

BILANS WODNY ZLEWNI STRUGI TORUŃSKIEJ W LATACH 1994–2012 NA PODSTAWIE MODELU SWAT Z WYKORZYSTANIEM METOD GIS

Tomasz Strzyżewski, Marek Kejna

Strzyżewski T., Kejna M., 2014: Bilans wodny zlewni Strugi Toruńskiej w latach 1994–2012 na podstawie modelu SWAT z wykorzystaniem metod GIS (*Water balance of Struga Toruńska basin in the years 1994–2012 based on SWAT model using GIS methods*), *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, Vol. 15, s. 41-50.

Zarys treści: W niniejszym artykule przeanalizowano zmienność bilansu wodnego na terenie niewielkiej zlewni rolniczej Strugi Toruńskiej w latach 1994–2012. Na podstawie danych meteorologicznych ze Stacji ZMŚP w Koniczynie oraz numerycznego modelu terenu i danych o pokrywie glebowej i użytkowaniu terenu obliczono zróżnicowanie przestrzenne ewapotranspiracji rzeczywistej, perkolacji, odpływu powierzchniowego i bilansu wodnego. W obliczeniach wykorzystano model SWAT2009 (*Soil and Water Assessment Tool*). Jego walidację przeprowadzono na podstawie pomiarów przepływów w Strudze Toruńskiej. Poszczególne składowe i bilans wodny wykazały znaczną zmienność z roku na rok uwarunkowaną czynnikami meteorologicznymi.

Słowa kluczowe: bilans wodny, model SWAT, Struga Toruńska, Koniczynka.

Key words: *water balance, SWAT model, Struga Toruńska, Koniczynka.*

Tomasz Strzyżewski, Marek Kejna, Katedra Meteorologii i Klimatologii, Wydział Nauk o Ziemi UMK, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń, tstrzyzewski@wp.pl; marek.kejna@umk.pl

1. Wprowadzenie

W Polsce występują niewielkie zasoby wody, sięgające ok. 62 km³ w postaci wód powierzchniowych oraz ok. 16 km³ z wód podziemnych (Review... 2003; Holtoś 2008; Water... 2009; The State... 2011). Przy znacznej zmienności warunków klimatycznych, zwłaszcza sum opadów atmosferycznych, pojawiają się okresowe niedobory wody. Największe sumy opadów atmosferycznych w ciągu roku występują w sezonie letnim, w okresie o największej ewapotranspiracji (Jokiel 2008). Niedobory wody wykazują znaczne zróżnicowanie w skali lokalnej, ponieważ są uzależnione nie tylko od opadów atmosferycznych, ale także od parametrów środowiska danej zlewni, intensywności parowania terenowego, perkolacji, spływu powierzchniowego,

możliwości retencji wody. Złożone zależności hydrologiczne wymagają zastosowania nowoczesnych technik opartych na badaniach modelowych (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski 2007).

Celem niniejszego opracowania jest wykazanie zróżnicowania przestrzennego poszczególnych składowych bilansu wodnego (BW) na obszarze niewielkiej zlewni rolniczej – Strugi Toruńskiej – w warunkach znacznej zmienności czynników klimatycznych w latach 1994–2012.

2. Obszar badań

Struga Toruńska (ST) jest rzeką II rzędu, wypływającą z jeziora Wielkądź i uchodzącą do Wisły na obszarze miasta Torunia. Jej długość wynosi 51,3 km.

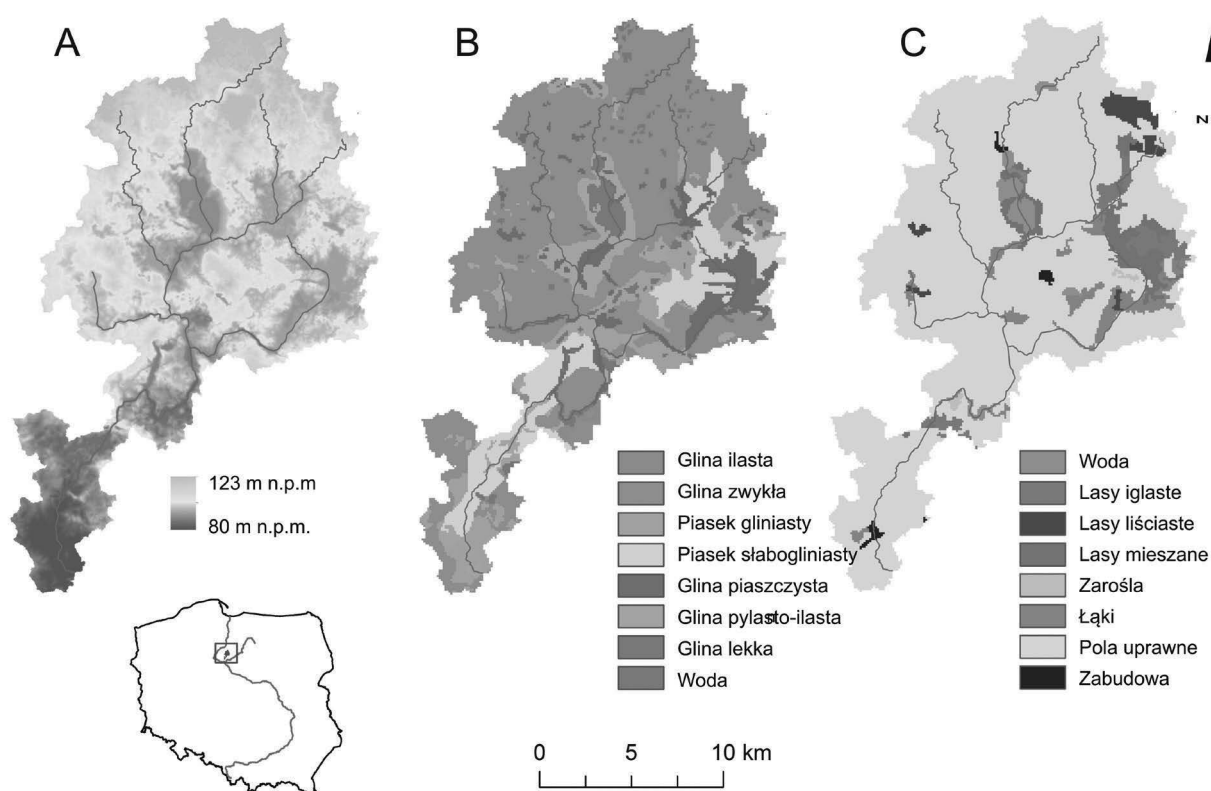
Powierzchnia zlewni ST wynosi 371 km² i obejmuje płaską, miejscami falistą, wysoczyznę morenową zlodowacenia bałtyckiego fazy poznańskiej. Jest to obszar silnie zróżnicowany pod względem budowy geologicznej z przewagą gliny morenowej o zmiennej miąższości od 3 do 27 m. ST w dolnym odcinku płynie po wąskim sandrze zbudowanym z piasków i żwirów wodnolodowcowych o małej miąższości oraz utworów zastoiszkowych i organicznych. W ujściowym odcinku płynie po terasach doliny Wisły, zbudowanych z piasków fluwialnych. Na terenie zlewni ST znajduje się 19 jezior o powierzchni >1 ha, o łącznej powierzchni 11,87 km². Gleby zlewni ST należą do typu gleb bielcowych, płowych i brunatnych pochodzenia plejstoceńskiego. Na formowanie się gleb w obrębie doliny rzecznej wpływ wywarły procesy bagienne, aluwialne procesy mułowo-błotne i mułowo-torfowe. Obszar zlewni ST jest intensywnie użytkowany rolniczo, grunty orne stanowią 71,6%, użytki zielone 8,5%. Lasy w postaci dwóch kompleksów zajmują 11,8 km² (lesistość 3,4%) – Celmer i in. (1996).

Badaniami objęto górną i środkową część zlewni Strugi Toruńskiej, do wodowskazu w Koniczynie. Dolną część zlewni, leżącą w znacznej części w obszarze miasta Torunia, pominięto ze względu na trudne do oszacowania antropogeniczne zaburzenia obiegu wody.

Tak wydzielona zlewnia o powierzchni 290 km² charakteryzuje się niewielkimi deniwelacjami od 80 do 123 m n.p.m. Najwyższe wzniesienia w północnej jej części mają pochodzenie polodowcowe subfazy krajeńsko-wąbrzeskiej ostatniego zlodowacenia (Niewiarowski 1996).

Według bazy FAO na obszarze zlewni ST dominują w pokryciu glebowym utwory gliniaste i gliniasto-piaszczyste, a w dolnej jej części również piaszczyste. Jest to obszar rolniczy, według Corine Land Cover z 2006 r. w pokryciu terenu dominują pola uprawne, a niewielkie kompleksy leśne występują we wschodniej części zlewni. Obszary trawiaste (łąki) występują zwłaszcza wokół jeziora Wieczno oraz wzdłuż ST.

Na terenie zlewni ST występują skomplikowane stosunki hydrologiczne, spowodowane przede wszystkim intensywną działalnością rolniczą. Poprowadzono tu sieć drenów, których gęstość sięga 67–80 km/km² oraz liczne rowy melioracyjne znacznie modyfikując naturalny rytm hydrologiczny w zlewni (Celmer, Marciniak 1996). Wszystkie te czynniki komplikują analizy związane z obiegiem wody, stąd też nieodzowne staje się wykorzystanie nowoczesnych analiz komputerowych przy obliczeniach bilansu wodnego oraz określeniu zasobów wodnych występujących na terenie zlewni ST.



Ryc. 1. Ukształtowanie terenu (A), pokrycie glebowe (B) i pokrycie terenu (C) zlewni Strugi Toruńskiej
 Fig. 1. Struga Toruńska basin: A – hipsometry, B – surface features, C – land use

3. Metodyka opracowania i dane źródłowe

Badania bilansu wody na obszarze zlewni ST przeprowadzono w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska. Program ten jest realizowany od 1993 r. i obejmuje monitoring ponad 100 abiotycznych i biotycznych parametrów stanu środowiska w ramach 11 podprogramów pomiarowych.

Składowe bilansu wodnego zlewni ST obliczono za pomocą modelu SWAT2009 (*Soil and Water Assessment Tool*), opracowanego przez Soil and Water Research Laboratory w Temple w Teksasie (USA). Model SWAT służy do przewidywania zmian w bilansie wodnym, stopniu erozji, zanieczyszczenia azotem i fosforem czy metalami ciężkimi. Jest to model fizyczny, dzięki czemu można wykonywać obliczenia o zadanym kroku czasowym. Model SWAT był wykorzystywany w wielu badaniach na świecie (Arnold i in. 2012). W Polsce użyto go w badaniach hydrograficznych realizowanych m.in. przez Pniewskiego i Okruszkę (2009), Miatkowskiego (2011), Orlińską i in. (2012).

W niniejszych badaniach wybrano wersję pracującą w MapWindow 4.1, która jest oprogramowaniem Open Source typu GIS. Kalibrację modelu przeprowadzono za pomocą osobnej aplikacji SWAT-CUP i trybu SUFI-2.

Do wykonania obliczeń składowych bilansu wodnego zlewni ST wykorzystano dwa rodzaje danych: podstawowe (bazowe) charakteryzujące zlewnię oraz dane meteorologiczne. Dane podstawowe stanowił cyfrowy model terenu (DEM) o rozdzielczości 15 m uzyskany z interferometrii radarowej (program ASTER) (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>), pokrycie terenu zaczerpnięto z Corine Land Cover 2006 (<http://www.eea.europa.eu>). Ważnym czynnikiem w procesach modelowania jest pokrycie glebowe obszaru zlewni. Dane te pochodzą z bazy FAO (<http://www.fao.org/nr/land/sols/en/>), zawierają one informacje na temat fizycznych parametrów gleb. Wszystkie powyższe dane zostały zaimplementowane w formacie rastrowym. Poza nimi wykorzystany został również plik wektorowy z ciekami wodnymi oraz akwenami wodnymi stworzony na podstawie mapy topograficznej w skali 1: 10 000.

W analizie wykorzystano również dane meteorologiczne ze Stacji Bazowej ZMŚP w Koniczynie k. Torunia, są to: średnia, minimalna i maksymalna dobową temperatura powietrza, suma dobową opadów atmosferycznych oraz średnia dobową prędkość wiatru. Pomiarów meteorologicznych w Koniczynie rozpoczęto już w latach 50. XX wieku. W niniejszym opracowaniu wykorzystano dane z lat 1994–2012. Początkowo dane pochodziły ze stacji automatycznej ASM9303, a od

2000 roku ze stacji automatycznej Milos 500 (Kejna i in. 2004). Opady atmosferyczne mierzone były codziennie za pomocą deszczomierza Hellmanna umieszczonego na wysokości 1 m. W niniejszej pracy wykorzystano opad nieskorygowany.

W modelu SWAT dokonuje się podziału zlewni na quasi-jednorodne pola (HRU – jednorodnie powierzchnie hydrologiczne), które charakteryzują się podobnymi właściwościami fizycznymi. Podział na subzlewnie dokonywany jest na podstawie rodzaju gleb, klas pokrycia terenu oraz nachylenia terenu. Wartość progową powierzchni inicjacji spływu korytowego ustalono na 6000 m², co wynika ze stosunkowo mało urozmaiconej rzeźby terenu. Liczbę przedziałów nachyleń stoków starano się maksymalnie zróżnicować. Klasy nachyleń ustalono na: do 0,5°; 1°; 2° i powyżej. Ostateczna liczba wyróżnionych subzlewni na podstawie jednorodnych powierzchni hydrologicznych wyniosła 155.

W obliczeniach bilansu wodnego uwzględniono następujące parametry: opad atmosferyczny, parowanie rzeczywiste, spływ powierzchniowy oraz przesiąkanie. Parametry te obliczono dla lat hydrologicznych 1994–2012. Do obliczania ewapotranspiracji potencjalnej (EP) użyto metody kombinowanej Penmanna (1956) według wzoru:

$$EP = \frac{\Delta / \gamma (Rn + G) + E_a}{\Delta / \gamma + 1}$$

gdzie:

Rn – promieniowanie netto (Wm⁻²),

G – ciepło odprowadzone do gleby (Wm⁻²),

E_a – zdolność ewaporacyjna powietrza (Wm⁻²),

Δ – nachylenie krzywej opisującej ciśnienie nasyconej pary wodnej jako funkcję temperatury (hPa K⁻¹),

γ – stała psychrometryczna równa 0,655 hPa K⁻¹.

Na podstawie EP obliczano ewapotranspirację rzeczywistą (ER), dla której program SWAT uwzględnił nachylenie terenu, ekspozycję oraz etapy wegetacji.

Bilans wodny (BW) zlewni cząstkowych obliczono na podstawie wzoru:

$$BW = BW_0 + \sum_{i=t}^t (R_m - Q_{surf} - ER_m - P_m)$$

gdzie:

BW – bilans wodny,

BW₀ – początkowa zawartość wody w glebie,

R_m – wielkość opadu atmosferycznego w miesiącu

Q_{surf} – wielkość spływu powierzchniowego w miesiącu,

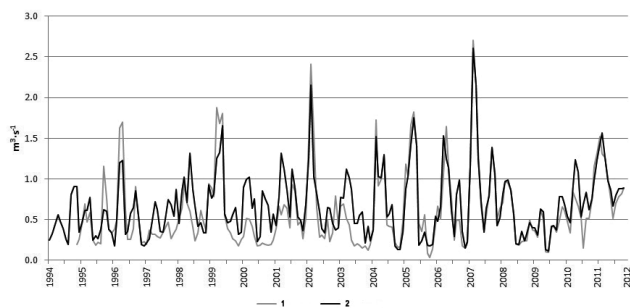
ER_m – wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej w miesiącu,

P_m – wielkość przesiąkania przez grunt w danym miesiącu.

Do kalibracji modelu SWAT wykorzystano dane symulowanego oraz zmierzonego przepływu Strugi Toruńskiej w profilu Koniczynka. W tym celu użyto oprogramowania SWAT-CUP. Z kilku metod autokalibracji wybrano SUFI-2. Jest to metoda oszczędnej techniki próbkowania (*Latin Hypercube Sampling*). Identyczną metodę wykorzystano w kalibracji modelu zlewni rzeki Redy (Orlińska i in. 2012). Po autokalibracji uzyskano współczynnik determinacji R^2 na poziomie 0,72, co według klasyfikacji Sarma i in. (1973) ocenia model jako bardzo dobry, a współczynnik zbieżności T-Czuprowa jako zadowalający.

Z przeprowadzonej ewaluacji wynika, że model SWAT dla zlewni Strugi Toruńskiej ma tendencje do niedoszacowania przepływów związanych z wiosennymi roztopami oraz przeszacowania przepływów w okresie letnim podczas opadów nawalnych (rys. 2). Wielkość niedoszacowania sięga ok. 15–20% przepływów związanych z wiosennymi roztopami i jest nawet mniejsza w porównaniu z wynikami uzyskanymi przez Pniewskiego i Okruszko (2009), którzy w swoim modelu zlewni Narwi oszacowali tę wartość na 20–60%. Natomiast przeszacowanie związane z opadami nawalnymi jest większe i wynosi 40–55%, wynika to z lokalnego charakteru opadów burzowych.

Ocena jakości modelu jest zadowalająca, szczególnie przy uwzględnieniu jakości danych podstawowych. Możliwe jest zwiększenie precyzji modelu poprzez użycie wyższej rozdzielczości danych wysokościowych terenu oraz pokrycia terenu. Szczególnie model wysokościowy wydaje się istotny ze względu na charakter zlewni Strugi Toruńskiej. Stosunkowo płaski obszar jest wrażliwy na nawet niewielkie błędy odwzorowania



Ryc. 2. Porównanie przebiegu przepływu wody w Strudze Toruńskiej w latach 1994–2011 na podstawie pomiarów i symulacji wg modelu SWAT

Fig. 2. Comparison of the measurement and simulated value of flow at Struga Toruńska river in the years 1994–2011

Objaśnienia: 1 – przepływ zmierzony, 2 – przepływ wg symulacji

Legend: 1 – measurement value of flow, 2 – simulated value of flow

powierzchni terenu, dodatkowo liczne antropogeniczne modyfikacje rzeźby wpływają na układ hydrologiczny zlewni. Należy wspomnieć tu o sieci drenarskiej, które w obliczu przeprowadzonych badań wydają się istotnym elementem bilansu wodnego zlewni.

4. Wyniki

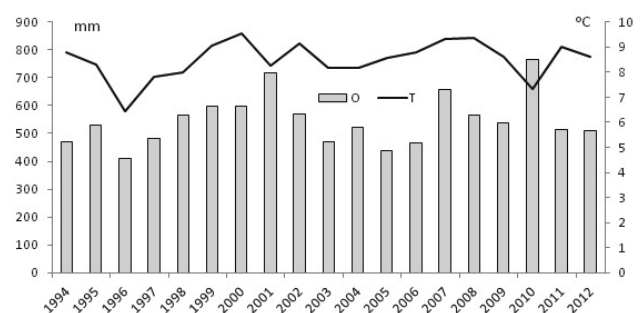
4.1. Warunki meteorologiczne w latach 1994–2012

Warunki meteorologiczne w Koniczynie charakteryzowały się z roku na rok znaczną zmiennością. W latach 1994–2012 średnia roczna temperatura powietrza wyniosła 8,5°C i zmieniała się od 6,5°C w 1996 r. do 9,6°C w 2000 r. (tab. 1, ryc. 3). W przebiegu rocznym najwyższa średnia temperatura powietrza wystąpiła w lipcu (19,1°C), a najniższa w styczniu (-1,6°C). Absolutny zakres temperatury powietrza sięgał 65°C, od 28,3°C do 36,9°C. Stopień zachmurzenia był duży (7,2 w skali 0–10), zwłaszcza w miesiącach jesienno-zimowych. Średnia roczna wielkość usłonecznienia wyniosła 1609,2 godzin. Wilgotność względna powietrza wyniosła 78,4%, z najniższymi wartościami w ciepłej połowie roku (maj 68%, kwiecień 69% i sierpień 70%). Średnia roczna suma opadów atmosferycznych wyniosła 546,6 mm z przewagą w ciepłej połowie roku (lipiec 95,4 mm). Największe sumy roczne opadów wystąpiły w 2001 r. (762,0 mm), a najmniejsze w 1996 r. (405,0 mm).

Pokrywa śnieżna utrzymywała się przeciętnie przez 27 dni w roku, od października do kwietnia. Jej maksymalna miąższość osiągnęła 40 cm w lutym 2010 r. Średnia prędkość wiatru była niewielka i wyniosła 3,3 m·s⁻¹.

4.2. Ewapotranspiracja rzeczywista

Wielkość parowania rzeczywistego z powierzchni terenu zależy przede wszystkim od czynników meteorolo-



Ryc. 3. Przebieg temperatury powietrza (T) i opadów atmosferycznych (O) w Koniczynie w latach 1994–2012

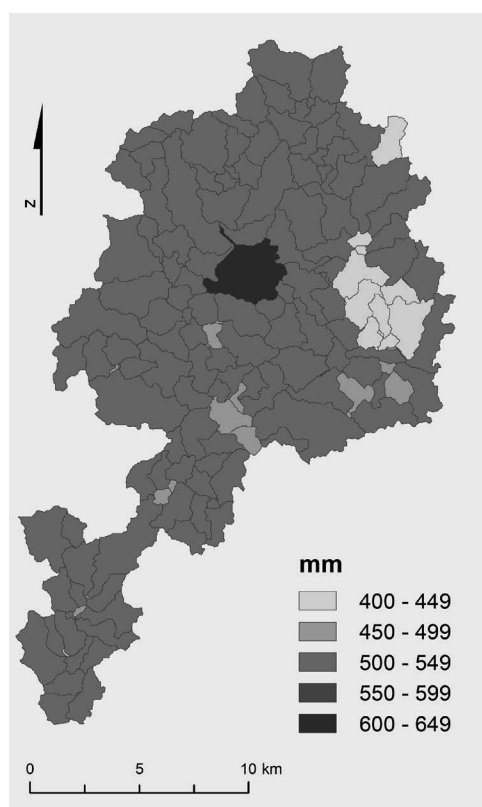
Fig. 3. Course of air temperature (T) and precipitation (O) in Koniczynka in the years 1994–2012

Tab. 1. Średnie miesięczne wartości elementów meteorologicznych w Koniczynce w latach 1994–2012
 Tab. 1. Mean monthly values of meteorological elements at Koniczynka in the years 1994–2012

Miesiące Months	Zachmurzenie Cloudiness (0–10)*	Usłonecznienie (godz.) Sunshine duration (hours)#	Temperatura powietrza Air temperature (°C)			Wilgotność powietrza Air humidity (%)	Opady atmosf. Precipitation (mm)	Pokrywa śnieżna Snow cover		Prędkość wiatru Wind velocity (m•s ⁻¹)
			Max	Średnia Mean	Min			Dni Days	Max (cm)	
I	8,1	30,9	12,0	-1,6	-28,3	87,6	32,2	8,3	38	3,9
II	7,6	59,1	13,0	-0,8	-23,0	84,7	27,1	6,8	40	4,0
III	7,0	128,0	20,9	2,7	-19,9	80,1	30,5	3,0	18	4,0
IV	7,0	189,0	31,8	8,7	-8,0	69,2	30,3	0,1	3	3,5
V	6,2	234,1	30,9	13,6	-3,6	67,7	56,4	.	.	3,2
VI	6,8	221,3	34,4	16,6	4,0	71,2	51,0	.	.	3,0
VII	6,5	213,0	36,9	19,1	4,6	71,5	95,4	.	.	2,8
VIII	6,3	215,3	35,6	18,5	6,2	70,1	68,0	.	.	2,8
IX	7,1	163,1	31,5	13,8	0,0	76,8	49,6	.	.	2,9
X	7,2	95,0	24,1	8,5	-6,1	82,0	33,7	0,1	1	3,1
XI	8,1	38,0	16,9	3,6	-17,6	88,1	35,4	2,0	9	3,3
XII	8,2	22,4	12,5	-0,7	-20,5	88,7	36,9	6,9	35	3,6
I-XII	7,2	1609,2	36,9	8,5	-28,3	78,4	546,6	27,2	40	3,3

Objaśnienia/Legend

* 1994–2002, # 1996–2012



Ryc. 4. Rozkład ewapotranspiracji rzeczywistej na obszarze zlewni Strugi Toruńskiej w okresie 1994–2012

Fig. 4. Distribution of real evaporation at Struga Toruńska basin in the years 1994–2012

gicznych: temperatury i wilgotności powietrza, zachmurzenia, wiatru, stanu termodynamicznego atmosfery oraz od czynników lokalnych, takich jak: stadium rozwoju i typ roślinności, rodzaj gleby, ekspozycja na promieniowanie słoneczne. W opracowaniu najpierw obliczono ewapotranspirację potencjalną (EP), która jest uzależniona od czynników atmosferycznych, a następnie ewapotranspirację rzeczywistą (ER), która zależy również od parametrów środowiskowych. ER przyjmuje wartości niższe niż EP.

W latach 1994–2012 z obszaru zlewni ST średnio co roku wyparowało 417,6 mm wody, co stanowi 76% sumy opadów atmosferycznych. Rozkład przestrzenny ER jest ściśle powiązany z występującą roślinnością i typami gleb. Najwyższe wartości parowania wystąpiły w zlewniach cząstkowych o intensywnym użytkowaniu rolniczymi oraz w subzlewniach o dużej powierzchni jezior, np. w zlewni obejmującej jezioro Wieczno ER wyniosło 608 mm (ryc. 4). Najmniejsze wartości parowania (411 mm) wystąpiły we wschodniej części zlewni Strugi Toruńskiej, gdzie przeważają tereny leśne – lasy iglaste oraz mieszane.

4.3. Perkolacja

Na obszarze zlewni ST w latach 1994–2012 średnia roczna suma perkolacji wyniosła 80 mm. Największe wartości przesiąkania przekraczały 150 mm i wystąpi-

ły we wschodniej części zlewni ST, gdzie przeważają gleby piaszczyste, charakteryzujące się dużą przepuszczalnością, a ponadto występują tu lasy, które ograniczają wielkość ER i spływ powierzchniowy. Najniższe wartości przesiąkania (poniżej 50 mm) wystąpiły w subzlewniach jeziornych, a także na terenach o słabo przepuszczalnych gleb gliniastych i ilastych. Najwyższe wartości przesiąkania były charakterystyczne w okresie wiosny (kwiecień i maj), kiedy to grunt jest nasycony wodą z roztopów, a wegetacja na polach dopiero się rozpoczyna. Jednocześnie temperatura powietrza nie jest jeszcze zbyt wysoka. Drugorzędne maksimum perkolacji wystąpiło w miesiącach sierpień–wrzesień, kiedy to opady były stosunkowo wysokie, ale nie miały tak nawalnego charakteru jak w czerwcu i lipcu. W czasie opadów nawalnych występuje intensywne parowanie z nagrzanej powierzchni gruntu oraz znaczny spływ powierzchniowy.

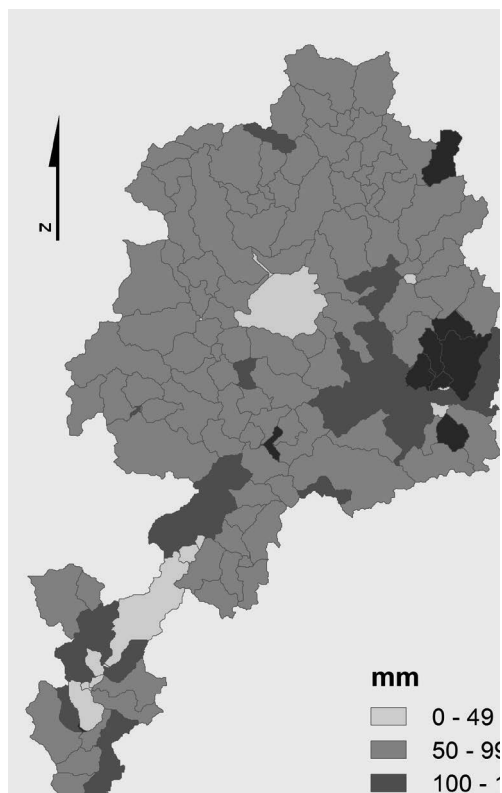
4.4. Spływ powierzchniowy

Nadmiar wody opadowej, która nie zdążyła wyparować lub wsiąknąć spływa po powierzchni terenu. Średnia wielkość spływu powierzchniowego z terenu zlewni ST wyniosła 37,4 mm. Najwyższe wartości spływu

powierzchniowego wystąpiły na terenach o słaboprzepuszczalnych glebach oraz o znacznych deniwelacjach (północna i północno-zachodnia część zlewni). Wyraźnie mniejszy spływ powierzchniowy wystąpił w subzlewniach ze znacznym udziałem lasów we wschodniej części zlewni, gdzie osiąga wartość bliską zeru. Nieco wyższe, ale również niskie wartości spływu powierzchniowego charakteryzują zlewnie cząstkowe znajdujące się na przewężeniu zlewni w jej południowej części.

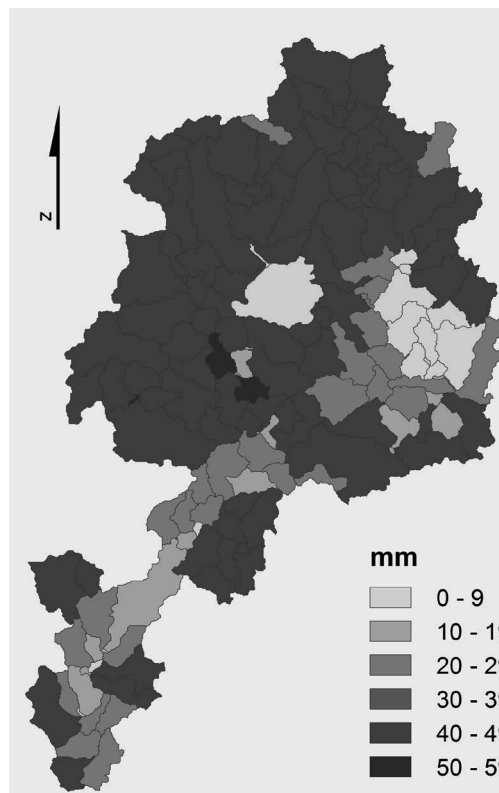
W przebiegu rocznym najwyższe wartości spływu powierzchniowego wystąpiły w lipcu (ok. 20 mm), miesiącu, w którym opady atmosferyczne są najwyższe w roku. Dodatkowo w lecie opady mają często charakter nawalny, co przy ich znacznym natężeniu powoduje, że woda nie jest w stanie wyparować i wsiąknąć, stąd też zwiększa się odpływ powierzchniowy. Najmniejszy spływ powierzchniowy wystąpił w kwietniu (ok. 3 mm), czyli w okresie o niewielkich opadach atmosferycznych. Jednocześnie pola uprawne nie są jeszcze pokryte roślinnością, która ogranicza spływ powierzchniowy.

Miesięczne wartości średniego spływu powierzchniowego oraz przepływu wody w Strudze Toruńskiej nie wykazują istotnie statystycznej korelacji (współczynnik korelacji liniowej Pearsona wyniósł $-0,12$) (ryc. 7).



Ryc. 5. Rozkład wartości przesiąkania na obszarze zlewni Strugi Toruńskiej w okresie 1994–2012

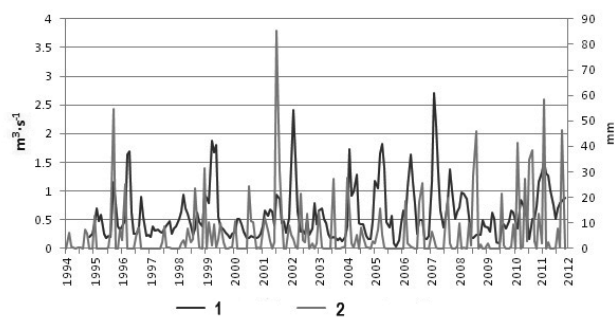
Fig. 5. Distribution of percolation at Struga Torunska basin in the years 1994–2012



Ryc. 6. Rozkład wartości spływu powierzchniowego na obszarze zlewni Strugi Toruńskiej w latach 1994–2012

Fig. 6. Distribution of surface runoff at Struga Torunska basin in the years 1994–2012

W przebiegu spływu powierzchniowego wystąpiły miesiące, kiedy z terenu zlewni odpływało ponad 40 mm. Największe miesięczne wskaźniki spływu wystąpiły we wrześniu 1995 r. (57 mm), lipcu 2001 r. (87 mm) oraz lipcu 2011 r. (59 mm). Są to miesiące letnie, kiedy opady charakteryzują się znaczną intensywnością, stąd też duża część wody odpływa po powierzchni. W miesiącach zimowych, przy ujemnej temperaturze powietrza, spływ powierzchniowy nie występował, a woda była retencjonowana w postaci pokrywy śnieżnej. Na tym tle odpływ wody ST wykazywał inny przebieg. Maksymalne przepływy wystąpiły na wiosnę, np. w lutym 2007 r., kiedy średni miesięczny przepływ wyniósł $2,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, natomiast po wystąpieniu opadów nawałnych wielkość przepływu wzrastała, ale bardzo nieznacznie. Wskazuje to na sporą bezwładność zlewni i powolną reakcję rzeki na dostawy i ubytki wody w zlewni. Duża bezwładność hydrologiczna jest charakterystyczna dla innych zlewni rzek pojezierzy (Zwoliński 2008), gdzie część wody jest czasowo retencjonowana w jeziorach.

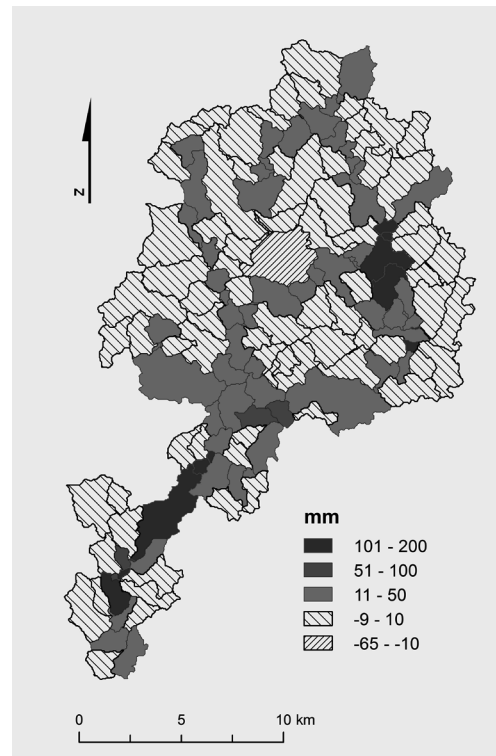


Ryc. 7. Porównanie spływu powierzchniowego oraz przepływu wody w Strudze Toruńskiej w latach 1994–2012 na podstawie pomiarów i symulacji według modelu SWAT
Fig. 7. Comparison of the measurement flow of Struga Toruńska river and runoff (SWAT model) in the years 1994–2011
 Objaśnienia: 1 – przepływ ST, 2 – spływ powierzchniowy
Legend: 1 – measurement flow of Struga Toruńska river, 2 – runoff (SWAT model)

4.5. Bilans wodny zlewni Strugi Toruńskiej

W analizowanym okresie w poszczególnych latach występował dodatni lub ujemny BW w zależności od warunków meteorologicznych (tab. 2). Wartości BW zmieniały się od 90,1 mm w 1994 r. do -44,2 mm w 2012 r. W analizowanym okresie wystąpiło 10 lat z dodatnim i 9 lat z ujemnym BW. Jednak końcowy BW był bliski równowagi i wyniósł 14 mm. Zaznacza się przy tym znaczne zróżnicowanie przestrzenne BW. Dodatni BW wystąpił zwłaszcza na obszarach pokrytych gęstą roślinnością, szczególnie leśną we wschodniej części zlewni. Pokazuje to jak ważne są nawet

niewielkie kompleksy leśne mogące znacząco poprawić stosunki hydrologiczne w obszarach niedoboru wody. Ujemnym bilansem wodnym (-65 mm) charakteryzowała się subzlewnia obejmująca jezioro Wieczno i Płużnickie ze względu na duże parowanie z otwartej powierzchni jezior oraz okolicznych łąk i terenów podmokłych.



Ryc. 8. Rozkład przestrzenny wartości bilansu wodnego dla obszaru zlewni Strugi Toruńskiej w latach 1994–2012
Fig. 8. Distribution of water balance at Struga Toruńska basin in the years 1994–2012

4.6. Zmienność składowych bilansu wodnego w latach hydrologicznych 1994–2012

Przebieg poszczególnych składowych bilansu wodnego w latach 1994–2012 charakteryzował się znaczną zmiennością uzależnioną od warunków meteorologicznych oraz zasobów wody w zlewni. Decydującym czynnikiem była wielkość opadów atmosferycznych, a następnie retencja wody w postaci pokrywy śnieżnej i oddziaływanie czynników meteorologicznych, od których uzależniona jest intensywność parowania.

W latach hydrologicznych 1994–2012 sumy roczne opadów atmosferycznych w Koniczynie zmieniały się od 410,7 mm w 1996 r. do 766,3 mm w 2010 r. Występowały nadmierne opady, intensywne roztopy, ale i długotrwałe okresy susz (Bąk i in. 2012). Najwyższe wartości ER wystąpiły w 1999 r. (510,3 mm) oraz

Tab. 2. Roczne wartości elementów bilansu wodnego w Koniczynie w latach 1994–2012
 Tab. 2. Annual values of water balance elements at Koniczynka in the years 1994–2012

Lata Years	Opady atmosferyczne Precipitation P (mm)	Ewaporacja rzeczywista Real evaporation		Perkolacja Percolation		Odpływ powierzchniowy Surface runoff		Bilans wodny Water balance- (mm)	Średni przepływ ST Measurement (m/s ²)
		mm	%P	mm	%P	mm	%P		
1994	498,7	386,4	77,5	9,8	2,0	12,4	2,5	90,1	
1995	577,8	464,8	80,4	33,5	5,8	41,3	7,1	38,2	0,45
1996	405,0	360,9	89,1	49,9	12,3	28,5	7,0	-34,3	0,66
1997	444,4	448,6	100,9	6,9	1,6	6,5	1,5	-17,6	0,31
1998	562,8	406,6	72,2	77,1	13,7	30,5	5,4	48,6	0,51
1999	579,6	510,3	88,0	34,1	5,9	38,3	6,6	-3,1	0,85
2000	558,7	362,9	65,0	172,7	30,9	31,9	5,7	-8,8	0,28
2001	762,0	512,3	67,2	111,6	14,6	89,1	11,7	49,0	0,54
2002	593,8	434,5	73,2	125,0	21,1	35,1	5,9	-0,8	0,73
2003	468,6	403,8	86,2	15,5	3,3	24,1	5,1	25,2	0,39
2004	496,1	392,8	79,2	93,6	18,9	35,9	7,2	-26,2	0,60
2005	413,0	421,2	102,0	12,4	3,0	18,3	4,4	-38,9	0,77
2006	497,8	385,3	77,4	55,9	11,2	36,5	7,3	20,1	0,65
2007	670,7	443,1	66,1	127,2	19,0	24,5	3,7	75,9	1,03
2008	592,6	349,8	59,0	156,8	26,5	54,5	9,2	31,5	0,52
2009	500,2	443,8	88,7	19,7	3,9	13,9	2,8	22,8	0,37
2010	674,9	398,7	59,1	194,0	28,7	87,1	12,9	-4,9	0,56
2011	647,2	424,7	65,6	112,1	17,3	70,3	10,9	40,1	0,99
2012	484,2	384,5	79,4	111,8	23,1	32,1	6,6	-44,2	
1994–2012	546,6	417,6	76,1	80,0	14,6	37,4	6,8	13,8	0,60

w 2001 r. (512,3 mm), a najniższe w 2008 r. (349,8 mm) oraz w 1996 r. (360,9 mm). Wartości te zależą od sum opadów atmosferycznych, ich rozkładu w ciągu roku, retencji w postaci pokrywy śnieżnej oraz stopnia nasycenia gruntu wodą. Przebieg perkolacji w analizowanym wieloleciu wskazywał ścisły związek z opadami atmosferycznymi. Najwyższe wartości przesiąkania wystąpiły w 2010 r. (średnio dla całej zlewni 194,0 mm), a najniższe w 1997 r. (jedynie 6,9 mm). W analizowanym okresie najwyższe wartości odpływu powierzchniowego wystąpiły w 2001 r. oraz 2010 r. (odpowiednio 89,1 i 87,1 mm), a najniższe w 1997 r. (6,5 mm).

5. Podsumowanie

Uzyskane na podstawie modelu SWAT składowe BW dla ST są zgodne z wynikami innych badań. Średnia ewapotranspiracja rzeczywista na obszarze ST wyniosła 417,6 mm, podczas gdy dla pobliskiej Bydgosz-

czy (lata 1945–2003) ewapotranspirację wskaźnikową po zastosowaniu modelu Monteith I oszacowano na 47 mm (Gąsiorok i in. 2008). Wielkość perkolacji jest silnie uzależniona od lokalnych właściwości gruntu. Odpływ powierzchniowy z terenu zlewni ST wyniósł 37,4 mm, co stanowi zaledwie 6,8% opadów atmosferycznych. Natomiast według pomiarów przepływów w ST (profil Koniczynka) ze zlewni odpłynęło 60,5 mm wody, co stanowi 11,1% opadów. Różnica ta wynika z zasilania ST również przez wody podziemne. W Polsce w małych zlewniach odpływa ok. 40% opadów (dane IMGW z lat 1981–1990 dla 44 zlewni) (Ostrowski 1997). Występuje jednak znaczne zróżnicowanie regionalne, wyższy współczynnik odpływu jest charakterystyczny dla zlewni położonych na terenach górskich i wyżynnych (Kanownik, Kowalik 2010). Niewielki wskaźnik odpływu ST może być związany ze dużą jeziornością zlewni (rzeka przepływa przez kilka jezior) oraz znacznego zużycia wody na potrzeby uprawy roślin. Średnie roczne wartości BW na

terenie zlewni ST wahały się od 90,1 mm w 1994 r. do -44,2 mm w 2012 r., a średnia roczna jego wartość wyniosła 13,8 mm. W omawianym okresie wystąpiło 10 lat z dodatnim i 9 lat z ujemnym BW.

Mimo zastosowania nowoczesnych metod komputerowych, obliczanie bilansu wodnego zlewni za pomocą modelu SWAT jest czaso- i pracochłonne. Wydaje się jednak, że uzyskane wyniki mogą być przydatne do szacowania wartości, które nie są bezpośrednio mierzone w terenie i mogą stanowić cenne uzupełnienie wiedzy na temat badanego obszaru. Jak pokazują wyliczenia i testy, model SWAT posiada zadowalającą dokładność, a zastosowanie danych wejściowych o wyższej rozdzielczości pozwala potencjalnie rozwijać model i uzyskiwać coraz to większą jego precyzję. Zastosowana metoda autokalibracji SUFI-2 jest użyteczna do kalibracji modeli dla stosunkowo niewielkich zlewni. Potwierdzają to wyniki Pniewskiego i Okruszko (2009) i Orlińskiej i in. (2012), którzy uzyskali zbliżone wyniki współczynnika determinacji oceniane jako bardzo dobre. Model SWAT ma jednak tendencję do niedoszacowania wpływu roztopów na przepływy cieków (dla ST 15–20%), co i tak jest lepszym wynikiem niż wartości uzyskane przez Pniewskiego i Okruszkę (2009), gdzie różnice sięgały 20–60%. Niedoszacowanie wielkości odpływu w czasie roztopów może wynikać z gęstej sieci drenażu melioracyjnego, który znacząco przyspiesza i zwiększa odpływ wody. Dla ST stwierdzono przeszacowania reakcji zlewni na opady nawalne (o 45–55%). Zlewnia ST charakteryzuje się sporą bezwładnością, co jest typowe dla zlewni pojeziernych (Zwoliński 2008).

Jak wskazuje Miatkowski (2011) model SWAT może służyć przede wszystkim do analiz rozchodzenia się zanieczyszczeń w glebie, metali i innych związków oraz ochrony wód. Jednak jak wykazały powyższe badania pozwala on również rozpoznać poszczególne składowe bilansu wodnego, co jest istotne przy ochronie zlewni poddanych silnej antropopresji.

6. Literatura

- Arnold J.G., Moriasi D.N., Gassman P.W., Abbaspour K.C., White M.J., Srinivasan R., Santhi C., Harmel R.D., van Griensven A., Van Liew M.W., Kannan N., Jha M.K., 2012:** *SWAT: model use, calibration and validation*. Transactions of the ASABE, Vol. 55(4), American Society of Agricultural and Biological Engineers: 1491-1508.
- Bartnik A., Jokiel P., 2001:** *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w Polsce środkowej w wieloletciu 1951–1998*. Wiadomości IMGW, Warszawa, 2: 3-17.
- Bąk B., Kejna M., Uscka-Kowalkowska J., 2012:** *Susze meteorologiczne w rejonie stacji ZMŚP w Koniczynie (Pojezierze Chełmińskie) w latach 1951–2010*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, t. 12, z. 2(38): 19-28.
- Celmer T., Marciniak K., Wójcik G., 1996:** *Wody powierzchniowe i podziemne*, W: G. Wójcik, K. Marciniak (red.) Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego – Stacja Bazowa w Koniczynie, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 77-90.
- Collins R., Kristensen P., Thyssen N., 2009:** *Water resources across Europe. Confronting water scarcity and drought*. 2009, European Environment Agency, Report No 2: 1-55.
- Corine Land Cover 2006:** European Environmental Agency.
- Diagnoza aktualnego stanu gospodarki wodnej, 2010:** Projekt Polityki wodnej państwa do roku 2030, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, <http://www.kzgw.gov.pl/pl/Projekt-Polityki-wodnej-panstwa-do-roku-2030.html>.
- Fal B., Bogdanowicz E., 2002:** *Zasoby wodne w Polsce*. Wiadomości IMGW, 3: 3-37.
- Gąsiorek E., Kamińska J., Musiał E., 2008:** *Modelowanie ewapotranspiracji wskaźnikowej w różnych regionach Polski*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, nr 7, PAN, Kraków: 69-80.
- Global Digital Elevation Map, 2011,** National Aeronautics and Space Administration.
- Harmonized World Soil Database, Vol. 1, 2009,** Food and Agriculture Organization.
- Hotłoś H., 2008:** *Quantity and availability of freshwater resources: The World – Europe – Poland*. Environment Protection Engineering, 34, 2: 67-77.
- Jokiel P., 2004:** *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku*. Wyd. UŁ, Łódź.
- Jokiel P., 2008:** *Zmiany, zmienność i ekstremalne sumy parowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej w Łodzi w drugiej połowie XX wieku*, W: P. Jokiel (red.), Zjawiska ekstremalne i zdarzenia nadzwyczajne w środkowej Polsce. Folia Geographica Physica, Wyd. UŁ, Łódź, 8: 63-88.
- Jokiel P., Tomalski P., 2004:** *Odpływy maksymalne w rzekach Polski*. Czasopismo Geograficzne, Wrocław, 1-2: 83-97.
- Kaczmarek Z., 1978:** *Zasoby wodne Polski i zasady ich racjonalnego użytkowania*. Nauka Polska, 8: 43-54.
- Kapuściński J., Pawuła A., 1999:** *Modele deterministyczne zlewni hydrologicznej jako element monitoringu hydro-meteorologicznego*. Fol. Univ. Agric. Stetin. 202 Agricultura. (79): 99-108.
- Kanownik W., Kowalik T., 2010:** *Variability of Water Resources Flowing Away from Small Agricultural*

- Catchment, Polish J. of Environ. Stud. Vol. 19, No. 1 (2010): 65-71.
- Kasperska-Wołowicz W., Łabędzki L., 2004:** *Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana i Penmana-Monteitha w różnych regionach Polski*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, t. 4 (11): 123-136.
- Kejna M., Uscka J., Wójcik G., Marciniak K., 2004:** *Warunki klimatyczne w Koniczynce (Pojezierze Chełmińskie) w latach 1994–2002*, (w:) Kejna M., Uscka J., (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring ekosystemów w warunkach narastającej antropopresji*. Biblioteka Monitoringu Środowiska: 131-146.
- Kostrzewski A., Szpikowski J., Szpikowska G., 2011:** *Stan geosystemów Polski – ocena na podstawie wybranych geoskaźników w programie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 12: 69-83.
- Mapa topograficzna Polski, 1:10000**, Główny Geodeta Kraju, Warszawa.
- Miatkowski Z., 2011:** *Problemy wdrażania zasady zanieczyszczający płaci w odniesieniu do zanieczyszczeń rozproszonych*. Prezentacja w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, październik 2011.
- Michalczyk Z., Sposob J., 2011:** *Water resources of Poland and their state in Lublin District*. *Teka Kom. Ochr. Kszt. Środ. Przyr. – OL PAN*, 2011, 8: 104-111.
- Orlińska P., Wróbel J., Wilk P., Wyniki kalibracji ilościowej modelu SWAT zlewni rzeki Redy**. Sprawozdanie, http://baltyk.pogodynka.pl/ftp/img/baltic_compass.
- Ostrowski J., 1997:** *Problematyka badawcza programu małych zlewni IMGW, Program Małych Zlewni IGMW*. Materiały badawcze IMGW. Seria Hydrologia. *Oceanologia*, T. 22: 1-123.
- Penman H.L., 1956:** *Evaporation: An introductory survey*. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4: 7-29.
- Pniewski M., Okruszko T., 2009:** *Autokalibracja modelu SWAT w zlewni Narwi*. Prezentacja w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie, 19.01.2009
- Review of world water resources by country, 2003:** *Water Reports*, 23, Food And Agriculture Organization Of The United Nations, Rome: 1-112.
- Sarma P.B.S., Delleur J.W., Rao A.R., 1973:** *Comparison of rainfall-runoff models for urban areas*. *Journal of Hydrology*, Volume 18, Issues 3-4: 329-347
- Stachy J., Biernat B., 1987:** *Odpyływ rzeczny. Średni odpyływ jednostkowy*, (w:) J. Stachy (red.). *Atlas hydrologiczny Polski*, IMGW, Wyd. Geol., Warszawa: 1-56.
- Summary Report, 2011:** *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing Systems at Risk*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1-47.
- Zwoliński Z., 2008:** *Wybrane zjawiska ekstremalne pojezierzy polskich*. *Landform Analysis*, 8: 98-106.

WATER BALANCE OF STRUGA TORUŃSKA BASIN IN THE YEARS 1994–2012 BASED ON SWAT MODEL USING GIS METHODS

Summary

The main aim of this article is to analyse the spatial and temporal variability of the water balance components in a small agricultural basin of the Struga Toruńska river (ST) in the period 1994–2012. Calculations were performed using a SWAT 2009 model (Soil and Water Assessment Tool). The analysis is based on the meteorological data of the ZMŚP (Integrated Environmental Monitoring) station in Koniczynka, a digital terrain model, the soil cover (FAO) and land use (Corine Land Cover 2006). The model calculated the actual evapotranspiration, percolation and surface runoff. The analysis calculated the spatial diversity of the actual evapotranspiration, percolation, surface runoff and water balance. Validation of the SWAT model was based on the measurements of water flow in the ST. The analysis shows that the SWAT model has a tendency to underestimate flows associated with the spring melting of snow cover (about 15–20%) and to overestimate the basin's response to heavy rainfall (about 40–55%). The analysis of individual components of the water balance depends on weather conditions. The total annual precipitation in this area in the period of 1994–2012 varied from 405.0 mm in 1996 to 762.0 mm in 2001. The highest values of real evaporation occurred in 1999 (510.3 mm), and in 2001 (512.3 mm), with the lowest in 2008 (349.8 mm) and 1996 (360.9 mm). The highest values of infiltration occurred in 2010 (194.0 mm), and the lowest in 1997 (6.9 mm). The highest values of surface runoff occurred in 2001 and 2010 (89.1 mm and 87.1 mm respectively) and the lowest in 1997 (6.5 mm). Water balance values varied from 90.1 mm in 1994 to –44.2 mm in 2012.

The results obtained using the SWAT model properly reflect the variability and spatial distribution of the water balance components and are a valuable addition to our knowledge of the hydrological relationship in the study area. The ST basin is characterised by large inertia and delayed reaction to the influence of meteorological factors, as is typical for the basin's lakeland area.