

ODPŁYW PODZIEMNY W SUDETACH NA PODSTAWIE ROZDZIAŁU HYDROGRAMU PRZY UŻYCIU FILTRÓW CYFROWYCH

GROUNDWATER RUNOFF IN THE SUDETES BASED ON HYDROGRAPH SEPARATION USING DIGITAL FILTERS

ROBERT TARKA¹, TOMASZ OLIHWER¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono i przetestowano dla obszaru Sudetów najczęściej stosowane filtry cyfrowe (Chapmana, Eckhardta, Lyne'a i Hollicka, Chapmana i Maxwella oraz Furey'a-Gupty) pozwalające wydzielić odpływ podziemny z hydrogramu. Badania przeprowadzono w 11 zlewniach, które w przeważającej części położone są na obszarach zbudowanych ze skał krystalicznych. Na podstawie analizy w zlewni eksperymentalnej rzeki Kamiennej skalibrowano parametry filtrów i ustalono, że dwa z nich: Lyne'a i Hollicka oraz Furey'a i Gupty, najlepiej odzwierciedlają na badanym terenie zmiany odpływu rzeczno-ziemnego w okresach niżówkowych. W kolejnej fazie pracy wykorzystano dwa wybrane w ten sposób filtry, z ustalonymi parametrami wejściowymi, do wyznaczenia odpływu podziemnego dla pozostałych rzek uwzględnionych w badaniach. Obliczony procentowy udział odpływu podziemnego w odpływie całkowitym w poszczególnych zlewniach stanowi od 48,8 do 68,3% przy wykorzystaniu filtra Lyne'a-Hollicka i od 54,4 do 72,5% dla filtra Furey'a-Gupty. Przeciętne wartości współczynnika odpływu podziemnego wynoszą odpowiednio 60,1 i 65,1%. Otrzymane wartości współczynnika odpływu podziemnego przy wykorzystaniu do wyznaczenia średniego rocznego odpływu podziemnego filtrów cyfrowych są o kilkanaście procent wyższe w stosunku do wartości uzyskanych metodą Wundta. Średnia wartość współczynnika odpływu podziemnego z użyciem metody Wundta wynosi 48,3%.

Słowa kluczowe: odpływ podziemny, filtry cyfrowe, Sudety.

Abstract. The article presents testing of the most commonly used digital filters (Chapman, Eckhardt, Lyne and Hollick, Chapman and Maxwell, and Furey-Gupta) that allow separating groundwater runoff from a hydrograph. The research was carried out in 11 river catchments representing the area of crystalline rocks of the Sudetes. Based on the analysis in the experimental basin of the Kamienna River, the parameters of the filters were calibrated, and it was established that two of them: Lyne-Hollick and Furey-Gupta, best reflect changes in the river runoff in low river-flow periods in the study area. In the next step, based on the calibrated parameters for two selected filters, groundwater runoff was determined for the remaining rivers included in the research. The groundwater runoff calculated using digital filters is from 48.8 to 68.3% (Lyne-Hollick filter) and from 54.4 to 72.5% (Furey-Gupta filter) of total runoff. The average values of the baseflow index equal 60.1 and 65.1%, respectively. The values of groundwater runoff and baseflow index, obtained with the use of digital filters, are over a dozen percent higher in relation to the values obtained by the Wundt method. The average value of the baseflow index using the Wundt method is 48.3%.

Key words: groundwater runoff, digital filters, Sudety Mts.

¹ Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: robert.tarka@uwr.edu.pl.

WSTĘP

W okresie niskich stanów rzek, kiedy nie ma opadów lub są one niewielkie (poniżej opadu efektywnego), natężenie przepływu rzeczno-geologicznego jest zdominowane przez odpływ podziemny. W związku z tym ważne jest oszacowanie udziału odpływu podziemnego w całkowitym odpływie rzeczno-geologicznym. Badania nad tym problemem zaczęły się ponad sto lat temu (Boussinesq, 1904; Mailliet, 1905; Horton, 1933). Odpływ podziemny, utożsamiany z zasobami dynamicznymi wód podziemnych, jest ważnym elementem bilansu wodnego zlewni. Wyznaczenie tej składowej jest bardzo ważne w kontekście zarządzania zasobami wodnymi. Istnieje szereg metod hydrogeologicznych oraz hydrologicznych umożliwiających wyznaczyć ten element obiegu wody w przyrodzie. Do tradycyjnych metod szeroko stosowanych w badaniach zasobowych zalicza się metody hydrologiczne bazujące na charakterystycznych przepływach niskich (Wundt, 1953; Kille, 1970) oraz metody polegające na graficznym wydzieleniu odpływu podziemnego z hydrogramu (metoda genetycznego podziału hydrogramu). Problematyka konwencjonalnego wydzielenia odpływu podziemnego metodą genetycznego podziału hydrogramu została szeroko przedstawiona w pracy Tarki (2002).

Od lat 80. XX w. pojawiło się wiele numerycznych algorytmów pozwalających w sposób automatyczny wydzielić odpływ podziemny z hydrogramu. Schematy stosowane w metodach numerycznych oparte są na cyfrowej, graficznej separacji odpływu podziemnego (Pettyjohn, Henning, 1979; Shirmahammadi i in., 1984; Nathan, McMahon, 1990; Sloto, 1991; Tarka, 2002) oraz na filtrach cyfrowych (Boughton, 1987, 1993; Chapman, 1991; Chapman, Maxwell, 1996; Furey, Gupta, 2001; Eckhardt, 2005).

Obecnie w wyniku rozwoju technik komputerowych oraz Internetu nastąpiła szybka automatyzacja działań pozwalających wyznaczyć odpływ podziemny. Stąd metody te są bardziej praktyczne i łatwiejsze do wdrożenia w związku z istnieniem ogólnodostępnego oprogramowania, np. HYSEP (<https://water.usgs.gov/software/HYSEP/>), HydrOffice (<http://hydrooffice.org>), SepHydro (<http://canadianriversinstitute.com/tool/pageMain.php>). Obecnie dostępny software pozwala analizować kilkudziesięcioletnie ciągi przepływów rzecznych i wyodrębnić z nich odpływ podziemny w bardzo krótkim czasie.

Celem artykułu jest:

- przedstawienie najczęściej stosowanych filtrów cyfrowych pozwalających wydzielić odpływ podziemny z hydrogramu,
- zweryfikowanie możliwości ich wykorzystania do oceny podziemnego komponentu odpływu rzeczno-geologicznego ze zlewni położonych na obszarach zbudowanych ze skał krystalicznych w Sudetach,
- określenie optymalnych wartości parametrów filtrów cyfrowych na tym obszarze,
- porównanie wartości współczynnika odpływu podziemnego uzyskanych przy wykorzystaniu do wyznaczenia średniego odpływu podziemnego filtrów cyfrowych i metody Wundta.

METODY BADAŃ

Metody manualne wydzielenia odpływu podziemnego z odpływu całkowitego obciążone są dużą dozą subiektywizmu. Wydawało by się, że zastosowanie metod cyfrowych pozwoli na eliminację tego rodzaju błędów, jednak rekurencyjne filtry cyfrowe (RFC) nie zostały opracowane dla warunków przyrodniczych, a mechanizm ich działania jest podobny do metod używanych w przetwarzaniu sygnałów. W analizie hydrologicznej, filtr (algorytm) bazując na określonej wartości progowej lub innej wartości deterministycznej służy do oddzielania składnika odpływu powierzchniowego, reprezentującego sygnał o wysokiej częstotliwości i odpływu podziemnego, który jest analogiczny do sygnału o niskiej częstotliwości.

Liczne badania odpływu podziemnego z zastosowaniem wskaźników takich jak: przewodność elektrolityczna właściwa (Kouanda i in., 2018; Longobardi i in., 2018) czy rozpuszczona krzemionka (Gonzales i in., 2009) wskazują na dużą przydatność filtrów cyfrowych i dużą dokładność oceny zasilania podziemnego rzek.

W pracy do wydzielenia odpływu podziemnego w zlewniach z obszaru Sudetów wybrano pięć najpopularniejszych filtrów, które przedstawiono w tabeli 1.

We wszystkich metodach RFC (tab. 1) obliczany jest odpływ podziemny dla każdego dnia, wykorzystując informację o przepływie rzeczno-geologicznym w dniu (i) oraz w dniu ($i-1$). Parametry α , k i γ są kalibrowane przy użyciu dziennych wartości przepływu rzeczno-geologicznego, natomiast wartość $BFImax$ określana jest przez użytkownika filtra.

Przy wykorzystaniu filtrów cyfrowych duże znaczenie na wynik końcowy analizy ma odpowiedni dobór parametrów wejściowych, a są one różnie przyjmowane. Na przykład dla filtra Lyne'a-Hollick'a Nathan i McMahon (1990), na podstawie analizy odpływu podziemnego 122 rzek w południowej Australii, określili wartość α na 0,925. Z kolei w badaniach w zlewni Murray-Darling przyjęto wartość α równą 0,98 (CSIRO, SKM, 2010). Tan i inni (2009) porównując uzyskane wartości odpływu podziemnego przy wykorzystaniu filtra Lyne'a-Hollick'a i Chapmana dla 94 rzek zauważyli zgodność uzyskiwanych rezultatów przy wartości parametru powyżej 0,98.

Eckhardt (2005) dla zaproponowanego filtra określił wartość $BFImax$ na 0,8 dla rzek stałych zasilanych z porowych warstw wodonośnych, a na 0,25 dla rzek z obszarów skał krystalicznych. W pracy z 2008 roku wskazał, że najbardziej reprezentatywną wartością parametru α jest 0,96. Z kolei Gonzales i inni (2009) kalibrując filtr Eckhardta na podstawie analizy rozpuszczonej krzemionki w rzekach z obszaru Holandii, uzyskali wartość parametru α równą 0,97, a $BFImax$ wynoszącą 0,92.

Z kolei cyfrowy filtr Furey'a-Gupty oparty jest na równaniu ciągłości i wszystkie jego parametry są dobrze określone fizycznie. Do wykorzystania filtra potrzebna jest znajomość równoczesnego przepływu rzeczno-geologicznego i opadu w celu określenia parametrów c_1 i c_3 . Furey i Gupta testując swój algorytm (2001) zasugerowali, że stosunek parametrów c_3/c_1 jest głównym źródłem błędów w oszacowaniu odpływu podziemnego.

Tabela 1

Filtry cyfrowe użyte w badaniach
Digital filters used in studies

Nazwa filtru	Równanie	Autor
Chapman	$q_{ff(i)} = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha} q_{ff(i-1)} + \frac{2}{3-\alpha} (q_{(i)} - \alpha q_{(i-1)})$	Chapman, 1991
Eckhardt	$q_{b(i)} = \frac{(1-BFI_{max})\alpha q_{b(i-1)} + (1-\alpha)BFI_{max}xq_1}{1-\alpha BFI_{max}}$	Eckhardt, 2005
Lyne i Hollick	$q_{ff(i)} = \alpha q_{ff(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2}$	Lyne, Hollick, 1979
One-parameter	$q_{b(i)} = \frac{k}{2-k} q_{b(i-1)} + \frac{1-k}{2-k} q_{(i)}$	Chapman, Maxwell, 1996
Furey-Gupta	$q_{b(i)} = (1-\gamma)q_{b(i-1)} + \gamma \frac{c_3}{c_1} (q_{(i-d-1)} - q_{b(i-d-1)})$	Furey, Gupta, 2001

$q_{(i)}$ – przepływ całkowity w dniu i , $q_{b(i)}$ – obliczony odpiływ podziemny w dniu i , $q_{f(i)}$ – obliczony odpiływ powierzchniowy w dniu i , $q_{(i-1)}$ – przepływ całkowity w dniu $(i-1)$, $q_{b(i-1)}$ – obliczony odpiływ podziemny w dniu $(i-1)$, $q_{f(i-1)}$ – obliczony odpiływ powierzchniowy w dniu $(i-1)$, k – parametr filtra cyfrowego, stała recesji (wartości między 0 a 1), α – parametr filtra cyfrowego (wartości między 0 a 1), BFI_{max} – długookresowy stosunek odpiływu podziemnego do całkowitego (wartości między 0 a 1), γ – stała recesji w filtrze Furey’a-Gupty (wartości między 0 a 1), c_1 – stosunek odpiływu powierzchniowego do opadu atmosferycznego w filtrze Furey’a-Gupty, c_3 – stosunek zasilania wód podziemnych do opadu atmosferycznego w filtrze Furey’a-Gupty, d – opóźnienie między opadem a zasilaniem wody podziemnej (d)

$q_{(i)}$ – total flow (observed flow) at day i , $q_{b(i)}$ – calculated baseflow at day i , $q_{f(i)}$ – calculated quick flow/direct run off at day i , $q_{(i-1)}$ – total flow at day $(i-1)$, $q_{b(i-1)}$ – calculated baseflow at day $(i-1)$, $q_{f(i-1)}$ – calculated quick flow/direct run off at day $(i-1)$, k – filter parameter, recession constant (the value between 0 and 1), α – filter parameter (the value between 0 and 1), BFI_{max} – maximum value of long-term ratio of baseflow to total streamflow (the value between 0 and 1), γ – recession constant in the Furey-Gupta filter (the value between 0 and 1), c_1 – overland flow coefficient in the Furey-Gupta filter, c_3 – ground-water recharge coefficient in the Furey-Gupta filter, d – recharge delay time (d)

Valent i Bulík (2016) w swoich badaniach w zlewni rzeki Jalovecký Potok położonej w Tatach Zachodnich ustalili wartości parametrów:

- dla filtru Furey’a-Gupty: $\gamma = 0,05$, $c_1 = 0,1$, $c_3 = 0,25$ i $d = 2$,
- dla filtru Chapmana i Eckhardta: $\alpha = 0,95$ i $BFI_{max} = 0,7$.

W literaturze wskazywana jest również duża czułość filtrów na zmianę parametrów. Nathan i McMahan (1990) podają, że zmiana wartości α o 3% w filtrze Lyne-Hollick’a powodowała zmiany odpiływu podziemnego nawet o +14% i –26%. Z tego względu wskazuje się, że dla uzyskania obiektywnych wartości odpiływu podziemnego nie powinno się przyjmować pojedynczych wartości parametrów (SKM, 2007). Indarto i inni (2016) podają indywidualne wartości parametrów dla rzek wschodniej Jawy i uzyskane na tej podstawie przedziały wartości dla 7 różnych filtrów. Autorzy ci wykazali, że prowadząc obliczenia z wykorzystaniem optymalnych wartości parametrów wziętymi z jednej rzeki uzyskuje się zadawalające wyniki dla rzek położonych blisko siebie, jeśli odznaczają się one podobną charakterystyką opadów a w związku z tym również podobną dynamiką odpiływu.

WYNIKI

Badania przeprowadzono w 11 zlewniach Sudetów (fig. 1). Dla okresu lat hydrologicznych 2001–2015 dane o codziennych przepływach pobrano z serwera IMGW (Dane

publiczne... <https://danepubliczne.imgw.pl/>). Zlewnie charakteryzują się powierzchnią od 48,7 do 186 km², a łączna ich powierzchnia wynosi 1118 km². W badaniach uwzględniono rzeki, których zlewnie w większości położone są na obszarach zbudowanych ze skał krystalicznych, które dominują w Sudetach.

W pierwszej kolejności do przetestowania filtrów cyfrowych wybrano rzekę Kamienną po posterunek w Piechowicach o powierzchni 99 km² (fig. 1). Obszar zlewni cząstkowej leży na terenie Karkonoszy w Sudetach Zachodnich. Zlewnia ma charakter naturalny, a przepływ rzeki nie jest zaburzany przez budowle hydrotechniczne. Pokrycie terenu to przede wszystkim lasy. Do analizy wykorzystano dzienne wartości przepływów z okresu piętnastu lat 2001–2015. Dzielne przepływy Kamienną wahają się od 0,33 do 60,3 m³/s, uzyskując średnią wartość 2,91 m³/s. Średni roczny opad atmosferyczny na obszarze zlewni wynosi około 950 mm.

Do testowania filtrów cyfrowych wykorzystano aplikację internetową SepHydro, która wykonuje separację odpiływu podziemnego za pomocą wielu metod. Narzędzie zapewnia tabelaryczną i graficzną prezentację odpiływu podziemnego, a także reprezentatywne statystyki. SepHydro to narzędzie internetowe opracowane w ramach współpracy badawczej między Canadian Rivers Institute (CRI), University of New Brunswick (UNB), Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) oraz Environment and Climate Change Canada (ECCC).

Parametry dla wybranych filtrów skalibrowano ręcznie. W tym celu wartości parametrów dla każdego algorytmu były wprowadzane metodą prób i błędów, zmieniając je do

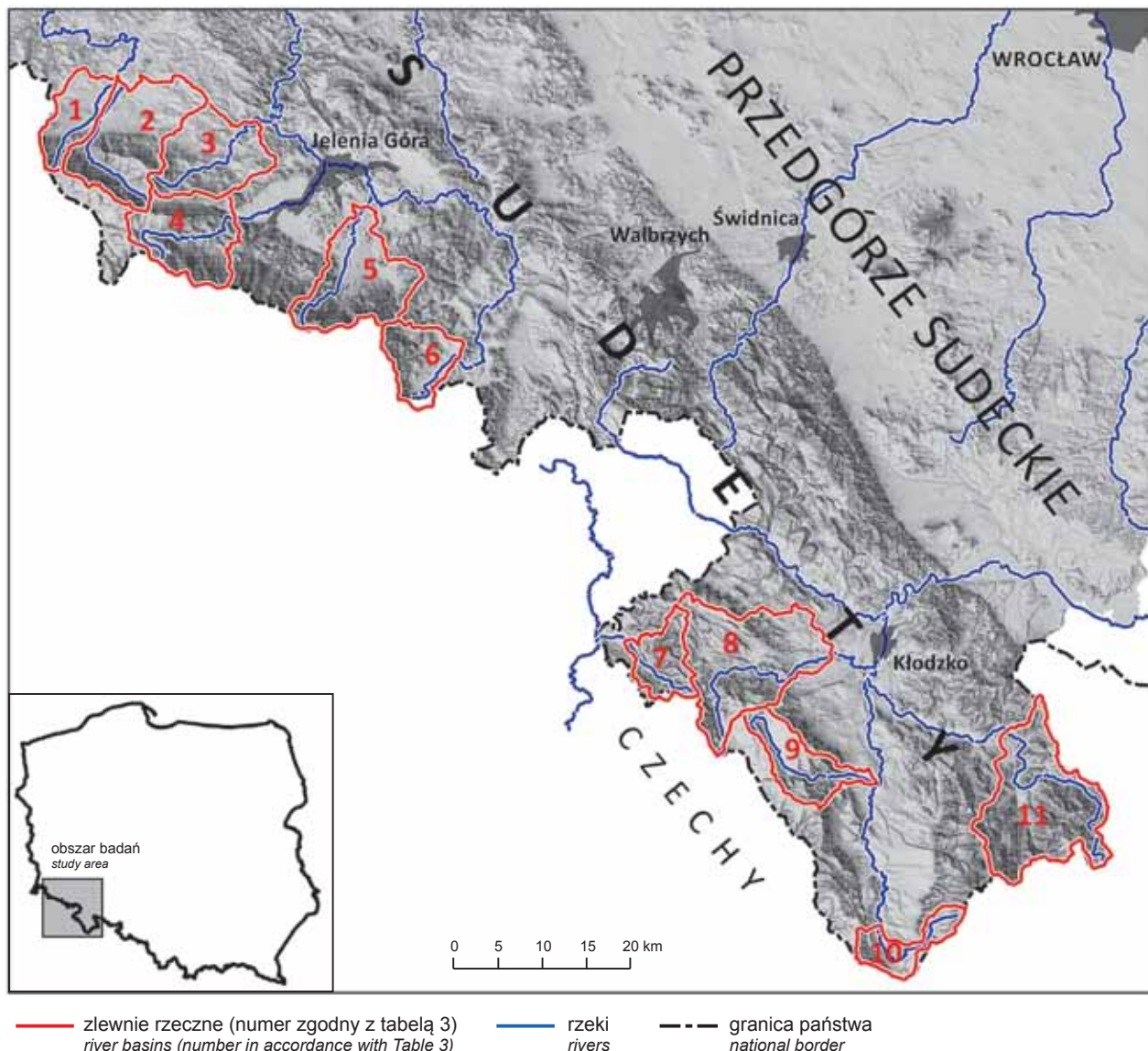


Fig. 1. Lokalizacja zlewni rzecznych na obszarze badań

Location of river basins in the study area

momentu, gdy krzywa obliczonego odpływu podziemnego zbliżona była do obserwowanych wartości przepływu całkowitego podczas okresów niżówkowych (bezopadowych). Przykład najlepszego dopasowania filtrów dla jednego z okresów niskich przepływów przedstawia figura 2. Podczas kalibracji za okresy niżówkowe przyjmowano okresy późno-jesienne i zimowe, gdyż w tym czasie w zasilaniu rzek dominującą, a czasami jedyną rolę odgrywa odpływ podziemny. Optymalne wartości parametrów otrzymanych w wyniku kalibracji dla każdej metody przedstawiono w tabeli 2. Analizując figurę 2, zauważyć można, że w przypadku trzech filtrów nawet przy wielokrotnej zmianie parametrów nie udało się osiągnąć pokrywania się odpływu rzeczno z obliczonymi wartościami odpływu podziemnego w okresach niżówkowych. Z tego względu do dalszej analizy wybrano dwa filtry, Lyne'a i Hollicka oraz Furey'a i Gupty,

które najlepiej odzwierciedlały zmiany odpływu o okresach niżówkowych, a więc stan naturalny w zlewni górskiej.

W kolejnej fazie pracy na podstawie wykalibrowanych parametrów dla dwóch wybranych filtrów wyznaczono odpływ podziemny dla pozostałych rzek uwzględnionych w badaniach. Otrzymane wyniki odpływów podziemnych i obliczone na tej podstawie współczynniki odpływu podziemnego zostały zestawione z analogicznymi wartościami obliczonymi przy wykorzystaniu metody Wundta. Wyniki zawiera tabela 3.

Obliczony odpływ podziemny z wykorzystaniem filtrów cyfrowych stanowi 48,8–68,3% (filtr Lyne-Hollick) i 54,4–72,5% (filtr Furey-Gupta) odpływu całkowitego. Przeciętne wartości współczynnika odpływu podziemnego wynoszą odpowiednio 60,1 i 65,1%. Filtr Furey'a-Gupty dał w poszczególnych zlewniach oszacowanie współczyn-

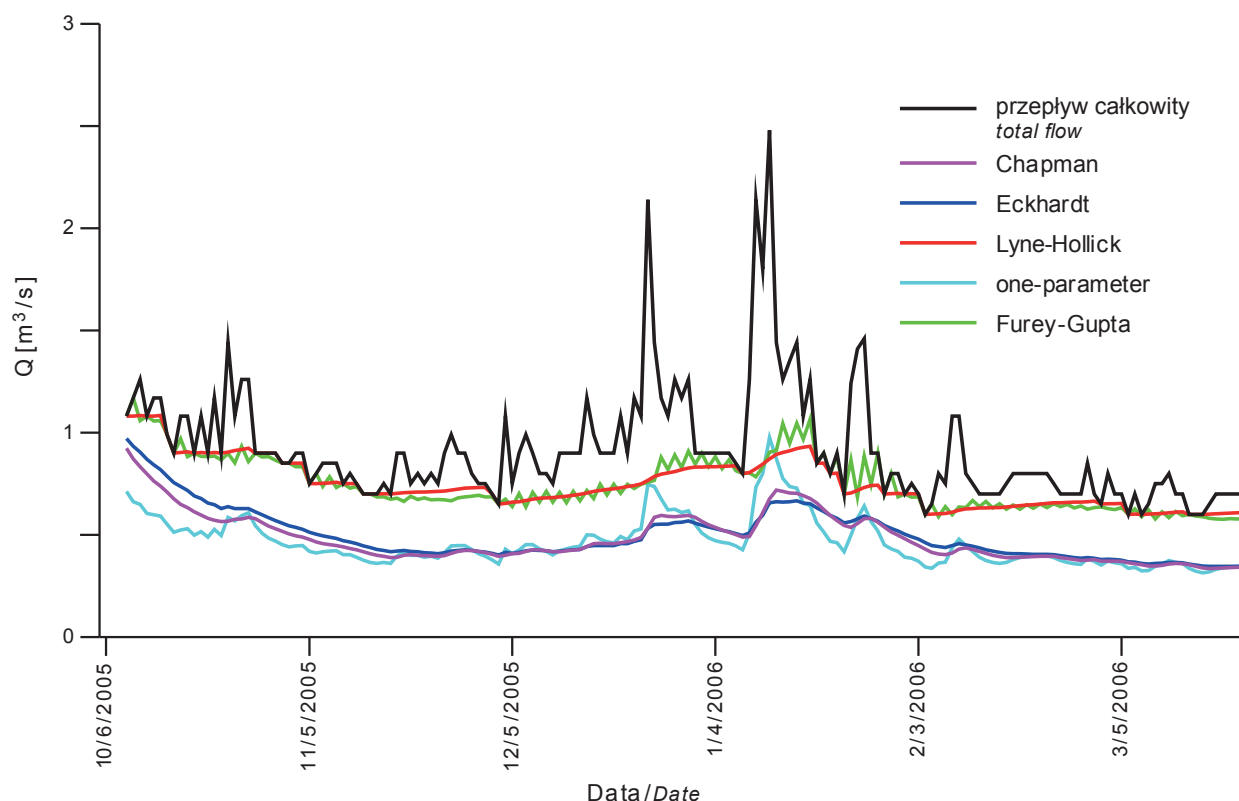


Fig. 2. Przykładowe wydzielenie odpływu podziemnego filtrami cyfrowymi w okresie niskich stanów dla zlewni Kamiennej posterunek Piechowice

Exemplary separation of groundwater runoff using digital filters during a low river-flow period for the Kamienna River catchment, Piechowice gauging station

nika odpływu podziemnego o 1,9–6,9% wyższe w stosunku do filtru Lyne’a-Hollicka. Otrzymane wartości odpływu podziemnego i współczynnika odpływu podziemnego przy wykorzystaniu filtrów cyfrowych są o kilkanaście procent wyższe w stosunku do wartości uzyskanych metodą Wundta. Średnia wartość współczynnika zasilania podziemnego przy ocenie odpływu podziemnego metodą Wundta wynosi 48,3%.

Biorąc pod uwagę, że procentowa różnica odpływu podziemnego pomiędzy wartością uzyskaną metodą Wund-

ta i z filtrów cyfrowych jest podobna w poszczególnych zlewniach to należy przyjąć, że zastosowana metodyka właściwie odzwierciedla warunki formowania się wód podziemnych na analizowanym obszarze. Z tego względu możliwe jest wyznaczanie odpływu podziemnego na większym obszarze w szeregu profilach pomiarowych przy wykorzystaniu zoptymalizowanych wartości parametrów filtrów cyfrowych ustalonych dla danego terenu charakteryzującego się zbliżonymi warunkami hydro-meteorologicznymi.

Tabela 2

Optymalne parametry filtrów cyfrowych dla rzeki Kamiennej
Optimal parameters of digital filters for the Kamienna River

Nazwa filtru	Parametry	Odpływu podziemny Q_g [m³/s]	Współczynnik odpływu podziemnego – BFI [%]
Chapman	$\alpha = 0,925$	1,44	49,3
Eckhardt	$\alpha = 0,95$; BFI _{max} = 0,5	1,43	49,0
Lyne i Hollick	$\alpha = 0,98$	1,63	56,0
One-parameter	$k = 0,75$	1,46	50,0
Furey-Gupta	$\gamma = 0,02$; $c_3/c_1 = 5$; $d = 1$	1,80	61,5

Tabela 3

Porównanie odpływu podziemnego i współczynnika odpływu podziemnego dla zlewni sudeckich z wykorzystaniem filtrów cyfrowych i metody Wundta

Comparison of groundwater runoff and the groundwater runoff coefficient for the river basins (Sudety Mts) with the use of digital filters and the Wundt method

Nr	Rzeka	Profil	Q	Lyne-Hollick		Furey-Gupta		Wundt	
				Q_g	BFI	Q_g	BFI	Q_g	BFI
1	Czarny Potok	Mirsk	0,90	0,44	48,8	0,49	54,4	0,31	34,9
2	Kwisa	Mirsk	3,03	1,54	50,8	1,73	57,1	1,12	37,1
3	Kamienica	Barcinek	1,23	0,67	54,8	0,74	60,0	0,50	40,4
4	Kamienna	Piechowice	2,92	1,63	56,0	1,80	61,5	1,24	42,3
5	Łomnica	Łomnica	2,00	1,26	63,2	1,36	68,3	1,04	52,1
6	Bóbr	Bukówka	0,82	0,56	68,0	0,25	69,9	0,50	61,0
7	Klikawa	Kudowa-Zdrój	0,54	0,32	58,7	0,36	65,6	0,25	46,6
8	Bystrzyca Dusznicka	Szalejów	2,04	1,37	67,3	1,44	70,5	1,16	56,7
9	Bystrzyca	Bystrzyca Kłodzka	0,92	0,63	68,2	0,67	72,1	0,54	58,9
10	Nysa Kłodzka	Międzylesie	0,74	0,42	57,1	0,47	63,9	0,32	43,1
11	Biała Łądecka	Łądek-Zdrój	3,24	2,21	68,3	2,25	72,5	1,89	58,5

Q – odpływ całkowity [m^3/s], Q_g – odpływ podziemny [m^3/s], BFI – współczynnik odpływu podziemnego [%]

Q – total flow [m^3/s], Q_g – base flow [m^3/s], BFI – base flow index [%]

Uzyskane wartości współczynnika zasilania podziemnego dla zlewni sudeckich przy wykorzystaniu filtrów cyfrowych są wyższe niż powszechnie podawane dotąd w literaturze (m.in. Kryza i in., 1989). Jednak na wyższe odpływy podziemne w stosunku do odpływów całkowitych, powyżej 60% w zlewniach położonych na obszarach krystalicznych Sudetów na przykładzie badań na Ziemi Kłodzkiej wskazywał już w swoich badaniach Olichwer (2007). Z tego względu niezmiernie istotne jest podjęcie szczegółowych badań odpływu podziemnego z wykorzystaniem nowoczesnych technik rejestracji parametrów ilościowych i jakościowych odpływu w celu szczegółowej analizy formowania się zasobów wód podziemnych na obszarze Sudetów.

WNIOSKI

1. Dla 11 rzek z obszaru Sudetów położonych w przeważającej części na obszarze występowania skał krystalicznych największą zgodność przepływów całkowitych z odpływem podziemnym wyznaczonym przy wykorzystaniu filtrów cyfrowych, w okresach niskich stanów, uzyskano dla filtru Lyne'a-Hollicka i Furey'a-Gupty. Stąd filtry te wydają się być najbardziej optymalne w analizie odpływu podziemnego w Sudetach, gdzie skały krystaliczne zajmują około 50% ich powierzchni.

2. Przeprowadzona analiza odpływu podziemnego dla szeregu zlewni przy wykorzystaniu parametrów wejścio-

wych do filtrów cyfrowych uzyskanych w wyniku kalibracji dla jednej zlewni wykazała, że możliwe jest wyznaczenie odpływu podziemnego na całym obszarze Sudetów filtrami cyfrowymi, w szeregu profilach pomiarowych, przy zastosowaniu optymalnych wartości parametrów ustalonych w wyniku ich kalibracji na mniejszym obszarze.

3. Przeciętna wartość współczynnika zasilania podziemnego dla zlewni sudeckich, położonych na obszarze występowania skał krystalicznych, obliczona na podstawie oszacowania odpływu podziemnego filtrami cyfrowymi wynosi 60–65%.

4. Wartości współczynnika zasilania podziemnego uzyskane przy wykorzystaniu do oceny średniego rocznego odpływu podziemnego filtrów cyfrowych są o kilkanaście procent wyższe niż przy zastosowaniu metody Wundta.

LITERATURA

- BOUGHTON W.C., 1993 – A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. *Institute of Engineers Australia National Conference. Publ.*, **93**, 14: 317–324.
- BOUGHTON W.C., 1987 – Hydrograph analysis as a basis of water balance modelling. The Institution of Engineers, Australia. *Civil Engineering Transaction CE*, **29**, 1: 8–33.
- BOUSSINESQ J., 1904 – Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol. *J. Mathématiques Pures Appliquées*, **10**: 5–78.
- CHAPMAN T., 1991 – Comment on evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, by RJ Nathan and TA McMahon. *Water Resources Research*, **27**, 7: 1783–1784.

- CHAPMAN T.G., MAXWELL A.I., 1996 – Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. *W: Hydrol. and Water Resour. Symp.*: 539–545. Institution of Engineers Australia, Hobart.
- CSIRO, SKM, 2010 – Baseflow assessment for the Murray-Darling Basin. Water for a Healthy Country National Research Flagship, CSIRO.
- DANE publiczne IMGW-PIB. Internet: <https://danepubliczne.imgw.pl/> (dostęp: lipiec 2019).
- ECKHARDT K., 2005 – How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process.*, **19**: 507–515.
- FUREY P.R., GUPTA V.K., 2001 – A physically based filter for separating base flow from streamflow time series. *Water Resour. Res.*, **27**, 11: 2709–2722.
- GONZALES A.L., NONNER J., HEIJKERS J., UHLENBROOK S., 2009 – Comparison of different baseflow separation methods in a lowland Catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **13**: 2055–2068.
- HORTON R.E., 1933 – The role of infiltration in the hydrological cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, **14**: 446–460.
- HYDROGRAPH Separation Program. Internet: <https://water.usgs.gov/software/HYSEP/> (dostęp: lipiec 2019).
- HYDROFFICE – Software for hydrology, meteorology, geoscience & data science. Internet: <http://hydrooffice.org> (dostęp: lipiec 2019).
- INDARTO I., NOVITA E., WAHYUNINGSIH S., 2016 – Preliminary Study on Baseflow Separation at Watersheds in East Java Regions. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, **9**: 538–550.
- KILLE K., 1970 – Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. *Z. dt. geol. Ges., Hydrogeol. Beitr.*, **1**: 89–95.
- KOUANDA B., COULIBALY P., NIANG D., FOWE T., KARAMBIRI H., 2018 – Analysis of the Performance of Base Flow Separation Methods Using Chemistry and Statistics in Sudano-Sahelian Watershed, Burkina Faso. *Hydrol. Current Res.*, **9**: 300.
- KRYZA H., KRYZA J., LIMISIEWICZ P., 1989 – Zmienność odpływów niskich obszaru sudeckiego i jej przyczyny. *Pr. Nauk. Instyt. Geotech.*, **58**, 29: 69–74.
- LONGOBARDI A., VILLANI P., GUIDA D., CUOMO A., 2018 – Regression approaches for hydrograph separation: Implications for the use of discontinuous electrical conductivity data. *Water. Vol.*, **10**, 9: 1235–1249.
- LYNE V., HOLLICK M., 1979 – Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Institute of Engineers Australia National Conference. Publ.*, **79**, 10: 89–93.
- MAILLET E., 1905 – Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Sci., A. Hermann, Paris.
- NATHAN R.J., MCMAHON T.A., 1990 – Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis. *Water Resour. Res.*, **26**, 7: 1465–1473.
- OLICHWER T., 2007 – Zasoby wód podziemnych Ziemi Kłodzkiej. *Acta Univ. Wratisl.*, **3022**.
- PETTYJOHN W.A., HENNING R., 1979 – Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report, **552**.
- SEPHYDRO – hydrograph separation tool. Internet: <http://canadianriversinstitute.com/tool/pageMain.php> (dostęp: lipiec 2019).
- SHIRMOHAMMADI A., KNISEL W.G., SHERIDAN J.M., 1984 – An approximate method for partitioning daily streamflow data. *J. Hydrol.*, **74**, 3/4: 335–354.
- SLOTO R.A., 1991 – A computer method for estimating ground-water contribution to streamflow using hydrograph-separation techniques. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 90-4162: 101–110.
- SKM, 2007 – Using baseflow for monitoring stream condition and groundwater and surface water resource condition change. Task 2 Milestone Report. Final, June 2007.
- TAN S.B.K., LO E.Y., SHUY E.B., CHUA L.H.C., LIM, W.H., 2009 – Hydrograph separation and development of empirical relationships using single parameter digital filters. *J. Hydrol. Eng.*, **14**, 3: 271–279.
- TARKA R., 2002 – Konwencjonalne a numeryczne metody oceny odpływu podziemnego rzek. Część I. Metody badań. *Gosp. Wod.*, **4**: 156–160.
- WUNDT W., 1953 – Gewässerkunde. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg.
- VALENT P., BULÍK M., 2016 – The selection of an appropriate baseflow separation method: a case study from Jalorecký Creek. *W: HydroCarpath 2016. Catchment Processes in Regional Hydrology: From Plot to Regional Scales – Monitoring Catchment Processes and Hydrological Modelling: abstracts of the conference: 24. Vienna/Bratislava/Sopron, 27.10.2016. 1st ed. Sopron. University of West Hungary Press.*

SUMMARY

Traditional methods widely used in the study of groundwater resources include hydrological methods based on characteristic low flows and the methods based on graphical separation of groundwater runoff from a hydrograph. A number of numerical algorithms have been introduced since the 1980s, allowing automatic separation of the groundwater runoff from the hydrograph. Schemes used in numerical methods are based on digital, graphical separation of groundwater runoff, and on digital filters. The aim of the article is to present the most commonly used digital filters that allow both separating the groundwater runoff from the hydrograph and verifying the possibility of their use for rivers from crystalline areas of the Sudetes. To separate the groundwater runoff in the river basins from the

Sudetes, five most popular filters were selected (Chapman, Eckhardt, Lyne and Hollick, One-parameter, Furey-Gupta). The research was carried out in 11 river catchments of the Sudetes in the period of 2001–2015, based on daily flows. The study includes rivers whose basins are located mostly in areas composed of crystalline rocks that dominate the Sudety Mountains. First, to test the digital filters, the Kamienna River was chosen for a gauging station in Piechowice. The SepHydro web application was used to test digital filters. The parameters for the selected filters were calibrated manually. Two filters were selected for further analysis, Lyne and Hollick as well as Furey and Gupta, which best reflected changes in the runoff during low-flow periods. In the next phase of work, based on calibrated parameters for two se-

lected filters, the groundwater runoff was determined for the remaining study rivers. For the Sudetic rivers, the highest convergence of total flows and groundwater runoff in low-flow periods was obtained for the Lyne-Hollick and Furey-Gupta filters. Therefore, they are the most optimal in application for the Sudetes. The average value of the groundwater recharge coefficient for the Sudetic river catchments located

in the area of occurrence of crystalline rocks, calculated on the basis of the estimation of groundwater runoff with digital filters, was 60–65%. The values of groundwater runoff and the groundwater recharge coefficient obtained with the use of digital filters are a dozen or so percent higher than those from the Wundt method.