

# **DAS BOXMODELL-KONZEPT – VON DER MODELLBASIERTEN FLUTUNGSKONZEPTION DES WISMUT-STANDORTS RONNEBURG ZUR ANWENDUNG IN DER DEUTSCHEN STEINKOHL E**

Michael Eckart<sup>1</sup>, Grzegorz Gzyl<sup>2</sup>, Holger Kories<sup>1</sup>, Michel Metz<sup>3</sup>, Rudolf Rengers<sup>4</sup>, Michael Paul<sup>5</sup>

**Kurzfassung:** Zu Beginn der 1990er Jahre stellte die Flutung des Ronneburger Bergbaugesbietes der Wismut GmbH in Anbetracht der Dimension der Aufgabe und der Kürze der Vorbereitungszeit eine besondere ingenieurtechnische Herausforderung dar. Im Zuge der erforderlichen Berechnungen verschiedener Flutungsszenarien erwies es sich, dass die Anwendung üblicher Simulatoren zur Berechnung von Grundwasserströmungen - besonders zur Abbildung des hydraulischen Kurzschlusses auf Strecken - ungeeignet war. Dies führte zur Entwicklung eines neuartigen Modellkonzeptes, dem Boxmodell, das auf die spezifischen Bedürfnisse der Flutung von Bergwerken ausgerichtet ist. Dieses Modellkonzept wurde schrittweise weiterentwickelt. So konnte das Modell um die dichteabhängige und die turbulente Strömung auf Strecken erweitert werden. Wegen der Zweckmäßigkeit des Verfahrens erfolgt seit dem Jahre 2000 der systematische Aufbau eines Boxmodells für den Bereich des Ruhrbergbaus, des Saarländischen Kohlereviere, für den Lothringischen Steinkohlebergbau (F), das Oberschlesische Kohlebecken (PL) sowie das Durham Coalfield (GB).

## **Grundlagen des Boxmodells und dessen anwendungsorientierte Weiterentwicklung**

### **Ausgangssituation**

Infolge der zu Beginn der 1990er Jahre kurzfristig notwendigen Entscheidung für eine Strategie zur Schließung des Ronneburger Uranbergbaugesbietes standen die Wismut-Ingenieure vor einer besonderen Herausforderung. Es mussten Antworten gegeben werden auf solche zentralen Fragestellungen wie: Wie lange dauert die zu konzipierende Flutung des untertägigen Grubengebäudes? Mit welchen Volumenströmen ist in der Endphase der Flutung zu rechnen? Welche Konzentrationen an grubenbürtigen Wasserschatstoffen sind in den nach Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs austretenden Flutungswässern zu erwarten?

Es zeigte sich, dass übliche geohydraulische Modellierungsverfahren nach den Verfahren der Finiten Elemente oder Finiten Differenzen nur sehr schwer die komplizierten Geometrien des Grubengebäudes innerhalb von Bergwerken abbilden können. Weiterhin war zu beachten, dass die Strömung im Streckensystem oftmals nicht mehr über laminare Strömungsgesetze erfasst werden kann. Neben vielen weiteren Merkmalen, die in den Folgejahren für bergbauspezifische Modellierungstechniken entwickelt wurden, bestand der wesentliche Beitrag der Wismut GmbH Anfang der 90er Jahre in der Schaffung eines frei strukturierbaren Diskretisierungsverfahrens, das den Anforderungen des untertägigen Bergbaus in der Ronneburger Lagerstätte gerecht wurde.

---

<sup>1</sup> DMT GmbH, Hydrogeologie & Wasserwirtschaft, 45307 Essen, Am Technologiepark 1

<sup>2</sup> Central Mining Institute, Department of Geology and Geophysics, 40-007 Katowice, Plac Gwarkow 1

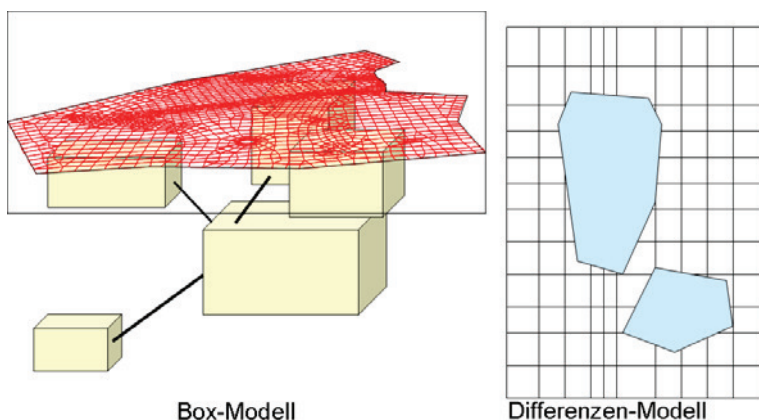
<sup>3</sup> Charbonnages de France, F-57800 Freyming-Merlebach, 2 Avenue Emile Huchet

<sup>4</sup> Deutsche Steinkohle AG, 44623 Herne, Am Shamrockring 1

<sup>5</sup> Wismut GmbH, 09117 Chemnitz, Jagdschänkenstraße 29

## Charakteristika des Boxmodells

Numerische Modelle wurden in den letzten Jahren zu Standardwerkzeugen im Bereich des Grubenwassermanagements. Damit die Anzahl der Bilanzzellen in Anbetracht der großen räumlichen Ausdehnung der zu betrachtenden Lagerstätten numerisch beherrschbar bleibt, sollte das numerische Modell aus relativ großen Bilanzzellen - Boxen - bestehen, innerhalb derer jedoch eine sinnvolle Mittelwertbildung hydraulischer Parameter möglich sein muss (Paul et al. 1998). So muss z. B. gewährleistet sein, dass infolge zahlreicher bergmännischer Auffahrungen ein hydraulischer Kurzschluss innerhalb der Boxen herrscht. Mit diesem Konzept kann eine drastische Verringerung der Anzahl der Zellen gegenüber klassischen Grundwassermodellen erreicht werden. Dabei wird nur so fein in räumliche Bilanzeinheiten unterteilt, wie dies zur Beantwortung der gestellten Fragen notwendig und aus hydraulischer Sicht möglich ist. Weiterhin soll die Geometrie der Bilanzeinheiten den praktischen Erfordernissen entsprechen und nicht aus einem gerade verfügbaren mathematischen Verfahren (z. B. Dreiecks- oder Vierecksdiskretisierung) abgeleitet werden. Die dadurch mögliche Reduzierung der Bilanzeinheiten schafft wiederum Freiraum, andere wichtige im Bergbau vorherrschende Erscheinungen zu berücksichtigen. Den wesentlichen Unterschied zwischen den Diskretisierungsansätzen der Verfahren zeigt die folgende Abbildung 1.



*Abb. 1 Anpassung des Diskretisierungsverfahrens an die Geometrie des Grubengebäudes im Vergleich zwischen Box- und Differenzenmodell*

Das Boxmodell verfügt über ein vollständig dreidimensionales Diskretisierungsverfahren. In vielen Anwendungsfällen wird jedoch so verfahren, dass die horizontale Einteilung in Boxen, die sich z. B. an Abbaugrenzen oder Markscheiden orientiert, für alle vertikalen Modellschichten identisch bleibt. Den Schichten einer Box können dann spezifische Ober- und Unterkanten zugewiesen werden. Die Flexibilität des Verfahrens wurde gezielt weiterentwickelt, so dass auch FE- oder FD-Netze in das Boxmodell überführt werden können und somit in jeder Modellscheibe völlig unterschiedliche Zellzahlen existieren können (s. Abb. 1).

Das Anwendungsbeispiel in Abb. 2 veranschaulicht das aktuelle Boxmodell des Ruhrgebietes (Stand 12/2006).

Den Boxen werden wichtige Informationen des jeweiligen Grubenfeldes aus bergmännischer, hydrogeologischer und geochemischer Sicht zugewiesen (Speichervolumen, Grundwasserneubildung, Pumpraten sowie Informationen zur Grubenwasserqualität, wie pH-Wert, Konzentrationen gelöster Inhaltsstoffe, Temperaturen, typische Mineralien der Festphase etc.). Den vertikalen und horizontalen Verbindungen zwischen den Boxen werden die spezifischen Strömungseigenschaften mitgeteilt.

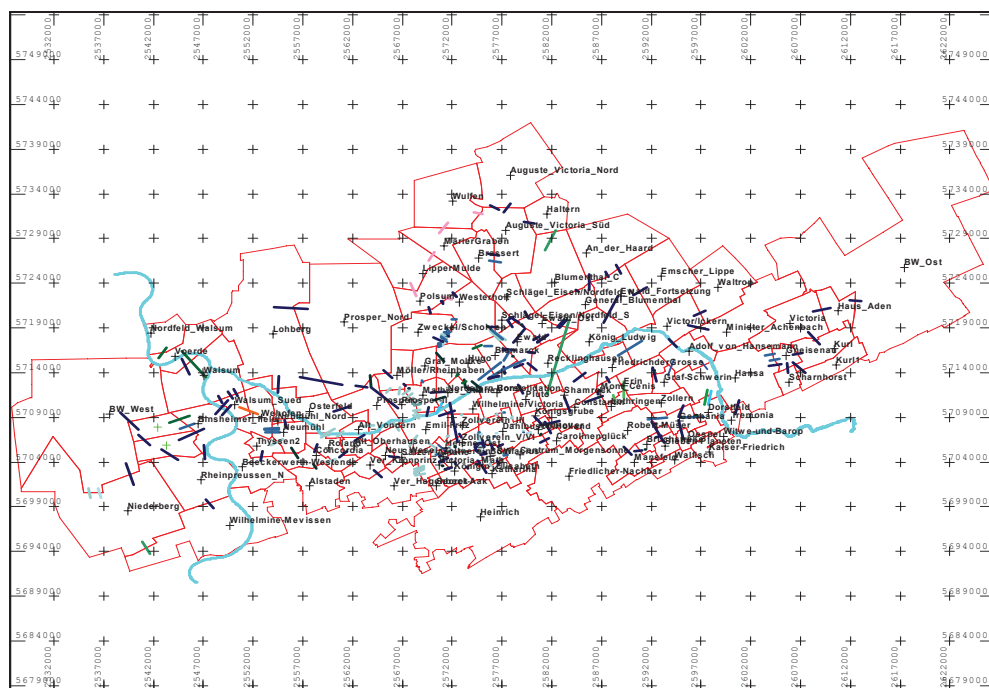


Abb. 2 Boxmodell Ruhrgebiet mit Boxgrenzen, Verbindungen, Rhein und Emscher (Stand 12/2006)

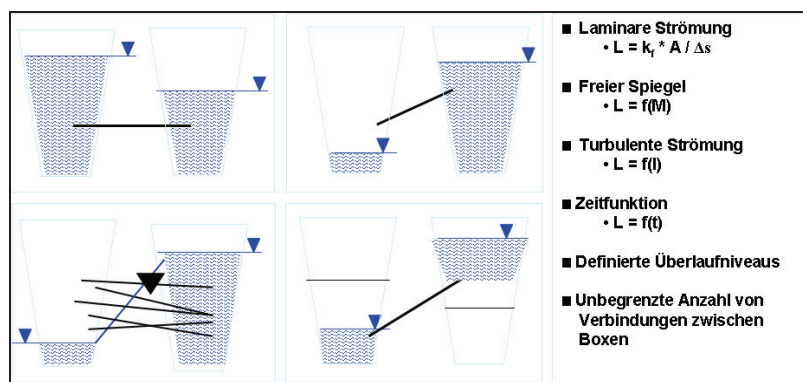


Abb. 3 Schematische Darstellung von Verbindungstypen und Strömungsgesetzen

## Berücksichtigung der Unsicherheiten hydraulischer Parameter

Das Boxmodell berücksichtigt als wasserleitende Elemente im Grubengebäude verschiedene Verbindungstypen: Strecken (Gesteinsstrecke, und/oder Flözstrecke), Abbau, Bohrlöcher sowie den geologischen Körper (Abb. 3). Entsprechend werden unterschiedliche Strömungsgesetze beachtet. Dies sind:

- Laminare Strömung für Einzelverbindungen (z. B. Gesteinsstrecke)
- Turbulente Strömung für Einzelverbindungen (z. B. Bohrung)
- Laminare Strömung mit Zeitverhalten (z. B. Abbau, Flözstrecke)
- Laminare Strömung für geologischen Körper (kf-Wert)

## Statistische Methoden zur Berücksichtigung der Wasserleitfähigkeit

Es hat sich gezeigt, dass das lange Zeit angewendete Konzept der Variantenunterscheidung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten (Szenarietechnik; z. B. pessimistische, realistische und optimistische Variante) nicht ausreicht, um die Verhältnisse realitätsnah abzubilden, da die Erfahrungen aus durchgeführten Grubenflutungen extreme Unsicherheit in der Bewertung der langzeitlichen Durchlässigkeiten offenbarten. Die durch den Gebirgsdruck hervorgerufene Konvergenz der Grubenbaue führt zu einer über die Zeit zunehmenden Verringerung der Leitwerte der Verbindungen zwischen den Boxen bis hin zu einem Verbruch von Strecken, was mit einer abrupten Abnahme der Durchlässigkeiten verbunden ist.

Diese Verringerung der Leitfähigkeit der Verbindungen ist der wesentliche Unterschied bei der Modellanwendung im Kohlebergbau gegenüber den relativ standfesten Verbindungen im Erzbergbau. Das Problem wurde durch Einführung statistischer Verfahren gelöst. Jede Verbindung wie z. B. Flözstrecke, Abbau, Gesteinstrecke wird neben dem hydraulischen Basisgesetz mit einer Wahrscheinlichkeit des Funktionsfalles beschrieben. Die Wahrscheinlichkeit des Offenbleibens ist z. B. bei der Flözstrecke wesentlich geringer als bei einer Gesteinstrecke. Durch Realisierung zahlreicher Modellläufe, bei denen ein Zufallsgenerator entsprechend dieser Wahrscheinlichkeit den hydraulischen Leitwert ständig variiert, wird das sensible Verhalten des Gesamtsystems quantifizierbar. So ist bei wenigen hydraulischen Elementen in einer Art Reihenschaltung die Wahrscheinlichkeit des Versagens des Gesamtsystems wesentlich größer als bei parallelen Strömungswegen.

Als ein Flutungsbeispiel zur Dokumentation des beschriebenen statistischen Verfahrens zeigt Abb. 4 die erwartete Veränderung des Grubenwasserspiegels in den Grubenfeldern des Französisch-Deutschen Bergbaubereichs „Lothringen-Warndt“.

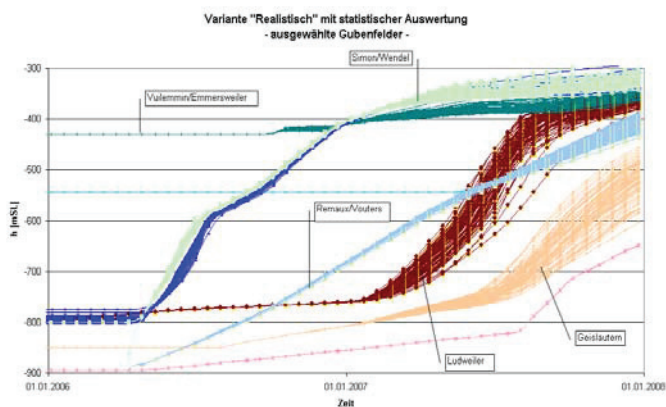


Abb. 4 Wasserstandsganglinien zur Flutung Warndt/Lothringen mit statistischer Methode

Durch diese Methodik können aus der Häufung berechneter Anstiegskurven der wahrscheinlichste Verlauf, ebenso aber auch Extremvarianten abgeleitet werden. Jedem hydraulischen Element muss dabei eine Verteilungsfunktion (Funktionsfall) mitgeteilt werden.

Durch Auswertung der Gesamtanzahl der Modellläufe lassen sich somit die Schwachstellen des hydraulischen Systems effektiv erkennen und der wahrscheinlichste Verlauf von Grubenflutungen unter Angabe einer konkreten Wahrscheinlichkeit prognostizieren.

## Stofftransport: Konzept der Massenerhaltung und des Massenaustausches

Die Entwicklung der Grubenwasserqualität großer Grubenfelder mit komplizierten Fließzuständen ist ein sehr komplexer Prozess, worauf das Prognoseinstrument abgestimmt sein muss. Das Modell muss den scharfen anfänglichen Anstieg des Konzentrationsniveaus während und

nach Flutung sowie die langfristige exponentielle Konzentrationsabnahme beschreiben. Die Beladung des Grubenwassers mit den höchsten gemessenen Werten durch einmalige Aufkonzentrierung des Flutungswassers ist hierbei nicht ausreichend, da dies nicht mit vielfach beobachteten ausgetragenen Gesamtmassen übereinstimmt. Zur Lösung dieses Problems wurde auf ein vereinfachtes Doppelporositätssystem zurückgegriffen. Das flutbare Volumen, das das gesamte künstlich geschaffene Resthohlraumvolumen wie Strecken und Abbaue sowie die Gesteinsporositäten umfasst, wird in ein aktives und passives Speichervolumen (Abb. 5) unterteilt. Die aktive Phase bezieht sich auf die offenen Strecken, die passive Phase auf die Abbaue einschließlich der angrenzenden Porenräume. Die Verteilung der auffüllbaren Porosität für Belange des Steinkohlenbergbaus ist etwa: 20 % offene Strecken, 80 % Abbaubereiche. Konvektion findet nur zwischen den aktiven Phasen der Boxen statt. Die passive Phase enthält lösliche Stoffe in hohen Konzentrationen. Weitere Lösungsprozesse finden in der passiven Phase statt. Der Massenaustausch zwischen der passiven und aktiven Phase wird in Analogie zur Diffusion mit dem Fick'schen Gesetz beschrieben.

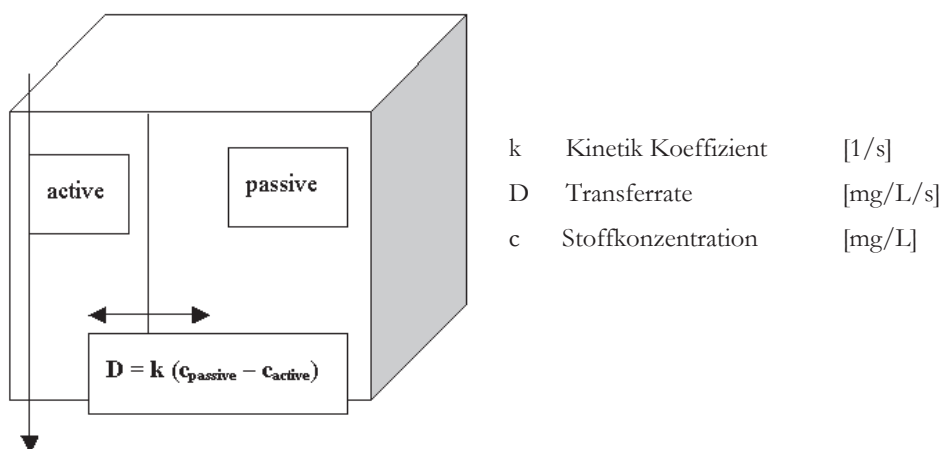


Abb. 5 Unterteilung in aktive und passive Teile einer Box

## Berechnung von Grubenflutungen nach analytischen und numerisch diskreten Methoden

Eine gut belegte und direkte Methode zur Prognose der Entwicklung von Eisenkonzentrationen aus gefluteten Gruben wurde durch Younger (2000) entwickelt und von Blachère (2003) sowie Younger & Blachère (2003) weiter adaptiert, um die speziellen Erfahrungen bei der Flutung der französischen Steinkohlegruben zu berücksichtigen (siehe Gleichung (1)). Die Methode besteht aus einer einfachen statistischen Bewertung von zahlreichen Flutungen und kann angewendet werden, wenn die Grubengeometrie und die hydraulischen Bedingungen nicht sehr komplex sind.

Die Konzentrationen für Fe und  $SO_4$  (Reaktionsprodukte der Pyrit-Oxidation) erreichen ihr typisches Maximum sehr rasch in der Anfangsphase nach Beendigung der Flutung und nehmen dann in exponentieller Weise ab (Abb. 6). Nach der o. g. Methode werden 50 % der maximalen Konzentration nach einer Zeit nach Beginn des Überlaufs erreicht, die der Flutungszeit entspricht.

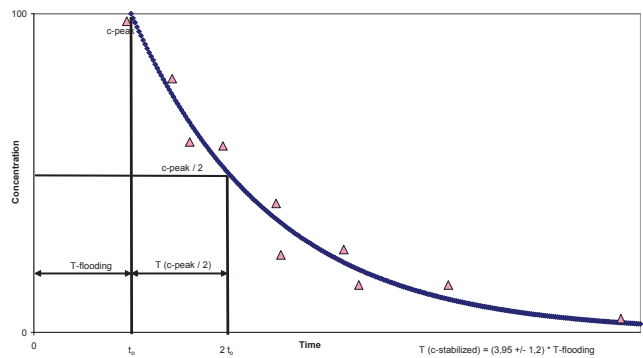


Abb. 6 Exponentielle Konzentrationsabnahme nach der Vollflutung

$$c(t) = c_0 * e[-(\ln 2 / t_0) * (t-t_0)]$$
 (1)

c	Konzentration des Überlaufs	[mg/L]
t	Zeit nach Flutungsbeginn	[s]
t <sub>0</sub>	Beginn des Grubenwasserüberlaufs (= Flutungszeit)	[s]
c <sub>0</sub>	Startkonzentration	[mg/L]

Einfluss des Volumenstromes

Im Folgenden wird das geflutete Grubengebäude als Bilanzzelle mit einheitlicher Grubenwasserqualität betrachtet, in dem es auf Grund gering mineralisierter zulaufender Grundwässer (stationäres Q nach Beendigung der Flutung) zu einer Mischung mit dem hoch mineralisierten Grubenwasser kommt. In Folge dessen werden durch den Grubenwasserüberlauf kontinuierlich abnehmende Stofffrachten aus dem Grubengebäude ausgetragen. Unter der Annahme, dass nach Beendigung der Flutung keine weiteren Lösungsprozesse im Grubengebäude stattfinden, ergibt sich in der beschriebenen Situation aus dem Massenerhaltungsgesetz folgende Differenzialgleichung:

$$(dc / dt) * V = -Q * c$$
 (2)

Q	Überlaufrate nach Flutung	[m3/s]
V	Wasservolumen im Bilanzelement	[m3]
c	Konzentration des Überlaufs	[mg/L]
t	Zeit nach Beginn des Überlaufs	[s]

Die analytische Lösung beschreibt die Stoffkonzentration in den austretenden Grubenwässern als Funktion der Zeit wie folgt:

$$c(t) = c_0 * e[-(Q/V) * t]$$
 (3)

Durch Einsetzen von t = 0, etwa dem Zeitpunkt zu Beginn des Überlaufs, ergibt sich c<sub>0</sub> als maximale Konzentration der ersten überlaufenden Grubenwässer. Eine Halbierung der hohen Startkonzentration c<sub>0</sub> ist demzufolge nach ln2 \* (V/Q), also nach ca. 70% der Zeit eines theoretischen vollständigen Austauschs zu erwarten. Während bei der empirisch gefundenen Gleichung (1) die Abnahme der Überlaufkonzentration von der Flutungszeit t<sub>0</sub> abhängt, wird sie bei der physikalisch abgeleiteten Gleichung (3) von Q/V bestimmt, wobei Q die Überlaufrate nach der Bergwerksflutung ist. Unter Beachtung des unterschiedlichen zeitlichen Nullpunktes beschreibt Gleichung (1) die gleiche Konzentrationsentwicklung wie Gleichung (3), wenn Q/V = ln2/t<sub>0</sub>, d. h. Q = (V/t<sub>0</sub>) \* ln2 gegeben ist. V/t<sub>0</sub> kann als mittlere Grundwasserzustromrate zur Grube während der Flutung betrachtet werden. Somit kann die Bedingung für die Gleichheit der beiden



Beschreibungen der Konzentrationsentwicklung auch folgendermaßen formuliert werden: die Überlaufrate nach Flutung eines Bergwerks entspricht ca. 70% der mittleren Flutungsrate. Diese Bedingung ist zumindest näherungsweise bei etlichen Bergwerksflutungen nicht unplausibel (kontinuierliches Abdrücken der zulaufenden Grundwässer durch das ansteigende Grubenwasser). Gleichung (3) repräsentiert damit die allgemeinere Lösung der Massenbilanzgleichung und berücksichtigt die tatsächliche Überströmrage nach der Flutung. Der Algorithmus, der für das Boxmodell genutzt wird, löst die oben dargestellte Prozessgleichung (Massenerhaltung) nach einer numerisch diskreten Methode für jede Bilanzeinheit (Box):

$$c_{neu} = c_{alt} - (c_{alt} * Q * \Delta t) / V \quad (4)$$

## Einfluss des Resthohlraumvolumens

Bei der Auswertung von aktuellen Flutungen können sehr unterschiedliche Konzentrationsentwicklungen beobachtet werden. Neben weiteren Einflussgrößen wie dem Pyritgehalt ist vor allem entscheidend, welcher Anteil des Resthohlraumvolumens  $V$  durch die Grubenwasserströmung erfasst wird.

Statistische Untersuchungen zeigen eine eindeutige Korrelation des Auswaschungsgrades der Grube mit der Intensität der Durchspülung, die ausgedrückt werden kann durch das Verhältnis "Austrittsvolumenstrom/Hohlraumvolumen" ( $Q/V$ ). Erfahrungen aus Südfrankreich und Deutschland waren Anlass, den Exponenten in Gleichung (3) mittels eines Korrekturfaktors ( $F$ ) anzupassen, um die standortspezifischen Flutungsbedingungen besser zu berücksichtigen:

$$c(t) = c_0 * e^{[-(Q/(V * F)) * (t)]} \quad (5)$$

Unsere Auswertungen von Flutungen in großen Kohlegruben deuten an, dass der Korrekturfaktor reale Ursachen hat. Es scheint eine Abhängigkeit zu geben zur Intensität der Durchströmung, dem Verhältnis „ $Q/V$ “. Um die Erkenntnisse für Prognoserechnungen verfügbar zu machen, musste der Faktor  $F$  durch eine Funktion  $F(Q/V)$  ersetzt werden. Nutzt man diesen Zusammenhang, so erhält man verbesserte Prognosen bei komplexeren Verhältnissen. Diese Gleichung kann auch in die Massenbilanzgleichung der numerischen Modelle eingeführt werden. Der standortspezifische Faktor  $F$  repräsentiert den Anteil des Resthohlraumvolumens, der tatsächlich durchströmt wird.

## Dichteabhängige Prozesse

Der Konzentrationsaustausch aus gefluteten Bergwerken kann bei Vernachlässigung der dichteabhängigen Prozesse z.T. um Größenordnungen überschätzt werden. Die hochaufgesalzenen Tiefenwässer haben das Bestreben, infolge der großen Dichte in den tiefen Bereichen der Grube zu verweilen. Dem wirken erzwungene Konvektionsströmungen und der Wärmegradient entgegen. Um diese Dichteeffekte zu berücksichtigen, wird im Boxmodell das Konzept des äquivalenten Frischwasserspiegels nach Guo & Langevin (2003) verwendet.

## Praxisbeispiel

Das Boxmodell wird zur Zeit für folgende Steinkohle- und Erzgruben eingesetzt: Uranbergbaubereich Ronneburg (seit 1992), Ruhrgebiet (seit 2002), Saarländisches Kohle-revier (seit 2003), Lorraine-Kohle-Becken/F (2004), Steinkohlengruben Lothringen/Warndt /F, ehemaliges Zwickau-Oelsnitzer Revier (2005), Durham Coalfield/GB (seit 2006), Schlesi-sches Kohlerevier/POL (2006) sowie für sechs Pb-Zn-Gruben in Bulgarien.

Die Anwendung des Modells und ausgewählte Ergebnisse werden am Beispiel der Flutung der Steinkohlengruben in Lothringen/Warndt gezeigt. Erfahrungen aller verfügbaren Flutungsbeispiele wurden dabei genutzt, um die Flutung des Lothringer Kohlebeckens zu berechnen. Hierfür erfolgte zuvor eine Kalibrierung des Boxmodells. Mögliche Entwicklungen des Grubenwasserspiegels wurden bereits in Abb. 4 vorgestellt.

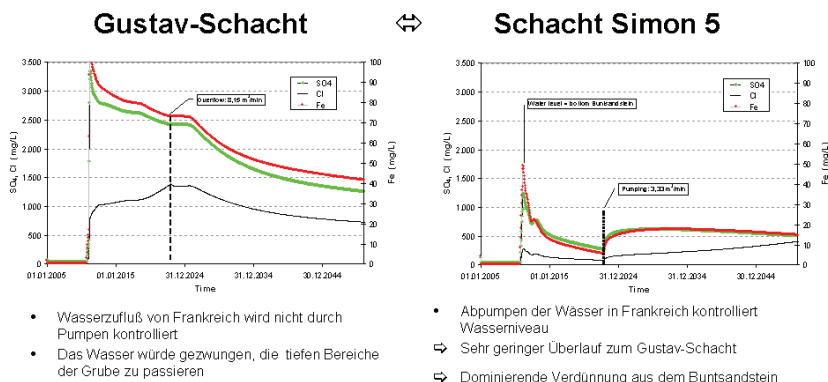


Abb. 7 Entwicklung der Konzentrationsganglinien für  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}$  und  $\text{Fe}$  bei zentraler und dezentraler Wasserhaltung für das Lothringer Koblecken bei unterschiedlichem Grubenwassermanagement

Die Abb. 7 repräsentiert zwei Alternativen für die Entwicklung der Grubenwasserqualität (ausgewählte Parameter: Eisen, Sulfat und Chlorid) an bestimmten Ausflussspunkten.

Der Gustav-Schacht im Rossel-Tal der deutschen Seite ist der tiefste Entlastungspunkt des gesamten Grubenfeldes. In der Alternative 1 wird der Grubenwasserstrom der französischen Gruben nicht durch Pumpmaßnahmen begrenzt und passiert die tiefen Grubenbereiche nach Deutschland. Der Überlauf der Grubenwässer am Gustavschacht ist frühestens in 2022 zu erwarten. Während Eisen und Sulfat mehr oder weniger der erwarteten exponentiellen Abnahme folgen, erhöht sich langfristig der Chloridgehalt, der aus den tiefen Grubenzuflüssen stammt. Bei Alternative 2 wird auf französischer Seite der Anstieg in der Endphase begrenzt, indem ein geringer Volumenstrom entnommen wird. Hier kommt es zu keinem Grubenwasserüberlauf am Gustav-Schacht. Die anfänglichen Konzentrationen sind hierbei relativ gering aufgrund der Verdünnung des Grubenwassers durch Wasser aus dem darüberliegenden Buntsandstein. Aus praktischer und umwelttechnischer Sicht erscheint die Alternative 2 vorteilhafter und wurde so als Vorzugsvariante für praktische Planungen ausgewählt.

## Literatur

- Eckart, M. u.a.: (1993): Flutungskonzeption des Ronneburger Bergbaugebietes, Wismut GmbH, unveröffentlicht
- Blachère, A. (2003): Prévision de la qualité des eaux de la mine de La Houve - Proposition d'un dispositif de traitement passif. CESAME, Fraisses.
- Eckart, M., Kories, H., Rengers, R. & Unland, W. (2004): Application of a numerical model to facilitate mine water management in large coal fields in Germany. / Mine Water 2004 - Process, Policy an progress, Newcastle upon Tyne, vol. 2, 209-218.
- Guo, W., Langevin, D. (2000): A Computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground water flow. SEAWAT - USGS
- Klinger, C. (2003): Chemische Prozesse und Monitoring bei der Flutung von pyrithaltigen Lagerstätten. / Workshop Wismut: Flutungsbedingte Beschaffenheit von Grubenwässern, Chemnitz.
- Paul, M., Sängler, H.-J., Snagowski, S., Märten, H., Eckart, M. (1998 ): Prediction of the flooding process at the Ronneburg site - Results of an integrated approach. / Uranium Mining and Hydrogeology II, Freiberg, 130-139.
- Younger, P.L. (2000): Deep mine hydrogeology after closure: insights from the UK. / Uranium Mining and Hydrogeology III - Uranium in the Aquatic Environment, Freiberg, 25-40.
- Younger, P.L. & Blachère, A. (2003): First-flush, Reverse First-flush and Partial First-flush: Dynamics of Short- and Long-term Changes in the Quality of Water Flowing from Abandoned Deep Mine Systems. / Annual British Columbia ML/ARD Workshop, Vancouver.