

WPŁYW JAKOŚCI DANYCH HYDROLOGICZNYCH NA OSZACOWANIE ODPŁYWU ZE ZLEWNI MIEJSKIEJ NA PRZYKŁADZIE POTOKU STRZYŻA W GDAŃSKU

Michał Szydłowski¹, Patrycja Mikos-Studnicka¹

¹ Katedra Hydrotechniki, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk, e-mail: mszyd@pg.gda.pl; patrycja.studnicka@wilis.pg.gda.pl

STRESZCZENIE

Kontrola oraz prognozowanie reakcji cieków powierzchniowych na nawalne epizody deszczowe, lub gwałtowne roztopy nabiera kluczowego znaczenia w aspekcie bezpieczeństwa przeciwpowodziowego zlewni zurbanizowanych. Bardzo dobrym przykładem zarówno problematycznego, jak i niosącego realne zagrożenie dla infrastruktury miejskiej ciek, jest Potok Strzyża w Gdańsku. W latach 2011–2013 realizowano budowę sieci posterunków kontrolnych w zlewni potoku. Dzięki temu przedsięwzięciu możliwe stało się gromadzenie cennych danych hydrologicznych dotyczących opadów i przepływów w obszarze silnie zróżnicowanej zlewni miejskiej. Obecnie trwają prace nad drugim etapem opomiarowania zlewni Potoku Strzyża, wyznaczonym na lata 2015–2017, mającym na celu rozwój metod ochrony przeciwpowodziowej, rozbudowę istniejącego systemu monitoringu opadów i przepływów w zlewni Potoku Strzyża, a także dodatkowo, stworzenie systemu sterowania retencją wód opadowych i roztopowych oraz monitoring jakości wód potoku stanowiących bezpośredni odbiornik miejskich ścieków deszczowych. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania ciągłych danych z monitoringu hydrologicznego do wyznaczenia rocznego współczynnika odpływu ze zlewni. Wyniki porównano z przybliżonym oszacowaniem tego parametru hydrologicznego, wykonanym na podstawie chwilowych pomiarów hydrometrycznych przepływu i dostępnych obserwacji opadów ze stacji leżącej w sąsiedztwie analizowanej zlewni.

Słowa kluczowe: jakość danych hydrologicznych, współczynnik odpływu, Potok Strzyża.

THE INFLUENCE OF HYDROLOGICAL DATA QUALITY ON ESTIMATING THE RUNOFF FROM CITY CATCHMENT ON THE EXAMPLE OF STRZYŻA CREEK IN GDAŃSK

ABSTRACT

Channel flow control and prediction of waterbodies reaction on heavy rainfalls or rapid snowmelt become critical when forecasting the flood risk in urban catchments. A very good example of both problematic and carrying a real threat to urban infrastructure is the Strzyża Creek in Gdańsk. In years 2011–2013 undertook the implementation of storm water monitoring system in the Strzyża Creek basin in Gdańsk. Since that time, it has become possible to collect valuable hydrological data on rainfall and flows in the strongly diversified urbanized districts of the city. Currently, the work is underway to extend the Strzyża Creek monitoring system. The ongoing research project is being realized again in years 2015–2017. The main aims of a project are: development of the methods of flood control, expansion of the existing rainfall-runoff and storage monitoring system in the basin and integrated water quantity and quality analysis, since the Strzyża Creek is one of the main stormwater collectors in Gdańsk. The article presents an example of using continuous data collected by the hydrological monitoring system to determine the annual runoff coefficient. The results were compared with the same parameter estimated on the basis of monthly instantaneous flow measurements and rainfall observations from the precipitation gauge localized in the vicinity of the analyzed catchment.

Keywords: the quality of the hydrological data, annual runoff coefficient, the Strzyża Creek.

CZASOPRZESTRZENNA STRUKTURA OPADÓW MIASTA GDAŃSKA

Położenie miasta

Gdańsk położony jest na Żuławach Wiślanych, u ujścia rzek Motławy i Wisły. Górny taras miasta leży na polodowcowych wzgórzach morenowych, taras dolny to nizinne tereny nadmorskie oraz obszary depresyjne Żuław Gdańskich. Miasto sąsiaduje bezpośrednio z Pobrzeżem i Pojezierzem Kaszubskim, Mierzeją Wiślaną i Zatoką Gdańską, co znacząco wpływa na kształtowanie się warunków hydrologicznych i hydrometeorologicznych rejonu. W części wschodniej Gdańska wody odprowadzane są głównie do rzek, zaś tereny zachodnie drenowane są przez liczne potoki (rys. 1).

Charakterystyki opadowe

Reżim opadowy Zatoki Gdańskiej kształtowany jest głównie przez zalegające w jej obszarze niższe baryczne, fronty atmosferyczne oraz typowe cechy środowiska nadmorskiego, w tym cień orograficzny i termikę zbiorników wodnych [Wołoszyn 2009; Szydłowski i Zima, 2013]. Specyficzna lokalizacja Gdańska w połączeniu z postępującą antropopresją mają znamienne wpływy na warunki klimatyczne oraz charakterystyki opadowe regionu.

Obserwacje opadów prowadzone w Gdańsku mają ponad dwustuletnią historię, jednak ich masowa popularyzacja nastąpiła po roku 1924, tuż po otwarciu lotniska w Gdańsku-Wrzeszczu. Powstałe wówczas w krótkim czasie stacje były

na przestrzeni lat wielokrotnie przenoszone, modernizowane lub całkowicie likwidowane [www.imgw.pl]. Obecnie na terenie Gdańska działają: trzy stacje meteorologiczne należące do sieci IMGW tj. Rębiechowo, Port Północny, Świbno, kilkanaście posterunków pomiarowych należących do Gdańskich Melioracji, posterunki Politechniki Gdańskiej we Wrzeszczu i Jelitkowie, a także wiele prywatnych punktów pomiarowych. Rozmieszczenie posterunków pomiarowych należących do Gdańskich Melioracji, IMGW oraz Politechniki Gdańskiej przedstawiono na rysunku 2.

Stacja Politechniki Gdańskiej, zlokalizowana na terenie kampusu uczelni, prowadzi obserwacje od 1991 roku, dając ponad 20 letni ciąg obserwacyjny. Stacja Bystrzec-Reja prowadzi zapisy od 2001, jednak z powodu przerw w działaniu, za wartościowe można uznać dopiero lata począwszy od 2008 roku, do chwili obecnej. Posterunek opadowy w Matemblewie funkcjonuje od 2005 roku, dając nieprzerwane zapisy od 2008 roku. Ciągi obserwacyjne ze stacji nienależących do zlewni omawianego Potoku Strzyża, tj. np. ze stacji opadowych leżących na terenie Portu Północnego i Rębiechowa są dłuższe i mają swój początek w latach dziewięćdziesiątych.

Rozkład opadów w regionie aglomeracji gdańskiej charakteryzuje się znaczną przestrzenną zmiennością, zmiennością rocznej i sezonowej wysokości opadu, liczby dni z opadem, liczby i czasu trwania okresów opadowych i bezopadowych. Dla pojedynczych epizodów nawalnych różnice w wysokości opadu widoczne są już dla posterunków oddalonych

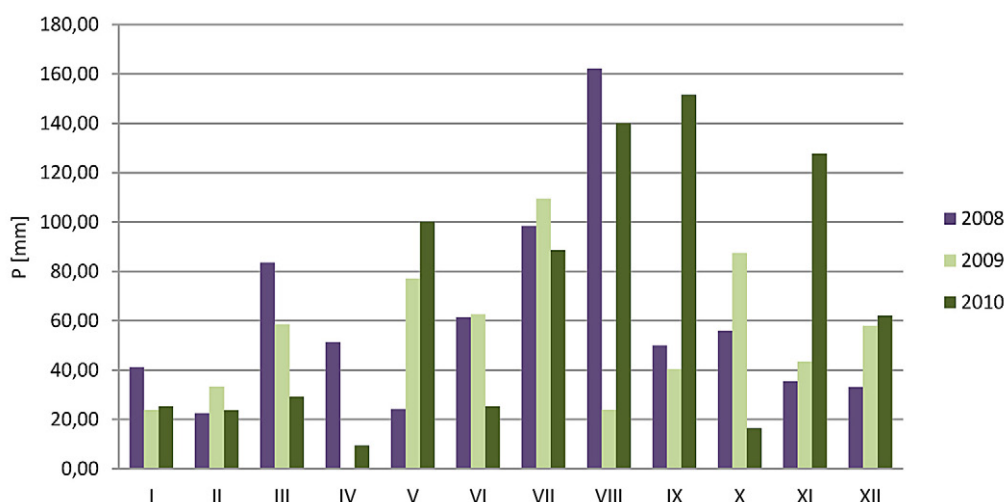


Rys. 1. Sieć hydrograficzna Gdańska [Gdańskie Melioracje]
Fig. 1. The Hydrographic map of Gdańsk [Gdańskie Melioracje]



Rys. 2. Rozmieszczenie stacji pomiarowych opadów atmosferycznych w Gdańsku, kolor niebieski i fioletowy - Gdańskie Melioracje, kolor czerwony - IMGW, kolor zielony - Politechnika Gdańska [Gdańskie Melioracje]

Fig. 2. Location of the precipitation gauges, colours blue and purple - Gdańskie Melioracje, red colour: IMGW, green colour - Gdańskie University of Technology [Gdańskie Melioracje]



Rys. 3. Zróżnicowanie miesięcznych, sezonowych i rocznych sum wysokości opadów atmosferycznych [mm] dla lat 2008–2010 na stacji Bystrzec-Reja [Gdańskie Melioracje]

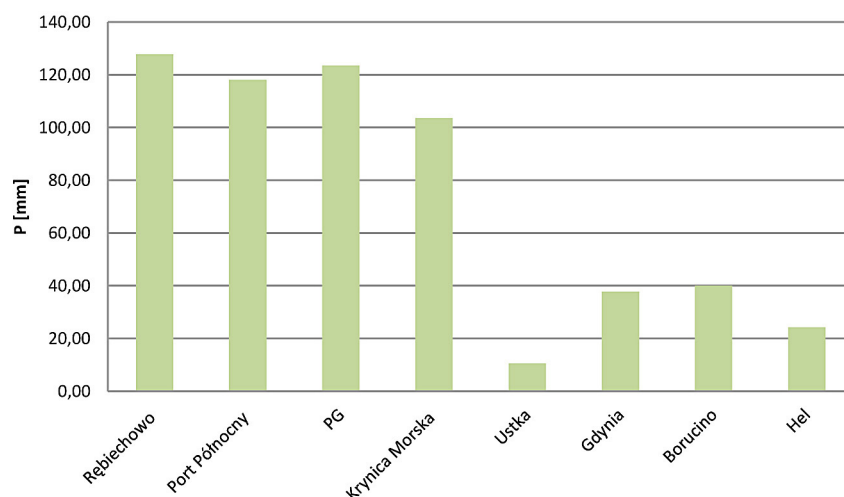
Fig. 3. Monthly, season and annual variability of precipitation totals [mm] in years 2008–2010, control cross-section Bystrzec-Reja [Gdańskie Melioracje]

od siebie o zaledwie 2–4 km [Weinerowska-Bords i in., 2012]. Przykład rocznej, sezonowej i miesięcznej zmienności opadu przedstawiono na rysunku 3.

Najwyższe notowane w regionie Gdańska sumy średnich opadów rocznych występują m.in. w rejonie Tolknicka, Stegny, Rozewia i wynoszą ponad 610 mm, najniższe natomiast obserwowane są np. w Gdyni, Jastarni – ok. 525–535 mm [Szydłowski i Zima, 2013]. Opady obserwowane w ostatnim 60-leciu na terenie Gdańska wykazującą wyraźny trend wzrostowy w stosunku do średniej rocznej wysokości opa-

dów. Dla Gdańska suma średnia opadów rocznych wynosi ok. 550 mm [Wołoszyn, 2009].

Jako przykład zróżnicowania przestrzennego opadów w okolicach Gdańska może posłużyć epizod katastrofalny z dnia 9 lipca 2001 r. Sumy opadów z 24 godzin od 9 do 10 lipca 2001, zarejestrowane na poszczególnych stacjach opadowych wynosiły: Gdańsk-Rębiechowo – 127,7 mm, Gdańsk Port Północny – 118,0 mm, Gdańsk Politechnika Gdańska – 123,5 mm, Krynica Morska – 103,6 mm, Ustka – 10,5 mm, Gdynia – 37,7 mm, Borucino – 40 mm, Hel -24,3 mm [Cyberski, 2003] (rys. 4).



Rys. 4. Zróżnicowanie przestrzenne 24 godzinnych sum opadów [mm] dla epizodu katastrofalnego z dnia 9 lipca 2001 r. [Cyberski, 2003]

Fig. 4. Spatial variability of 24-hour precipitation totals [mm] on 9 of July 2001 r. [Cyberski, 2003]

MONITORING OPADÓW I PRZEPIYWÓW

Zlewnia Potoku Strzyża

Zlewnia Potoku Strzyża została wybrana na obszar eksperymentalny ze względu na przebieg potoku przez kluczowe dzielnice miasta oraz realne zagrożenie płynące ze stronu ciek podczas, coraz częściej nawiedzających Gdańsk, ekstremalnych zjawisk pogodowych.

Będący przedmiotem analiz Potok Strzyża, wypływa z obszaru źródłowego w rejonie wzgórz Migowskich. Na jego zlewnię składają się zalesione wysoczyzny morenowe, obszary przemysłowe oraz tereny o gęstej zabudowie miejskiej poprzecinane głównymi arteriami komunikacyjnymi Gdańska. Deniwelacja zlewni miejscowo wynosi nawet 110 m, spadki podłużne ciek zawierają się w przedziale od 0,5% do 5%, spadek średni wynosi około 1%. Całkowita powierzchnia zlewni Potoku Strzyża to 33,9 km², zaś jego długość 13,3 km. Ciek zasilają prawostronnie: Potok Królewski (km 1+600) i Potok Jasień (km 7+800), lewostronnie: Potok Matarnicki (km 11+190). W zlewni Potoku Strzyża funkcjonuje osiem zbiorników retencyjnych, o łącznej pojemności ok. 80 tys. m³, z których część pełni funkcje rekreacyjną. Potok pełni rolę głównego odbiornika ścieków deszczowych i roztopowych dla zachodniej i fragmentu centralnej części miasta.

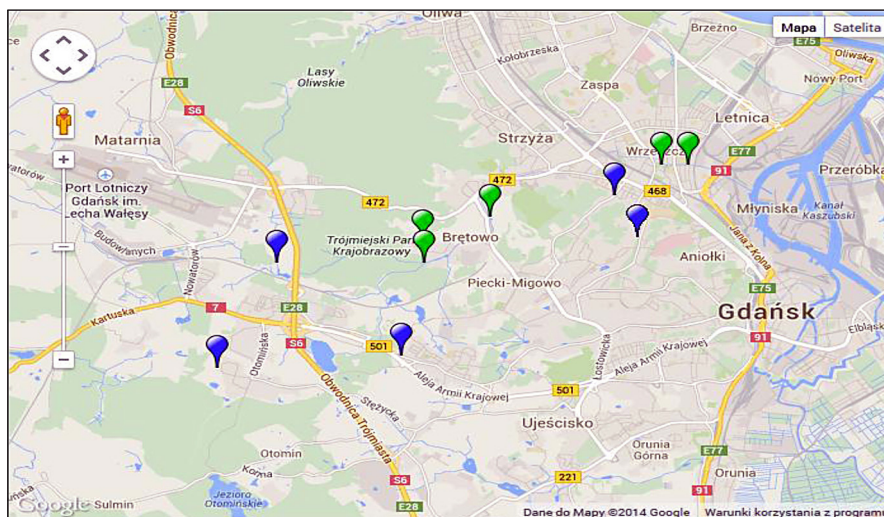
Monitoring etap I

Pierwszy etap budowy systemu monitoringu zlewni został zrealizowany w latach 2011–2013.

Po zakończeniu prac urządzenia pomiarowe zostały przekazane na własność Gdańskim Melioracjom. W chwili obecnej systemu monitoringu składa się z ultradźwiękowych sond pomiaru poziomu zainstalowanych ponad zwierciadłem wody w kanałach i jednym zbiorniku retencyjnym, przyrządów do pomiaru natężenia przepływu i ciśnienia hydrostatycznego w kanalizacji deszczowej oraz deszczomierzy objętościowych o rozdzielczości pomiarowej 0,1 mm, wyposażonych w system ogrzewania. Posterunki pomiarowe zlokalizowane są w dzielnicach: Matarnia, Matemblewo, Jasień, Kiełpino Górne, w rejonie ulic Franciszka Kubacza, Mikołaja Reja, Ogrodowa, Jaškowa Dolina, Sobieskiego oraz na terenie Politechniki Gdańskiej (rys. 5). Zapis prowadzony jest w sposób ciągły, a zgromadzone dane hydrologiczne dostępne są na specjalnie utworzonej stronie internetowej HydraNET Anywhere.

Monitoring etap II

W roku 2015, w ramach prowadzonych przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku projektów-badawczo rozwojowych, Katedra Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Łądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej pozyskała środki na realizację zadania pt.: „Sterowanie retencją wód opadowych i roztopowych oraz prognozowanie zagrożenia powodziowego w przymorskiej zlewni zurbanizowanej”. Przedsięwzięcie ma na celu rozbudowę systemu monitoringu opadów i przepływów w zlewni Potoku Strzyża o kolejne urządzenia pomiaru i transmisji danych hydrologicznych, a także utworzenie



Rys. 5. Lokalizacja urządzeń pomiarowych w zlewni Potoku Strzyża
[<http://anywhere.hydranet.pl/Obs/Gdansk/Melioracje>]

Fig. 5. Location of monitoring gauges in the Strzyża Creek catchment
[<http://anywhere.hydranet.pl/Obs/Gdansk/Melioracje>]

systemu obliczeniowego pozwalającego sterować retencją wód opadowych i roztopowych w zbiornikach leżących w obrębie zlewni Potoku Strzyża. Dzięki zgromadzonej informacji możliwe będzie przygotowanie modeli komputerowych pozwalających na symulację pracy zbiorników retencyjnych, sprecyzowanie miejsc krytycznych w czasie propagacji fal wezbraniowych, a także przedstawienie rzeczywistej interakcji między podziemną i naziemną siecią melioracyjną miasta. Dodatkowo przygotowany zostanie model prognostyczny, wykorzystujący dane meteorologiczne, którego główną funkcją będzie ostrzeganie mieszkańców oraz władz miasta przed ryzykiem potencjalnych zagrożeń powodziowych ze strony Potoku Strzyża. Po zakończeniu prac w roku 2017 właścicielem nowopowstałych elementów systemu ponownie zostaną Gdańskie Melioracje.

WYKORZYSTANIE DOSTĘPNEJ INFORMACJI HYDROLOGICZNEJ

Opady w zlewni Potoku Strzyża

Właścicielem deszczomierzy funkcjonujących w zlewni Potoku Strzyża są Gdańskie Melioracje i Politechnika Gdańska. Posterunki opadowe zlokalizowane są w:

- górnej części zlewni, w dzielnicach: Kiełpino Górne, Matarnia i Matemblewo,
- środkowej części zlewni, w rejonie ulic: Ogrodowa i Narutowicza (kampus Politechniki Gdańskiej),

- dolnej części zlewni, w rejonie ulicy Reja (rysunek 6).

Zapis pomiarów, w elektronicznym systemie gromadzenia danych HydraNET, dla wszystkich powyższych stacji, prowadzony jest w sposób ciągły od roku 2013. Wartości wysokości opadów przedstawiane są bądź w formie tabelarycznej, bądź w postaci wykresu (rys. 7). Przed rokiem 2013 informacje na temat opadów obserwowanych na stacjach Matemblewo i Bystrzec-Reja archiwizowane były przez Gdańskie Melioracje i Politechnikę Gdańską.

Najdłuższe wspólne ciągi obserwacyjne opadów w zlewni Potoku Strzyża zarejestrowano dla stacji: Matemblewo, Politechnika Gdańska i Bystrzec-Reja. Roczne sumy opadów dla lat 2008–2014 prezentuje rysunek 8. Stacje te są reprezentatywne kolejno dla górnego, środkowego i ujściowego odcinka potoku.

Opady w rejonie Matemblewa są przeważnie wyższe od tych zanotowanych na posterunkach w dolnym i środkowym biegu potoku. Fakt ten może wynikać ze specyficznego ukształtowania terenu, na którym zlokalizowano posterunek pomiarowy. Rejon gdańskich wzgórz morenowych jest często miejscem zalegania wilgotnych mas powietrza i cechuje się większymi wysokościami opadu w roku, w stosunku do stacji leżących w innych punktach zlewni Potoku Strzyża. Roczne sumy opadów na stacji Matemblewo i Bystrzec-Reja różnią się znacząco, np. dla 2009 różnica wysokości opadów między posterunkami wyniosła 82 mm, a dla roku 2010 aż 171 mm. Potwierdza to, opisywane przez



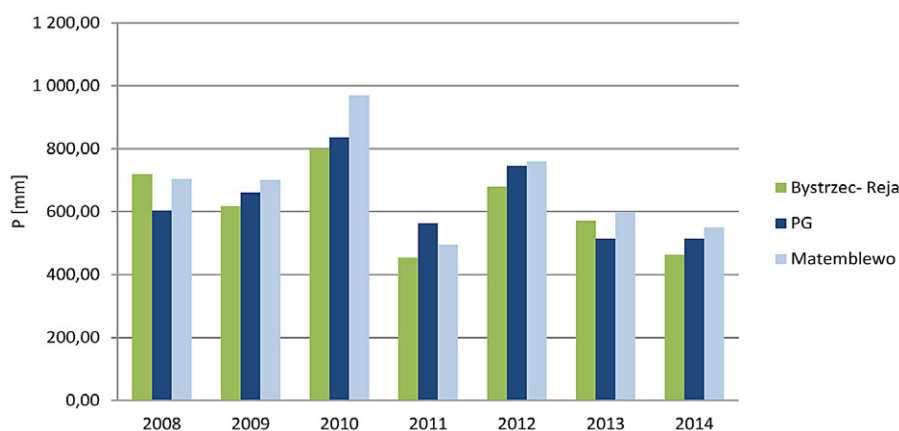
Rys. 6. Mapa cyfrowa obszaru zlewni Potoku Strzyża z lokalizacją istniejących stacji opadowych i granicą zlewni, kolor niebieski posterunki Gdańskich Melioracji, kolor zielony posterunek Politechniki Gdańskiej [podkład mapowy: <http://www.gis.gdansk.pl>]

Fig. 6. Digital terrain model (DTM) of the Strzyża Creek catchment area with catchment boundary marked with red colour and precipitation gauges, green colour: Gdańsk University of technology, blue colour: Gdańskie Melioracje (source: Geographical Information System (GIS) city of Gdańsk [<http://www.gis.Gdańsk.pl>])



Rys. 7. Stacja Bystrzec-Reja – przykład pomiaru opadu przedstawiony w postaci krzywej sumowej [<http://anywhere.hydranet.pl/Obs/Gdansk/Melioracje>]

Fig. 7. Exemplary precipitation gauge Bystrzec-Reja, precipitation marked with blue colour [<http://anywhere.hydranet.pl/Obs/Gdansk/Melioracje>]



Rys 8. Roczne sumy opadów dla lat 2008-2014 zarejestrowane na stacjach Matemblewo, Politechnika Gdańska i Bystrzec-Reja [Politechnika Gdańska, Gdańskie Melioracje]

Fig. 8. Annual precipitation totals in years 2008-2014, precipitation gauges: Matemblewo, Gdańsk University of Technology and Bystrzec-Reja [Gdańsk University of Technology Gdańskie Melioracje]

innych autorów, istotne czasowe i przestrzenne zróżnicowanie opadów w rejonie miasta Gdańska [Weinerowska-Bords i in., 2012].

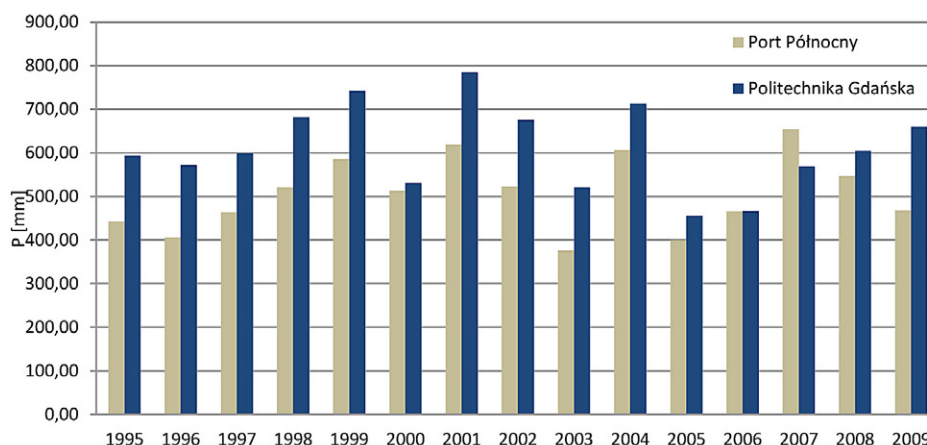
Chcąc obliczyć opad średni dla zlewni należy wziąć pod uwagę szereg czynników takich jak m.in. rzeźba terenu, pokrycie i sposób użytkowania jej powierzchni, rozmieszczenie stacji opadowych. Obliczanie średniej wysokości opadu metodą arytmetyczną jest możliwe wyłącznie dla terenów jednolitych pod kątem wyżej wymienionych cech. W innym razie należy posłużyć się jedną z dostępnych metod, np. stosowaną przez IMGW metodą regionów opadowych, uwzględniającą takie cechy zlewni jak: położenie nad poziomem morza, ekspozycję, rzeźbę i użytkowanie terenu [Pociask-Karteczka, 2003].

Ze względu na aktualnie niewystarczającą liczbę stacji opadowych w obrębie Potoku Strzy-

ża obliczenie średniego opadu dla zlewni metodą regionów opadowych nie jest możliwe. Jako opady reprezentatywne dla analizowanego obszaru, przyjęto zatem roboczo, zapisy ze stacji Politechniki Gdańskiej, które kształtują się w środku przedziału między najwyższymi i najniższymi opadami w zlewni.

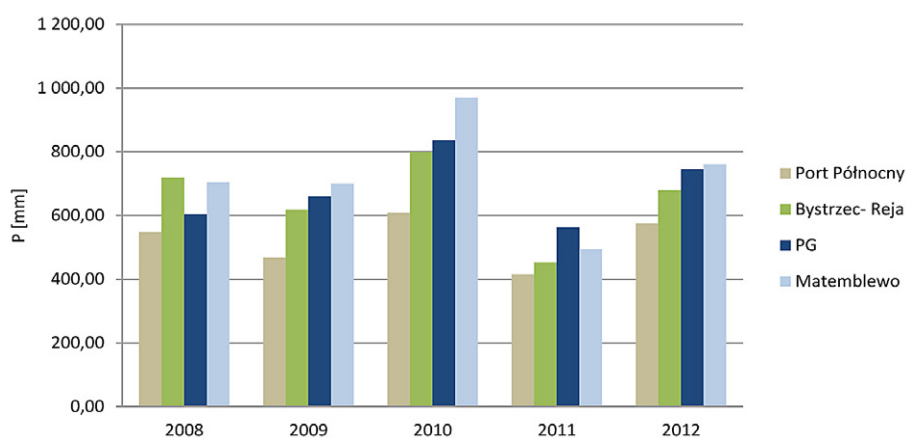
Dla porównania na rysunku 9 przedstawiono opady zarejestrowane w wieloleciu 1995–2009, na, leżącej w sąsiedztwie, lecz poza obrębem zlewni Potoku Strzyża, stacji Port Północny [Sikora i Cieśliński, 2015] i na stacji Politechniki Gdańskiej (rys. 2).

Prezentowane roczne sumy opadów dla Portu Północnego są zdecydowanie niższe, niż zaobserwowane na posterunku Politechniki Gdańskiej. Dla lat 2008–2012 i stacji Bystrzec-Reja oraz Matemblewo, sytuacja wygląda podobnie (rys. 10).



Rys. 9. Roczne sumy opadów dla lat 1995-2009, zarejestrowane na stacjach Port Północny [Sikora i Cieśliński 2015 i Politechnika Gdańska]

Fig. 9. Annual precipitation totals in years 1995-2009, precipitation gauges Port Północny [Sikora i Cieśliński 2015 and Gdańsk University of Technology]



Rys. 10. Roczne sumy opadów dla lat 2008-2012, zarejestrowane na stacjach Port Północny [Sikora i Cieśliński 2015], Bystrzec-Reja, Matemblewo i Politechnika Gdańska [Politechnika Gdańska, Gdańskie Melioracje]

Fig. 10. Annual precipitation totals in years 2008-2012, precipitation gauges: Port Północny [Sikora i Cieśliński 2015], Bystrzec-Reja and Gdańsk University of Technology [Gdańsk University of Technology, Gdańskie Melioracje]

Niższe roczne sumy opadów dla stacji Port Północny wynikać mogą z jej specyficznego położenia. Stacja synoptyczna zlokalizowana jest na terenie przymorskim, charakteryzującym się odmiennymi cechami klimatycznymi, niż obszary położone w głębi lądu, na wyższych rzędnych względem poziomu morza. Klimat w rejonie styku morskich i lądowych mas powietrza charakteryzuje się m.in. większą liczbą dni wietrznych, relatywnie niskimi temperaturami w sezonie letnim, a także niższymi opadami. Dodatkowo na częstość i intensywność występowania opadów w aglomeracjach miejskich mają wpływ zyski wilgoci ze źródeł przemysłowych, wzrost koncentracji jąder kondensacji oraz tzw. lokalne wyspy ciepła [Weinerowska-Bords, 2010]. Przeprowadzone w latach 70 w St. Louis w Stanach Zjednoczonych badania wykazały, że opady w mieście były wyższe od tych występujących na obszarach pozamiejskich nawet o 58% [Chelmicki, 2001].

Prawidłowy dobór źródła informacji hydrologicznej, w postaci danych opadowych, pochodzących ze stacji pomiarowych leżących w obrębie zlewni, pozwala uniknąć poważnych błędów m.in. podczas szacowania odpływu z obszarów zurbanizowanych o niejednorodnym ukształtowaniu, pokryciu i zagospodarowaniu, co dalej przedstawiono na przykładzie analizy odpływu ze zlewni Potoku Strzyża w Gdańsku.

Odpływ ze zlewni Potoku Strzyża

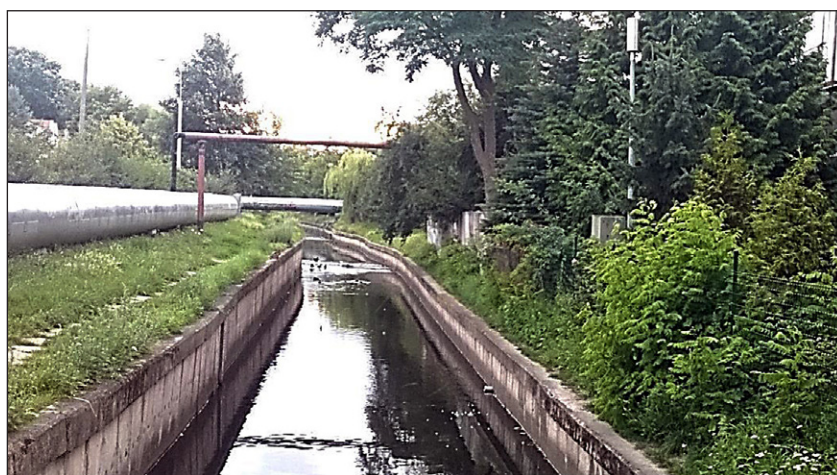
Zapis stanów Potoku Strzyża prowadzony jest w sposób ciągły przez system monitoringu hydrologicznego od roku 2013. Sondy pomia-

ru poziomu zwierciadła wody zlokalizowano w przekrojach takich jak przepusty, przelewy oraz uregulowane odcinki cieków. Dodatkowo Gdańskie Melioracje dysponują informacją na temat stanów rejestrowanych na posterunku pomiarowym Bystrzec-Reja (rys. 11) od roku 2000, w tym zapisem ze stacji automatycznej od 23.05.2001 r.

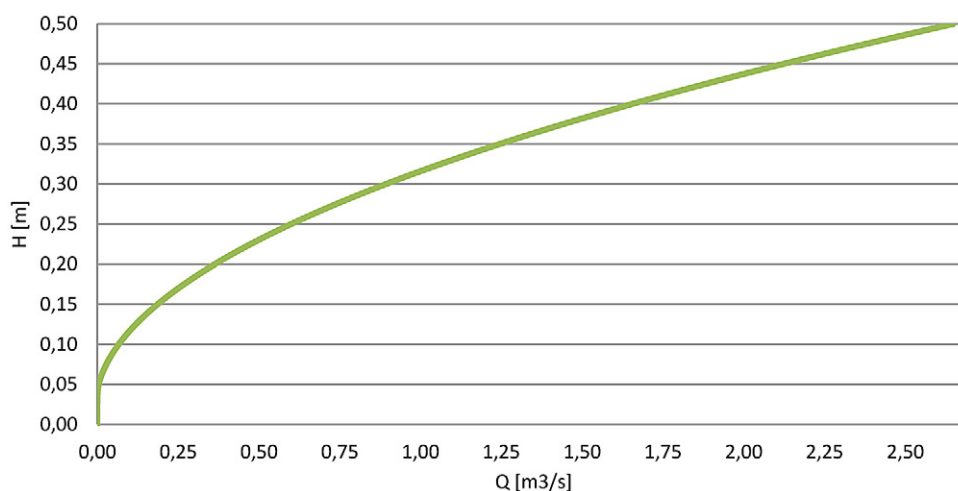
Krzywe charakterystyczne przepływu

W celu oszacowania natężenia przepływu Q w przekrojach kontrolnych Potoku Strzyża wykorzystano podstawowe formuły hydrauliczne. Aby zweryfikować teoretyczne zależności $Q(h)$, dla różnych napełnień koryta h , na każdym z posterunków wykonano serię pomiarów prędkości przepływu za pomocą przenośnej sondy elektromagnetycznej Flo-Mate 2000. Przy znanej geometrii analizowanych sekcji, możliwe było wyliczenie rzeczywistego natężenia przepływu, a następnie porównanie go z przepływem teoretycznym dla stanu, przy którym wykonano pomiar. Przykład zweryfikowanej krzywej charakterystycznej, dla przekroju pomiarowego Bystrzec-Reja zlokalizowanego w ujściowym odcinku potoku, przedstawiono na rysunku 12. Wyznaczona z formuł hydraulicznych krzywa teoretyczna została skorygowana na podstawie pomiarów wykonanych przez Katedrę Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej oraz firmę Res-Con, działającą na zlecenie Gdańskich Melioracji.

Opracowana krzywa konsumcyjna pozwala w wygodny sposób przeliczać zapis monitoringu poziomu wody w korycie potoku, na natężenie przepływu.



Rys. 11. Przekrój kontrolny Bystrzec-Reja, rejon ulicy Reja w Gdańsku (fot. Patrycja Mikos-Studnicka)
Fig. 11. Water stage and precipitation gauge, control cross-section Bystrzec-Reja, ul. Reja in Gdańsk (photo: Patrycja Mikos-Studnicka)



Rys. 12. Zależność $Q(h)$ wyznaczona dla stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Politechnika Gdańska, Gdańskie Melioracje]

Fig. 12. Rating curve $Q(h)$, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańsk University of Technology, Gdańskie Melioracje]

Odpiływ w wieloleciu

Dysponując informacją hydrologiczną w postaci ciągłego zapisu stanów Potoku Strzyża w przekroju kontrolnym Bystrzec-Reja oraz zweryfikowaną krzywą przepływu (konsumcyjną) dla przekroju, w którym prowadzony jest pomiar napnienia koryta, oszacowano odpiływ ze zlewni Potoku Strzyża w wieloleciu 2000–2014. Stacja Bystrzec-Reja leży w ujściowym odcinku potoku, gdzie ciek nie jest już istotnie zasilany zarówno przez kolektory, jak i spływ powierzchniowy. Stąd szacowany w przekroju odpiływ może być uznany za reprezentatywny dla całej zlewni.

W latach 2000–2014 zapis stanów potoku w przekroju Bystrzec-Reja prowadzony był z częstotliwością co 10 oraz co 1 minutę. Automatyka stacji rejestracji poziomu zwierciadła wody uległa w tym okresie kilku awariom, skutkującym przerwami w jej działaniu. Zestawienie poszczególnych lat wraz liczbą dni w roku, kiedy prowadzony był zapis przedstawiono w tabeli 1.

Przykłady rocznych przebiegów stanów Potoku Strzyża, dla lat objętych pełnym zapisem przedstawiono na rysunkach 13, 14 i 15.

Przedstawione na wykresach przebiegi stanów dla lat 2007, 2011 i 2014 obrazują zróżnicowanie rocznych przepływów Potoku Strzyża. Rok 2007 cechuje się licznymi, krótkimi wezbrzeniami opadowymi. Maksymalny stan, zarejestrowany w przekroju Bystrzec-Reja, wyniósł 0,93 m. W roku 2011 można zaobserwować zarówno wezbrzenia sezonowe w półroczu zimowym i letnim, jak i te wywołane opadami. Maksymalny stan dla tego roku wyniósł 0,7 m.

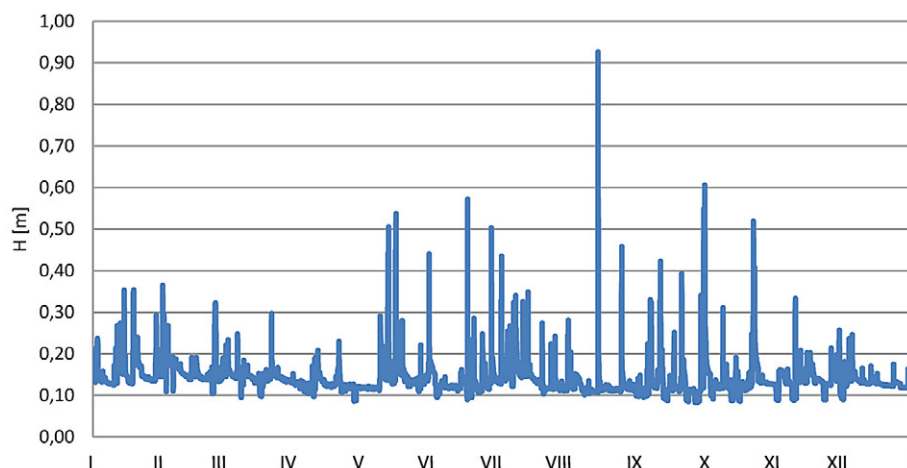
Z kolei w roku 2014 przepływ ma charakter bardzo wyrównany, a amplituda wahań zwierciadła wody jest nieznaczna. Pojawiające się wezbrzenia opadowe osiągają maksymalnie do 0,42 m.

Roczny przebieg stanów Potoku Strzyża, dla roku z niepełnym zapisem przedstawiono na rysunku 16.

Tabela 1. Liczba dni oraz częstotliwość zapisu stanów w latach 2000–2010 na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Politechnika Gdańska, Gdańskie Melioracje]

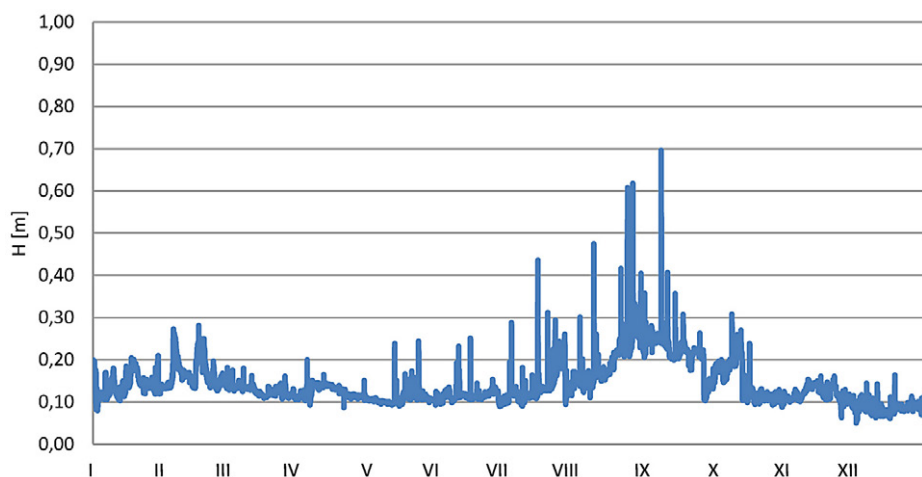
Table 1. Number of days and frequency of the measurements in years 2000–2010, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańsk University of Technology, Gdańskie Melioracje]

| Rok | Liczba dni z zapisem | Częstotliwość pomiaru [min] |
|------|----------------------|-----------------------------|
| 2000 | 153 | 10 |
| 2001 | 325 | 10 |
| 2002 | 310 | 10 |
| 2003 | 352 | 10 |
| 2004 | 276 | 10 |
| 2005 | 357 | 10 |
| 2006 | 341 | 10 |
| 2007 | 365 | 10 |
| 2008 | 364 | 10 |
| 2009 | 257 | 10 |
| 2010 | 112 | 10 |
| 2011 | 365 | 10 |
| 2012 | 296 | 10 |
| 2013 | 364 | 1 |
| 2014 | 365 | 1 |



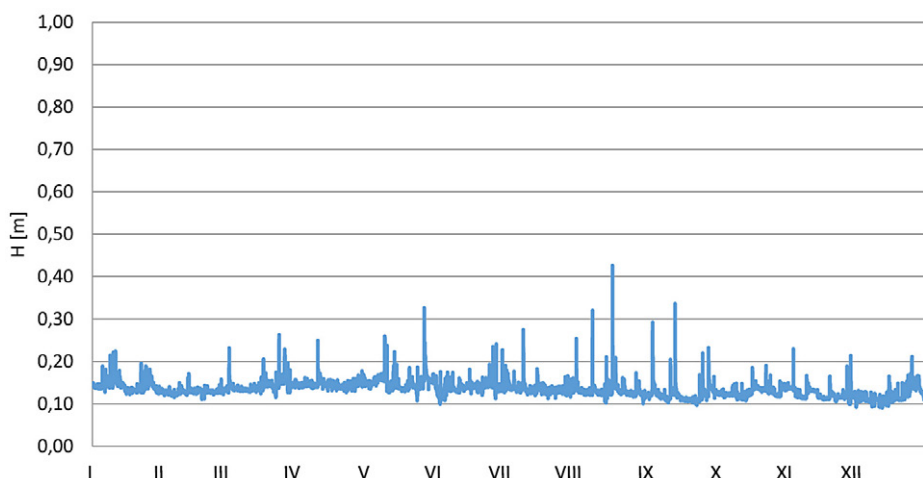
Rys. 13. Stany obserwowane w roku 2007 na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Gdańskie Melioracje]

Fig. 13. Water stages observed in 2007, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańskie Melioracje]



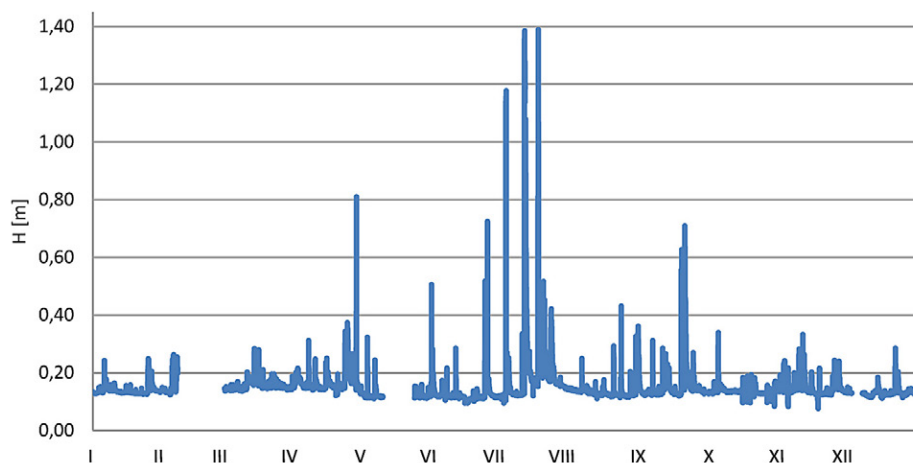
Rys. 14. Stany obserwowane w roku 2011 na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Gdańskie Melioracje]

Fig. 14. Water stages observed in 2011, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańskie Melioracje]



Rys. 15. Stany obserwowane w roku 2014 na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Gdańskie Melioracje]

Fig. 15. Water stages observed in 2014, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańskie Melioracje]



Rys. 16. Stany obserwowane w roku 2001 na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Gdańskie Melioracje]

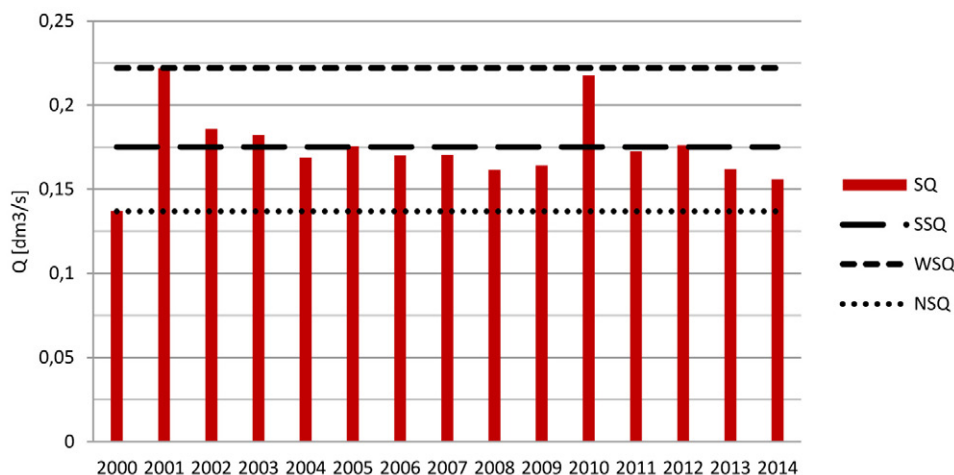
Fig. 16. Water stages observed in 2001, control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańskie Melioracje]

W roku 2001 sonda pomiaru poziomu zwierciadła wody, zlokalizowana na posterunku Bystrzec-Reja, kilkakrotnie ulegała zawieszeniu, co skutkowało niepełnym okresem obserwacji stanów wynoszącym 325 dni. W lipcu 2001 roku miał miejsce w Gdańsku opad katastrofalny, który doprowadził m.in. do awarii zbiornika retencyjnego Srebrzysko. Odpowiedzą na te zdarzenia są zarejestrowane w lipcu, w przekroju kontrolnym, stany maksymalne przekraczające przepływ brzegowy. Stany wynoszące około 1,4 m wykraczają poza zakres rejestracji sondy z powodu wystąpienie Potoku Strzyża z koryta.

Na podstawie zgromadzonych danych hydrologicznych oszacowano średni roczny przepływ w wieloleciu 2000–2014 (rys. 17).

Wartości średnich rocznych przepływów przedstawiono w tabeli 2.

Średnia z przepływów średnich rocznych SSQ w wieloleciu 2000–2014 wyniosła 0,175 m³/s. Największy średni przepływ z wielolecia WSQ wystąpił w roku 2001 i wyniósł 0,222 m³/s. Najmniejszy średni roczny przepływ NSQ wystąpił w roku 2000 i był równy 0,137 m³/s. Poza widocznymi na rysunku 16 dwoma przepływami ekstremalnymi w latach 2001 i 2010 odpływ ze zlewni Potoku Strzyża w wieloleciu 2000–2014 ma charakter wyrównany. W latach 2001 i 2010 średnie roczne opady z posterunku Politechniki Gdańskiej wyniosły odpowiednio 785 mm i 836 mm. Dodatkowo zarówno w roku 2001, jak i 2010 miały miejsce katastrofy zbiorników retencyj-



Rys. 17. Średnie roczne przepływy w wieloleciu 2000–2014 obserwowane na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku

Fig. 17. Average annual flows in years 2000–2014 observed at control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk

Tabela 2. Średnie roczne przepływy w wieloleciu 2000–2014 obserwowane na stacji Bystrzec-Reja, Potok Strzyża w Gdańsku [Gdańskie Melioracje]

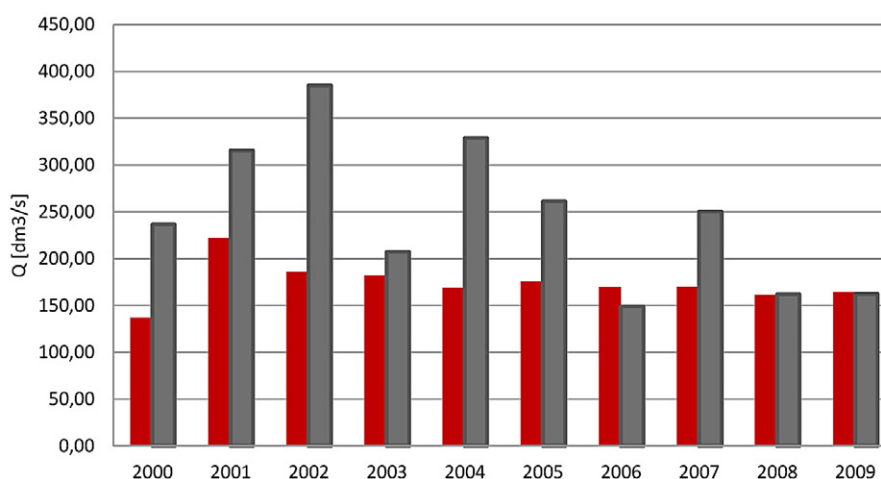
Table 2. Average annual flows in years 2000–2014 observed at control cross-section Bystrzec-Reja, Strzyża Creek in Gdańsk [Gdańskie Melioracje]

| Rok | SQ [m ³ /s] |
|------------|------------------------|
| 2000 | 0,137 |
| 2001 | 0,222 |
| 2002 | 0,186 |
| 2003 | 0,182 |
| 2004 | 0,169 |
| 2005 | 0,175 |
| 2006 | 0,170 |
| 2007 | 0,170 |
| 2008 | 0,161 |
| 2009 | 0,164 |
| 2010 | 0,218 |
| 2011 | 0,172 |
| 2012 | 0,176 |
| 2013 | 0,162 |
| 2014 | 0,156 |
| SSQ | 0,175 |
| WSQ | 0,222 |
| NSQ | 0,137 |

nych zlokalizowanych na potoku. W 2001 roku w czasie katastrofalnego opadu zniszczona została zapora czołowa zbiornika Srebrzysko. W 2010 roku awarii uległ zbiornik retencyjny Nowiec II,

w Gdańsku Matemblewie. Oba zdarzenia w połączeniu z intensywnymi opadami wpłynęły istotnie na wzrost średnich rocznych przepływów. Średni roczny przepływ w 2001 został oszacowany na podstawie 325 dni obserwacji i nie uwzględnia stanów, które wystąpiły po przekroczeniu zakresu zapisu sondy pomiaru poziomu zwierciadła wody, w lipcu po przekroczeniu wody brzegowej ($h > 1,4$ m). Dlatego możliwe, iż wartość przepływu maksymalnego dla tego roku i co za tym idzie przepływ charakterystyczny WWQ, mogą być jeszcze wyższe. Maksymalny przepływ korytowy, przy stanie wody brzegowej w przekroju kontrolnym Bystrzec-Reja wynosi około 22 m³/s.

Zaletą ciągłej obserwacji stanów jest możliwość odwzorowania rzeczywistego reżimu przepływu rzeki. Dla porównania na rysunku 18 przedstawiono średnie roczne przepływy w wieloleciu 2000–2009 obliczone na podstawie ciągłych zapisów automatycznych stacji monitoringu Potoku Strzyża (Politechnika Gdańska) oraz na podstawie pomiaru chwilowego natężenia przepływu, wykonywanego raz w miesiącu dla każdego z analizowanych lat [Sikora i Cieśliński, 2015]. Pomiar raz w miesiącu prowadzony był w rejonie ujścia Potoku Strzyża do Martwej Wisły, z użyciem młynka hydrometrycznego [Nowacki i Szumilas, 2009]. W przypadku cieków cechujących się znaczną dynamiką przepływu, szacowanie średnich przepływów miesięcznych na podstawie pomiaru chwilowego natężenia przepływu nie pozwala precyzyjnie określić zmienność rytmu przepływów w wileleciu.



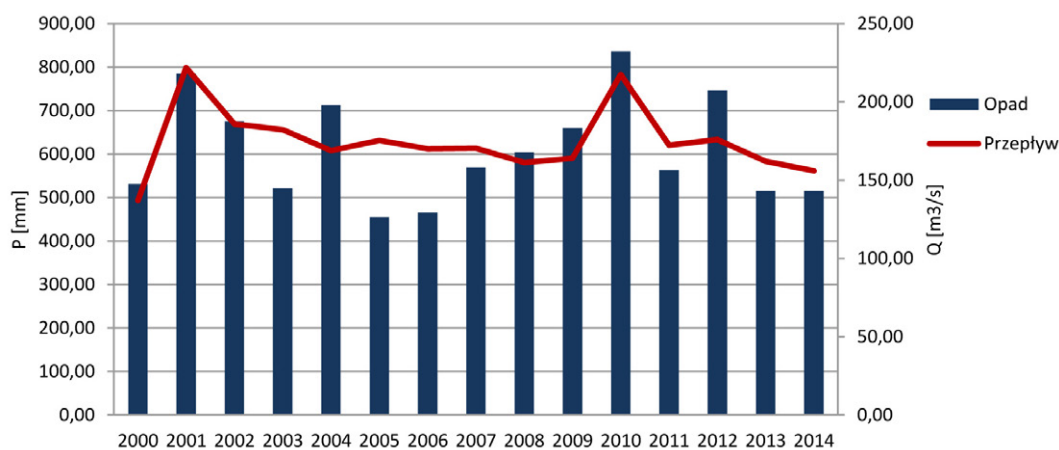
Rys. 18. Średnie roczne przepływy w wieloleciu 2000–2009 obserwowane na stacji Bystrzec-Reja oraz przy ujściu Potoku Strzyża do Martwej Wisły w Gdańsku, kolor szary: przepływy oszacowany na podstawie pomiarów wykonywanych raz w miesiącu [Sikora i Cieśliński, 2015]; kolor czerwony: przepływy oszacowany na podstawie zapisu ciągłego (Politechnika Gdańska)

Fig. 18. Average annual flows in years 2000–2009, observed at control cross-section Bystrzec-Reja and at the estuary of the Strzyża Creek in Gdańsk, grey colour: flow estimated on a basis of monthly measurements [Sikora i Cieśliński, 2015]; red colour: flow calculated on a basis of continuous monitoring (Gdańsk University of Technology)

Przepływy oszacowane na podstawie 12 pomiarów w roku zdecydowanie odbiegają od obliczonych ze wskazań automatycznej sondy pomiaru poziomu zwierciadła wody oraz krzywej charakterystycznej przepływu przekroju Bystrzec-Reja. Największe, bo aż blisko 50%, różnice w natężeniu przepływu dotyczą lat 2002 i 2004. Dodatkowo, dająca się zaobserwować nierównomierność przepływu między kolejnymi latami, szacowanymi na podstawie pomiarów wykonywanych raz w miesiącu, zaburza rzeczywisty obraz ustroju Potoku Strzyża. Potok ten jest ciekim kontrolowanym. W analizowanym okresie w jego zlewni działało już kilka regulujących odpływ zbiorników retencyjnych: Kiełpinek, Nowiec II, Górne Młyny, Ogrodowa, Wileńska, Srebrzysko. Przykład ten obrazuje jednoznacznie, jak znaczący wpływ na oszacowanie odpływu ze zlewni ma jakość danych hydrologicznych.

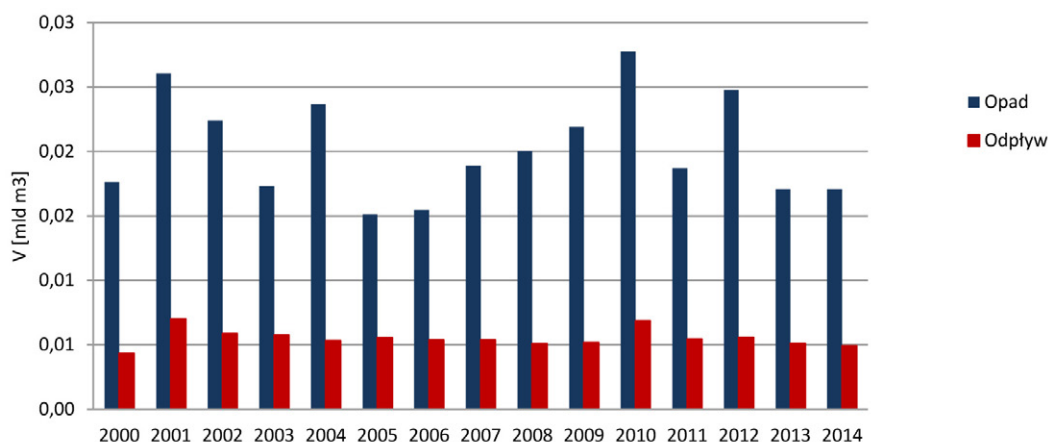
ANALIZA WYNIKÓW

Dzięki dostępnej informacji hydrologicznej na temat opadów oraz przepływów w zlewni Potoku Strzyża możliwe było określenie współczynnika odpływu w wieloleciu 2000–2014. Zmiany sum opadów oraz średnich rocznych przepływów w analizowanym okresie przedstawia rysunek 19. Wartość współczynnika odpływu, obliczonego dla 15 lat obserwacji ciągłej przepływów w przekroju kontrolnym Bystrzec-Reja oraz opadów na posterunku Politechniki Gdańskiej (rys. 20), zawarła się w przedziale od 0,22 dla lat 2004 i 2012, do 0,37 dla roku 2005. Średnia jego wartość wyniosła 0,28 i była zbliżona do współczynnika odpływu Dolnej Wisły wynoszącego 0,3. Wyrównana wartość współczynnika wynika niewątpliwie z obecności w zlewni Potoku Strzyża licznych przepływowych zbiorników retencyjnych regulujących odpływ.



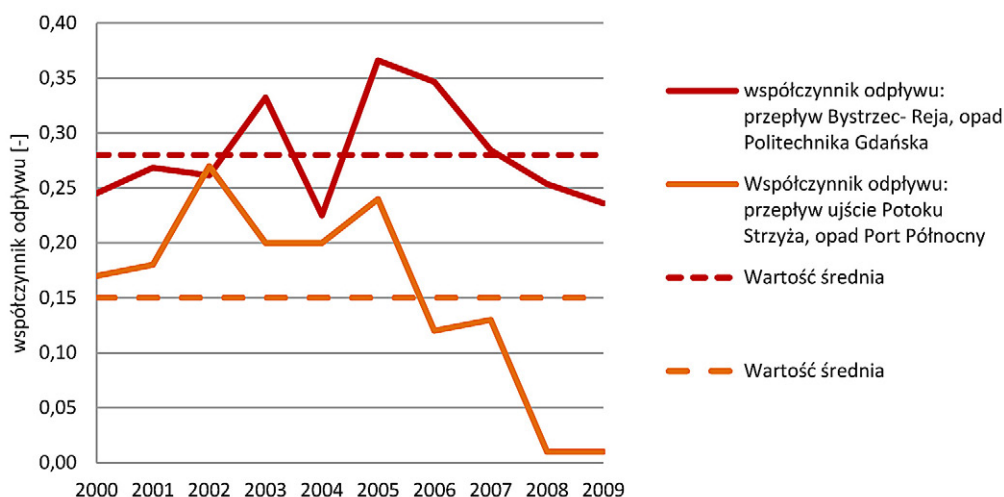
Rys. 19. Średnie roczne przepływy na stacji Bystrzec-Reja i roczne sumy opadów ze stacji opadowej Politechnika Gdańska w wieloleciu 2000–2014

Fig. 19. Average annual flows at control cross-section Bystrzec-Reja and annual precipitation totals observed at precipitation gauge Gdańsk University of Technology, years 2000–2014



Rys. 20. Roczne objętości opadu na posterunku Politechnika Gdańska oraz odpływu skumulowanego w przekroju kontrolnym Bystrzec-Reja w wieloleciu 2000–2014, Potok Strzyża w Gdańsku

Fig. 20. Annual precipitation volumes observed at precipitation gauge Gdańsk University of Technology and cumulative outflow volumes observed at control cross-section Bystrzec-Reja, years 2000–2014, Strzyża Creek in Gdańsk



Rys. 21. Wartość współczynnika odpływu ze zlewni Potoku Strzyża w wieloleciu 2000–2009, obliczona na podstawie ciągłej obserwacji przepływów w przekroju Bystrzec-Reja i opadów z posterunku Politechnika Gdańska oraz na podstawie pomiarów przepływu wykonywanych raz w miesiącu przy ujściu potoku do Martwej Wisły i opadów ze stacji Port Północny [Sikora i Cieśliński, 2015]

Fig. 21. The Strzyża Creek catchment annual runoff coefficient in years 2000–2009, calculated on a basis of continuous monitoring of flow at control cross-section Bystrzec-Reja and rainfall observations at precipitation gauge Gdańsk University of Technology, and on a basis of monthly instantaneous flow measurements and rainfall observations from the precipitation gauge localized in the vicinity of the Strzyża Creek catchment [Sikora i Cieśliński, 2015]

W celu podkreślenia istotności właściwego doboru i jakości danych hydrologicznych obliczony współczynnik odpływu można porównać z oszacowaniem tego parametru przedstawionym przez autorów Sikora i Cieśliński [2015]. We wspomnianej publikacji do oszacowania wartości współczynnika dla zlewni Potoku Strzyża, wykorzystano dane opadowe ze stacji synoptycznej Port Północny zlokalizowanej poza zlewnią tego potoku oraz szacunkowe średnie przepływy roczne przyjęte na podstawie comiesięcznych pomiarów przepływu chwilowego. Na rysunku 21 przedstawiono wartości współczynników odpływu z dziesięciolecia 2000–2009, obliczonych na podstawie ciągłej obserwacji przepływów w przekroju Bystrzec-Reja i opadów na posterunku Politechniki Gdańskiej oraz na podstawie pomiarów przepływu wykonywanych raz w miesiącu przy ujściu potoku do Martwej Wisły i danych opadowych pochodzących ze stacji Port Północny [Nowacki i Szumilas, 2009; Sikora i Cieśliński, 2015].

Obliczone na podstawie obu źródeł danych hydrologicznych współczynniki odpływu znacznie się różnią. O ile wartość obliczona na podstawie danych z ciągłego monitoringu hydrologicznego opadu i przepływu jest w większości lat wyrównana, to współczynnik oszacowany na podstawie opadu spoza zlewni i comiesięcznych pomiarów hydrometrycznych przepływu znacząco zmienia swoją roczną wartość i istotnie odbiega od war-

tości rzeczywistych. Wartość średnia tego współczynnika w analizowanym wieloleciu wyniosła 0,15. Skłania to do konkluzji, że w procesie wyznaczania współczynnika odpływu ze zlewni miejskich niezbędny jest ciągły monitoring parametrów hydrologicznych. W przeciwnym razie, wykorzystanie tylko chwilowych wartości natężenia przepływu oraz opadów z posterunków niereprezentatywnych pod względem lokalizacji w zlewni, prowadzić może do zafałszowania rocznej wartości współczynnika odpływu. W przypadku zlewni zurbanizowanej bardzo istotne są bowiem zarówno przestrzenna zmienność opadów, jak i zmienność przepływu w trakcie roku hydrologicznego.

PODSUMOWANIE

Jakość danych hydrologicznych ma kluczowy wpływ na oszacowanie charakterystyk cieków i ich zlewni. Pochodzenie i reprezentatywność takiej informacji jak roczne natężenie przepływu, czy roczna suma opadów, jest szczególnie istotne w przypadku zlewni zurbanizowanych. Dzięki znajomości reżimu rzeczno-eg oraz charakterystyk dotyczących przestrzennej i czasowej zmienności opadu, możliwe jest zarówno odpowiednie projektowanie systemów melioracyjnych miasta, jak i zabezpieczenie go przed ewentualnymi skutkami lokalnych powodzi, będących następstwem opadów nawalnych.

Dobór źródła informacji na temat opadów w zlewni powinien spełniać kryterium reprezentatywności, co do lokalizacji, w której wykonywano pomiary. W zlewniach miejskich, o zmiennych formach zagospodarowania terenu i ukształtowania powierzchni, czasoprzestrzenna struktura opadów jest widoczna już na posterunkach oddalonych od siebie o zaledwie kilka kilometrów. Prawidłowe oszacowanie średnich rocznych sum opadów determinuje wartość współczynnika odpływu ze zlewni. W niniejszym artykule wykazano jak znacząco różnią się między sobą średnie sumy opadów z wielolecia 2000–2009, pochodzące z posterunku opadowego Politechniki Gdańskiej, leżącego w środkowej części zlewni Potoku Strzyża, oraz stacji opadowej Port Północny zlokalizowanej w jej sąsiedztwie.

Średnie roczne przepływy w przypadku zlewni miejskich powinny być obliczane na podstawie ciągłego monitoringu hydrologicznego. Określanie ich wyłącznie na bazie comiesięcznych pomiarów chwilowego natężenia przepływu prowadzi do znaczących błędów, co do ich wielkości, a także do zafałszowanego obrazu przebiegu zmian przepływu w wieloleciu. Przykładem wykorzystania zbyt ubogiej informacji hydrologicznej jest przytaczany w artykule sposób oszacowania średnich rocznych przepływów dla Potoku Strzyża tylko na podstawie pomiarów raz w miesiącu. Podejście to spowodowało nawet blisko 50% różnice pomiędzy natężeniem średniego rocznego przepływu obliczanego na podstawie zapisu ciągłego monitoringu stanów w przekroju kontrolnym Bystrzec-Reja, a przepływem określonym na podstawie pomiarów chwilowego wydatku mierzonego raz w miesiącu przy ujściu ciek do Martwej Wisły. Dodatkowo efektem wykorzystania niepełnej informacji hydrologicznej była znaczna nierównomierność oszacowanego średniego przepływu rocznego między kolejnymi latami, co zdecydowanie zaburzyło rzeczywisty obraz ustroju Potoku Strzyża.

Prawidłowy dobór informacji hydrologicznej na temat opadów i przepływów pozwala precyzyjnie określić wartość współczynnika odpływu ze zlewni. Przykład Potoku Strzyża obrazuje jak bardzo może różnić się średni współczynnik odpływu obliczony na podstawie danych z ciągłego zapisu opadu i przepływu, od tego oszacowanego na podstawie opadu spoza zlewni i comiesięcznych pomiarów chwilowego natężenia przepływu. W pierwszym przypadku średni współczynnik odpływu ze zlewni Potoku Strzyża w wieloleciu 2000–2009 wyniósł 0,28, natomiast w podejściu drugim był znacznie zaniżony i wyniósł 0,15.

Powyższe rozważania skłaniają do refleksji na temat koniecznej ostrożności i dokładności podczas doboru źródła danych hydrologicznych mających służyć do określania charakterystyk cieków i zlewni miejskich oraz wartości jakie niesie ze sobą prowadzenie ciągłego monitoringu parametrów hydrologicznych na terenie miast, gdzie cieki powierzchniowe pełnią funkcję odbiorników odpływu wód opadowych i roztopowych.

LITERATURA

1. Chelmiński W., 2001. Woda – zasoby, degradacja, ochrona. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
2. Cyberski J. (red.) 2003. Powódź w Gdańsku 2001. Praca zbiorowa. GTN, Wydział Nauk o Ziemi, Gdańsk.
3. Nowacki J., Szumilas T. (red.) 2010. Monitoring cieków wodnych w Gminie Gdańsk w roku 2009. Gdański Uniwersytet Medyczny, Wydział Środowiska Urzędu Miejskiego w Gdańsku, materiały niepublikowane.
4. Pociask-Karteczka J. (red.) 2003. Zlewnia. Właściwości i procesy. IGiP UJ, Kraków.
5. Sikora M., Cieśliński R., 2015. Kształtowanie się odpływu w zlewni zurbanizowanej na przykładzie zlewni Strzyży. *Inżynieria Ekologiczna* 41, 69–78.
6. Szydłowski M., Zima P., 2013. Zastosowanie modelu opad-odpływ do oszacowania spływu wód opadowych z górnej części zlewni potoku Strzyża w Gdańsku, poprzedzającego awarię zbiornika Nowiec II. B. Więzik (red.) Problemy obliczania przepływów ekstremalnych w zlewniach kontrolowanych i niekontrolowanych. Tom II. Warszawa: Komitet Gospodarki Wodnej PAN, 2013, 83–100.
7. Szydłowski M. (red.) 2011. Monitorowanie, modelowanie i analiza zagrożenia powodziowego w małej zlewni miejskiej na przykładzie zlewni Potoku Strzyża w Gdańsku. Umowa nr WFO-S/D/201/162/2011 zawarta między Wojewódzkim Funduszem Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku a Politechniką Gdańską.
8. Weinerowska-Bords K. 2010. Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej. Wyd. Polit. Gdańskiej.
9. Weinerowska-Bords K., Szydłowski M., Bielecka K., 2012. Analiza czasowej i przestrzennej zmienności opadów w zlewni Potoku Strzyża w Gdańsku. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 6, 490–500.
10. Wołoszyn E. 2009. Analysis of rainfall data of gdansk meteorological station. [In:] Proc. of International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering. Orhid, Macedonia, 1-5 September 2009, 675–684.