

Analiza wybranych jednostek bilansów zapotrzebowania wody w aspekcie zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi

Mgr inż. Aleksandra Pieniaszek – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Dr Piotr Szymański – Wyższa Szkoła Gospodarki w Bydgoszczy, Instytut Ekonomii i Zarządzania

Zgodnie z ustawą [16] z dnia 7 czerwca 2001 roku o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków Przedsiębiorstwa Wodociągowo-Kanalizacyjne są zobowiązane do dostarczenia wody w wymaganej ilości, jakości i pod odpowiednim ciśnieniem oraz odprowadzania w sposób ciągły i niezawodny ścieków o należytej jakości. Podstawą wyznaczania zapotrzebowania wody i ilości odprowadzanych ścieków są bilanse wodno-ściekowe opracowywane zgodnie z Rozporządzeniem [11], na podstawie danych własnych PWK [20] oraz norm i wytycznych [19]. Z reguły przyczynia się to do optymalizacji procesu produkcji wody dla ujęć i stacji uzdatniania (SUW). Pomimo zmniejszenia poboru wody wodociągowej wskutek wprowadzenia opłat uwzględniających koszty jej wytworzenia i dystrybucji Polska nadal jest zagrożona deficytem wody. Zasoby dyspozycyjne wody pitnej naszego kraju należą do najuboższych w Europie [15, 18]. Ilość wody produkowanej na cele komunalne ma niebagatelne znaczenie nie tylko dla gospodarki wodno-ściekowej, ale również dla środowiska naturalnego. Coraz częściej występujące w naszej strefie klimatycznej ekstremalne zjawiska pogodowe w postaci długich okresów bezdeszczowych prowadzą do znacznych niedoborów wody. Ciągłe uszczelnianie powierzchni [2] zurbanizowanych prowadzi do przesuszania gruntu, gdyż wody opadowe odprowadzane są systemami kanalizacyjnymi poza tereny miejskie bądź do oczyszczalni ścieków. W rezultacie następuje powolne zmniejszanie zasobów wód gruntowych, które nie są zasilane przez infiltrujące wody opadowe.

W związku z tym konieczne jest wprowadzanie rozwiązań mających na celu ochronę zasobów wodnych, a z pewnością przeciwdziałanie ich pomniejszeniu, poprzez implementację rozwiązań z zakresu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi [2]. Punktem wyjścia może i powinna być weryfikacja bilansów zapotrzebowania na wodę, rzeczywistej ilości pobieranej wody oraz ilości odprowadzanych ścieków. Tego rodzaju analizy mogą wykazać potencjalne wielkości zapotrzebowania na wodę, które można by zaspokoić przez wody o obniżonej jakości, na przykład wody opadowe.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, w pracy postawiono następujące cele:

- analiza czynników wpływających na sezonowy wzrost poboru wody wodociągowej i wyodrębnienie jej ilości przeznaczonej na cele gospodarcze,
- analiza możliwości zmniejszenia poboru wody wodociągowej na podlewanie ogrodów, mycie placów i ulic, podlewanie zieleni miejskiej na przykładzie jednostkowych wskaźników zapotrzebowania na wodę, w aspekcie implementacji rozwiązań z zakresu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

METODYKA BADAŃ

Opis analizowanego miasta i systemu – obiekt badań

Analizy przeprowadzone w niniejszej pracy wykonano dla miasta Świecie, położonego w województwie kujawsko-pomorskim, w odległości około 50 km od Bydgoszczy i Torunia. Miasto zamieszkuje [12] około 26 tys. osób, a całą gminę około 33 tys. osób.

Pod względem geomorfologicznym Świecie położone jest na Pojezierzu Południowobałtyckim [12] w obrębie makroregionu Pojezierza Południowopomorskiego i w odległości około 800 m od Doliny Dolnej Wisły, w strefie krawędziowej Wysoczyzny Świeckiej, przez którą przepływa rzeka Wda.

Gospodarka wodno-ściekowa miasta i gminy Świecie korzysta z 6 ujęć wody (ujęcia głębinowe), a ścieki komunalne (po mechanicznym podczyszczeniu) kierowane są na przemysłową, biologiczną oczyszczalnię ścieków zlokalizowaną na terenie zakładu papierniczego „Mondi Świecie S.A.”.

Na terenie miasta Świecie funkcjonują 4 ujęcia wody [8]: w Morsku (pobór 350,0 m³/h), przy ul. Parkowej (pobór 93,5 m³/h), przy ul. Słowackiego (pobór 78,0 m³/h), przy ul. Sienkiewicza (pobór 49,0 m³/h). Gminne ujęcia są zlokalizowane w miejscowościach Terespol Pomorski oraz Gruczno i pracują łącznie ze średnią wydajnością około 624 m³/d [12, 20]. Według danych pomiarowych udostępnionych przez ZWiK w Świeciu [20] w latach 2012-2018 do sieci wodociągowej wtłaczano średnio 4 715 m³/d wody (ze wszystkich ujęć).

System kanalizacji miasta Świecie [8] jest układem grawitacyjno-ciśnieniowym (10 pompowni ścieków o łącznej wydajności około 2 500 m³/h). Jednocześnie system można sklasyfikować jako układ kanalizacji mieszanej, z rozdzielczą kanalizacją sanitarną i deszczową, kanałami ogólnospławnymi, ale i występującymi kanałami o funkcji mieszanej (prowadzą ścieki sanitarne i deszczowe, w wyniku nielegalnych lub błędnych podłączeń do systemu).

Bilans zapotrzebowania wody i ilości odprowadzanych ścieków – dane i założenia

Bilans zapotrzebowania wody i ilości odprowadzanych ścieków wykonano dla liczby mieszkańców zgodnej z danymi GUS, która zamieszkuje obszar objęty analizami (Miasto Świecie, Gruczno, Terespol). Liczba ta w okresie badawczym wynosiła 28 107 osób.

Tabl. 1. Założenia do bilansu zapotrzebowania wody. Opracowanie własne

Lp.	Zapotrzebowanie	j.o.*	według [1]		według [11]		według [19]		według [20]		przyjęte	
			q_j^*	N_d^*	q_j^*	N_d^*	q_j^*	N_d^*	q_j^*	N_d^*	q_j^*	N_d^*
			dm ³ / j.o./d*	–	dm ³ / j.o./d*	–	dm ³ / j.o./d*	–	dm ³ / j.o./d*	–	dm ³ / j.o./d*	–
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Mieszkalnictwo wielorodzinne	M	160	1,1	160	–	230	1,5	125	1,5	125	1,5
2	Mieszkalnictwo jednorodzinne	M	100	1,2	100		200	2,0	100	1,5	100	1,5
3	Mieszkalnictwo – podlewanie ogrodów	m ²	2,0	2,0	2,5		12	6,0	1,0	6,0	1,0	6,0
4	Usługi i urzędy	M	25	2,0	–		65	1,3	24	1,3	24	1,3
5	Komunikacja zbiorowa	M	20	2,0	–		7	1,2	4,0	1,2	4,0	1,2
6	Mycie placów i ulic	M	30	2,4	–		13	2,6	10	2,4	10	2,4
7	Polewanie zieleni miejskiej	M	30	2,0	–		15	6,0	10	6,0	10	6,0
8	Tereny przemysłowe	M	10	2,0	–		100	1,20	12	1,25	12	1,25

* j.o. – jednostka obmiarowa; q_j – jednostkowe zapotrzebowanie wody, N_d – współczynnik nierównomierności dobowej; dm³/j.o./d – jednostka zapotrzebowania na wodę wyrażona w litrach na mieszkańca (lub metr kwadratowy) w ciągu doby

Wielkości jednostkowego zapotrzebowania na wodę dla poszczególnych jednostek bilansowych (potrzeby wodociągu komunalnego) oparto o wytyczne [1, 8, 19], Rozporządzenie [11] oraz dane eksploatacyjne gestora sieci [20]. Bilans wykonano dla wodociągu komunalnego bez uwzględniania potrzeb technologicznych ZWiK (w tym SUW), które przyjmowane są jako wartości 10 ÷ 15% średniodobowego zapotrzebowania na wodę.

Wartości jednostkowego zapotrzebowania na wodę przyjęto według założeń (tabl. 1 – kolumna 11):

- zapotrzebowanie wody dla mieszkalnictwa, dla grupy 4 i 5 (o których mowa w [11]);
- jednostką odniesienia na zapotrzebowanie wody do podlewania ogródków [1, 11, 19] jest 1 m²; dla każdego od-

biorcy (w analizowanym okresie średnio 928 podliczników według [20]) przyjęto powierzchnię do podlewania 100 m²;

- zgodnie z [1, 19] jednostką odniesienia zapotrzebowania wody do celów ogólnokomunalnych, to jest potrzeb komunikacji zbiorowej, mycia placów i ulic, polewania zieleni miejskiej, a także dla jednostek „usługi i urzędy” oraz „tereny przemysłowe”, jest 1M (mieszkaniec);
- współczynniki nierównomierności dobowej wyznaczono na podstawie założeń eksploatatora [20].

Bilans ilości ścieków odprowadzanych do oczyszczalni wykonano na podstawie założeń (tabl. 2 – kolumna 5):

Tabl. 2. Założenia do bilansu ilości odprowadzanych ścieków. Opracowanie własne

Lp.	Odpływ ścieków	j.o.*	według [19]	według [20]	przyjęte
			s%*	s%*	s%*
			dm³/j.o./d*	dm³/j.o./d*	dm³/j.o./d*
	1	2	3	4	5
1	Mieszkalnictwo wielorodzinne	M	95	90	90
2	Mieszkalnictwo jednorodzinne	M	95	90	90
3	Mieszkalnictwo – podlewanie ogrodów	m²	0	0	0
4	Usługi i urzędy	M	95	90	90
5	Komunikacja zbiorowa	M	100	100	100
6	Mycie placów i ulic	M	25	10	10
7	Polewanie zieleni miejskiej	M	0	0	0
8	Tereny przemysłowe	M	85	85	85

* j.o. – jednostka obmiarowa; s% – procentowy odpływ ścieków w stosunku do zapotrzebowania na wodę, dm³/j.o./d – jednostka odpływu ścieków, wyrażona w litrach na mieszkańca (lub metr kwadratowy) w ciągu doby

- ilość ścieków dopływających do systemu kanalizacyjnego przyjęto jako wartość procentową zapotrzebowania wody na poszczególne cele;
- współczynnik nierównomierności dobowej przyjęto dla mieszkalnictwa $N_d = 1,5$, a dla pozostałych (generujących odpływ do kanalizacji) jednostek bilansowych $N_d = 1,6$.

Dane pomiarowe

Analizom poddano ilości uzdatnionej wody wtłoczonej do sieci wodociągowej i ścieków odprowadzanych do zakładowej oczyszczalni, mierzone w interwałach dobowych, przez eksploatatora i właściciela sieci, to jest Zakład Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Świeciu [20]. Analizowano również zużycie wody do podlewania ogrodów (odczyty podliczników tzw. wodomierzy ogrodowych) w miesięcznych krokach czasowych. Pomiary dotyczyły ilości wody wodociągowej wtłoczonej do sieci ze wszystkich ujęć na terenie miasta i gminy Świecie, które łącznie pracują na zlewnię kanalizacyjną oczyszczalni ścieków przy zakładzie „Mondi Świecie S.A.” (opomiarowana ilość odprowadzanych ścieków podlegająca rozliczeniom przez ZWiK Sp. z o.o. w Świeciu). Dane dotyczące opadów uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej [6], dla stacji opadowych Osie (kod stacji 253180120), Grudziądz (kod stacji 253180150) oraz Nowy Jasiniec (kod stacji 253180170) i klimatycznej (pomiaru średniej dobowej: temperatury, prędkości wiatru, wilgotności względnej powietrza, ciśnienia pary wodnej) na stacji Toruń (kod stacji 353180250). Pomiary wykonywane były w okresie od 1 stycznia 2013 do 31 października 2018 roku.

Analizy danych – metodyka

Analizy wykonano w programie Statistica [13] oraz w arkuszach kalkulacyjnych programu Microsoft Excel, w których wykonano bilanse wodno-ściekowe, zestawiono dobowe dane pomiarowe uzyskane z ZWiK w Świeciu, IMGW oraz wyznaczone w toku badań zmienne mogące mieć wpływ na sezonowy wzrost zużycia wody wodociągowej, to jest:

- ilość wody wtłoczonej do sieci wodociągowej [m^3/d];
- wysokość opadu atmosferycznego w ciągu doby [mm];
- wysokość opadu atmosferycznego w ciągu doby – po odparowaniu według wzoru (5) [mm];
- niedosyt wilgotności powietrza według wzoru (5.2) [hPa];
- średnia dobową temperaturę [$^{\circ}\text{C}$];
- średnia dobową wilgotność względną [%];
- współczynnik wyrażający iloraz ilości odprowadzanych na oczyszczalnię ścieków i ilości wody wtłoczonej do sieci wodociągowej – według wzoru (6).

Bilans zapotrzebowania wody i ilości odprowadzanych ścieków dla okresu badawczego opracowano na podstawie wzorów:

$$Q_{sr\ d_w} = q_j \cdot \frac{j.o.}{1000} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{sr\ d_w}$ – średniodobowe zapotrzebowanie na wodę [m^3/d],

$j.o.$ – liczba mieszkańców bądź średnia powierzchnia do podlewania przyjęta jako $100 \text{ m}^2/\text{odbiorcę}$,

$$Q_{max\ d_w} = Q_{sr\ d_w} \cdot N_{d_w} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{max\ d_w}$ – maksymalne dobowe zapotrzebowanie na wodę [m^3/d],

N_{d_w} – współczynnik nierównomierności dobowej zapotrzebowania wody,

$$Q_{sr\ d_s} = Q_{sr\ d_w} \cdot s\% \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{sr\ d_s}$ – średniodobowy odpływ ścieków do systemu kanalizacyjnego [m^3/d],

$s\%$ – procentowy odpływ ścieków względem zapotrzebowania wody dla danej jednostki bilansowej,

$$Q_{max\ d_s} = Q_{sr\ d_s} \cdot N_{d_s} \quad [\text{m}^3/\text{d}] \quad (4)$$

gdzie:

$Q_{max\ d_s}$ – maksymalny dobowy odpływ ścieków [m^3/d],

N_{d_s} – współczynnik nierównomierności dobowej dla odpływu ścieków.

Na podstawie danych pomiarowych przeanalizowano ciąg danych obejmujący 2 130 przypadków, zestawionych w dobowe szeregi czasowe. Dane odstające od pomiaru ilości wody wodociągowej wtłoczonej do sieci (po weryfikacji przez ZWiK w Świeciu) zastąpiono średnimi arytmetycznymi dwóch sąsiednich pomiarów. Zakwalifikowano do nich pomiary z dni, w których wystąpił nagły wzrost poboru wody (ponad wartość oczekiwaną dla danego okresu) spowodowany przez:

- awarię w sieci (odnotowaną przez eksploatatora sieci) - w dniu 03.03.2014 roku;
- pożary (według raportów Komendy Miejskiej Państwowej Straży Pożarnej w Świeciu) – w listopadzie i grudniu 2013 roku, w lutym i marcu 2015 roku.

Dokładne wartości liczbowe pobranej wody na powyższe cele są niemożliwe do określenia (znane dane szacunkowe). Ze względu na awarię systemu kontrolno-pomiarowego ścieków odprowadzanych do oczyszczalni „Mondi” w okresie 17.05.2013 do 24.06.2013 roku z analiz usunięto dni pomiarowe do dnia następującego po wznowieniu pracy systemu. Spowodowało to zmniejszenie liczby przypadków do $N = 1\,955$ (okres badawczy od 25.06.2013 do 31.10.2018 roku).

Zmienne przeanalizowano pod kątem [9]:

- miar tendencji centralnych – mediana, moda (dominanta), średnia arytmetyczna;
- miar rozproszenia – odchylenie standardowe, wariancja;
- miar kształtu rozkładu – skośność i kurtოza.

Wyznaczono korelacje pomiędzy poszczególnymi zmiennymi zależnymi i niezależnymi.

Wprowadzone na podstawie uzyskanych danych pomiarowych zmienne zależne:

A) wysokość opadu atmosferycznego po odparowaniu na podstawie [4, 7, 10]:

wyznaczono wysokość opadu jaka w ciągu doby może odparować przy znanej temperaturze średniej powietrza (pomiaru IMGW [6]) według wzoru:

$$O_{eh} = E_{ah} - O \quad (5)$$

$$E_{ah} = 0,26\Delta_h(1 + 0,4v) \quad (5.1)$$

$$\Delta_h = e_{sh} - e \quad (5.2)$$

$$e_{sh} = \frac{e \cdot 100}{f} \quad (5.3)$$

gdzie:

O_{eh} – wysokość opadu atmosferycznego po odparowaniu (w funkcji wilgotności względnej powietrza) [mm];

O – wysokość opadu atmosferycznego [mm];

E_{ah} – czynnik aerodynamiczny ewapotranspiracji [mm/d];

Δ_h – niedosyt wilgotności powietrza [hPa];

e_{sh} – prężność pary wodnej [hPa];

e – aktualna prężność pary wodnej (pomiar IMGW [6]) [hPa];

v – prędkość wiatru (pomiar IMGW [6]) [m/s];

T – temperatura powietrza (pomiar IMGW [6]) [°C];

f – wilgotność względna powietrza (pomiar IMGW [6]) [hPa];

B) w celu oszacowania ilości wody wodociągowej pobieranej do celów gospodarczych (nieodprowadzanej do systemu kanalizacyjnego) wprowadzono zmienną – współczynnik sw – będący ilorazem ilości odprowadzanych do oczyszczalni ścieków i ilości wtłoczonej do sieci wody wodociągowej, opisany wzorem:

$$sw = \frac{Q_{sr d_k}}{Q_{sr d_w}} \quad (6)$$

gdzie:

$Q_{sr d_k}$ – średnia dobowo ilość odprowadzanych do oczyszczalni ścieków [m³/d];

$Q_{sr d_w}$ – średnia dobowo ilość wody wodociągowej wtłoczonej do sieci [m³/d];

sw – współczynnik ścieki / woda (*sewage / water*) z wyodrębnionymi trzema przedziałami opisanymi w rozdziale dotyczącym wyników analiz.

Zmienne przeanalizowano w szeregach czasowych jednodobowych i miesięcznych.

Dane zweryfikowano również pod kątem zgodności z wykonanym bilansem (tabl. 3) zapotrzebowania wody i ilości odprowadzanych ścieków dla miasta Świecie w latach 2013-2018. Wykonano bilans wodno-ściekowy skorygowanych wartości wskaźników jednostkowych (tabl. 7) w celu uwidocznienia ilości wody wodociągowej pobieranej do celów gospodarczych a możliwej do zastąpienia przez wody o obniżonej jakości (na przykład wody opadowe).

WYNIKI I DYSKUSJA

Zgodnie ze schematem ideowym (rys. 1) dostarczana woda wodociągowa przeznaczana jest na różne cele, włącznie z podlewaniem ogrodów, polewaniem zieleni miejskiej czy myciem placów i ulic. Jednak zgodnie z założeniami pracy nie wszystkie potrzeby wymagają pokrycia zapotrzebowania wodą o wysokiej jakości przeznaczonej do spożycia przez ludzi.

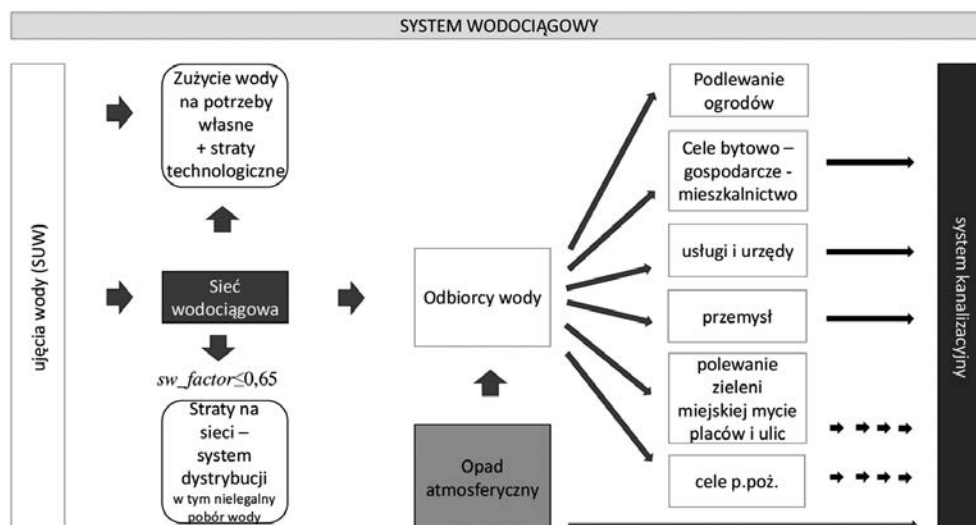
Przeprowadzono analizy jednostek bilansowych zapotrzebowania wody na cele gospodarcze oraz korelacji pracy systemu wodociągowego miasta Świecie i warunków klimatycznych oraz atmosferycznych w aspekcie możliwości wykorzystania rozwiązań z zakresu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

Charakterystyka porównawcza danych bilansowych i pomiarowych (rzeczywistych)

Przeprowadzone analizy zmiennych „pobór wody” i „odpływ ścieków” wykazały, że wartości średniodobowe $Q_{sr d}$ wyznaczone w bilansie zapotrzebowania wody i odprowadzania ścieków (tabl. 3) są wartościami zbliżonymi do danych rzeczywistych (różnica rzędu około 5%), co umożliwia ich porównywanie.

Dla obu zmiennych, zestawionych w szeregi dobowe, wykonano analizy statystyczne (tabl. 4). Rozkłady zmiennych były zbliżone do rozkładu normalnego, z wyraźną prawoskośnością (SKE), co oznacza większą liczbę wyników pomiarów zbliżonych do średniej.

Wykazano, że wartości miar tendencji centralnych poboru wody wodociągowej (tabl. 4) są wielkościami porównywalnymi z wartościami bilansowymi ($Q_{sr dw} = 4\,966\text{ m}^3/\text{d}$). Wartości maksymalne różnią się znacząco (maksimum – $7\,520\text{ m}^3/\text{d}$, przy wyznaczonej w bilansie wartości $Q_{max d}$ poboru wody wynoszącej $9\,062\text{ m}^3/\text{d}$ – różnica sięgająca 20%), co może świadczyć o zbyt dużych wartościach wskaźników jednostkowych zapotrzebowania wody przyjmowanych w bilansach. Rozrzut wartości pomiarowych scharakteryzowano przez wartość odchylenia standardowego $\sigma = 583$ i współczynnik zmienności $V = 12\%$. Pobór



Rys. 1. Schemat ideowy systemu wodociągowego miasta średniej wielkości (opracowanie własne)

Tabl. 3. Bilans wodno-ściekowy analizowanego obszaru (opracowanie własne)

Lp.	Elementy zagospodarowania przestrzennego	Jednostka odniesienia		q_j	Zapotrzebowanie wody $Q_{sr d w}$	Zapotrzebowanie wody $Q_{max d w}$	Odpływ ścieków $Q_{sr d s}$		Odpływ ścieków $Q_{max d s}$
		j.o.	ilość				s%	[m³/d]	
1.	Mieszkalnictwo_wielorodzinne	M	15658	125,0	1957	2936	90	1762	2642
	Mieszkalnictwo_jednorodzinne	M	12449	100,0	1245	1867	90	1120	1681
2.	Mieszkalnictwo_podl ogrodów	m²	92800	1,0	93	464	0	0	0
3.	Usługi i urzędy	M	28107	24,0	675	877	90	607	971
4.	Komunikacja zbiorowa	M	28107	4,0	112	135	100	112	180
5.	Mycie ulic i placów	M	28107	10,0	281	675	0	0	0
6.	Polewanie zieleni	M	28107	10,0	281	1686	0	0	0
7.	Tereny przemysłowe	M	28107	12,0	337	422	85	287	459
8.	Ogółem:		28107		4966	9062		3912	5933
9.	Procentowy odpływ ścieków:							0,79	0,65

Tabl. 4. Statystyki opisowe zmiennej /w/, /wo/ i /s/ (opracowanie własne)

Zmienne / Statystyki	M średnia arytmetyczna	Me mediana	Mo moda	Min	Max	σ odchylenie standardowe	V współczynnik zmienności	SKE skośność	K kurtoza
Pobór wody wodociągowej /w/	4719	4590	4259	3347	7520	583	12	1,209	1,735
Woda na podlewanie ogrodów /wo/	4,63	3,53	Wielokr.	0,30	15,88	3,76	81	1,08	0,64
Dopływ ścieków do OS /s/	4097	4023	3995	1846	7397	507	12	1,216	5,755

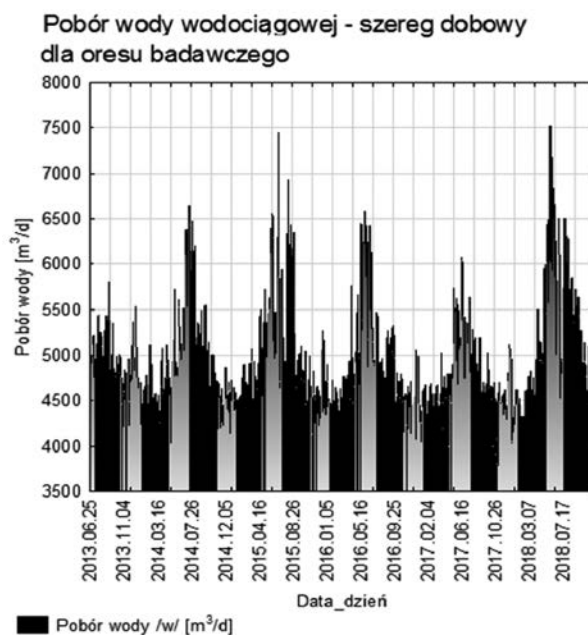
wody wodociągowej do podlewania ogrodów również charakteryzował się rozkładem prawoskośnym, zbliżonym do normalnego. Wyznaczona średnia arytmetyczna ilości wody pobieranej na podlewanie ogrodów, wynosząca 4,63 m³/odbiorcę/m-c (okres badawczy obejmował zarówno ciepłe jak i zimne półrocza), jest wielkością odpowiadającą $Q_{sr d} = 0,28 \text{ m}^3/\text{d}$, to jest dla jednostki odniesienia 100 m² wskaźnik $q_j = 2,8 \text{ d m}^3/\text{j.o.}/\text{d}$.

Zmienna zdefiniowana jako dobowy odpływ ścieków do oczyszczalni „Mondi”, której średnia arytmetyczna wynosi 4 097 m³/d, mediana 4 023 m³/d i moda 3 995 m³/d, również wykazuje dużą zbieżność z wielkościami bilansowymi średniego dobowego odpływu ścieków, jednak wartości maksymalne bilansowe i rzeczywiste różnią się znacząco, to jest $Q_{max d rzec} \approx 1,25 Q_{max d bilans}$, co świadczy o występowaniu innych dopływów do systemu kanalizacyjnego (objętych odrębnymi analizami i badaniami).

Charakterystyka poboru wody wodociągowej w czasie

Rozkład poboru wody wykazuje wyraźną sezonowość, co zobrazowano na rys. 2, gdzie można wyodrębnić okresy ciepłe i zimne, ze znacznymi przewyższeniami wartości rozbiórów w miesiącach letnich.

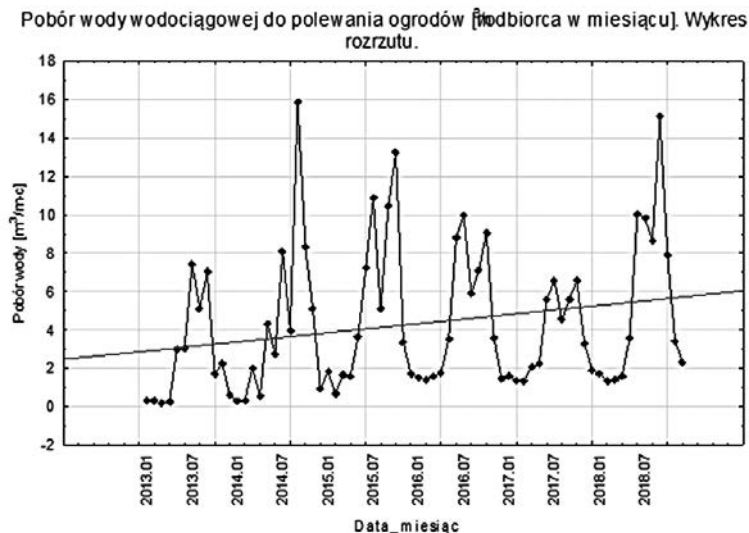
Podobnie kształtuje się rozkład poboru wody wodociągowej do podlewania ogrodów (rys. 3) dla danych zagregowanych do szeregów miesięcznych. Zauważalny jest wzrost zużycia wody w miesiącach maj – październik z kulminacją poboru w mie-



Rys. 2. Rozkład poboru wody wodociągowej (opracowanie własne)

siącu wrześniu, która w 2014 i 2018 roku przekroczyła wartość 15 m³ wody średnio zużywanej przez indywidualnego odbiorcę do podlewania ogrodów.

Przyczyną wzrostu poboru wody wodociągowej na cele gospodarcze w półroczu ciepłym są czynniki klimatyczne i atmosferyczne, co przeanalizowano w ramach niniejszej pracy.



Rys. 3. Rozkład poboru wody wodociągowej na podlewanie ogrodów (opracowanie własne)

Tabl. 5. Tablica korelacyjna analizowanych wielkości (opracowanie własne)

Zmienne		Opad atmosferyczny /O/	Opad atmosferyczny po odparowaniu /O _{eh} /	Temperatura powietrza /T/	Wilgotność względna powietrza /f/	Niedosyt wilgotności powietrza /Δ _h /
		[mm]	[mm]	[°C]	[hPa]	[hPa]
Pobór wody wodociągowej /w/	(m ³ /d)	-0,019	-0,067	0,665	-0,613	0,786
Odpływ ścieków do OS /s/		0,457	0,445	-0,027	0,211	-0,150
sw		0,330	0,356	-0,441	0,531	-0,585
Woda na podlewanie ogrodów /wo/	(m ³ /m-c)	0,276	-0,194	0,615	-0,318	0,486

Wzrost poboru wody wodociągowej w korelacji ze wzrostem temperatury był opisywany już w literaturze [4, 14] i uzasadniany wzrostem potrzeb bytowo-gospodarczych (na przykład zwiększone zapotrzebowanie na pobieranie płynów przez ludzi i zwierzęta, częstsze kąpiele – higiena, schładzanie), ale jest on również związany z okresem wegetacyjnym roślin, upraw. Podobną zależność obserwujemy w korelacji z niedosytem wilgotności Δ_h wyznaczonym według wzoru (5.2), a odwrotną – ujemną korelację z wilgotnością względną f . Niedosyt wilgotności opisuje jak chłonne jest powietrze i związany jest ściśle z prężnością pary wodnej e_{sh} . Zatem, im wyższy niedosyt wilgotności, tym większa ewaporacja (również ewapotranspiracja), stąd tak duża korelacja ze zmienną poboru wody wodociągowej (tabl. 5) zwłaszcza w okresie wegetacyjnym (wyższe parowanie – większe zapotrzebowanie na wodę). Korelację ujemną wyznaczono natomiast w przypadku poboru wody wodociągowej z wilgotnością względną (im bardziej wilgotne powietrze, tym mniejszy pobór wody). Przedstawione zależności znajdują również odzwierciedlenie w zagregowanych danych miesięcznych, w których uwzględniono zmienną „pobór wody na podlewanie ogrodów” (rys. 3). W toku wykonywanych analiz nie stwierdzono występowania korelacji pomiędzy ilością wody wodociągowej włączanej do sieci a wysokością opadów atmosferycznych /O/ i wysokością opadu po odparowaniu /O_{eh}/ (korelacje -0,019 i -0,067 – tabl. 5).

Analiza zmienności czasowej współczynnika sw

W celu wyodrębnienia ilości wody wodociągowej pobieranej na cele gospodarcze (nie odprowadzanej do systemu kanalizacyjnego) wprowadzono zmienną zależną – współczynnik sw (6).

Współczynnik sw to iloraz ilości odprowadzanych do oczyszczalni ścieków i ilości wody włączonej do sieci wodociągowej, z wyodrębnionymi trzema przedziałami:

- 1) $0,65 \geq sw$ – założono (na podstawie bilansu wodno-ściekowego – tabl. 3), że ilość pobranej wody jest znacząco większa od ilości odprowadzanych ścieków, co utożsamiono z awarią, bądź niekontrolowanym (nielegalnym) poborem wody wodociągowej, nazwanym stratą na sieci;
- 2) $0,65 < sw < 1,04$ – wartość wskaźnika nie wykazuje odchylenia w kierunku strat wody lub nie wskazuje na niekontrolowane dopływy do systemu kanalizacyjnego – praca układu w normie;
- 3) $1,04 \leq sw$ – założono, że ilość ścieków dopływających do OS przewyższa prognozowany zrzut bądź przewyższa ilość włączonej do sieci wody wodociągowej, co świadczy o wystąpieniu niekontrolowanego dopływu do systemu kanalizacyjnego.

Sposób wyznaczania charakterystyk współczynnika sw :

– dla wartości bilansowych:

$$sw_{sr} = \frac{Q_{sr d_s}}{Q_{sr d_w}} = 0,79 ; sw_{max} = \frac{Q_{max d_s}}{Q_{max d_w}} = 0,65$$

– dla wartości rzeczywistych:

$$M \mp \sigma \rightarrow 0,73 < sw < 1,04$$

gdzie:

M – średnia arytmetyczna zmiennej sw ,

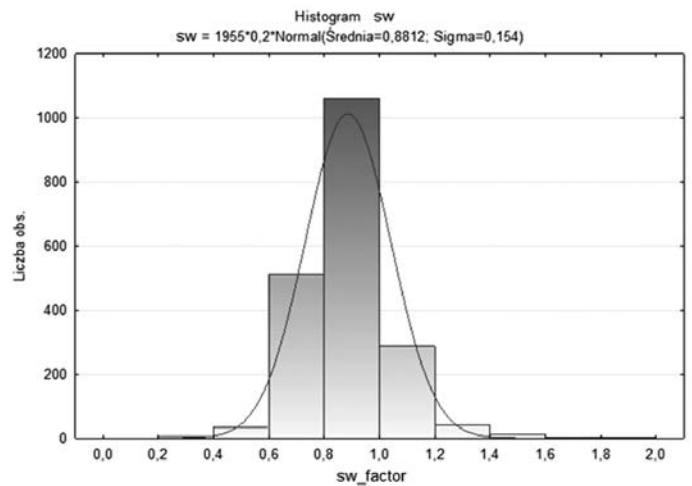
σ – odchylenie standardowe zmiennej sw .

Ze względu na fakt, że wartości środkowe przedziałów współczynnika sw są wielkościami zbliżonymi, przyjęto skrajne wartości przedziałów, to jest dolny danych bilansowych i górny danych rzeczywistych.

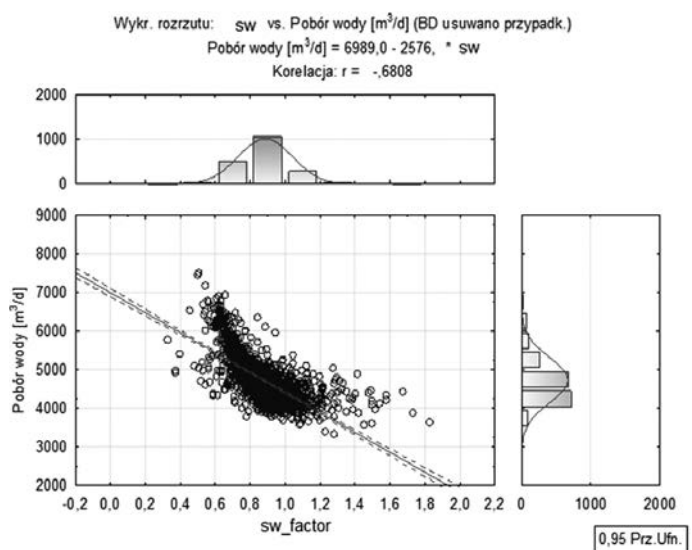
Współczynnik sw , którego rozkład przedstawiono na rys. 4, podobnie jak rozkład poboru wody wodociągowej, jest rozkładem prawoskośnym ($SKE = 0,751$) z kurtozą $K = 2,874$, średnia arytmetyczna $M = 0,881$, mediana $Me = 0,874$, moda $Mo = 0,911$ (tabl. 6).

Analiza rozkładu współczynnika sw wykazuje korelację ujemną ze zmienną poboru wody $r = -0,681$ (rys. 5). Oznacza to, że im większy pobór wody (bez odpływu do systemu kanalizacyjnego w ilości od 65% do 79% – zgodnie z tabl. 3), tym współczynnik sw jest niższy. Zależność występowania sw poniżej progu 0,65 obserwowano tylko w okresie ciepłym, czyli w sezonie wegetacyjnym, w czasie, gdy występuje zapotrzebowanie na wodę do celów polewania zieleni, mycia placów i ulic, czy podlewania ogrodów i nawadniania upraw. W okresie tym obserwowany jest bardzo duży pobór wody, o czym świadczy najniższa odnotowana wartość współczynnika $sw = 0,327$ (w dniu 30.07.2014 roku). Wartość współczynnika $sw \leq 0,65$ wystąpiła w okresie analiz 116 razy, zawsze w okresie ciepłym, począwszy od kwietnia do października. W latach uważanych za suche zdarzenia miały miejsce średnio po 30 razy (2014, 2015 i 2018 – średni roczny niedosyt wilgotności powietrza był wyższy o około 40% od roku 2017, a wilgotność powietrza niższa o około 18%). W 2017 roku, w którym odnotowano występowanie zjawisk ekstremalnych (opady deszczu – suma opadów wyniosła 729,7 mm w 2017, przy 478,3 i 423,9 mm w latach 2014 i 2015), odnotowano tylko 1 zdarzenie ze współczynnikiem $sw \leq 0,65$. W okresie zimnym (listopad – marzec, w trakcie analiz) nie odnotowano żadnego zdarzenia spełniającego warunek $sw \leq 0,65$.

Sytuacja, gdy zdarzenie spełnia warunek $sw \geq 1,04$ wystąpiła 249, z czego w okresie ciepłym 95 razy, a w okresie zimnym 154, co oznacza, że zwiększone (ponad założony przedział $1,04 \leq sw \leq 0,65$) dopływy do systemu kanalizacyjnego obserwowane są na przestrzeni całego roku (brak zwiększonego poboru wody wodociągowej w okresie zimnym do mycia placów i ulic, polewania zieleni, nawadniania oraz nielegalnego poboru wody wodociągowej z sieci).



Rys. 4. Statystyki opisowe zmiennej sw (opracowanie własne)



Rys. 5. Wykres zależności współczynnika sw i poboru wody wodociągowej (opracowanie własne)

Ocena możliwości zmniejszenia poboru wody wodociągowej

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że maksymalne rozbiory z sieci wodociągowej występują wyłącznie w półroczu ciepłym i skorelowane są ze wzrostem temperatury i niedosytu wilgotności. Wartości rzeczywistego poboru wody i $Q_{max d}$ zapotrzebowania wody w bilansie (pomimo około 20% rozbieżności) potwierdzają tę zależność.

W tabl. 7 przedstawiono propozycję korekty jednostkowych wskaźników zapotrzebowania na wodę, które można

Tabl. 6. Statystyki opisowe zmiennej sw (opracowanie własne)

Zmienne / Statystyki	M średnia arytmetyczna	Me mediana	Mo moda	Min	Max	σ odchylenie standardowe	V współczynnik zmienności	SKE skośność	K kurtozą
Współczynnik sw	0,881	0,874	0,912	0,327	1,828	0,154	17,472	0,751	2,874

Tabl. 7. Korekta bilansu wodno-ściekowego analizowanego obszaru (opracowanie własne)

Lp.	Elementy zagospodarowania przestrzennego	Jednostka odniesienia		q_j	Zapotrzebowanie wody $Q_{sr\ d\ w}$	Współcz. nierówn. dobowej N_d	Zapotrzebowanie wody $Q_{max\ d\ w}$	Odpływ ścieków $Q_{sr\ d\ s}$		Współcz. nierówn. dobowej N_d	Odpływ ścieków $Q_{max\ d\ s}$
		j.o.	ilość					s%	[m³/d]		
1.	Mieszkalnictwo_wielorodzinne	M	15658	120,0	1879	1,50	2819	90	1691	1,50	2537
	Mieszkalnictwo_jednorodzinne	M	12449	95,0	1183	1,50	1774	90	1064	1,50	1597
	Mieszkalnictwo_podl ogrodów	m²	92800	0,1	9	6,00	56	0	0	–	0
2.	Usługi i urzędy	M	28107	24,0	675	1,30	877	90	607	1,60	971
3.	Komunikacja zbiorowa	M	28107	4,0	112	1,20	135	100	112	1,60	180
4.	Mycie ulic i placów	M	28107	0,0	0	2,40	0	0	0	–	0
5.	Polewanie zieleni	M	28107	0,0	0	6,00	0	0	0	–	0
6.	Tereny przemysłowe	M	28107	12,0	337	1,25	422	85	287	1,60	459
7.	Ogółem:		28107		4195		6082		3912		5743
8.	Procentowy odpływ ścieków:							0,93		0,94	

Tabl. 8. Szacunkowe oszczędności poboru wody wodociągowej do celów gospodarczych (opracowanie własne)

Lp.	Elementy zagospodarowania przestrzennego	Wielkości obecne			Wielkości skorygowane			Oszczędności	
		źródło poboru wody	$Q_{sr\ d\ w}$ [m³/d]	$Q_{max\ d\ w}$ [m³/d]	źródło poboru wody	$Q_{sr\ d\ w}$ [m³/d]	$Q_{max\ d\ w}$ [m³/d]	$Q_{sr\ d\ w}$ [m³/d]	$Q_{max\ d\ w}$ [m³/d]
1.	Mieszkalnictwo_wielorodzinne	miejski / gminny system wodociągowy	1957	2936,0	osiedlowe ZR	1879	2819	78	117
	Mieszkalnictwo_jednorodzinne		1245	1867,0	mikroretencja	1183	1774	62	93
2.	Mieszkalnictwo_podl ogrodów		93	464,0	mikroretencja	9	56	84	408
3.	Mycie ulic i placów		281	675,0	miejskie ZR	0	0	281	675
4.	Polewanie zieleni		281	1686,0	miejskie ZR	0	0	281	1686
5.	Ogółem:		3857	7628		3071	4649	786	2979

wykorzystać przy wykonywaniu bilansów wodno-ściekowych, z uwzględnieniem alternatywnych źródeł pokrycia zapotrzebowania na wodę do celów gospodarczych w postaci zretencjonowanych wód opadowych. Założenia:

Skorygowanie jednostkowych wskaźników zapotrzebowania dla mieszkalnictwa o 5 dm³/M/d, zminimalizowanie poboru wody wodociągowej na podlewanie ogrodów (przez wprowadzenie mikroretencji zbiornikowej wynoszącej minimum 3 m³/odbiorcę) oraz całkowite zastąpienie poboru wody wodociągowej do polewania zieleni miejskiej oraz mycia placów i ulic pozwoli na zmniejszenie planowanego średniodobowego zapotrzebowania wody niemal o 800 m³/d, a maksymalnego zapotrzebowania niemal o 3 000 m³/d.

Wartości te przekładają się (przy założeniu występowania maksymalnych rozbiórów w okresie badawczym średnio 30 razy w roku) na około 100 000 m³/rok wody, której zapotrzebowanie można pokryć poprzez implementację rozwiązań z zakresu zrównoważonego gospodarowania wodami opadowymi.

WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W pracy wykonano analizy wielkości poboru wody wodociągowej i ilości ścieków odprowadzanych do oczyszczalni oraz wielkości poboru wody do podlewania ogrodów w mieście Świecie. Analizowane wielkości badano w korelacjach z czynnikami klimatycznymi i atmosferycznymi zestawionymi w dobowe i miesięczne szeregi czasowe. Analizom poddano również wskaźniki jednostkowego zapotrzebowania na wodę w aspekcie możliwości wykorzystania alternatywnego źródła wody (o obniżonej jakości) do celów gospodarczych. Na podstawie wyników analiz stwierdzono:

- występowanie zależności między sezonowym wzrostem poboru wody wodociągowej a wzrostem temperatury i niedosytu wilgotności;
- brak korelacji między poborem wody wodociągowej i wysokością opadów atmosferycznych (również po odparowaniu);

- obniżenie wartości wskaźników jednostkowych zapotrzebowania wody może przyczynić się do zmniejszenia poboru wody wodociągowej na cele gospodarcze przy jednoczesnym wprowadzeniu retencji zbiornikowej i mikroretencji wód opadowych w celu zapewnienia źródła wody o obniżonej jakości do mycia placów i ulic, polewania zieleni miejskiej i podlewania ogrodów.

LITERATURA

1. Gabryszewski T.: Wodociągi. Wydawnictwo Arkady. Warszawa 1983.
2. Geiger W., Dreiseitl H.: Nowe sposoby odprowadzania wód deszczowych. Poradnik. Oficyna wydawnicza Projprzem – EKO Bydgoszcz 1999.
3. Główny Urząd Statystyczny. Dane demograficzne. www.stat.gov.pl
4. Hotłoś H. Analiza wpływu czynników meteorologicznych na zmienność poboru wody w miejskim systemie wodociągowym. Ochrona Środowiska nr 2(35) 2013.
5. Infrastruktura Miast. Monografia pod red. J. Dziopaka, D. Słysia, A. Stec. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2017
6. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Dane pomiarowe i klimatyczne. www.danepubliczne.imgw.pl
7. Kasperska-Wołowicz, W. Łabędzki L.: Porównanie ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana – Monteitha w różnych regionach Polski. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie 2004:t4 z. 2a (11), 123-136.
8. Koncepcja programowo-przestrzenna modernizacji i rozbudowy kanalizacji sanitarnej na terenie miasta Świecie. Aqua-Project Zakład Inżynierii Wodno-Ściekowej w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2016.
9. Krzysztofiak M., Urbanek D.: Metody statystyczne. Warszawa. PWN 1977.
10. Łabędzki L., Bąk B., Kanecka-Geszke E.: Wielkość i zmienność ewapotranspiracji według Penmana – Monteitha w okresie wegetacyjnym w latach 1970-2004 w wybranych regionach Polski. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie 2012 (IV-VI):t 12 z. 2 (38), 159-170.
11. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 stycznia 2002 roku w sprawie określenia przeciętnych norm zużycia wody.
12. Strategia Rozwoju Gminy Świecie na lata 2018-2027. Dorfin Grant Thornton Frąckowiak Sp. z o.o., Sp. k. Toruń 2017.
13. Statistica 2019 (licencja testowa). StatSoft Polska; Kraków.
14. Suligowski Z.: Prognozowanie poboru wody wodociągowej w aglomeracji miejsko-przemysłowej. Budownictwo wodne. Zeszyty naukowe Politechniki Gdańskiej nr 435. Gdańsk 1990.
15. Tarka R.: Hydrologia. Przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych i terenowych. Wydawnictwo Ocean. Wrocław 1999.
16. Ustawa o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków z dnia 07.06.2001 roku. (Dz. U. z 2017r. poz. 328 z późn. zm.); www.sejm.gov.pl/isap
17. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 roku. Prawo wodne. (Dz. U. z 2017 roku poz. 1566) www.sejm.gov.pl.
18. Wojciechowska E. Gajewska M., Żurkowska N., Surówka M., Obarska-Pępowiak H.: Zrównoważone systemy gospodarowania wodą deszczową. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2015.
19. Wytyczne do programowania zapotrzebowania wody i ilości ścieków w miejskich jednostkach osadniczych. Instytut Kształtowania Środowiska Departamentu Gospodarki Komunalnej Ministerstwa Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska. Warszawa 1978.
20. Zakład Wodociągów i Kanalizacji w Świeciu sp. z o.o. Dane pomiarowe i eksploatacyjne. www.zwik.com.pl