

ANALIZA PORÓWNAWCZA METOD BILANSOWANIA WODY W SYSTEMACH PODZIEMNEGO ROZSĄCZANIA OCZYSZCZONYCH ŚCIEKÓW

COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATION METHODS OF WATER BUDGET WITHIN SOIL ABSORPTION SYSTEMS

Ryszard Błażejowski¹, Marek Kalenik²

¹ Katedra Budownictwa Wodnego AR w Poznaniu

² Zakład Wodociągów i Kanalizacji Wiejskich SGGW

Wstęp

Znaczny przyrost ilości ścieków z gospodarstw wiejskich i brak uzasadnienia ekonomicznego dla budowy zbiorczych systemów kanalizacji na terenach o zabudowie rozproszonej przyczynił się w ostatnich latach do wzrostu zainteresowania budową indywidualnych systemów kanalizacyjnych z odprowadzaniem oczyszczonych ścieków do gruntu. Najpopularniejszymi systemami podziemnego rozsączania ścieków są studnie chłonne i drenáže rozsączające. W bezpośrednim sąsiedztwie tych urządzeń następuje wzrost wilgotności gruntu i może wystąpić podniesienie poziomu zwierciadła wód gruntowych. Zjawiska te mogą być oceniane pozytywnie (alimentacja lokalnych zasobów wód podziemnych, nawadnianie roślin), jak i negatywnie (podtapianie samego systemu rozsączania, sąsiadujących budowli, korzeni drzew itd.). Odrębnym zagadnieniem, które nie jest przedmiotem niniejszego artykułu, jest wpływ zanieczyszczeń zawartych w oczyszczonych ściekach na jakość wód podziemnych.

Jednym z warunków odprowadzania wstępnie lub biologicznie oczyszczonych ścieków bytowo-gospodarczych do gruntu jest zachowanie odległości pionowej między poziomem rozsączania a maksymalnym poziomem

zwierciadła wód gruntowych równej lub większej od 1,5 m (Rozp. 1991). Ma to na celu utlenienie zanieczyszczeń w strefie aeracji oraz lepsze niż w strefie saturacji zatrzymanie bakterii i wirusów. Niestety, wskutek ciągłego doprowadzania ścieków do gruntu pierwotny poziom wód gruntowych może się podnosić i po pewnym czasie przekroczyć wartość dopuszczalną. Dla prognozowania zmian wilgotności gruntu i położenia zwierciadła wód gruntowych na etapie projektowania systemów podziemnego rozsączania ścieków niezbędne jest dokonanie bilansu wody w bezpośrednim sąsiedztwie rozpatrywanych systemów. Celem artykułu jest krytyczny przegląd metod bilansowania wody w gruncie otaczającym studnię chłonną i drenaż rozsączający.

Dotychczasowe badania

Sporządzenie dokładnego bilansu wodnego w strefie podziemnego oczyszczania ścieków jest zadaniem trudnym i dlatego podaje się zazwyczaj bilans uproszczony, oparty na następujących założeniach upraszczających (Laak, 1986):

- a) przepływ w strefie podsiąku kapilarnego i w strefie nienasyconej jest pomijalnie mały,
- b) ewapotranspiracja jest pomijalnie mała,
- c) poszczególne warstwy gruntu są jednorodne i izotropowe,
- d) infiltracja wód deszczowych jest pomijalnie mała.

Dodatkowym uproszczeniem jest zazwyczaj rozpatrywanie zagadnienia jako płaskie (dwuwymiarowe) i ustalone w czasie. Tak uproszczone modele dają jedynie bardzo przybliżoną odpowiedź na pytanie: ile wody można wprowadzić dodatkowo do gruntu bez problemów dla użytkownika oczyszczalni i negatywnych skutków dla środowiska.

Jeden z najprostszych modeli tego typu, oparty na równaniu ruchu Darcy'ego, proponują do stosowania Metcalf i Eddy (1991). Przyrost głębokości wody gruntowej, płynącej po stropie warstwy nieprzepuszczalnej ze spadkiem i pod długim drenażem rozsączającym, ułożonym prostopadle do kierunku spływu wód gruntowych wyniesie:

$$\Delta H = \frac{Q}{k i L} \quad (1)$$

gdzie: Q - średnia dobową ilość doprowadzanych ścieków, m³/d; k - współczynnik filtracji, m/d; i - spadek hydrauliczny; L - długość drenażu, m.

Zaletą tego podejścia - obok prostoty - jest abstrahowanie od miąższości warstwy wodonośnej, wadą - nieuwzględnienie przepływu w strefie aeracji, rozptywu wody na boki oraz niemożność uwzględnienia przypadku poziomego zwierciadła wód gruntowych.

Bilanse wodne systemów podziemnego rozsączania ścieków są sporządzane dla celów projektowania dla tzw. złóż ewapotranspiracyjnych (Salvato, 1992). Złóża takie buduje się w niesprzyjających warunkach gruntowo-wodnych (grunty nieprzepuszczalne w podłożu lub wysoki poziom wód gruntowych) jako szczelne niecki, z których woda jest odprowadzana jest do atmosfery w postaci pary dzięki ewapotranspiracji. Warunkiem działania takiego systemu jest zrównoważony bilans wodny, tj. w okresie bilansowania dopływ ścieków i infiltracja wód opadowych nie mogą być większe od ewapotranspiracji. Dopuszcza się retencję wody w złożu w okresie słabej ewapotranspiracji, jednakże zapas ten musi zostać odparowany w okresie silnej ewapotranspiracji. W krajowych warunkach klimatycznych system taki może być rozpatrywany jedynie dla okresu wegetacyjnego i zabudowy rozproszonej. Przyjmując za Kędziorą (1996), że ewapotranspiracja rzeczywista z powierzchni porośniętej trawą wyniesie w okresie od 1 maja do 30 września 450 mm, a opad efektywny tylko 300 mm, to powierzchnia ewapotranspiracji dla oczyszczalni ścieków z domku zamieszkałego przez 4 osoby, przy oszczędnym zużyciu wody $50 \text{ dm}^3/\text{Md}$ wyniosłaby $0,05 \text{ m}^3/\text{Md} \times 4 \text{ M} \times 153 \text{ d} / (0,45 \text{ m} - 0,3 \text{ m}) = 204 \text{ m}^2$. Gdyby złożo ewapotranspiracyjne przekryć przezroczystym zadaszaniem, to powierzchnię tę można by zmniejszyć trzykrotnie - do 68 m^2 .

Hantush (1967) podał analityczne rozwiązania zagadnienia początkowo-brzegowego stałego zasilania wodą poziomej jednorodnej warstwy wodonośnej przez poletka infiltracyjne w kształcie prostokąta i koła. Rozwiązania te słuszne są przy spełnieniu założeń Dupuita-Forchheimera. Ich ograniczeniem jest przyjęcie jedynie poziomego spągu zasilanej warstwy wodonośnej oraz nie uwzględnienie przepływu w strefie nienasyconej (z wyjątkiem strefy zasilania, gdzie kierunek ruchu wody przyjęto jako pionowy w dół). Ze względu na to ostatnie ograniczenie, model Hantusha powinien dawać lepsze wyniki dla gruntów grubo- niż dla drobnoziarnistych. Zaletą rozwiązań analitycznych Hantusha jest uwzględnienie przestrzennego schematu zasilania i rozptywu wody w strefie saturacji. Finnemore (1993) opracował dla nich nomogramy pozwalające na szybkie obliczanie poziomu wód gruntowych pod poletkami infiltracyjnymi.

Znacznie większe możliwości analizy bilansu wodnego w obrębie systemów podziemnego rozsączania ścieków dają modele numeryczne, uwzględniające zmienne w czasie zasilanie, przepływ w strefie aeracji i saturacji oraz przestrzenny charakter przepływu wody w gruncie. Przykładem tego typu modelu jest HELP (*Hydrologic Evaluation of Landfill Performance*) opracowany przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (Lange i in. 1997) dla oceny ilości odcieków ze składowisk odpadów lub model FINENA opracowany przez Srokę i Wosiewicza (1996).

Ten ostatni jest modelem przepływu dwuwymiarowego, obejmującym przepływ wody w strefie aeracji i saturacji w warunkach ustalonych. Do scharakteryzowania gruntu wymaga wprowadzenia takich parametrów jak: współczynnik filtracji, relatywna przewodność hydrauliczna gruntu ($0 \leq k_r \leq 1$) i krzywa pF gruntu.

Określenie obszaru i okresu bilansowania wody

Ogólnie, bilans wodny, odniesiony do powierzchni terenu pokrywającej obszar bilansowania, można wyrazić następująco:

$$P + Z_0 + D + H - ETR - V = Z_t \quad [L^3/L^2T] \quad (2)$$

gdzie P - efektywny opad atmosferyczny w okresie t ,

$Z_{0(t)}$ - zapas wody w gruncie na początku (i na końcu) okresu bilansowania t ,

D - objętość wody dostarczonej przez drenaż rozsączający lub studnię chłonna,

H - naturalny dopływ podziemny do obszaru bilansowania,

ETR - ewapotranspiracja rzeczywista,

V - odpływ podziemny z obszaru bilansowania.

Mimo iż w dłuższym okresie czasu retencja gruntowa $Z_t - Z_0$ stanowi zaledwie ułamek procenta dopływu wody D , jest ona decydująca dla poprawnego działania systemu rozsączania, gdyż decyduje o rozmiarach strefy aeracji, niezbędnej dla odpowiedniego doczyszczania ścieków w gruncie.

Zasięg obszaru bilansowania zależy od celu obliczeń i lokalnych warunków gruntowo-wodnych. Obszar ten ograniczony jest od góry powierzchnią terenu, a od dołu spągami warstwy wodonośnej pierwszego horyzontu. Duże trudności w określeniu dolnej granicy obszaru występują w przypadku braku warstwy nieprzepuszczalnej, podścielającej warstwę wodonośną i przy głęboko (> 8 m) położonym poziomie zwierciadła wody gruntowej. W tych przypadkach jednak bilansowanie nie ma tak ważnego znaczenia praktycznego, gdyż są to sprzyjające warunki podziemnego rozsączania ścieków. Boczne ograniczenia obszaru wynikają zazwyczaj z potencjalnego zasięgu pozytywnych lub negatywnych oddziaływań podziemnego rozsączania, które należy określić. Najczęściej jest to określenie wpływu podwyższonego poziomu wód gruntowych na przyległe budowle i na możliwość powstawania wysięków w terenie spadzistym lub z wychodniami skalnymi. Najmniejszy zasięg obszaru bilansowania w rzucie poziomym obejmuje obrys urządzeń rozsączających poszerzony o kilka metrów z każdej strony.

Horyzont czasu bilansowania powinien obejmować czas żywotności systemu rozsączania szacowany na około 20 lat. Poszczególne interwały okresu bilansowania zależą od zmienności składników bilansu, dostępności danych pomiarowych i wymaganej dokładności obliczeń. Im krótszy jest interwał czasowy,

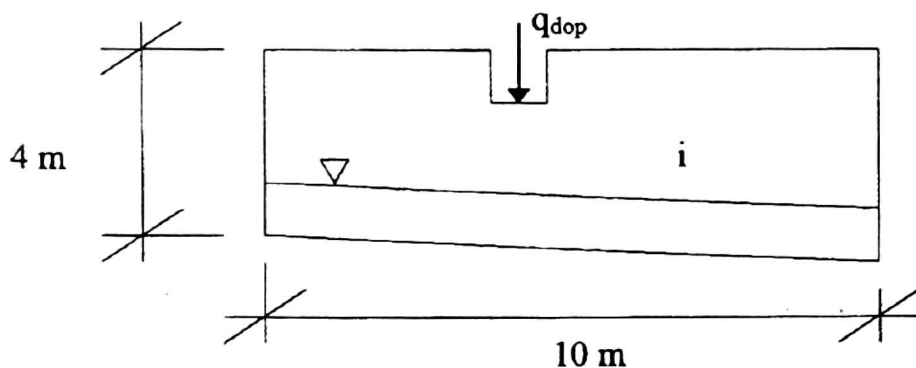
tym z reguły dokładniejszy jest wynik bilansowania. W praktyce najkrótszym interwałem jest jedna doba, a najdłuższym - czas żywotności systemu. W dostępnej nam literaturze nie znaleźliśmy analizy wpływu długości interwału czasowego na dokładność wyników bilansowania.

Przykład obliczeniowy

Wykorzystując wyżej przedstawione metody obliczeniowe bilansu ścieków, dostarczanych drenażem rozsączającym do gruntu, podjęto próbę oszacowania wzniesienia zwierciadła wód gruntowych pod drenażem rozsączającym dla dwóch rodzajów gruntu przy różnych nachyleniach spągu warstwy wodonośnej.

Do obliczeń przyjęto następujące założenia (wg rys. 1):

- szerokość warstwy infiltracyjnej - 0,5 m,
- głębokość położenia zwierciadła wód gruntowych - 2,0 m, mierząc od dna warstwy rozsączającej w osi drenażu,
- początkowa miąższość warstwy wodonośnej - 1,0 m,
- nachylenie spągu warstwy wodonośnej i początkowe nachylenie płaszczyzny zwierciadła wody gruntowej: $i = 0$, $i = 1 \%$, $i = 10 \%$,
- długość drenażu $L = 1,0$ m w obliczeniach metodą Metcalfa i Eddy'ego oraz z wykorzystaniem modelu numerycznego FINENA i $L = 20,0$ m w obliczeniach metodą analityczną Hantusha.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy

Fig. 1. Calculation scheme

Obliczenia przeprowadzono dla piasku luźnego i piasku słabo gliniastego o parametrach przedstawionych w tabeli 1. Współczynnik filtracji dla tych gruntów (tab. 1) oszacowano na podstawie normy BN-76/8950-03 (Norma, 1976). Dopuszczalne obciążenie hydrauliczne ścieków oszacowano za pomocą wzoru empirycznego, podanego przez Laaka (1986) dla ścieków wstępnie oczyszczonych w osadniku gnilnym:

$$D = q_{dop} = 40k - \frac{4,8}{0,3 + \log k} \quad [\text{cm/d}] \quad (2)$$

gdzie: k - współczynnik filtracji, cm/s.

W modelu Hantusha przyjęto okres obliczeniowy równy 10 lat.

Przy takich założeniach przeprowadzono obliczenia, a ich wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Właściwości fizyczne gruntów modelowych

Tab. 1. Physical properties of modelled soils

Charakterystyka Characteristic		Rodzaj gruntu Soil type	
		Piasek luźny Loose sand	Piasek słabo gliniasty Loamy sand
Porowatość, % Porosity, %		41,6	47,3
Skład granulometryczny, % Texture, %	1,0 - 0,1 mm	90	73
	0,1 - 0,05 mm	3	15
	0,05 - 0,02 mm	3	5
	0,02 - 0,005 mm	2	1
	0,005 - 0,002 mm	1	2
	< 0,002 mm	1	4
Wilgotność w % przy sile ssącej, hPa Water content in % at suction head, hPa	2,5 (pF = 0,4)	39,0	44,5
	10 (pF = 1,0)	35,5	42,5
	31 (pF = 1,5)	29,0	39,5
	100 (pF = 2,0)	13,0	34,5
	500 (pF = 2,7)	7,0	24,0
	2500 (pF = 3,4)	4,0	13,5
	15000 (pF = 4,2)	2,5	7,5
Wsp. filtracji wg BN (Norma, 1976), [m/d] Permeability coefficient acc. to (Norma, 1976), [m/d]		2,6	0,56
Dopuszczalne obciążenie hydrauliczne ściekami - q_{dop} , [m/d] wg wzoru (3) Long time acceptance rate - q_{dop} , [m/d] acc. to Equation (3)		0,020	0,017

Porównując obliczenia wzniesienia zwierciadła wód gruntowych zestawione w tabeli 2 dla dwóch rodzajów gruntów można zauważyć znacznie wyższe podniesienie zwierciadła wody w gruncie bardziej zwięzłym (o mniejszej wodoprzepuszczalności) niż w gruncie niespoistym. Im nachylenie spągu warstwy wodonośnej jest większe, tym mniejsze jest wzniesienie zwierciadła wody gruntowej.

Analizując wyniki obliczeń z metodami analitycznymi i metodą numeryczną widzimy, że metoda Metcalfa i Eddy'ego daje wyniki znacznie odbiegające od uzyskanych dwiema pozostałymi metodami. Wynika to ze zignorowania lokalnego zwiększania spadku zwierciadła wody pod drenażem, nieuwzględnienia rozplywu wody na boki oraz z pominięcia przepływu w strefie ograniczonego wzniosu kapilarnego i strefie aeracji. W związku z powyższym, metody Metcalfa i Eddy'ego nie należy stosować w gruntach słabo przepuszczalnych i przy małych nachyleniach spagu warstwy wodonośnej.

Tab. 2. Wysokość podniesienia zwierciadła wody gruntowej pod rowem infiltracyjnym o szerokości 0,5 m obliczona różnymi metodami

Tab. 2. Height of groundwater ridge under infiltration dike 0,5 m wide, calculated by various methods

Autorzy metody obliczeniowej Authors of the calculation method	Piasek luźny Loose sand $q = 20 \text{ mm/d}$			Piasek słabo gliniasty Loamy sand $q = 17 \text{ mm/d}$		
	$i = 0$	$i = 1 \%$	$i = 10 \%$	$i = 0$	$i = 1 \%$	$i = 10 \%$
Metcalf i Eddy (1991)	-	39 cm	4 cm	-	150 cm	15 cm
Hantush/Finnemore	4cm	-	-	10 cm	-	-
Sroka i Wosiewicz (1996)	1cm	~ 0	~ 0	3 cm	2 cm	~ 0

Podsumowanie

Stwierdzono duże rozbieżności wyników obliczeń położenia zwierciadła wody gruntowej pod drenażem rozsączającym wykonanych różnymi metodami, nawet dla najprostszyc przypadków warunków gruntowo-wodnych. Wynika stąd konieczność dalszych badań w tym kierunku i potrzeba opracowania metod obliczeniowych, możliwych do zastosowania w praktyce inżynierskiej.

Podziękowanie: autorzy składają podziękowane dr. inż. Zbigniewowi Sroce za wyrażenie zgody na korzystanie z programu FINENA i konsultacje podczas obliczeń tym programem, a także dr. inż. J. Szatyłowiczowi za udostępnienie charakterystyk gruntów.

Literatura

- FINNEMORE E. J. 1993. *Estimation of ground-water mounding beneath septic drain fields*. Ground Water, vol. 31, 6: 884-889.
- HANTUSH M. S. 1967. *Growth and decay of groundwater in response to*

- uniform percolation*. Water Resources Research. vol. 3, 1: 227-234.
- KĘDZIORA A. 1995. Podstawy agrometeorologii. PWRiL Poznań.
- LANGE D. A., CELLIER B. F., DUNCHAK T. 1997. *A case study of the HELP model: actual versus predicted leachate production rates at a municipal landfill in northeastern Ohio*. Water Quality International. 11/12, 40-42.
- LAAK R. 1986. Wastewater Engineering Design for Unsewered Areas. Technomic Publ. Co. Inc., Lancaster-Basel.
- METCALF & EDDY. 1991. Wastewater Engineering. Mc Graw Hill, Inc. N.Y.
- Norma branżowa BN-76/8950-03. 1976. Obliczanie współczynnika filtracji gruntów niespoistych na podstawie uziarnienia i porowatości.
- SALVATO J. A. 1992. Environmental Engineering and Sanitation. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- SROKA Z., WOSIEWICZ B. J. 1996. *Seepage through earth dams regarding unsaturated zone*. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, 71: 328-335.
- Rozporządzenie MOŚZNiL w sprawie klas czystości wód i warunków, jakim powinny odpowiadać ścieki odprowadzane do wód powierzchniowych i do ziemi. Dz. U. nr 166, 1991.

Summary

Comparative analysis of calculation methods of water budget within soil absorption systems. In the paper a short review of calculation methods of water budget within soil absorption systems is given. Results of calculations of the height of ground water ridge under infiltration dike using three methods are presented. Rather big discrepancy between results obtained even for simple calculation schemes was stated. There is a need for elaboration of relatively simple calculation methods which could be used in engineering practice.

Ryszard Błażejowski

Katedra Budownictwa Wodnego AR ul. Wojska Polskiego 73A

60-625 Poznań