Berücksichtigung der geologischen Unsicherheit in der Bewertung von Lagerstätten am Beispiel des Braunkohlenbergbaus. ISBN 3-938924-12-8, TU Clausthal, 2009.
- [6] R. Dimitrakopoulos und X. Luo. Generalized Sequential Gaussian Simulation on Group Size v and Screen-Effect Approximations for Large Field Simulations, *Mathematical Geology*, 36: Seite 567 bis 591, 2004.
- [7] P. Goovaerts. Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press: New York, 1997.
- [8] R. M. Isaaks, E. H. & Srivastava. An introduction to applied geostatistics, Oxford University Press, New York, 1989.
- [9] C. V. Deutsch. Geostatistical Reservoir Modeling. Oxford University Press, Inc., New York, 2002.
- [10] H. Akin, und H. Siemes. Praktische Geostatistik – Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften. Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [11] O. Leuangthong und C. Deutsch. Transformation of Residuals to Avoid Artifacts in Geostatistical Modelling With a Trend. *Mathematical Geology*, Vol. 36 No.3: Seite 287 bis 305, 2004.
- [12] C. Deutsch und A. Journel. GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide. Oxford University Press, New York, 1992.
- [13] R. Dimitrakopoulos. Conditional simulation of algorithms for Modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, v.12, Seite 173 bis 179, 1998.
- [14] C. Minnecker. Ansatz zur optimierten Abbauplanung für die selektive Gewinnung in Braunkohletagebauen, 13. Geokinematischer Tag, 2012, Tagungsband, Seite 321 bis 332

Alle Grafiken: Verfasser