

Badania modelowe strefy aeracji z wykorzystaniem programu Unsat Suite i badań georadarowych

Magdalena Gańko¹, Joanna Trzeciak¹, Sebastian Zabłocki¹

Modelling research of the vadose zone using the UnSat Suite program and a ground-penetrating radar. *Prz. Geol.*, 65: 1202–1205.

Abstract. The purpose of this paper was to analyze the effect of detailed recognition and correct mapping of the boundaries between layers of different grain sizes on the results of modelling tests of the vadose zone. The modelling was performed using UnSat Suite software that enables modelling of water permeability and migration of pollutants through the vadose zone using various numerical programs, including VS2DT that was used in this case study. Direct field research, including drilling of boreholes and ground-penetrating radar investigation, has shown a significant variation in lithology of the vadose zone in a small test area located in Włocławek city. Various sand fractions have been found: from fine to coarse sand, with varying filtration parameters and moisture content. Ground-penetrating radar investigations have enabled a more accurate recognition and refinement of geologic structures, particularly in the context of lithological boundaries, including the space between boreholes. The results of the modelling tests conducted in the vadose zone enabled determination of the velocity, time and volume of infiltration water.

Keywords: vadose zone, UnSat Suite, ground-penetrating radar, percolation time, recharge

Właściwości strefy aeracji odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu chemizmu wód podziemnych pierwszego poziomu wodonośnego (Pazdro, Kozerski, 1990). Prawidłowe rozpoznanie natężenia i prędkości przepływu wód w tej strefie może być narzędziem wykorzystywanym do optymalnego zarządzania środowiskiem naturalnym, szczególnie na tych obszarach, w których zwierciadło wód podziemnych występuje płytko i pierwszy poziom wodonośny jest pozbawiony naturalnej izolacji. Na skutek zmian litologii i uziarnienia osadów strefa aeracji jest na ogół niejednorodna, dlatego prawidłowe odwzorowanie właściwości tej strefy stwarza trudności w obliczeniach modelowych.

Zasilanie wód podziemnych poprzez strefę aeracji, jako słabo rozpoznane, jest parametrem modelu identyfikowanym na ogół w toku kalibracji (Lerner i in., 1990; de Vries, Simmers, 2002). Należy jednak dążyć do tego, żeby dane wejściowe do badań modelowych strefy saturacji były wynikiem modelu bilansowego, a najlepiej wynikiem deterministycznego modelu przepływowego strefy nienasyconej (Gurwin, 2010).

Jednym z najważniejszych efektów modelowania strefy aeracji jest wiarygodna informacja o możliwej wielkości zasilania poprzez tę strefę wód podziemnych. Celem niniejszej publikacji jest ocena wpływu szczególności rozpoznania strefy aeracji, w tym prawidłowego odwzorowania granic litologicznych, na wynik badań modelowych tej strefy. Tak szczegółowe rozpoznanie warunków panujących w strefie nienasyconej jest najczęściej przeprowadzane na potrzeby lokalne, a pomijane w opracowaniach regionalnych (Jaworska-Szulc, 2015), w związku z tym rezultaty rozpoznania strefy nienasyconej, mimo że powinny, zazwyczaj nie są odnoszone do wyników badań strefy nasyconej.

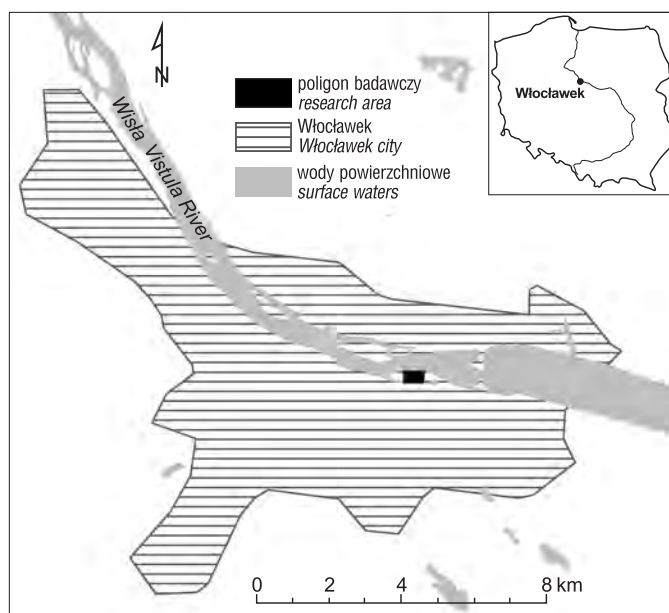
OBSZAR BADAŃ

Poligon badawczy wyznaczono we Włocławku, na terenie zielonego nieużytku na lewym brzegu Wisły

(ryc. 1). Deniwelacje terenu nie przekraczają 1 m. W podłożu występują mady, piaski i piaski ze żwirami nasypów i mielizn młodszego tarasu zalewowego Wisły (Mojski, 1958). Po wykonaniu wierceń badawczych stwierdzono występowanie pod powierzchnią terenu piasków drobno-, średnio- i różnoziarnistych o sumarycznej miąższości 8–13 m. Poniżej natrafiono na osady spoiste – pyły i gliny związane. W obrębie utworów piaszczystych występuje swobodny poziom wodonośny. W trakcie wykonywania badań zwierciadło wód podziemnych kształtowało się na głębokości 3,7 m p.p.t.

METODYKA

Na poligonie badawczym wykonano 3 otwory o głębokości 4,5 m. Z każdego mb. zwiercin lub po każdej



Ryc. 1. Lokalizacja poligonu badawczego
Fig. 1. Location of the research area

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; magdalena.ganko@student.uw.edu.pl, joanna.trzeciak@student.uw.edu.pl, s.zablocki@uw.edu.pl.

zaobserwowanej makroskopowo zmianie rodzaju gruntu pobierano do badań próby osadów. W próbach tych oznaczono:

- wilgotność objętościową – według metodyki Myślińskiej (1998), poprzez wysuszenie próbki w temperaturze 105–110°C do uzyskania stałej masy;
- skład granulometryczny na podstawie analizy sitowej, wykonanej z użyciem 9 sit o standardowych wymiarach oczek;
- współczynnik filtracji – metodą stałogradientową z przepływem dół–góra za pomocą permeamtru kolumnowego UPK-99. Wyniki przeliczono z zastosowaniem poprawki temperaturowej dla 10°C.

Na podstawie wyników analizy sitowej sklasyfikowano badane grunty wg normy PN-86/B-02480.

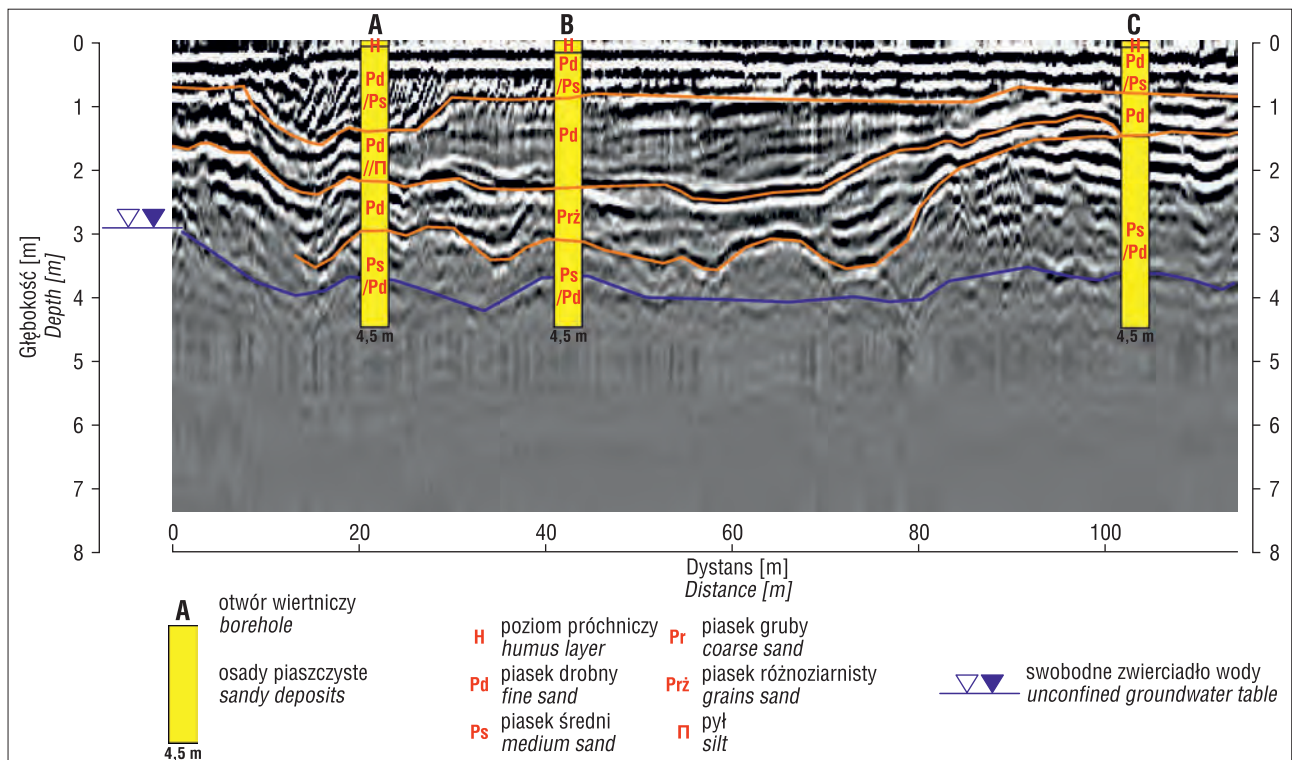
Badania georadarowe przeprowadzono wzdłuż linii łączącej otwory badawcze (na odcinku o dł. ok. 115 m). Ich celem było uzyskanie ciągłości rozpoznania budowy geologicznej. Weryfikacja przebiegu granic litologicznych określonych w trakcie wierceń była możliwa dzięki obserwacji fal odbitych na granicy zmian właściwości elektromagnetycznych gruntu, przedstawionych w formie echogramu (ryc. 2).

Model strefy aeracji utworzono za pomocą programu WHI UnSat Suite (Gogolev, Delaney, 1999), na podstawie danych uzyskanych z wierceń badawczych, badań geofizycznych i analizy laboratoryjnej. Do obliczeń wykorzystano program VS2DT, stosowany głównie do modelowania migracji zanieczyszczeń w strefie aeracji (Gogolev, Delaney, 1999; Gogolev, 2002; Galitskaya, Pozdnyakova, 2006; Kumar, 2016). VS2DT bazuje na metodzie różnic skończonych i może być stosowany do modelowania przepływu wody oraz transportu w warunkach ustalonych

i w warunkach nieustalonych. Do podstawowych cech modeli wykonywanych programem VS2DT należy wielowarstwowość profilu strefy aeracji i heterogeniczność właściwości gruntów.

W pierwszym etapie modelowania zbudowano schemat danych wejściowych dla 3 profili otworów badawczych, przyjmując granice poszczególnych wydzielen na podstawie obserwacji makroskopowych w trakcie wierceń. Niestety, ze względu na mieszanie się urobku podczas wiercenia ślimakowego i brak wyraźnych różnic w uziarnieniu osadów, dokładne ustalenie przebiegu tych granic nie zawsze było możliwe. Do modeli wprowadzono dane dotyczące współczynnika filtracji i wilgotności objętościowej gruntu. Jako warunki brzegowe przyjęto od powierzchni terenu warunek typu FLUX, odwzorowujący wielkość zasilania infiltracyjnego, dla dolnej granicy założono natomiast warunek typu TOTAL HEAD, reprezentujący swobodne zwierciadło wód podziemnych na głębokości 3,7 m p.p.t. Proces kalibracji polegał na znalezieniu najlepszego dopasowania wartości uzyskanych podczas modelowania do warunków rzeczywistych (wyników badań laboratoryjnych). Dopasowanie to określono poprzez korektę wielkości zasilania infiltracyjnego z powierzchni terenu.

W drugim etapie prac dane wejściowe do badań modelowych uzupełniono o wyniki badań georadarowych, gdzie do modelu wstawiono granice wyinterpretowane na podstawie obrazu echogramu. Największą różnicę w położeniu granic litologicznych stwierdzono w otworze A, gdzie kontynuuje się warstwa piasków różnoziarnistych widoczna w otworze B. Najmniejsze zmiany, rzędu 0,1 m, odnotowano w profilu C. Typy warunków brzegowych i proces kalibracji nie uległy zmianie.



Ryc. 2. Echogram badań GPR wzdłuż fragmentu profilu II–II'
Fig. 2. GPR echogram along part of profile II–II'

Kalibracja opierała się na dopasowaniu modelowanych wartości wilgotności objętościowej z wartościami określonymi laboratoryjnie (ryc. 3).

WYNIKI BADAŃ

Stwierdzono, że wg normy PN-86/B-02480 w analizowanej strefie aeracji występują piaski drobnoziarniste i średnioziarniste z wkładkami piasków różnoziarnistych i średnioziarnistych (tab. 1).

Jako wynik badań modelowych uzyskano rozkład wilgotności i prędkości przesączania w profilu pionowym (tab. 2; ryc. 3) oraz wartość infiltracji efektywnej. Współczynnik filtracji badanych osadów wynosił: na głębokości 0,5 m od 6,26 do 17,56 m/d, na głębokości 1,9 m w otworach A i B – ok. 3,19 m/d, a w otworze C – ok. 16 m/d; natomiast na głębokości powyżej 3 m – od 15,11 do 33,84 m/d. Wilgotność objętościowa zmieniała się wraz

z głębokością od 2,69 do 16,26%, jedynie w otworze C była nieznacznie większa na głębokości 0,5 m (tab. 1).

Korelacja oznaczeń wilgotności objętościowej i prędkości przesączania, dokonanych na podstawie rozpoznania punktowego i badania georadarem, była zróżnicowana. Najmniejszą zgodność uzyskano w profilu B, który cechuje się największą zmiennością litologiczną, natomiast największą korelację, przekraczającą 93%, odnotowano w profilu C.

WNIOSKI

Wyniki badań modelowych i laboratoryjnych umożliwiły określenie prędkości, czasu i ilości przesączającej się wody w badanej strefie aeracji we Włocławku.

Stwierdzono, że w warunkach wilgotnościowych panujących w trakcie wykonywania badań infiltracja zwiększała jedynie wilgotność przypowierzchniowej partii stre-

Tab. 1. Wyniki badań laboratoryjnych próbek gruntu
Table 1. Results of laboratory tests of soil samples

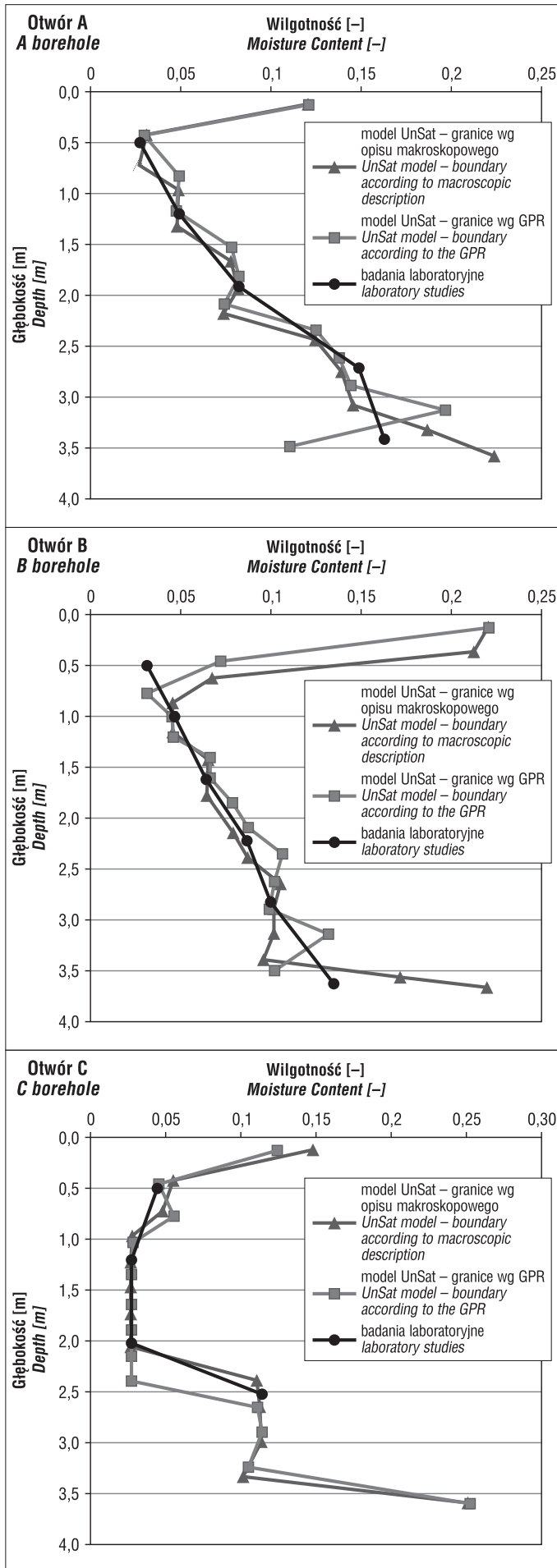
Miejsce poboru próbek <i>Sampling site</i>	Głębokość poboru próbki [m p.p.t.] <i>Sampling depth</i> [m b.g.l.]	Litologia próbki <i>Sample litology</i>	Współczynnik filtracji <i>Conductivity</i> [m/s]	Współczynnik filtracji <i>Conductivity</i> [m/d]	Wilgotność <i>Moisture</i> [%]
Otwór A <i>Borehole A</i>	0,5	Pd/Ps	$1,50 \times 10^{-4}$	12,98	2,69
	1,2	Pd/Ps	$1,01 \times 10^{-4}$	8,70	4,91
	1,9	Pd	$3,69 \times 10^{-5}$	3,19	8,20
	2,7	Pd	$4,24 \times 10^{-5}$	3,67	14,87
	4,0	Ps/Pd	$1,75 \times 10^{-4}$	15,11	16,26
Otwór B <i>Borehole B</i>	0,5	Pd/Ps	$2,03 \times 10^{-4}$	17,56	3,14
	1,0	Pd	$7,96 \times 10^{-5}$	6,87	4,65
	1,6	Pd	$3,69 \times 10^{-5}$	3,19	6,44
	2,2	Pd	$5,98 \times 10^{-5}$	5,16	8,68
	2,8	Pgr/Ps/Pd	$1,74 \times 10^{-4}$	15,00	10,02
	3,9	Pd/Ps	$3,92 \times 10^{-4}$	33,84	13,52
Otwór C <i>Borehole C</i>	0,5	Pd	$7,24 \times 10^{-5}$	6,26	4,52
	1,2	Pd/Ps	$1,74 \times 10^{-4}$	15,06	2,80
	2,0	Ps	$1,87 \times 10^{-4}$	16,20	2,76
	2,5	Ps	$2,94 \times 10^{-4}$	25,40	11,41

Objaśnienia symboli / *Explanation of symbols:*

Pd – piasek drobnoziarnisty / *fine sand*, Ps – piasek średnioziarnisty / *medium sand*, Pgr – piasek gruboziarnisty / *coarse sand*

Tab. 2. Wyniki badań modelowych
Table 2. Results of model tests

Lokalizacja <i>Location</i>	Rozpoznanie punktowe <i>Point recognition</i>		Rozpoznanie ciągle (georadar) <i>Continuous diagnosis</i> (<i>ground-penetrating radar</i>)		Współczynnik korelacji dla wyników rozpoznania punktowego i ciągłego <i>Correlation coefficient of point recognition and continuous diagnosis</i> (<i>ground-penetrating radar</i>)	
	Czas przesączania [rok] <i>Percolation time</i> [year]	Prędkość przesączania [cm/d] <i>Infiltration velocity</i> [cm/d]	Czas przesączania [rok] <i>Percolation time</i> [year]	Prędkość przesączania [cm/d] <i>Infiltration velocity</i> [cm/d]	Wilgotność <i>Moisture</i>	Prędkość przesączania <i>Infiltration velocity</i>
A	0,012	0,0083	0,012	0,0087	0,78	0,81
B	0,020	0,0050	0,025	0,0040	0,67	0,57
C	0,025	0,0041	0,042	0,0024	0,93	0,96



←

Ryc. 3. Zestawienie wyników badań wilgotności gruntu na podstawie wyników modelowania UnSat i badań laboratoryjnych w otworach A, B i C

Fig. 3. Comparison of the moisture content results in soils based on UnSat models and laboratory studies in boreholes A, B and C

fy aeracji, a w miejscach występowania drobniejszych frakcji piaszczystych, przenikanie wody do głębszych partii profilu było znacznie ograniczone, w efekcie czego wilgotność objętościowa osiągała 2–5%. W głębszych partiach gruntu zaznaczył się wpływ podsiąku kapilarnego, który spowodował zwiększenie wilgotności do kilkunastu procent. Wyniki obliczeń czasu przesiąkania wskazują na możliwość dotarcia zanieczyszczeń konserwatywnych (trwałych) z powierzchni terenu do warstwy wodonośnej po 4,28–5,43 dniach.

W niniejszej publikacji wykazano, że badania georadarowe, z uwagi na zwiększenie szczegółowości rozpoznania, mogą być bardzo pomocne w pracach modelowych i wywierać wpływ na ostateczny wynik obliczeń czasu i prędkości przesączania w strefie aeracji. Oszacowana w toku badań wielkość zasilania obrazuje jedynie warunki wilgotnościowe występujące w danym cyklu sezonowym, nie może więc być podstawą badań modelowych strefy saturacji.

Serdecznie dziękujemy Recenzentom za cenne uwagi merytoryczne.

LITERATURA

- De VRIES J.J., SIMMERS I. 2002 – Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.*, 10: 5–17.
- GALITSKAYA I., POZDNYAKOVA I. 2006 – Assessment of groundwater and unsaturated zone contamination in urban areas. IAEG2006, Paper number 179. The Geological Society of London.
- GOGOLEV M.I. 2002 – Assessing groundwater recharge with two unsaturated zone modeling technologies. *Envir. Geol.*, 42: 248–258, DOI 10.1007/s00254-001-0494-7.
- GOGOLEV M.I., DELANEY P. 1999 – 1-D unsaturated zone groundwater flow and contaminant transport modeling using VLEACH, PESTAN, VS2DT and HELP. WHI UnSat Suite user's manual. WHI Publ., Waterloo.
- GURWIN J. 2010 – Ocena odnawialności struktur wodonośnych bloku przedsudeckiego. Integracja danych monitoringowych i GIS/RS z numerycznymi modelami filtracji. *Acta Univ. Wratisl.*, 3258: 218.
- JAWORSKA-SZULC B. 2015 – Ocena zasilania wód podziemnych na Pojezierzu Kaszubskim z zastosowaniem różnych metod i różnej skali opracowania. *Prz. Geol.*, 63 (10/1): 764–768.
- KUMAR C.P. 2016 – Impact of climate changes on groundwater resources, [W:] Dinda S. (red.). *Handbook of Research on Climate Change Impact on Health and Environmental Sustainability*. Sidho-Kanho-Birsha University, India.
- LERNER D.N., ISSAR A.S., SIMMERS I. 1990 – Groundwater recharge a guide to understanding and estimating natural recharge. Intern. Assoc. Hydrogeologists, Kenilworth, Rep. 8.
- MACIOSZCZYK T. 1999 – Czas przesączania pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych. *Prz. Geol.*, 8: 731–736.
- MOJSKI E. 1958 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Włocławek (442). Państw. Inst. Geol.
- MYŚLIŃSKA E. 1998 – Laboratoryjne badania gruntów. PWN, Warszawa.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B. 1990 – *Hydrogeologia ogólna*. Wyd. Geol., Warszawa.
- PN-B-02480:1986 – wersja polska. Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.