

Geostatistische Schätzung der Bauwürdigkeit von Flözen im Südfeld der Erkelener Anthrazit-Lagerstätte (BR Deutschland)

Von Heinz BURGER, Theodoros PETROPOULOS, Wolfdietrich SKALA
und Volker WEBER

Mit 8 Abbildungen und 1 Tabelle im Text

Eingelangt am 19. Dezember 1989

Zusammenfassung: Im Rahmen eines Projektes zur Erkundung des Südfeldes der Erkelener Anthrazit-Lagerstätte (BR Deutschland) wurden geostatistische Untersuchungen und Auswertungen von Flözmächtigkeiten sowie Rohstoffeigenschaften zur Unterstützung der Bergbau-Planung durchgeführt. Für diese Arbeiten standen zunächst Analysewerte aus maximal 16 Bohrungen des Südfeldes zur Verfügung. Im Hinblick auf möglichst zuverlässige Vorhersagen wurden jedoch ergänzend zu den Bohrlochaufschlüssen Rohstoffwerte und Flözmächtigkeiten aus bereits abgebauten Lagerstättenbereichen, die außerhalb des Explorationsgebietes lagen, hinzugenommen. Ergänzend hierzu wurde der Versuch einer Bauwürdigkeitsabschätzung durchgeführt, die in Form eines Delphi-Verfahrens mit linearem Ansatz erfolgte.

Einleitung

Das ständig wachsende Angebot neuer, schnellerer und genauerer Meßmethoden hat dazu geführt, daß im Rahmen von Projekten geowissenschaftlicher Erkundung immer größere Mengen von Daten produziert und digital gespeichert werden. Dieser Vorgang der Datengewinnung geschieht in der Praxis häufig ohne genaue Kenntnis der tatsächlichen Effektivität der Meßgrößen für die Zielsetzung, ohne begründbare Vorgaben notwendiger Meßabstände usw. Dies hat unter anderem dazu geführt, daß nur selten die jeweiligen konkreten Planungs- und Entscheidungsstufen hinsichtlich ihrer tatsächlichen Anforderungen an die Zielgrößen, insbesondere aber auch nach Kriterien der wirtschaftlichen Vertretbarkeit analysiert werden. Dieser Stand aktueller Möglichkeiten hat in zahlreichen geowissenschaftlichen Fragenstellungen, so auch im Steinkohlebergbau, nicht, wie eigentlich zu erwarten wäre, dazu geführt, daß Meßgrößen im Hinblick auf bestimmte Zielsetzungen leichter und schneller interpretiert werden können. Im Gegenteil wird es zusehends schwieriger, geowissenschaftliche Informationen unterschiedlicher Herkunft integriert für Planungsziele zu nutzen.

In solchen Fällen, in denen vor allem konkrete Planungsziele verfolgt werden, erweist es sich daher als sinnvoller, vor einer geostatistischen Interpolation die Interaktionen der Einflußgrößen im Hinblick auf das Planungsziel in Art einer Systemanalyse eindeutig zu definieren und, wenn nicht anders möglich, auch subjektiv zu bewerten. Dieser Einsatz von Bewertungssystemen in Form einfacher Expertensysteme wird vor allem bereits für Fragen der quantitativen Risikoeinschätzung (quantitative risk-assessment), etwa zur Beurteilung des Gefährdungspotentials durch Kernkraftwerke oder zur Einschätzung bestimmter Krankheitsrisiken mit Erfolg realisiert. Auch die von CONSTANTINIDES et al. (1986) mittels eines Delphi-Verfahrens unter Nutzung von linearen Ansätzen durchgeführte Favorability-Studie für den Raum von Molai (Peloponnes, Griechenland) geht von ähnlichen Ansätzen aus.

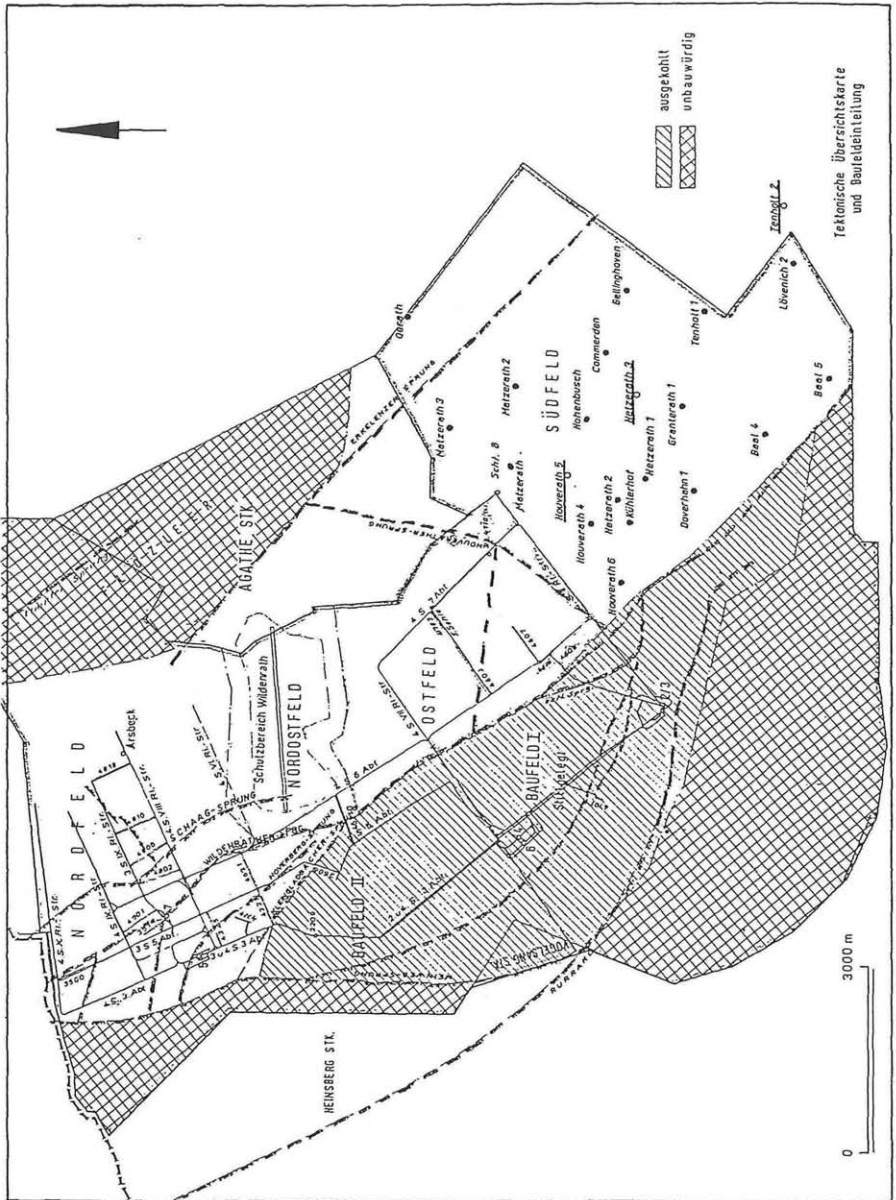


Abb. 1: Tektonische Übersichtskarte und Baufeldteilung der Erkelzen Anthrazit-Lagerstätte.

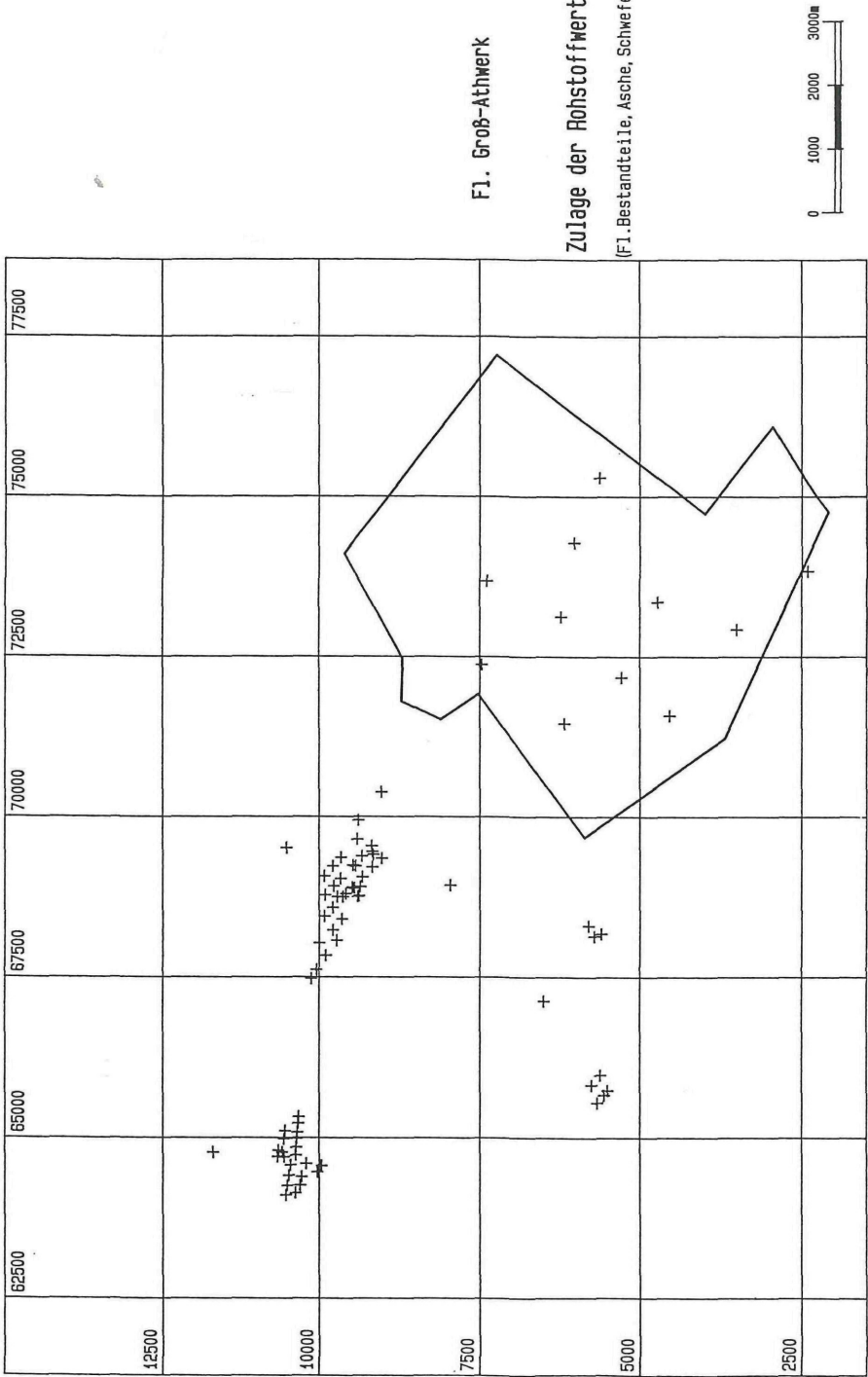


Abb. 2: Meßstellen bzw. Bohransatzstellen für ein ausgewähltes Flöz (Groß Athwerk).

Untersuchungen im Südteil der Erkelener Anthrazit-Lagerstätte

Zur Erkundung des Südteils der Erkelener Anthrazit-Lagerstätte, eines etwa 35 km² großen Feldes, wurde ein umfangreiches Tiefbohrprogramm mit dem Ziele durchgeführt, die bisher gebauten Kohlscheider Schichten nach Süden hin zu erkunden (Abb. 1). Hierbei sollten Kenntnisse über die Bauwürdigkeit aus den Mächtigkeiten der Flöze sowie den verschiedenen Rohstoffeigenschaften im Hinblick auf die Planung eines zukünftigen Bergbaues erzielt werden.

Folgendes Datenmaterial stand zur Verfügung (Abb. 2):

1. Datenmaterial aus dem Südfeld der Erkelener Lagerstätte (Zielgebiet): Umgrenzung des Südfeldes, Meß- und Analysenwerte aus maximal 13 (später 16) Bohrungen (Kohlen- bzw. Bergmittelmächtigkeiten, Flüchtige Bestandteile, Schwefel, Asche), bezogen auf fünf Flözbereiche. Die durchschnittlichen Bohrungsabstände im Zielgebiet liegen bei rund 1500 m. Ein besonderes Problem für die Bergbauplanung stellt die Tatsache dar, daß in den genannten Flözbereichen Flözaufspaltungen bzw. -scharungen auftreten.

2. Umfangreiches Datenmaterial wurde zu Vergleichszwecken aus den entsprechenden Flözbereichen der nordwestlich bis westlich angrenzenden, bereits ausgekohnten bzw. im Abbau stehenden Baufelder zur Verfügung gestellt. Es handelt sich dabei um isolierte, vergleichsweise dicht beprobte Bereiche (Probenabstände rund 100 bis 200 m), die zum Teil durch unbeprobte Lagerstättenteile vom Zielgebiet getrennt sind („Clusterbildungen“ der Daten).

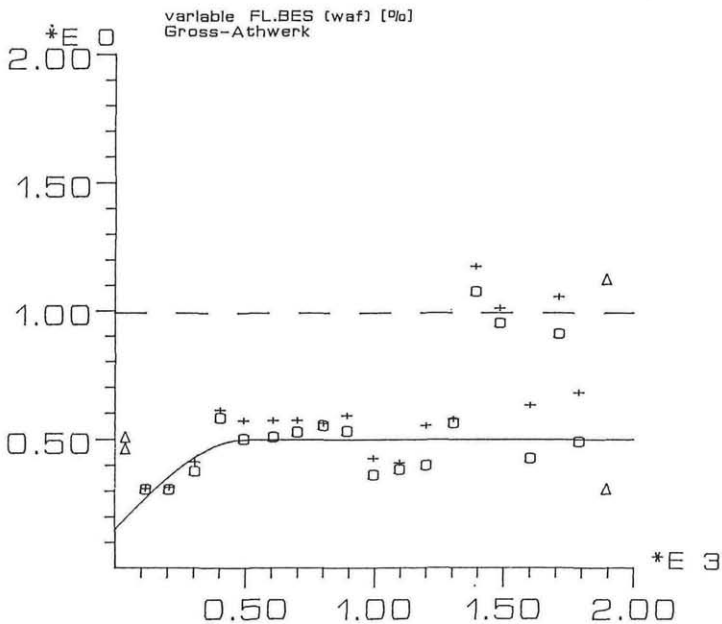


Abb. 3: Mittleres Variogramm der flüchtigen Bestandteile für das Flöz Groß Athwerk (errechnet aus den Meßdaten des abgebauten Lagerstättenbereiches).

Geostatistische Grundlagen

Geostatistische Strukturuntersuchungen wurden in sämtlichen Flözbereichen – getrennt nach dem Zielgebiet (Südfeld) sowie den westlich und nordwestlich anschließenden in Abbau stehenden Baufeldern – an sämtlichen Variablen durchgeführt. Diese Untersuchungen sollten klären, inwieweit in den dicht beprobten Bereichen der Testgebiete geostatistische Strukturen nachweisbar sind, die sich gegebenenfalls auf das nur weitmaschig erprobte Südfeld übertragen und dort zur Schätzung der Bauwürdigkeit einsetzen lassen. Die Reichweite der mittleren Variogramme (Abb. 3) beträgt bei sphärischen Modellen etwa 500–1500 m. Die in den Testgebieten ermittelten Variogramme konnten auf das Südfeld übertragen werden, ohne daß Widersprüche in den Datenstrukturen aufgetreten wären.

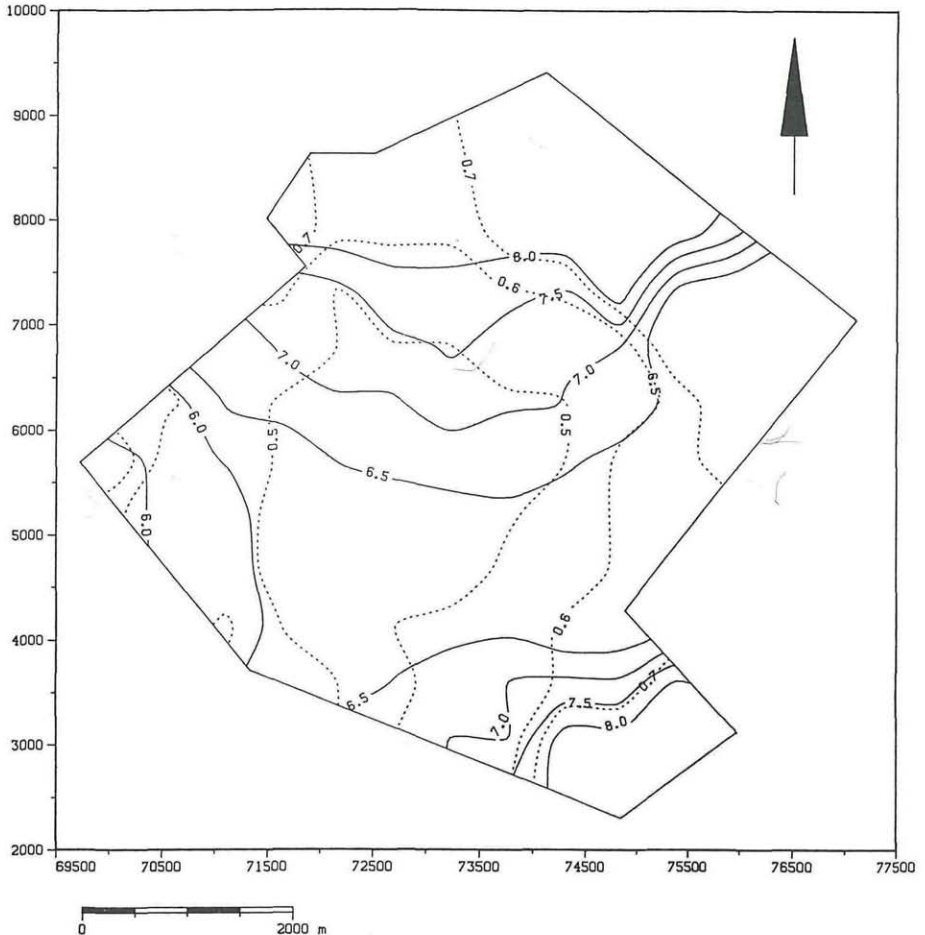
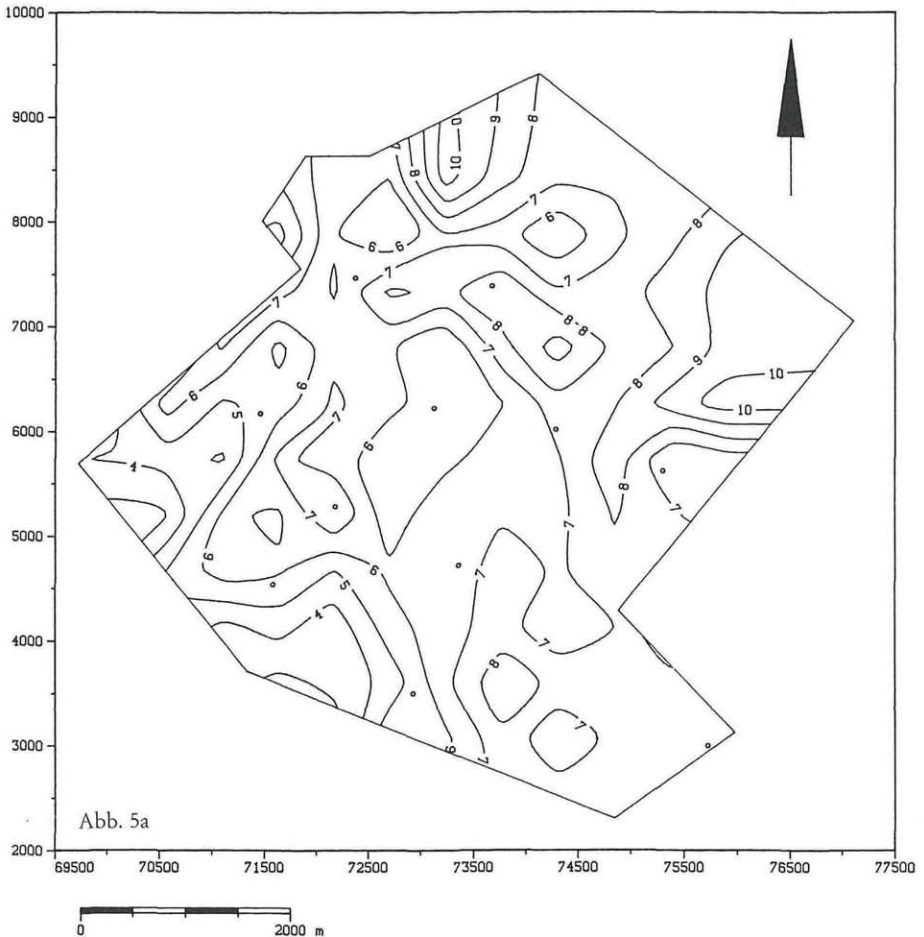


Abb. 4: Darstellung der Kriging-Ergebnisse im Zielgebiet der Erkelenzer Anthrazit-Lagerstätte für das Flöz Groß Athwerk. Flüchtige Bestandteile (Schätzwerte und Schätzstandardabweichungen).

Um erste Hinweise auf die Verteilung der Einflußgrößen auf die Bezugsflächen innerhalb des Zielgebietes bzw. deren Aussagegenauigkeit zu erhalten, wurden zunächst einfache Kriging-Untersuchungen durchgeführt. Ausgehend von den bereits erwähnten mittleren Bohrungsabständen von ca. 1500 m wurde ein Block-Kriging auf Planungseinheiten 500×500 m durchgeführt. Derartige Bezugsflächen erscheinen sinnvoll, da dadurch die errechneten Schätzfehler auf Flächeneinheiten zu beziehen sind, die etwa in der Größenordnung der Planungseinheiten (Bauhöhen) liegen. Dadurch waren bei einem Verhältnis von 1:3 der Seitenlängen der Planungseinheiten zu den Bohrungsabständen bei den gegebenen Variogrammreichweiten praktisch vertretbare Schätzfehler zu erreichen (Abb. 4).



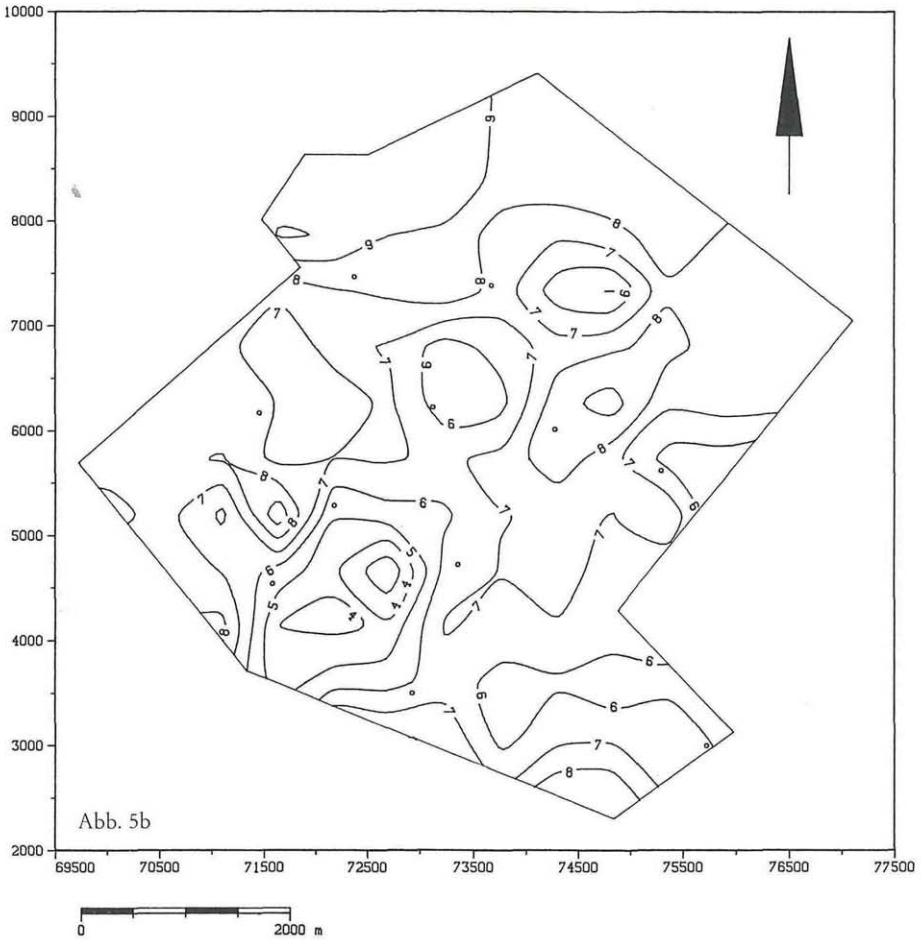


Abb. 5a + 5b: Zwei ausgewählte Simulationsläufe für das Flöz Rauschenwerk (flüchtige Bestandteile).

Konditionierte Simulation der Flözeinheiten

Mit zunehmender Ausdünnung der Stützstellen nimmt die Zuverlässigkeit der Schätzung im Interpolationsraum ab, so daß mittels einfacher Kriging-Methoden, ausgehend von den im Steinkohlebergbau üblichen Bohrungsabständen, nur pauschale Planungen des Abbaufeldes zu erzielen sind. Dies trifft insbesondere zu, wenn für die Schätzung punktuelle Stützung bzw. relativ kleine Planungseinheiten angenommen werden. Aus diesen Gründen werden für die vorliegenden Untersuchungen Raster 500×500 m gewählt.

Außerdem gibt es eine Reihe von Aspekten der bergmännischen Planung für das Abbauvorfeld bzw. für nicht erschlossene Teufen, die im Hinblick auf deren Bewertung sowie die Abbauplanung nur in geringem Maße an lokalen Erwartungswerten interessiert sind. In diesen Planungsphasen kann es vielmehr von Bedeutung sein, mit möglichst großer Zuverlässigkeit folgende Angaben zu machen:

Die Entscheidung, einen Abbaubereich in die Förderung einzubeziehen, kann getroffen werden, wenn dies wirtschaftlich rentabel und vom Standpunkt der Bergsicherheit aus geeignet erscheint. Um eine entsprechende Entscheidung vorbereiten zu können, kommt es eher darauf an, Informationen über die Planungseinheit insgesamt oder über größere Teilareale derselben zu erlangen, als lokal begrenzt gültige Schätzwerte zu ermitteln. In diesem Zusammenhang spielen Grenzgehaltsprobleme (Cut-off-Probleme) oft eine wesentliche Rolle. Der Planungsraum kann etwa dann als bauwürdig erscheinen, wenn ein bestimmter Anteil an seiner Fläche einen vorgegebenen Grenzgehalt an Schwefel, Asche usw. nicht überschreitet. Für die Abbauplanung kommt es zudem darauf an, möglichst zuverlässig über die Größenordnung der lokalen Variabilität der Meßgröße Bescheid zu wissen, um mit der Förderung und der Aufbereitung entsprechend reagieren zu können. Auf Grund von Erfahrungen aus anderen Untersuchungen mit vergleichbaren Problemstellungen (BURGER 1986, BURGER et al. 1986, KANNENBERG et al. 1987) wurde zur Lösung entsprechender Probleme im Südfeld der Erkelenzer Anthrazit-Lagerstätte die Konditionierte Simulation eingesetzt.

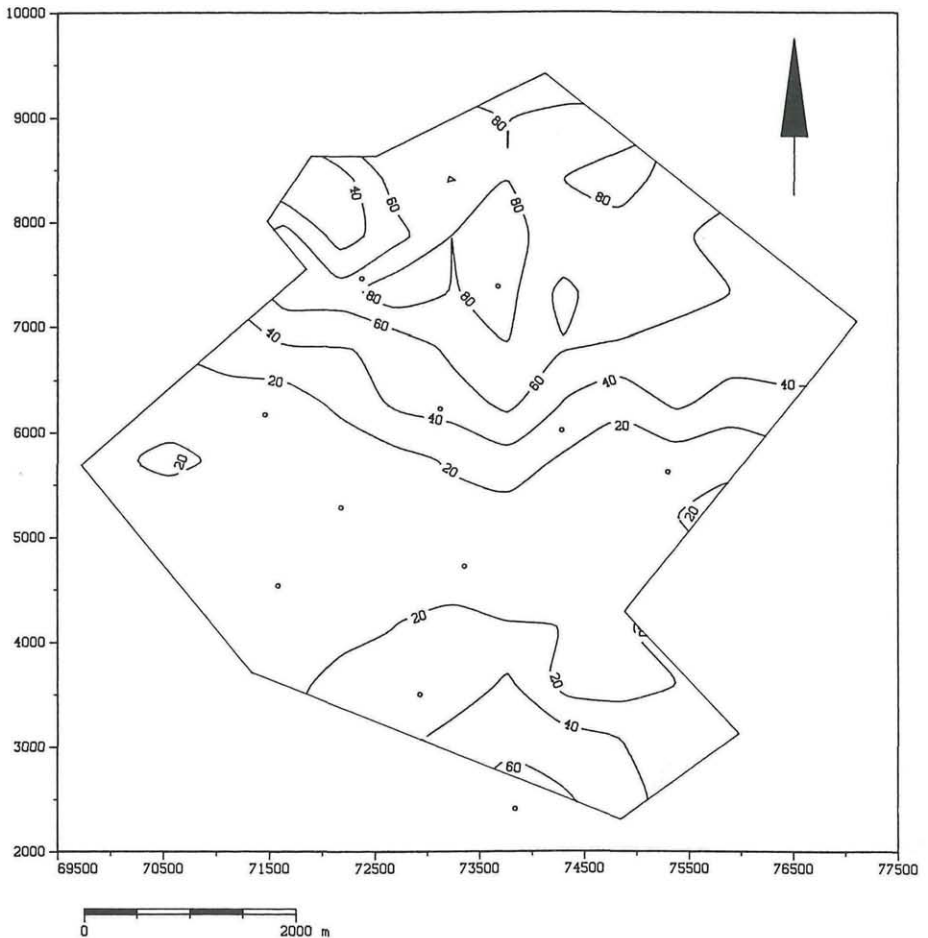


Abb. 6: Darstellung der über cut-off (7%) flüchtigen Bestandteile. Wahrscheinlichkeit durch Überlagerung von 10 Simulationsläufen.

Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe wurden zunächst in Isolinenplänen zu Vergleichszwecken dargestellt (Abb. 5). Von größerer praktischer Bedeutung dagegen ist die bereits von KANNENBERG et al. 1987 eingeführte Überlagerung der jeweils zehn Einzelläufe. In dieser geben die Isolinen die %-Wahrscheinlichkeit an, mit denen die jeweiligen Grenzwerte der Variablen überschritten werden. Die 80%-Linie der flüchtigen Bestandteile sagt zum Beispiel aus, daß dort acht von zehn Simulationsläufen den vorgegebenen Grenzwert von 7% überschritten haben (Abb. 6). Auf diese Weise kann eine zusätzliche Planungsunterlage erstellt werden.

Klassifikation des Planungsraumes

Zur Beurteilung des Planungsraumes können zunächst, jeweils für die einzelnen Flöze, die Ergebnisse hinsichtlich der einzelnen Zielgrößen getrennt herangezogen werden. Für eine umfassende Bewertung des Planungsraumes müssen selbstverständlich neben den Rohstoffwerten und den Flöz- und Bergmittelmächtigkeiten auch Kenntnisse über die Verteilung und Mächtigkeiten der Nebengesteine, der Tektonik sowie spezieller bergbaulicher Gegebenheiten herangezogen werden. Für die Risikoanalyse bzw. auch für die Bewertung von Erzhöflichkeiten (favorabilities) wurden daher, ausgehend von entscheidungstheoretischen Überlegungen, Verfahren entwickelt, die durch Integration von Planungsräumen ermöglicht werden. Ein einfaches, lineares Verfahren wurde z. B. durch BURGER & SKALA 1987 (Risikobewertung von Grundwassergefährdungen) bzw. CONSTANTINIDES et al. 1986 (Klassifizierung von Erzhöflichkeiten) entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Dieses Modell ist zunächst kein Entscheidungsbaummodell, sondern ein flaches Delphi-Verfahren (BAXTER et al. 1978). Es bezieht sich auf einen Satz von n Kriterien c_i für die Exploration, die mit Gewichten w_i zu versehen sind, sowie einen Favorability-Index, definiert durch:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i \times p(c_i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n p(c_i) \geq 1; \quad 0 < c_i < 1$$

Die Gewichte w_i sowie die subjektiven Bewertungseinheiten $p(c_i)$ wurden durch Experten der BERGBAUFORSCHUNG in der für Delphi-Verfahren üblichen Vorgangsweise bestimmt (Tabelle 1). Das hier eingesetzte Verfahren umfaßte im einzelnen folgende Schritte:

Tabelle 1: Bewertungstabelle der Bauwürdigkeit von Flözen der Erkelenzer Anthrazit-Lagerstätte.

weighting factor	criteria	assigning values to the criteria				
		0.0	0.25	0.50	0.75	1.0
0,35	seam thickness (m)	< 0.65	0.65-0.70	0.76-0.90	0.91- 01.0	1.01-1.50
0.25	volatile (%)	> 10.0	10.0-8.6	8.5-8.0	7.9 -7.1	< 7.0
0.20	seam thickness/ interburden	< 3.0	3.1 -4.5	4.6 -8.0	8.1 -20.0	> 20.0
0.10	ash content (%)	> 4.0	3.9 -3.5	3.4 -3.0	2.9 - 2.5	< 2.5
0.10	sulfur (%)	> 1.0	0.99-0.86	0.85-0.73	0.72-0.57	0.56-0.44

Die Klassifikationen wurden auf der Basis der für die einzelnen Planungseinheiten (500×500 m) und die für die Rohstoffwerte und Mächtigkeiten errechneten Kriging-Schätzwerte bzw. Kriging-Schätzvarianzen durchgeführt. Für jede der nachfolgenden Monte-Carlo-Simulationen wird eine Dreiecksverteilung mit dem Kriging-Schätzwert als Maximum (most likely) und der doppelten Schätzstandardabweichung als Begrenzung angenommen. Diese Berechnungen wurden für jede der ca. 110 Planungseinheiten getrennt durchgeführt. Anschließend wurden die ermittelten Eckwerte der Dreiecksverteilung auf der Basis der in Tab. 1 zusammengestellten Bewertungstabelle in subjektive Bewertungseinheiten übergeführt.

Für jedes einzelne Flächenelement werden nun entsprechend den jeweiligen Dreiecksverteilungen zufällige Einschätzungen der Rohstoffwerte und der Mächtigkeiten gewählt und durch Lösung der Gleichung (1) Favorability-Werte (Bauwürdigkeitswerte) bestimmt. Dieser Vorgang der Monte-Carlo-Simulation wurde für die einzelnen Zellen jeweils $50 \times$ wiederholt, so daß für die einzelnen Flächenelemente jeweils 50 unterschiedliche Bauwürdigkeitswerte vorliegen. Als repräsentativer Bauwürdigkeitswert wird das

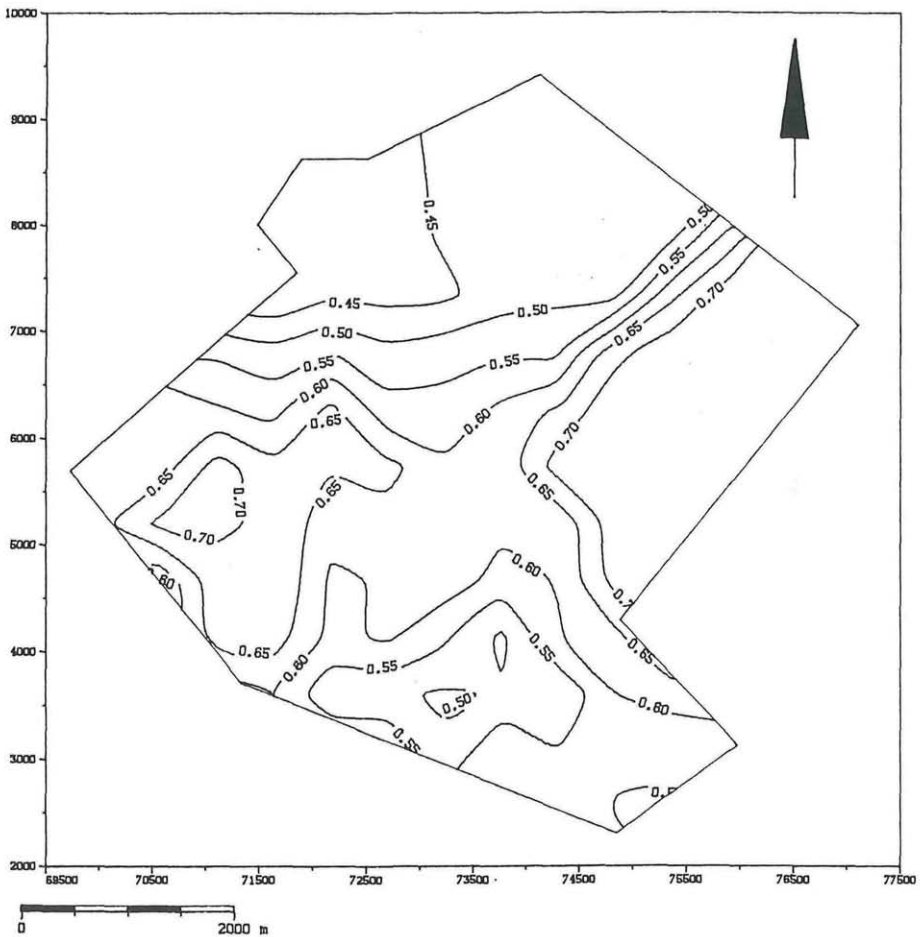


Abb. 7: Klassifikation der Bauwürdigkeit in Wahrscheinlichkeit, Flöz Groß Athwerk, Erkelener Anthrazit-Lagerstätte.

© Naturwissenschaftlicher Verein für Steiermark; download unter www.biologiezentrum.at
arithmetische Mittel der 50 Werte aufgefaßt und kartographisch als Isolinenplan dargestellt. Damit wurde dem Ansatz Rechnung getragen, die Wahrscheinlichkeit der Überschätzung der Bauwürdigkeit der Wahrscheinlichkeit deren Unterschätzung gleichzusetzen (Abb. 7).

Ausblick

Dieser erste Versuch einer Bauwürdigkeitsabschätzung, wenn auch über den einfachen Weg eines Delphi-Verfahrens mit linearem Ansatz, hat interessante, für den Bergbau wichtige Ergebnisse erbracht. Wesentliche Informationen, wie die tektonischen Gegebenheiten, die Nebengesteinsverhältnisse und spezielle bergbauliche Einflußgrößen, konnten jedoch zunächst nicht berücksichtigt werden. Um alle maßgeblichen qualitativen und quantitativen Einflußgrößen hinsichtlich ihrer Interaktionen und Auswirkungen auf die Bauwürdigkeit berücksichtigen zu können, sollen in Zukunft Entwicklungen einfacher Expertensysteme vorgenommen werden.

Literatur

- BAXTER, G. G., CARGILL, S. M., CHIDESTER, A. H., HART, P. E., KAUFMAN, G. M., URQUIDI-BARRAU, F. (1978): „Workshop on the Delphi Method“, Math. Geol. No 10, 581–588.
- BURGER, H. (1986): „Einsatzmöglichkeiten der Simulation räumlich verteilter Daten im frühen Explorationsstadium“, Erzmetall, 39, 445–450.
- BURGER, H., SCHÜRSMANN, B., SKALA, W., WEBER, V. (1986): „Application of Conditional Simulation in the Hardcoal Mining“, Proc. 19th APCOM, 173–182.
- BURGER, H., SKALA, W. (1988): „Application of Geostatistical Methods in Mapping Potential Hazards“, Geol. Jb. Beih.
- CONSTANTINIDES, D., FALTSETAS, H., PAPASTAVROU, SHULMAN, M. (1986): „The Classification and Ranking of Exploration Prospects: Kuroko Type Zn-Ag-Pb Deposits, Greece“, Proc. 19th APCOM, 687–694.
- KANNENBERG, M., SKALA, W., WEBER, V. (1987): „Some Conditional Simulations Compared with Later Results in the Hardcoal Mining“, Proc. 20th APCOM, 219–232.

Anschriften der Verfasser: Dr. H. BURGER, Dr. Th. PETROPOULOS, Prof. Dr. W. SKALA, Freie Universität Berlin, Institut für Geologie – Mathematische Geologie – Malteserstraße 74–100, D-1000 Berlin 46.
Dr. V. WEBER, Bergbauforschung GmbH, Franz-Fischer-Weg 61, D-4300 Essen.