



Ossietzkystr. 37a
D 01662 Meißen
Tel. : 03521-463530
g.stolle@keramikinstitut.de

Rohstoff-Qualitäts-Modellierung von Steine- und Erden-Lagerstätten – Beispiel Tonlagerstätten

Die Rohstoff-Qualitäts-Modellierung am Beispiel von Tonlagerstätten ist so vielschichtig wie die Art der Nutzung der Tone und die damit verbundenen Rohstoffkonditionen. Das Ziel derartiger Modellierungsarbeiten besteht in der Erarbeitung hochauflösender Qualitäts-Strukturen von Rohstoffkörpern auf der Grundlage granulometrischer, geochemischer und keramtechnologischer Daten. Dabei werden die räumlichen Variabilitäten der Rohstoffkennwerte in den Lagerstätten erfasst und darauf aufbauend unverzichtbare Entscheidungshilfen für einen qualitätsorientierten Abbau entwickelt.

Auch die Beschränkung auf ein engeres Erzeugnisspektrum, wie z. B. bei grobkeramischen Produkten, erfordert bei der Vielfalt der substantiellen Komponenten des Rohstoffes eine Verdichtung bzw. Bündelung der granulometrischen, geochemischen und keramtechnologischen Daten, um den Gewinnungs-, Aufbereitungs- und Hochtemperaturprozess besser steuern zu können.

Aufgrund der hohen Vielfalt der unterschiedlich bedeutsamen Rohstoffkennwerte ist es notwendig, diese mit Hilfe der univariaten und multivariaten Statistik zu reduzieren, um einen für die jeweilige Lagerstätte charakteristischen granulometrischen, geochemischen oder keramtechnologischen Hauptkennwert zu extrahieren. Darüber hinaus ist es anhand des jeweiligen Hauptkennwertes (Modellkennwertes) und der Korrelations- und Regressionsrechnung möglich, jeden für die Lagerstätte später benötigten Kennwert zu berechnen.

Nachfolgend werden verschiedene Teilschritte der Modellierungsarbeiten erläutert und mit Hilfe von ausgewählten Tabellen sowie Graphiken anschaulich untersetzt, um die hohe Praxisrelevanz und vielfältige Bedeutung zu verdeutlichen.

1 Hochpassfilterung

Findet eine hochauflösende Beprobung der zur Verfügung stehenden Bohrungen bzw. Schürfe über kleine Probelängen mit genäherter Äquidistanz statt, wird über standardnormierte Analysendaten ein indirekter Zutritt zum geologischen Körper hergestellt. Das heißt, anstelle der trendbelasteten Originalwerte werden nur die lokalsystematischen Anteile derselben verwendet, wodurch systematische Analysefehler weitestgehend eliminiert werden.

Beseitigte Skalenunterschiede zwischen invers zueinander korrelierten Rohstoffkennwerten ermöglichen es, den Rohstoffkörper mit Hilfe einer Trendanalyse genau zu untergliedern. Entsprechend dieser Unterteilung wird der Datensatz neu sortiert, mit der univariaten Statistik analysiert und mit der Multivariatstatistik auf Kausalzusammenhänge zwischen den Merkmalen überprüft (Kap. 2).

2 Datenanalyse

Für die Rohstoffkennwerte wird eine explorative Datenanalyse als Grundlage für die Verdichtung und Eliminierung redundanter Informationen vorgenommen. Diese hat zum Ziel schrittweise über die Stufen der univariaten und multivariaten Statistik mit statistischen Maßzahlen, Häufigkeitsverteilungen (Bild 1), linearen Einfachkorrelationen (Bild 2), partiellen und multiplen Korrelationen, Entscheidungsbäume (Bild 3) zu entwickeln.



Auf der Grundlage von Plausibilitätskriterien und den eben genannten Entscheidungsbäumen wird einerseits der jeweilige Modellkennwert ausgewählt, andererseits werden auf dieser Basis verschiedene Regressionsansätze entwickelt, mit welchen weitere bedeutende Rohstoffkennwerte direkt oder indirekt aus dem Modellkennwert berechnet werden (Bild 3).

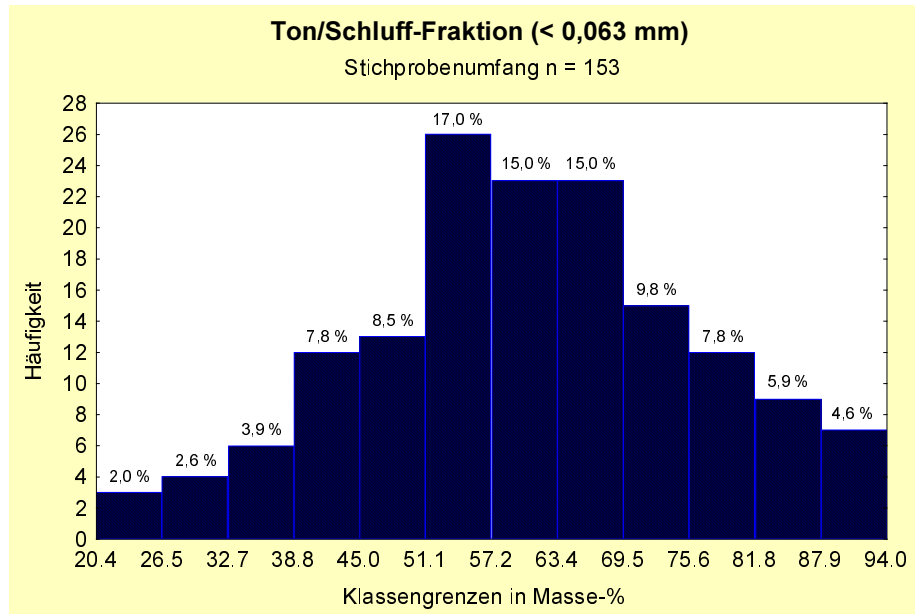


Bild 1. Häufigkeitsverteilung (Histogramm) der Feinkorn-Fraktion mit 12 Klassen und einer ange deuteten Heterogenität (RUST, 2003).

Für die Berechnung dieser Rohstoffkennwerte spielt die Korrelationsanalyse, deren Aufgabe hauptsächlich in der Erfassung und Überprüfung von Kausalbeziehungen zwischen zwei oder mehreren Merkmalen besteht, eine entscheidende Rolle.

Rohstoff- Qualitäts- Kennwerte	Korrelationsmatrix				positiv		negativ	
	Kies-Fraktion	Sand-Fraktion	Ton/Schluff-Fraktion	Karbonat-Gehalt	#	$ r_{xy} \geq 0,9$	e	
Kies-Fraktion	#	#	e	#	#	$ r_{xy} \geq 0,7 < 0,9$	e	
Sand-Fraktion	#	#	e	-	#	$ r_{xy} \geq 0,5 < 0,7$	e	
Ton/Schluff-Fraktion	e	e	#	e	#	$ r_{xy} \geq 0,3 < 0,5$	e	
Karbonat-Gehalt	#	-	e	#	#	$ r_{xy} < 0,3$	e	
					-	$ r_{xy} $ unterhalb der Signifikanzgrenze	-	

Zufallshöchstwert des Korrelationskoeffizienten $r_{q,m} = r_{0,975;151} = 0,1588$ bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$.

Bild 2. Piktogramm der linearen Einfachkorrelationen mit drei Korngrößen-Fractionen und dem Karbonat-Gehalt (Goeritz, 2003).

Aufgrund ähnlichen Korrelationsverhaltens werden Merkmale gruppiert und somit wesentliche Eigenschaften der Merkmalsassoziationen fixiert. Die Grundlage dieser Gruppierung stellt der positive oder negative Zusammenhang sowie die Stärke der Korrelation dar.

Zur Visualisierung der Korrelationsmatrix werden Piktogramme (Bild 2) erarbeitet, welche die bivariaten Korrelationsbeziehungen über abgestufte Grade zunehmender Signifikanz ausweisen. Unterschiedlich große Vollkreise (positive Korrelation) und Hohlkreise (negative Korrelation) repräsentieren die Größenintervalle der Korrelationskoeffizienten oberhalb der Signifikanzgrenze.

Liegt der Korrelationskoeffizient unterhalb dieser Grenze, wird er als insignifikant durch einem Querstrich ausgewiesen (Bild 2). Die Abstufung der Korrelationsbeziehungen erfolgt ausgehend von insignifikanten, zu schwach signifikanten ($|r_{xy}| < 0,3$), zu mäßig signifikanten ($|r_{xy}| \geq 0,3 < 0,5$), zu stark signifikanten ($|r_{xy}| \geq 0,5 < 0,7$), zu sehr stark signifikanten ($|r_{xy}| \geq 0,7 < 0,9$) bis hin zu höchstsignifikanten ($|r_{xy}| \geq 0,9$) Zusammenhängen.

Im Anschluss an die Korrelationsrechnungen wird ein Entscheidungsbaum (Bild 3), im vorliegenden Beispiel aus dem zusammengefassten Modellkennwert Ton/Schluff-Fraktion (Ebene 0), entwickelt. Die Graphik zeigt, dass in der Ebene 1 sowohl die Kies-Fraktion als auch die Sand-Fraktion direkt aus der Ton/Schluff-Fraktion mittels Regressionsfunktionen berechnet werden. In Ebene 2 wird mittels linearer Einfachregression der Karbonat-Gehalt aus der Kies-Fraktion errechnet. Alternativ dazu kann in Ebene 3 der Karbonat-Gehalt über multiple Regressionsansätze, einmal aus der Kies- und Sand-Fraktion, zum anderen aus der Ton/Schluff- und Sand-Fraktion, berechnet werden.

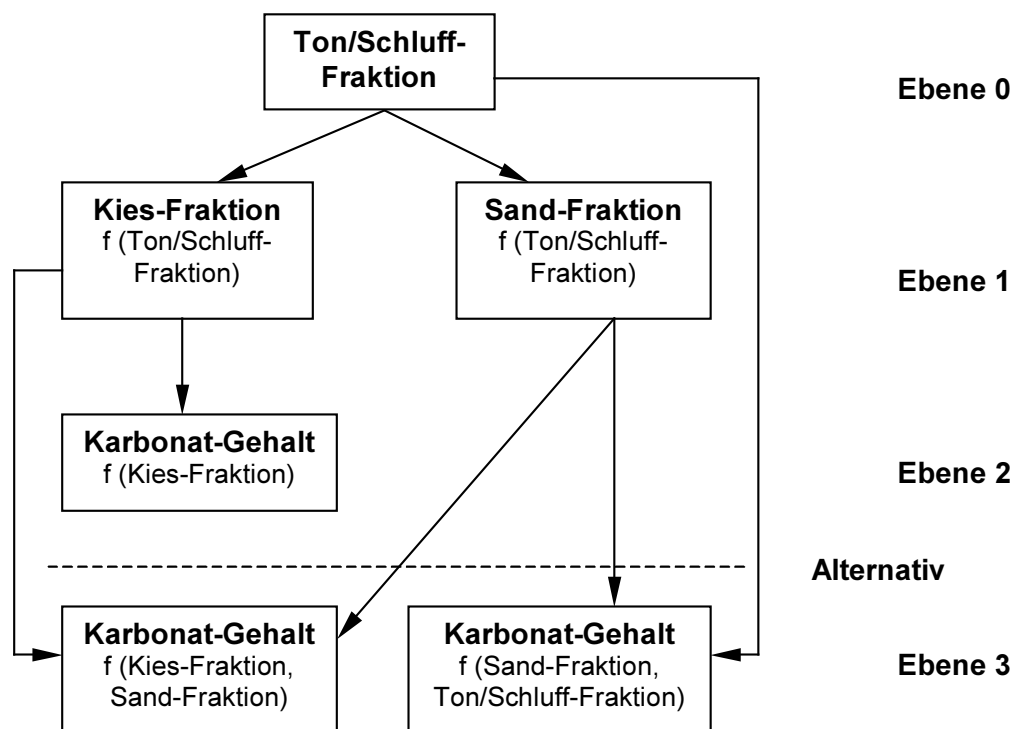


Bild 3. Aus der zusammengefassten Ton/Schluff-Fraktion (Modellkennwert) abgeleiteter Entscheidungsbaum (Rust, 2003).

3 Entwicklung ein-, zwei- und dreidimensionaler Qualitäts-Strukturen

Die Rohstoff-Qualitäts-Modellierung von Steine- und Erden-Lagerstätten am Beispiel von Tonlagerstätten erfolgt i.e.S. in mehreren Teilschritten, die nachfolgend aufgezeigt werden.

3.1 Tiefpassfilterung

Bei der Tiefpassfilterung mit Hilfe der gleitenden Durchschnitte wird über die Längen-Qualitäts-Einheiten ein Fenster bestimmter Größe gelegt, welches mit einer konstanten

Schrittweise verschoben wird. Die damit erreichte Merkmalsglättung in den Kurven der gleitenden Durchschnitte führt zum Nachweis bzw. zur Typisierung determinierter und saisonaler Veränderungen des Modellkennwertes und liefert gleichzeitig die Grundlage zur Erarbeitung zweidimensionaler Qualitäts-Strukturen (Kap. 3.2).

3.2 Zweidimensionale Qualitäts-Strukturen

Die entscheidende Grundlage für eine umfassende Modellierung zweidimensionaler Qualitäts-Strukturen bildet die Vermaschung der Bohrungen in Dreiecks-Netzen, auf denen unter Verwendung zweidimensionaler Schnittrisse die Nebenstützpunkte festgelegt werden (Bild 4).

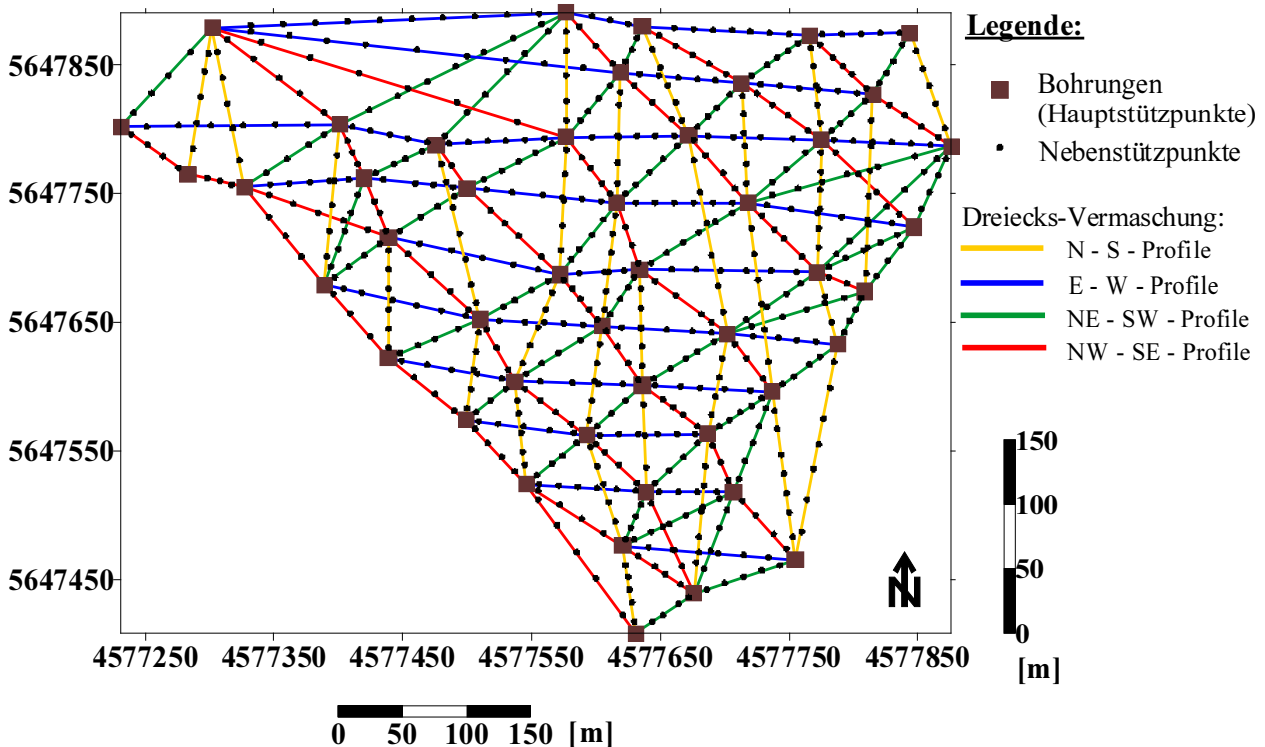


Bild 4. Informationsgewinn unter Einbeziehung von Nebenstützpunkten (RUST, 2003).

Die gleitenden Durchschnitte in den Bohrungen und die Dreiecks-Vermaschung zwischen den Bohrungen sind wichtige Voraussetzungen für die Isolinienkonstruktion in Schnittrissen. Im Ergebnis dieser vertikal erzeugten Schnittrissflächen werden Parallel-Strukturen und Dreiecks-Anomalien ausgewiesen. Diese erzeugten Isolinienstrukturen werden wie folgt verwendet:

- (1) Zum Nachweis des Stratiformitätsgrades, das heißt, dem Verhältnis der Flächenanteile der Anomalien zu den Flächenanteilen der Parallel-Strukturen und dessen richtungsorientierter Ausprägung sowie
- (2) Zur Berechnung von nichtlinear interpolierten Nebenstützpunkten zwischen den Bohrungen (Hauptstützpunkten). Das heißt, es werden für diese Nebenstützpunkte die gewogenen Mittelwerte für definierte Abbauscheibenhöhen (Bild 5) auf vertikalen Schnittlinien durch das Isolinienfeld berechnet (Bild 5). Dabei dienen die Kennwertgehalte der Isoflächen und Isolinienabstände als Gewichte.

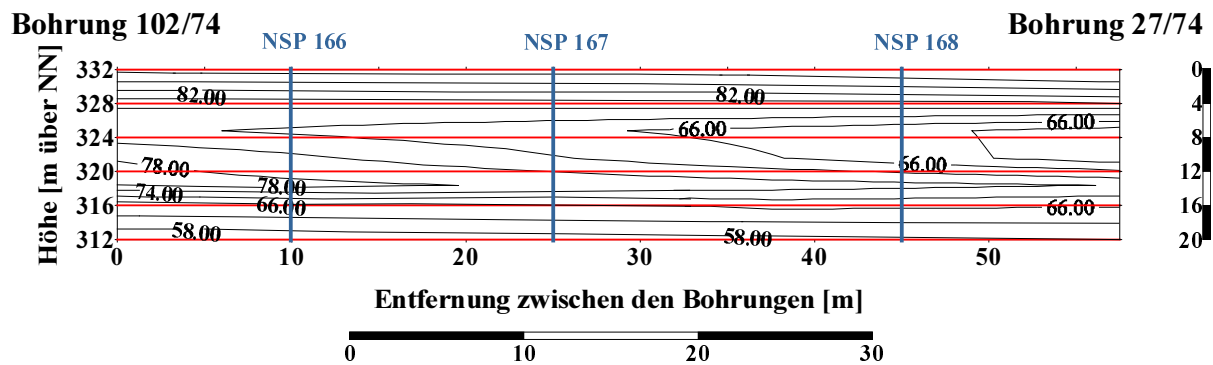


Bild 5. Ton/Schluff-Gehalts-Isolinienfeld mit Parallel-Strukturen im hangenden und liegenden Bereich und Dreiecks-Anomalien im zentralen Teil des Isolinienfeldes sowie festgelegte Nebenstützpunkte zwischen zwei Bohrungen (RUST, 2003).

3.3 Dreidimensionale Qualitäts-Strukturen

Die erreichte, entscheidend höhere Stützpunktzahl im Rohstoffkörper (Bild 4) erlaubt es, mit beliebigen Interpolationsmethoden (u.a. Kriging, Inversdistanz-Schätzung) Qualitäts-Isolinienkarten (Bild 6) und Qualitäts-Blockkarten (Bild 7) zu berechnen, welche der Realität weitestgehend genähert sind.

Zusätzliche Verbesserungen bei der Erzeugung der dreidimensionalen Qualitäts-Strukturen werden durch die Verwendung von Richtungs-Anisotropien der Qualitäts-Kennwerte erreicht, die aus einfachen oder geschachtelten Variogramm-Modellen gewonnen werden.

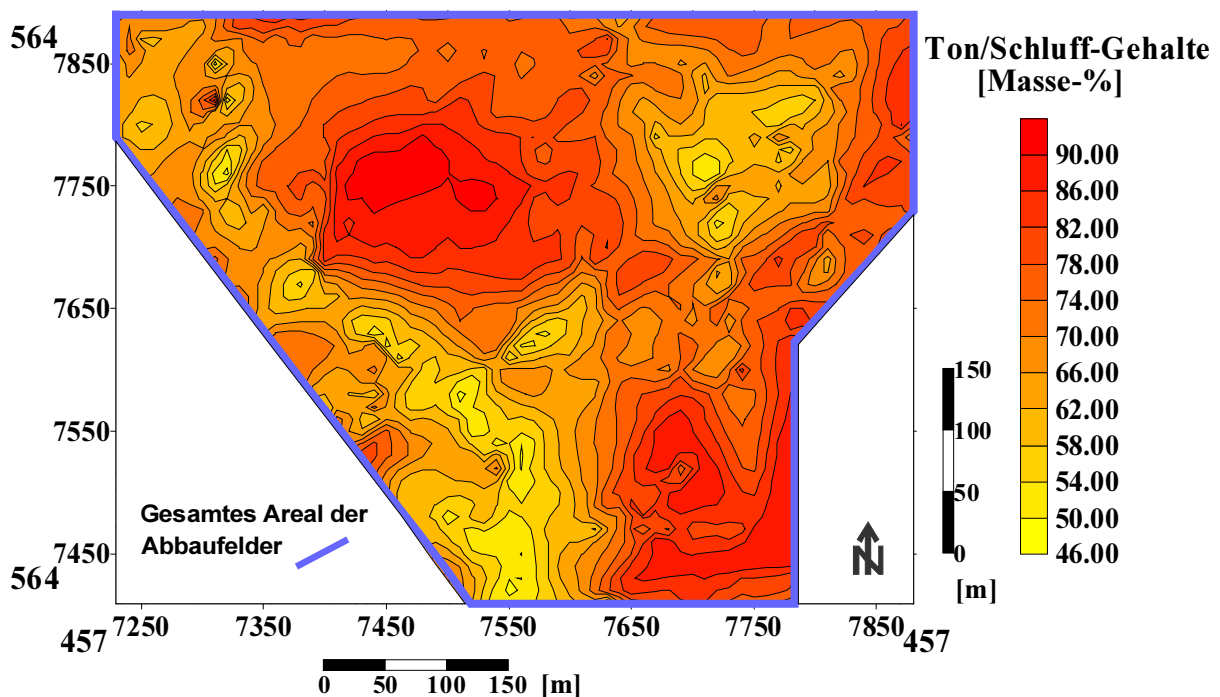


Bild 6. Qualitäts-Isolinienkarte am Beispiel einer Abbauscheibe mit differenzierten Ton/Schluff-Gehalts-Arealen (RUST, 2003).

Im Gegensatz zu den Qualitäts-Isolinienkarten (Bild 6), die primär die Basis der geologischen Interpretation bilden, stellen Qualitäts-Blockkarten (Bild 7) die wichtigste Arbeitsgrundlage für das Qualitäts-Sicherungssystem des Steine- und Erden-Betriebes dar.

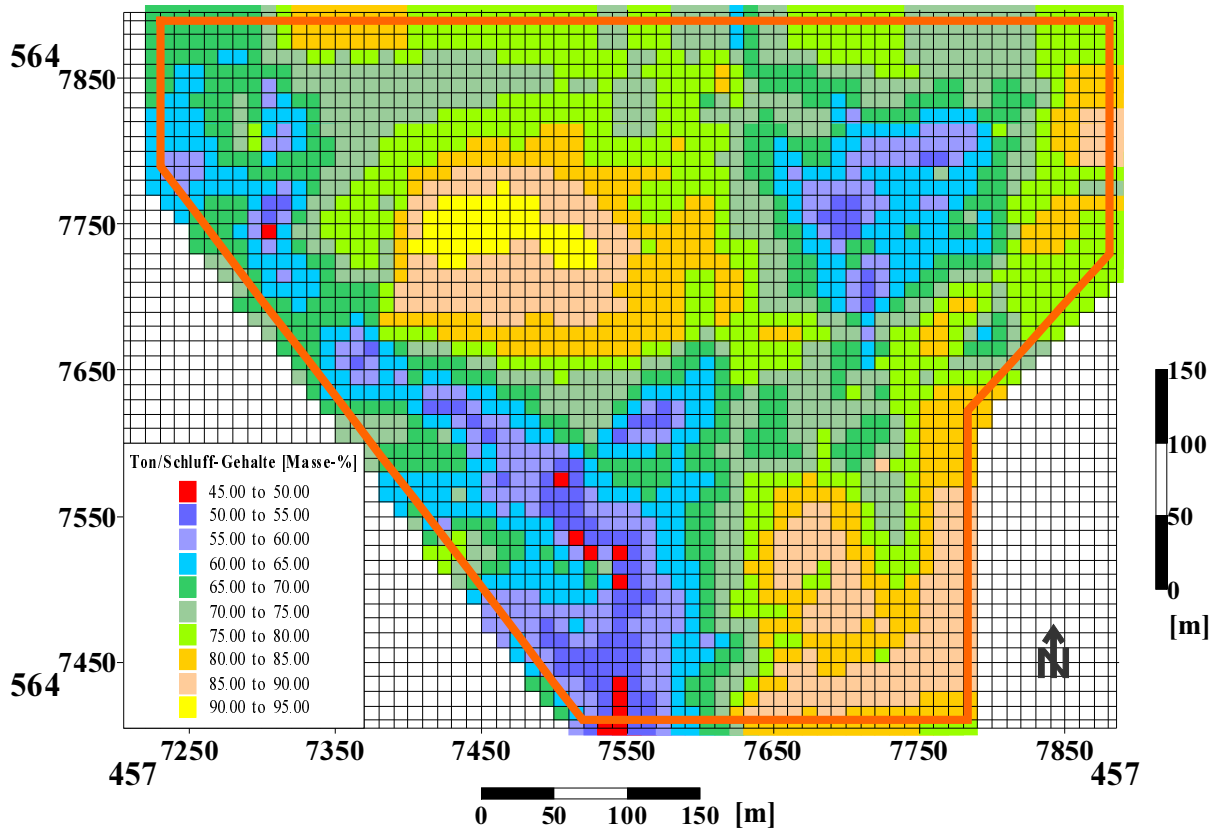


Bild 7. Qualitäts-Blockkarte am Beispiel einer Abbauscheibe mit äquidistanten Blockabmaßen von 10 m x 10 m in der Fläche und 4 m Abbauscheibenhöhe (RUST, 2003).

3.4 Mengen-Qualitäts-Bilanzen

Im Ergebnis der Qualitäts-Modellierungsarbeiten werden tabellarisch (Tabelle 1) und graphisch (Bild 9) Mengen-Qualitäts-Bilanzen ausgewiesen. Diese sind die Grundlage für einen streng qualitätsorientierten kurz-, mittel- und langfristigen Rohstoff-Abbau, den Rohstoff-Versatz und die Ressourcen-Schonung.

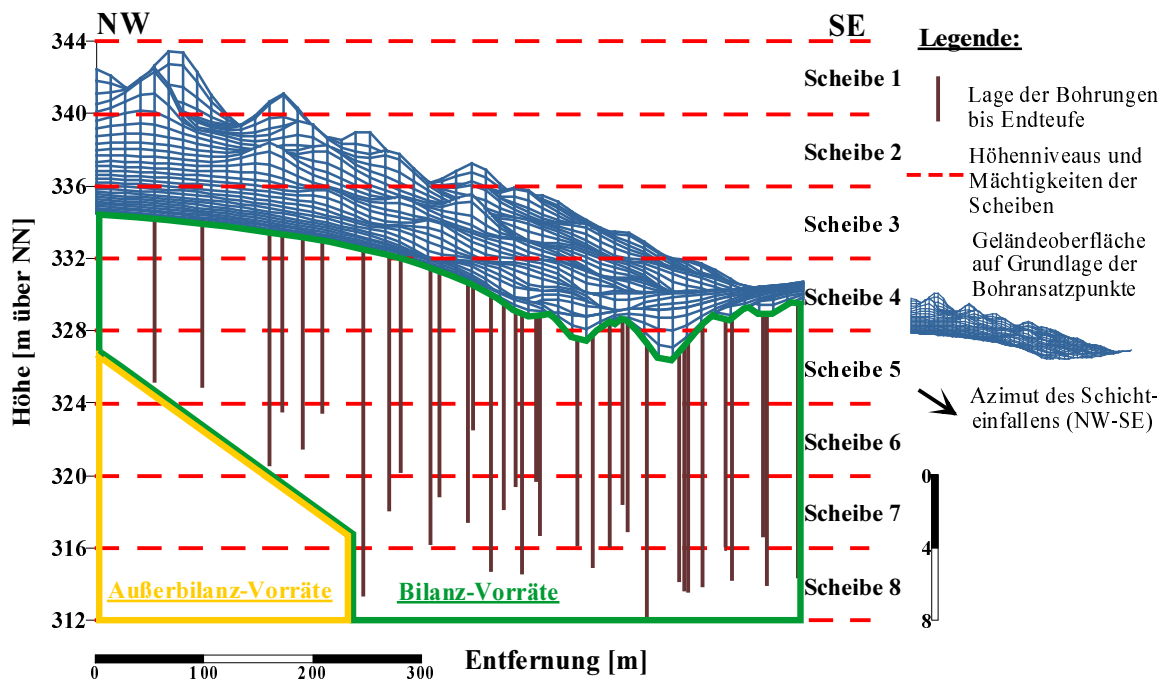




Bild 8. Allgemeine Lagerstättenverhältnisse am Beispiel einer Tonlagerstätte mit Differenzierung des Rohstoffkörpers in 4 m-Abbauscheiben (RUST, 2003).

Bei den Mengen-Qualitäts-Bilanzen wird grundsätzlich zwischen Bilanz-Vorräten und Außerbilanz-Vorräten unterschieden (Bild 8): Bilanz-Vorräte sind Vorräte mit definierten Mengen- und Qualitäts-Angaben. Außerbilanz-Vorräte sind Vorrats-Mengen, deren Existenz aufgrund der allgemeinen Lagerstättensituation wahrscheinlich ist, für die jedoch aufgrund von Informationslücken keine Qualitäts-Angaben gemacht werden können.

3.4.1 Tabellarische Ausweisung

In der tabellarischen Ausweisung der Mengen-Qualitäts-Bilanzen werden den numerisch von unten nach oben abnehmenden Blockklassen (Spalte 1) zugeordnet: Gehalts-Intervalle (Spalte 2), die zugehörige Blockanzahl (Spalte 3), die zugehörigen Blockmengen in Tonnen (Spalte 4), die kumulativen Blockmengen in Tonnen (Spalte 5), die durchschnittlichen Gehalte je Blockklasse (Spalte 6) und die kumulativen durchschnittlichen Gehalte des jeweiligen Modellkennwertes in Masse-% (Spalte 7).

Zusätzlich werden in den Spalten 8 und 9 die jeweiligen kumulativen Durchschnitts-Gehalte weiterer Qualitäts-Kennwerte unter Verwendung von Regressionsgleichungen ausgewiesen.

Tabelle 1. Mengen-Qualitäts-Bilanzen am Beispiel einer Abbauscheibe in tabellarischer Auflistung (RUST, 2003).

Klasse	Klassen-intervall [Masse-%]	Block-anzahl	Menge je Klasse [t]	Menge kumulativ [t]	Klassenmittel der Ton/Schluff-Fraktion [Masse-%]	Kumulativer Durchschnitt der Ton/Schluff-Fraktion [Masse-%]	Kumulative Durchschnitts-Gehalte (mittels Regression) [Masse-%]	
							Kies	Sand
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	45 - 50	11	8800	1844000	49,29	72,19	7,75	20,07
9	50 - 55	85	68000	1835200	53,04	72,30	7,70	20,00
8	55 - 60	178	142400	1767200	57,90	73,04	7,37	19,59
7	60 - 65	310	248000	1624800	62,68	74,36	6,79	18,85
6	65 - 70	361	288800	1376800	67,50	76,47	5,86	17,67
5	70 - 75	421	336800	1088000	72,70	78,85	4,82	16,33
4	75 - 80	410	328000	751200	77,30	81,60	3,60	14,79
3	80 - 85	283	226400	423200	82,30	84,94	2,14	12,92
2	85 - 90	203	162400	196800	87,24	87,98	0,80	11,22
1	90 - 95	43	34400	34400	91,48	91,48	0,00	9,26

3.4.2 Graphische Ausweisung

Um operativ sofort für beliebige, beispielsweise vom Rohstoffnutzer oder Kunden vorgegebene bzw. geforderte Durchschnitts-Gehalte die zugehörigen Vorrats-Reserven und maximalen Verschnitt-Gehalte ermitteln zu können, werden die kumulativen Mengen- und Gehalts-Kurven für die einzelnen Abbauscheiben in Summendiagrammen dargestellt.

In einem Summendiagramm (Bild 9) werden nachfolgend die Mengen-Qualitäts-Bilanzen einer Abbauscheibe als Beispiel gewählt, zwei Durchschnitts-Gehalte der Ton/Schluff-Fraktion als cut-off-Werte vorgegeben und folgende Resultate erzielt (Bild 9):

- (1) Ein Rohstoffnutzer oder Kunde fordert einen Rohstoff mit einem cut-off-Wert von 75,0 Masse-%. Diese Menge entspricht einem kumulativen Durchschnittsgehalt der Ton/Schluff-Fraktion von 75,0 Masse-% (Vorgabe A). Man findet für diesen kumulativen Durchschnittsgehalt auf der linken Ordinatenachse eine Vorrats-Menge von $1.550 \cdot 10^3$ t Rohstoff und auf der Abzissenachse einen Verschnitt-Gehalt von 64,2 Masse-%. Dieser Verschnitt-Gehalt von 64,2 Masse-% markiert die untere Verschnitt-Grenze für den vorgegebenen Durchschnitts-Gehalt. Die Differenz zwischen beiden von 10,8 Masse-% fixiert das entsprechende Verschnitt-Intervall. Das heißt, um einen Durchschnitts-Gehalt von 75,0 Masse-% beim Abbau dieser Scheibe zu gewährleisten, kann man innerhalb der Abbauscheibe bis zu einem Minimal-Gehalt von 64,2 Masse-% abbauen.
- (2) Würde ein kumulativer Durchschnitts-Gehalt der Ton/Schluff-Fraktion von 90,0 Masse-% (Vorgabe B) gefordert sein, so würde sich eine Vorrats-Menge von $100 \cdot 10^3$ t Rohstoff und ein Verschnitt-Gehalt von 89,8 Masse-% ergeben. Das Verschnitt

Intervall hat sich gegenüber Vorgabe A auf 0,2 Masse-% reduziert. Demzufolge gibt es nahezu keine Verschnitt-Möglichkeiten.

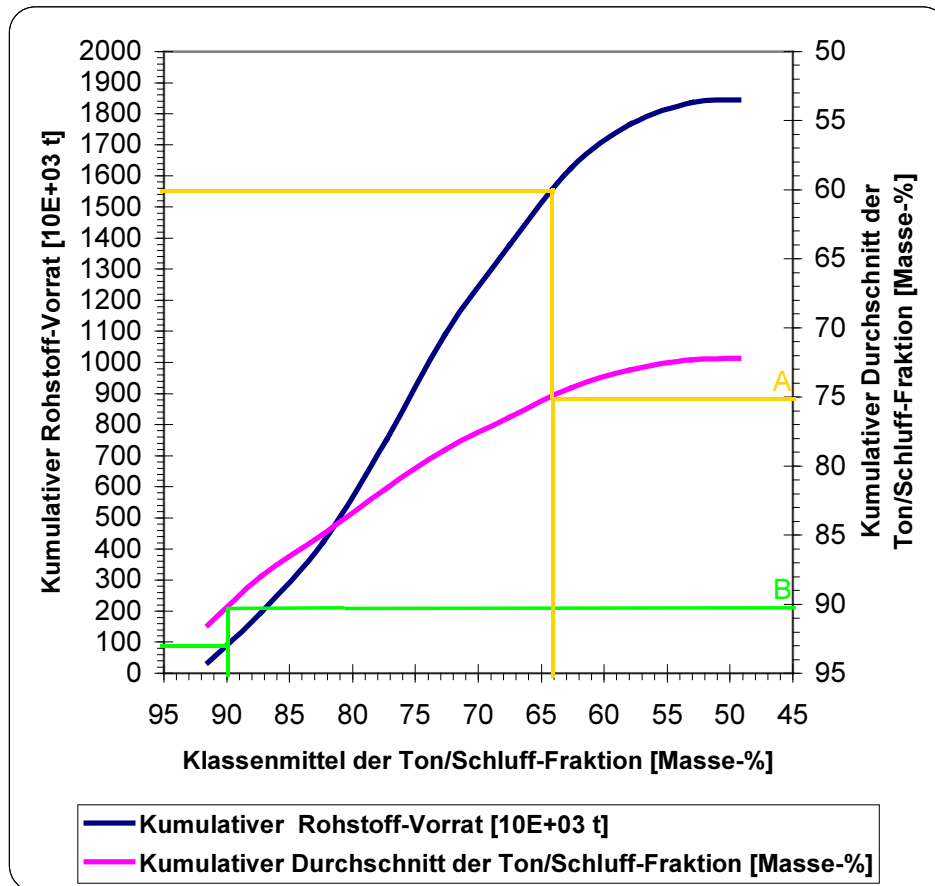


Bild 9. Kumulative Mengen- und Gehalts-Kurve der Ton/Schluff-Fraktion am Beispiel einer Abbauscheibe mit den Vorgaben A und B (RUST, 2003).

Derartige Kurven lassen sich anhand der tabellarischen Mengen-Qualitäts-Bilanzen gleichermaßen für die Kies- und Sand-Fraktion (Tabelle 1) oder für den Karbonat-Gehalt darstellen und damit beispielsweise die für die Produktion erforderlichen minimalen und maximalen Karbonat-Gehalte aushalten und produktionstechnisch steuern.

Auf der Grundlage der gewonnenen Ergebnisse der Rohstoff-Qualitäts-Modellierung von Steine- und Erden-Lagerstätten am Beispiel von Tonlagerstätten können somit wichtige Hinweise für eine optimale Abbauführung gegeben werden.