BIULETYN PAŃSTWOWEGO INSTYTUTU GEOLOGICZNEGO 436: 103–108, 2009 R.

OCENA ZASILANIA WÓD PODZIEMNYCH W WYBRANYCH ZLEWNIACH METODĄ INFILTRACYJNĄ

THE ASSESSMENT OF GROUNDWATER RECHARGE BY INFILTRATION METHOD IN SELECTED CATCHMENTS

ROBERT DUDA[1], MAGDALENA PASZKIEWICZ[1]

Abstrakt. W artykule określono wielkość zasilania wód podziemnych na podstawie infiltracji opadów atmosferycznych. Badania prowadzono w zlewniach dwóch rzek: Rudawy i Stradomki, zlokalizowanych w południowej Polsce. Zasilanie z infiltracji opadów uzyskano na podstawie średniej wielkości opadów atmosferycznych oraz odpowiednio dobranych dla poszczególnych typów utworów powierzchniowych wskaźników infiltracji efektywnej. Obliczono również wielkość zasobów odnawialnych wód podziemnych za pomocą hydrologicznej metody Wundta, czyli wielkość przepływów w rzekach.

Słowa kluczowe: wody podziemne, zasilanie, metoda infiltracyjna, infiltracja efektywna.

Abstract. The paper describes the assessment of groundwater recharge on the basis of precipitation infiltration. Investigations were carried out on two selected catchments located in southern Poland: Rudawa and Stradomka. Groundwater recharge was assessed on the basis of the mean precipitation value and effective infiltration coefficients, well-chosen for individual types of surface material. Groundwater renewable resources, i.e. the amount of river flows obtained from the Wundt's method, are also presented. The results received from the two methods were compared.

Key words: groundwater, recharge, infiltration method, effective infiltration.

WSTĘP

Celem badań była ilościowa ocena zasilania wód podziemnych w wybranych zlewniach. Omówienie metod ilościowej oceny zasilania wraz z obszernym zestawieniem literatury podali m.in. Scanlon i in. (2002). Zasilanie wód podziemnych i procesy wpływające na zasilanie opisali m.in. Lerner i in. (1990), Lerner (1997) oraz de Vries i Simmers (2002). Natomiast przegląd aktualnego stanu badań związanych z zasilaniem oraz kierunków badań, które będą lub powinny być rozwijane w najbliższej przyszłości, podali Alley i in. (2002).

Zasilanie wód podziemnych oceniono metodą hydrogeologiczną, opartą na określeniu wskaźnika infiltracji efektywnej wody do utworów występujących na powierzchni (Jokiel, 1994). Spośród różnych metod hydrogeologicznych wybrano tę metodę, ponieważ zasilanie głównie odbywa się poprzez infiltrację wody z opadów atmosferycznych oraz, w odróżnieniu od niektórych metod, ten sposób nadaje ocenianemu zasilaniu właściwy rozkład przestrzenny. Rozkład przestrzenny infiltracji efektywnej zależy m.in. od zmienności przestrzennej opadów, wykształcenia litologicznego utworów

[1] Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: duda@agh.edu.pl

powierzchniowych i związanego z tym typu gleb, kąta nachylenia powierzchni terenu, rodzaju roślinności, sposobu zagospodarowania terenu i głębokości do zwierciadła wód gruntowych. Zmienność przestrzenna zasilania w obszarze badań jest elementem niezbędnym do modelowania hydrogeologicznego (Sanford, 2002).

Przez infiltrację rozumie się przesiąkanie wody przez powierzchnię gruntu pod wpływem połączonych sił ciężkości, lepkości i kapilarności (Kowalski, 1987). Po przejściu przez barierę, jaką tworzy pokrywa roślinna, i wypełnieniu zbiornika intercepcji woda opadowa dociera do powierzchni gruntu. Zgodnie z teorią Hortona dzieli się tutaj na wodę infiltrującą i spływającą powierzchniowo. W trakcie infiltracji wydziela się dwa procesy: wsiąkania i przesiąkania. Wsiąkanie polega na wypełnieniu makroporowatości gleby i uzupełnianiu wilgoci glebowej. Przesiąkanie rozpoczyna się w momencie ustania wsiąkania i sprowadza się do przenikania frontu zwilżania w dół profilu glebowego, a warunkiem jego podtrzymania jest dalsze zasilanie (Werner-Więckowska, 1975). W miarę przesączania przez profil glebowy i strefę aeracji pojawiają się straty związane z wypełnieniem makroporowatości ośrodka i w efekcie transpiracji. Wskutek tego do strefy saturacji dociera jedynie część infiltrującej wody opadowej, którą określa się jako infiltrację efektywną (Jokiel, 1994). Charakterystykę zasilania, odpływu podziemnego i metod ich oceny podali m.in. Dynowska (1983) i Humnicki (2006).

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH ZLEWNI

Zlewnia Rudawy, lewostronnego dopływu Wisły (fig. 1), jest zlewnią II rzędu, o powierzchni 328 km^2. Badaniami objęto obszar o powierzchni 290 km^2, zamknięty wodowskazem w Balicach, odległym 10 km od ujścia do Wisły, czyli tylko zlewnię wodowskazu. Średni spadek Rudawy wynosi 5,6‰.

Zlewnia Rudawy znajduje się na pograniczu monokliny śląsko-krakowskiej i zapadliska przedkarpackiego. W zlewni występują elementy rzeźby zrębowej, krasowej, fluwialnej i fluwioglacjalnej. Obszary o nachyleniu mniejszym niż 5° stanowią 51% powierzchni zlewni, 5–15° – 42%, a ponad 15° – 7%. Tereny rolnicze stanowią 74% powierzchni zlewni, lasy – 21%, a łąki – 5%. Lasy porastające zbocza wąwozów powodują zmniejszenie spływu powierzchniowego, co zwiększa infiltrację efektywną. Natomiast lasy występujące na płaskich, podmokłych terenach południowo-zachodniej i południowej części zlewni sprzyjają parowaniu (Tlałka, 1970).

W zlewni Rudawy utwory powierzchniowe to głównie czwartorzędowe lessy (ponad 60%), a także piaski, piaski i gliny deluwialne, gliny zwałowe oraz piaski i żwiry w dolinie rzeki (fig. 2). Na powierzchni występują również utwory jurajskie, triasowe i górnodewońskie, wykształcone jako zlepieńce, dolomity, margle i wapienie. Odsłaniają się one na niespełna 15% powierzchni zlewni (Jóźwiak, Kowalczewska, 1986).

Zlewnia Stradomki, prawostronnego dopływu Raby, zajmuje powierzchnię 371 km^2. Badaniami objęto obszar o powierzchni 362 km^2, zamknięty wodowskazem w Stradomce. Średni spadek Stradomki wynosi 12$^o/_{oo}$.

Zlewnia Stradomki znajduje się w północnej części fliszowych Karpat zewnętrznych. Utwory powierzchniowe wykształcone są jako czwartorzędowe gliny pylaste i zwietrzelinowe, piaski oraz piaski ze żwirami w dolinie rzeki. Osady te zajmują 35% powierzchni zlewni (fig. 2). Pozostałe utwory ukazujące się na powierzchni to paleogeńsko-kredowe kompleksy piaskowców z łupkami o różnej przepuszczalności oraz łupki i margle. Utwory te występują na 65% powierzchni zlewni (Skoczylas-Ciszewska, Burtan, 1954; Burtan, 1978).

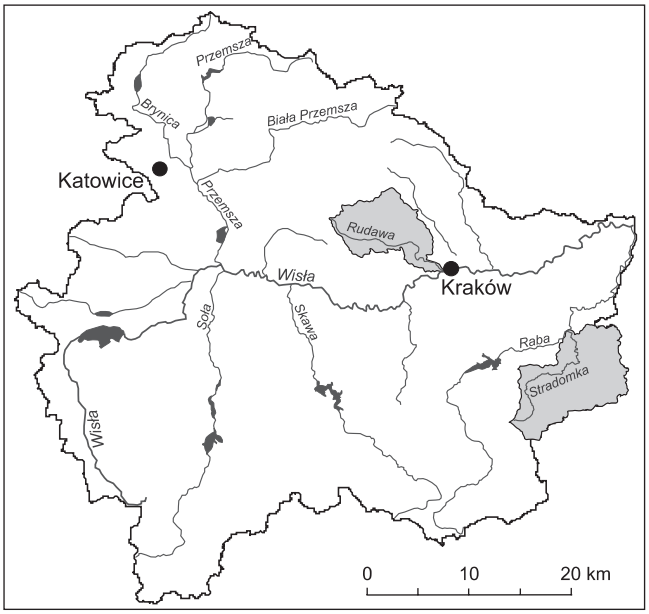

Fig. 1. Lokalizacja badanych zlewni w granicach zachodniej części zlewni górnej Wisły

Location of the catchments in the western part of the Upper Vistula River basin

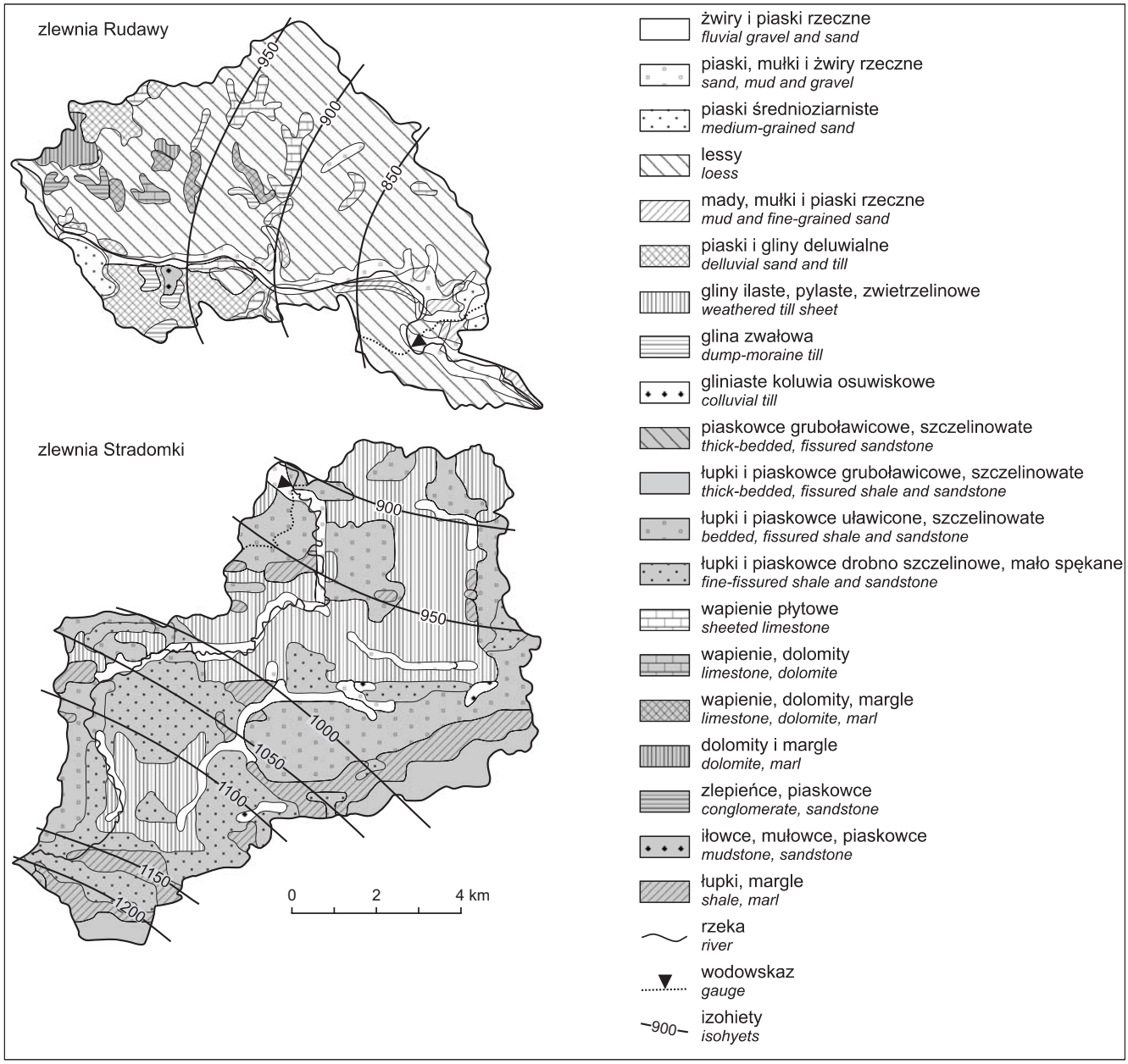

Fig. 2. Utwory powierzchniowe w zlewniach Rudawy i Stradomki oraz rozkład przestrzenny wysokości średnich opadów w latach 1956–1980, w mm/rok

Surface deposits in the Rudawa river and Stradomka river catchments, and spatial distribution of mean precipitation for the period 1956–1980, mm/year

SPOSÓB OCENY WIELKOŚCI INFILTRACJI EFEKTYWNEJ

Parametrem wpływającym na wielkość zasilania utworów wodonośnych jest wysokość opadów atmosferycznych. Wysokości opadów uzyskano dla wielolecia 1956–1980 z kilkunastu stacji opadowych, zlokalizowanych w obszarach badań oraz w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Są to wartości zmierzone i nie poprawione, więc bezpośrednio mogą służyć jedynie jako wartości do porównań statystycznych. Wielkości opadu atmosferycznego mierzonego deszczomierzem Hellmanna są obarczone pewnym błędem, zwłaszcza w przypadku opadów w formie stałej, czyli śniegu i gradu. Do błędu pomiaru opadów zaliczają się także inne straty wody, spowodowane np. wiatrem, parowaniem wody z pluwiometru oraz zwilżaniem jego powierzchni recepcyjnej.

Do oceny zasobów wód podziemnych niezbędne są skorygowane wartości opadów, czyli uwzględniające błąd ich

pomiaru. W latach siedemdziesiątych podjęto próby korelacji wielkości opadów zmierzonych. Według Chomicza (1976) średni rzeczywisty opad w wieloleciu 1931–1960 był o około 20% wyższy od pomierzonego. Z tego względu w celu uzyskania rzeczywistych wysokości opadów w badanych zlewniach dodano jednakową poprawkę, wynoszącą 19%. Uznano, że bardziej szczegółowe korygowanie zmierzonego opadu, zgodnie z propozycją Chomicza, nie wpłynie znacząco na uzyskany wynik. Następnie dokonano interpolacji rozkładu przestrzennego rzeczywistych wartości opadów w badanych zlewniach (fig. 2).

Wartości wskaźników infiltracji efektywnej wybranych gruntów i skał występujących na powierzchni w badanych zlewniach dobrano w sposób uproszczony, tzn. na podstawie typu litologicznego (tab. 1). Uznano, że litologia utworów powierzchniowych jest czynnikiem decydującym i nie korygowano dobranych w ten sposób wartości wskaźnika w zależności od innych parametrów. Typy litologiczne gruntów i skał przyjęto według map geologicznych. Do analizy zlewni Stradomki wykorzystano mapy w skali 1:50 000, natomiast dla zlewni Rudawy – w skali 1:200 000.

Tabela 1

Wskaźniki infiltracji efektywnej wybranych gruntów i skał w badanych zlewniach

Effective infiltration coefficients of selected soils and rocks in the catchments

Typ utworów powierzchniowych	Zlewnia	
	Stradomki	Rudawy
Żwiry i piaski rzeczne	0,30	0,33
Piaski, mułki i żwiry rzeczne	0,20	0,23
Piaski średnioziarniste		0,19
Lessy		0,13
Gliny ilaste, pylaste, zwietrzelinowe	0,09	
Łupki i piaskowce uławicone, szczelinowate	0,12	
Wapienie płytowe		0,27
Wapienie, dolomity, margle		0,18
Zlepieńce, piaskowce		0,18
Łupki, margle	0,08	

WYNIKI I DYSKUSJA

Ze względów praktycznych często dokonuje się uproszenia i stawia znak równości między zasilaniem wód podziemnych, czyli infiltracją efektywną, zasobami odnawialnymi wód podziemnych i odpływem podziemnym (Jokiel, 1994). Dlatego w celu porównania uzyskanych wartości zasilania wód podziemnych z innymi danymi uzyskanymi w niezależny sposób obliczono wielkości odpływu podziemnego hydrologiczną metodą Wundta (tab. 2). W metodzie tej odpływ podziemny utożsamiany jest ze średnim wieloletnim niskim przepływem rzeki SNQ_m, wyznaczonym na podstawie minimalnych przepływów miesięcznych. Wielkości SNQ_m wody w Rudawie określono na podstawie dostępnych danych z wielolecia 1974–2002, natomiast w Stradomce – z wielolecia 1961–2000.

W zlewni Stradomki wielkość zasilania wód podziemnych oceniona metodą infiltracyjną była o około 9% większa od wartości uzyskanej metodą hydrologiczną. Średnia ważona po powierzchni wartość wskaźnika infiltracji dla utworów powierzchniowych wydzielonych na mapach geologicznych zlewni Stradomki wynosi 0,12.

W celu lepszego dopasowania wielkości zasilania wód podziemnych w zlewni Rudawy przyjęto wartości wskaźników infiltracji utworów powierzchniowych nieco wyższe niż dla drugiej zlewni. Jednak wielkość zasilania uzyskana metodą infiltracyjną była o około 25% niższa niż oceniona metodą hydrologiczną. Średnia ważona po powierzchni wartość wskaźnika infiltracji dla utworów powierzchniowych zlewni Rudawy wynosi 0,15.

Do oceny wielkości zasilania wód podziemnych na podstawie infiltracji opadów atmosferycznych niezbędne są dane wieloletnie. Uznano, że okres 25 lat jest wystarczający do wykonania tego typu obliczeń. Jednak w przeprowadzonych badaniach wielkości opadów oraz przepływów wody w rzekach określone są dla różnych wieloleci. Biorąc pod uwagę występującą w latach 1980–1995 długotrwałą suszę hydrologiczną, prawdopodobnie średnie wieloletnie wysokości opadów z lat 1961–2000 byłyby w zlewni Stradomki o kilka procent niższe niż w przyjętym do oceny wieloleciu 1956–1980. Z tego względu wielkość zasilania wód podziemnych oceniona metodą infiltracyjną byłaby bliższa wartości uzyskanej metodą hydrologiczną.

Obserwowaną różnicę w ocenie zasilania wód podziemnych w zlewni Rudawy prawdopodobnie stanowi odpływ podpowierzchniowy wód podziemnych, który występuje na obszarach wyżynnych i górskich. Odpływ podpowierzchniowy, będący częścią odpływu podziemnego, nie jest jednak

Tabela 2

Zasilanie wód podziemnych ocenione metodą infiltracyjną i hydrologiczną [m^3/s]

Groundwater recharge assessed by infiltration and hydrological methods [m^3/s]

Zlewnia	Metoda infiltracyjna	Metoda hydrologiczna	Proporcja wyniku z metody infiltracyjnej do hydrologicznej
Rudawy	1,27	1,70	0,75
Stradomki	1,39	1,28	1,09

elementem zasilania warstwy wodonośnej. Z tego względu w obszarach wyżynno-górskich zasoby odnawialne wód podziemnych, określone na podstawie średnich niskich przepływów miesięcznych rzeki w wieloleciu, są zawyżone o wartość odpływu podpowierzchniowego. Ponieważ wielkość tego odpływu jest trudna do bezpośredniej oceny, można zastosować inną metodę. Podobne spostrzeżenia prezentują m.in. Dynowska (1983) czy Humnicki (1997, 2006).

Inną przyczyną niepełnej oceny wielkości zasilania wód podziemnych metodą infiltracyjną w badanych zlewniach może być niedokładna interpolacja rozkładu przestrzennego opadów. Rozkład przestrzenny wysokości opadów jest trudny do dokładnej interpolacji z powodu jego zależności od wysokości terenu nad poziomem morza. W opisywanym badaniu interpolację wykonano bez uwzględnienia tej zależności.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony sposób realizacji oceny zasilania wód podziemnych za pomocą metody infiltracyjnej nie dał dokładnych wyników. Zastosowana metoda charakteryzuje się koniecznością prawidłowego przyjęcia silnie zmiennych czasowo i przestrzennie parametrów, niezbędnych do oceny wielkości infiltracji efektywnej i odpływu podziemnego.

W przypadku wykorzystywania danych określonych w różnych wieloleciach należy dodatkowo wykonać kontrolną analizę niepewności. Powinno się porównać wyniki oceny zasilania wód podziemnych uzyskane na podstawie opadów i przepływów w rzekach z tych samych oraz z różnych wieloleci. W dalszych badaniach dotyczących oceny zasilania wód podziemnych za pomocą metody infiltracyjnej w obszarach górskich, podgórskich i wyżynnych interpolacja rozkładu przestrzennego wysokości opadów atmosferycznych powinna uwzględniać zmienność wielkości opadów w zależności od rzędnej terenu.

W obszarach wyżynno-górskich zasoby odnawialne wód podziemnych, określone na podstawie średnich niskich przepływów miesięcznych rzeki w wieloleciu, są zawyżone o wartość odpływu podpowierzchniowego. W celu lepszego dopasowania wielkości zasilania wód podziemnych z oceną uzyskaną za pomocą innych metod hydrologicznych, nieobarczonych wskazaną cechą, powinno się dodatkowo wykonać kontrolną ocenę odpływu podziemnego metodą rozdziału hydrogramu rzeki, czyli ścięcia fali wezbrania (Mau, Winter, 1997; Rutledge, 1997, 1998; Halford, Mayer, 2000) lub metodą Killego.

Najwłaściwsze byłoby jednak podejście ujmujące całościowo system krążenia wody w zlewni i równoczesne wyznaczenie istotnych składowych bilansu wodnego. Jest to możliwe przy zastosowaniu odpowiednich programów umożliwiających modelowanie obiegu wody w zlewni, z wyodrębnieniem m.in. zasilania wód podziemnych. Możliwości takiego modelowania z wykorzystaniem programu SHE podają m.in. Soczyńska (1997) oraz Smerdon i in. (2009), a programu Stanford – m.in. Radczuk i in. (1981) oraz Soczyńska (1997).

Praca została zrealizowana i sfinansowana w ramach badań statutowych (umowa 11.11.140.139) prowadzonych w Katedrze Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i badań własnych autorów (umowa 10.10.140.585).

LITERATURA

ALLEY W.M., HEALY R.W., LABAUGH J.W., REILLY T.E., 2002 – Flow and storage in groundwater systems. *Science*, 296: 1985–1990.

BURTAN J., 1978 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Mszana Dolna. Wyd. Geol., Warszawa.

CHOMICZ K., 1976 – Opady rzeczywiste w Polsce (1931–1960). *Prz. Geof.*, **21**, 1: 19–25.

DE VRIES J.J., SIMMERS I., 2002 – Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J.*, **10**, 1: 5–17.

DYNOWSKA I., 1983 – Odpływ podziemny w dorzeczu górnej Wisły. *Czas. Geogr.*, **54**, 4.

HALFORD K.J., MAYER G.C., 2000 – Problems associated with estimating ground water discharge and recharge from stream-discharge records. *Ground Water*, **38**: 331–342.

HUMNICKI W., 1997 – Analiza czasowo-przestrzennej zmienności odpływu podziemnego tatrzańskiej części zlewni Białki. *W*: Współczesne problemy hydrogeologii (red. J. Górski, E. Liszkowska), t. 8: 67–72. Wyd. WIND, Wrocław.

HUMNICKI W., 2006 – Zasilanie i drenaż wód podziemnych. *W*: Podstawy hydrogeologii stosowanej (red. A. Macioszczyk): 72–96. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa,

JOKIEL P., 1994 – Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geogr. Lodz.*, 66–67.

JÓŹWIAK A., KOWALCZEWSKA G., 1986 – Mapa hydrogeologiczna Polski 1:200 000, ark. Kraków. Państw. Inst. Geol., Warszawa.

KOWALSKI J., 1987 – Hydrogeologia z podstawami geologii. PWN, Warszawa.

LERNER D.N., 1997 – Groundwater recharge. *W*: Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments (red. O.M. Saether, P. de Caritat): 109–150. AA Balkema, Rotterdam.

LERNER D.N., ISSAR A.S., SIMMERS I., 1990 – Groundwater recharge, a guide to understanding and estimating natural recharge. IAH, International Contributions to Hydrogeology, vol. 8.

MAU D.P., WINTER T.C., 1997 – Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA. *Ground Water*, **35**: 291–304.

RADCZUK L., SOCZYŃSKA U., OSTROWSKI J., 1981 – Opracowanie regionalnego modelu zlewni na podstawie modelu Stanford IV. Struktura modelu Stanford IV. *Wiad. IMGW*, 1–2.

RUTLEDGE A.T., 1997 – Model-estimated ground-water recharge and hydrograph of ground-water discharge to a stream. *US Geol. Surv., Water Resour. Invest. Rep.*, **97**: 29.

RUTLEDGE A.T., 1998 – Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data – update. *US Geol. Surv., Water Resour. Invest. Rep.*, **98**: 43.

SANFORD W., 2002 – Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeol. J.*, **10**, 1: 110–120.

SCANLON B.R., HEALY R.W., COOK P.G., 2002 – Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, **10**, 1: 18–39.

SKOCZYLAS-CISZEWSKA K., BURTAN J., 1954 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Bochnia. Inst. Geol., Warszawa.

SMERDON B.D., ALLEN D.M, GRASBY S.E., BERG M.A., 2009 – An approach for predicting groundwater recharge in mountainous watersheds. *Journal of Hydrology*, **365**, 3–4: 156–172.

SOCZYŃSKA U., 1997 – Hydrologia dynamiczna. PWN, Warszawa.

TLAŁKA A., 1970 – Obieg wody w zrębowym obszarze wyżynnym na przykładzie dorzecza Rudawy. *Zesz. Nauk. UJ, ser. Pr. Geogr.*, **24**.

WERNER-WIĘCKOWSKA H., 1975 – Zmienność kształtowania się odpływu w zlewni. *Prz. Geof.*, **20**, 2: 121–128.

SUMMARY

The paper describes the assessment of groundwater recharge on the basis of precipitation infiltration. Investigations were carried out on two catchments: Rudawa and Stradomka, located in southern Poland (Fig. 1).

Groundwater recharge was assessed on the basis of precipitation and effective infiltration coefficients, well-chosen for individual types of surface material. A correction (19% for the measured precipitation) was added to receive an actual precipitation value in the catchments. Subsequently, spatial distribution interpolation of the actual precipitation in the catchments was made (Fig. 2). Effective infiltration coefficients for selected soil and rocks outcrops on the analyzed catchments surface was chosen in a simplified approach, i.e. on the base of lithology type (Table 1). There was accepted that lithology of surface material is a decisive factor and didn't correct coefficient value depends on other parameters. Lithology types of soils and rocks coming from geological maps.

Groundwater recharge compared with others data got in the independent method. For that reason there was evaluated groundwater baseflow by Wundt hydrology method (Table 2). In that method groundwater baseflow is identified with longtime mean low streamflow, appointed on the base of minimum monthly flows.

Groundwater recharge evaluated by infiltration method in Stradomka catchment was about 9% higher than from hydrology method. In Rudawa catchment was accepted a little bit higher values of effective infiltration coefficients than for Stradomka catchment. However recharge from infiltration method was about 25% lower than assessed by hydrology method. The difference in assessment of groundwater recharge in Rudawa catchment, make up probably interflow. Interflow is a part of ground runoff but it isn't component of groundwater recharge and baseflow. Accordingly, in upland-mountainous areas groundwater renewable resources specified on the base of longtime mean low streamflow, are higher about subsurface runoff (interflow). For better groundwater recharge fitting with the quantity received by other hydrology methods there should be made additionally assessment of groundwater baseflow by streamflow hydrograph separation method or Kille method.

Presented approach of groundwater recharge assessment on the base of infiltration method didn't give exact results. That method requires accurate assumption of temporally and spatially changeable s, essentials for recharging infiltration and groundwater baseflow evaluation. Accordingly, appropriate would be a complex approach, including comprehensive water circulation system in the catchment and determining significant components of water balance. This approach is possible with using software making possible modeling of water circulation in the catchment, with groundwater recharge separation of balance. This kind of integrated modeling possibility in the SHE numerical code is by Soczyńska (1997) and Smerdon *et al.* (2009) or the Stanford numerical code is by Radczuk *et al.* (1981) and Soczyńska (1997).