G. CHRISTOPH

Modellstudien zum Aufsättigungsprozeß hydrogeologischer Erkundungsbohrungen in Kippen und ihre Auswirkungen auf die Hydraulik der Umgebung

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

Kurzfassung
Auf der Grundlage der Erkenntnisse über den Einfluß von Inhomogenitäten auf die Hydraulik und Kinetik der Aufsättigung bindiger Kippen (Christoph, dieses Heft) wird modellmäßig untersucht, welche Konsequenzen sich daraus für hydrogeologische Erkundungsbohrungen ableiten lassen.
Aus den Modelluntersuchungen folgt, daß die in den einzelnen Meßstellen gemessenen Änderungen der Fließrichtung, des hydraulischen Potentials, der Konzentration oder der Temperatur nicht mit den großräumigen Prozessen in der Kippe zusammenhängen müssen. Fehlinterpretationen lassen sich vermeiden, wenn das Bohrgut als Material zwischen zwei Dichtungen durch Material mit niedrigem K_f ersetzt wird. Wasserstandsmessungen und Einbohrloch-Tracerexperimente sollten nur in langzeitig und weiträumig ungestörten Kippenbereichen durchgeführt werden.

Einleitung

Mit den bisherigen Modellrechnungen (Christoph, dieses Heft) wurde der große Einfluß von betriebstechnisch bedingten Inhomogenitäten bei der Anlage der Kippen auf die Hydraulik und Kinetik der Aufsättigung bindiger Kippen, insbesondere die Auswirkungen von Dränagezonen, diskutiert. Im folgenden soll nun modellmäßig untersucht werden, welche Konsequenzen sich daraus auf hydrogeologische Erkundungsbohrungen ableiten lassen, die ja u.U. auch zusätzliche Dränagezonen in der Kippe erzeugen können.

Modellierung

Geometrie, Materialparameter und Anfangsbedingungen

Zu diesem Zweck wurde die Modellrechnung für den Aufsättigungsprozeß der Kippe Zwenkau/Cospuden (Christoph, dieses Heft) mit den Grundeinstiegsdaten und einer Sättigungsverteilung nach 7 Jahren Liegezeit der Absetzerkippe und 3 Jahren Liegezeit der Förderbrückenkippe, insgesamt also 10 Jahre nach Beginn des Aufsättigungsprozesses (Abb. 1), in der Weise modifiziert, daß an jeweils 4 verschiedenen und örtlich genügend weit voneinander gelegenen Positionen (damit keine gegenseitige Beeinflussung im interessierenden Zeitraum auftreten kann) der Filterbereich (Koordinaten x_0, y_0) entsprechender hypothetischer Grundwasser-meßstellen in hydrogeologischen Erkundungsbohrungen positioniert wurde (Abb. 2). Mit der Wahl der Parameter, die zur Ausgangsverteilung der Abb. 1 geführt hatten, und den in der Kippe berechneten Anstiegsgeschwindigkeiten ist bekannt, welchen Einfluß die Grundwasserneubildung auf die Anstiegsgeschwindigkeit der Grundwasseroberfläche hat. Insbesondere ist 10 Jahre nach Beginn der Aufsättigung der Einfluß der Seeflutung ebenfalls noch ausgeschlossen.

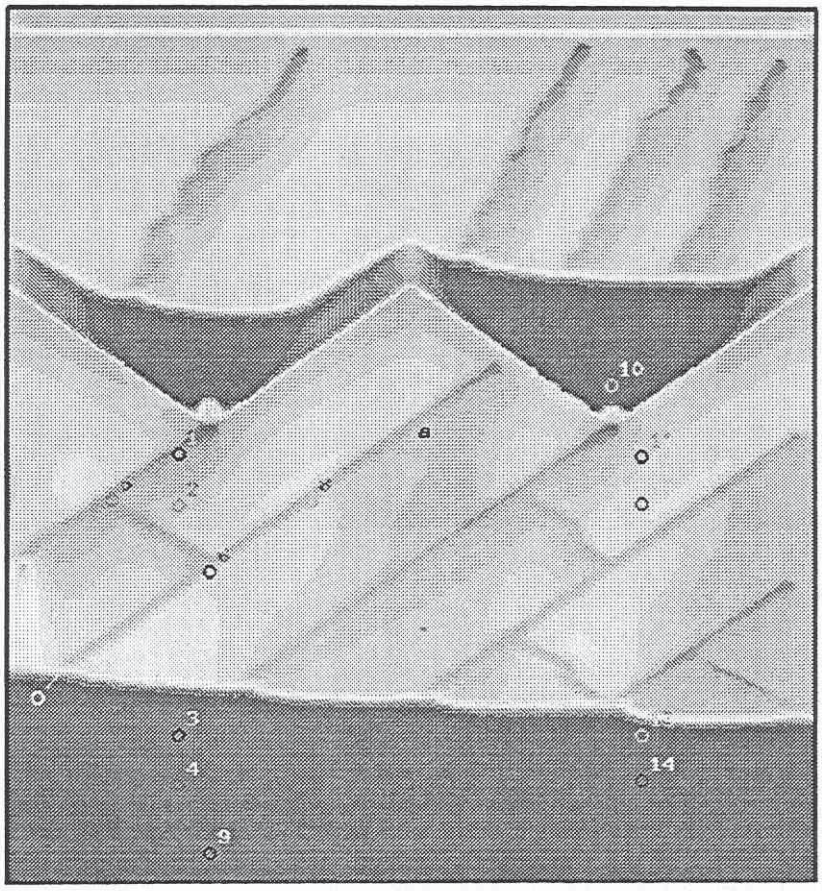


Abb. 1: Berechnete Sättigung nach 3 Jahren Liegezeit der Absetzerkippe mit K_f(Zwischenschicht) = 10^{-9} m/s (Abmessungen: 56 m vertikal x 52 m horizontal, Sättigungsskala: Graustufen zwischen s = 0,13 und s = 1,0)

Durch Neustart der Modellrechnung wurde dann die Kinetik beim Wasseranstieg in den Grundwassermeßstellen studiert und mit den entsprechenden Wasserständen ohne Grundwassermeßstellen verglichen.
Die 4 Filterpositionen beziehen sich auf die Fälle, wo sich die Filter
- in einer Dränageschicht der gesättigten Zone (GWM 9),
- im ungestörten Bereich der gesättigten Zone (GWM 14),
- im stark entwässerten Gebiet einer Dränageverzweigung (GWM 6),
- im ungestörten ungesättigten Bereich (GWM 12)

der Förderbrückenkippe befinden.
Die Erkundungsbohrungen, in denen die Meßstellen installiert sind, wurden entsprechend der praktischen Anlage gemäß Abb. 2 wie folgt approximiert: Die Gesamtlänge der Bohrung, in deren Mitte sich das eigentliche Steigrohr befindet, beträgt 10 m. Sie ist bewußt so kurz gehalten worden, um einen Schnitt mit weiteren Dränageschichten möglichst auszuschließen und damit die einzelnen örtlichen Einflüsse beim Wasseranstieg in den Grundwassermeßstellen klar auszuweisen. Der Durchmesser der Bohrung beträgt 0,40 m. Bei Berücksichtigung eines ca. 0,20 m starken durch die Bohrung u.U. verdichteten Mantels erweitert sich der nunmehr gesondert gegliederte vertikale Bereich der Bohrung in der vertikalebenen Modellierung auf 0,80 m Breite. Um diese Geometrie noch genügend genau im Netz der finiten Elemente zu erfassen, wurde in dem so festgelegten örtlichen Bereich eine Elementverfeinerung vorgenommen, bei der die kleinsten Dreieckselemente eine Seitenlänge von ca. 0,10 m haben.

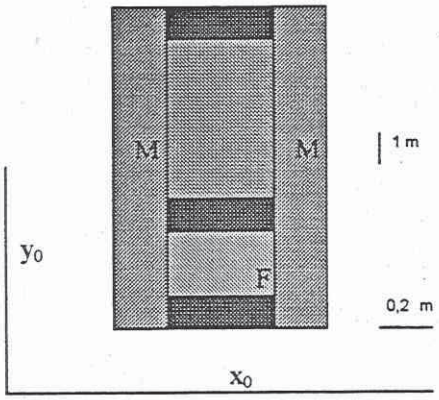


Abb. 2: Modellannahmen zu den Erkundungsbohrungen

x_0 , y_0 Koordinaten des Filtermittelpunktes

B = Bohrgut : $K_f = 10^{-6}$ m/s , $s_0 = 0,5$
D = Dichtung : $K_f = 10^{-10}$ m/s , $s_0 = 0,5$
F = Filter : $K_f = 10^{-4}$ m/s , $s_0 = 0,1$
M = Mantel : $K_f = 10^{-7}$ m/s , s_0 = gemäß Abb. 1
: $K_f = 10^{-8}$ m/s , $s_0 = 0,5$ bei Verdichtung

Die Bohrungen sind vertikal in 5 Abschnitte gegliedert. An der tiefsten Stelle befindet sich eine Tondichtung D, darüber die Filterstrecke F, dann folgen Tondichtung D, Kippenmaterial B und wiederum ein Filter. Die Filterstrecke ist 2 m lang, die jeweils 1 m starken Tondichtungen, die effektiv auch noch die feinsandigen Gegenfilter miterfassen sollen, werden durch ein $K_f = 10^{-10}$ m/s genähert. Zwischen den zwei oberen Dichtungen befindet sich das bei der Bohrung entnommene und beim Ausbau der Bohrung wiedereingebrachte nunmehr aber „gelockerte" Kippenmaterial B mit einem etwas höheren $K_f = 10^{-6}$ m/s (gegenüber dem ursprünglich verwendeten $K_f = 10^{-7}$ m/s) und der Sättigung s = 0,5. Der Filterkies mit einem $K_f = 10^{-4}$ m/s, der beim Ausbau der Meßstelle in der Filterstrecke eingebracht wird, ist zu Beginn relativ „trocken": s = 0,1.
Außerdem soll auch noch getestet werden, mit welchem Einfluß zu rechnen ist, wenn beim Bohrprozeß das umgebende Kippenmaterial der Bohrung in einem Mantelbereich M von ca. 0,20 m verdichtet wurde (hypothetisches $K_f = 10^{-8}$ m/s gegenüber ursprünglich $K_f = 10^{-7}$ m/s , bzw. bei den Dränagezonen $K_f = 10^{-6}$ m/s gegenüber ursprünglich $K_f = 10^{-5}$ m/s).
Untersucht wird die Sättigungsverteilung in der Kippe in der Umgebung der so genäherten Grundwassermeßstellen und in der Grundwassermeßstelle selbst, wenn man die in Abb. 2 dargestellte Geometrie in die Grundwassersituation der Abb. 1 an den jeweiligen Filterstrecken (Koordinaten x_0, y_0) einfügt und die zeitliche Entwicklung verfolgt. In der Diskussion stehen also insgesamt 4x2 verschiedene Fälle.
Insbesondere sind die Fragen interessant, wie schnell sich in einem Meßsystem, das sich in der gesättigten Zone befindet, ein Wasserspiegel einstellen kann, wie er von der Lage der Dränageschichten abhängt und ob sich auch in einem Meßsystem, das in der ungesättigten Zone positioniert wurde, ein Wassersiegel einstellen kann.

Ergebnisse

In den Tabellen 1 und 2 sind die Rechenergebnisse für das hydraulische Potential h und die Sättigung s vor erfolgter Bohrung (t = 3650d), nach dem Filterausbau (t = 3650 d +0 d) sowie 1 d, 5 d, 30 d und 180 d nach Beginn der Aufsättigung der Bohrung im jeweiligen Mittelpunkt der 4 Filterstrecken an den Positionen 6, 9, 12, 14 dargestellt. Eine graphische Darstellung für die Umgebung von Position 9 und 12 erfolgt in den Abbildungen 3 und 4.
Zu Vergleichszwecken sind in den Tabellen auch noch 2 Positionen im gesättigten Bereich angegeben, die in der Nähe der Position 9 (der Punkt 4) und etwas weiter von der Position 9 (der Punkt 7) liegen. Die Zeit zwischen dem Bohrbeginn und dem Ausbau der Bohrung zur Grundwassermeßstelle bleibt bei dieser Modellierung, bei der es nur um grundsätzliche Tendenzen geht, unberücksichtigt.

Aus den Tabellen ergibt sich folgender Sachverhalt. Die Grundwassermeßstellen, deren Filterstrecken im gesättigten Teil der Kippe stehen, sind innerhalb von ca. 1 Monat soweit geflutet, daß der Filterbereich gesättigt ist. Der am Beobachtungspunkt berechnete Wasserspiegel liegt selbst im ungünstigsten Fall nicht mehr als 0,26 m unter dem Wasserspiegel, der vor der Bohrung an dieser Stelle berechnet wurde.

Beobach-tungspunkt	Filter-mitte		vor Filter-einbau	nach Filter-einbau	aktuelle Zeit [d]				Lage des Filters
Nr.	x[m]	y[m]	t=3650 d	t=3650 d	3650+1	3650+5	3650+30	3650+180	
4 (rot)	21,00	16,40	h=21,516 s= 1,000	21,490 1,000	17,944 1,000	20,977 1,000	21,344 1,000	21,611 1,000	
9 (blau)	23,00	12,00	21,076 0,100	8,382 0,100	12,533 1,000	20,414 1,000	20,883 1,000	21,243 1,000	ges. Zone Drängebiet
6 (grün)	23,00	30,00	28,684 0,377	26,382 0,100	27,587 0,160	28,180 0,238	28,450 0,299	28,497 0,313	unges. Zone Drängebiet
12 (rot)	51,00	34,38	33,350 0,515	30,766 0,100	30,795 0,101	31,241 0,116	32,190 0,182	32,799 0,290	unges. Zone
14 (grün)	51,00	16,65	19,918 1,000	13,039 0,100	15,494 0,446	16,712 1,000	19,748 1,000	20,226 1,000	ges. Zone
7 (rosa)	12,00	21,98	22,679 1,000	22,679 1,000	22,660 1,000	22,647 1,000	22,647 1,000	22,632 1,000	

Tabelle 1: Hydraulische Potentiale h [m] und Sättigungen s für die Beobachtungspunkte 6, 9, 12, 14 (Filtermittelpunkte von Grundwassermeßstellen) incl. Vergleichspunkte 4, 7 in einem rechtwinkligen Koordinatensystem, dessen linker unterer Eckpunkt (Eckpunkt der Modellfläche) bei x=10 m, y=10 m liegt.
Die Grundwassermeßstellen liegen nicht in einer verdichteten Umgebung.

Beobach-tungspunkt	Filter-mitte		vor Filter-einbau	nach Filter-einbau	aktuelle Zeit [d]				Lage des Filters
Nr.	x[m]	y[m]	t=3650 d	t=3650 d	3650+1	3650+5	3650+30	3650+180	
4 (rot)	21,00	16,40	h=21,516 s= 1,000	21,490 1,000	20,440 1,000	19,758 1,000	21,375 1,000	21,688 1,000	
9 (blau)	23,00	12,00	21,076 1,000	8,382 0,100	12,246 1,000	19,859 1,000	20,814 1,000	21,192 1,000	ges. Zone Drängebiet
6 (grün	23,00	30,00	28, 684 0,377	26,382 0,100	26,659 0,108	27,779 0,179	28,384 0,282	28,694 0,382	unges. Zone Drängebiet
12 (rot)	51,00	34,38	33,350 0,515	30,766 0,100	30,769 0.100	30,839 0,102	31,422 0,124	32,132 0,176	unges. Zone
14 (grün)	51,00	16,65	19,918 1,000	13,039 0,100	14,356 0,171	15,334 0,374	19,722 1,000	20,194 1,000	ges. Zone
7 (rosa)	12,00	21,98	22,679 1,000	22,679 1,000	22,674 1,000	22,655 1,000	22,647 1,000	22,633 1,000	

Tabelle 2: Hydraulische Potentiale h [m] und Sättigungen s für die Beobachtungspunkte 6, 9, 12, 14 (Filtermittelpunkte von Grundwassermeßstellen) incl. Vergleichspunkte 4, 7 in einem rechtwinkligen Koordinatensystem, dessen linker unterer Eckpunkt (Eckpunkt der Modellfläche) bei x=10 m, y=10 m liegt.
Die Grundwassermeßstellen liegen in einer verdichteten Umgebung.

Dabei erfolgt im Punkt 9 wegen des unmittelbaren Anschlusses an die Dränageschicht eine erheblich schnellere Sättigung und auch ein eher einsetzender Wasseranstieg als an der Position 14. Die zusätzlich diskutierte Möglichkeit der Verdichtung des Materials im Mantelbereich der Bohrung hat dagegen nur einen geringen Einfluß, der sich in einer vergleichsweise nur geringfügigen Zeitverzögerung der Vorgänge gegenüber dem Fall ohne Verdichtung äußert.
Demgegenüber zeigt sich, daß bei den beiden Filterstrecken im ungesättigten Bereich der Kippe, die auch ohne Bohrung nach 180 d noch nicht geflutet wären, auch nach 180 d keine

Aufsättigung erfolgt ist, im Gegenteil ist die Sättigung jetzt geringer als im Zustand vor der Bohrung, was natürlich damit zusammenhängt, daß „trockener" Filterkies in das Grundwassermeßsystem eingebaut wurde. Auch der Anschluß des Punktes 6 an die Dränagezone ändert an dieser Tatsache nichts.
Beide Situationen entsprechen der Praxis bei der Anlage von Grundwassermeßstellen: man positionert dort die Filter, wo nach den Voruntersuchungen möglichst bereits Wasser ins Bohrloch fließt.

Einflüsse auf die Umgebung der Meßstellen in der gesättigten Zone

Trotz weitgehend geklärter Situation im Filterstreckenbereich soll der Flutungsvorgang im Punkt 9 detailliert über die Rechenergebnisse in der Abb. 3 diskutiert werden, weil daran sowohl die Leistungsfähigkeit der Modellrechnungen als auch ihre Anwendbarkeit bei der Interpretation praktischer Fragestellungen demonstriert werden kann.
Der Fall t = 0 d in Abb. 3 stellt lediglich eine Vergrößerung von Abb. 1 dar, wobei jetzt zusätzlich auch noch die Vektoren der Filtergeschwindigkeit dargestellt sind. Bemerkenswert ist dabei die geringe Erhöhung der Grundwasseroberfläche an der Stelle, wo die Dränageschicht (die den Punkt 9 berührt) die Grundwasseroberfläche schneidet. Anhand der Geschwindigkeitsvektoren ist zu erkennen, daß diese Erhöhung zwei Ursachen hat, nämlich der bevorzugte nach unten gerichtete Wasserstrom aus den Dränageschichten der ungesättigten Zone und der nach oben gerichtete Zustrom aus der gesättigten Zone, der ebenfalls bevorzugt in den Dränageschichten erfolgt.
In Abb. 3 werden die jeweiligen Sättigungsverteilungen mit dem zugehörigen Geschwindigkeitsfeld zu den Zeitpunkten 1 d, 5 d, 30 d nach Beginn der Aufsättigung der Bohrungen für den Fall dargestellt, bei dem eine Verdichtung im Mantelraum der Bohrung vorliegt. Danach ist zu sehen, welche Prozesse ablaufen. Das Filtermarial, das Kippenmaterial zwischen den Dichtungen und die Tonsperren sättigen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf, die mit dem jeweiligen K_f -Wert gekoppelt sind. Am schnellsten wird das „trockene" Filtermaterial mit dem höchsten K_f -Wert aufgesättigt. Das dazu benötigte Wasser wird der Umgebung entzogen. Der Zufluß erfolgt dabei hauptsächlich über die gesättigte Dränagezone.
Daß das tatsächlich so ist, ist aus den Geschwindigkeitsvektoren bei t = 1 d zu ersehen. Letztendlich führt der zum Filter gerichtete Wasserstrom zu einem Wasserdefizit am Schnittpunkt der Dränagezone mit der Grundwasseroberfläche, weshalb sich an dieser Stelle im Gegensatz zum Zeitpunkt t = 0 d nunmehr ein Sättigungsminimum herausbildet.
Mit zunehmender Zeit ist die Sättigung des Filtermaterials soweit fortgeschritten, daß kaum noch Wasser zur weiteren Aufsättigung benötigt wird. Der Betrag der Geschwindigkeiten wird dann geringer. Schließlich ändern die Geschwindigkeitsvektoren im gesättigten Teil der Dränagezone ihre Richtung. Das Sättigungsminimum wird dann wieder aufgefüllt. Nach längerer Zeit bildet sich wieder analog zu t = 0 d ein Maximum aus.

- Zur Zeit t = 5 d fließt das Wasser noch zur Filterstrecke. Es gibt noch das Sättigungsminimum.
- Zur Zeit t = 30 d hat sich die Fließrichtung bereits umgekehrt. Es gibt kein Sättigungsextremum mehr.
- Zur Zeit t = 180 d (in Abb. 3 nicht dargestellt) ist der Ausgangszustand (t = 0 d) wieder weitgehend erreicht. Das Sättigungsmaximum existiert wieder. Der Einfluß der gesetzten Grundwassermeßstelle auf das Strömungsfeld in der Kippe ist überwunden.

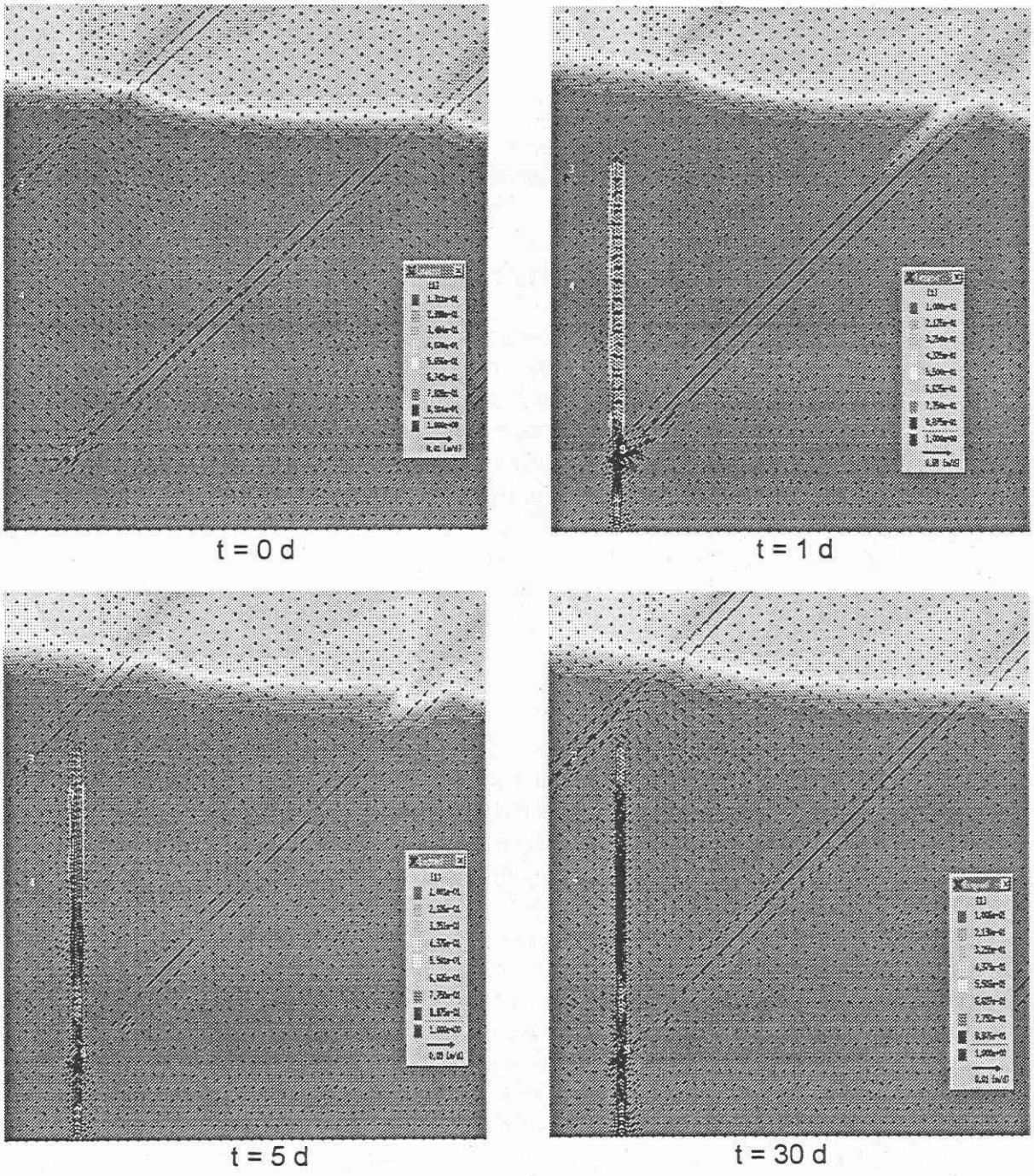


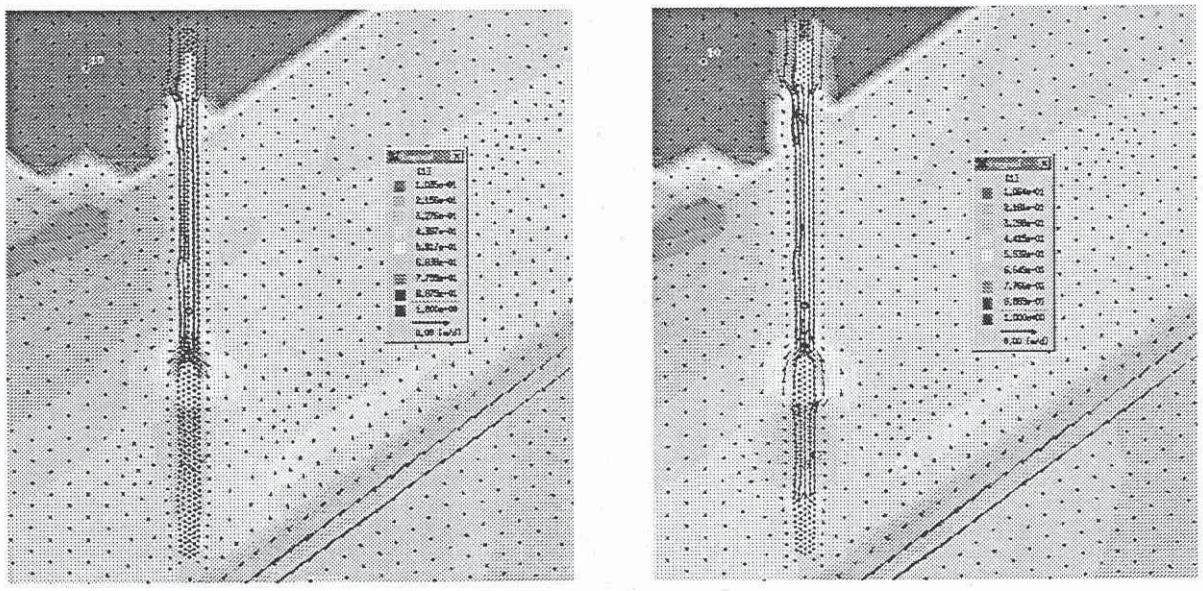
Abb. 3: Sättigungs- und Geschwindigkeitsverteilung in der Umgebung der Grundwassermeßstelle 9 (Mantelbereich der Bohrung ist verdichtet)
t = 0 d vor Einbringen der Bohrung (Detail von Abb. 1),
t = 1 d nach Beginn des Aufsättigungsprozesses der Bohrung,
t = 5 d nach Beginn des Aufsättigungsprozesses der Bohrung,
t = 30 d nach Beginn des Aufsättigungsprozesses der Bohrung

Der hier rechnerisch verfolgte Aufsättigungsprozeß des Filterbereichs einer Meßstelle in der gesättigten Zone ist phänomenologisch auch ohne Rechnung zu verstehen. Er weist aber auf einen Effekt hin, dem bisher in der hydrogeologischen Erkundungspraxis kaum Beachtung geschenkt wurde. Trotz ständig steigenden Wasserstands im Beobachtungsrohr ändert sich auch nach größeren Zeiträumen beim Flutungsprozeß einer Grundwassermeßstelle in Filternähe die Fließrichtung. Diese Änderungen könnten u. U. zu Fehlinterpretationen von Ergebnissen der Einbohrloch-Tracermethoden bei der Bestimmung von Fließrichtungen in der

Kippe führen. Eine gemessene Richtungsänderung muß also nicht unbedingt auf geänderte großräumige Fließverhältnisse in der Kippe zurückzuführen sein. Sie kann auch eine Folge einer künstlich in der inhomogenen Kippe erzeugten instationären Situation sein, wie sie eine noch nicht lange genug existierende hydrogeologische Erkundungsbohrung während des Aufsättigungsprozesses oder kurz vorher durchgeführte Pumpmaßnahmen darstellen.

Besonderheiten an Meßstellen in der ungesättigten Zone

Als interessanter Gesichtspunkt erweist sich auch der zu Beginn der Untersuchungen vermutete Dränageeffekt, den die angenommene 5 m lange Säule B aus dem feuchten Kippenmaterial zwischen den beiden oberen Dichtungen hervorrufen kann. Das oberhalb der mittleren Filterdichtung eingelagerte Material zeigt wegen des höheren K_f gegenüber der Umgebung dann in der oberen Zone eine geringere Sättigung als die Umgebung. Die Einlagerung stellt analog den bisherigen Modellergebnissen wieder eine Dränage dar, die das Wasser aus den oberen Zonen der Kippe in die tieferen Bereiche der Kippe transportiert. Sie führt zu einer verstärkten Aufsättigung über der mittleren Tonsperre.



verdichtete Umgebung der Bohrung unverdichtete Umgebung der Bohrung

Abb. 4: Sättigung 180 d nach Beginn der Aufsättigung einer Bohrung mit dem Filtermittelpunkt im Beobachtungspunkt 12 mit und ohne Verdichtung des Kippenmaterials

In der Abb. 4 ist dieser Sachverhalt am Beobachtungspunkt 12 in der ungesättigten Zone noch 180 Tage nach Installation der Grundwassermeßstelle zu erkennen. In Abb. 4 ist ebenfalls der Fall dargestellt, wo die Bohrung durch verdichtetes Material umgeben ist. Der vertikale Abfluß kann dann nicht mehr ungehindert erfolgen. Das führt dazu, daß das Wasser oberhalb der Tonsperren länger gehalten wird, als es ohne Verdichtung der Fall wäre. Wie bereits beim Aufsättigungsprozeß der Kippe erörtert, können sich dann je nach Ausdehnung der Dränagezonen, Anfangssättigung und K_f-Wert des verfüllten Materials der Bohrung und des verdichteten Kippenmaterials in der Mantelzone der Bohrung auch ohne Einfluß der Grundwasserneubildung vollständig gesättigte Zonen oberhalb der Tondichtungen herausbilden, wobei das entsprechende Wasser aus den darüberliegenden Zonen stammt. Aus beiden Abbildungen ist zu sehen, wie dieses Wasser die Tondichtung am Rand umfließt und in tiefere Zonen vordringt. Werden im Filterbereich oder in Nähe der Tonsperren

Sickerwassersammler positioniert, so stellen die Wasseransammlungen oberhalb der Tonsperren also eine potentielle Gefahr für Fehlinterpretationen (das Wasser stammt eigentlich aus anderen Zonen) dar, selbst für den Fall, daß die Tonsperren „dicht" bleiben. Diese Gefahr wird ausgeschaltet, wenn beim Ausbau der Grundwassermeßstellen der Einbau von lockerem Kippenmaterial zwischen den Tonsperren vermieden wird.

Schlußfolgerungen und Empfehlungen

Aus den Modelluntersuchungen folgt, daß die in den einzelnen Meßstellen gemessenen Änderungen der Fließrichtung, des hydraulischen Potentials, der Konzentration oder der Temperatur nicht mit den großräumigen Prozessen in der Kippe zusammenhängen müssen. Fehlinterpretationen lassen sich vermeiden, wenn das Bohrgut als Zwischenfüllung durch Material mit niedrigem K_f ersetzt wird. Einflüsse eventueller Wegsamkeiten sollten über Packerexperimente ermittelt werden. Wasserstandsmessungen und Einbohrloch-Tracerexperimente sollten nur in „wochenlang" und weiträumig ungestörten Kippenbereichen durchgeführt werden.

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