

G. CHRISTOPH

Modellstudien zum Aufsättigungsprozeß der Kippe Zwenkau/Cospuden

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH
Sektion Hydrogeologie, Theodor-Lieser-Str. 4, D-06120 Halle,

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag wird versucht, experimentelle Einzelergebnisse zur Hydraulik der Braunkohlentagebaukippe Zwenkau/Cospuden unter einem übergeordneten Aspekt zu analysieren, zu interpretieren und zu verallgemeinern.

Dazu wurden mit Hilfe der hydrodynamischen Modellierung zur Beschreibung ungesättigter und gesättigter Zonen von Porengrundwasserleitern auf der Basis der Richardsgleichung die Sensitivität folgender Einflußgrößen auf die Sättigungs- und Geschwindigkeitsverteilung getestet: K_f -Verteilung in der Kippe, Anfangssättigung, Grundwasserneubildung, Randbedingungen, Anwendbarkeit verschiedener Ortsskalen. Die Modellierungen erfolgten mit dem Simulationsprogramm FEFLOW Version 4.7.

Danach lassen sich folgende Aussagen treffen. Der Aufsättigungsprozeß der Kippe in Cospuden ist noch nicht abgeschlossen. Auch 10 Jahre nach Beginn der Flutung ist zu erwarten, daß in der Förderbrückenkippe nur die Seerandzone vollständig gesättigt ist. Die hochaufgelöste Sättigungsverteilung im Innern der Kippe wird weitgehend durch die Anordnung von gut und schlecht wasserleitenden Zonen bestimmt. Die langfristige Entwicklung der Kippenaufsättigung wird im wesentlichen durch die Grundwasserneubildung und Zuflüsse von außen, insbesondere die Flutung des Tagebaurestlochs, geregelt.

Einleitung

Die vorliegenden Modelluntersuchungen widmen sich dem Thema der Neubewertung des bisher bekannten Datenmaterials zur Hydraulik der Kippen.

Grundannahme der Modelluntersuchungen ist, daß der Auffüllprozeß der Kippen als instationärer Prozeß einer anfangs ungesättigten inhomogenen Kippe mit dränierenden Zwischenschichten aufgefaßt wird. Ein solcher Prozeß ist über hydrodynamische Gleichungen der ungesättigten Zone beschreibbar. Die Modellstudien haben das Ziel, herauszufinden, welches die wesentlichen Prozesse sind, die für die Aufsättigung der Kippen verantwortlich sind.

Geologischer und hydrogeologischer Erkenntnisstand

In Abb. 1 ist schematisch der prinzipielle Aufbau der Braunkohlentagebaukippe zwischen Cospuden und Zwenkau in einem Vertikalschnitt senkrecht zur Gleisrichtung eines Tagebauabschnittes dargestellt, wie er auch in der Modellierung (über 2 Rippen der Förderbrückenkippe) verwendet wird.

Eine geringmächtige relativ wasserundurchlässige nach dem Kohleabbau verbleibende Kohleschicht bildet die bei ca. 60 m NN die untere Schicht- und Modellgrenze. Über der Kohleschicht befinden sich Abraummassen der zuerst angelegten Förderbrückenkippe mit Rippenstrukturen einer Periodizität, die mit dem jeweiligen Abbaufortschritt (Gleisrückbreite) für die Tagebaugeräte zusammenhängt. Im betrachteten Gebiet beträgt die Länge dieser Rippen mehr als 1000 m. Die mittleren Abmessungen der Vertikalstrukturen sind aus Abb. 1 zu entnehmen.

Die Rippenstruktur selbst ist nicht homogen, sie besteht vielmehr aus vielen geringmächtigen in sich relativ homogenisierten Schichten, die im wesentlichen parallel zur Oberflächenstruktur der Förderbrückenkippe angeordnet sind.

Im allgemeinen liegen die Rippenstrukturen viele Jahre offen. Dabei können physikalische Verwitterung und chemische Reaktionen dazu führen, daß die oberflächennahe Zone Strukturveränderungen (z.B. infolge Kolmation) erfährt, die zu einer Erniedrigung des K_f -Wertes führt (SCHOLZ & KAUBISCH 1986). Über die sich so ausbildende Zwischenschicht ist wenig bekannt. In den Modellannahmen wird aus rechentechnischen Gründen eine Schichtdicke von 3 m angenommen.

Nach einer bestimmten Liegezeit der Förderbrückenkippe wird die Absetzerkippe bis zu einer Höhe von ca. 112 m NN geschüttet. Die Materialparameter der Absetzerkippe streuen stark, sind aber denen der Förderbrückenbrücke ähnlich. Abweichungen gegenüber der Förderbrückenkippe ergaben sich zum Zeitpunkt der Messung (14 Jahre nach Anlage der Förderbrückenkippe und 7 Jahre nach Anlage der Absetzerkippe) insbesondere für die Sättigung im oberen Bereich der Absetzerkippe. Dort wurden teilweise nur $s = 0,1$ gemessen. In den Modellrechnungen wird in Übereinstimmung mit den Daten der Förderbrückenkippe zu Beginn der Anlage der Absetzerkippe versuchsweise ebenfalls $s = 0,5$ angenommen. Auf der Förderbrückenkippe liegt schließlich noch eine ca. 2 m starke Bodenschicht.

Modellierung

Die hydraulische Beschreibung (DIERSCH 1998) der ungesättigten Zone incl. ihrem Grenzfall, der gesättigten Zone ($s = 1$), erfolgt über das nichtlineare Gleichungssystem Richardsgleichung (1) und Darcygleichung (2) für das hydraulische Potential h , den Darcyflußvektor q und die Sättigung s

$$\left[S_0 s(\psi) + \varepsilon \frac{\partial s(\psi)}{\partial \psi} \right] \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q_h \quad (1)$$

$$q = -K_r(s) K_{\max} \left(\nabla h + \frac{\rho - \rho_0}{\rho} e \right) \quad (2)$$

mit	$h = z + \psi = z + p^f / \rho \cdot g$	hydraulisches Potential
	z	Vertikalkoordinate
	ψ	kapillare Druckhöhe
	p^f	Druck
	g	Erdbeschleunigung
	S_0	Speicherkompressibilität
	ε	Porosität
	Q_h	Fluß-Quelldichte
	$K_{\max}$	maximale hydraulische Leitfähigkeit (K_f)
	K_r	relative hydraulische Leitfähigkeit
	ρ, ρ_0	Dichte und Bezugsdichte des Wassers
	e	vertikaler Einheitsvektor

Im folgenden sollen die Abhängigkeiten der relativen hydraulischen Leitfähigkeit K_r und der kapillaren Druckhöhe ψ in der ungesättigten Zone von der effektiven Sättigung s_e

näherungsweise durch das parametrisierte van Genuchten-Mualem-Modell (DIERSCH, 1998) vorgegeben werden:

$$s_e = \begin{cases} \frac{1}{\left[1 + (A|\psi|^n)^m\right]} & \text{für } \psi < 0 \\ 1 & \text{für } \psi \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K_r = (s_e)^{1/2} \left\{ 1 - \left[1 - (s_e)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (4)$$

mit der effektiven Sättigung

$$s_e = \frac{s - s_r}{s_s - s_r}, \quad (5)$$

wobei s die Sättigung, s_s die maximale Sättigung, s_r die residuale Sättigung und A , n , $m = 1 - 1/n$ experimentelle Anpaßparameter darstellen.

Das Gleichungssystem ist unter Vorgabe des Ziels der Modellierung, der Geometrie des jeweiligen Modellgebiets, der Rand- und Anfangsbedingungen sowie der Materialparameter zu lösen, und die Ergebnisse sind zu interpretieren.

Die Lösung erfolgte mit dem Simulationsprogramm FEFLOW Version 4.7.

Speziell wurden folgende Situationen untersucht

- Aufsättigungsprozesse der Förderbrückenkippe und der Absetzerkippe in einem vertikalen Schnitt senkrecht zu den Rippenstrukturen (Abbn. 1-2) in der Nähe einer hypothetischen Grundwasserscheide.
- Aufsättigungsprozesse der Förderbrückenkippe und der Absetzerkippe in einem vertikalen Schnitt parallel zu den Rippenstrukturen (Abb. 3) von der hypothetischen Grundwasserscheide bis zum entstehenden Tagebaurestsee.

Vertikaler Schnitt senkrecht zu den Rippenstrukturen

Geometrie

Die Annahme, daß sich der gewählte Schnitt in der Nähe der Grundwasserscheide befindet, garantiert, daß die Voraussetzung für eine vertikal-ebene Modellierung, nämlich die Vernachlässigung des Flusses senkrecht zur Modellebene, gesichert ist. Um eine hohe Auflösung von ca. 0,30 m zu gewährleisten, wurde ein Modellgebiet gewählt, das die volle Kippenhöhe aber nur 2 Rippenbreiten umfaßt. Das Modellgebiet mit den detaillierten geometrischen Abmessungen ist in Abb. 1 dargestellt. In der Diskretisierung der 12 Superelemente setzt sich die Modellfläche aus ca. 42000 Dreiecksflächenelementen zusammen, deren kleinstes eine Seitenlänge von ca. 0,30 m hat. Zusätzlich zu den in sich homogen angenommenen Großstrukturen werden in der Förderbrückenkippe zwei in sich homogene unabhängige Dränagesysteme mit einer Mächtigkeit von ca. 0,60 m betrachtet, die die kolmatierte Zwischenschicht im Rippental durchbrechen. Das rechte System speist dabei 4 zur Rippenkontur parallele Schichten, das linke 2. Die Lage der Dränageschichten und ihre Verzweigungen sind in Abb. 1 zu erkennen. Mit diesen Schichten, die in ihren Abmessungen und Materialparametern noch hypothetisch sind, der Realität jedoch vermutlich recht gut entsprechen, sollen mögliche durch die Schüttungstechnologie erzeugte räumliche Inhomogenitäten erfaßt werden.

In der Absetzerkippe sind für Testzwecke ähnliche hydraulische Wegsamkeiten (allerdings mit weniger Symmetrie) vorgesehen.

Rand- und Anfangsbedingungen

Der Fluß durch das Liegende wird vernachlässigt. Seitliche Flüsse quer durch die Rippen sind denkbar, die hohe Symmetrie der Kippe und die Kipptechnologie regen als Näherungsannahme aber ebenfalls die Vernachlässigung des Flusses durch die rechte und linke Modellgrenze an. Die Grundwasserneubildung stellt eine Randbedingung 2. Art am oberen Rand des jeweiligen Modellgebiets dar.

Gemäß der Definition des hydraulischen Potentials läßt sich bei Kenntnis der Materialparameter für die ungesättigte Zone die Anfangsverteilung des hydraulischen Potentials festlegen, wenn man die Feuchteverteilung zu Beginn vorgibt. Diese Möglichkeit wird im folgenden genutzt.

Materialdaten

Die Eingangsmaterialdaten, die in der Ergebnisdiskussion noch variiert werden, sind

$\varepsilon = 0,55$ (0,45)	im gesamten Modellgebiet
$K_f = 10^{-7}$ m/s	ungestörter Bereich der Absetzer- und Förderbrückenkippe
$K_f = 10^{-8}$ m/s	Zwischenschicht
$K_f = 10^{-5}$ m/s	Entwässerungsschichten
$K_f = 10^{-9}$ m/s	Deckschicht
$S_o = 10^{-4}$ m ⁻¹	Speicherkompressibilität
$s_s = 1,0$	maximale Sättigung
$s_r = 0,05$	residuale Sättigung
$A = 1,2$ m ⁻¹	Parameter
$n = 3$	Parameter

Alle Abbildungen beziehen sich auf $\varepsilon = 0,55$. Mit diesem Maximalwert wurde bewußt gerechnet, um nachzuweisen, daß sich selbst bei einem derart hohen ε auch ohne Grundwasserneubildungsrate relativ hohe Wasseranstiegsraten berechnen lassen.

Die Speicherkompressibilität ist als Standardwert vom Programm FEFLOW 4.7 übernommen worden.

Für die ungesättigte Zone liegen keine Materialdaten vor, weshalb für die Parameter A und n Anpaßparameter verwendet wurden, die den Mittelwert aus entsprechenden Literaturwerten (DIERSCH, 1998) ähnlicher Materialien darstellen. Die residuale Sättigung ist rein hypothetisch, sie liegt bewußt unterhalb der niedrigsten gemessenen Sättigung von $s = 0,1$ bei $s_r = 0,05$. Der Parametersatz zur Beschreibung der ungesättigten Zone des Modellgebiets wurde wegen nicht vorhandener experimenteller Daten für alle Schichten einheitlich angenommen. Diese grobe Vereinfachung ist unter dem Aspekt zu sehen, daß die eigentliche Zielgröße der Modellstudien darin besteht, prinzipielle Aussagen über den Einfluß einzelner Modellannahmen und Parameter auf die örtliche und zeitliche Verteilung der Sättigung in den Kippen zu machen. Es geht nicht um eine detailgetreue Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

Ergebnisse: Liegezeit Förderbrückenkippe

Entsprechend den experimentellen Untersuchungen wurde die Anfangssättigungsverteilung im gesamten Gebiet Zwischenschicht und Förderbrückenkippe mit $s(t=0) = 0,5$ Sättigung

angenommen. Es gibt also zu Beginn der Entwicklung keine gesättigten Bereiche. Die (zum Modellierzeitraum noch nicht vorhandene) Absetzerkippe wurde ignoriert. Das Eindringen von Niederschlagswasser mit zeitgemittelt 0,2 m/a (KNAPPE, 1998) wurde durch Randbedingungen 2. Art unmittelbar auf der Rippenoberfläche modellmäßig erfaßt.

Abb. 1 zeigt die Sättigungsverteilung 100 Tage, ein Jahr und 7 Jahre nach Beginn ($t = 0$ d) der Ausgangssituation. Danach erfolgt die Entwässerung der bevorzugten Schichten im wesentlichen von oben nach unten, weshalb sich das Wasser demzufolge in den tiefsten Lagen dieser Zonen sammelt. Der erhöhte Grundwasserstand in der linken Hälfte hängt damit zusammen, daß in diesem Bereich die leichtdurchlässigen Gebiete mit der größeren Querschnittsfläche, die demzufolge auch mehr Wasser enthalten, hier enden.

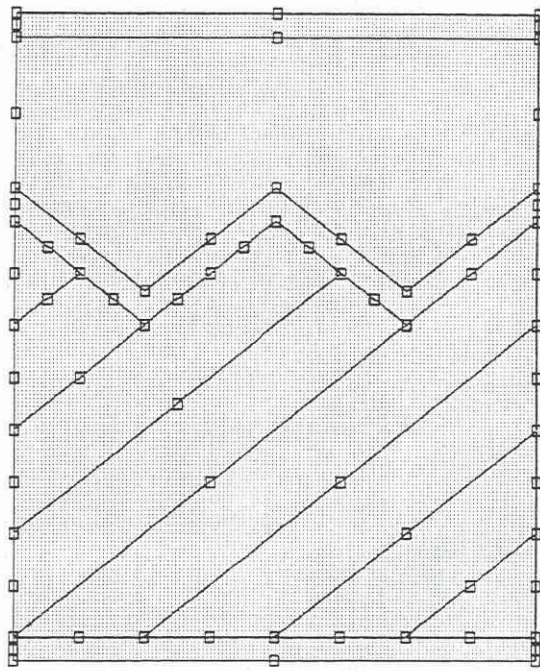
Nach 7 Jahren, dem angenommenen Zeitpunkt, an dem die freie Liegezeit der Förderbrückenkippe beendet ist, zeigt die Grundwasseroberfläche jetzt eine ausgeglichene Kontur. Der Wasserstand links ist nach wie vor höher als rechts. Der nach 7 Jahren Liegezeit erreichte Grundwasserstand beträgt im Mittel ca. 8,6 m (für $\varepsilon = 0,45$ ca. 13,8 m), woraus sich eine mittlere Wasseranstiegsgeschwindigkeit von 1,22 m/a (für $\varepsilon = 0,45$ ca. 2,05 m/a) berechnet. Die Wasseranstiege in den einzelnen Beobachtungspunkten zeigen eine gute Übereinstimmung mit den wenigen bekanntgewordenen Grundwasseranstiegsgeschwindigkeiten in der Förderbrückenkippe, die zwischen 1,2 m/a und 1,8 m/a liegen.

Um den Einfluß der mit 0,2 m/a relativ hoch angesetzten Grundwasserneubildungsrate zu eliminieren, wurde eine analoge Rechnung mit einer Grundwasserneubildungsrate von 0 m/a durchgeführt. Nach 7 Jahren erhalten wir ein ähnlich strukturiertes Bild wie in Abb. 1 mit einer mittleren Anstiegsgeschwindigkeit von 0,90 m/a (bzw. 1,05 m/a für $\varepsilon = 0,45$). Die so bestimmte mittlere Anstiegsgeschwindigkeit ist nur geringfügig geringer als die, bei der die Grundwasserneubildungsrate (0,2 m/a) berücksichtigt wurde.

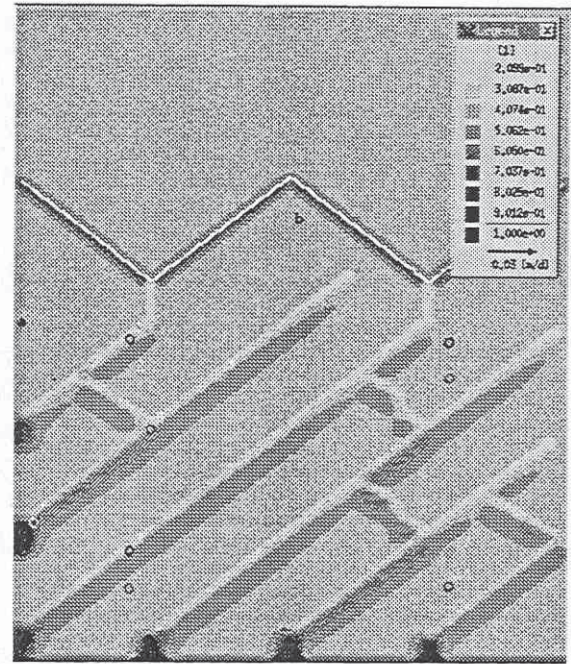
Für die Deutung des experimentell festgestellten Wasseranstieg ist demnach nicht eine bestimmte Grundwasserneubildungsrate notwendig. Der Wasseranstieg zu Beginn der Aufsättigung der Kippe läßt sich auch allein aus den Annahmen über die Geometrie von Drainagezonen, die K_f -Verteilung in der Kippe und die anfängliche Sättigungsverteilung erklären.

Um quantitative Aussagen über den Einfluß der Größen zu bekommen, die das Sättigungsverteilungsmuster in der Kippe steuern, sind gegenüber den Grundannahmen Modifikationen (vor allem über die Variation der Parameter) vorgenommen worden, mit denen analoge Rechnungen durchgeführt wurden. Insbesondere wurden Detailstudien zu folgenden Situationen (isoliert oder kombiniert) durchgeführt:

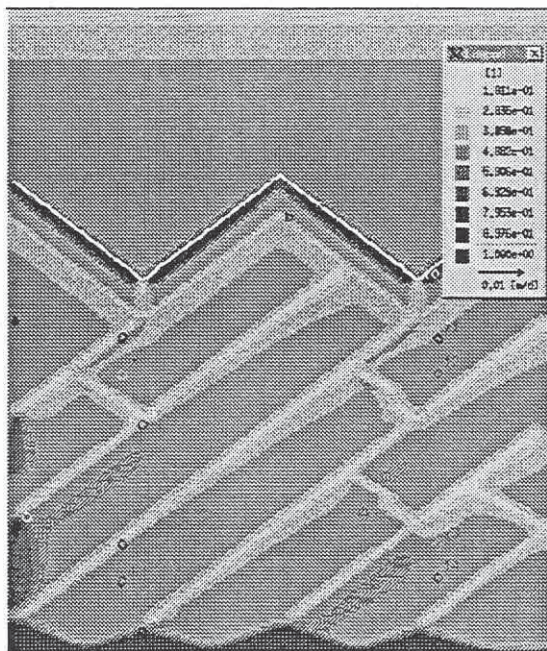
- $K_f(\text{Förderbrückenkippe}) = 10^{-9}$ m/s (Ähnlichkeit zum Kluftgrundwasserleiter),
- $K_f(\text{Drainagezonen}) = 10^{-7}$ m/s (die Kippe ist homogen),
- keine Grundwasserneubildung.



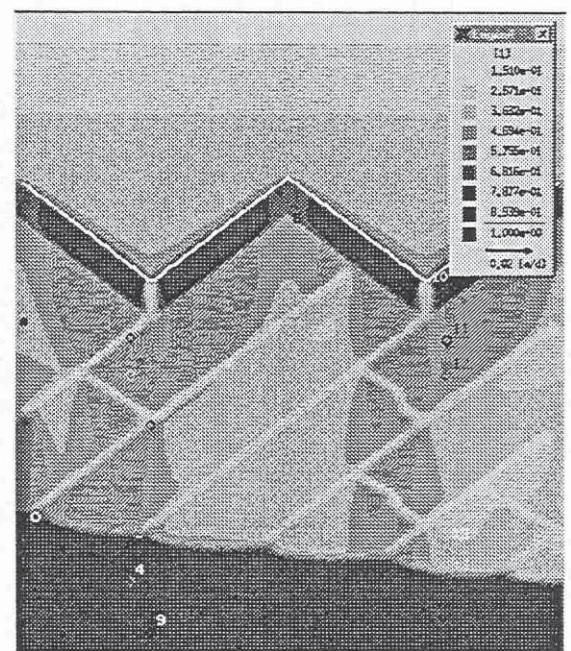
$t = 10 \text{ d}$



$t = 100 \text{ d}$



$t = 1 \text{ a}$



$t = 7 \text{ a}$

Abb. 1: Superelemente der Modellebene für die vertikal-ebene Flußmodellierung in eine Schnitt senkrecht zu den Rippen der Förderbrückenkippe Cospuden (Abmessungen: 56 m vertikal x 52 m horizontal) sowie berechnete Sättigung der Förderbrückenkippe nach 100 Tagen, einem Jahr und 7 Jahren mit dem Eingangsdatensatz und der homogenen Anfangssättigung von $s = 0,5$

Das Ergebnis der Studien unterstreicht die Bedeutung der wasserdurchlässigen Zonen in der Kippe für die Kinetik und die untergeordnete Rolle der Grundwasserneubildung in den ersten Jahren der Aufsättigung der Kippen.

Ergebnisse: Liegezeit Absetzerkippe

Nach Ablauf der Liegezeit der Förderbrückenkippe (Modellannahme $t = 7$ a) wird nun die Absetzerkippe aufgetragen. Modellmäßig gehen wir dabei von den gleichen Materialdaten und Anfangsbedingungen wie bei der Förderbrückenkippe aus. Gegenüber der Förderbrückenkippe gibt es im wesentlichen folgende Unterschiede.

Die Basis ist nicht mehr bei einer einheitlichen Teufe, sondern folgt der Rippenstruktur. Die Basisabgrenzung der Absetzerkippe ist auch nicht mehr undurchlässig, sondern wird durch die K_f -Verteilung der Zwischenschicht festgelegt. Ferner findet der Eintrag der Niederschläge nicht mehr auf der Rippenoberfläche, sondern am oberen Modellrand auf der relativ undurchlässigen Deckschicht statt. Außerdem soll die Grundwasserneubildungsrate gemäß Lysimetermessung dort mit einheitlich $0,1 \text{ m/a}$ (REICHEL et al. 1989, KNAPPE 1998) angenommen werden.

Im Unterschied zur Förderbrückenkippe, wo die dränierenden Zonen genau parallel und im gleichen Abstand zueinander angeordnet waren, werden nun in der Absetzerkippe 3 nicht mehr so regelmäßige Dränageschichten (jedoch mit gleicher Mächtigkeit und gleichem K_f wie in der Förderbrückenkippe) über dem rechten Rippental und nur eine Dränagezone über dem linken angenommen, womit ein schnellerer Zulauf rechts erwartet wird. Gleichzeitig werden die Wegsamkeiten der Zwischenschicht geschlossen, indem dort der K_f -Wert der durchlässigen Bereiche gleich dem K_f -Wert der Zwischenschicht gesetzt wird.

Die Modellierung mit den für die Förderbrückenkippe verwendeten Materialdaten liefert als Ergebnis, daß der Grundwasserstand der sich nach kurzer Zeit herausgebildeten gesättigten Zone in den Rippentälern bis etwa zum dritten Jahr ansteigt, um dann bis zum Jahr 7 nach Anlage der Absetzerkippe wieder abzufallen.

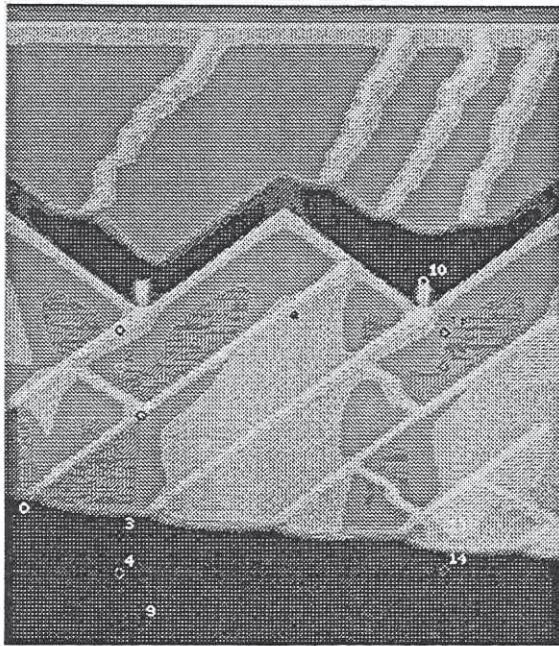
Die Ursache dafür ist der angenommene K_f -Wert der Zwischenschicht. Er ist offensichtlich nicht klein genug, um eine halbwegs wirksame Abdichtung der Absetzerkippe in den betrachteten Zeiträumen nach unten darzustellen.

Um das zu überprüfen, wurden die Rechnungen dadurch modifiziert, daß bei sonst gleichen Annahmen lediglich der K_f -Wert der Zwischenschicht eine Größenordnung niedriger angesetzt wurde, was auch noch mit experimentellen Messungen verträglich ist (Scholz & Kaubisch, 1986): $K_f = 10^{-9} \text{ m/s}$. Die entsprechenden Ergebnisse sind für verschiedene Zeiten in der Abb. 2 dargestellt. Erwartungsgemäß ist die Zwischenschicht jetzt ein effektiver Grundwasserstauer, der auch nach 7-jähriger Liegezeit der Absetzerkippe das Sickerwasser noch staut und schließlich dazu führt, daß nach Überflutung der Höhenlagen der Zwischenschicht sich ein einheitlicher Grundwasserleiter in der Absetzerkippe herausbildet.

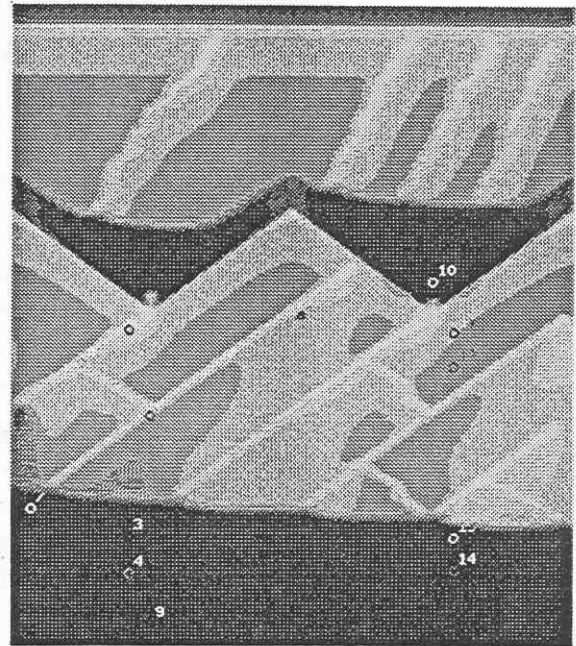
Vertikaler Schnitt parallel zu den Rippenstrukturen

Geometrie, Rand- und Anfangsbedingungen, Materialdaten

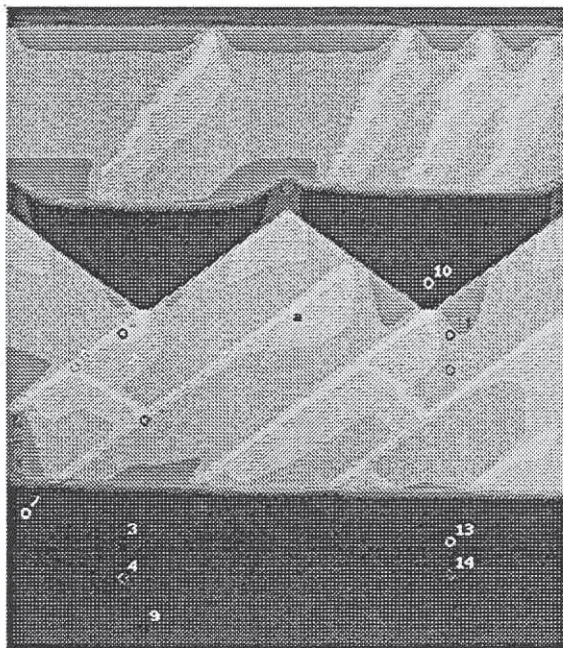
Im Gegensatz zu den Modellrechnungen in einem Kippenschnitt senkrecht zu den Rippen in der Nähe einer Grundwasserscheide, wo angenommen wurde, daß an der rechten und linken Modellgrenze der Wasserfluß zu vernachlässigen ist, steht nunmehr die Frage des Kippenabflusses in das Tagebaurestloch, das am linken Rand der Modellebene (Abb. 3) liegen soll, im Vordergrund. Das bedeutet, daß Zu- und Abflüsse am linken Modellrand zugelassen sind.



t = 1 a

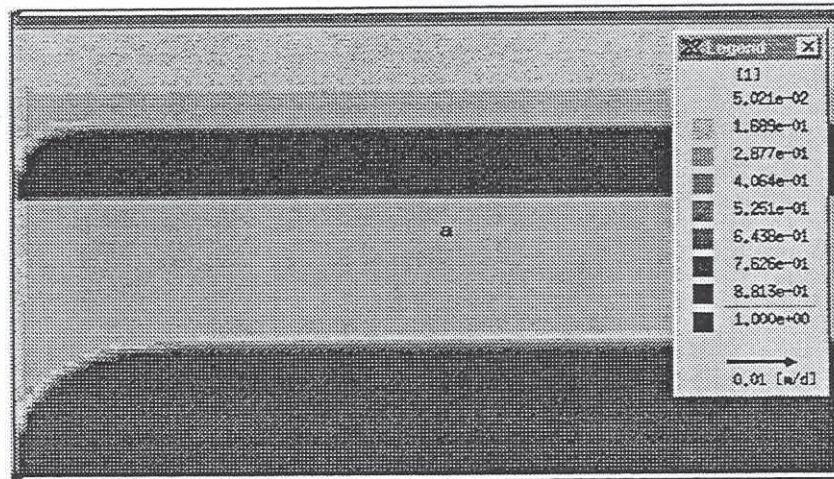


t = 3 a

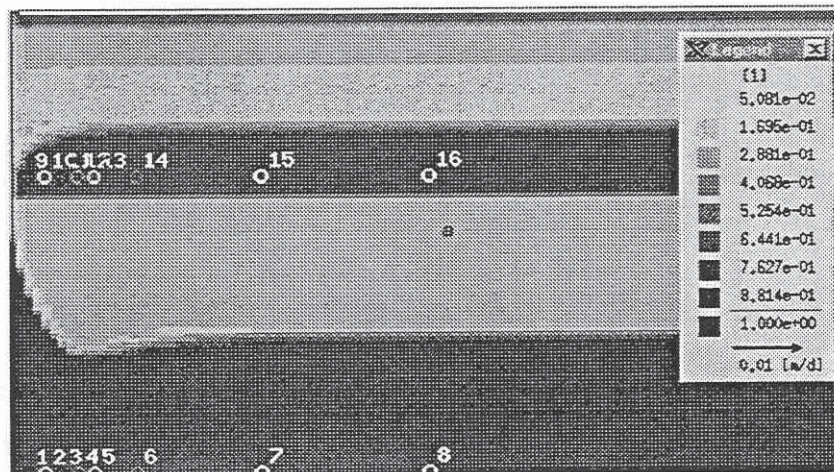


t = 7 a

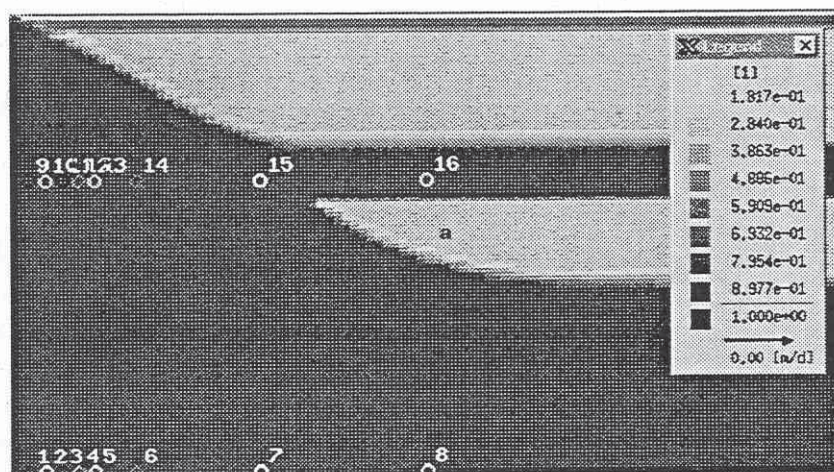
Abb. 2: Berechnete Sättigung nach einem Jahr, 3 Jahren und 7 Jahren Liegezeit der Absetzerkippe mit $K_f(\text{Zwischenschicht}) = 10^{-9} \text{ m/s}$
 (Abmessungen: 56 m vertikal x 52 m horizontal, Sättigungsskala:
 8 Graustufen zwischen $s = 0,13$ und $s = 1,0$)



$t = 14 \text{ a}$ (Beginn der Flutung)



$t = 19 \text{ a}$ (5 Jahre nach Beginn der Flutung)



$t = 54 \text{ a}$ (30 Jahre nach Ende der Flutung)

Abb. 3: Sättigungen zu verschiedenen Zeitpunkten für die Flußmodellierung in einem Schnitt parallel zu den Rippen der Förderbrückenkippe (Abmessungen: 56 m vertikal x 1000 m horizontal)

Entsprechend den realen Abmessungen der Rippenstrukturen sollen Kippeneinflüsse in einem Bereich bis 1000 m vom Rand des Tagebaurestlochs modellmäßig diskutiert werden. Da keine entsprechenden interpolierbaren Messungen längs der Rippenstrukturen vorliegen, wird vereinfachend angenommen, daß die Grundwasserscheide der Kippe etwa in der Mitte der Kippe in eben 1000 m Entfernung (längs der Rippen) vom Restloch zeitunabhängig vorliegt. Das bedeutet, daß der Fluß an der rechten Modellgrenze Null ist und hat den Nebeneffekt, daß die Ergebnisse, die sich aus der Modellierung senkrecht zu den Rippen (eben an der Grundwasserscheide) ergaben, nunmehr diejenigen an der rechten Modellgrenze sein müssen, wenn man mit effektiven Parametern arbeitet, die sich aus Mittelwerten der Ergebnisse senkrecht zu den Rippenstrukturen ableiten lassen.

Analog muß bei der angestrebten Flußmodellierung längs der Rippenstrukturen (jedoch mit Mittelwerten senkrecht zu den Rippen) auch eine Modellgeometrie konstruiert werden, die dem Mittelwert über die Rippentäler und Rippenhöhen entspricht. Im Unterschied zum Schnitt senkrecht zu den Rippen liegt bei gleicher Gesamthöhe der Kippe die Hangendgrenze der 3m mächtigen Zwischenschicht nunmehr einheitlich bei 19.5 m unter Geländeoberkante. Die wasserabführenden Drainagezonen gibt es nicht mehr. Ihre Wirkungsweise wird durch die neu verwendeten effektiven K_f -Parameter erfaßt. Für die Förderbrückenkippe und die Absetzerkippe wurden einheitlich $K_f = 4 \times 10^{-7}$ m/s angenommen. Alle anderen Materialparameter sind mit den Parametern der Modellierung senkrecht zu den Rippen identisch. Auch die oberen Randbedingungen 2. Art sind gleich und wurden direkt auf der Zwischenschicht bzw. auf der Deckschicht realisiert. Als Anfangsbedingung wurde wieder $s = 0,5$ gewählt.

Da es sich bei der vorliegenden Studie nur um prinzipiell zu erwartende Größenordnungen einzelner Effekte (vor allem im Innern der Kippe) geht, wird die detaillierte Geometrie der Kippenböschung vernachlässigt: die Modellierung erfolgt in einer 56 m x 1000 m großen rechteckigen Modellfläche (Abb. 3). Diskretisiert wird über 5600 rechteckige Flächenelemente der Dimension

1 m(vertikal) x 10 m(horizontale). Bei den Darstellungen der Ergebnisse ist die vertikale Dimension 10-fach überhöht.

Ergebnisse der Modellierung

Da die Wasserhaltung während des gesamten Tagebaubetriebes so gestaltet wird, daß das Arbeitsgelände der Bagger stets wasserfrei ist, wird als linke Randbedingung (d.h. am Kippenrand) für die gesamte Zeit, in der die Wasserhaltung erfolgt, eine konstante hydraulische Höhe angenommen, die der unteren Modellgrenze entspricht.

Die Sättigungsverteilung nach 14-jähriger Liegezeit der Förderbrückenkippe und 7-jähriger Liegezeit der Absetzerkippe ist in Abb. 3 ($t = 14$ a) dargestellt. Danach liegt im größten Teil der Kippe ein einheitlicher Grundwasserstand mit vernachlässigbaren Horizontalgeschwindigkeiten in der gesättigten Zone vor. Nur in der Randzone bis ca. 90 m vom Kippenrand gibt es Abweichungen.

Analog zur vorhergegangenen Rechnung wurde dabei von einem K_f -Wert der Zwischenschicht von $K_f = 1 \times 10^{-9}$ m/s ausgegangen, der die Ausbildung eines zweiten Grundwasserleiters zuläßt.

Ab $t = 14$ a soll dann das Tagebaurestloch geflutet werden. Entsprechend dem über einen Zeitraum von 4 Jahren festgestellten mittleren zeitlich linearen Seeanstieg von ca. 5.5 m/a wurde die Rechnung ab $t = 14$ a dann mit einer zeitabhängigen linken Randbedingung bis zur Zeit $t = 24$ a weitergeführt, nach der der See um 55 m gestiegen ist. Der Seespiegel liegt dann gerade 1 m unter der oberen Modellgrenze. Dargestellt ist in Abb. 3 ($t = 19$ a) die Sättigungsverteilung 5 Jahre nach Beginn der Flutung. Man kann während der Rechnung

verfolgen, wie sich ein örtliches Minimum des Sättigungsrandes sowohl in der Förderbrückenkippe als auch in der Absetzerkippe herausbildet (der gleichzeitig die Grundwasseroberfläche repräsentiert), der mit fortschreitender Zeit ansteigt und ins Innere der Kippe wandert. Das Minimum stellt eine Grundwasserscheide in dem Sinne dar, daß das Wasser aus dem Kippeninnern und dem Kippenrand sich in der horizontalen Geschwindigkeitskomponente zu dieser Grundwasserscheide bewegt.

Bemerkenswert ist, daß das Minimum 5 Jahre nach Beginn der Flutung in der Förderbrückenkippe erst bei ca. 100 m Entfernung vom Kippenrand liegt. Mit anderen Worten: Erst 5 Jahre nach Beginn der Seeflutung kann damit gerechnet werden, daß das Seewasser in den ca. 100 m vom Kippenrand entfernten Grundwassermeßstellen nachgewiesen werden kann. Diese Aussage läßt sich durch Messungen der Isotopenzusammensetzung des Wassers der Kippe und des Tagebaurestsees überprüfen. So konnte erstmals im Mai 1999 tatsächlich Seewasser in einem Kippenpegel nachgewiesen werden (KNÖLLER, 1999).

Nach 10 Jahren ist nach den Annahmen über das Flutungsszenario das Tagebaurestloch geflutet. Der Seewasserspiegel ist von da an, dh. 24 Jahre nach Anlage der Förderbrückenkippe, konstant bei 55 m über der unteren Modellbegrenzung. Für Aussagen zur weiteren Aufsättigung der Kippe nach Ende der Flutung wird deshalb diese Höhe des Seewasserspiegels als linke Randbedingung gesetzt. In Abb. 3 ist ebenfalls die Sättigungsverteilung 30 Jahre nach Ende der Flutung (bzw. 54 Jahre nach Anlage der Förderbrückenkippe) dargestellt.

Zu diesem Zeitpunkt sind die Drainageprozesse längst abgeklungen. Der Wasseranstieg im Innern der Kippe ist nunmehr eine Folge der Grundwasserneubildung. Das Innere der Förderbrückenkippe ist aber immer noch nicht vollständig gesättigt, so daß kein Wasserfluß aus der Kippe in den See erfolgt.

Schlußfolgerungen

Bei der Analyse der Ergebnisse der Modellrechnungen und den in der Praxis tatsächlich nachgewiesenen Abweichungen gegenüber grober klastischen Kippen (etwa in der Lausitz, wo mit K_f -Werten von ca. $K_f = 5 \times 10^{-5}$ m/s gerechnet wird) stellt sich heraus, daß die Ergebnisse im wesentlichen aus folgenden Besonderheiten resultieren:

- Existenz einer hydraulisch schlechtleitenden Kippenmatrix,
- Existenz einer relativ hohen Anfangssättigung,
- Existenz von eingelagerten geringmächtigen aber gutleitenden Schichten.

In der Anfangszeit der Kippenaufsättigung ist dann die Grundwasserneubildung sekundär.

Die grobkörnigen in die Kippe eingelagerten Schichten wirken als Drainagezonen. In ihrer Umgebung entwässern sie die zwar ungesättigte, jedoch mit einem hohen Wasseranteil ausgestattete Kippenmatrix und transportieren das Wasser innerhalb der Drainagezone relativ schnell in darunterliegende Bereiche. Sind diese Bereiche nach unten durch schlecht wasserdurchlässiges Material begrenzt, so erfolgt dort ein Wasserstau (auch als „hängende Wasserkörper“) und u.U. ein Wasseranstieg.

Ist der K_f -Wert der feinkörnigen Kippenmatrix erheblich kleiner als der K_f -Wert der Drainagezonen, so erfolgt der Wasseranstieg im wesentlichen innerhalb der Drainagezonen. Dann kann sich ein gesonderter Grundwasserleiter auf der Basis kommunizierender Zonen herausbilden.

Die Lage der gesättigten Zonen und die Wasseranstiegsgeschwindigkeiten der zugehörigen Grundwasseroberflächen sind im Detail von der Geometrie und damit von der K_f -Verteilung in der Kippe abhängig.

Auf der Grundlage der verwendeten Parameter läßt sich ableiten, daß es trotz rascher Flutung des Tagebaurestlochs noch Jahrzehnte dauern kann, bis der Sättigungsprozeß der Kippe

Cospuden/Zwenkau beendet ist. Eine wesentliche Verschlechterung der Wasserqualität des Tagebaurestsees als Folge von Schadstoffeinträgen aus der Kippe wird deshalb mittelfristig nicht erwartet.

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die fraglichen Kippen im Südraum Leipzig weder generell gesättigt noch ungesättigt oder trocken sind, sondern sich in einem Zustand allmählicher Aufsättigung befinden, in der z.Zt. noch alle 3 Spezialfälle vorkommen und nachgewiesen werden können.

Literatur

DIERSCH, H.-J.(1998):Reference Manual FEFLOW, Part 2 Applications.- WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin.

SCHOLZ, R.-P.,KAUBISCH, M.(1986):Zur wasserhaushaltlichen Charakterisierung von Kippenkomplexen im Bergbau.- Neue Bergbautechnik, 16.Jg. Heft12, 460-463.

KNAPPE, S.(1999): Persönliche Mitteilung

KNÖLLER, K.(1999): Persönliche Mitteilung

Beiträge zum Workshop

**Prozesse und Stoffströme in
Kippensedimenten – Tagebaue
Zwenkau, Cospuden und Espenhain**

am 3. und 4. Juni 1999

Walter Gläßer, Gerhard Strauch, Peter Schreck und Elke Bozau
Sektion Hydrogeologie