

# Grundlagen von Schichtungsprozessen in gefluteten Untertagebergwerken

LUDWIG LUCKNER, ALEXANDER MORGENSTERN, Germany

Die Steuerung der Wasser- und Stoffströme in gefluteten Grubengebäuden, und damit die Beförderung der Ausbildung einer Schichtung, setzt eine tiefgreifende Prozesskenntnis der inneren und äußeren Triebkräfte voraus. Dazu zählen die von außen beeinflusste erzwungene Konvektion und die im inneren durch

Massenkräfte hervorgerufene freie Konvektion. Die Betrachtung dieser beiden Prozesse bildet die Grundlage für gesamt-systemare Prozessbeschreibungen in Form von modelltechnischen Abbildungen.

## Basics of stratification processes in flooded deep minings

The management of the water- and substance streams requires the knowledge of the inner and outer driving forces: the enforced convection influenced from the outside and the free convection

caused by the inner mass-forces. The description of the processes in the entire system in terms of model-technical transformations is based on these convections.

Die Wasser- und Stoffströme in gefluteten Grubengebäuden werden durch innere und äußere Einwirkungen getrieben. Eine bewusste Steuerung dieser Prozesse setzt eine tiefgreifende Prozesskenntnis voraus. Ziel solch einer Steuerung ist oftmals die Ausbildung einer Schichtung im Wasserkörper der gefluteten Grube. Diese zeichnet sich durch Wässer mit günstiger Beschaffenheit in den Erdoberflächen nahen Bereichen aus, welche die Oberflächengewässer im Randbereich speisen, und die Wässer mit hoher Stoffkonzentration überschichten. Die durch äußere Einwirkungen erzwungene Konvektion wird dabei von der durch innere Triebkräfte (Massenkräfte) bewirkten freien Konvektion überlagert. Beiden Prozessen sei deshalb nachfolgend nochmals Aufmerksamkeit gezollt, ehe gesamt-systemare Prozessbe- trachtungen und ihre modelltechnische Reflektion einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

## 1 Erzwungene Konvektion

Treibende Kräfte für die konvektiven Wasserströme in einem gefluteten oder in Flutung befindlichen Grubengebäude sind

- die Zu- und Abflüsse über die Grenzflächen des zu betrachtenden Wasserkörpers mit seinem Umfeld, die durch ihre extensiven und intensiven Kennwerte flux und pressure determiniert sind,
- die durch Niederschläge und infiltrierende Oberflächengewässer gespeisten Sickerwässer, die dem zu betrachtenden Wasserkörper von der Tagesoberfläche aus zugehen, insbesondere determiniert durch ihre flux-Werte,

- die aus dem Grubengebäude abgepumpten Wassermengen und die in das Grubengebäude eingeleiteten bzw. verstürzten Wassermengen, determiniert durch ihre flux-Werte, und
- die im Endzustand gefluteter Gruben exfiltrierenden Grubenwässer, die in die lokalen Vorfluter austreten.

Die treibenden Kräfte für die konvektiven Wasserströme im zu betrachtenden Wasserkörper, der die Hohlform des Grubengebäudes kohärent ausfüllt, sind in der „Sprache der Modellierer“ die Randbedingungen 1., 2. und 3. Art, während der zu betrachtende Wasserkörper der von seinem Umfeld aus- bzw. abgegrenzte Modellraum ist, auf den sich alle Betrachtungen fokussieren.

Für die modellgestützte Beschreibung der konvektiven Wasserströme im Modellraum wird dieser gewöhnlich finitisiert, d.h. in finite Teilräume untergliedert. Eine zu feinteilige Finitisierung mit einer sehr großen Anzahl finiter Elemente hat sich im applikativen Bereich zumeist nicht bewährt. Auch eine zu grobe Diskretisierung, so auch die 0-dimensionale Betrachtung des gesamten Wasserkörpers des Grubengebäudes, ist gewöhnlich nicht die problemadäquate Lösung. So ist es ganz natürlich, dass heute als vorteilhafte Lösung die Fragmentierung, d.h. die Strukturierung des Modellraumes, in eine moderate Zahl von Fragmenten gesehen wird [1, 2].

Einer Fragmentierung ist z.B. auch der Wasserkörper des in Flutung befindlichen Grubengebäudes in Ronneburg zur modellgestützten Reflektion der konvektiven Wasserströme unterworfen worden. Abbildung 1 zeigt diese als Boxmodell bezeichnete Modellstruktur mit ihren Zellen (Zelle steht hier für Fragment). Die Zellen gilt es bei derartigen Modellstrukturen sehr sorgfältig und wohl begründet auszuwählen. Sie bilden im Modell die kleinsten Elemente, die gewöhnlich als repräsentative Elementarvolumina (REV) bezeichnet werden. Sie sind bezüglich ihrer Strömungs- und Stoffdynamik durch ihre repräsentative Elementarzeit (REZ) gekennzeichnet [1, 2]. Die intensiven und extensiven Zustands- und Prozessgrößen – so z.B. die Wasserdrücke und Stoffkonzentrationen – sind für diese REV und REZ gelumpete (örtlich und zeitlich gemittelte) Größen, was ihren Vergleich mit Messwerten, die ein örtliches und zeitliches Messfenster haben, enorm erschwert.

PROF. DR.-ING. HABIL. LUDWIG LUCKNER,  
GFI Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden,  
Meraner Str. 10, 01217 Dresden, Germany  
Tel. +49 (0) 351-4050-660, Fax +49 (0) 351-4050-679  
e-mail: lluckner@gfi-dresden.de

Dr.-Ing. ALEXANDER MORGENSTERN,  
Dept. Thermal Systems and Buildings,  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Germany  
Tel. +49 (0) 761-4588-5107, Fax +49 (0) 761/4588-9107  
e-mail: alexander.morgenstern@ise.fraunhofer.de

Vortrag anlässlich des Wismut-Workshops „Flutungsbedingte Beschaffenheit von Grubenwässern“ vom 6. bis 7. Mai 2003 in Chemnitz.

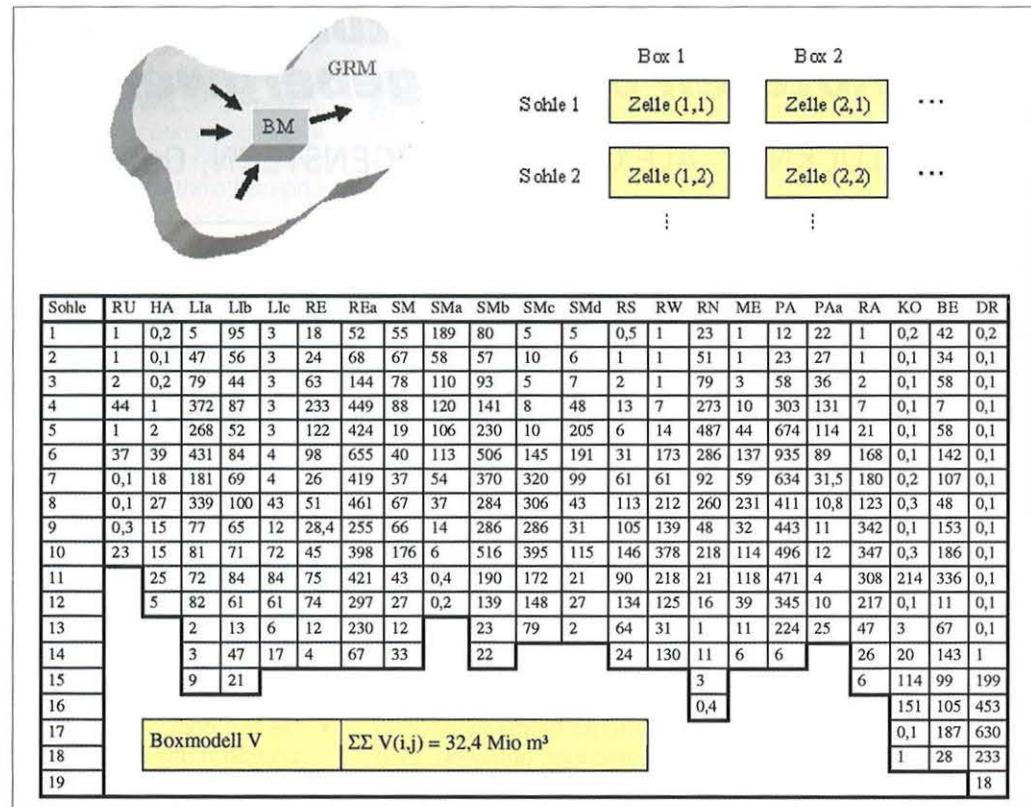


Abb. 1:  
Strukturmodell des Wasserkörpers  
der Grube Ronneburg nach KALKA  
et al. [3]

Die Verkopplung der Fragmente bzw. Zellen zur Reflektion der möglichen Wasser- und Stoffströme (fluxes) wird gewöhnlich durch Kopplungsmatrizen widergespiegelt, die beschreiben, mit welchen Zellen eine bestimmte betrachtete Zelle (A) Wasser und Stoff austauschen kann. Die Kopplungsmatrix widerspiegelt somit die räumlich-hydraulische Vernetzung des Wasserkörpers im Grubengebäude durch Strecken, Blindschächte, Bohrungen, Klüfte u.a.m. Von Null verschieden sind deshalb in der Regel Kopplungen zwischen örtlich benachbarten Zellen, wenn der Austausch nicht durch errichtete Absperrbauwerke oder Verwahrung von Schächten technisch unterbunden wurde.

Als mathematisches Modell für die Widerspiegelung der Wasser- und Stoffaustauschströme zwischen den verkoppelten Zellen müssen die Ströme in Abhängigkeit der diese Strömungen treibenden Größen beschreibbar werden. Hierfür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine relativ einfache lineare funktionale Beschreibung wurde von uns z. B. in LUCKNER et al. [4] wie folgt vorgeschlagen:

Für die Wasserströme in beliebiger Richtung zwischen der Zelle A und B

$$Q_{A \rightarrow B} \approx \frac{k_{AB} \cdot A_{AB}}{\Delta L_{AB} \cdot g \cdot \rho_{w,AB}} [g \cdot (\rho_w \cdot \Delta z)_{AB} + \Delta p_{AB}] \quad (1)$$

Für die Stoffströme zwischen den Zellen A und B des Stoffes x

$$F_{x,A \rightarrow B} \approx Q_{A \rightarrow B} (c_{x,A} + \delta_{AB} (c_{x,A} - c_{x,B}) / \Delta L_{AB}) \quad (2)$$

mit  $Q_{A \rightarrow B}$ : Volumenstrom des von Zelle A nach Zelle B strömenden Wassers in  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $k_{AB}$ : Durchlässigkeitskoeffizient der Verbindung zwischen den Zellen A und B in  $\text{m}/\text{s}$  (diesen Parameter gilt es im Feld experimentell zu bestimmen oder durch hydraulische Berechnung des Strömungsprozesses in der Verbindung zu lumpen),  $A_{AB}$ : Querschnittsfläche der Verbindung zwischen den Zellen A und B,  $\Delta L_{AB}$ : Länge der Verbindung zwischen den Zellen A und B, g: Erdbeschleunigung in  $\text{m}/\text{s}^2$ ,  $\rho_{w,AB}$ : mittlere Dichte des Wassers in der Verbindung zwischen den Zellen A und B in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $\Delta z_{AB}$ : Höhendifferenz zwischen den lumping points der Zellen A und B in m,  $\Delta p_{AB}$ : Druckdifferenz zwischen den lumping points der Zellen

A und B in  $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}/(\text{s}^2\text{m})$ ,  $F_{x,AB}$ : Stoffstrom des Stoffes x im Wasser in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $c_{x,A}$ : Konzentration des Stoffes x im Wasser in  $\text{kg}/\text{m}^3$  und  $\delta_{AB}$ : hydrodynamische, an die Konvektion gebundene Dispersivität in m ( $\delta_{AB}$  ist eine charakteristische Länge, die die Strukturheterogenität des Strömungsfeldes reflektiert).

Triebgrößen für den Wasserstrom sind somit gemäß Gleichung 1 der Druck und die Schwerkraft und für die Stoffströme der konvektive Wasserstrom, der den Stoff x konvektiv verfrachtet und dispersiv verteilt bzw. vermischt.

Mit den Flux-Gleichungen Gleichung 1 und 2 gilt es, die Bilanzgleichungen für alle Fragmente bzw. Zellen zu formulieren. Diese Bilanzgleichungen lauten für die Zelle A:

$$\frac{d(p_w \cdot V)_A}{dt} = \sum_B (Q_{A \leftarrow B} \cdot \rho_{w,B}) \pm \sum S_{w,A} \quad (3)$$

wobei S den source/sink-term reflektiert, der die zwischen der Zelle A und externen Quellen und Senken ausgetauschten Wasserströme reflektiert, und

$$\frac{dm_{x,A}}{dt} = \sum_B F_{A \leftarrow B} \pm \sum R_{x,A} \quad (4)$$

wobei  $\sum R_{x,A}$  die Stoffströme widerspiegelt, die durch homogene und heterogene Reaktionen in der Zelle gebildet werden oder verschwinden. Maßgebende homogene Reaktionen im Wasser einer Zelle sind dabei natürlich die Assoziations/Dissoziations-, Säure/Base- und Oxidations/Reduktions-Prozesse. Die heterogenen Reaktionen werden vor allem von den Austausch- und Lösungs/Fällungsprozessen und biologischen Metabolismen determiniert. Ihre Simulation als thermodynamische Gleichgewichtsprozesse oder als kinetische Prozesse erfolgt heute gewöhnlich mit Hilfe des hydrogeochemischen Modells PHREEQC.

## 2 Freie Konvektion

Die freie Konvektion in einem Wasserkörper wird durch innere Triebkräfte bewirkt. Sie gilt es, in unterschiedlicher Maßstabsebene zu betrachten:

## 2.1 Micro-Scale

Im Molekularmaßstab gilt es prioritätär zwei gegenläufige Prozesse zu untersuchen. Dies sind

- die gravitative Differentiation und
- die ihr entgegenwirkende molekulare Diffusion.

Die treibenden Kräfte für die gravitative Differentiation im Wasser sind die Unterschiede der Molekül- bzw. Ionen-dichten  $\rho_i$  der Komponenten, die die Mischphase Wasser bilden. Die Ionen-dichtedifferenzen bewirken Auf- und Abtriebskräfte in der aquatischen Mischphase. Bezogen auf die Ionen-dichte des Wassers ergibt sich z.B. die relative Ionen-dichte  $\rho'$  zu:

$$\rho'_{\text{HCO}_3^-} < \rho'_{\text{SO}_4^{2-}} \quad \text{bzw.} \quad \rho'_{\text{Ca}^{2+}} < \rho'_{\text{Mg}^{2+}} \quad (5)$$

Die gravitative Differentiation ist deshalb als treibende Kraft z.B. dafür verantwortlich, dass  $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$  und  $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$  bzw.  $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$  bestrebt sind, sich im oberen Bereich eines Wasserkörpers anzureichern und  $\text{Mg}^{2+}(\text{aq})$  und  $\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$  im Tiefenbereich. Überlagert wird dieser Prozess durch Fällungsreaktionen. Da  $\text{NaCl}$  eine sehr hohe Löslichkeit besitzt, ist im Tiefenwasser z.B. auch von Ronneburg eine hohe  $\text{Na}^+(\text{aq})$ - und  $\text{Cl}^-(\text{aq})$ -Konzentration zu erwarten. Wie KALKA et al. [3] erwähnen, ist die Ionenwanderung zwischen benachbarten aquatischen REV bei Beachtung der Ladungsbilanz mit PHREEQC unter Benutzung des Reactions-Befehls simulierbar und damit nur für jeweils eine Zelle betrachtbar.

Die molekulare Stoffdiffusion erstrebt einen Konzentrationsausgleich in der aquatischen Phase. Sie wirkt damit der gravitativen Differentiation im Micro-Scale entgegen. Die molekulare Stoffdiffusion basiert auf der Brownschen Molekularbewegung, die die Entropie der Moleküle in der Mischphase Wasser (gekennzeichnet durch aq) reflektiert. Betrachtet man eine vertikale Wassersäule, so bewirkt die molekulare gravitative Differentiation vertikale Konzentrationsunterschiede, die die molekulare Stoffdiffusion wieder auszugleichen sucht. Im thermodynamischen Gleichgewichtszustand sind beide Stoffflüsse gleich groß. Abbildung 2 widerspiegelt solch einen Zustand unter hydrostatischen Verhältnissen in einem Wasserkörper. Dieser thermodynamische Gleichgewichtszustand einer linearen vertikalen Konzentrationsverteilung von Stoffen im Wasserkörper – der auch eine lineare vertikale Dichte-Verteilung der Mischphase Wasser bewirkt – wird gewöhnlich als Bezugszustand genutzt. Bei der Störung dieses Profils werden treibende Kräfte frei, die eine Rückkehr zu diesem Bezugszustand durch freie konvektive Ausgleichsströmungen anstreben.

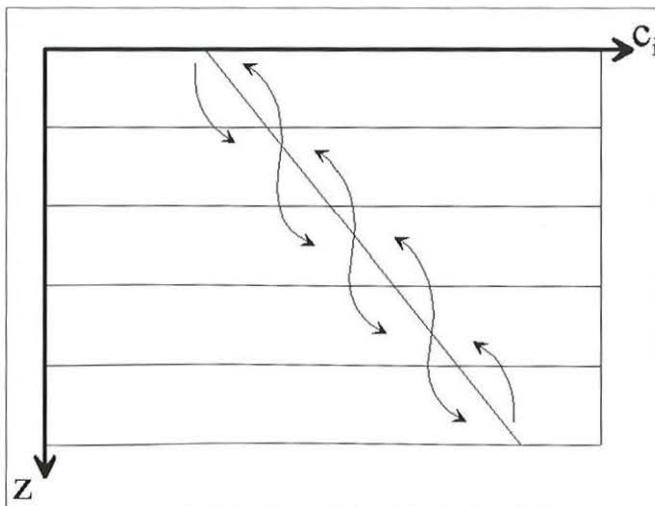


Abb. 2: Thermodynamisches Gleichgewichtsprofil für einen Stoff mit relativ hoher Ionen-dichte  $\rho_i$ , unter der Wirkung der molekularen gravitativen Differentiation und der molekularen Diffusion bei hydrostatischen Verhältnissen in einem Wasserkörper

## 2.2 Local-Scale

Bei der Untersuchung von Strömungsprozessen wird das Wasser als kohärente Mischphase betrachtet. In dieser Mischphase bilden die  $\text{H}_2\text{O}$ -Moleküle den Solventen und die Beschaffenheits-formierenden Komponenten die Solutes. Die Eigenschaften der Mischphase Wasser lassen sich beispielsweise durch die Kompressibilität  $\kappa$ , die Dichte  $\rho$ , die Viskosität  $\eta$  und die Oberflächenspannung  $\sigma$  kennzeichnen. Die Kennzeichnung setzt voraus, dass als repräsentatives Elementarvolumen REV ein Wasservolumen zu setzen ist, in dem die das Wasser bildenden Komponenten als statistisch verteilt angenommen werden können.

Die Dichte der Mischphase Wasser  $\rho_w(x,y,z)$  im physikalischen Systempunkt P (x,y,z) des betrachteten REV ist durch den Quotienten der extensiven thermodynamischen Zustandsgrößen Masse  $\Delta m$  und Volumen  $\Delta V$  des REV für den P (x,y,z) definiert, der den lumping-point darstellt. Sie ist deshalb zwangsläufig funktionell von den intensiven thermodynamischen Zustandsgrößen Druck  $p$ , Temperatur  $T$  und stofflicher Zusammensetzung der Mischphase  $n_1, \dots, n_k$  abhängig:

$$\rho_w(x,y,z) = m_w / V_{\text{REV}(x,y,z)} = f(p, T, n_1, \dots, n_k) \quad (6)$$

(näherungsweise wird oftmals  $n_1, \dots, n_k$  durch  $c_{\text{TDS}}$  ersetzt; TDS – total dissolved solids)

Die Änderungen der Dichte des Wassers in Abhängigkeit der intensiven Zustandsgrößen hat beispielsweise im Wasserkörper der Grube Ronneburg folgende Größenordnung [1, 5]:

$$\Delta \rho / \rho \approx -\Delta V / V = \kappa \Delta p|_{T,n} - \alpha \Delta T|_{p,n} + \beta \Delta c_{\text{TDS}}|_{p,T} \quad (7)$$

mit  $\kappa \approx 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$  bei  $15^\circ\text{C}$  und geringem Stoffgehalt,  $\alpha \approx 1,52 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  bei  $15^\circ\text{C}$  und 10 bar und geringem Stoffgehalt und  $\beta \approx 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ L/g TDS}$  bei  $15^\circ\text{C}$  und 10 bar (TDS – total dissolved solids).

Betrachtet man hiervon ausgehend beispielsweise die Dichteänderungen über eine Teufenänderung von  $\Delta z = 100 \text{ m}$  im Wasserkörper einer in Flutung befindlichen Grube, so ergeben sich mit  $\Delta p \approx 1,0 \text{ MPa}$ ,  $\Delta T \approx 2,6 \text{ K}$  bei einer geotherm. Tiefenstufe von  $38 \text{ m/K}$  und  $\Delta c_{\text{TDS}} \approx 0,7 \text{ g}_{\text{TDS}}/\text{L}$  die relativen Volumen- bzw. Dichteänderungen zu:

$$\Delta \rho / \rho|_{T,n} = \kappa \Delta p|_{T,n} \approx 4,7 \cdot 10^{-4}, \quad \Delta \rho / \rho|_{p,n} = -\alpha \Delta T|_{p,n} \approx -4,0 \cdot 10^{-4} \quad \text{und}$$

$$\Delta \rho / \rho|_{p,T} = \beta \Delta c_{\text{TDS}}|_{p,T} \approx 5,6 \cdot 10^{-4}.$$

Die Auf- und Abtriebsströme, die durch Dichteunterschiede des Wassers bewirkt werden, soll Abbildung 3 veranschaulichen. Der

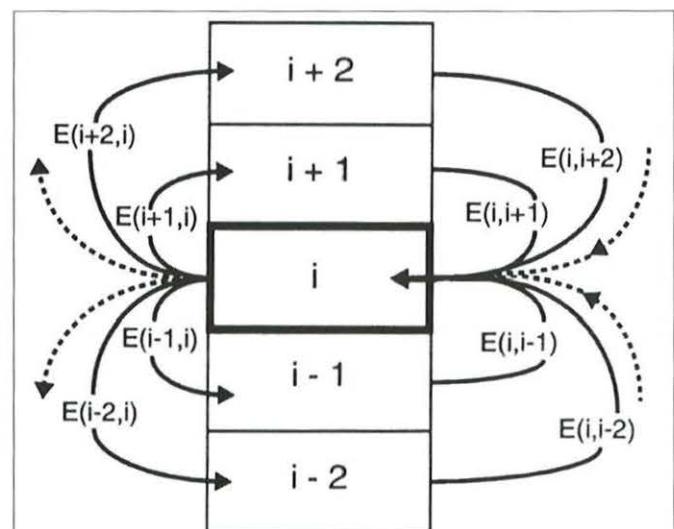


Abb. 3: Dichte-getriebener Stofftransport in einer vertikalen Wassersäule als parcel transport mit den Volumenströmen  $Q = E$  und dem Massenstrom  $\dot{m} = \sum(Q(i,j)c_j) - c_i \sum Q(j,i)$  nach LERMAN et al. [5]

Massenfluss des Wassers erfolgt in einer vertikalen Wassersäule hiernach als so genannter Paket-Transport, der von STULL [6] als Transient Turbulence Transport bezeichnet wurde. Die ausgetauschten finiten kleinen Wasserkörper (parcels) müssen dabei nicht benachbart sein.

Treibende Kraft für die Dichte-bewirkte Strömung als parcel transport ist nur die Dichteänderung infolge Temperatur- und Konzentrationsänderung. Der Term  $\kappa\Delta p$  kann keine Vertikalströmung bewirken, weil das Parcel beim Auf- oder Abstieg den Umgebungsdruck sofort übertragen bekommt. Dies ist für den Stoffgehalt (gekennzeichnet durch  $c_{TDS}$ ) und den inneren Energiegehalt (gekennzeichnet durch  $T$ ) für das auf- oder absteigende Parcel anders.

Vernachlässigt man die adiabatische Temperaturänderung  $\Delta T / \Delta z|_{T,n}$ , so ergibt sich als Bedingung für eine stabile vertikale Schichtung eines Wasserkörpers für den Fall, dass keine erzwungene Konvektion im Wasserkörper auftritt, folgende Bedingungsgleichung

$$\alpha dT/dz < \beta dc_{TDS}/dz \text{ bzw. } \alpha dT < \beta dc_{TDS} \quad (8)$$

d.h. der Dichtezuwachs infolge eines Anstiegs des Salzgehaltes  $c_{TDS}$  mit zunehmender Eintauchtiefe in den Wasserkörper der Grube muss größer sein als die Dichteabnahme infolge des Temperaturanstiegs  $T$ .

## 2.3 Systems-Scale

Die Ausbildung gravitativer Schichtungsprozesse unter der Einwirkung freier und erzwungener Konvektion und der an sie gebundenen turbulenten Mischprozesse ist im Maßstab des betrachteten Wasserkörpers (Systemmaßstab) für Seen seit Jahrzehnten tiefgründig untersucht worden. Bei der Flutung der Tagebaurestlöcher des Braunkohle-Bergbaus z.B. bilden sich Restseewasserkörper aus, die vor allem im Sommer eine ausgeprägte Dichte-Schichtung aufweisen können. Abbildung 4 zeigt hierzu eine schematische Darstellung der Strukturierung des Wasserkörpers eines Tagebaurestsees und seiner Verkopplung mit dem Gewachsenen und den Kippen seines Umfeldes.

Diese Abbildung soll zeigen, dass die durch extern eingetragene Energie bewirkte erzwungene Konvektion im Restseewasserkörper und die eine Dichte-bedingte Schichtung formierende

freie Konvektion (zur Minimierung der Lageenergie) im gesamten Wasserkörper oder nur in Teilen ein Fließgleichgewicht auszubilden vermögen. Die drei Teilwasserkörper Epi-, Hypo- und Monolimnion sind dabei durch relativ gleiche Dichteverteilungen gekennzeichnet, während in relativ geringmächtigen Sprungsschichten zwischen ihnen relativ große Dichtegradienten auftreten. Diese Sprungsschichten leisten der Durchmischung durch erzwungene Konvektion erheblichen Widerstand, so dass eine Grobstruktur des Wasserkörpers typisch ist.

Im Wasserkörper einer in Flutung befindlichen Grube unterscheiden sich die Prozesse der freien und erzwungenen Konvektion von denen eines in Flutung befindlichen Tagebaurestsees vor allem dadurch,

- dass die erzwungene Konvektion nicht durch Windenergieeintrag sondern nur über die zu betrachtenden Wasserzu- und Wasserabflüsse über die Systemgrenzen (Randzuflüsse, Infiltration, Wasserübertritte, Abpumpmengen, Versickerungsmengen) bewirkt werden,
- dass die Dichte-getriebene freie Konvektion im Grubenwasserkörper durch einen ganzjährig wirkenden geothermischen Erdwärmestrom, der von unten nach oben gerichtet ist, und den Konzentrations-bedingten Dichteunterschieden benachbarter Wasserelemente (parcels) den Restseebedingungen im Winter ähnlicher als im Sommer ist und
- dass der freien und erzwungenen Konvektion im Grubenwassergebäude wesentlich größere Fließwiderstände entgegenstehen als im Restsee.

## 3 Beförderung der Schichtung im Grubenwasserkörper

### 3.1 Modellgestützte Prognose der Formierung der Schichtung

Für die Beförderung der Schichtung im Flutungswasserkörper eines Grubengebäudes fällt einem zuverlässigen Prognose-Tool der Zustandsentwicklung prioritäre Bedeutung zu. Die Zustandsvariablen derartiger Modellwerkzeuge determinieren vorrangig die anzuwendenden Verfahren zur Probenahme, Analyse und Auswertung von Wasserproben, die der fortlaufenden Verifikation

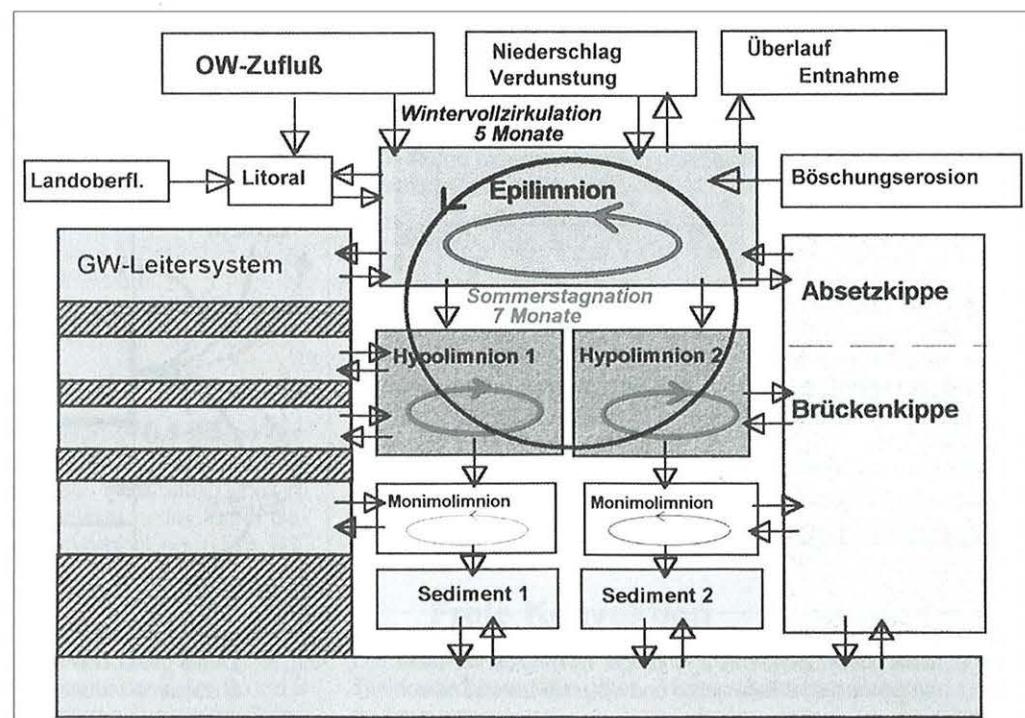


Abb. 4:  
Dichte-bedingte Strukturierung  
des Wasserkörpers eines Tage-  
baurestsees nach LUCKNER et al. [7]

des Prognosemodells und seiner weiteren Ertüchtigung dienen müssen. Die Auswirkungen jedweder Maßnahme im Rahmen der Flutung lassen sich dann modellgestützt prognostizieren. Entscheidungsfindungen über die Ergreifung oder Unterlassung von Maßnahmen bzw. die Bemessung/Auslegung der Maßnahmeparameter gilt es hierauf zu gründen.

Die gewöhnlich erhobenen Messwerte der Zustandsvariablen und Flüsse sind den Elementareinheiten der Fragment- bzw. Boxmodelle nicht adäquat. Es müssen deshalb Vorschriften bzw. Algorithmen entwickelt werden, die die gewonnenen Messwerte mit ihrer kleinräumlichen Repräsentanz in aggregierte Werte für den Raum des Grubengebäudes überführen, der von einer Zelle bzw. Verbindung repräsentiert wird, mit deren Zustandsvariablen oder Flussgrößen der Vergleich geführt werden soll. Der Kenntnisstand hierzu ist unzureichend und damit die fortlaufende Validierung und Ertüchtigung von Fragmentmodellen noch immer nur bedingt möglich. Es wird deshalb für dringend gebeten erachtet, Zuordnungs-/Transfer-Vorschriften bzw. Algorithmen zu begründen, die angeben, mit welchen der Messwerte (Analysen) unter Anwendung bestimmter Vorschriften die aggregierten „Ist-Werte“ gebildet werden und mit welchen die Zellzustands- und Verbindungsflussgrößen des Fragmentmodells adäquat verglichen werden können.

### 3.2 Leitlinien zur Förderung der Schichtungsformierung

Die Gewährleistung einer Schichtung des Flutungswasserkörpers eines Grubengebäudes dergestalt, dass sich die höher konzentrierten, wärmeren Wässer unten und die niedriger konzentrierten, kälteren Wässer oben im gefluteten Grubenwassergebäude einschichten, setzt voraus,

- dass die erzwungene Konvektion und die an sie gebundene hydrodynamische Dispersion so klein als möglich gehalten wird und
- dass die Speisung des Flutungswasserkörpers im Zentralbereich der Grube, wo hohe  $c_{TDS}$ - und  $dc_{TDS}/dz$ -Werte auftreten, mit relativ wenig Infiltrat erfolgt, das geringere  $c_{TDS}$ -Gehalte und möglichst hohe Wassertemperaturen aufweist und dass die Entlastung des Flutungswasserkörpers in den Randbereichen des Grubenfeldes gewährleistet wird. Diese Aussage ist z. B. gleichbedeutend damit, dass eine Entlastung – d.h. Abpumpen – im Zentralbereich einer Grube zum Aufstieg von Wässern größerer Dichte führt; dieser Prozess ist als salt-water upconing bekannt und in der Regel unerwünscht.

Im Stadtgebiet von Bitterfeld, wo mit der Fremdwasserflutung der Tagebaurestlöcher der Goitsche der Grundwasserspiegel ansteigt, wurde die Überschichtung des schadstoffhaltigen mineralisierten Grundwasserkörpers unter der Stadt mit einem Frischwasserkörper durch Versickerung von warmem Wasser aus Oberflächengewässern, von Beregnungswasser bzw. über techn. Infiltrationselemente (Dränleitungen, Brunnen) im Sommer untersucht. Auch dabei ist es das Ziel gewesen, dass möglichst gering belastetes Grundwasser in die Vorfluter austritt [9].

### 3.3 Fazit

Zur Förderung der im Ziel der Flutung eines Grubengebäudes angestrebten Dichte-bedingten Schichtung des Wasserkörpers gilt es, die extern steuerbaren konvektiven Einflüsse zu optimieren.

Die vertikale Dichteänderung infolge des gelösten Stoffgehaltes  $dp_{TDS}/dz$  sind im Flutungswasserkörper den vertikalen Dichteänderungen infolge der geothermischen Temperaturverteilung  $dp_T/dz$  entgegen gerichtet und können sich in ungünstigen Fällen deshalb weitgehend aufheben. Der Schichtung entgegen wirken weiterhin die konvektiven Prozesse, welche von hydromechanischen Mischungsvorgängen (Dispersionsprozessen) begleitet sind. Die erstrebte gravitative Schichtung ist somit beförderbar, wenn die erzwungene Konvektion behindert wird, was vor allem durch Verminderung von örtlichen Wasserentnahmen, insbesondere im Zentralteil, und durch Erhöhung der hydraulischen Strömungswiderstände im Grubengebäude bewirkt werden kann.

## Literatur

- [1] BUSCH, K.-F., LUCKNER, L. & TIEMER, K. (1993): Geohydraulik (Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 3, 3. neubearbeitete Auflage), 497 S.; Berlin/Stuttgart (Gebrüder Bornträger).
- [2] LUCKNER, L. & SCHESTAKOW, W.M. (1991): Migration Processes in the Soil and Groundwater Zone. 485 p; Florida (Lewis Publishers, Inc.).
- [3] KALKA, H., HERMANN, F. & MÜNZE, R. (2002): Schichtungs- und Reduktionsprozesse – Auswirkungen von geplanten Flutungsszenarien auf die hydraulische und geochemische Langzeitstabilität innerhalb der Grube – Boxmodell V –, Abschlussbericht der UIT GmbH im Auftrag der Wismut GmbH Chemnitz; 100 S.
- [4] LUCKNER, L. & MÖRGENSTERN, A. (2002): Studie „Überprüfung der bei der Flutung des Grubengebäudes Ronneburg angewendeten Verfahren zur Probenahme, Analyse und Auswertung von Wasserproben vor dem Hintergrund der beobachteten Schichtung des Flutungswassers“, Dresdner Grundwasserforschungszentrum e.V – Studie im Auftrag der Wismut GmbH Chemnitz.
- [5] LERMAN, A., IMBODEN, D. & GAT, J. (Hrsg.) (1995): Physics and Chemistry of Lakes. 2. Aufl., 334 S.; Springer Verlag.
- [6] STULL, R.B. (1984): Transient Turbulence Theory, Part 1, The concept of eddy mixing across finite distances. – J. Atmos. Sci., **41**: 3351-3367.
- [7] LUCKNER, L., GOCKEL, G. & SEIDEL, K.-H. (1997): Restlochflutung – Gefahrenabwehr, Wiedernutzbarmachung und Normalisierung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse im Lausitzer Revier; Broschüre: Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH; 85 S.; Berlin (Presse- und Öffentlichkeitsarbeit).
- [8] WERNER F. (1999): Modellgestützte Untersuchungen zur Genese der Wasserbeschaffenheit in Folgelandschaften des Braunkohlebergbaus, Dissertationsschrift, Universität Leipzig, 124 S.; Proceedings des Dresdner Grundwasserforschungszentrums e.V., ISSN 1430-0176, Heft 14.
- [9] BILEK F., MÜLLER M. & LUCKNER, L. (2000): Erarbeitung eines Modellkonzeptes zur Untersuchung der 3D-GW-Strömungs- und GW-Beschaffenheitsprozesse unter der Stadt Bitterfeld. Studie für die LMBV-LB/Sachsen-Anhalt; Grundwasserforschungsinstitut GmbH Dresden.