

## Numerische Ansätze für die Diskretisierung und hydraulische Simulation von untertägigen Bergwerksflutungen

*Dr. Timo Kessler<sup>1</sup>, Dr. Michael Eckart<sup>2</sup>, Prof. Dr. Maria-Theresia Schafmeister<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Universität Greifswald, Institut für Geographie und Geologie,  
<sup>2</sup>DMT GmbH & Co. KG*

Keywords: *Bergwerksflutung, Steinkohle, Grubenwasseranstieg, Numerische Modellierung*

### 1. Einleitung

Im Dezember 2018 wurde im letzten aktiven deutschen Steinkohlebergwerk Prosper Haniel der Betrieb eingestellt. Mit der Stilllegung der Kohlenförderung beginnen die Aufgaben des Nachbergbaus und damit an vielen ehemaligen Bergwerksstandorten die Flutung und die nachgelagerte Wasserhaltung des Bergwerkes. Bei einer Bergwerksflutung werden in erster Linie die Pumpen auf den Sohlen des Bergwerks abgeschaltet und der Grundwasserspiegel steigt aufgrund von Zuflüssen langsam auf ein bestimmtes Niveau an. Der Wasserzustrom setzt sich aus meteorischem Infiltrationswasser, Tiefenzuläufen aus geklüfteten Aquiferen und Formationswasser zusammen. Wie sich die Komponenten quantitativ aufteilen hängt von der Struktur und den hydraulischen Eigenschaften der überlagernden Schichten und vom Grundwasserfließgeschehen in der Tiefe ab. Bei der Flutung werden häufig stark saline Tiefenwässer durch Mischungsprozesse (turbulente Hohlraumströmung, Heben des Grubenwassers) mit oberflächennahen Wässern vermischt. Dies kann zu einer Verunreinigung sekundärer Grundwassertaquifere sowie zu einer hohen Salzbelastung des gehobenen Wassers führen. Die Grubenwasserhaltung hat diesbezüglich das Ziel ein nachhaltiges Grubenwasserniveau zu identifizieren und einzustellen, bei welchem die relevanten Wasserressourcen geschützt sind und Kontaminationen minimiert werden können.

Um den zeitlichen Verlauf des Grubenwasseranstiegs und die damit verbundenen chemischen Frachten prognostizieren zu können, wurden verschiedene Modellansätze für Bergwerksflutungen entwickelt und dokumentiert (vgl. Toran and Bradbury, 1988; Adams and Younger, 1997; Sherwood, 1997; Burke and Younger, 2000; Gandy and Younger, 2007; Azrag, Ugorets and Atkinson, 2012). Anders als in herkömmlichen Strömungsmodellen in porösen Medien nach Darcy, wird die Wasserbewegung in Grubenhohlräumen mindestens während des Wasseranstieges als turbulent charakterisiert. Grubenflutungen sind daher meist eine Kombination aus Matrixfluss und Hohlraumströmung. Die Modelle können basierend auf der Strömungscharakteristik in drei Ansätze unterteilt werden: a) physikalisch motivierte Modellkonzepte, welche die Strömung zwischen Hohlräumen und Matrix differenziert berechnen, b) semi-explizite Parametermodelle (Boxmodelle), welche die Flüsse über definierte Volumina bilanzieren, sowie c) voll diskretisierte, numerische Kontinuum Modelle. Zwei dieser Ansätze [b) und c)] sollen in diesem Beitrag vorgestellt werden.

## 2. Modelltypen

### *Semi-explizite Parametermodelle*

In den 1990er Jahren wurden für große Bergbaureviere mit mehreren Wasserprovinzen konzeptionelle Modelle miteinander kommunizierender Becken einheitlicher Parametrisierung entwickelt und in Softwarepaketen umgesetzt (GRAM, BoxModell3D). Dabei werden hydraulische Einheiten unabhängig von der räumlichen Geometrie des Grubengebäudes definiert und damit der Rechenaufwand um ein Vielfaches reduziert. Der Ansatz ist vergleichbar mit einem volumetrischen Black-Box-Modell, an dem hydraulische Übertritt- und Ausflussspunkte für jedes Becken separat festgelegt werden. Die Berechnung des Grubenwasseranstiegs basiert auf den gefluteten Beckenvolumina und den für eine Wasserprovinz berechneten Wasserbilanzen (Adams and Younger 2001). Da es sich bei den Parametermodellen um eine Volumenbilanzmodellierung handelt, kommt der Berechnung des flutbaren Hohlraumvolumens eine Schlüsselrolle zu. Dieses wird als Resthohlraumvolumen als Differenz von Rohfördervolumen und Senkungs- und Versatzvolumen definiert (Eckart et al. 2004).



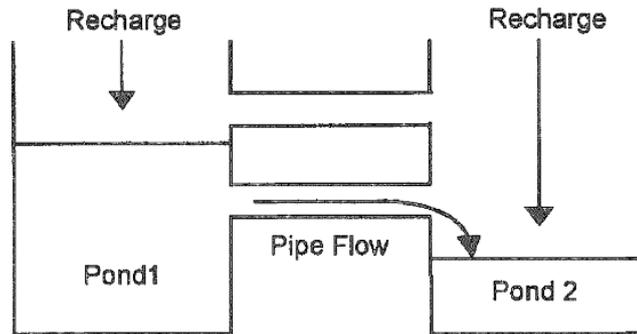


Abbildung 1: Schema des Konzepts der kommunizierenden Röhren/Becken durch Wasserübertrittspunkte wie es im GRAM code implementiert wurde (Sherwood 1997).

### Numerische Kontinuum Modelle

Trotz vielversprechender Ergebnisse und häufiger Anwendung von semi-expliziten Parametermodellen im deutschen Steinkohlenbergbau gibt es auch eine Reihe gut dokumentierter Grubenwasseranstiegsmodelle mittels numerischer Kontinuummodelle. Die meisten Modelle wurden mit der Software MODFLOW (McDonald and Harbaugh 1988) durchgeführt und basieren auf laminaren Strömungsgleichungen. Es zeigt sich jedoch, dass diese Modelle für Bergwerksanwendungen mit einigen Limitierungen behaftet sind. Die notwendigen Datengrundlagen für die Parametrisierung sind oft umfangreich und/oder nicht verfügbar (Kim and Choi 2018). Daneben kann die Diskretisierung des Modellraumes aufgrund der Hohlräumstrukturen kompliziert werden (Adams and Younger 2001). Unabhängig davon wurden in Anlehnung an kleinskalige Hohlraummodelle Erweiterungsmodule für Kontinuum Modelle entwickelt, welche die Kombination von laminarem Matrixfluss mit turbulenter Rohrströmung erlauben (z.B. MODFLOW-CFP (Shoemaker et al. 2005)). Allerdings fehlen hierfür dokumentierte Erfahrungswerte aus Grubenwasseranwendungen.

### 3. Aktuelle Modellentwicklungen

In deutschen Steinkohlerevieren an Saar und Ruhr kommen überwiegend Parametermodelle zum Einsatz um Grubenwasseranstiege und die damit verknüpften Schadstofffrachten zu modellieren. Diese Modelle sind jedoch, was die Repräsentation der Geologie und die Parametrisierung der untertägigen Strukturen und Hohlräume angeht, stark vereinfacht. Insbesondere das komplexe Fließverhalten im Untergrund (turbulent bei Flutung, laminar in Hohlräumen, Darcy im Nebengestein) kann rechnerisch nicht abgebildet werden. Mit numerischen Modellen, welche auf Basis stratigraphischer und strukturgeologischer Kenntnisse inklusive anthropogen geschaffener Grubenhohlräume diskretisiert werden, können hydraulisch relevante Strukturen implementiert werden. Darüber hinaus stehen für die verschiedenen Fließstypen

entsprechende Gleichungen zur Verfügung, welche geometrisch differenziert kombiniert werden können. Verschiedene Versuche mit FEM Modellen haben dabei gezeigt, dass insbesondere die Geometrie und die räumliche Dimension der Grubenhohlräume zu Konvergenzproblemen führen können. Ein wesentlicher Arbeitsschritt erfolgreicher Modellierungen besteht in der sorgfältigen Diskretisierung der Hohlräume und der benachbarten Gesteinsmatrix, da hier die größten Gradienten physikalischer Parameter auftreten. Vielversprechende Ergebnisse können insbesondere mit unstrukturierten, tetraedrischen Netzen erzielt werden, welche kleinräumige Strukturen in großen Modellgebieten recheneffizient abbilden können.

Die Frage nach dem passenden Modellansatz ist auch eine Frage Datenverfügbarkeit und der zu modellierenden räumlichen Skala. Einerseits unterstützen inverse Parametermodelle eine rasche und verlässliche Berechnung beobachteter Grubenwasserdynamiken. Die Kalibrierung über die Volumenströme lässt dabei eine hohe Genauigkeit der prognostizierten Anstiegskurven zu und erlaubt die Berechnung von Schadstofffrachten in bestimmten Wasserprovinzen. Numerische Ansätze können das reale Fließgeschehen in Grubengebäuden inklusive der unterschiedlichen Fließtypen differenziert abbilden. Die Modelle lassen sich allerdings aufgrund der Komplexität schwer diskretisieren und erfordern eine strenge Validierung der Randbedingungen. Bei der Weiterentwicklung numerischer Modellansätze für Grubenwasseranstiege können insbesondere Parametermodelle als wertvolle Benchmark dienen und sollten als solche wissenschaftlich berücksichtigt werden.

#### 4. Literatur

Adams, R., and P.L. Younger. 1997. "Simulation of Groundwater Rebound in Abandoned Mines Using a Physically Based Modelling Approach." *International Mine Water Association IMWA*, 353–62.

Adams, R., and P.L. Younger, 2001. "A Strategy for Modeling Ground Water Rebound in Abandoned Deep Mine Systems." *Ground Water*. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02306.x>.

Azrag, E.A., V.I. Ugorets, and L.C. Atkinson. 2012. "Use of a Finite Element Code to Model Complex Mine Water Problems," 31–41.

Burke, S.P., and P.L. Younger. 2000. "Groundwater Rebound in the South Yorkshire Coalfield: A First Approximation Using the GRAM Model." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 33 (2): 149–60.  
<https://doi.org/10.1144/qjegh.33.2.149>.



Konferenzband zur 1. Fachkonferenz GeoMAP, Freiberg

Eckart, M., Brüggemann, Hewig, Kunz, Langosch, Marzilger, Rüterkamp, Schiffer, and TeKook. 2004. "Abschlussbericht Resthohlraumvolumen."

Gandy, C.J., and P.L. Younger. 2007. "Predicting Groundwater Rebound in the South Yorkshire Coalfield, UK." *Mine Water and the Environment* 26: 70–78.  
<https://doi.org/10.1007/s10230-007-0153-7>.

Kim, Sung Min, and Yosoon Choi. 2018. "SIMPL: A Simplified Model-Based Program for the Analysis and Visualization of Groundwater Rebound in Abandoned Mines to Prevent Contamination of Water and Soils by Acid Mine Drainage." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (5).  
<https://doi.org/10.3390/ijerph15050951>.

McDonald, Michael G., and Arlen W. Harbaugh. 1988. "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model." *Techniques of Water-Resources Investigations*.  
<https://doi.org/10.3133/twri06A1>.

Sherwood, J.M. 1997. "Modelling Minewater Flow and Quality Changes after Coalfield Closure." Newcastle University.

Shoemaker, W Barclay, Eve L Kuniatsky, Steffen Birk, Sebastian Bauer, and Eric D Swain. 2005. "Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005." *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A24*, 50.

Toran, Laura, and Kenneth R. Bradbury. 1988. "Ground-Water Flow Model of Drawdown and Recovery Near an Underground Mine." *Ground Water* 26 (6): 724–33.  
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00423.x>.