

Metoda wyznaczania pojemności awaryjnej sieciowego zbiornika wodociągowego

Method for determining the emergency capacity of the water network tank

MAGDALENA STRĘK, JANUSZ R. RAK, IZABELA PIEGDOŃ

DOI 10.36119/15.2025.2.6

System zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) jest częścią infrastruktury krytycznej aglomeracji miejskich, którego sprawność ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli. Podczas sytuacji kryzysowych, takich jak: awarie techniczne, skażenia, klęski żywiołowe czy akty terrorystyczne istnieje konieczność uruchomienia alternatywnych metod zaopatrzenia w wodę. Zapewnienie ciągłości dostaw wody w warunkach kryzysowych wymaga odpowiedniego przygotowania się do takiego zdarzenia, oszacowania realnego zapotrzebowania na wodę, wskazania awaryjnych źródeł wody oraz zapewnienia odpowiednich środków do jej dystrybucji. Raport NIK-u z 2023 roku nt. zapewnienia bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę na wypadek wystąpienia sytuacji kryzysowych, wskazuje, że polskie gminy ze względu na brak odpowiednich zasobów oraz środków nie są przygotowane do kryzysowych dostaw wody. W pracy zaproponowano wykorzystanie zapasów wody zgromadzonych w sieciowych zbiornikach wodociągowych w celu zapewnienia dostawy wody podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej. Słowa kluczowe: sytuacja kryzysowa, zbiorniki wodociągowe, pojemność awaryjna

The collective water supply system (CWSS) is part of the critical infrastructure of urban agglomerations, the efficiency of which is crucial for the security of the state and its citizens. During crisis situations, such as technical failures, contamination, natural disasters or acts of terrorism, there is a need to launch alternative water supply methods. Ensuring the continuity of water supply in crisis conditions requires appropriate preparation for such an event, estimating the real demand for water, indicating emergency water sources and providing appropriate means for its distribution. The NIK report of 2023 on ensuring the security of water supply to selected local government units in the event of crisis situations indicates that Polish municipalities are not prepared for crisis water supplies due to the lack of appropriate resources and means. The paper proposes the possibility of using water stored in the water network tank to ensure water supply in emergency situations.

Keywords: crisis situation, water supply tanks, emergency capacity

Wprowadzenie

Zgodnie z ustawą [21] przedsiębiorstwa wodociągowe mają obowiązek zapewnienia ciągłej i niezawodnej dostawy do konsumentów wody o odpowiedniej jakości, w odpowiedniej ilości, pod odpowiednim ciśnieniem i w dowolnej chwili czasu. Aktualnym wyzwaniem dla każdego przedsiębiorstwa wodociągowego jest dostawa wody podczas wystąpienia sytuacji kryzysowych, w których uszkodzeniu ulega system zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW). Przez sytuację kryzysową rozumie się takie zdarzenia jak: ekstremalne zjawiska pogodowe, konflikty zbrojne, ataki terrorystyczne czy awarie techniczne. W przypadku zajścia tych zdarzeń konieczne jest zapewnienie mieszkańcom alternatywnego systemu

dostawy wody zdanej do spożycia. Ludność dotknięta klęską ma prawo do ochrony i pomocy, zapewnienia podstawowych warunków godnego życia oraz dostępu do bezpiecznej wody. Według zaleceń przedstawionych w „Karcie humanitarnej” [11] oraz rekomendacji WHO [23] pierwszymi działaniami podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej związanej z brakiem dostawy wody z sieci wodociągowej jest: zidentyfikowanie nowego źródła wody, ustalenie wymaganej ilości wody oraz opracowanie systemu jej dystrybucji poza siecią wodociągową. Wybór nowego źródła wody powinien uwzględniać jego dostępność, bezpieczeństwo, bliskość względem zaopatrywanego obszaru oraz stabilność mikrobiologiczną wody [11]. Wskazane powyżej standardy mają na celu uchronić oso-

by poszkodowane przed spożyciem wody o nieodpowiedniej jakości lub brakiem wody, co może być przyczyną poważnych problemów zdrowotnych, a w ekstremalnych sytuacjach prowadzić do śmierci.

Sposób zapewnienia awaryjnego zaopatrzenia w wodę wynika głównie z możliwości technicznych oraz posiadanych zasobów przez przedsiębiorstwo wodociągowe i może być realizowane poprzez m.in.: wykorzystanie ujęć rezerwowych, zapasu wody zgromadzonej w zbiornikach wodociągowych czy dystrybucję wody butelkowanej i workowanej [2, 12, 14, 18]. Przeprowadzona w 2023 roku przez NIK kontrola dotycząca zapewnienia bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę wybranych jednostek samorządu terytorialnego na wypadek

wystąpienia sytuacji kryzysowych [15] wykazała wiele nieprawidłowości w tym zakresie. Do głównych zarzutów stawianych przez NIK należy zaliczyć brak aktualnych i kompletnych wyliczeń odnośnie do bilansu kryzysowego zapotrzebowania w wodę oraz brak odpowiednich zasobów możliwych do wykorzystania podczas kryzysu. Ponadto NIK wskazał, że w żadnej z kontrolowanych gmin nie utrzymywano w stanie sprawności ujęć rezerwowych. Dodatkowo stwierdzono, że przedsiębiorstwa wodociągowe nie posiadały zapasów wody butelkowanej lub jej ilości były niewystarczające do zapewnienia nawet dobowego fizjologicznego zapotrzebowania na wodę. Tylko jedno przedsiębiorstwo dysponowało automatyczną paczkowarką do dozowania i paczkowania wody w woreczki foliowe, której wydajność pozwalała na pokrycie w 26% poziomu dobowego fizjologicznego zapotrzebowania na wodę. Również wykorzystanie zapasów wody zgromadzonych w zbiornikach wodociągowych w większości gmin okazało się niemożliwe w wyniku braku wyposażenia zbiorników w instalację do poboru wody przez beczkowozy. W kontrolowanych jednostkach nie zabezpieczono również odpowiedniej liczby środków do transportu i dystrybucji wody. Główną przyczyną niewłaściwej organizacji dostaw wody w sytuacjach kryzysowych w gminach był brak ustalonych standardów działania w tym zakresie [15]. Obowiązujące wówczas przepisy prawne nie precyzowały wytycznych dotyczących realizacji dostaw wody oraz obowiązków gmin i przedsiębiorstw wodociągowych w warunkach kryzysowych.

Kluczowym aspektem skutecznego systemu zapewnienia bezpieczeństwa dostawy wody w warunkach kryzysowych, jest możliwość wykorzystania w pełni posiadanych zasobów m.in.: zbiorników wodociągowych, studni awaryjnych czy ujęć rezerwowych. W sytuacji, kiedy nie jest możliwe dostarczenie wody za pośrednictwem sieci wodociągowej, konieczne jest zidentyfikowanie i zabezpieczenie nowego źródła wody oraz opracowanie alternatywnego sposobu jej dostawy. Szczegółowe znaczenie w realizacji kryzysowego zaopatrzenia w wodę odgrywa potencjał związany z wykorzystaniem wody zgromadzonej w zbiornikach wodociągowych [18]. Według Raportu [15] zapas wody znajdującej się w zbiornikach istotnie wpłynął na poprawę bezpieczeństwa dostawy wody w kontrolowanych miastach.

Celem pracy jest opracowanie metody wyznaczania pojemności awaryjnej sieciowych zbiorników wodociągowych

oraz wykorzystania zgromadzonej w nich wody do zaopatrywania ludności w wodę zdatną do spożycia podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej.

Wyznaczenie pojemności sieciowych zbiorników wodociągowych

Sieciowe zbiorniki wodociągowe odgrywają istotną rolę w funkcjonowaniu SZZW. Obiekty te umożliwiają magazynowanie wody w okresie zmniejszonego poboru oraz wspomaganie dostawy w okresie jej zwiększonego zapotrzebowania. Dodatkowo stabilizują ciśnienie w sieci wodociągowej oraz gromadzą rezerwę (zapas) wody na cele przeciwpożarowe i awaryjne [7,24].

Pojemność całkowita zbiornika wodociągowego jest sumą jego pojemności cząstkowych: użytkowej (wyrównawczej) oraz pojemności asekuracyjnej, w skład której wchodzi pojemność przeznaczona na wypadek awarii lub pożaru [7,24]:

$$V_c = V_w + V_{as} \quad (1)$$

gdzie:

V_c – całkowita pojemność zbiornika wodociągowego [m^3],

V_w – pojemność wyrównawcza zbiornika wodociągowego [m^3],

V_{as} – pojemność asekuracyjna zbiornika wodociągowego [m^3].

W obliczeniach zbiornika uwzględnia się zawsze większą wartość spośród pojemności przeciwpożarowej i awaryjnej [7,24]:

$$V_{as} = \max(V_{pp}, V_{aw}) \quad (2)$$

gdzie:

V_{pp} – objętość przeciwpożarowa zbiornika wodociągowego [m^3],

V_{aw} – objętość awaryjna zbiornika wodociągowego [m^3].

Pojemność wyrównawczą przeznaczoną na wyrównywanie nierównomierności rozborów wody oblicza się na podstawie bilansu dopływu i odpływu wody ze zbiornika. Pojemność przeciwpożarowa określona jest w Rozporządzeniu [16] i zależy od liczby mieszkańców jednostki osadniczej. Pojemność awaryjna tzw. rezerwa bezpieczeństwa to objętość wody zalecana w celu zapewnienia ciągłości dostawy wody, podczas przestojów konserwacyjnych lub sytuacji kryzysowych, takich jak: awarie wodociągów, przerwy w dostawie prądu czy podczas wystąpienia klęsk żywiołowych. Ze względu na brak jednolitych wytycznych, ustalenie tej

pojemności wywołuje wiele kontrowersji. W literaturze istnieją różne podejścia dotyczące wyznaczania pojemności zbiorników wodociągowych [6, 10, 13, 17]. Większość autorów odnosi się do przyjmowania całkowitej pojemności zbiornika V_c , bez uwzględniania jego poszczególnych pojemności. Wielkości te nie są jednoznaczne i wynoszą 30-35 % Q_{maxd} proponowane w pracach [6, 17], 50 % Q_{maxd} podawane w publikacji [13] oraz 100 % Q_{maxd} zalecane w pracy [10]. Różnica poglądów dotyczy również wyznaczania samej objętości awaryjnej zbiorników wodociągowych. Autorzy prac [8, 9, 13, 23] oraz wytyczne [3, 5, 19, 22, 24] proponują różne metody wyznaczania tego rodzaju pojemności lub wskazują bezpośrednio na przyjmowanie określonej wielkości pojemności awaryjnej. Według [9] dla wodociągów zaopatrujących jednostki osadnicze liczące od 20-150 tys. mieszkańców i czasie trwania awarii wynoszącym 6-8 godzin pojemność awaryjną powinno się przyjmować na poziomie 25-35% Q_{maxd} . Taki sam zakres zaproponowano w pracy [13]. W pracy [8] podano, że w krajach uprzemysłowionych objętość awaryjna przyjmowana jest na poziomie do 30% Q_{maxd} . Dodatkowo, jej autor zwrócił również uwagę na fakt, że w wielu krajach obserwuje się stałą tendencję do powiększania objętości asekuracyjnej zbiornika ze względu na korzystne ograniczanie negatywnych skutków awarii SZZW. Wytyczne kanadyjskie [5] zalecają przyjęcie objętości awaryjnej równej 25% sumy pojemności przeciwpożarowej i wyrównawczej lub 15% $Q_{\text{śrd}}$ lub 40% $Q_{\text{śrd}}$ w przypadku braku pojemności przeciwpożarowej. Według amerykańskich wytycznych projektowych [3] objętość rezerwowa powinna wynosić 100% $Q_{\text{śrd}}$. Zalecenia obowiązujące w Republice Czeskiej wskazują na przyjmowanie rezerwy awaryjnej równej 50% Q_{dmax} [19], a standardy obowiązujące we Francji i Afryce Południowej [22] rekomendują przyjmowanie pojemności awaryjnej na poziomie 200% $Q_{\text{śrd}}$. Norma 1508 zaleca przyjęcie rezerwy bezpieczeństwa na podstawie oceny ryzyka i przypuszczalnego czasu wystąpienia usterek magistrali zasilającej, urządzeń na ujęciu wody zasilającej, pompowni i systemu sterowania oraz skutków takich uszkodzeń. Dodatkowo zaleca powiększenie rezerwy bezpieczeństwa jeśli system dystrybucji wody ma być stosowany do dostarczania wody na cele przeciwpożarowe [24].

Tak duże rozbieżności dotyczące obliczania rezerwy awaryjnej oraz brak jednoznacznych wytycznych powoduje, że

zbiorniki wodociągowe projektowane są bez uwzględnienia tego rodzaju pojemności. Należy zwrócić uwagę na fakt, że funkcja magazynowania wody może zostać skutecznie wykorzystana jako zasób wody zdatnej do spożycia w sytuacjach kryzysowych. Woda zgromadzona w sieciowych zbiornikach wodociągowych stanowi łatwo dostępne źródło wody, o odpowiedniej jakości mikrobiologicznej, co pozwala na jej wykorzystanie już w pierwszej dobie kryzysu. Dostawa wody ze zbiornika może być realizowana przez określony przedział czasu, zależny od objętości zgromadzonej w nim wody, dlatego uwzględnienie pojemności awaryjnej może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa dostaw wody w sytuacjach kryzysowych.

Metodyka badań

Zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej

Proponowana koncepcja dotyczy wyznaczenia pojemności awaryjnej zbiornika wodociągowego oraz wykorzystania zgromadzonej w nim wody jako źródła dostawy dla mieszkańców podczas wystąpienia sytuacji kryzysowych. W celu realizacji kryzysowego zaopatrzenia w wodę proponuje się pobór wody z wytypowanego sieciowego zbiornika wodociągowego do beczkowni oraz jej dystrybucję do wybranych punktów czepalnych znajdujących się na terenie miasta. Wytypowany zbiornik zostaje odłączony od sieci wodociągowej w ciągu pierwszych godzin wystąpienia sytuacji kryzysowej, aby zabezpieczyć zgromadzony w nim zapas wody. Pozostałe zbiorniki sieciowe pracują bez zmian w celu stabilizacji ciśnienia, aż do wyczerpania zapasów wody znajdującej się w systemie wodociągowym.

Jednostkowe zapotrzebowanie na wodę podczas sytuacji kryzysowej przyjęto na podstawie międzynarodowych wytycznych [1, 2,] w których wyróżniono:

- fizjologiczne zapotrzebowanie na wodę: $q_f = 2,5 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$ – ilość wody przeznaczona do spożycia (ilość wody, która pokrywa potrzeby niezbędne do przetrwania organizmu),
- minimalne zapotrzebowanie na wodę: $q_m = 7,5 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$ – ilość wody przeznaczona do spożycia i na podstawowe praktyki higieniczne,
- niezbędne zapotrzebowanie na wodę: $q_n = 15 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$ – ilość wody przeznaczona do spożycia oraz podstawowe praktyki higieniczne i gotowanie.

Zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej w stopniu fizjologicznym, minimalnym oraz niezbędnym wyznaczono na podstawie wzorów (3)-(5):

$$Q_f = q_f \cdot LM \quad (3)$$

$$Q_m = q_m \cdot LM \quad (4)$$

$$Q_n = q_n \cdot LM \quad (5)$$

gdzie,

Q_f – zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej na poziomie fizjologicznym [m^3/d],

Q_m – zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej na poziomie minimalnym [m^3/d],

Q_n – zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej na poziomie niezbędnym [m^3/d],

q_f – jednostkowe fizjologiczne zapotrzebowanie na wodę w czasie kryzysu $2,5 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$,

q_m – jednostkowe minimalne zapotrzebowanie na wodę w czasie kryzysu $7,5 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$,

q_n – jednostkowe niezbędne zapotrzebowanie na wodę w czasie kryzysu $15 \text{ [dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$,

LM – liczba mieszkańców.

Ocenę czasowych możliwości dostawy wody ze zbiornika z uwzględnieniem zapotrzebowania na wodę w stopniu fizjologicznym, minimalnym i niezbędnym wyznaczono według formuł:

$$t_f = \frac{V_{zb}}{Q_f} \quad (6)$$

$$t_m = \frac{V_{zb}}{Q_m} \quad (7)$$

$$t_n = \frac{V_{zb}}{Q_n} \quad (8)$$

gdzie,

t_f – czas pokrycia dostawy wody ze zbiornika wodociągowego dla fizjologicznego zapotrzebowania na wodę [d],

t_m – czas pokrycia dostawy wody ze zbiornika wodociągowego dla minimalnego zapotrzebowania na wodę [d],

t_n – czas pokrycia dostawy wody ze zbiornika wodociągowego dla niezbędnego zapotrzebowania na wodę [d],

V_{zb} – objętość wody zgromadzona w zbiorniku.

Jednym z warunków przy stosowaniu proponowanej metody jest konieczność posiadania przez wytypowany zbiornik instalacji do poboru wody przez beczkownię. Równie ważnym aspektem jest dys-

ponowanie odpowiednią liczbą środków transportu do dystrybucji wody zgromadzonej w zbiorniku. Podczas sytuacji kryzysowej priorytetem jest zaopatrzenie w wodę mieszkańców w jak najkrótszym czasie oraz zapewnienie ilości wody pozwalającej na funkcjonowanie w czasie trwania sytuacji kryzysowej.

W celu wyznaczenia objętości awaryjnej zbiornika wodociągowego proponowano formułę uwzględniającą jednostkowe kryzysowe zapotrzebowanie na wodę dla mieszkańców oraz czas trwania sytuacji kryzysowej:

$$V_{aw} = q_i \cdot LM \cdot t \quad (9)$$

gdzie:

V_{aw} – pojemność awaryjna zbiornika wodociągowego [m^3],

q_i – zapotrzebowanie na wodę w sytuacji kryzysowej [$\text{dm}^3/(\text{M}\cdot\text{d})]$,

LM – liczba mieszkańców,

t – czas trwania sytuacji kryzysowej [d].

Charakterystyka obiektów badań

Analizę możliwości dostawy wody ze zbiornika wodociągowego podczas wystąpienia sytuacji kryzysowej przeprowadzono dla 5 miast w województwie podkarpackim. Są to systemy o średniej wielkości, zaopatrujące w wodę miasta powiatowe. W większości dysponują one kilkoma sieciowymi zbiornikami wodociągowymi.

Miasto A zaopatrywane jest w wodę za pomocą dwóch ujęć wód podziemnych, składających się z 12 studni. Sieć wodociągowa współpracuje z 3 sieciowymi zbiornikami wodociągowymi o pojemnościach: 500 m^3 , 300 m^3 oraz 300 m^3 . Miasto zamieszkuje 15 828 mieszkańców. Miasto B zaopatrywane jest w wodę z trzech ujęć wód powierzchniowych. Miasto zamieszkuje 45 948 mieszkańców. Na sieci wodociągowej zlokalizowane są 3 sieciowe zbiorniki wodociągowe o pojemnościach: 1400 m^3 , 1400 m^3 i 2000 m^3 . Miasto C posiada dwa ujęcia wody powierzchniowej. Na sieci wodociągowej znajdują się 4 sieciowe zbiorniki wodociągowe o pojemnościach: 500 m^3 , 2000 m^3 , 300 m^3 oraz 150 m^3 . Liczba mieszkańców miasta wynosi 36 999 osób. Miasto D zaopatrywane jest w wodę z 2 ujęć: głównego – powierzchniowego oraz dodatkowego składającego się z 3 studni głębinowych. Na sieci wodociągowej znajduje się jeden sieciowy zbiornik wodociągowy o pojemności $1\,800 \text{ m}^3$. Miasto zamieszkuje 32 505 mieszkańców.

Miasto E zaopatrywane jest w wodę przez jedno ujęcie wód powierzchniowych. Na sieci wodociągowej zlokalizowanych jest 5 sieciowych zbiorników wodociągowych o pojemnościach: 300 m³, 600 m³, 1000 m³, 1000 m³ i 2400 m³. Miasto zamieszkuje 59 779 mieszkańców.

W każdym mieście wytypowano jeden sieciowy zbiornik wodociągowy o największej pojemności, który może stanowić źródło wody w początkowej fazie sytuacji kryzysowej. W mieście A do analizy wytypowano zbiornik o pojemności 500 m³, w miastach B i C wyznaczono zbiorniki o pojemności 2000 m³, w mieście D analizę objęto zbiornik o pojemności 1 800 m³, a w mieście E do badań wytypowano zbiornik o pojemności 2400 m³.

Wyniki badań

Wyznaczenie niezbędnej objętości zbiornika wodociągowego do pokrycia zapotrzebowania na wodę w sytuacji kryzysowej

Obliczenia wymaganej objętości rezerwy awaryjnej zbiornika dla poszczególnych miast z uwzględnieniem czasu trwania sytuacji kryzysowej wynoszącej 1, 3, 6 i 7 dób zestawiono w tabeli nr 1. W obliczeniach wykorzystano wzory (3)-(5) i (9).

Określenie prawdopodobnego czasu trwania sytuacji kryzysowej nie zawsze jest możliwe do przewidzenia, a często wręcz nierealne. Wytyczne [1, 11, 26] podają, że podczas kryzysu krótkoterminowego, trwającego 3-6 dób wymagane jest dostarczenie wody na poziomie fizjologicznym wynoszącym 2,5 [dm³/(M·d)]. W przypadku wystąpienia kryzysów długoterminowych, trwających powyżej 6 dób wymagana jest dostawa wody w ilości 7,5 – 15 [dm³/(M·d)]. Przedsiębiorstwa wodociągowe powinny dyspono-

wać takimi zasobami wody, które są w stanie zapewnić przetrwanie dla mieszkańców miasta przez jak najdłuższy okres. Wyznaczone zgodnie ze wzorem (9) wartości przedstawiają wymaganą pojemność awaryjną, która jest niezbędna do zapewnienia dostaw wody podczas sytuacji kryzysowych. Podczas sytuacji kryzysowej krótkoterminowej objętość awaryjna zbiornika wyznaczona dla analizowanych miast stanowi od 4-7% $Q_{\text{śrd}}$ dla zapewnienia dostawy wody na poziomie fizjologicznym. Do pokrycia dostaw wody w stopniu minimalnym i niezbędnym rezerwa awaryjna wynosiła odpowiednio 21% i 42% $Q_{\text{śrd}}$. Podczas kryzysów długoterminowych i konieczności zapewnienia dostawy wody powyżej 6 dób objętość awaryjna stanowiła odpowiednio 29% $Q_{\text{śrd}}$ dla minimalnego oraz 58% $Q_{\text{śrd}}$ dla niezbędnego zapotrzebowania na wodę. Zgromadzone ilości wody w zbiorniku po pewnym czasie ulegną wyczerpaniu, co powoduje, że istnieje potrzeba znalezienia nowego źródła wody. Podczas wystąpienia sytuacji kryzysowych, dla zapewnienia ciągłości zaopatrzenia w wodę dla mieszkańców, kluczowe staje się wyko-

rzystanie wszystkich posiadanych przez przedsiębiorstwo wodociągowe zasobów. Do wspomagania dostaw w kryzysie mogą zostać wykorzystane studnie miejskie lub pożarowe znajdujące się na terenie miasta. Praktyka eksploatacyjna wskazuje, że przygotowanie takiej studni do poboru wody na potrzeby związane z zaopatrzeniem w wodę zdatną do spożycia wynosi nawet do 7 dób, co powoduje, że niezbędne staje się zapewnienie źródła wody do tego czasu. Przeprowadzona analiza wykazała, że przyjęcie pojemności awaryjnej na poziomie 29% $Q_{\text{śrd}}$ jest w stanie zapewnić dostawę wody do spożycia przez 7 dób w stopniu minimalnym wynoszącym 7,5 [dm³/(M·d)], co spełnia standardy proponowane przez wytyczne [1, 11, 26].

Analizę możliwości czasowych dostawy wody ze zbiornika dla spełnienia norm fizjologicznego, minimalnego oraz niezbędnego stopnia zapotrzebowania na wodę w sytuacji kryzysowej przedstawiono w tabelach 2-6. Ponieważ napełnienie zbiornika jest zmienne w ciągu doby, w obliczeniach uwzględniono cztery warianty napełnienia: 100%, 75%, 50% oraz 25%.

Tabela 2. Czas pokrycia dostawy wody podczas kryzysu w mieście A
Table 2. Water supply coverage time during the crisis in city A

Miasto	Ilość wody w zbiorniku [m ³]	Kryzysowe zapotrzebowanie na wodę [m ³]		Czas pokrycia dostawy wody [d]
A	500 m ³ (100% napełnienia)	Fizjologiczne	39,57	12,64
		Minimalne	118,71	4,21
		Niezbędne	237,42	2,11
	375 m ³ (75% napełnienia)	Fizjologiczne	39,57	9,48
		Minimalne	118,71	3,16
		Niezbędne	237,42	1,58
	250 m ³ (50% napełnienia)	Fizjologiczne	39,57	6,32
		Minimalne	118,71	2,11
		Niezbędne	237,42	1,05
	125 m ³ (25% napełnienia)	Fizjologiczne	39,57	3,16
		Minimalne	118,71	1,05
		Niezbędne	237,42	0,53

Tabela 1. Wymagana objętość awaryjna zbiornika wodociągowego
Table 1. Required emergency volume of the water network tank

Miasto	LM	q_i [dm ³]	V_{aw} [m ³] dla $t = 1$ d	V_{aw} [m ³] dla $t = 3$ d	V_{aw} [m ³] dla $t = 6$ d	V_{aw} [m ³] dla $t = 7$ d
A	15828	2,5	39,6	118,7	237,4	277,0
		7,5	118,7	356,1	712,3	831,0
		15	237,4	712,3	1 424,5	1 661,9
B	45948	2,5	114,9	344,6	689,2	804,1
		7,5	344,6	1 033,8	2 067,7	2 412,3
		15	689,2	2 067,7	4 135,3	4 824,5
C	36999	2,5	92,5	277,5	555,0	647,5
		7,5	277,5	832,5	1 665,0	1 942,4
		15	555,0	1 665,0	3 329,9	3 884,9
D	32505	2,5	81,3	243,8	487,6	568,8
		7,5	243,8	731,4	1 462,7	1 706,5
		15	487,6	1 462,7	2 925,5	3 413,0
E	59779	2,5	149,4	448,3	896,7	1 046,1
		7,5	448,3	1 345,0	2 690,1	3 138,4
		15	896,7	2 690,1	5 380,1	6 276,8

W realnych warunkach czas dostawy wody ze zbiornika będzie uwarunkowany od objętości zgromadzonej wody w momencie wystąpienia sytuacji kryzysowej.

Wnioski

Według wytycznych [11] absolutnym minimum podczas sytuacji kryzysowych jest dostawa wody gwarantująca przetrwanie organizmu obejmująca wodę do picia w ilości 2,5 [dm³/(M·d)]. Przyjęcie rezerwy awaryjnej na poziomie fizjologicznego zapotrzebowania na wodę, pozwala na dostawę wody ze zbiorników przez okres od 3 do 22 dób. Jednocześnie wytyczne [11] wskazują, że dla zachowania odpowiedniego stopnia bezpieczeństwa zdrowotnego osób poszkodowanych

Tabela 3. Czas pokrycia dostawy wody podczas kryzysu w mieście B
Table 3. Water supply coverage time during the crisis in city B

Miasto	Ilość wody w zbiorniku [m³]	Kryzysowe zapotrzebowanie na wodę [m³]		Czas pokrycia dostawy wody [d]
B	2000 m³ (100% napęlnienia)	Fizjologiczne	114,87	17,41
		Minimalne	344,61	5,80
		Niezbędne	689,22	2,90
	1 500 m³ (75% napęlnienia)	Fizjologiczne	114,87	13,06
		Minimalne	344,61	4,35
		Niezbędne	689,22	2,18
	1 000 m³ (50% napęlnienia)	Fizjologiczne	114,87	8,71
		Minimalne	344,61	2,90
		Niezbędne	689,22	1,45
	500 m³ (25% napęlnienia)	Fizjologiczne	114,87	4,35
		Minimalne	344,61	1,45
		Niezbędne	689,22	0,73

Tabela 4. Czas pokrycia dostawy wody podczas kryzysu w mieście C
Table 4. Water supply coverage time during the crisis in city C

Miasto	Ilość wody w zbiorniku [m³]	Kryzysowe zapotrzebowanie na wodę [m³]		Czas pokrycia dostawy wody [d]
C	2000 m³ (100% napęlnienia)	Fizjologiczne	92,49	21,62
		Minimalne	277,49	7,21
		Niezbędne	554,98	3,60
	1500 m³ (75% napęlnienia)	Fizjologiczne	92,49	16,22
		Minimalne	277,49	5,41
		Niezbędne	554,98	2,70
	1000 m³ (50% napęlnienia)	Fizjologiczne	92,49	10,81
		Minimalne	277,49	3,60
		Niezbędne	554,98	1,80
	500 m³ (25% napęlnienia)	Fizjologiczne	92,49	5,41
		Minimalne	277,49	1,80
		Niezbędne	554,98	0,90

Tabela 5. Czas pokrycia dostawy wody podczas kryzysu w mieście D
Table 5. Water supply coverage time during the crisis in city D

Miasto	Ilość wody w zbiorniku [m³]	Kryzysowe zapotrzebowanie na wodę [m³]		Czas pokrycia dostawy wody [d]
D	1800 m³ (100% napęlnienia)	Fizjologiczne	81,26	22,15
		Minimalne	243,78	7,38
		Niezbędne	487,57	3,69
	1350 m³ (75% napęlnienia)	Fizjologiczne	81,26	16,61
		Minimalne	243,78	5,54
		Niezbędne	487,57	2,77
	900 m³ (50% napęlnienia)	Fizjologiczne	81,26	11,08
		Minimalne	243,78	3,69
		Niezbędne	487,57	1,85
	450 m³ (25% napęlnienia)	Fizjologiczne	81,26	5,54
		Minimalne	243,78	1,85
		Niezbędne	487,57	0,92

Tabela 6. Czas pokrycia dostawy wody podczas kryzysu w mieście E
Table 6. Water supply coverage time during the crisis in city E

Miasto	Ilość wody w zbiorniku [m³]	Kryzysowe zapotrzebowanie na wodę [m³]		Czas pokrycia dostawy wody [d]
E	2 400 m³ (100% napęlnienia)	Fizjologiczne	149,44	16,06
		Minimalne	448,34	5,35
		Niezbędne	896,68	2,68
	1800 m³ (75% napęlnienia)	Fizjologiczne	149,44	12,04
		Minimalne	448,34	4,01
		Niezbędne	896,68	2,01
	1200 m³ (50% napęlnienia)	Fizjologiczne	149,44	8,03
		Minimalne	448,34	2,68
		Niezbędne	896,68	1,34
	600 m³ (25% napęlnienia)	Fizjologiczne	149,44	4,01
		Minimalne	448,34	1,34
		Niezbędne	896,68	0,67

w kryzysie, rekomendowana jest dostawa wody w wysokości 7,5 [dm³/(M·d)], co odpowiada minimalnemu zapotrzebowaniu na wodę w warunkach kryzysowych. Taką samą ilość wody zalecają wytyczne [1,23] podczas kryzysów długoterminowych, trwających powyżej 6 dób. W Polsce według zapisów nowej ustawy z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej [20] wójt (burmistrz, prezydent miasta), starosta oraz wojewoda mają obowiązek zapewnienia m.in. dostępu do wody przez co najmniej 3 dni trwania zagrożenia. Ustawa nie podaje jednak wytycznych co do ilości dostarczanej wody. Biorąc pod uwagę zalecenia zawarte w wytycznych [1, 11] odnośnie do norm dla dostawy wody w sytuacjach kryzysowych proponuje się przyjmowanie pojemności awaryjnej wynoszącej 29% $Q_{\text{śrd}}$, co stwarza możliwość dostawy wody w ilości 7,5 [dm³/(M·d)] przez okres 7 kolejnych dób. Przeprowadzona analiza wykazała, że pobór takiej ilości wody możliwy jest tylko w miastach C i D przy 100% napęlnieniu zbiornika. Stwierdzono natomiast, że z jednego zbiornika w danym SZZW przez okres 7 dób można pokryć dostawę wody w stopniu fizjologicznym, w trzech wariantach napęlnienia zbiornika: 100%, 75% i 50%. Należy to uznać za istotne źródło wody w sytuacji kryzysowej. Pozostała ilość wody powinna zostać pokryta z innych alternatywnych źródeł.

W rzeczywistych warunkach możliwości czasowe zabezpieczenia dostaw wody będą zależały od ilości wody zgromadzonej w zbiorniku w chwili wystąpienia sytuacji kryzysowej (stopnia napęlnienia zbiornika). Objętość wody znajdująca się w danym momencie w zbiorniku zależy m.in. od wielkości rozbiorów wody, pory dnia, godziny, dnia tygodnia, czy pory roku. Należy także uwzględnić problematykę pogarszania się jakości wody w zbiorniku. Zalecany czas przebywania wody w zbiorniku wynosi 40 h [7]. Przechowywanie wody w zbiorniku powyżej 3 dób może doprowadzić do pogorszenia jakości mikrobiologicznej wody. W takiej sytuacji skutecznym rozwiązaniem może być proces dochlorowania wody lub dezynfekcja wody lampą UV [18].

Dużym wyzwaniem dla przedsiębiorstwa wodociągowego podczas sytuacji kryzysowej jest również kontekst logistyczny związany z dystrybucją wody przy użyciu cystern i beczkowozów. Problemem może okazać się zapewnienie odpowiedniej liczby środków transportu przez przedsiębiorstwo wodociągowe. Raport [15] wskazuje, że przedsiębiorstwa nie

dysponują odpowiednią liczbą środków do transportu wody. W takiej sytuacji dobrą praktyką jest zawieranie umów na wynajem beczkowozów i cystern z sąsiednimi gminami lub prywatnymi przedsiębiorcami.

Podsumowanie

W przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej, której skutkiem jest przerwa w dostawie wody z sieci wodociągowej konieczne jest zapewnienie zaopatrzenia w wodę w alternatywny sposób. Zakłócenia w dostawie wody mogą wystąpić w dowolnym miejscu i czasie, dlatego ważne jest odpowiednie przygotowanie się na takie zdarzenia. Tego rodzaju działania powinny obejmować zidentyfikowanie i zabezpieczenie zasobów wody o odpowiedniej ilości i jakości, gdyż brak wody niesie ze sobą zagrożenie dla zdrowia i życia mieszkańców.

W sytuacji kryzysowej sieciowe zbiorniki wodociągowe mogą być wykorzystane jako łatwo dostępne i bezpieczne źródło dostawy wody do odbiorców, pod warunkiem zabezpieczenia w nich wody o odpowiedniej jakości i ilości. Przeprowadzona analiza wykazuje istotny wpływ na poprawę bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców podczas wystąpienia sytuacji kryzysowych wykorzystując możliwość poboru wody ze zbiornika. W czasie kryzysu, jeden ze zbiorników powinien stanowić źródło wody dla beczkowozów.

Literatura wskazuje na duże rozbieżności w projektowaniu pojemności zbiorników wodociągowych, istnieje więc konieczność opracowania współczesnych zaleceń dla wyznaczania rezerwy awaryjnej zbiornika wodociągowego.

Norma [24] jasno wskazuje na konieczność uwzględnienia w projektowaniu

pojemności zbiorników, rezerwy bezpieczeństwa w celu zapewnienia niezawodności dostawy wody do odbiorców. Uwzględnienie pojemności awaryjnej w projektowaniu całkowitej pojemności zbiorników staje się konieczne nie tylko pod względem wystąpienia awarii w systemie wodociągowym, ale dodatkowo powinna uwzględniać aspekt zapewnienia dostawy wody w sytuacjach kryzysowych.

LITERATURA

- [1] Austrian Association for Gas and Water (ÖVGW). Trinkwassernotversorgung, Krisenvorsorgeplanung in der Trinkwasserversorgung: W 74; Österreichische Vereinigung für das Gas – und Wasserfach: Vienna, Austria, 2017.
- [2] Bross, L.; Krause, S.; Wannevitz, M.; Stock, E.; Sandholz, S.; Wienand, I. Insecure Security: Emergency Water Supply and Minimum Standards in Countries with a High Supply Reliability. *Water* 2019, 11, 732.
- [3] Design Standards & Review Guidelines For Streets, Potable Water, Sewer Storm Drains, & Alternative Water. City of Fernley Department of Public Works. May 2008.
- [4] Federal Ministry of the Interior (BMI). Konzeption Zivile Verteidigung (KZV): Conception Civil Defense; Bundesministerium des Innern: Berlin, Germany, 2016.
- [5] Guidelines for the Design, Construction and Operation of Water and Sewerage Systems. Government of Newfoundland and Labrador. Department of Environment and Conservation Water Resources Management Division, 2005.
- [6] Knapik K.: Lokalizacja zbiornikowych rezerw awaryjnych w systemie dystrybucji wody. *Czasopismo Techniczne*, 7-Ś, 187-194, 2003.
- [7] Knapik K., Bajer W.: Wodociągi. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków, 2010.
- [8] Kulbik M.: Rola i znaczenie zbiornika sieciowego w kształtowaniu hydrauliki i jakości wody w systemie wodociągowym. *Zaopatrzenie w Wodę, Jakość i Ochrona Wód*, s. 93-106, 2012.
- [9] typ B.: Problemy rezerwy wyrównawczej i asekuracyjnej w zbiornikach wodociągów komunalnych. I Zjazd Wodociągów Polskich, 1991.
- [10] Płoskonka R.: Metoda optymalnej lokalizacji rezerw zbiornikowych w systemie dystrybucji wody. Rozprawa doktorska. Kraków, 2008.
- [11] Podręcznik Sfery: Karta Humanitarna i Standardy Minimalne w działaniach Humanitarnych. Sphere Association, 2018.
- [12] Rak J.: Logistics of water Supply in crisis situations. *Water Supply, Quality and Water Protection*. s. 129–137, 2014.
- [13] Rak J.: Problematyka dywersyfikacji dostawy wody. *Technologia Wody*, nr 1, s.14-16, 2014.
- [14] Rak J. R.: Zaopatrzenie w wodę w sytuacjach kryzysowych w ujęciu ilościowym. *Instal* nr 1, s. 65-69, 2014.
- [15] Raport NIK: Zapewnienie Bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę wybranych jednostek samorządu terytorialnego na wypadek wystąpienia sytuacji kryzysowych. Delegatura we Wrocławiu, 2023.
- [16] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 24 lipca 2009 r. w sprawie przeciwpożarowego zaopatrzenia w wodę oraz dróg pożarowych (Dz.U. 2009 nr 124 poz. 1030).
- [17] Suligowski Z.: Warunki techniczne wykonania i odbioru sieci i instalacji wod. – kan. *Paradnik kierownika budowy i inspektora nadzoru*. Verlag Dashofer, 2007.
- [18] Szpak D., Tchórzewska-Cieślak B., Stręk M.: A new method of obtaining water from water storage tanks in a crisis situation using renewable energy. *Energies* 2024, 17, 874.
- [19] Tuhovcak L., Adler P., Kucera T., Raclavsky J.: Vodarenstvi. B. Doprava vody. *Vysoke Ucení Technické v Brně. Fakulta Stavební*. Brno 2006.
- [20] Ustawa z dnia 5 grudnia 2024 r. o ochronie ludności i obronie cywilnej (Dz.U. 2024 poz. 1907).
- [21] Ustawa z dnia 7 czerwca 2001 r. o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (Dz.U. z 2001, nr 72 poz. 747 z późn. zm).
- [22] Van Zyl J.E., Piller O., Legat Y.: Sizing Municipal Storage Tanks Based on Reliability Criteria. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Volume 134, Issue 6, 2008.
- [23] WHO Technical Notes On Drinking-Water, Sanitation and Hygiene in Emergencies. 2013.
- [24] Zaopatrzenie w wodę. Wymagania dotyczące systemów i ich części składowych przeznaczonych do gromadzenia wody. Norma PN-EN 1508, 2002.