

Publikationsserie B 73:3

GRUNDVATTENAVSÄNKNING

Del 2. Evaluering av lågpermeabla
lagers hydrauliska diffusivitet
med hjälp av provpumpningsdata

L Carlsson

Rättelse

Geohydrologiska forskningsgruppen, CTH meddelande nr 3,

Inst. för vatten- och avloppsteknik, Publikationsserie B 73:3

Grundvattenavsänkning

Del 2: Evaluering av lågpermeabla lagars hydrauliska diffusivitet
med hjälp av propumpningsdata

Sid 14 tabell 1, kolumn 4

står	skall vara
$d \frac{m^2}{sek}$	$d \frac{m^2}{sek}$
$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Innehållsförteckning

	Sid
Förord	2
Referat	3
Abstract	3
Inledning	4
Orientering	4
Läckande akvifärer	6
Läckande akvifärer med observationer av vattentrycksförändring i det lågpermeabla lagret vid provpumpning	8
Data från provpumpning i Angered av Bo Alte AB	12
Orientering	12
Områdets geologiska uppbyggnad samt placering av piezometrar i det lågpermeabla lagret	12
Analys av det lågpermeabla lagrets hydrauliska dif- fusivitet	12
Sammanfattning	14
Refererad litteratur	16

Förord

Genom forskningsanslag från Statens råd för byggnadsforskning (BFR) har vid avdelningen för väg- och vattenbyggnad vid Chalmers Tekniska Högskola en geohydrologisk forskningsgrupp organiserats där institutionerna för geologi, geoteknik med grundläggning, vattenbyggnad samt vattenförsörjnings- och avloppsteknik ingår.

Föreliggande arbete utgör ett försök att utgående från avsänkningar i såväl ett slutet grundvattenmagasin som överlagrande lågpermeabla lager i samband med provpumpning beräkna den hydrauliska diffusiviteten för ett lågpermeabelt lager inom ett område vid Angered i Göteborg. Grundmaterial för beräkningarna har välvilligt ställts till förfogande av ingenjörsfirma Bo Alte AB i Göteborg som på uppdrag av AB Göteborgshem genomfört nämnda provpumpning.

Göteborg i maj 1973

Leif Carlsson

Referat

Analys av hydrauliska diffusiviteten för lågpermeabelt lager utgående från avsänkingsmätningar i såväl en sluten akvifär som överlagrande lågpermeabelt lager i samband med provpumpning har beskrivits av Neuman och Witherspoon (1972). Nämnda analys har tillämpats på avsänkingsvärden erhållna i samband med provpumpning i Angered, Göteborg utförda och välvilligt ställda till förfogande av ingenjörfirma Bo Alte AB i Göteborg. Geologiskt uppbyggs provpumpningsområdet av cirka 25 m skiktad lera överlagrande 0,5 m friktionsmaterial närmast berg. Markytan är belägen cirka 60 m ö.h. Erhållna värden på hydrauliska diffusiviteten, i geotekniska sammanhang även benämnt c_v -tal, är av storleksordningen $10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sek}$ för leran.

Abstract

Analysis of the hydraulic diffusivity of aquitards in connection with pumping test of leaky aquifers has been described by Neuman and Witherspoon (1972). This analysis has been applied to measurements from Angered, Gothenburg where pumping test has been carried out by the consulting firm Bo Alte Ltd, Gothenburg. This area is geologically built up by about 25 meters of layered quaternary clay above 0,5 meters of sand and silt overlaying the bedrock. Ground surface is situated about 60 meters above sea-level. Values of $10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$. have been calculated for the clay.

Inledning

Avsänkning av grundvattenytan eller grundvattnets tryckyta i samband med provpumpningar ger upplysning om den grundvattenförande formationens (akvifärens) geohydrologiska parametrar, transmissivitet och magasinskoefficient. (Beträffande geohydrologisk nomenklatur hänvisas till Pfannkuch 1969.) Vid provpumpning av slutna akvifärer, dvs. grundvattenförande formationer som saknar fri grundvattenyta erhålles förutom en avsänkning av grundvattnets tryckyta i akvifären även en porvattentryckssänkning i de över- eller underlagrande lågpermeabla lagren. Storleken av den sistnämnda avsänkningen bestäms förutom av läge i förhållande till pumpbrunn och akvifär även av dessa lagres hydrauliska diffusivitet, dvs. förhållandet mellan den vertikala permeabiliteten och den specifika magasinskoefficienten hos det lågpermeabla lagret. Genom analys av porvattentrycksförändringar i lågpermeabla lagren samt grundvattenståndssänkning i samband med provpumpning är det möjligt att beräkna den hydrauliska diffusiviteten för de lågpermeabla lagren.

Orientering

Analys av grundvattenavsänkning i samband med provpumpning för att bestämma det provpumpade grundvattenmagasinets transmissivitet och magasinskoefficient utgår från det av Theis (1935) angivna sambandet mellan tid, avstånd, avsänkning och provpumpningskapacitet. Metoden innebär superponering av erhållen sambandskurva mellan avsänkning och tid efter pumpstart mot sambandet mellan u och $W(u)$ enligt

$$W(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

där
$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4 T \cdot t}$$

S = grundvattenmagasinets magasinskoefficient

T = grundvattenmagasinets transmissivitet

r = avstånd mellan pumpbrunn och observerad grundvattennivå

t = tid efter pumpstart

Förutsättningar för giltigheten av det av Theis beskrivna förfarings-sättet är bland annat följande:

1. Dupuit - Forchheimers antaganden gäller, dvs. grundvattnets hastighet inom betraktad sektion är direkt proportionell mot tryckhöjdens gradient.
2. Grundvattenmagasinet är homogent och isotropt samt har undre begränsande yta horisontell.
3. Grundvattenmagasinet har oändlig utsträckning i horisontell led.
4. Grundvattenmagasinet dräneras omedelbart, dvs. magasinskoefficienten S har ett konstant ej tidsberoende värde.
5. All grundvattenströmning mot uttagspunkten är radiell.
6. Ursprunglig grundvattenyta (piezometrisk yta) är horisontell (eller har mycket svag lutning)
7. Brunn genom vilken grundvatten uttages genomtränger hela grundvattenmagasinet.
8. Diametern på uttagsbrunnen är liten i jämförelse med andra dimensioner inom betraktat grundvattensystem.
9. Grundvatten bortpumpas med konstant kapacitet.
10. Grundvattenmagasinet tillföres ej vatten genom dränering från över- eller underlagrande material.

Nämnda förutsättningar är under en provpumpning sällan uppfyllda samtidigt. Vid exempelvis en akvifär med fri grundvattenyta (öppen akvifär) är förutsättning nr 4 ej uppfylld då vid pumpningen den vattenförande sektionen samtidigt minskas. Vidare förutsätter härledningen av Theis sambandsekvation att akvifären ej är dränerande, dvs. att avsänkningen i samband med provpumpningen ej medför att över- eller underlagrande material genom vertikal vattentransport dräneras till akvifären. Erhåller akvifären vattentillskott genom nämnd dränering kallas den i litteraturen för läckande akvifär (leaky aquifer).

Läckande akvifär

En sluten akvifär uppbyggd exempelvis av sand och grus och överlagrad av silt eller lera kommer vid bortpumpning av vatten från densamma att dränera överlagrande lågpermeabelt material. Motsvarande kan ett under akvifären beläget lågpermeabelt lager dräneras.

Dräneringen av de lågpermeabla lagren, dvs. läckaget till akvifären medför avvikelser från avsänkingsförloppet enligt Theis typkurva (Theis 1935).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

där s = avsänkningen i akvifären

Teori för matematisk behandling av läckande akvifärer har presenterats av Hantush och Jacob (1955). Enligt denna teori har dräneringen av de lågpermeabla lagren antagits ej medföra någon magasinförändring i densamma. Följande uttryck för avsänkningen erhålles härmed (Hantush och Jacob 1955)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \frac{r}{\lambda}) \quad (3)$$

där Q = provpumpningskapacitet

$$\lambda = \sqrt{\frac{k \cdot b \cdot m'}{k'}}$$

k = akvifärens permeabilitet ($\frac{T}{b}$)

b = akvifärens mäktighet

k' = lågpermeabla lagrets vertikala permeabilitet

m' = lågpermeabla lagrets mäktighet

Vid bestämning av T , S och λ användes superponering analogt med Theis förfarande, varvid erhållna samband mellan tid och avsänkning superponeras mot sambandet mellan u och $W(u, \frac{r}{\lambda})$ för olika värden på parametern $\frac{r}{\lambda}$. Funktionen $W(u, \frac{r}{\lambda})$ kan härvid tecknas enligt följande (Hantush och Jacob 1955, Hantush 1964):

$$W(u, \frac{r}{\lambda}) = \int_u^{\infty} \frac{1}{y} \exp(-y - \frac{r^2}{4\lambda^2 y}) dy \quad (4)$$

Teorin beträffande läckande akvifärer har modifierats av Hantush (1960, 1964) varvid även den genom dräneringen av det lågpermeabla lagret orsakade magasinförändringen i densamma medtagits. Enlig Hantush (1964) kan härvid två fall urskiljas enligt fig. 1. Det första fallet innebär att grundvattenytan i den i fig. 1 markerade övre akvifären ej påverkas av avsänknningen i den undre. I fall två antages det lågpermeabla lagret vara överlagrat av impermeabelt lager, vilket ej medger någon tillförsel av vatten till densamma. I båda fallen antages grundvattnets trycknivå i slutna akvifären överensstämma med trycknivån i det lågpermeabla lagrets undre del.

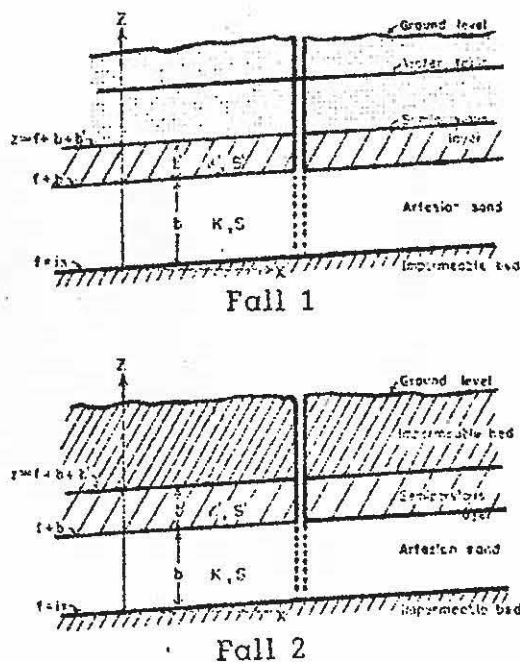


Fig. 1 Olika läckande akvifärer enligt Hantush (1964)

Avsänkningsförloppet i akvifären i de nämnda fallen kan approximativt tecknas enligt följande (Hantush 1964) :

a. Lösning med kort tid $t < 0,1 \cdot \frac{m' S'}{k'}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H(u, \Psi) \quad (5)$$

$$\text{där } \Psi = \frac{r}{4b} \sqrt{\frac{S' \cdot k' \cdot b}{k \cdot S \cdot m'}} \quad (6)$$

S' = det lågpermeabla lagrets magasinskoefficient

b. Lösning med lång tid $t > 2 \cdot \frac{m' S'}{k}$

$$\text{Fall 1 } s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_1', \frac{r}{\lambda}) \quad (7)$$

$$\text{Fall 2 } s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_2') \quad (8)$$

$$\text{där } u_1' = \frac{3S + S'}{3S} \quad (9)$$

$$u_2' = \frac{S + S'}{S} \quad (10)$$

Analogt med tidigare nämnda förfaringssätt med utvärdering medelst sambandskurvor, erhålles värden på de olika geohydrologiska parametrarna genom superponering av erhållna samband mellan tid och avsänkning mot exempelvis sambandet mellan u och $H(u, \Psi)$ för olika värden på parametern Ψ .

Läckande akvifär med observationer av vattentrycksförändring i det lågpermeabla lagret vid provpumpning

Vid utvärdering av erhållna samband mellan tid och avsänkning enligt den av Hantush och Jacob (1955) framförda teorin erhålles ofta alltför stora värden på akvifärens permeabilitet och alltför små värden på det lågpermeabla lagrets permeabilitet (Neuman och Witherspoon 1969b). Enligt teori för läckande akvifärer av Neuman och Witherspoon (1969a) är avsänkningen i varje lager dvs. varje akvifär resp. lågpermeabelt lager en funktion av dimensionslösa parametrar Ψ_{ij} och $(\frac{r}{\lambda})_{ij}$, vilka beror av såväl akvifärens som nämnda lagers hydrauliska karakteristika. Detta medför att för bestämning av Ψ och $\frac{r}{\lambda}$ bör avsänkningens storlek och tidsfunktion vara känd icke endast i akvifären utan även i de lågpermeabla lagren. Beräkningar enligt Hantush (1960, 1964) med parameter Ψ (ekv. 5) är endast tillämpliga för små tidsvärden.

Vidare tages här endast hänsyn till avsänkingsförloppet i akvifären, vilket med hänsyn till superponeringsförfarandet ger stora möjligheter till misstolkningar. Möjligheten att i samband med avsänkingsförloppet erhålla värden på de lågpermeabla lagrens vertikala variation beträffande $\frac{k'}{S'}$, dvs. beträffande dess hydrauliska diffusivitet föreligger ej heller vid beräkningar enligt Hantush (1960, 1964).

Vid bortpumpning av vatten från en sluten akvifär överlagrad av ett lågpermeabelt lager enligt fig 1 (fall 2) kan som tidigare nämnts avsänkningen i akvifären beskrivas enligt följande asymptotiska ekvation för små värden på t (Hantush 1960, 1964)

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{1}{4t_D}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Psi}{\sqrt{y(4t_D y - 1)}}\right) dy \quad (11)$$

I det lågpermeabla lagret erhålles följande samband (Neuman och Witherspoon 1972)

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\frac{1}{4t_D}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Psi + \sqrt{y \cdot t_D}}{\sqrt{y(4t_D y - 1)}}\right) dy \quad (12)$$

där

$$t_D = \frac{k \cdot t}{S_s \cdot r^2} = \frac{T \cdot t}{S \cdot r^2}$$

$$t'_D = \frac{k' \cdot t}{S'_s} = \frac{T' \cdot t}{S' \cdot z^2}$$

S_s = akvifärens specifika magasinskoefficient

S'_s = det lågpermeabla lagrets specifika magasinskoefficient

z = vertikala avståndet mellan mätpunkt i akvitarden och akvifärens övre begränsning

T' = det lågpermeabla lagrets transmissivitet

s = avsänkningen i akvifären

s' = avsänkningen i det lågpermeabla lagret

Teoretiskt är ekv. (11) och (12) begränsade till

$$t_D < \frac{1,6 \Psi^2}{\left(\frac{r}{\lambda}\right)^4} \quad (13)$$

dvs. $t < 0,1 \cdot \frac{m' S'}{K'}$. Ur praktisk synvinkel kan dock t_D vara större än villkoret enligt ekv. (13). Speciellt gäller detta när avståndet mellan mätpunkt i lågpermeabla lagret och akvifären är litet (Neuman och Witherspoon 1972).

Neuman och Witherspoon (1968) har presenterat en teori för svagt läckande akvifärer där avsänkningen i det lågpermeabla lagret kan tecknas enligt

$$s'(r, z, t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} - \text{Ei} \left(- \frac{t'_D \cdot y^2}{t_D (4t'_D y^2 - 1)} \right) e^{-y^2} dy \quad (14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{4t'_D}}$$

Avsänkningen s i akvifären kan härvid tecknas enligt Theis, se ekv. (2). Genom att betrakta förhållandet $\frac{s'}{s}$ som funktion av t'_D har Neuman och Witherspoon (1972) visat att för praktiska värden på t_D , nämnda förhållande är oberoende av Ψ när denna parameter är mindre än ett. Då Ψ är direkt proportionell mot radiella avståndet från pumpbrunnen kan storleken av densamma hållas inom nämnda gräns genom att placera observationspunkterna tillräckligt nära pumpbrunnen.

Nämnda metod kan enligt Neuman och Witherspoon (1972) tillämpas på läckande akvifärer med över- eller underlagrande lågpermeabla lager. En serie kurvor utvisande sambandet mellan $\frac{s'}{s}$ och t'_D för olika värden på parametern t_D har framställts av Witherspoon och Neuman (1967) samt av Neuman och Witherspoon (1972), se fig. 2. Vid utvärdering av det lågpermeabla lagrets hydrauliska diffusivitet beräknas förhållandet mellan avsänkningen s i akvifären och vattetrycksänkningen s' i nämnda lager på samma avstånd r från pumpbrunnen och vid samma tidpunkt t efter pumpstart. Beräknat förhållande $\frac{s'}{s}$ ställs i relation till motsvarande värde på t_D . Som framgår av fig. 2 erhålles mindre variationer i värdet av t_D vid givet värde på $\frac{s'}{s}$ för $t_D > 100$. Beräkning av t_D förutsätter att värde på T och S för akvifären är kända. Utvärdering av dessa

värden utföres genom superponering av avsnänkingsvärden för akvifären enligt exempelvis Theis metod, se exempelvis Carlsson (1973).

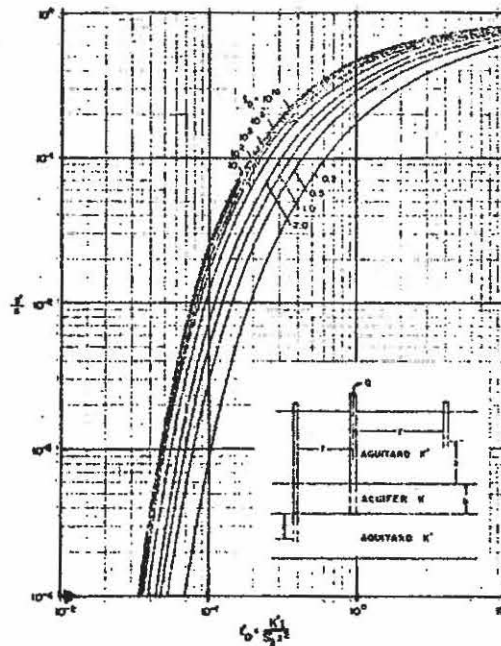


Fig. 2 Sambandet mellan $\frac{s^I}{s}$ och t_D^I för olika värden på t_D^I vid ett halv-
oändligt lågpermeabelt lager (Neuman och Witherspoon 1972)

Kännedom om $\frac{s^I}{s}$ och motsvarande t_D^I - värde ger ur fig.2 värde på t_D^I .
Utgående från detta senare värde kan den hydrauliska diffusiviteten,
 α beräknas enligt

$$\alpha = \frac{z^2}{t} \cdot t_D^I \quad (15)$$

Neuman och Witherspoon (1972) har påpekat att för $\frac{s^I}{s} < 0,1$ är värdet av t_D^I reelltvis okänsligt vad beträffar storleken av $\frac{s^I}{s}$. Hydrauliska diffusiviteten α är således för korrekt utvärdering i första hand beroende av noggrann bestämning av t resp. z medan trycksänkningen s^I med tillräcklig noggrannhet torde kunna erhållas utgående från exempelvis mätningar medelst öppna piezometrar (Neuman och Witherspoon 1972).

Små värden på Ψ resp. $\frac{r}{\lambda}$ medför små avvikelser från Theis typkurva.
Storleken av nämnda parametrar varierar med avståndet från pump-

brunnen, dvs från nära noll i anslutning till pumpbrunnen till stora värden med ökande avstånd r . Möjligheten att analysera akvifärers geohydrologiska parametrar utgående från Theis typkurva är således störst vid betraktelse av sambandet mellan tid och avsänkning för små värden på r . Avståndavsänkingsanalyser baserade på Theis metoder kan härvid ej generellt appliceras och bör sålunda undvikas vid läckande akvifärer (Neuman och Witherspoon 1972).

Data från provpumpning i Angered av Bo Alte AB

Orientering

Ingenjörskontor Bo Alte AB har på uppdrag av AB Göteborgshem genomfört en provpumpning inom ett område i Angered med avsikt att åstadkomma en långvarig grundvattenavsänkning. Material från denna provpumpning har välvilligt ställts till förfogande av Bo Alte AB. Provpumpningen och avsänkingsdata för densamma har tidigare beskrivits av Bo Alte AB (1972). Analys av akvifärens geohydrologiska data har genomförts av Carlsson (1973).

Områdets geologiska uppbyggnad samt placering av piezometrar i det lågpermeabla lagret

Provpumpningsområdet uppbygges geologiskt av 20 - 35 m lera övergarande 0,2 - 1,0 m friktionsmaterial. Enligt uppgift av Bo Alte AB är leran skiktad med förekomster av mindre tunna molager. Inom området har 4 st. pumpbrunnar installerats. Dessutom har grundvattenståndsrör ned till friktionslager samt piezometrar för porvattentryckmätningar på olika nivåer i leran installerats. Placering av nämnda brunnar, rör och piezometrar framgår av fig. 3.

Analys av det lågpermeabla lagrets hydrauliska diffusivitet

Under ett inledande stadium i provpumpningen bortpumpades vatten ur pumpbrunn P1. Resultat av grundvattenavsänkningen i friktionslagret liksom porvattentryckminskningen under denna period framgår av Bo Alte AB (1972).

Piezometrar för porvattentryckmätningar är belägna på varierande nivåer över friktionslagrets (akvifärens) överyta. Nivåerna framgår

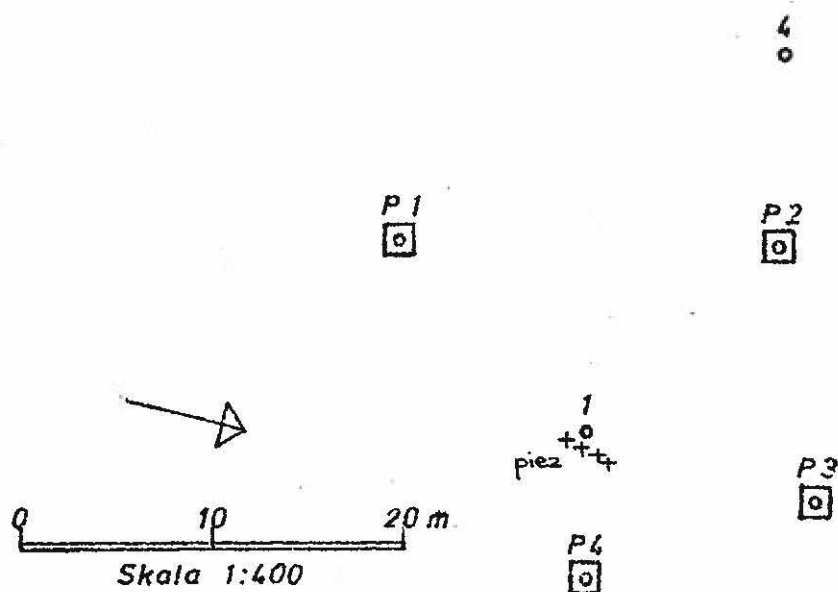


Fig. 3 Plan över pumprör (P1 - P4), grundvattenståndsror (1, 4) och piezometrar (piez) vid Bo Alte AB:s provpumpningsplats i Angered.

av tabell 1 där även beräknade värden på förhållandet $\frac{s^1}{s}$ är angivna. Av tabell 1 framgår vidare beräknade värden på t_D samt utgående från erhållna värden på t_D^1 beräknade värden på den hydrauliska diffusiviteten α . Vid beräkningarna av t_D har antagits att akvifären, dvs friktionslagret, har en mäktighet av 0,5 m samt att dess transmissivitet och magasinskoefficient är $10^{-5} \text{ m}^2/\text{sek}$. resp. 10^{-5} (Carlsson 1973).

Som framgår av tabell 1 synes värdet på hydrauliska diffusiviteten minska med tiden. Huruvida denna minskning kan sättas i samband med det förhållande att leran (det lågpermeabla lagret) under det tidiga av-sänkingsförloppet reagerar elastiskt, dvs dess magasinskoefficient, är mycket liten medan den under senare skedet har en irreversibel konsolidering innebärande ett större värde på magasinskoefficienten, är mycket svårt att avgöra. Nämnade förhållande beträffande lerans konsolidering påverkar även dess permeabilitet, dvs minskande permeabilitet med ökande belastning.

Tabell 1. Beräknade värden på $\frac{s'}{s}$, t_D samt α för olika piezometrar vid olika tidpunkter efter pumpstart. Data från Bo Alte AB (1972)

tid min	t_D	Piezometer							
		djup 24,7 m z = 1,7 m		djup 22,0 m z = 4,4 m		djup 19,0 m z = 7,4 m		djup 12,0 m z = 14,4 m	
		$\frac{s'}{s} \cdot 10^2$	$\alpha \frac{m^2}{sek}$	$\frac{s'}{s} \cdot 10^2$	$\alpha \frac{m^2}{sek}$	$\frac{s'}{s} \cdot 10^2$	$\alpha \frac{m^2}{sek}$	$\frac{s'}{s} \cdot 10^2$	$\alpha \frac{m^2}{sek}$
85	26	18,8	$7 \cdot 10^{-4}$						
145	44,4	30,6	$7 \cdot 10^{-4}$	4,72	$4 \cdot 10^{-4}$				
205	62,7	36,8	$6 \cdot 10^{-4}$						
265	81,1	35,6	$5 \cdot 10^{-4}$	5,94	$2 \cdot 10^{-4}$	1,98	$4 \cdot 10^{-4}$	1,98	$14 \cdot 10^{-4}$
325	99,5	41,9	$5 \cdot 10^{-4}$						
385	117,9	47,7	$5 \cdot 10^{-4}$	7,28	$2 \cdot 10^{-4}$	3,62	$3 \cdot 10^{-4}$	1,82	$9 \cdot 10^{-4}$
1165	367			15,61	$0,7 \cdot 10^{-4}$	4,68	$1 \cdot 10^{-4}$	1,56	$3 \cdot 10^{-4}$

Den hydrauliska diffusiviteten benämnes i geotekniska sammanhang även c_v -tal och bestämningar av detsamma utföres laboriemässigt medelst ödometeranalys. Jämförande undersökningar av Wolff och Papadopoulos (1972) visar att hydrauliska diffusiviteten bestämd utgående från pumpförsök är cirka 10 - 1000 gånger större än motsvarande värde bestämt medelst ödometer. Motsägande resultat har dock angivits vid Penrose Conference 1971 (Witherspoon och Freeze 1972).

Sammanfattning

Den möjlighet, som i samband med provpumpning av läckande akvifär föreligger att bestämma ett över- eller underlagrande lågpermeabelt lagrs hydrauliska diffusivitet bör i högsta grad beaktas. Genom relativt enkla kompletterande piezometrar för porttrycksmätningar i nämnda lager kan fältmätningar av en även för geotekniska behov betydelsefull parameter utföras. Den metod som beskrivits av Neuman och Witherspoon (1972) baseras på mätningar under provpumpningens initialskele och beräknade värden på den hydrauliska diffusiviteten som härvid erhålles

återspeglar bestämningen i vilka även i det lågpermeabla lagret förekommande lager med avvikande permeabilitet ingår. Erhållna resultat från provpumpningar av Bo Alte AB i Angered visar att den hydrauliska diffusiviteten i ett lågpermeabelt lager uppbyggt av skiktad lera torde vara av storleksordningen $10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sek.}$

Refererad litteratur

- Bo Alte AB. 1972: Kontrollerad grundvattensänkning för bestämning av förkonsolideringstryck och kompressionsegenskaper på djupet. - BFR:s programgrupp för geohydrologisk forskning, lägesrapporter Nr 2. 28 nov. 1972.
- Carlsson, L. 1973: Grundvattenavsänkning. Del 1. Evaluering av akviferers geohydrologiska data med hjälp av provpumpningsdata. - Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik, publikationsserie B73:2. Göteborg 1973.
- Hantush, M.S., Jacob, C.E. 1955: Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. - Transactions, American Geophysical Union. Vol. 36, No. 1, February 1955, sid. 95 - 100.
- Hantush, M.S. 1960: Modification of the theory of leaky aquifers. - Journal of Geophysical Research. Vol. 65, No. 11, Nov. 1960, sid. 3713 - 3726.
- Hantush, M.S. 1964: Hydraulics of wells. - Advances in hydroscience. Vol. 1 - 1964, sid. 281 - 432. Academic Press. New York 1964.
- Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1968: Theory of flow in aquicludes adjacent to slightly leaky aquifers. - Water Resources Research. Vol. 4, No. 1, sid. 103 - 112.
- Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1969 a: Theory of flow in a confined two-aquifer system. - Water Resources Research. Vol. 5, No. 4, sid. 803 - 816, August 1969.
- Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1969 b: Applicability of current theories of flow in leaky aquifers. - Water Resources Research. Vol. 5, No. 4, sid. 817 - 829, August 1969.
- Neuman, S.P., Witherspoon, P.A. 1972: Field determination of the hydraulic properties of leaky multiple aquifer systems. - Water Resources Research. Vol. 8, No. 5, sid. 1284 - 1298, October 1972.

Pfannkuch, H-O. 1969: Elsevier's dictionary of hydrogeology. - Elsevier Publishing Company. Amsterdam 1969.

Theis, C.V. 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage.-Transactions, American Geophysical Union. Vol. 16, 1935, sid. 519 - 524.

Witherspoon, P.A., Neuman, S.P. 1967: Evaluating a slightly permeable caprock in aquifer gas storage: 1. Caprock of infinite thickness. - Journal of Petroleum Technology. Sid. 949 - 955. July 1967.

Witherspoon, P.A., Freeze, R.A. 1972: The role of aquitards in multiple-aquifer systems. - Geotimes, vol. 17, No. 4, sid. 22 - 24. April 1972.

Wolff, R.G., Papadopoulos, S.S. 1972: Determination of the hydraulic diffusivity of a heterogeneous confining bed. - Water Resources Research. Vol. 8, No. 4, sid. 1051 - 1058. August 1972.