

Wodoprzepuszczalność glin aluwialnych z uprzywilejowanymi drogami przepływu

Edward Wienclaw*, Stanisław Żakowicz*, Kazimierz Garbulewski*

Hydraulic conductivity of alluvial clay containing preferential paths of groundwater flow

S u m m a r y. Alluvial clays containing macro-pores were found in the surface part of deposit at Chmielnik valley (Polish Flysch Carpathians), where biological wastewater treatment plant was localized. In order to determine the hydraulic conductivity (k) of clay deposit in vicinity of the plant, the comprehensive field and laboratory tests were made. Besides the conventional test methods, special „in situ” model tests were performed. It was discovered that the hydraulic conductivity values measured with using the convectional methods ($k = 1 \times 10^{-9} \div 6 \times 10^{-7}$ m/s) do not represent the actual field values. The groundwater moves much faster through the clay layer than predicted with the hydraulic conductivity obtained in the tests. The model „in situ” tests indicated that value of hydraulic conductivity is $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s. Analysis of hydrogeological situation and results of alluvial clay properties assessment permitted to conclude that the clay layer cannot be considered as a sufficient natural sealant for the design wastewater treatment plant.

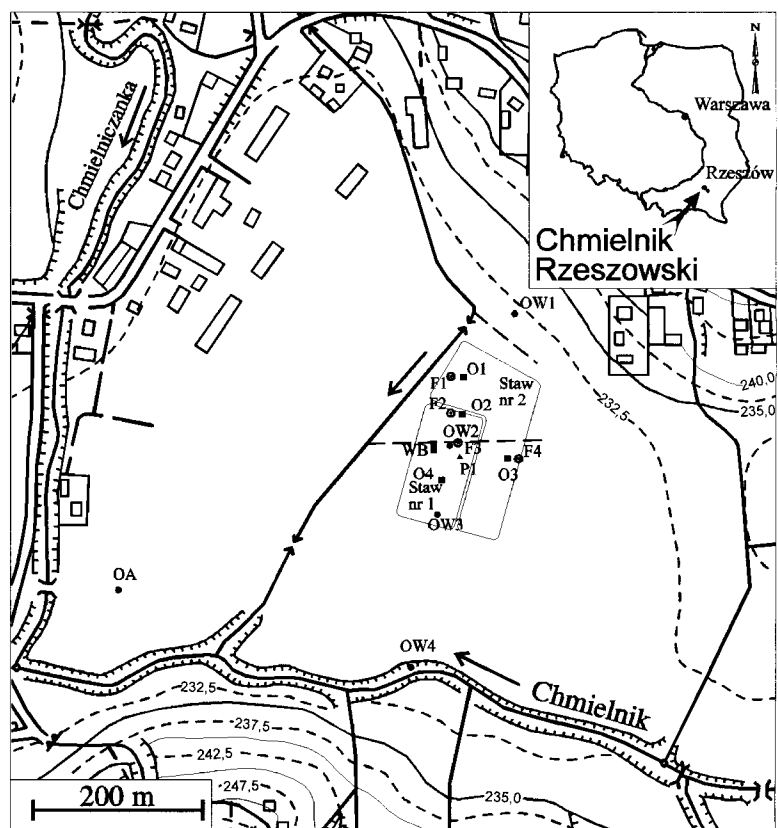
za składu granulometrycznego aluwiołów doliny Chmielnika oraz badania wykonane metodami tradycyjnymi przemaływały za możliwością uznania gruntów za słabo przepuszczalne. Wyniki tych badań nie uzasadniały jednak, zaobserwowanych podczas wizji terenowej, zaskakująco intensywnych dopływów wód podziemnych do wykopu badawczego i do odkrywek. W związku z tym podjęto specjalne obserwacje (reakcji stanów wód w otworze wiertniczym, wywołanej zalewaniem wykopu badawczego), umożliwiające określenie współczynnika wodoprzepuszczalności glin w wyniku rozwiązania zadania odwrotnego.

Sytuacja geologiczna i właściwości glin aluwialnych

Teren badań jest położony na Pogórzu Dynowskim, w dolinie potoku Chmielnik (ryc. 1). Współczesna powierzchnia doliny jest stosunkowo płaska; deniwelacje dochodzą do 1 m. Rozcina ją koryto Chmielnika o głębokości 3,5 m oraz koryto jego prawobrzeżnego dopływu (Chmielniczanka) i

Udział cząstek najmniejszych w składzie granulometrycznym glin aluwialnych, których podstawowym składnikiem są przede wszystkim minerały ilaste oraz różnego rodzaju tlenki, wodorotlenki itp, decyduje o małej zdolności tych gruntów do przewodzenia wody. Mogą one zawierać jednak liczne makropory, tj. pory większe niż utworzone w wyniku sedimentacji przez poszczególne cząstki gruntu, znajdujące się jedna przy drugiej w ośrodku gruntowym (Miller & Mishra, 1989). Spękania i szczeliny związane z wysychaniem, kanaliki korzeniowe, a także kanaliki wykonane przez zwierzęta są przykładem makroporów, które — występując w gliniastej pokrywie aluwialnej — decydują z kolei o większej zdolności do przewodzenia wody, aniżeli wynikałoby to ze składu granulometrycznego gruntów. Gdy makropory łączą się ze sobą, stanowią uprzywilejowane drogi przepływu wód podziemnych w otaczającym je gruncie (Beven, 1981; Govindarayu i in., 1995; Smettem i in., 1983).

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie, na podstawie wyników badań wodoprzepuszczalności gliniastej pokrywy aluwialnej w dolinie potoku Chmielnik (Garbulewski i in., 1994) (gdzie jest budowana biologiczna oczyszczalnia ścieków typu Lemna), wpływu metodyki badań na uzyskiwane wartości współczynnika wodoprzepuszczalności gruntów spoistych z uprzywilejowanymi drogami przepływu. Anali-



Ryc. 1. Plan sytuacyjny analizowanego odcinka doliny potoku Chmielnik i lokalizacja badań: OA — otwór archiwalny (Wisł & Kajstura, 1967), P1,OW1+OW4 — otwory badawcze, F1+F4 — piezometry, WB — wykop badawczy, O1+O4 — odkrywki

Fig. 1. General layout of analysed valley of Chmielnik with location of tests: OA — archive borehole (Wisł & Kajstura, 1967), P1,OW1+OW4 — boreholes, F1+F4 — test piezometers, WB — test pit, O1+O4 — outcrops

*Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

rowy odwadniające o głębokości 1÷1,5 m. Powierzchnię doliny budują spójne osady aluwialne strefy pozakorytowe o łącznej miąższości od 6 m do ponad 10 m. Do głębokości ok. 2,5 m są one silnie zmienione przez procesy glebowe. Analiza składu granulometrycznego badanych gruntów wykazała, że są to głównie gliny pylaste i gliny pylaste zwięzłe oraz ility pylaste. Dominuje w nich frakcja pyłowa, stanowiąca 65÷78% całego uziarnienia. Frakcja piaszkowa stanowi 1÷14%, a frakcja iltowa 16÷31% całego uziarnienia. Osady zawierają dużo części organicznych. Z badań metodą spalania uzyskano zawartość części organicznych w zakresie 2,0÷8,5%. Zawartość węglanów wapnia w badanych próbkach gruntu jest w większości poniżej 1%. Jednakże, dla niektórych próbek, określono zawartość CaCO₃ na 3÷5% lub nawet >5%. Wyniki badań (tab. 1) wykazały, że gliny aluwialne w dolinie Chmielnika, występujące w podłożu stawów oczyszczalni, są gruntami ekspansywnymi. Grunty występujące do głębokości 1,5 m, których wilgotność wynosi 20÷30%, mogą w wyniku zwiększenia wilgotności pęcznić. Zdolność gruntów do pęcznienia w warunkach *in situ* na głębokościach większych od 1,5 m jest niewielka, co wynika z faktu, że grunty te są w stanie pełnego nasycenia wodą; ich wilgotność naturalna jest większa od 60%, a stopień nasycenia $S_r=1,0$.

Tab. 1. Właściwości badanych gruntów aluwialnych
Tab. 1. Properties of alluvial soil tested

Właściwość gruntu Soil property	Jednostka Unit	Wartość Values
Gęstość właściwa, ρ_s Specific density	g/cm ³	2,70
Granica plastyczności, w_L Plastic limit	%	20,4÷30,5
Granica płynności, w_L Liquid limit	%	31,1÷56,6
Granica skurczalności, w_S Shrinkage limit	%	16,2÷29,1
Wskaźnik plastyczności, I_P Plasticity index	%	10,7÷27,9
Wilgotność naturalna, w_n Moisture content	%	20,7÷67,3
Wskaźnik pęcznienia Swelling index	%	0,1÷5,6
Siła pęcznienia Swelling pressure	kPa	12,5÷150

W strefie przypowierzchniowej (do głębokości 1,5÷2,5 m) badane gliny charakteryzują się wyjątkowo dużą wodonością w stosunku do glin zalegających głębiej. W strefie tej stwierdzono zaskakująco intensywne dopływy do wykopu badawczego i do odkrywek, związane z istnieniem w glinie uprzywilejowanych dróg przepływu. Zwierciadło piezometryczne przypowierzchniowych wód podziemnych w okresie styczeń–lipiec 1994 r. stabilizowało się na głębokości 0,5÷1,5 m ppt. W warunkach naturalnych są to wody o niewielkiej ruchliwości (wielkość poziomego gradientu hydraulicznego wynosi 0,0001÷0,0002). Zasilanie przypowierzchniowych wód podziemnych odbywa się na drodze infiltracji opadów atmosferycznych i dopływu wód podziemnych z pokryw zboczowych przylegających do doliny stoków. Ubytki w zasobach wód przypowierzchniowych są wywołane głównie podsiękaniem kapilarnym i następnie parowaniem oraz odwodnieniem rowem melioracyjnym.

Osadem wypełniającym spągową część profilu doliny są otoczaki, żwiry i piaski korytowe miąższości od 5 m do ponad 10 m, leżące na podłożu skalnym, zbudowanym z

piaskowca (Wisł & Kajstura, 1967). W strefie przyległej do stoków, oprócz wymienionych dwóch serii aluwii, występują gliny i pyły deluwialne.

Badania wodoprzepuszczalności glin w laboratorium

Badania wodoprzepuszczalności glin wykonano w laboratorium metodą zmiennego gradientu hydraulicznego (metoda powszechnie stosowana dla gruntów spójnych). Schemat badań przedstawiono na ryc. 2a. Próbkę do badań wodoprzepuszczalności pobrano z dna i skarpy wykopu badawczego. Badania przeprowadzono dla 5 próbek, z których 3 pobrano pionowo, a 2 próbki poziomo. Długość próbek gruntu w cylinderekach wynosiła 17 cm, ich średnica — 6 cm. W badaniach zastosowano zmienny gradient, przy czym jego początkowa wartość wynosiła od 12 do 15. Zmianę wartości współczynnika w czasie, dla próbek pionowych, pokazano na ryc. 2b, dla próbek poziomych — na ryc. 2c. Z badań uzyskano wartości współczynnika wodoprzepuszczalności pionowej w zakresie $1 \cdot 10^{-9}$ ÷ $4 \cdot 10^{-9}$ m/s. Wartości współczynnika wodoprzepuszczalności poziomej nie różnią się od współczynnika wodoprzepuszczalności pionowej i wynoszą $1 \cdot 10^{-9}$ ÷ $3 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Badania wodoprzepuszczalności glin w terenie

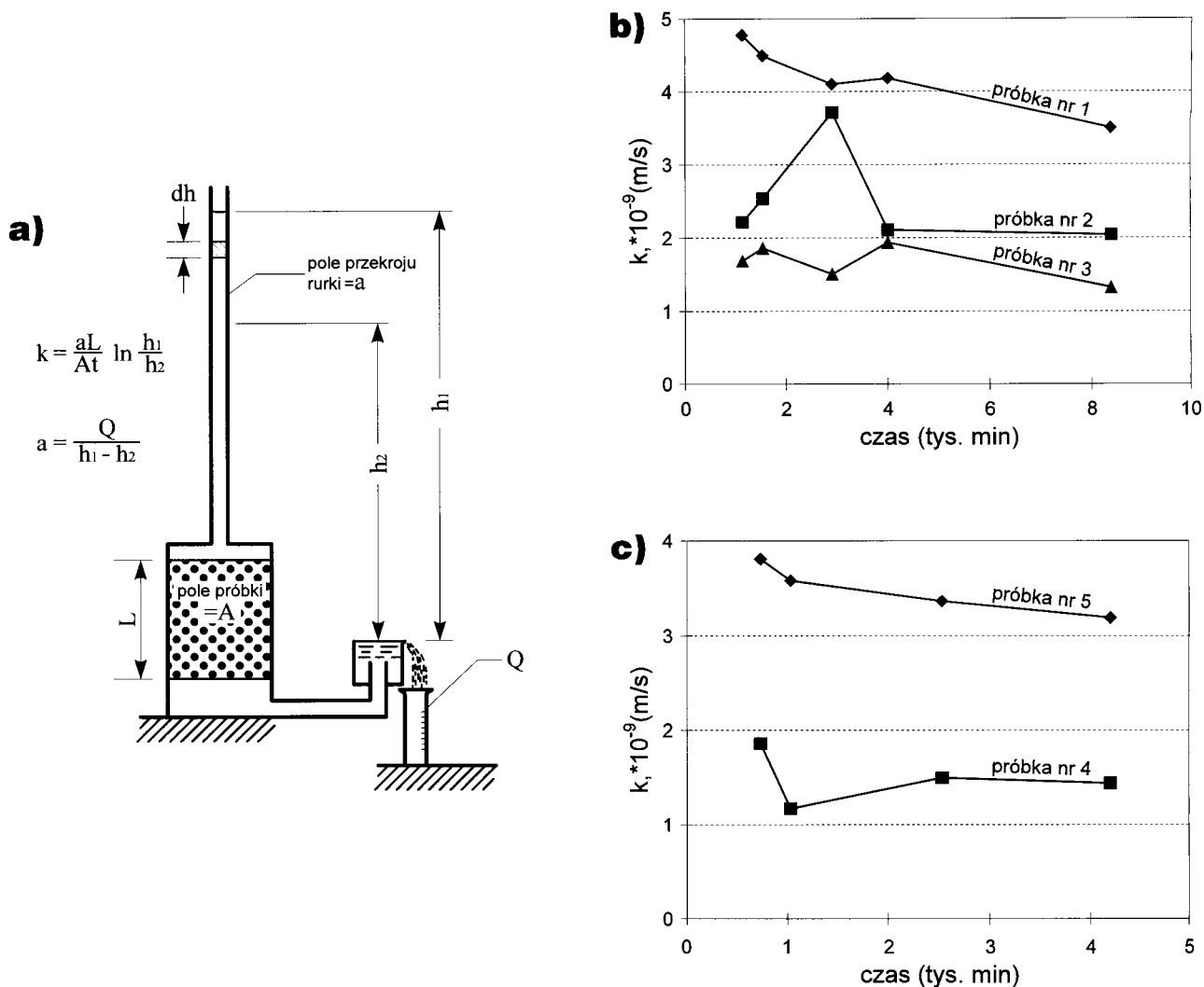
Metoda zmiennego gradientu. W celu określenia wodoprzepuszczalności gruntów metodą zmiennego gradientu, zainstalowano w terenie cztery piezometry obserwacyjne. Schemat typowego piezometru przedstawiono na ryc. 3a. Piezometry obserwacyjne składają się z dwóch podstawowych części: rury wiertniczej o średnicy 8 cm i szklanej rurki o średnicy 1 cm. Rurka szklana została wsunięta w gumowy korek zamykający od góry rury wiertniczej. Długość rur wiertniczych wynosiła 204 cm, długość szklanych rurek 143÷146 cm. Do rurki szklanej wlewano wodę pobraną z miejscowej studni i obserwowano w czasie zmiany jej położenia z jednoczesną kontrolą temperatury wody. W celu niedopuszczenia do parowania wody, do rurek piezometrycznych wlewano niewielką ilość oleju. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na ryc. 3b. Z badań uzyskano następujące wartości współczynnika wodoprzepuszczalności: $k=2 \cdot 10^{-9}$ m/s z piezometru nr 1, $k=6 \cdot 10^{-7}$ m/s z piezometru nr 2, $k=5 \cdot 10^{-9}$ m/s z piezometrów nr 3 i nr 4.

Metoda wzniosu wody w otworze. Badania przeprowadzono w otworach: P1 i OW2.

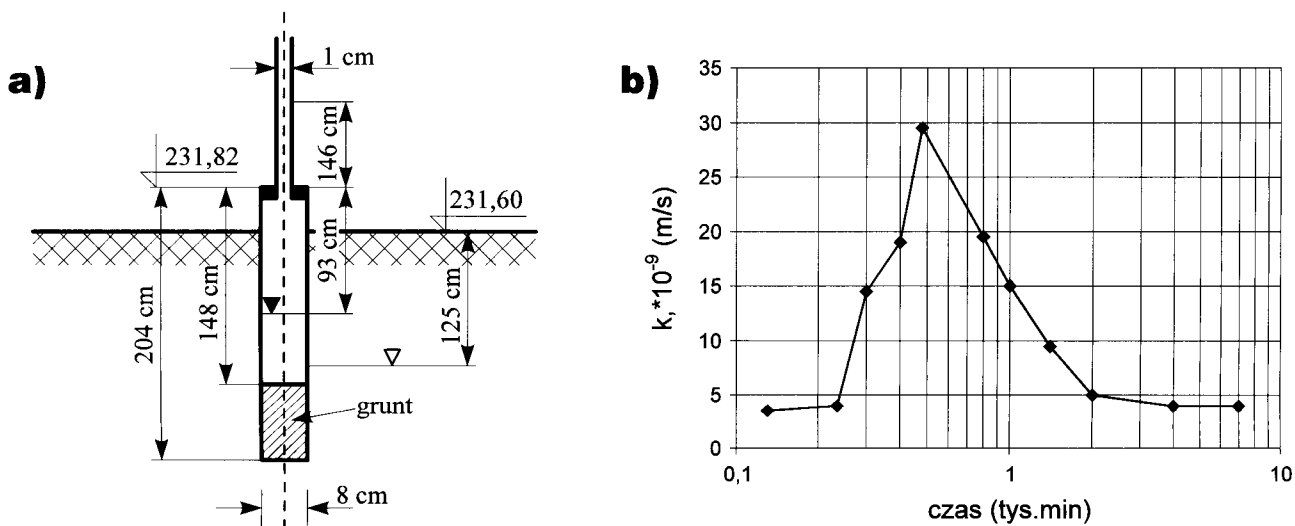
Badania w otworze P1 miały na celu określenie wodoprzepuszczalności gruntu, przy założeniu, że woda dopływa do otworu tylko przez jego dno. Po wykonaniu otworu o głębokości 1,5 m, zainstalowano w nim uszczelnione rury wiertnicze. Rury opierały się o dno otworu. Po szczypaniu wody obserwowano podnoszenie się jej zwierciadła w otworze. Badania wodoprzepuszczalności gruntu tą metodą wykonano następnie na głębokości 2,5 m i 3,5 m. Z obserwacji zwierciadła wody w otworze wynika, że dopływ wody przez dno odbywał się na głębokości 1,5 m i 2,5 m. Pomiar na głębokości 3,5 m nie wykazały zmian zwierciadła wody w otworze. Do obliczenia współczynnika wodoprzepuszczalności gruntów zastosowano wzór:

$$K = \frac{2,3 * C}{t_1 - t_2} \lg \frac{s_1}{s_2} \quad (1)$$

gdzie: C — stała empiryczna ($C=0,19rh$), r — promień



Ryc. 2. Schemat (a) i wyniki badań współczynnika wodoprzepuszczalności w kierunku pionowym (b) i poziomy (c) w laboratorium
 Fig. 2. Diagram of conductivity test in laboratory (a) and test results (b — vertical samples, c — horizontal samples)



Ryc. 3. Schemat piezometru obserwacyjnego (a) i wyniki badań wodoprzepuszczalności w piezometrze P3 (b)

Fig. 3. Diagram of piezometer (a) and test results in piezometer P3 (b)

otworu, h — miąższość strefy zawodnionej glin z uprzywilejowanymi drogami przepływu, s_1 i s_2 — depresja w otworze odpowiednio w czasie t_1 i t_2 . Z obliczeń uzyskano dla gruntów zalegających na głębokości 1,5 m wartość współczynnika wodoprzepuszczalności $k=1*10^{-7}$ m/s, a dla gruntów zalegających na głębokości 2,5 m $k=9*10^{-8}$ m/s.

Badania w otworze OW2 miały na celu określenie wodoprzepuszczalności gruntu, przy założeniu, że woda dopływa do otworu tylko przez ściany boczne. Badania polegały na szcerpaniu około 10 litrów wody i pomiarach poziomu podnoszącego się słupa wody w czasie. Pomiar poziomu wody w otworze przeprowadzano przez około 10 godzin, w 1-godzinnych interwałach i po upływie 25 godzin. Otwór OW2 został zlokalizowany w odległości 2,3 m od ściany wykopu badawczego. Z prowadzonych obserwacji poziomu wody w otworze OW2 wynika, że kopanie wykopu i napełnianie go ściekami miało wpływ na położenie zwierciadła wody w otworze badań wodoprzepuszczalności. Do oceny współczynnika wodoprzepuszczalności przyjęto wobec tego pomiary przeprowadzone w okresie przed przystąpieniem do wykonywania wykopu badawczego. Współczynnik wodoprzepuszczalności k określono korzystając ze wzoru:

$$k = \frac{2,3 * r * C}{2h (t_1 - t_2)} \lg \frac{s_1}{s_2} \quad (2)$$

gdzie: — poszczególne oznaczenia jak we wzorze (1). Z obliczeń uzyskano wartość współczynnika wodoprzepuszczalności $k=6*10^{-7}$ m/s.

Metoda identyfikacji parametru. Obliczenia wodoprzepuszczalności glin aluwialnych metodą identyfikacji parametru przeprowadzono, wykorzystując obserwacje reakcji zwierciadła wód podziemnych w otworze OW2 wywołanej zalewaniem wykopu badawczego ściekami. Wykop w kształcie prostokąta o wymiarach 3,5 m x 6,5 m wykonano do głębokości 1,5 m. Trzy ściany wykopu wykonano pionowo, a czwartą o nachyleniu 1:3. Wykop badawczy został wypełniony ściekami bytowo-gospodarczymi, pobranymi z

miejscowych szamb. W czasie napełniania wykopu ściekami, stwierdzono wyraźny wpływ ich poziomu na zwierciadło wody w otworze OW2, w którym prowadzono badania wodoprzepuszczalności metodą wzniosu wody. Do identyfikacji współczynnika wodoprzepuszczalności glin przyjęto następujący schemat obliczeniowy (ryc. 4):

— spąg glin z uprzywilejowanymi drogami przepływu jest poziomy i położony na wysokości $Z_{sp}=228,70$ m n.p.m. (osady zalegające głębiej uznano za nieprzepuszczalne),

— średnia miąższość strefy zawodnionej glin z uprzywilejowanymi drogami przepływu między wykopem i otworem OW2, w okresie rozwoju wzniosu zwierciadła wody, wynosi $h=(H_0^0+H_9^0+H_0+H_9)/4-Z_{sp}=1,69$ m,

— maksymalna wartość współczynnika grawitacyjnej pojemności wodnej, w strefie rozwoju wzniosu wody, obliczona dla analizowanego podłoża, wynosi $\mu = 0,11$,

— przepływ między wykopem a otworem OW2 jest poziomy i jednowymiarowy (przyrost szerokości wstęgi prądu na długości pomiędzy ścianą wykopu a otworem jest $<10\%$ — wyniki badań analogowych z wykorzystaniem modelu AEHD) oraz półgraniczony jednostronnie z granicą $x=0$, wymuszającą stany wód podziemnych na brzegu wykopu,

— w okresie przed zalewaniem wykopu przepływ odpowiadał warunkom przepływu ustalonego.

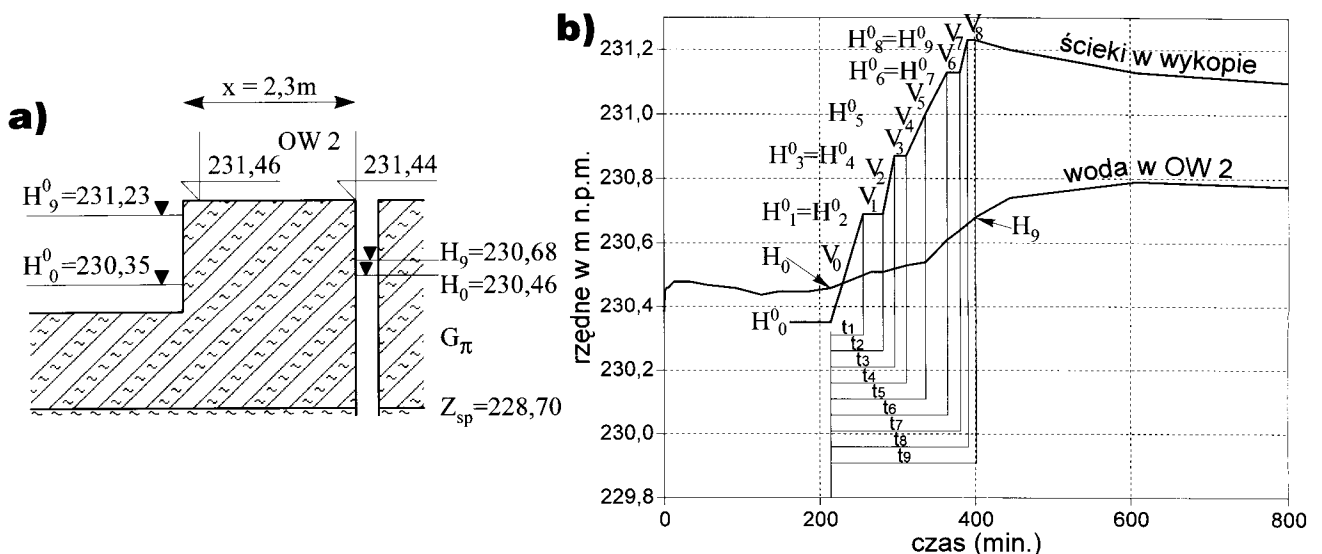
Zależność pomiędzy zmianą stanów zwierciadła wody w otworze OW2 ($H=H_9-H_0$) a zmianą stanów ścieków w wykopie badawczym (ściślej — prędkością zmian stanów odpowiednio $V_0=(H_1^0-H_0^0)/t_1$ dla okresu $t \leq t_1$, $V_1=(H_2^0-H_1^0)/(t_2-t_1)$ dla okresu $t_1 \leq t \leq t_2$, $V_2=(H_3^0-H_2^0)/(t_3-t_2)$ dla okresu $t_2 \leq t \leq t_3$, itp. dla kolejnych okresów napełniania wykopu) wyrażono równaniem postaci (Szestakow, 1973):

$$\Delta H = V_0 t_9 R(\lambda_9) + (V_i - V_{i-1})(t_9 - t_i) R(\lambda_i) \quad (3)$$

gdzie:

$$\lambda_i = \frac{x}{2\sqrt{a(t_9 - t_i)}} \quad \lambda_9 = \frac{x}{2\sqrt{a t_9}}$$

Funkcja $R(\lambda)$ występująca w wyrażeniu (3) opisana jest równaniem:



Ryc. 4. Schemat badań (a) i wyniki obserwacji poziomów wody i ścieków (b) do obliczeń współczynnika wodoprzepuszczalności

Fig. 4. Scheme of conductivity test (a) and water and sewage levels (b)

$$R(\lambda) + (1 - 2\lambda^2) \operatorname{erfc} \lambda - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \lambda e^{-\lambda^2}$$

a jej wartości są stabilizowane i dostępne w literaturze fachowej (np. Flisowski i in., 1986; Macioszczyk & Szestakow, 1983). Wielkość a , występująca w wyrażeniu λ , jest nazywana współczynnikiem grawitacyjnej piezoprzewodności. Wyraża ona szybkość zmian procesu nie ustalonego przepływu o zwierciadle swobodnym i łączy współczynnik wodoprzepuszczalności k ze średnią miąższością strefy zawodnionej rozpatrywanej warstwy glin h i jej grawitacyjną pojemność wodną μ :

$$a = \frac{hk}{\mu} \quad (4)$$

Obliczenie współczynnika wodoprzepuszczalności k polegało na rozwiązywaniu metodą prób „zadania odwrotnego”. W równaniu (3) zadawano różne wartości współczynnika grawitacyjnej piezoprzewodności a , aż otrzymano obliczoną wartość ΔH równą wartości obserwowanej (0,22 m). Zgodność obliczonej wartości ΔH z obserwowaną uzyskano dla $a = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ i wykorzystując zależność (4) uzyskano wartość współczynnika wodoprzepuszczalności $k = a \cdot h = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

Dyskusja wyników badań

Wartości współczynnika wodoprzepuszczalności glin aluwialnych, występujących w przy powierzchniowej strefie doliny Chmielnika — uzyskane poszczególnymi metodami — różnią się w sposób istotny. Różnice w wynikach sięgają czterech rzędów. Najniższe wartości współczynnika wodoprzepuszczalności — zarówno poziomej, jak i pionowej — uzyskano z badań metodą zmiennego gradientu. Główną przyczynę tak niskich wartości współczynnika wodoprzepuszczalności należy upatrywać w wielkości badanych próbek gruntu, która nie była reprezentatywna dla analizowanej przy powierzchniowej strefy pokrywy aluwialnej (tzw. efekt skali). Wyraźnie wyższą wartość współczynnika wodoprzepuszczalności w badaniach metodą zmiennego gradientu uzyskano z badań w piezometrze nr 2. Po zakończeniu badań stwierdzono w rdzeniu gruntowym rury piezometru nr 2 fragment słabo rozłożonego korzenia. Był on przyczyną intensywniejszego przepływu wody w piezometrze i w związku z tym wyższej wartości współczynnika wodoprzepuszczalności. Podobnego rzędu wartości współczynnika wodoprzepuszczalności, jak z badań w piezometrze nr 2, uzyskano w badaniach metodą wzniosu wody w otworach P1 i OW2. Najwyższą wartość współczynnika wodoprzepuszczalności uzyskano drogą pośrednią w wyniku identyfikacji parametru.

Badania w otworze OW2 łącznie z obserwacją poziomu ścieków w wykopie badawczym uznano za pozwalające uzyskać najbardziej wiarygodne wartości współczynnika wodoprzepuszczalności gliniastej pokrywy aluwialnej z uprzywilejowanymi drogami przepływu (do potrzeb oceny wodoprzepuszczalności podłoża stawów budowanej oczyszczalni typu Lemna). Przyjęty schemat obliczeniowy identyfikacji współczynnika wodoprzepuszczalności umożliwia

bowiem ocenę parametru dla prawie rzeczywistych warunków przepływu wód podziemnych po zrealizowaniu oczyszczalni.

Wnioski

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwala podać następujące wnioski:

❖ Określenie wiarygodnej wartości współczynnika wodoprzepuszczalności glin aluwialnych jest trudne zarówno ze względu na metodykę badań, jak i właściwości gruntów. Szczególnie trudnym zadaniem jest uzyskanie wiarygodnych wartości współczynnika wodoprzepuszczalności w przypadku występowania w glinach uprzywilejowanych dróg przepływu. W takiej sytuacji należy liczyć się z możliwością uzyskania zaskakująco wysokich wartości współczynnika, odbiegających od wartości typowych dla glin bez dróg ułatwionego przepływu.

❖ Z badań prowadzonych w laboratorium na próbkach o nienaruszonej strukturze, ze względu na niereprezentatywność próbek i wpływ ich przygotowania na wyniki pomiarów, uzyskano wartości współczynnika wodoprzepuszczalności bez uwzględnienia uprzywilejowanych dróg przepływu. Badania prowadzone metodami obserwacji poziomów wody w pojedynczych punktach (otworach) również nie gwarantowały uzyskania rzeczywistych wartości współczynnika wodoprzepuszczalności i były zależne od wybranej metodyki badań.

❖ W celu określenia współczynników wodoprzepuszczalności miarodajnych do potrzeb projektowania uszczelnienia zbiorników (np. stawów oczyszczalni ścieków) należy przeprowadzić badania w skali naturalnej, np. stosując przedstawioną w artykule metodę próbnego zalewania wykopu.

Literatura

- BEVEN K. 1981 — Soil Sciences Soc. Am. J., 45: 1245.
 FLISOWSKI J., IWANIEJKO R., TRZOS O., WIECZYSTY A. & BRZOZA-WÓJCIK M. 1986 — Prognozowanie wpływu piętrzenia rzek na wody podziemne i obliczanie systemów odwadniających. Pol. Krak. im. T. Kościuszki, Instytut Inżynierii Sanitarnej i Ochrony Środowiska, Kraków.
 GARBULEWSKI K., PAWŁAT H., WIENCLAW E. & WOLSKI W. (red.) 1994 — Badania geotechniczne dotyczące możliwości rezygnacji z uszczelnienia geomembraną osadników oczyszczalni ścieków typu LEMNA w Chmielniku Rzeszowskim. GEOTEKO, sp. z o.o. Wesoła k. Warszawy.
 GOVINDARAYU R.S., REDDI L.N. & BHARGAWA S.K. 1995 — J. Geotechn. Eng., Sep., 121: 652–659.
 MACIOSZCZYK T. & SZESTAKOW W.M. 1983 — Dynamika wód podziemnych — metody obliczeń. Wyd. Geol., Warszawa.
 MILLER C.J. & MISHRA M. 1989 — Water Resources Bull. Am. Water Resources Assoc., 25: 551–563.
 SMETTEM K.R.J., TRUDGILL S.T. & PICKLES A.M. 1983 — Soil Sc. Soc. Am. J., (34:) 499–509.
 SZESTAKOW W.M. 1973 — Dynamika podziemnych wód. Izd. Mosk. Univ.
 WISZ J. & KAJSTURA Z. 1967 — Dokumentacja hydrogeologiczna z przeprowadzonych prac badawczych wraz z projektem likwidacji otworu badawczo-eksploatacyjnego w Chmielniku. PZR-W WODROL, Rzeszów.