



POLITECHNIKA

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej

JN.01622

PRACE NAUKOWE • INŻYNIERIA ŚRODOWISKA • z. 69

ISSN 1234-4338 • ISBN 978-83-7814-355-0



401000000077847

Bogdan Ozga-Zieliński

BEZPIECZEŃSTWO I NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMÓW HYDROLOGICZNYCH



OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
WARSZAWA 2015

J11.01622

POLITECHNIKA WARSZAWSKA



PRACE NAUKOWE

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA z. 69



ISSN 1234-4338

WARSZAWA 2015

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

106647

25 -

RADA REDAKCYJNA

Ewa Karwowska
Marek Mitosek
Bernard Zawada

REDAKTOR DZIAŁOWY

Andrzej Kulig

OPINIODAWCY

Kazimierz Banasik
Janusz Kindler

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015

ISBN 978-83-7814-355-0

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
(WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE)

00-644 Warszawa, ul. Polna 50, tel. (48) 22-234-75-03

www.wydawnictwopw.pl

Druk: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Nakład 124 egz. Zamówienie nr 388/2014

Bogdan Ozga-Zieliński

Wydział Inżynierii Środowiska

BEZPIECZEŃSTWO I NIEZAWODNOŚĆ SYSTEMÓW HYDROLOGICZNYCH

Rękopis dostarczono 10.02.2015 r.

W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania teorii niezawodności, a w zasadzie wykorzystania jej praktycznego aspektu, jakim jest inżynieria niezawodności i jej narzędzia opisu matematycznego obiektów i systemów technicznych w pełni zaprojektowanych i zbudowanych przez człowieka, do opisu struktury niezawodnościowej systemu quasi-naturalnego – systemu hydrologicznego, jego bezpieczeństwa oraz występujących w nim zagrożeń wynikających z pojawiania się meteorologicznych i hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych, traktowanych, jako zdarzenia niepożądane powodujące ryzyko wystąpienia strat zarówno finansowych jak i ludzkich. Dotychczas takie podejście do problemów bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania systemów hydrologicznych w tym ochrony przed ekstremalnymi zjawiskami hydrologicznymi, do których należą duże wezbrania powodujące powodzie, nie było w hydrologii polskiej stosowane. Proponowane w pracy metody szacowania zagrożeń, ryzyka i strat związanych z występowaniem ekstremalnych zdarzeń hydrologiczno-meteorologicznych mają na celu zwiększenie możliwości obronnych przed tymi zdarzeniami i poprawienie zarządzania ryzykiem ich pojawiania się oraz wzmocnienie aktualnie stosowanych metod ochrony przed powodzią zgodnymi z wytycznymi europejskiej Dyrektywy powodziowej.

Słowa kluczowe: system hydrologiczny, zlewnia rzeczna, bezpieczeństwo, niezawodność, ryzyko, zagrożenie, straty, wezbranie, powódź, niżówka, susza.

WYKAZ OZNACZEŃ

- a_0, a_1 – współczynniki kalibrujące
- A – zdarzenie szczytowe lub zdarzenie niepożądane
- A – powierzchnia zlewni
- A_i – i -te zdarzenie niepożądane
- A_{ij} – niepożądane zdarzenie podstawowe
- \bar{A}_{ij} – zdarzenie przeciwne do zdarzenia A_{ij}
- α – poziom ufności

- BP – bardzo prawdopodobne wystąpienie zdarzenia niepożądanego
- B_1, B_2 – zdarzenia kalibrujące
- C – Człowiek
- C – częste wystąpienie zdarzenia niepożądanego
- Δt – szerokość przedziału czasowego
- e_i – i -ty element
- E – ekspozycja
- ET – wartość oczekiwana czasu funkcjonowania obiektu bez niesprawności
- ET_i – wartość oczekiwana czasu funkcjonowania i -tego elementu bez niesprawności
- E ϑ – wartość oczekiwania czasu przebywania (pozostawiania) obiektu w stanie niezdatności
- $f(s)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa strat
- $f_j(s)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej S w ramach poszczególnych kategorii strat s_j
- $f(t)$ – funkcja gęstości prawdopodobieństwa
- $F(t)$ – funkcja zawodności obiektu
- $\widehat{F}(t)$ – estymator funkcji zawodności obiektu
- $F_{\text{eks},j}(t)_i$ – oszacowane prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego przez j -tego eksperta
- $F_i(t)$ – funkcja zawodności i -tego elementu obiektu
- $F_l(t)$ – funkcja zawodności l -tego elementu obiektu
- k – współczynnik gotowości
- k – liczba elementów
- k – liczba zdarzeń wtórnych
- k – liczba kategorii strat
- K – straty i szkody katastrofalne
- K_k – koszty strat dóbr kultury
- K_l – koszty strat życia i zdrowia ludzi
- K_m – koszty strat dóbr materialnych
- K_p – koszty strat politycznych
- K_s – koszty strat środowiska przyrodniczego
- $K(t)$ – funkcja gotowości
- $K(t)$ – miara korzyści uzyskanych w czasie t z niezawodnego funkcjonowania systemu hydrologicznego
- lzl – liczba zagrożonych ludzi
- \overline{lzl} – średnia liczba zagrożonych ludzi w jednym wystąpieniu zdarzenia A_i
- L_{A_i} – liczba wystąpień zdarzenia A_i
- L_{s_j, A_i} – liczba ofiar zdarzenia A_i w kategorii s_j

- $L(t)$ – wielkość populacji zamieszkałej poniżej obiektu hydrotechnicznego
 L_0 – wielkość populacji w chwili początkowej
 λ – parametr rozkładu – liczba niesprawności obiektu w określonym czasie t
 $\lambda(t)$ – funkcja intensywność uszkodzeń (niesprawności) obiektu
 $\hat{\lambda}(t)$ – estymator funkcji intensywności uszkodzeń (niesprawności)
 $\bar{\lambda}$ – średnia intensywność uszkodzeń (niesprawności) obiektu
 $\Lambda(t)$ – skumulowana intensywność uszkodzeń tzw. funkcja wiodąca
 m – liczba sekwencji zdarzeń wtórnych
 m – liczba ekspertów
 M – straty i szkody małe
 Mo_s – wartość modalna strat
 MP – mało prawdopodobne wystąpienie zdarzenia niepożądanego
 M_{RH} – miara ryzyka hydrologicznego
 $\widehat{M}_{RH}(s, t)$ – estymator miary ryzyka M_{RH}
 $M_{RH}^K(s, t)$ – miara ryzyka $M_{RH}(s, t)$ odniesiona do korzyści
 MWO – Maksymalny Wiarygodny Opad
 MWW – Maksymalne Wiarygodne Wezbranie
 n – liczba elementów obiektu
 n – liczba zdarzeń wtórnych w j -tej sekwencji
 n_{A_i} – liczba wszystkich wystąpień zdarzenia A_i
 $n_{A_i}(s_j)$ – liczba wystąpień zdarzenia A_i , dla których straty ludzkie S były większe bądź równe s w kategorii s_j
 n_j – liczba osób, które wskutek wszystkich wystąpień zdarzenia A_i doznały strat w kategorii s_j
 $n(t)$ – liczba zdarzeń powodujących niesprawność obiektu
 $n(t, t + \Delta t)$ – liczba zdarzeń powodujących niesprawność obiektu w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$
 $n(s, t)$ – liczba zdarzeń niepożądanych powodujących straty s
 $n(s, t)$ – liczba największych wezbrań, które mogły spowodować straty s
 N – Natura – siły Natury
 N – liczba wszystkich zdarzeń zjawiska oddziaływującego na obiekt
 N – liczba elementów e budowli hydrotechnicznej
 N – liczba wystąpień największych wezbrań
 N – liczba lat obserwacji
 N – liczba ofiar
 $N(t)$ – liczba zdarzeń oddziaływujących na obiekt w chwili t pomniejszona o liczbę zdarzeń powodujących niesprawność obiektu w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$, tj. liczba zdarzeń oddziaływujących na obiekt na początku każdego okresu Δt

- $N = N(t = 0)$ – liczba wszystkich zdarzeń oddziaływujących na obiekt w całym okresie jego funkcjonowania
 NQ_i – najmniejszy przepływ w i -tym roku ($i = 1, 2, \dots, N$)
 NWQ – najmniejszy przepływ z przepływów maksymalnych w wieloleciu
 v_i – czas trwania i -tej odnowy obiektu
 ϑ_i – czas przebywania i -tego elementu obiektu w stanie niezdatności
 p – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego
 p – prawdopodobieństwo przewyższenia
 p_A – prawdopodobieństwo zdarzenia niepożądanego A
 $p(A_{ij})$ – prawdopodobieństwo zajścia podstawowego zdarzenia prowadzącego do zdarzenia szczytowego
 $p(A_{ij}/A_{ik})$ – prawdopodobieństwo warunkowe zajścia zdarzenia A_{ij} pod warunkiem zajścia zdarzenia A_{ik}
 $p(B_1), p(B_2)$ – prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń kalibrujących B_1 i B_2
 $p(Z_n)$ – miara częstości zajścia zdarzenia niepożądanego Z_n
 $p^{(k,j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia j -tej sekwencji wywołanej wystąpieniem k -tego zdarzenia niepożądanego
 $p_i^{(k,j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia i -tego zdarzenia wtórnego w j -tej sekwencji wywołanego k -tym zdarzeniem niepożądanym
 $p^{(j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia j -tej sekwencji
 $p_i^{(j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia i -tego zdarzenia wtórnego w j -tej sekwencji
 p_j, p_i lub $P(S = s_j/A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat S w kategorii s_j pod warunkiem wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i
 $p_j(S \geq s_j/A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat ludzkich S większych lub równych s w kategorii s_j pod warunkiem wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i
 p_{nat} – przyrost naturalny
 poz – średnia pozycja zdarzenia w rankingu
 $P_S(s, t)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat o rozmiarze s w dowolnej chwili t
 P – prawdopodobne wystąpienie zdarzenia niepożądanego
 $P(\cdot)$ – prawdopodobieństwo niepojawienia się niesprawności
 $P(A)$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia niepożądanego A
 $P(A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego zdarzenia A_i
 P_e – cząstkowe prawdopodobieństwa zniszczenia budowli hydrotechnicznej wywołane niesprawnościami jej elementów e
 $P_e(\widetilde{W}_e)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia niepożądanego wywołanego przez element e

PMF	– Probable Maximum Flood
P_{\min}	– minimalne prawdopodobieństwo katastrofy
PN	– prawie niemożliwe wystąpienie zdarzenia niepożądanego
PO	– straty i szkody pomijalne
$P[S(t) \geq s]$	– prawdopodobieństwo wystąpienia strat nie mniejszych niż s
$P[S(t) \geq s/A_j]$	– prawdopodobieństwo wystąpienia strat większych bądź równych s pod warunkiem zajścia zdarzenia niepożądanego A_j
P_{TOT}	– prawdopodobieństwa całkowitego zniszczenia budowli hydrotechnicznej
PZ	– poziom zagrożenia systemu hydrologicznego
$PZ^{(j)}$	– poziom zagrożenia j -tej sekwencji zdarzeń wtórnych
$PZ^{(k, j)}$	– poziom zagrożenia j -tej sekwencji zdarzeń wtórnych wywołanych wystąpieniem k -tego zdarzenia niepożądanego
$PZ(s)$	– poziom zagrożenia życia ludzkiego
q	– wskaźnik przeceny obiektu
q_i	– wskaźnik wzrostu inwestycyjnego
Q	– natężenie przepływu
Q_{doz}	– przepływ dozwolony – maksymalny przepływ niepowodujący szkód powodziowych
Q_g	– przepływ graniczny wezbrania, które może spowodować straty powodziowe
Q_{gn}	– przepływ graniczny niżówki rzecznej przyjmowany najczęściej, jako przepływ WNQ
Q_{gw}	– przepływ graniczny wezbrania przyjmowany najczęściej, jako przepływ NWQ
Q_m	– przepływ miarodajny
Q_{max}	– przepływ maksymalny – kulminacyjny wezbrania
$Q_{\text{max}, p=1\%}$	– przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia 1%
$Q_{\text{max}, 50\%}$	– przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia 50%
Q_{MWW}	– przepływ odpowiadający Maksymalnemu Wiarygodnemu Wezbraniu (MWW)
Q_n	– przepływ nienaruszalny; górna granica ekstremalnych zdarzeń minimalnych
Q_{op}	– przepływ ochrony powodziowej; dolna granica ekstremalnych zdarzeń maksymalnych
$Q_{p\%}$	– przepływ maksymalny o prawdopodobieństwie przewyższenia $p\%$
RA	– obszar ryzyka akceptowanego
$R(t)$	– funkcja niezawodności
$R_0 = R(t=0)$	– wartość funkcji niezawodności w chwili $t=0$

- $\widehat{R}(t)$ – estymator funkcji niezawodności
 $R_i(t)$ – funkcja niezawodności i -tego elementu obiektu
 $R_l(t)$ – funkcją niezawodności l -tego elementu obiektu
 RNT – obszar ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego)
 RTK – obszar ryzyka tolerowanego – ryzyka kontrolowanego
 RTN – obszar ryzyka tolerowanego – ryzyka niepożądanego
 s – straty ludzkie indywidualne lub/i zbiorowe lub straty ekonomiczne (finansowe)
 \bar{s} – wartość średnia strat
 s_j – j -ta kategoria strat
 s_{\min} – strata minimalna
 s_{\max} – strata maksymalna
 $s_{\max, j}$ – maksymalna wielkość strat w kategorii s_j
 s_o – wartość oczekiwana strat
 S – miara strat
 S – strata
 S_i – prawdopodobieństwo, że element e_i spowoduje katastrofę budowli w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i
 $S(t)$ – funkcja strat
 SWQ – średni przepływ z przepływów maksymalnych w wieloleciu
 \mathring{S} – Środowisko (przyrodnicze i bezpośrednie otoczenie człowieka)
 t – czas
 t_i – chwila wystąpienia i -tej niesprawności obiektu
 t_i – czas funkcjonowania bez niesprawności i -tego elementu struktury równoległej
 t_r – czas remontu obiektu
 t_{rw} – trwałość obiektu
 τ – czas funkcjonowania obiektu bez niesprawności lub chwila t_i wystąpienia i -tej niesprawności
 τ_i – czas niezawodnego funkcjonowania obiektu między i -tymi niesprawnościami
 τ_{wi} – okres trwania i -tej niesprawności
 T – Technika
 T – czasu funkcjonowania obiektu bez niesprawności
 T – średni okres powtarzalności
 W – wrażliwość (podatność)
 W – straty i szkody wysokie
 $W_b(t)$ – wartości obiektu hydrotechnicznego
 $W_M(t)$ – wartość majątku zatopionego po katastrofie obiektu hydrotechnicznego po czasie t

- $W_M(t_0)$ – wartość majątku początkowego w chwili $t_0 = 0$
 W_R – koszty remontu obiektu
 W_0 – księgową wartość początkową obiektu
 \widetilde{W}_e – średnia ocena ekspertów dotycząca możliwości spowodowania zdarzenia niepożądanego przez element e budowli hydrotechnicznej
 WGB – wskaźnik gwarancji bezpieczeństwa
 WKP – wskaźnik komplementarnej powodziogenności
 WNQ – największy przepływ z przepływów minimalnych w wieloleciu
 WWQ – największy obserwowany przepływ w wieloleciu
 WZB – wskaźnik zagrożenia bezpieczeństwa
 WZP – wskaźnik zagrożenia powodziowego
 $Z_{\alpha/2}$ – wartość statystyki z odczytana z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego dla $\alpha/2$
 Z – straty i szkody znaczące
 Z_n – zdarzenie niepożądane
 Z_0 – wartość oczekiwana (przewidywana) lub najbardziej prawdopodobna strat
 $Z(s)$ – prawdopodobieństwo tego, że zajście zdarzenia niepożądanego A spowoduje straty o wielkości większej bądź równej s
 $Z(s)_i, Z_{o,i}$ – miary strat – skutków wystąpienia i -tych zdarzeń lub procesów niepożądanych
 $Z(S \geq s_j / A_j)$ – zagrożenie powstania strat nie mniejszych niż s , pod warunkiem wystąpienia zdarzenia niepożądanego A

1. CEL I ZAKRES PRACY

W całym wszechświecie, całym środowisku otaczającym człowieka, jak i w nim samym – w jego psychice i fizjologii – występują zjawiska ekstremalne.

Występowanie zjawisk ekstremalnych w każdej sytuacji i w każdej dziedzinie budzi zainteresowanie, najczęściej połączone z obawami. Człowiek nie przejawia większego zainteresowania sytuacjami ustabilizowanymi tzw. normalnymi, które z punktu widzenia nauki określa się, jako wartości średnie analizowanego zjawiska. Ekstrema natomiast, i to zarówno maksima jak i minima budzą nie tylko zainteresowanie, lecz przede wszystkim niepokój.

Matematyczny opis zjawisk ekstremalnych jest wykorzystywany we wszystkich dziedzinach nauki. Analizując przebieg czasowy dowolnego zjawiska łatwo zauważyć, że w zależności od jego charakteru, przyjmuje ono wartości szybciej

lub wolniej zmieniające się w czasie, często zmieniają się jego wartości ekstremalne lub przeciwnie przebieg zjawiska jest ustabilizowany – bardziej płaski. Zjawiska charakteryzujące się małym zakresem zmienności są uważane za „bezpieczniejsze” i nawet, jeżeli są one niekorzystne to łatwiej się przed nimi zabezpieczyć. Natomiast zjawiska o dużej zmienności, charakteryzujące się wartościami bardzo dużymi bądź bardzo małymi, są na ogół niekorzystne (niebezpieczne) i trudno się przed nimi zabezpieczyć. Większość zjawisk naturalnych to ten drugi rodzaj, do którego między innymi należą duże wezbrania rzek i bardzo głębokie niżówki. Do opisu przebiegu tych zjawisk w czasie stosowane są różne modele matematyczne, które w sposób lepszy lub gorszy opisują rzeczywiste przebiegi analizowanego zjawiska.

W odniesieniu do zjawiska takiego jak przepływ rzeczny, który jest przedmiotem zainteresowania niniejszej pracy, analiza wartości ekstremalnych ma szczególne znaczenie, ze względu na skutki ich występowania dla człowieka, środowiska przyrodniczego i całej gospodarki. Ekstremalne wartości w zakresie przepływów dużych są przyczyną powodzi, natomiast ekstrema przepływów niskich są przyczyną suszy hydrologicznej. Zdarzenia ekstremalne w postaci dużych wezbrań powodujących powodzie lub w postaci głębokich niżówek powodujących susze są źródłem występowania zagrożeń, które są bezpośrednią przyczyną powstawania strat w środowisku przyrodniczym i w gospodarce narodowej, a przede wszystkim strat w życiu i zdrowiu ludzi. Są one zatem, z punktu widzenia bezpieczeństwa człowieka i jego działalności, zdarzeniami niepożądanymi.

Celem niniejszej pracy jest wykorzystanie teorii niezawodności do analizy wartości ekstremalnych przepływu rzecznoego oraz ich wpływu na bezpieczeństwo funkcjonowania systemu hydrologicznego, który można zdefiniować jako układ funkcjonalno-przestrzenny zlewni rzecznej, obejmujący naturalne zasoby wód powierzchniowych i podziemnych, środowisko przyrodnicze, w którym one występują, działania techniczne i nietechniczne umożliwiające kształtowanie tych zasobów oraz powiązania występujące między tymi elementami. System hydrologiczny należy traktować w niniejszej pracy jako część systemu wodno-gospodarczego [Kindler, 2001, 2009; Tyszewski i in., 2008], bezpośrednio związaną z problematyką zarządzania ryzykiem wystąpienia przepływów ekstremalnych. W Polsce w dziedzinie gospodarki wodnej i hydrologii pierwsze próby wykorzystania teorii niezawodności do oceny zasobów wodnych podjęli Kundzewicz i Kindler [1995]. Teoria niezawodności jest jednak przede wszystkim stosowana do opisu obiektów technicznych w takich dziedzinach jak lotnictwo, konstruowanie maszyn czy transport [Inżynieria ..., 1992; Podstawy ..., 1999; Bucior, 2004; Szopa, 2009; Pamuła, 2011] oraz opisu systemów technicznych, na przykład systemów wodociągowych i kanalizacyjnych [Wieczysty, 1990; Kwietniewski i in., 1993; Kwietniewski, 2008; Kwietniewski i Rak, 2010]. Szczególne osiągnięcia w praktycznym zastosowaniu teorii niezawodności mają inżynierowie zajmujący

się projektowaniem bezpiecznych i niezawodnych systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę [Kwietniewski, 1999; Rak i Kwietniewski, 2011; Rak i in., 2012].

Proponowana w niniejszej pracy metodyka ma na celu poprawę bezpieczeństwa i niezawodności systemów hydrologicznych, którą można osiągnąć poprzez zwiększenie niezawodności tych elementów systemu, które mają istotny wpływ na poprawne jego funkcjonowanie lub poprzez na przykład dodanie innych elementów do istniejącej już struktury systemu, pozwalających na jego większą niezawodność. W przypadku obiektów złożonych, jakimi są systemy hydrologiczne, ma to szczególne znaczenie w procesie planowania budowy nowych obiektów (elementów) technicznej ochrony powodziowej, a także przy modernizacji już istniejących obiektów hydrotechnicznych, jak również przy projektowaniu zagospodarowania przestrzennego i użytkowania zlewni rzecznej oraz wykorzystania środków nietechnicznych.

Proponowana metodyka stanowi kolejny krok na drodze postępu w dziedzinie ochrony przed powodzią oraz stwarza możliwości lepszego opisu niezawodnego funkcjonowania systemów hydrologicznych, a tym samym pozwala na lepsze wykorzystanie metod obecnie stosowanych przy ocenie zagrożenia i ryzyka ekstremalnymi zdarzeniami hydrologicznymi, opartymi głównie na modelowaniu hydraulicznym przepływu rzecznego i na działaniach o charakterze planistycznym [*Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego*, 2009; *Metodyka opracowania map ryzyka powodziowego*, 2009; *Metodyka Wstępnej Oceny Ryzyka Powodziowego*, 2010; *Raport ...*, 2011; IMGW-PIB, 2012; KZGW, 2013].

W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania teorii niezawodności, a w zasadzie wykorzystania jej praktycznego aspektu, jakim jest inżynieria niezawodności, do opisu struktury niezawodnościowej systemu quasi-naturalnego – systemu hydrologicznego, jego bezpieczeństwa oraz pojawiających się w nim zagrożeń wynikających z losowo występujących meteorologicznych i hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych. Jak wiadomo, zdarzenia te związane są z ryzykiem występowania wielu niepożądanych strat, zarówno w zakresie życia ludzkiego jak i strat finansowych. Dotychczas takie podejście do problemów bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania systemów hydrologicznych, w tym ochrony przed ekstremalnymi zjawiskami hydrologicznymi, do których należą duże wezbrania powodujące powódzie oraz głębokie niżówki powodujące susze, nie było w hydrologii polskiej stosowane. Proponowane w pracy metody szacowania zagrożeń, ryzyka i strat związanych z występowaniem ekstremalnych zdarzeń hydrologiczno-meteorologicznych mają na celu zwiększenie możliwości ochrony przed tymi zdarzeniami. Metody te należy traktować jak uzupełnienie aktualnie stosowanych w krajach Unii Europejskiej procedur zarządzania ryzykiem wystąpienia przepływów ekstremalnych, m.in. ochrony przed powodzią zgodnymi z wytycznymi europejskiej Dyrektywy powodziowej [*Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim*].

Zakres pracy obejmuje sześć rozdziałów i wykaz cytowanej literatury.

Rozdział 1 przedstawia cel i zakres pracy.

Rozdział 2 poświęcony jest wprowadzeniu do zagadnień związanych z teorią niezawodności i bezpieczeństwa oraz zagrożeniom człowieka i jego otoczenia od sił Natury jak również wzajemnym relacjom między siłami Natury, Człowiekiem, Technika i Środowiskiem przyrodniczym.

W rozdziale 3 poruszono zagadnienia identyfikacji mechanizmów powstawania ekstremalnych zagrożeń hydrologicznych, uwzględniając zagrożenia występujące w dolinach rzek i na obszarze zlewni oraz techniczne i nietechniczne działania obronne właściwe dla tych zagrożeń.

Rozdział 4 w całości został poświęcony niezawodności i bezpieczeństwu działania systemu hydrologicznego. Podano w nim podstawowe pojęcia i miary stosowane w teorii niezawodności i bezpieczeństwa oraz przedstawiono możliwość wykorzystania ich do opisu systemu hydrologicznego i określania prawdopodobieństwa wystąpienia w nim zagrożeń związanych z przepływami ekstremalnymi.

W rozdziale 5 skoncentrowano się na problematyce związanej z ryzykiem hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych. Zdefiniowano ryzyko tych zdarzeń, podano główne źródła jego powstawania i jego własności. W kolejnych podrozdziałach rozdziału 5 przedstawiono sposoby oceny ryzyka, jego identyfikacji jakościowej oraz ilościowej, zaproponowano metody identyfikacji zagrożeń występujących w systemie hydrologicznym pod kątem ilościowym. Następnie omówiono zależności między miarami ryzyka hydrologicznego, niezawodności i zagrożenia oraz modelowanie ryzyka i niezawodności systemu hydrologicznego. Ostatnie dwa podrozdziały poświęcone są metodom szacowania strat i zarządzaniu ryzykiem hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych.

Przedstawione w rozdziałach 2–5 zagadnienia teoretyczne zilustrowano przykładem obliczeniowym w rozdziale 6.

Całość pracy zwięźsza podsumowanie poruszonych zagadnień oraz wnioski końcowe wskazujące na możliwość praktycznego wykorzystania teorii niezawodności i ryzyka do opisu i oceny bezpieczeństwa systemów hydrologicznych (rozdział 7).

Bibliografia obejmuje cytowane pozycje literaturowe, które mogą być pomocne przy rozszerzeniu i uzupełnieniu wiedzy na temat prezentowanych w pracy zagadnień o rozważania naukowe autorów poszczególnych pozycji bibliograficznych.

2. WPROWADZENIE

Do niedawna istniał pogląd, że zagrożenia wywołane przez siły Natury praktycznie nie dotyczą nauki o bezpieczeństwie, która skupia się na zagrożeniach wywołanych techniką [Berenstein, 1997]. Uważano, że zupełnie innymi cecha-

mi charakteryzują się systemy naturalne (quasi-naturalne) i systemy techniczne zbudowane przez człowieka i chociaż w określonych zakresach zarówno jedne jak i drugie zagrażają bezpieczeństwu człowieka, to ich działanie i możliwość sterowania nimi są zdecydowanie różne, a tym samym radykalnie różni się ich opis. Nauka do obu tych systemów miała zupełnie inne podejście i zazwyczaj używała innych narzędzi do ich opisu. W ostatnich latach coraz częściej zaczęły się pojawiać klęski żywiołowe wywołane ekstremalnymi zdarzeniami naturalnymi, będące przyczyną coraz większej liczby ofiar śmiertelnych oraz coraz większych strat w środowisku przyrodniczym i gospodarce. W tej sytuacji, ludzie zaczęli podejmować coraz więcej działań mających na celu obniżenie poziomu zagrożenia ekstremalnymi zdarzeniami zjawisk naturalnych. Jednocześnie umyślowiono sobie, że problemy bezpieczeństwa zarówno w systemach technicznych zbudowanych przez człowieka jak i w systemach naturalnych często mają ten sam charakter i mogą być opisywane w podobny sposób [Szopa, 2001].

Zagrożenia wywołane siłami Natury występują od początku Świata. Należą do nich zagrożenia powstające w wyniku występowania takich zjawisk jak: huragany, trzęsienia ziemi, wybuchy wulkanów, tsunami, gwałtowne – o dużej intensywności i wydajności opady, wyładowania atmosferyczne, duże upały, silne mrozy i inne. Przed zagrożeniami wywołanymi przez siły Natury można stosować różne środki obrony i ewentualnie ograniczać ich niekorzystny wpływ na człowieka, środowisko przyrodnicze i gospodarkę, ale nie można wpływać na ich własności i sterować nimi. Można tylko monitorować je i próbować prognozować. Zagrożenia wywołane siłami Natury są w zasadzie niezależne od działalności człowieka. Jednakże, człowiek poprzez niekontrolowaną lub niefrasobliwą działalność może w pewnym stopniu oddziaływać na Naturę, przyczyniając się na przykład do zmian klimatu. Oddziaływanie to jednak nie jest bezpośrednie, tzn. człowiek nie jest w stanie powstrzymać huraganów, wybuchów wulkanów czy trzęsień ziemi, nie może wywołać tsunami, gwałtownych intensywnych opadów czy dużych upałów lub silnych mrozów, lecz mając poprzez swoją działalność pewien wpływ, zazwyczaj negatywny, na klimat ziemski, przyczynia się pośrednio do zwiększenia intensywności lub częstości występowania naturalnych zdarzeń ekstremalnych [Raport IPCC, 2014] przy jednoczesnej nierównomiernej dystrybucji tych zdarzeń w skali globalnej [Kundzewicz, 2014].

Zagrożenia powstające w wyniku działania sił Natury są z punktu widzenia bezpieczeństwa człowieka znacznie groźniejsze niż zagrożenia wynikające z techniki czy środowiska przyrodniczego. Potrafią one wywoływać ogromne straty ekonomiczne i dotyczą najczęściej nie pojedynczych osób, lecz dużej części populacji ludzkiej.

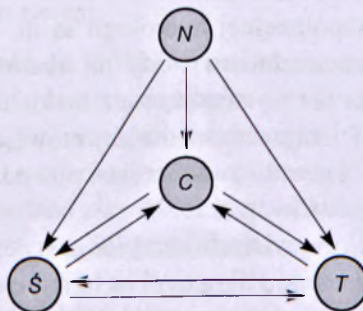
W ostatnich latach nastąpił gwałtowny rozwój nowej interdyscyplinarnej dziedziny naukowej, mianowicie „nauki o niezawodności i bezpieczeństwie” i ściśle związanej z nią problematyce zarządzania ryzykiem [Szymanek, 2001; Tarczyń-

ski i Mojsiewicz, 2001; Wolanin, 2004; Preś, 2007; Kaczmarek, 2008; Szopa, 2009; Titowicz, 2010; Zarządzanie ..., 2010; Rak i Kwietniewski, 2011; Pamuła, 2011; Grocki, 2012; Rak i in., 2012]. Obejmuje ona różnorodne aspekty współczesnych zagrożeń, powodowanych nie tylko rozwojem techniki, lecz również zagrożenia ekologiczne (środowiska przyrodniczego), gospodarcze – ekonomiczne, polityczne, militarne i inne, występujące w różnej skali, począwszy od skali lokalnej a kończąc na globalnej [Szopa, 2004].

Bezpieczeństwo jest często określane, jako „wolność od zagrożenia i ryzyka”. W odniesieniu do tak postawionej tezy rodzą się pytania: czy taki stan bezpieczeństwa jest w ogóle możliwy, czy nie należy stanów zagrożenia traktować, jako stanów „normalnych”, chociaż, co jest oczywiste, niepożądanych? Przede wszystkim trzeba się pogodzić z brakiem stanu absolutnie bezpiecznego. Tymczasem zdarzenia niepożądane są odczuwane, jako „nienormalne”, ponieważ godzą w zakodowaną w człowieku potrzebę poczucia bezpieczeństwa. Sytuacja bezpieczna jest postrzegana, jako „normalna”, zaś zagrożenie jest widziane, jako rodzaj „zakłócenia”. Należy więc usunąć to „zakłócenie”, aby przywrócić sytuację normalną. Tymczasem w rzeczywistości zagrożenie jest sytuacją normalną (naturalną). Redukcja ryzyka zagrożenia to „dobro”, za które trzeba zapłacić, a nie sytuacja, na którą wszyscy zasługują bez ponoszenia dodatkowych kosztów. Na ogół jednak nie ma możliwości ani technicznych, ani finansowych, aby ryzyko zagrożenia całkowicie wyeliminować. Zatem bezpieczeństwo należy zdefiniować, jako stan charakteryzujący się brakiem nieakceptowanego ryzyka wystąpienia zagrożenia. W literaturze można znaleźć inne definicje bezpieczeństwa, na przykład podaną przez Szopę [1999, 2001] „*bezpieczeństwo jest to pojęcie przeciwne do pojęcia strat ludzkich*”. Według tej definicji, czym większe jest ryzyko pojawienia się strat ludzkich tym mniejsze jest bezpieczeństwo i odwrotnie. Biorąc pod uwagę określenie bezpieczeństwa, jako wolności od zagrożeń, lub jako wolność od ryzyka ich wystąpienia i ponoszenia strat, należy stwierdzić, że w rzeczywistości nie istnieje stan pełnego, bezwzględniego bezpieczeństwa. Można jedynie mówić o bezpieczeństwie akceptowanym. Ponadto bezpieczeństwo jest związane z subiektywnym odbiorem (odczuciem) określonej sytuacji. W pracy Wolanina [2004] bezpieczeństwo jest definiowane, jako „*stan otoczenia naturalnego i cywilizacyjnego określony przez akceptowane ryzyko*”. Bezpieczeństwa nie można, więc określać w kategoriach bezwzględnych – jest ono ściśle związane z subiektywnym odczuciem ryzyka zagrożenia i poczuciem bezpieczeństwa. Akceptowane ryzyko jest miarą bezpieczeństwa. Pojęcie bezpieczeństwa jest, jak widać, trudne do jednoznacznego zdefiniowania, gdyż poza obiektywnie istniejącym zagrożeniem, które w wielu przypadkach jest również trudne do określenia (najczęściej określane jest poprzez wielkość ryzyka) istnieje problem poczucia bezpieczeństwa u osób zagrożonych. Istnieją, więc dwa problemy do rozwiązania, jeden dotyczy określenia rzeczywistego zagrożenia i drugi, znacznie trudniejszy, oceny tego zagrożenia przez osoby na nie narażone.

Początkowo nauka o niezawodności i bezpieczeństwie powstawała i rozwijała się przede wszystkim w odniesieniu do bezpieczeństwa człowieka, w kontekście jego kontaktu z urządzeniami technicznymi – układ Człowiek-Technika (C-T). W ostatnich latach coraz częściej nauka o niezawodności i bezpieczeństwie traktowana jest szerzej, obejmując Człowieka, Technikę i Otoczenie – układ C-T-O [Szopa, 2009]. Układ ten najczęściej dotyczy najbliższego otoczenia człowieka, na które bezpośrednio oddziałuje analizowane urządzenie techniczne. W niniejszej pracy rozpatrywane są zjawiska zachodzące w systemie hydrologicznym (w zlewni rzecznej), tj. oddziaływanie techniki na środowisko przyrodnicze jak i oddziaływanie przekształconego pod wpływem człowieka i techniki środowiska przyrodniczego na bezpieczeństwo człowieka, a więc układ Człowiek-Technika-Środowisko (C-T-Ś). W przypadku techniki są to oddziaływania wynikające z różnego rodzaju niesprawności, uszkodzeń, awarii czy katastrof obiektów technicznych, w szczególności hydrotechnicznych. Natomiast, w przypadku człowieka przede wszystkim wszelkiego rodzaju błędy popełniane przez niego, głównie związane z jego działalnością na obszarze zlewni prowadzące do niesprawności urządzeń technicznych, które z kolei prowadzą do uszkodzenia (zniszczenia, zanieczyszczenia, skażenia) środowiska przyrodniczego, które w wyniku uszkodzenia, w konsekwencji negatywnie oddziałuje na człowieka i technikę w postaci sprzężenia zwrotnego.

Biorąc po uwagę istniejące od zawsze zagrożenia człowieka i jego otoczenia od sił Natury, m. in. od zjawisk ekstremalnych zachodzących na powierzchni Ziemi, powodujących klęski żywiołowe i zachodzących najczęściej na bardzo dużych obszarach, należy rozszerzyć układ bezpieczeństwa człowieka do postaci: siły Natury-Człowiek-Technika-Środowisko przyrodnicze (N-C-T-Ś) (rys. 2.1). A więc do układu obejmującego nie tylko znacznie większe obszary, ale przede wszystkim znacznie więcej różnorodnych obiektów i zagrożeń.



Rys. 2.1. Diagram zagrożeń: N – Natura (siły Natury), C – Człowiek, T – Technika, Ś – Środowisko (przyrodnicze i bezpośrednie otoczenie człowieka)

Fig. 2.1. Hazard diagram: N – forces of Nature, C – Human, T – Technology (Engineering), Ś – natural Environment

Przedstawiony na rysunku 2.1 układ zagrożeń jest przedmiotem niniejszej pracy. Odzwierciedla on relacje między siłami Natury, człowiekiem, techniką i środowiskiem przyrodniczym. W przypadku człowieka, środowiska i techniki relacje te mogą być dwukierunkowe. Oznacza to, że zagrożenia dotyczące człowieka mogą wynikać z zagrożeń powodowanych przez środowisko przyrodnicze i technikę, jak i człowiek poprzez swoją działalność może negatywnie oddziaływać na środowisko i technikę w sposób bezpośredni lub poprzez technikę pośrednio na środowisko. Oddziaływanie techniki rozumiane jest w tej pracy, jako zagrożenie powodowane przez obiekty (urządzenia) hydrotechniczne, ich katastrofy i awarie. Jedynie zagrożenia pochodzące od sił Natury są jednokierunkowe, gdyż ani człowiek, ani technika, ani środowisko przyrodnicze nie mają większego wpływu na występowanie zagrożeń ze strony sił Natury.

Zagrożenia człowieka przez siły Natury nie były dotychczas przedmiotem zainteresowania nauki o niezawodności i bezpieczeństwie, a przecież są to zjawiska wyrządzające nie tylko ogromne straty materialne, ale także zagrażające życiu dużych zbiorowości ludzi. Wymaga to bardziej złożonych i kosztownych środków dla zapewnienia bezpieczeństwa człowieka i ochrony jego mienia. Systemy naturalne (quasi-naturalne), do których należą system meteorologiczny (atmosferyczny) i system hydrologiczny (zlewnia rzeczna), w istotny sposób różnią się od systemów technicznych, w pełni zaprojektowanych i zbudowanych przez człowieka i nawet poznanie mechanizmów ich działania nie pozwala nimi w pełni sterować, można natomiast obserwować i prognozować ich zachowanie.

Rzeczywiste zagrożenia są najczęściej określane przez specjalistów (ekspertów) z dziedziny nauki i techniki, właściwej dla rozpatrywanego rodzaju zagrożenia. Często jest to zadanie bardzo trudne, szczególnie w odniesieniu do pojawiających się coraz to nowych, nie w pełni zbadanych zagrożeń, dla których brak jest doświadczeń w ocenie ich szkodliwości.

Przedmiotem badań współczesnej hydrologii są m. in. zagrożenia naturalne powodowane wystąpieniem nadmiaru wody na obszarach, na których w warunkach normalnych woda nie występuje, bądź brakiem wody na obszarach, na których brak wody stanowi zagrożenie. Inaczej mówiąc przedmiotem badań są ekstremalnie duże, o różnej genezie, wezbrania – powodzie i ekstremalnie długotrwałe susze i głębokie niżówki w rzekach.

Rozwój techniki obok oczywistych korzyści przynosi wiele, często nieprzewidywanych zagrożeń i to zarówno dla samej techniki, która je powoduje jak i dla człowieka i środowiska przyrodniczego. Współczesna nauka o niezawodności i bezpieczeństwie obejmuje więc, nie tylko techniczne aspekty bezpieczeństwa, ale również całą przestrzeń przyrody, która generuje wiele procesów niszczących i zdarzeń ekstremalnych.

Nauka o niezawodności i bezpieczeństwie jest nauką dynamicznie rozwijającą się, w której priorytetowymi celami badań są [Szymanek, 2001; Szopa, 2009; Rak i in., 2012]:

- Identyfikacja mechanizmów powstawania zagrożeń.
- Określenie mechanizmów obronnych właściwych dla konkretnych rodzajów zagrożeń.
- Ocena niezawodności działania konkretnych obiektów narażonych na różne rodzaje zagrożeń.
- Ocena ryzyka, w tym ocena występowania niebezpiecznych zdarzeń niepożądanych.
- Redukcja ryzyka.
- Akceptowanie ryzyka.
- Zapewnienie bezpieczeństwa.

Powyższe zagadnienia, w odniesieniu do zagrożeń hydrologicznych, zostały omówione w kolejnych rozdziałach pracy.

3. IDENTYFIKACJA MECHANIZMÓW POWSTAWANIA EKSTREMALNYCH ZAGROŻEŃ HYDROLOGICZNYCH

Będące przedmiotem niniejszej pracy zagrożenia hydrologiczne występują w postaci nadmiarów lub braków wody na powierzchni Ziemi w trzech środowiskach, mianowicie:

- w korytach rzek (wody płynące),
- w zbiornikach naturalnych i sztucznych,
- okresowo na obszarze zlewni.

W pracy Ozga-Zielińskiego [2010] zaproponowano następującą definicję zdarzenia ekstremalnego: *Zdarzenie ekstremalne jest to zdarzenie na wystąpienie, którego nie jesteśmy przygotowani (zabezpieczeni) technicznie, ekonomicznie czy mentalnie.* Oznacza to, że zdarzenie ekstremalne (nie myląc z pojęciem lokalnych ekstremów, jakie badane zjawisko osiąga w swoim przebiegu) jest na tyle duże i na tyle rzadko występujące, że zabezpieczenie się przed nim jest z punktu widzenia dostępnych możliwości technicznych, bądź ekonomicznych, bądź mentalnych niemożliwe. Jeżeli człowiek jest przygotowany, tzn. zabezpieczony przed skutkami wystąpienia nawet bardzo groźnego i rzadko występującego zdarzenia, to zdarzenie to nie jest dla niego niebezpieczne a tym samym nie jest zdarzeniem ekstremalnym w myśl powyższej definicji. Należy pamiętać, że niebezpieczne

zdarzenia ekstremalne dotyczą zarówno niebezpiecznych zdarzeń maksymalnych jak i niebezpiecznych zdarzeń minimalnych.

Naturalnie nie wszędzie i nie zawsze jesteśmy w stanie zabezpieczyć się przed każdą wartością, jaką może osiągnąć analizowane zjawisko. Z tego powodu wartość progowa badanego zjawiska klasyfikująca je, jako zjawisko ekstremalne, może być różna w różnych sytuacjach, dla różnych osób, różnych obiektów, różnych regionów, etc.

Powyższa definicja obejmuje wszystkie rodzaje zdarzeń ekstremalnych. Przyśiępając natomiast do badań szczegółowych naleŹy podać definicję dokłādniejszā, tzn. definicję „ilościowā”, która pozwoli w sposób jednoznaczny zakwalifikować badane zjawisko, jako ekstremalne.

W dziedzinie zdarzeń ekstremalnych, głównym przedmiotem zainteresowania hydrologii śródłādowych wód płynących (potamologii) sā wezbrania i niŹówki, włāciwe ich zdefiniowanie oraz okrešlanie granic powyŹej, lub poniŹej, których stanowią one zdarzenia ekstremalne.

Okrešlenie wielkošci wezbrań powodziowych, a szczególnie wielkošci górnej granicy potencjału powodziowego rzeki, tj. Maksymalnego Wiarygodnego Wezbrania (*MWW*) jest jednym z najtrudniejszych, a jednocześnie najistotniejszych zadaniami nie tylko ochrony przeciwpowodziowej, lecz również całej współczesnej hydrologii [Ozga-Zielińska i Ozga-Zieliński, 2003; Banasik i Ostrowski, 2010].

3.1. ZAGROŹENIA W KORYTACH RZEK

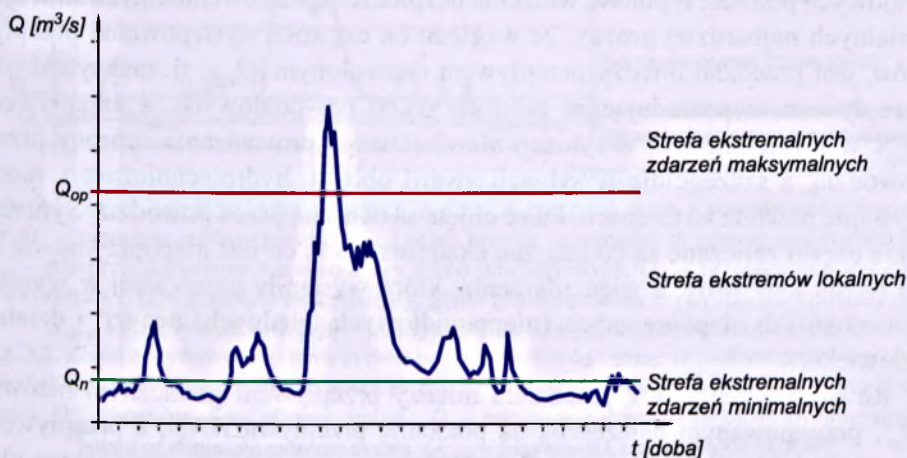
Do stref hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych w odniesieniu do rzek proponuje się zaliczyć (rys. 3.1):

- strefę zdarzeń ekstremalnych maksymalnych (strefa powodzi), znajdujāca się powyŹej przepływu ochrony przeciwpowodziowej Q_{op} ;
- strefę zdarzeń ekstremalnych minimalnych (strefa suszy rzecznej), znajdujāca się poniŹej przepływu nienaruszalnego Q_n .

ZagroŹenia występujā jednak nie tylko w strefach ekstremalnych zagroŹeń maksymalnych i minimalnych, ale również w strefie ochrony przeciwpowodziowej oraz w strefie sterowania niŹówkami, które łącznie tworzā strefę ekstremów lokalnych (rys. 3.1). Sā to zagroŹenia mniejsze niŹ występujāce w strefach zdarzeń ekstremalnych, jednak z uwagi na ich częste występowanie (w większym lub mniejszym stopniu występujā prawie w kaŹdym roku) stanowią one istotne zagroŹenie hydrologiczne wymagajāce stałej kontroli i interwencji.

Obydwa zdarzenia ekstremalne, powódzie i susze, sā zjawiskami niekorzystnymi z punktu widzenia gospodarki wodnej, chociaŹ powódŹ, jako zjawisko gwałtowne, bezpośrednio i natychmiast zagraŹajāce bezpieczeŹstwu ludnošci i infrastrukturze gospodarczej uwaŹana jest często za większe zagroŹenie niŹ su-

sza, która narasta przez dłuższy czas, a więc nie jest zjawiskiem gwałtownym i tak spektakularnym jak powódź. Wydaje się, że łatwiej jest przygotować się na skutki suszy. W rzeczywistości łatwiej jest przygotować się jedynie mentalnie ze względu na długi czas jej powstawania. Straty ekonomiczne w rolnictwie, braki w zaopatrzeniu ludności i gospodarki w wodę mogą być równie dotkliwe jak straty powodziowe, a techniczna ochrona przed suszami równie kosztowna jak przed powodziąmi.



Rys. 3.1. Hydrogram przepływu rzecznoego z naniesionymi strefami ekstremalnych zdarzeń maksymalnych, ekstremów lokalnych i ekstremalnych zdarzeń minimalnych

Fig. 3.1. Hydrograph of river discharge with extreme events zones: maximal events, local extreme events, minimal events

Na rysunku 3.1 przedstawiono hydrogram przepływów rzecznych z zaznaczonymi granicami zdarzeń ekstremalnych maksymalnych i minimalnych oraz strefą ekstremów lokalnych. Przystępując do analizy zdarzeń ekstremalnych należy wyraźnie odróżnić zjawiska ekstremalne od lokalnych wartości ekstremalnych, jakie występują w czasie trwania badanego zjawiska.

Ustalenie liczbowych wartości powyższych granic, tj. dolnej granicy ekstremalnych zdarzeń maksymalnych i górnej granicy ekstremalnych zdarzeń minimalnych, zależy od przyjętych definicji i kryteriów wynikających z rozpatrywanych zagrożeń. Za dolną granicę ekstremalnych zdarzeń maksymalnych najczęściej jest przyjmowany maksymalny przepływ ochrony powodziowej Q_{op} , tj. przepływ, na który zaprojektowana została infrastruktura przeciwpowodziowa, a więc przepływ, powyżej którego już nie można zabezpieczyć się przed powodzią i występują wówczas nieuniknione straty powodziowe (materialne lub/i ludzkie). Za górną granicę ekstremalnych zdarzeń minimalnych można natomiast przyjąć przepływ nienaruszalny Q_n , wówczas woda nie powinna być w ogóle pobierana z rzeki – powinna być pozostawiona w celu zapewnienia

swobodnego rozwoju i życia flory i fauny rzeki. Występuje wówczas tzw. hydrologiczna susza rzeczna.

Między górną i dolną strefą zdarzeń ekstremalnych znajduje się obszar (zakres) gospodarczego wykorzystania wody rzecznej, inaczej mówiąc obszar zarządzania przepływem rzeczonym (rys. 3.2). Przepływy w przedziale $\langle Q_n, Q_{op} \rangle$ są na różnych rzekach, a właściwie na poszczególnych odcinkach rzeki, w różny sposób zarządzane i wykorzystywane w zależności od lokalnych bądź ogólnokrajowych potrzeb. Z punktu widzenia bezpieczeństwa i ewentualnych strat materialnych najbardziej groźny, ze względu na częstość występowania przepływów, jest przedział między przepływem dozwolonym Q_{doz} , tj. maksymalnym przepływem niepowodującym żadnych szkód powodziowych, a przepływem Q_{op} . W przedziale tym w sytuacji niewłaściwego prowadzenia ochrony przed powodzią, a szczególnie w sytuacji awarii obiektu hydrotechnicznego, może wystąpić powódź na terenach, które objęte są ochroną przed powodzią. Sytuacje takie często zaliczane są do zdarzeń ekstremalnych, co jest niepoprawne. Są to po prostu katastrofy, a więc zdarzenia, które wystąpiły najczęściej w wyniku zaniedbań lub niepoprawnych (nieprawidłowych, błędnych) decyzji i działań człowieka.

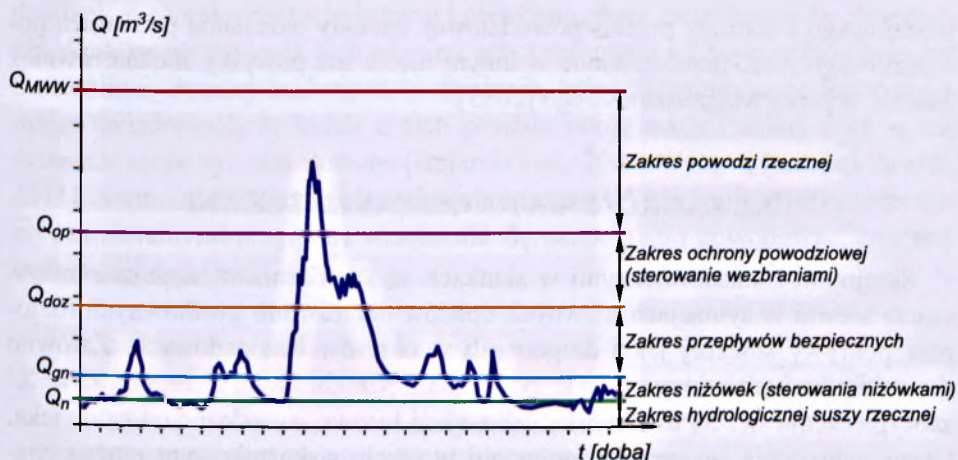
Również przepływy z przedziału między przepływem granicznym nizin Q_{gn} , przyjmowanym najczęściej na poziomie przepływu WNQ , a przepływem nienaruszalnym Q_n mogą powodować występowanie zjawisk gospodarczo niekorzystnych, tj. występowanie niedoborów w zaopatrzeniu w wodę, na występowanie których powinniśmy być przygotowani i które nie stanowią zdarzenia ekstremalnego. Dopiero spadek przepływu poniżej przepływu nienaruszalnego stanowi zdarzenie ekstremalne.

Zakres przepływów powyżej górnej granicy ekstremalnych zdarzeń maksymalnych i poniżej dolnej granicy ekstremalnych zdarzeń minimalnych jest „niezabezpieczony” i wówczas mamy do czynienia z klęską powodzi lub suszy, tj. ze zdarzeniami ekstremalnymi.

Natomiast zakres wykorzystania wody dla potrzeb gospodarki wodnej w zasadzie ogranicza się do przedziału między górną i dolną granicą występowania zdarzeń ekstremalnych.

Ostatnią wyróżnioną strefą na rysunku 3.2 jest strefa przepływów „bezpiecznych”, tzn. strefa, w której nie występują ani duże wezbrania wywołujące powódzie, ani głębokie nizin, w okresie których występują braki w zaspokajaniu potrzeb wodnych wszystkich użytkowników.

Reasumując, takie podejście wymaga ustalenia, dla poszczególnych odcinków rzek, konkretnych wartości progowych, powyżej których w zakresie przepływów wysokich, lub poniżej których w zakresie przepływów niskich, przepływ rzeczny będzie uznany za zdarzenie ekstremalne. Przy ustalaniu tych granic powinno się kierować względami bezpieczeństwa człowieka.



Rys. 3.2. Strefy zagrożeń hydrologicznych w korycie rzecznej wraz z wartościami progowymi: Q_{op} – przepływ ochrony powodziowej; dolna granica ekstremalnych zdarzeń maksymalnych, Q_{doz} – przepływy dozwolone niepowodujące szkód powodziowych, Q_n – przepływy graniczne nizin rzecznej, Q_n – przepływy nienaruszalny; górna granica ekstremalnych zdarzeń minimalnych, Q_{MWW} – przepływy odpowiadający Maksymalnemu Wiarygodnemu Wezbraniu (*MWW*)

Fig. 3.2. Zones of hydrologic hazards in river bed with threshold values: Q_{op} – flood protection level – design flood; lower bound of maximum extreme events, Q_{doz} – maximum flow not causing flood losses, Q_{gn} – boundary flow of river drought, Q_n – minimum acceptable (ecological) flow; upper bound of minimum extreme events, Q_{MWW} – Maximum Credible Flood (*MWW*)

Oddzielnym zagadnieniem jest problem określania maksymalnego zakresu występowania zdarzeń ekstremalnych i ich fizycznych ograniczeń. W odniesieniu do zdarzeń ekstremalnych poniżej dolnej strefy, czyli poniżej przepływu nienaruszalnego Q_n sprawa wyznaczenia ograniczeń jest prosta i jednoznaczna. Najmniejsza wartość, jaką mogą przyjąć przepływy jest równa zero. Znacznie trudniejsze jest określenie maksymalnej wartości, jaką mogą przyjąć (osiągnąć) przepływy rzeczne. Zagadnienie to było przedmiotem pracy Ozga-Zielińskiej i Ozga-Zielińskiego [2003] a następnie zespołu interdyscyplinarnego – hydrologów i meteorologów, Ozga-Zielińskiej, Kupczyk, Ozga-Zielińskiego, Suligowskiego, Brzezińskiego i Niedbały [2003, 2011] i dotyczyło określania Maksymalnego Wiarygodnego Wezbrania (*MWW*) tzn. największego wezbrania, które może fizycznie wystąpić w wyniku jednoczesnej maksymalizacji opadu (Maksymalny Wiarygodny Opad (*MWO*)) i dogodnych warunków jego spływu z obszaru zlewni. Znajomość chociażby rzędu wielkości przepływu *MWW*, który może wystąpić w warunkach ekstremalnych, pozwala uświadomić sobie jak groźne sytuacje powodziowe mogą wystąpić poza zakresem aktualnie istniejącej ochrony przeciwpowodziowej. W tym celu w powyższych pracach oprócz metodyki określania *MWO* i *MWW* zaproponowano również wyznaczanie miar powodziogenności rzek: wskaźnika gwarancji bezpieczeństwa, wskaźnika zagrożenia powodziowego i wskaźnika komplementarnej powodziogenności oraz stref zagrożenia po-

wodziowego i ochrony przeciwpowodziowej. Metody określania potencjału powodziowego rzek, przedstawione w innym ujęciu niż powyżej, można również znaleźć w pracy Magnuszewskiego [2013].

3.2. ZAGROŻENIA NA OBSZARZE ZLEWNI

Skrajnymi i katastroficznymi w skutkach są zagrożenia występujące na obszarze zlewni w sytuacjach ulewnych opadów deszczu lub gwałtownych roztopów pokrywy śnieżnej jak i długotrwałych okresów bezopadowych. Zarówno powódzie jak i susze obszarowe są zjawiskami, przed którymi nie ma możliwości zabezpieczenia się. Są to zjawiska całkowicie losowe, niezależne od człowieka. Ocenę zagrożenia suszami obszarowymi w ujęciu wskaźnikowym można znaleźć w pracach Tokarczyk [2010], Stolarskiej i in. [2012], Kępińskiej-Kasprzak [2013, 2014] oraz generalnie zagrożeniami obszarowymi w zarządzaniu zasobami wodnymi w pracy Walczykiewicza [2010] oraz Kindlera i Okruszki [2014]. W niniejszej pracy skoncentrowano się głównie na zagrożeniach w korytach rzek i obszarach przyległych do nich.

3.3. TECHNICZNE I NIETECHNICZNE MECHANIZMY OBRONNE WŁAŚCIWE DLA ZAGROŻEŃ HYDROLOGICZNYCH

W ostatnich latach na całym świecie można zaobserwować zwiększoną liczbę występowania zdarzeń ekstremalnych. Jest to spowodowane z jednej strony zmiennością i zmianami klimatu, szczególnie w skali globalnej, z drugiej zaś antropopresją, szczególnie w skali lokalnej i regionalnej. Zwiększona liczba występowania hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych wywołuje wzrost zainteresowania metodami obronnymi przed tymi zdarzeniami, zarówno metodami technicznymi jak nietechnicznymi. Generalnie odchodzi się od dotychczas stosowanych sposobów obronnych, polegających na bezpośredniej ochronie przed powodzią lub suszą, na rzecz ograniczania ryzyka powstawania strat wywołanych tymi zjawiskami ekstremalnymi. Ryzyko powstawania strat rozumiane jest tutaj, jako potencjalne skutki wystąpienia zdarzenia niepożądanego w korycie rzeki i na obszarze zlewni przy jednoczesnym uwzględnieniu stopnia przygotowania zarówno ludzi jak i istniejącej infrastruktury znajdujących się w zasięgu oddziaływania występującego zdarzenia niepożądanego. Takie podejście na gruncie europejskim znalazło swoje odzwierciedlenie w zapisach Dyrektywy 2007/60/WE w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim – w tzw. Dyrektywie powodziowej.

W celu ograniczenia strat wynikających z wystąpienia hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych (zdarzeń niepożądanych) podejmuje się różnego rodzaju

działania o charakterze technicznym i nietechnicznym zmierzające do złagodzenia skutków wystąpienia tych zdarzeń, gdyż całkowite ich wyeliminowanie jest niemożliwe. Poniżej omówiono te działania, które aktualnie są podejmowane, mając świadomość, że każde z nich posiada swoje wady i zalety oraz że nie wszędzie może być zastosowane [Bojarski i in., 2005; Wyżga i Radecki-Pawlik, 2011]. Niemniej przy kompleksowej ochronie przed hydrologicznymi zdarzeniami ekstremalnymi mogą one wzajemnie się uzupełniać i powodować, że straty będą mniej dotkliwe.

3.3.1. Techniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych w korytach rzek

Do technicznych działań (środków) obronnych przed zagrożeniami hydrologicznymi zaliczane są budowle hydrotechniczne i działania o charakterze inżynierskim, które realizują zarówno ochronę czynną jak i bierną. Do ochrony czynnej zaliczane są obiekty, które wpływają na redukcję wezbrań, tzn. pozwalają kształtować wartości przepływów tworzących wezbranie, w szczególności wartość przepływu maksymalnego – przepływu kulminacyjnego oraz objętość wezbrania i czas jego trwania. Są to przede wszystkim zbiorniki retencyjne ze stałą rezerwą powodziową, zbiorniki suche z zamknięciami, poldery z zamknięciami, kanały ulgi z zamknięciami, jeziora z możliwością nadpiętrzenia. Do działań o charakterze czynnej ochrony technicznej zalicza się także likwidację zatorów poprzez łodołamanie i przy użyciu materiałów wybuchowych. Do ochrony biernej zaliczane są obiekty, które, przy ukształtowanym już wezbraniu, mają na celu niedopuszczenie do rozlania się wody poza przewidziany do tego obszar. Są to wały przeciwpowodziowe oraz poldery, suche zbiorniki i kanały ulgi, bez zamknięć umożliwiających sterowanie nimi. Do działań w ramach ochrony biernej zalicza się utrzymanie i regulację koryt rzecznych, mające wpływ na ich przepustowość [Kledyński, 2011].

Podstawowym jednak działaniem obronnym zarówno przeciw występowaniu powodzi jak i niżówek są sterowane zbiorniki retencyjne, które w okresach wezbrań magazynują nadmiar wody, zaś w okresach niedoborów mogą stanowić źródło zaopatrzenia w wodę. Występująca jednak losowa nieregularność w chronologii pojawiania się wezbrań i niżówek powoduje, że woda zmagazynowana w zbiornikach w okresie wezbrania nie zawsze może być przetrzymywana do okresu niżówkowego. Zbiorniki retencyjne powinny być jak najszybciej, ale jednocześnie jak najbardziej efektywnie gospodarczo, opróżniane i gotowe na zmagazynowanie następnego wezbrania, które może wystąpić w krótkim okresie poprzednim. Dotyczy to oczywiście zbiorników retencyjnych, których głównym

zadaniem jest ochrona przeciwpowodziowa terenów poniżej zbiornika. Natomiast zbiorniki, których podstawowym zadaniem jest utrzymywanie znacznego napełnienia, głównie dla potrzeb energetyki wodnej i zaopatrzenia w wodę, w niewielkim stopniu są zaangażowane w ochronę przeciwpowodziową, służą jako rezerwuary wodne w okresach niżówkowych.

Głównym zadaniem pozostałych wymienionych wyżej form technicznych działań jest lokalna ochrona obszarów, które nie mogą czy nie powinny być zalane podczas wystąpienia zdarzenia niepożądanego – wezbrania powodującego powódź.

Do działań technicznych należy zaliczyć również te działania, które kształtują retencję dolinową rzek. Aktualnie w wielu krajach zaleca się budowę wałów przeciwpowodziowych jak najdalej od koryta rzeki. Ich położenie powinno odzwierciedlać kształt doliny a nie koryta. W miejscach, w których jest to możliwe należy poszerzyć obszar międzywała. Istotne znaczenie ma także odpowiednia eksploatacja rumowiska rzecznego, z jednej strony zmniejszająca zamulanie koryt, z drugiej zaś skracająca czas przebywania wody na terenach zalewowych. Również występowanie roślinności na terenach zalewowych, której rodzaj i gęstość porostania ma wpływ na zmniejszenie przepustowości terenów zalewowych i koryta rzecznego a tym samym zwiększenie zagrożenia powodziowego poprzez podniesienie rzędnych zwierciadła wody i odkładanie rumoszu skalnego. Zagadnienia wpływu przemian zachodzących w korytach rzek (przede wszystkim pogarszania się ich przepustowości) na zwiększenie zagrożenia powodziowego można znaleźć w pracach Ozga-Zielińskiego i in. [2010], Magnuszewskiego i in. [2012], Łosia [2013], Magnuszewskiego [2013; 2014], Ozga-Zielińskiego i in. [2013; 2014] i Kubraka i in. [2014].

W społeczeństwie wciąż panuje powszechna opinia, że techniczna ochrona – szczególnie wały przeciwpowodziowe, stanowi najbardziej skuteczny środek ograniczenia skutków wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Ludzie zamieszkujący na obszarach chronionych wałem mają wrażenie, że są całkowicie bezpieczni. Intensywnie zagospodarowują tereny na zawału tworząc kosztowną infrastrukturę. Jeśli wał zostanie przerwany, bądź woda przeleje się przez jego koronę, straty wywołane takim zdarzeniem będą nieporównywalnie większe niż gdyby tego wału w ogóle nie było [Bobiński i Żelaziński, 1996].

Oczywiście działania techniczne mimo wielu swoich wad, związanych z silnym oddziaływaniem na otaczające środowisko naturalne, w niektórych sytuacjach są jedyną możliwą do zastosowania formą ochrony przed powodzią, szczególnie, gdy na terenach chronionych występuję gęsta zabudowa i nie można zastosować innych środków ochronnych.

Niewątpliwą zaletą działań technicznych jest możliwość wykorzystania ich do sterowania ryzykiem hydrologicznym w strefie ekstremów lokalnych (rys. 3.1).

3.3.2. Techniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych na obszarze zlewni

Na obszarze zlewni, poza korytami rzecznyymi, występują dwa rodzaje zagrożeń hydrologicznych, mianowicie powódzie obszarowe oraz susze. Można wyróżnić trzy rodzaje powodzi obszarowych:

- powódzie na obszarach nizinnych słabo zagospodarowanych,
- powódzie stokowe na obszarach górskich,
- powódzie miejskie.

Podstawową formą ochrony technicznej przed skutkami wystąpienia pierwszych dwóch rodzajów wymienionych powodzi obszarowych są działania na rzecz rozwoju i kształtowania retencji zlewni i spowolnienia spływu powierzchniowego. Działania te nie eliminują negatywnych skutków ekstremalnych wezbrań, lecz mogą przyczynić się do zmniejszenia wielkości powodzi a w przypadku zlewni górskich również do zmniejszenia gwałtowności ich przebiegu (gwałtowne wezbrania – szybkie powódzie tzw. – „flash floods”) [Guidance ..., 2007; Madej i in., 2009]. Działania te nie mają większego znaczenia w przypadku powodzi miejskich (urban floods), których przyczyną jest wystąpienie opadu nawałnego o dużej wydajności w krótkim czasie i na stosunkowo małym obszarze. Dodatkowo wystąpieniu powodzi miejskich sprzyja źle zaprojektowany lub nieprawidłowo utrzymany i użytkowany system kanalizacyjny miasta. Wielkość powodzi miejskich potęguje występowanie dużych powierzchni nieprzepuszczalnych, w konsekwencji brak możliwości retencjonowania wody na powierzchni zlewni i w gruncie oraz brak możliwości szybkiego odpływu wody związany z ograniczeniami przepustowości (wydajności) nawet najlepiej zaprojektowanej i użytkowanej (utrzymanej) kanalizacji.

Do działań sprzyjających retencjonowaniu wody na obszarze zlewni miejskiej (obszarze zurbanizowanym) należy zaliczyć: zielone ażurowe parkingi, zielone dachy, sztuczne zbiorniki naziemne i podziemne, systemy pozwalające na gromadzenie, rozprowadzenie, filtrowanie i ponowne wykorzystanie wody deszczowej, przydomowe tereny zielone zasilane wodą deszczową z rynien, nie odprowadzaną bezpośrednio do kanalizacji.

Szersze omówienie zagadnień związanych z występowaniem szybkich powodzi, do których niektórzy autorzy zaliczają również powódzie miejskie, można znaleźć w pracach Madeja i in. [2009] i Ostrowskiego i in. [2012], a wpływu urbanizacji zlewni na wielkość wezbrań w pracach Banasika i in. [2008] oraz Banasika i Phama [2010].

Działania techniczne kształtujące i rozwijające retencję zlewni mają istotny wpływ na opóźnienie lub w niektórych sytuacjach nawet na całkowite ograni-

czenie spływu powierzchniowego, szczególnie w zlewniach nizinnych o małych spadkach terenu i silnie użytkowanych rolniczo. Do tych działań należy zaliczyć wszelkie zabiegi związane z wykorzystaniem już istniejącej i tworzeniem nowej retencji dużych kompleksów leśnych, użytków zielonych, terenów podmokłych i bagien, stawów i małych oczek wodnych jak również zabiegów agrotechnicznych ułatwiających retencjonowanie wody i utrudniających jej spływ do koryt rzecznych. Szersze omówienie poszczególnych działań można znaleźć w pracy Koniecznego i in. [2012].

Nieco odmienny charakter mają działania techniczne na obszarze zlewni, związane z przygotowaniem infrastruktury mieszkaniowej i użytkowej, znajdującej się w zakresie oddziaływania zdarzenia niepożądanego. Niestety nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie już istniejącej zabudowy na terenach, które potencjalnie mogą być zalane. Niemniej jeśli jest to technicznie możliwe i ekonomicznie opłacalne należy zabudowę na tych terenach przenieść tam gdzie nie występuje bezpośrednie zagrożenie ich zalania. Natomiast obiekty, które są narażone na podtopienia i zalanie można uszczelnić, tj. uniemożliwić dostęp wodzie do wnętrza obiektu, zabezpieczyć wnętrze obiektu i jego wyposażenie, zastosować stałe lub tymczasowe osłony przeciwpowodziowe obiektu, zabezpieczyć kanalizację obiektu przed cofaniem się ścieków, itp., tak aby były bardziej odporne na wodę [Konieczny i in., 2012].

Całkowicie odmienny charakter obrony przed zdarzeniami ekstremalnymi mają działania techniczne na obszarze zlewni, związane z budową skutecznych systemów wczesnego ostrzegania przed możliwością wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Istniejący w IMGW-PIB system osłony kraju pozwala na monitorowanie i prognozowanie ekstremalnych zjawisk hydrologicznych i meteorologicznych oraz na wydawanie ostrzeżeń o możliwości ich wystąpienia, którego głównymi odbiorcami są służby kryzysowe działające na poziomie ogólnokrajowym i regionalnym. Jednak w skali lokalnej system ostrzeżeń IMGW-PIB jest niewystarczający, ze względu na ograniczoną gęstość sieci pomiarowo-obszerniczej. Obecnie w wielu krajach, w tym również w Polsce (choć w niewielkim stopniu), budowane są lokalne systemy ostrzeżeń przed ekstremalnymi zdarzeniami, szczególnie przed gwałtownymi wezbrzeniami, które prowadzą do tzw. szybkich powodzi, występujących głównie w zlewniach rzek górskich i podgórskich, gdzie czas koncentracji jest krótszy niż 6 godzin. Zadaniem tych systemów jest natychmiastowe ostrzeżenie ludności zamieszkującej lub czasowo przebywającej na terenach zagrożonych zalaniem, z pominięciem wielopoziomowego systemu przepływu informacji służb kryzysowych. Szczegółowy opis działania takich systemów można znaleźć w pracach Barszczyńskiej i in. [2005] i Madeja i in. [2009].

3.3.3. Nietechniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych w korytach rzek i na obszarze zlewni

Do nietechnicznych działań obronnych przed zagrożeniami hydrologicznymi należy zaliczyć edukację na temat zdarzeń ekstremalnych, informację o wystąpieniu zagrożenia w postaci powodzi lub suszy, właściwe planowanie zagospodarowania przestrzennego, system ubezpieczeń oraz system prawny i instytucjonalny. Edukacja powinna obejmować przede wszystkim wiedzę na temat mechanizmów powstawania zagrożeń meteorologicznych i hydrologicznych, rozwijanie świadomości o możliwych konsekwencjach wystąpienia zdarzeń ekstremalnych, przygotowanie na nadejście zagrożenia, umiejętność zachowania się podczas wystąpienia zagrożenia, umiejętność radzenia sobie po wystąpieniu zagrożenia i świadomość wzięcia odpowiedzialności za bezpieczeństwo nie tylko swoje i osób bliskich, ale również osób trzecich takich jak sąsiedzi, współpracownicy, klienci, turyści itp. Edukacja powinna dotyczyć przede wszystkim ludności zamieszkującej na stałe na terenach zagrożonych wystąpieniem zdarzeń niepożądanych, ale również osób prowadzących na tych terenach działalność gospodarczą, przebywających czasowo, społeczności lokalnej nienarażonej bezpośrednio na oddziaływanie zagrożenia oraz przedstawicieli organów administracji centralnej i samorządowej, których zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa ludności zamieszkującej w obrębie ich działania. Edukacja powinna obejmować nie tylko wszystkie grupy społeczne, ale i wiekowe, począwszy od młodzieży szkolnej a skończywszy na ludziach w podeszłym wieku, którzy wymagają szczególnej troski w trakcie powodzi i zaraz po jej ustąpieniu [Barszczyńska i in., 2005; Konieczny i in., 2006; Rucińska, 2012].

Informacja o zbliżającym się zagrożeniu i jego potencjalnym przebiegu nie powinna ograniczać się jedynie do działań informacyjnych, ale również podawać sposoby przygotowania siebie, swojej rodziny, swojego domu czy miejsca pracy na konkretny rodzaj zagrożenia, podawać drogi i miejsca ewakuacji, lokalizować tereny najbardziej zagrożone w trakcie trwania zdarzenia niepożądanego, itp.

Planowanie zagospodarowania przestrzennego jest jednym z najlepszych sposobów prewencji przed zagrożeniami hydrologicznymi. Brak zgody na lokalizację obiektów na terenach bezpośrednio zagrożonych zalaniem eliminuje *de facto* straty w infrastrukturze mieszkaniowej i użytkowej, a prawdopodobieństwo utraty życia zmniejsza niemal do zera. Na terenach, które nie są bezpośrednio zagrożone, lecz mogą znaleźć się w zasięgu oddziaływania zdarzenia ekstremalnego powinno się ograniczyć zabudowę do minimum, w szczególności nie powinno się tam lokalizować obiektów użyteczności publicznej, przemysłowych oraz obiektów, których zniszczenie może spowodować wtórne zagrożenie.

Ubezpieczenia są jedną z form finansowego zabezpieczenia potencjalnie zagrożonych na wypadek wystąpienia zdarzenia ekstremalnego. Mechanizm obron-

ny rozumiany jest tutaj, jako pomoc w usuwaniu skutków wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Straty materialne i moralne ludności dotkniętej katastrofą są rekompensowane na drodze finansowej ze środków ubezpieczenia własnego uszkodzonego bądź dedykowanych (celowych) funduszy państwowych przeznaczonych na likwidację skutków zdarzeń ekstremalnych.

Zapewnienie podstaw prawnych i instytucjonalnych ma na celu wdrożenie polityki państwa w zakresie bezpieczeństwa obywateli i łagodzenia skutków zdarzeń niepożądanych. System prawny składa się z szeregu ustaw dotyczących zagrożeń naturalnych i technicznych, służb ratownictwa, służb porządkowych, służb specjalistycznych a także przepisów dotyczących użytkowania terenu i uregulowań odnoszących się do kompetencji organów administracji centralnej i samorządowej jak również do praw i obowiązków obywateli.

Reasumując, techniczne mechanizmy obronne przed ekstremalnymi zagrożeniami hydrologicznymi mają za zadanie, jak to współcześnie określane jest w strategiach ochrony przeciwpowodziowej, *utrzymać wodę z dala od ludzi*, zaś nietechniczne mechanizmy mają na celu *utrzymanie ludzi z dala od wody*. Wybór odpowiednich mechanizmów musi uwzględniać aspekty bezpieczeństwa ludzi i ich mienia, ochrony środowiska przyrodniczego oraz potencjalnych strat gospodarczych, zawsze w odniesieniu do reżimu hydrologicznego rzeki, który jest zmienny na jej długości. Ochrona przeciwpowodziowa w każdym miejscu (w dolinie rzeki, na obszarze zlewni) jest wieloaspektowym i indywidualnym, i tym samym multidyscyplinarnym rozwiązaniem [Kledyński, 2011]. Należy wyraźnie podkreślić, że stosowanie tylko działań technicznych lub tylko działań nietechnicznych nie jest wystarczające, aby zapewnić znaczące złagodzenie oddziaływania ekstremalnych zdarzeń hydrologicznych. Te działania muszą się wzajemnie przenikać i uzupełniać.

Należy pamiętać, że zarówno powódź jak i braki w zaopatrzeniu w wodę w okresach niżówek nie są zdarzeniami całkowicie losowymi. Zdarzeniami w pełni losowymi są jedynie zjawiska meteorologiczne, pod wpływem których kształtuje się przepływ rzeczny. Zatem zdarzeniami losowymi są jedynie wezbrania i niżówki. Powódź natomiast, czy brak zaopatrzenia w wodę, zależą ponadto od:

- Rodzaju i rozmiarów zastosowanej technicznej ochrony przeciwpowodziowej.
- Dokładności (trafności) prognozy meteorologicznej i hydrologicznej.
- Skuteczności (poprawności) stosowanych procedur sterowania przepływem.
- Przyjętego planu przestrzennego zagospodarowania zlewni.
- Sposobu użytkowania powierzchni zlewni.
- Realizacji w praktyce przyjętej strategii rozwoju, programów operacyjnych i rozwiązań planistycznych przeciwdziałania wzrostowi ryzyka i ograniczania skutków powodzi i susz.

W sytuacji właściwego, adekwatnego do rozmiarów występujących wezbrań, zabezpieczenia technicznego w postaci zbiorników retencyjnych, obwałowań ko-

ryt rzecznych, polderów, kanałów ulgi, suchych zbiorników, niezabudowanych terenów międzywala oraz właściwych procedur sterowania przepływem fali wezbraniowej, można w znacznym stopniu zabezpieczyć się przed powodzią. Tak więc, istnieje wiele możliwości ograniczania skutków wezbrań włączając w to również środki nietechniczne. Dlatego też jeszcze raz należy wyraźnie stwierdzić, że powódź nie jest, jak to się często błędnie określa, zdarzeniem całkowicie losowym. Zdarzeniami losowymi są niewątpliwie wezbrania, będące skutkiem losowości zdarzeń meteorologicznych.

W sprzeczności ze skuteczną ochroną przed powodzią, która wymaga jak najszybszego opróżniania zbiorników retencyjnych, jest zabezpieczenie przed występowaniem niżówek, a w konsekwencji zabezpieczenie przed wystąpieniem hydrologicznej suszy rzecznej. Oba te zjawiska, powódź i susza, są z punktu widzenia gospodarki wodnej zjawiskami równie niekorzystnymi, chociaż zabezpieczenie przed nimi jest często trudne do jednoczesnego pogodzenia.

Na zakończenie tego rozdziału należy stwierdzić, że zagrożenia związane z wodą to nie tylko zagrożenia wynikające z pojawiania się zdarzeń ekstremalnych, wezbrania-powodzie i niżówki-susze, ale również zagrożenia wywołane przez zanieczyszczenie wody oraz nieprawidłowe działanie człowieka. Problematyka zagrożeń związanych z wodą była przedmiotem prac Komitetu Badań nad Zagrożeniami związanymi z Wodą przy Prezydium Polskiej Akademii Nauk, których efektem końcowym było przygotowanie raportu opublikowanego w artykułach tematycznych dotyczących ogólnej charakterystyki zagrożeń związanych z wodą [Iwanicki i in., 2014; Kundzewicz i in., 2014], zagrożeń zasobów wodnych [Gutry-Korycka i in., 2014], zagrożeń związanych z jakością wody [Gromiec i in., 2014; Gromiec, 2014; Gromiec i Sadurski, 2014], zagrożeń związanych z nadmiarem wody [Romanowicz i in., 2014; 2014a], zagrożeń związanych z niedoborem wody [Kędziora i in., 2014; 2014a] i zagrożeń instytucjonalnych w gospodarce wodnej [Kindler i in., 2014, 2014a].

4. NIEZAWODNOŚĆ I BEZPIECZEŃSTWO DZIAŁANIA SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO

Teoria niezawodności i bezpieczeństwa to *dyscyplina naukowa, zajmująca się opracowywaniem metod i sposobów postępowania w trakcie projektowania, wytwarzania, odbioru, transportowania i przechowywania oraz eksploataowania obiektów, mająca na celu zapewnienie skutecznego i bezpiecznego ich zastosowania* [Rutkowski, 2005].

Teoria niezawodności zajmuje się wykrywaniem praw rządzących występowaniem uszkodzeń, metodami ich prognozowania, opracowaniem sposobów podwyższania niezawodności obiektów. Większość zagadnień teorii niezawodności wymaga zastosowania metod matematycznych – w szczególności rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej. Zadaniem teorii niezawodności jest opracowanie zasad konstruowania urządzeń złożonych w taki sposób, aby były one zdolne do działania, nawet po uszkodzeniu pewnej liczby ich elementów. Zazwyczaj straty spowodowane zawodnością urządzeń nie ograniczają się jedynie do kosztów naprawy samego urządzenia, ale również obejmują koszty usuwania następstw uszkodzenia w otoczeniu, jak również „koszty utraconych szans”. Prace zmierzające do zapewnienia odpowiedniej niezawodności urządzenia muszą być podejmowane już na etapie projektowania i konstruowania. Należy odpowiednio określić zadania, jakie stawia się przed projektowanym urządzeniem, rozpoznać obciążenia i inne oddziaływania środowiska, dobrać stosowne materiały, rozpoznać procesy powstawania uszkodzeń, przeanalizować scenariusze potencjalnych uszkodzeń i ich możliwe następstwa. Opracowane powinny zostać odpowiednie procedury badań odbiorczych, zasady postępowania z obiektem w czasie jego eksploatacji obejmujące tzw. profilaktykę techniczną, zasady diagnozowania. Niezawodność, jako dyscyplina naukowa obejmuje wiele koncepcji, wskaźników, narzędzi matematycznych, jak również metody pomiaru i prognozowania wartości wykorzystywanych wskaźników [Rutkowski, 2005].

Łatwo zauważyć, że teoria niezawodności i bezpieczeństwa została stworzona przede wszystkim dla potrzeb projektowania, wytwarzania (budowania) i eksploatacji obiektów technicznych o wymaganej niezawodności.

W hydrologii podstawowym obiektem podlegającym badaniom naukowym jest zlewnia rzeczna traktowana w niniejszej pracy, jako system hydrologicznie zamknięty uwzględniający zagospodarowanie zlewni, w szczególności obiektami (elementami) gospodarki wodnej. W niniejszej pracy termin *zlewnia rzeczna* nie należy interpretować wyłącznie w ujęciu geograficzno-przyrodniczym jako obiekt „czysto” naturalny, lecz przede wszystkim należy interpretować, jako obiekt wodnogospodarczy podlegający ciągłym (stałym) przeobrażeniom pod wpływem działalności człowieka. System hydrologiczny może odnosić się do jednej zlewni rzecznej bądź kilku zlewni jednocześnie, a w przypadku dużych rzek również do ich dorzeczy.

W pracy podjęto próbę opisu zlewni rzecznej metodami i narzędziami stosowanymi w teorii niezawodności i jej praktycznym wykorzystaniu, inżynierii niezawodności. Zlewnia rzeczna potraktowana została jako obiekt złożony składający się z elementów będących z jednej strony naturalnymi zasobami wód powierzchniowych i podziemnych występującymi w środowisku przyrodniczym, z drugiej zaś urządzeniami hydrotechnicznymi umożliwiającymi kształtowanie tych zasobów, przy uwzględnieniu powiązań występujących między tymi elementami.

4.1. PODSTAWOWE POJĘCIA I MIARY TEORII NIEZAWODNOŚCI I BEZPIECZEŃSTWA

W pracy przyjęto symbole i oznaczenia właściwe dla teorii niezawodności i bezpieczeństwa w celu łatwiejszego zrozumienia narzędzi opisu stosowanych w obszarze problematyki niezawodności i bezpieczeństwa oraz możliwości łatwego skorzystania z piśmiennictwa dotyczącego tej problematyki.

Prezentowane zagadnienia będą dotyczyć systemu N-C-T-S, czyli siły Natury-Człowiek-Technika-Środowisko przyrodnicze (rys. 2.1) gdyż system hydrologiczny obejmuje wszystkie powiązania między tymi czterema elementami, które mają istotny wpływ na niezawodność jego działania i bezpieczeństwo przede wszystkim człowieka, ale również środowiska przyrodniczego i obiektów technicznych w nim występujących.

Używane w teorii niezawodności i bezpieczeństwa terminy takie jak zdarzenie niepożądane, zagrożenie, ryzyko, niezawodność lub zawodność, niesprawność, uszkodzenie, wypadek, katastrofa, straty będą wykorzystane do opisu i analizy systemu hydrologicznego.

Przed przystąpieniem do jakichkolwiek analiz należy zdefiniować, co rozumie się pod pojęciem obiekt, zdarzenie niepożądane i niesprawność obiektu. W teorii niezawodności i bezpieczeństwa pod pojęciem *obiektu* rozumie się *jednostkę funkcjonalną, rozwiązanie techniczne, rozwiązanie organizacyjne posiadające określone cechy eksploatacyjne. Cechy eksploatacyjne determinują własności jednostki (obiektu) oraz przewidziane dla niej warunki użytkowania. Określenie eksploatacyjne wskazuje na cechy istotne dla użytkownika z punktu widzenia korzystania z danego obiektu* [Pamuła, 2011]. W niniejszej pracy *obiektem* będzie system hydrologiczny. Jak wspomniano wcześniej system hydrologiczny jest obiektem złożonym tzn. jest zbiorem elementów (obiektów niepodzielnych) wzajemnie powiązanych ze sobą, tj. o ustalonej organizacji i wzajemnych relacjach. Poszczególne elementy realizują funkcjonalność całego systemu i definiują jego parametry działania. A zatem w toku badań niezawodnościowych system hydrologiczny będzie obiektem traktowanym, jako całość. Jednak dla ułatwienia analizy będzie przedstawiony w postaci struktury powiązanych ze sobą elementów (obiektów niepodzielnych). Obiektami niepodzielnymi (inaczej elementami, z których składa się obiekt złożony, jakim jest system hydrologiczny) mogą być obiekty hydrotechniczne takie jak zbiorniki retencyjne, wały przeciwpowodziowe, poldery, kanały ulgi, etc., ale również koryto rzeki, retencja doliny rzeki czy retencja zlewni.

Zdarzenie niepożądane to takie zdarzenie, które powoduje wystąpienie niesprawności w funkcjonowaniu obiektu. Dla systemu hydrologicznego zdarzeniem niepożądanym będzie hydrologiczne zdarzenie w postaci ekstremalnego wezbrania powodującego powódź bądź w postaci ekstremalnej niżówki powodującej suszę

hydrologiczną. W pracy skoncentrowano się przede wszystkim na zagadnieniach dotyczących zdarzeń ekstremalnych w postaci ekstremalnych wezbrań, które będą przedmiotem analizy niezawodnościowej systemu hydrologicznego. Podobne podejście może być wykorzystane do analizy niezawodności i bezpieczeństwa w przypadku zagrożeń powodowanych występowaniem ekstremalnych niżówek. Zagadnienia dotyczące zdarzeń ekstremalnych w postaci niżówek i susz hydrologicznych, choć w całkiem innym ujęciu niż prezentowane w niniejszej pracy, zostały przedstawione ostatnio przez Tokarczyk [2010] i Kępińską-Kasprzak [2013, 2014].

Ogólnie pod pojęciem *niesprawność obiektu* rozumie się *każde zdarzenie uniemożliwiające, fizycznie lub umownie, spełnienie przewidzianych dla danego obiektu funkcji* [Szopa, 2009]. W odniesieniu do konkretnego obiektu należy zawsze podać kryteria niesprawności, aby można było precyzyjnie zdefiniować, co rozumiane jest pod pojęciem niesprawności danego obiektu.

Niesprawnościami fizycznymi są zdarzenia, których zajście uniemożliwia natychmiast funkcjonowanie obiektu, zaś niesprawnościami umownymi nazywa się takie zmiany stanu obiektu, które nie przerywają natychmiast jego funkcjonowania, a jedynie wywołują niedopuszczalne pogorszenie poprawności funkcjonowania obiektu lub stwarzają możliwość wystąpienia niedopuszczalnego uszkodzenia obiektu mogącego spowodować poważne straty.

W przypadku zlewni rzecznej z istniejącą infrastrukturą przeciwpowodziową, niesprawnością takiego złożonego obiektu będzie wystąpienie powodzi, jako zdarzenia niepożądanego, będącego efektem ekstremalnego wezbrania. W zależności od wielkości zagrożenia spowodowanego wystąpieniem zdarzenia niepożądanego w systemie hydrologicznym, jako całości, jak i w poszczególnych elementach jego struktury mogą wystąpić niesprawności fizyczne lub/i umowne.

Ponieważ w systemie hydrologicznym (tj. obiekcie złożonym) występują elementy techniczne traktowane, jako obiekty niepodzielne tworzące techniczną infrastrukturę przeciwpowodziową używany będzie również termin *uszkodzenie obiektu*, rozumiany jako synonim niesprawności elementu technicznego (obektu niepodzielonego). Uszkodzenie będzie rozumiane, jako niesprawność fizyczna takiego obiektu. Rozległe uszkodzenie takiego obiektu, wymagające dużych nakładów finansowych, często nazywa się *awarią*.

W świetle powyższej terminologii można przyjąć następującą ogólną definicję niezawodności obiektu:

Niezawodność obiektu jest to jego zdolność, w określonym czasie, do pełnienia, bez niesprawności, przewidzianych dla niego funkcji, tzn. zdolność do prawidłowego jego funkcjonowania (działania).

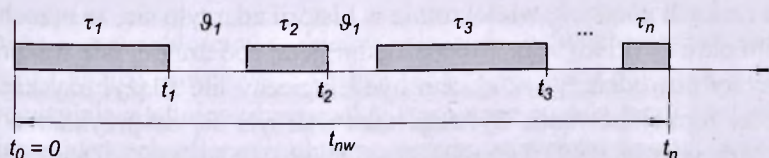
Powyższa definicja może być uszczegółowiona dla konkretnego obiektu np. zlewni rzecznej z istniejącą infrastrukturą przeciwpowodziową, o informację na temat cech tego obiektu (jego elementów) decydujących o jego niezawodności (lub niesprawności).

Jeśli za niesprawność obiektu w postaci systemu hydrologicznego przyjmie się wystąpienie powodzi, a elementami struktury tego obiektu będą na przykład zbiorniki retencyjne, wały przeciwpowodziowe i retencja obszarowa to definicję niezawodności takiego systemu można rozszerzyć do następującej postaci:

Niezawodność systemu hydrologicznego jest to jego zdolność do retencjonowania w określonym czasie ekstremalnego opadu, wywołującego ekstremalne wezbranie, w istniejących zbiornikach retencyjnych działających zgodnie z instrukcją ich pracy, w korycie rzeki i na terenach zalewowych ograniczonych wałami w dobrym stanie technicznym oraz na obszarze zlewni, której stan zabudowy, użytkowania i nasycenia gruntu pozwala na zahamowanie (zmniejszenie, ograniczenie) spływu powierzchniowego.

Innymi słowy niezawodność systemu hydrologicznego jest to jego cecha polegająca na zdolności elementów, z których jest zbudowany, do pełnienia w określonym czasie, bez niesprawności, przewidzianych dla nich funkcji, tzn. zdolność systemu do prawidłowego jego funkcjonowania (działania) – bez powstawania powodzi.

Z punktu widzenia teorii niezawodności system hydrologiczny można traktować, jako obiekt odnawialny (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Przebieg funkcjonowania obiektu odnawialnego: t_i – chwila wystąpienia i -tej niesprawności obiektu, τ_i – czas funkcjonowania obiektu między i -tymi niesprawnościami, ϑ_i – czas trwania i -tej odnowy obiektu, t_{nw} – trwałość obiektu (za Szopa [2009])

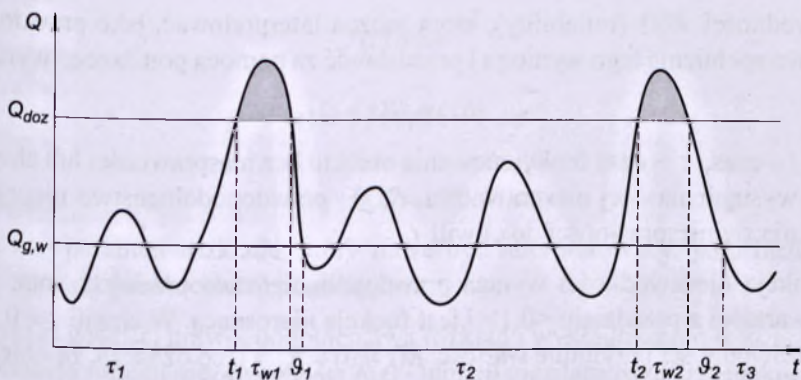
Fig. 4.1. Run of renewable object functioning: t_i – moment of occurrence of object failure i , τ_i – time of object functioning between failures i , ϑ_i – duration of object renovation i , t_{nw} – durability of object (by Szopa [2009])

Na rysunku 4.1 pokazany jest przebieg czasowy funkcjonowania obiektu odnawialnego przerywany chwilami wystąpienia niesprawności obiektu i czasami jego odnowy, podczas których obiekt jest w stanie zdatności lub niezdatności do poprawnego działania. Oba te stany określają stan niezawodnościowy obiektu. Zarówno czas funkcjonowania obiektu (stan zdatności) jak i czas odnowy obiektu (stan niezdatności) oraz chwile wystąpienia niesprawności obiektu są zmiennymi losowymi. Trwałość obiektu rozumiana jest w teorii niezawodności, jako czas upływający od początku eksploatacji obiektu aż do wystąpienie ostatniej niesprawności, po której obiektowi nie można przywrócić już stanu zdatności, bo jest to technicznie niemożliwe bądź ekonomicznie nieopłacalne. W przypadku obiektów takich jak zlewnie rzeczne, w zasadzie pojęcie trwałości

obiektu nie ma zastosowania. Można jedynie rozważać trwałość jego elementów – hydrotechnicznych obiektów niepodzielnych, z których zbudowany jest system hydrologiczny.

Jak wspomniano wcześniej zlewnię rzeczną można traktować, jako system odnawialny. Oznacza to, że zlewnia, jako całość (obiekt złożony) jak i elementy (obiekty niepodzielne), z których jest zbudowana mogą, w procesie wypełniania swoich funkcjonalności, być doprowadzone do pełnej sprawności, na przykład obiekty hydrotechniczne mogą być remontowane po wystąpieniu ich uszkodzenia czy awarii. W teorii niezawodności i bezpieczeństwa wyróżnia się obiekty natychmiast odnawialne i odnawialne o niezerowym czasie odnowy. W pierwszym przypadku czas niesprawności i czas odnowy obiektu jest na tyle krótki w porównaniu z czasem poprawnego funkcjonowania obiektu, że można przyjąć, że czas odnowy jest równy zero. W drugim przypadku czas odnowy jest większy od zera, lecz skończony. Przyjmując, że czas trwania niesprawności, czyli czas trwania powodzi jest znacząco krótszy w porównaniu z czasem poprawnego działania systemu hydrologicznego w okresach, gdy nie dochodzi do powodzi, system hydrologiczny, jako całość można zakwalifikować, jako obiekt natychmiast odnawialny, tj. z czasem odnowy równym zero. Jednak analizując szczegółowo incydenty wezbraniowe na niektórych rzekach w Polsce, w szczególności rzekach górskich, wielokrotnie w historii zdarzyło się, że przechodzące w krótkim okresie (kilku bądź kilkunastu dni) jedna po drugiej fale wezbraniowe powodowały powodzie, gdyż system hydrologiczny nie zdążył uzyskać pełnej sprawności funkcjonowania. Sytuacja taka zdarzyła się na przykład w zlewni górnej Odry w roku 1997 [*Monografia powodzi lipiec 1997. Dorzecze Odry*, 1999]. Również w przypadku poszczególnych elementów występujących w systemie hydrologicznym, na przykład obiektów technicznej ochrony powodziowej, czy retencji zlewni, dla których powrót do pełnej sprawności wymaga pewnego skończonego okresu czasu, należałoby jednak system hydrologiczny traktować, jako obiekt ze skończonym niezerowym czasem odnowy i tak będzie on w niniejszej pracy traktowany.

Jeśli przyjmie się, że niesprawnością systemu hydrologicznego będzie wystąpienie powodzi, jako zdarzenia niepożądanego, będącego efektem ekstremalnego wezbrania z przepływem maksymalnym powyżej np. przepływu dozwolonego Q_{doz} , który przyjmuje się, jako największy przepływ nie powodujący szkód powodziowych, czy powyżej przepływu ochrony powodziowej Q_{op} , to analizując przebieg przepływów w pewnym okresie czasu (najlepiej w całym okresie obserwacyjnym) można wyróżnić okresy niezawodnego funkcjonowania systemu hydrologicznego τ , oraz chwile wystąpienia jego niesprawności t_i i okresy trwania niesprawności τ_{wi} połączone z okresami odnowy systemu u_i , tj. okresami jego powrotu do pełnej sprawności po ustąpieniu niesprawności (zakończeniu powodzi) (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Hydrogram przepływów wraz zaznaczonymi okresami niezawodnego funkcjonowania systemu hydrologicznego τ , oraz chwilami wystąpienia jego niesprawności t , i okresami trwania niesprawności τ_{wi} połączonymi z okresami odnowy systemu ν , $Q_{g,w}$ – przepływ graniczny wezbrania przyjmowany najczęściej jako przepływ *NWQ*, Q_{doz} – przepływ dozwolony przyjmowany często jako przepływ *SWQ* lub $Q_{max,50\%}$

Fig. 4.2. Hydrograph with periods of reliable hydrological system operation τ as well as with moments of occurrence of its failure t and duration of its failures τ_{wi} connected with duration of system renovation ν , $Q_{g,w}$ – boundary flow of river flood often accepted as *NWQ*, Q_{doz} – maximum flow not causing flood losses often accepted as *SWQ* or $Q_{max,50\%}$

Analiza niezawodnościowa obiektu składa się z dwóch etapów: analizy jakościowej i analizy ilościowej. Analiza jakościowa jest konieczna, aby można było precyzyjnie zdefiniować wszystkie stosowane pojęcia teorii niezawodności w odniesieniu do określonego obiektu, przede wszystkim należy sprecyzować, co rozumiane jest pod pojęciem niesprawności obiektu i niezawodności obiektu. W przeciwnym wypadku po analizie ilościowej, przy wykorzystaniu odpowiednich miar niezawodności, nie będzie możliwe prawidłowe zinterpretowanie otrzymanych wyników i wyciągnięcie właściwych wniosków.

Analiza niezawodnościowa obiektu dotyczy czasu funkcjonowania obiektu. W związku z tym wszystkie miary niezawodności są funkcjami czasu prawidłowej pracy obiektu, czasu niesprawności – wystąpień uszkodzeń obiektu i czasu jego odnowy. Momentu wystąpienia niesprawności czy uszkodzenia obiektu nie da się przewidzieć. Zatem niesprawności i uszkodzenia obiektu (systemu) są zmiennymi losowymi, a co za tym idzie losowe – przypadkowe są czasy ich wystąpień, trwania i odnowy. Na ilościowy opis zdarzeń losowych pozwala znajomość rachunku prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwo wystąpienia uszkodzeń obiektu, jego czasu niezdatności lub zdatności do prawidłowego funkcjonowania może być określone w wyniku analizy częstotliwościowej zjawisk (zdarzeń), które powodują niesprawność obiektu.

W przypadku systemu hydrologicznego miarą niezawodności, która dobrze charakteryzuje zdolność takiego obiektu do prawidłowego działania jest funkcja

niezawodności $R(t)$ (reliability), którą można interpretować, jako prawdopodobieństwo spełnienia tego wymogu i przedstawić za pomocą poniższego wyrażenia

$$R(t) = P(\tau > t) \quad (4.1)$$

gdzie: t – czas, τ – czas funkcjonowania obiektu bez niesprawności lub chwila t_i wystąpienia i -tej niesprawności, $P(\cdot)$ – prawdopodobieństwo niepojawienia się niesprawności do chwili t_i .

Funkcja niezawodności wyraża prawdopodobieństwo przewyższenia, przyjmuje wartości z przedziału $<0,1>$ i jest funkcją nierosnącą. W chwili $t = 0$ funkcja niezawodności przyjmuje wartość $R(t = 0) = R_0 = 1$ co oznacza, że obiekt jest sprawny, a więc zdolny do funkcjonowania.

Zdarzenie przeciwne $\tau \leq t$ wyraża niezdatność obiektu do funkcjonowania. A zatem prawdopodobieństwo wystąpienia niesprawności do chwili t , wynosi

$$F(t) = P(t \leq \tau) \quad (4.2)$$

gdzie: $F(t)$ wyraża dystrybuantę i może być traktowane, jako miara zawodności obiektu (failure).

Ponieważ $R(t) + F(t) = 1$ to $R(t) = 1 - F(t)$ i $F(t) = 1 - R(t)$, a zatem istnieje ścisła relacja między funkcją niezawodności i funkcją zawodności obiektu.

Jeśli istnieje funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej t równa

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4.3)$$

wówczas

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (4.4)$$

i

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (4.5)$$

Funkcję gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy obiektu można przedstawić, jako prędkość zmian niezawodności lub inaczej bezwzględne pogorszenie niezawodności

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (4.6)$$

Funkcję gęstości $f(t)$ można wyznaczyć empirycznie na podstawie histogramu występowania uszkodzeń obiektu, czyli analizy gęstości częstości występowania niesprawności obiektu.

Jeśli czas funkcjonowania obiektu bez niesprawności ma rozkład wykładniczy, co ma często miejsce w przypadku obiektów z losowym (przypadkowym) uszkodzeniem (przeciążeniem), to

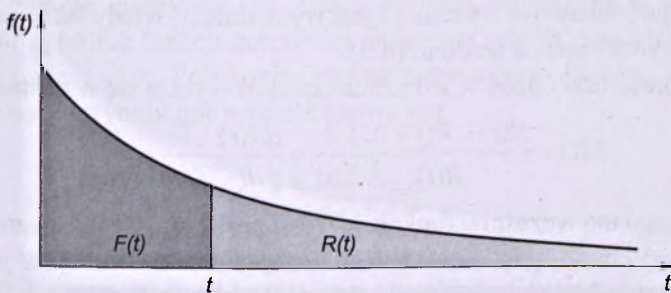
$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4.7)$$

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4.8)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (4.9)$$

gdzie: λ – parametr rozkładu, który może być interpretowany, jako liczba niesprawności obiektu w określonym czasie t .

Wykres gęstości prawdopodobieństwa rozkładu wykładniczego oraz graficzna interpretacja funkcji niezawodności $R(t)$ i funkcji niezdatności $F(t)$ obiektu przedstawiona jest na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Graficzna interpretacja funkcji niezawodności $R(t)$ i funkcji niezdatności $F(t)$ funkcjonowania obiektu

Fig. 4.3. Graphical interpretation of reliability $R(t)$ and failure $F(t)$ functions of object operation

Z powyższego wynika, że do wyznaczenia funkcji niezawodności $R(t)$ i funkcji niezdatności $F(t)$ obiektu potrzebna jest znajomość funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej t oraz znajomość liczbowych wartości jej parametrów. Uzyskanie tej wiedzy jest możliwe na drodze eksperymentu, tj. przede wszystkim poprzez pomiar zjawisk fizycznych, które mają wpływ na wystąpienie niesprawności obiektu. W systemach hydrologicznych przyczynami ich niesprawności są ekstremalne zdarzenia hydrologiczne (ekstremalne wezbrania stwarzające powodzie) spowodowane ekstremalnymi zdarzeniami meteorologicznymi.

Ponieważ dla obiektów bardzo złożonych postacie funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej t mogą być nieznane lub trudne do określenia, istnieje możliwość bezpośredniego oszacowania funkcji niezawodności $R(t)$ i związanej z nią funkcji niezdatności $F(t)$ przy wykorzystaniu estymatora funkcji niezawodności $\hat{R}(t)$ w postaci

$$\hat{R}(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} \quad (4.10)$$

gdzie: $n(t)$ – liczba zdarzeń powodujących niesprawność obiektu, N – liczba wszystkich zdarzeń zjawiska oddziałującego na obiekt.

Oprócz funkcji niezawodności $R(t)$ i funkcji niezdatności $F(t)$, w teorii niezawodności i bezpieczeństwa często używana jest miara zwana intensywnością uszkodzeń (niesprawności) $\lambda(t)$, która wyraża prawdopodobieństwo wystąpienia niesprawności obiektu w jednostce czasu następującej bezpośrednio po chwili t , pod warunkiem, że w chwili t obiekt był zdalny do funkcjonowania. Choć intensywność uszkodzeń jest często traktowana, jako miara niezawodności to *de facto* jest to miara zawodności obiektu [Szopa, 2009]. Między funkcją niezawodności $R(t)$ a intensywnością uszkodzeń $\lambda(t)$ istnieje ścisły związek w postaci

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} \quad (4.11)$$

W przypadku, gdy funkcja uszkodzeń jest stała $\lambda(t) = \lambda$, co oznacza, że rozkład prawdopodobieństwa zmiennej t jest wykładniczy, wtedy funkcja niezawodności może być wyrażona wzorem (4.9).

Intensywność uszkodzeń w jednostce czasu Δt wyraża się w postaci

$$\lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \frac{1}{\Delta t} = \frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} = -\frac{f(t)}{R(t)} \quad (4.12)$$

Jak wspomniano wcześniej funkcja $\lambda(t)$ jest prawdopodobieństwem uszkodzenia w kolejnej chwili, gdy dotąd obiekt był sprawny. Im mniejsza jest wartość funkcji $\lambda(t)$ tym własności niezawodnościowe obiektu są lepsze. Analizując przebieg funkcji uszkodzeń można ocenić własności niezawodnościowe obiektu.

Gdy $\lambda(t) = \lambda$ oraz λt jest małe, można korzystać z zależności przybliżonych w celu obliczenia funkcji niezawodności $R(t) \approx 1 - \lambda t$ i funkcji niezdatności $F(t) \approx \lambda t$.

Estymatorem funkcji intensywności uszkodzeń (niesprawności) jest wyrażenie

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N(t) \Delta t} \quad (4.13)$$

gdzie: $n(t, t + \Delta t)$ – liczba zdarzeń powodujących niesprawność obiektu w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$, Δt – szerokość przedziału czasowego, $N(t)$ – liczba zdarzeń oddziaływujących na obiekt w chwili t pomniejszona o liczbę zdarzeń powodujących niesprawność obiektu w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$, tj. liczba zdarzeń oddziaływujących na obiekt na początku każdego okresu Δt ($N(t = 0) = N$), N – liczba wszystkich zdarzeń oddziaływujących na obiekt w całym okresie jego funkcjonowania.

Miarą wyczerpywania się możliwości prawidłowego funkcjonowania obiektu jest skumulowana intensywność uszkodzeń (tzw. funkcja wiodąca) $\Lambda(t)$ wyrażona wzorem

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau = -\ln[R(t)], \quad t \geq 0 \quad (4.14)$$

Trzecią miarą niezawodności obiektu jest wartość oczekiwana czasu t funkcjonowania obiektu bez niesprawności, oznaczana symbolem ET i wyrażana w postaci

$$ET = \int_0^{\infty} R(t) dt, \text{ gdy } \lambda(t) \neq \text{const} \quad (4.15)$$

a przy stałym $\lambda = \text{const}$, $ET = 1/\lambda$ (rozkład wykładniczy).

Do obiektów odnawialnych po wystąpieniu niesprawności można zastosować także pojęcie gotowości obiektu. *Gotowość* można zdefiniować, jako zdolność obiektu do przebywania (pozostawania) w stanie zdatności w dowolnej chwili jego eksploatacji. Miarą gotowości obiektu jest prawdopodobieństwo $K(t)$ przebywania (pozostawania) obiektu w stanie zdatności w danej chwili czasowej t nazywane funkcją gotowości. W zastosowaniach praktycznych wykorzystuje się stacjonarną postać funkcji gotowości nazywaną współczynnikiem gotowości $k = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t)$ dla $t \rightarrow \infty$. Przyjmując pewne uproszczenia [Szopa, 1999] można przyjąć, że współczynnik gotowości k równy jest

$$k = \frac{ET}{ET + E\vartheta} \quad (4.16)$$

gdzie: ET – wartość oczekiwana czasu funkcjonowania obiektu bez niesprawności, $E\vartheta$ – wartość oczekiwania czasu przebywania (pozostawania) obiektu w stanie niezdatności.

Warto zauważyć, że współczynnik gotowości może dawać błędną ocenę niezawodności, zwłaszcza przy ekonomicznych ocenach stopnia wykorzystania obiektu. Jak podaje Szopa [2009] dwa obiekty o jednakowej gotowości mogą się znacznie różnić w ocenie zdolności tych obiektów do przebywania w stanie zdatności. Na przykład obiekty o współczynniku gotowości $k = 0,9$ mogą mieć znacząco różne oczekiwane czasy funkcjonowania bez niesprawności i oczekiwane czasy przebywania w stanie niezdatności $ET_1 = 9$ godz. i $E\vartheta_1 = 1$ godz. oraz $ET_2 = 900$ godz. i $E\vartheta_2 = 100$ godz.

4.2. STRUKTURA NIEZAWODNOŚCIOWA SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO

W przypadku obiektów złożonych takich jak system hydrologiczny, istotnym zagadnieniem w badaniach niezawodnościowych obiektu jest określenie niezawodności obiektu w zależności od jego struktury i elementów. Zanim przystąpi się do określenia struktury niezawodnościowej obiektu złożonego, a ściślej mówiąc do tworzenia modelu obiektu złożonego pod kątem jego niezawodności, należy precyzyjnie określić jak będzie rozumiana niesprawność obiektu. Inaczej, na-

leży ustalić jakie zdarzenie podczas funkcjonowania obiektu może spowodować, że obiekt jest niezdatny do działania. W modelach obiektów złożonych takich jak system hydrologiczny, struktura niezawodnościowa takiego obiektu może być złożona z różnych struktur podstawowych. W nauce niezawodności wyróżnia się cztery podstawowe struktury obiektów: szeregowe, równoległe, „ k z n ” i z rezerwą. Przy obiektach złożonych wyróżnia się również strukturę mieszaną. Szersze omówienie struktur niezawodnościowych obiektów technicznych można znaleźć w zasadzie we wszystkich pracach dotyczących teorii czy inżynierii niezawodności i bezpieczeństwa, między innymi w pracach Migdalskiego [1992], Buciora [2004], Szopy [1999, 2009] czy Pamuły [2011]. W niniejszej pracy jedynie omówiono po krótko poszczególne struktury podstawowe i miary niezawodnościowe stosowane do ich opisu, przede wszystkim jednak skoncentrowano się na tej strukturze niezawodnościowej, która będzie mogła być zastosowana do opisu systemu hydrologicznego. Należy jednak pamiętać, że struktura niezawodnościowa obiektu może być względna, co oznacza, że ten sam obiekt w różnych sytuacjach może być opisany inną strukturą, na przykład szeregową lub mieszaną. Czynnikiemami decydującymi, jaka struktura niezawodnościowa dla danego obiektu zostanie przyjęta, są kryteria określenia jego niesprawności. Ustalenie struktury niezawodnościowej obiektu złożonego jak również określenie miar niezawodności jego elementów może być wykorzystane do szacowania prawdopodobieństwa zajścia niesprawności obiektu w czasie t , tj. określenia funkcji zawodności obiektu $F(t)$. Przyjęcie określonej struktury niezawodnościowej obiektu złożonego przede wszystkim służy do analizy wpływu funkcji niezawodności $R_i(t)$ poszczególnych jego elementów na wielkość funkcji zawodności $F(t)$ jak również funkcji niezawodności $R(t)$ obiektu złożonego. Powyższa analiza może prowadzić do wniosku, że niektóre elementy mają większy wpływ na poziom niezawodności całego obiektu jak również, że nawet niewielka zmiana struktury obiektu złożonego może prowadzić do zwiększenia wartości funkcji niezawodności obiektu złożonego. Poprawę niezawodności obiektu złożonego można osiągnąć poprzez zwiększenie niezawodności tych jego elementów, które mają istotny wpływ na jego poprawne funkcjonowanie lub przez uzupełnienie istniejącej już struktury obiektu dodatkowymi elementami, pozwalającymi na większą niezawodność obiektu. W przypadku obiektów złożonych, jakimi są systemy hydrologiczne, ma to szczególne znaczenie w procesie planowania budowy nowych elementów ochrony powodziowej, a także przy modernizacji już istniejących urządzeń hydrotechnicznych, jak również przy projektowaniu zagospodarowania przestrzennego i użytkowania zlewni rzecznej.

Struktura szeregową

W teorii niezawodności przyjmuje się, że obiekt posiada strukturę szeregową (rys. 4.4), jeśli w czasie jego funkcjonowania wszystkie elementy mające wpływ

na jego działanie są sprawne. Oznacza to, że niesprawność któregokolwiek elementu e_i jego struktury powoduje niesprawność całego obiektu złożonego.

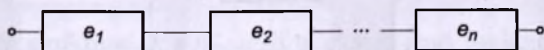
Jeżeli czasy funkcjonowania bez niesprawności elementów struktury szerego-
wej t_i , $i = 1, 2, \dots, n$, są zmiennymi losowymi wzajemnie niezależnymi to funkcję
zawodności $F(t)$ takiej struktury, czyli prawdopodobieństwo wystąpienia nie-
sprawności obiektu w czasie t można wyrazić w postaci

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)] \quad (4.17)$$

a funkcję niezawodności $R(t)$ w postaci

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (4.18)$$

gdzie: $R_i(t)$ – funkcja niezawodności i -tego elementu, $F_i(t)$ – funkcja zawodno-
ści i -tego elementu.



Rys. 4.4. Struktura szeregową obiektu

Fig. 4.4. Serial structure of object

Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$ obiektu o strukturze szerego-
wej jest równa

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (4.19)$$

sumie intensywności uszkodzeń $\lambda_i(t)$ poszczególnych elementów.

Wartość oczekiwana czasu T funkcjonowania obiektu bez niesprawności ET
jest równa

$$ET = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{ET_i}} \quad (4.20)$$

gdzie: ET_i – wartość oczekiwana czasu funkcjonowania i -tego elementu bez nie-
sprawności.

Współczynnik gotowości k obiektu równy jest

$$k = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{E\vartheta_i}{ET_i}} \quad (4.21)$$

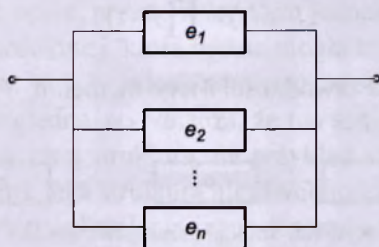
gdzie: ϑ_i – czas przebywania i -tego elementu w stanie niezdatności.

Z analizy wzorów (4.17)–(4.21) wynika, że wraz ze wzrostem złożoności
obektu o strukturze szerego-
wej, tj. ze zwiększającą się liczbą n elementów, po-

ziom jego niezawodności obniża się i rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia niesprawności w czasie t , tj. rośnie wartość funkcji niezdatności $F(t)$ takiego obiektu, a poziom niezawodności całego obiektu $R(t)$ jest zawsze niższy niż poziom niezawodności najbardziej zawodnego elementu.

Struktura równoległa

Obiekt posiada strukturę równoległą (rys. 4.5) w sensie niezawodnościowym, jeśli w czasie jego funkcjonowania, chociaż jeden element mający wpływ na jego działanie jest sprawny. Oznacza to, że obiekt złożony o takiej strukturze ulega niesprawności z chwilą, gdy ostatni ze zdatnych elementów e_i ulegnie niesprawności.



Rys. 4.5. Struktura równoległa obiektu

Fig. 4.5. Parallel structure of object

Przyjmując, że czasy funkcjonowania bez niesprawności elementów struktury równoległej t_i , $i = 1, 2, \dots, n$, są zmiennymi losowymi wzajemnie niezależnymi, funkcję niezawodności $R(t)$ i funkcję niezdatności $F(t)$ można określić z następujących zależności

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (4.22)$$

$$F(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4.23)$$

Wartość oczekiwana czasu T funkcjonowania obiektu bez niesprawności ET jest równa

$$ET = \left(1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right) ET_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.24)$$

gdzie: ET_i – wartość oczekiwana czasu funkcjonowania i -tego elementu bez niesprawności.

Z analizy struktury równoległej wynika, że wraz ze wzrostem złożoności obiektu, tj. ze zwiększającą się liczbą n elementów, rośnie poziom jego niezawodności i maleje prawdopodobieństwo wystąpienia niesprawności w określonym czasie

t . Maleje zatem wartość funkcji niezdatności $F(t)$ takiego obiektu, a poziom niezawodności całego obiektu $R(t)$ jest zawsze wyższy od poziomu niezawodności najbardziej zawodnego elementu. Tak więc, stosowanie kilku elementów, które pełnią te same funkcje w obiekcie złożonym, ustawionych równolegle w sensie niezawodnościowym jest skutecznym sposobem zwiększenia niezawodności całego układu. Przykładem takiej struktury w systemach hydrologicznych są kanały ulgi, których zadaniem jest zwiększenie przepustowości koryta rzeki w okresie wezbraniowym (powodziowym), tj. przejęcie i odprowadzenie części wody, która nie może zmieścić się w korycie głównym i powoduje powódź na terenach przyległych do rzeki. Taka struktura często występuje w obszarach silnie zurbanizowanych. Wadą układów równoległych jest duży koszt budowy i eksploatacji elementów takiego obiektu, choć uwzględniając straty spowodowane powodzią, taka inwestycja jest *per saldo* opłacalna nie tylko ze względów ekonomicznych, ale i społecznych.

Struktura „ k z n ”

Obiekt posiada strukturę „ k z n ”, jeśli w czasie jego funkcjonowania, co najmniej k z n jego elementów jest sprawnych. Przy założeniu niezależności zmiennych losowych t_i czasów funkcjonowania elementów obiektu bez niesprawności, funkcja niezawodności takiego obiektu przyjmuje postać

$$R(t) = \sum_{j=k}^{j=n} \frac{n!}{j!(n-j)!} R_j'(t) [1 - R_j(t)]^{n-j}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.25)$$

Tego rodzaju struktura nie ma zastosowania w systemach hydrologicznych.

Struktura z rezerwą

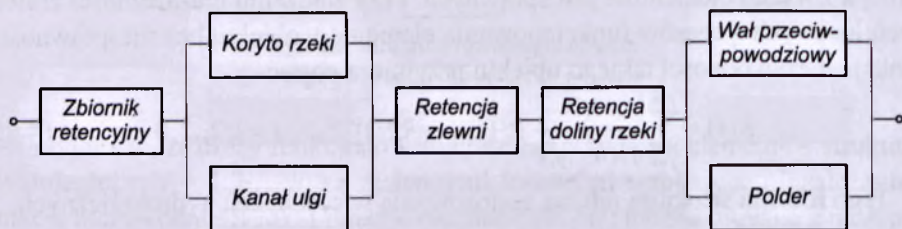
Obiekt o strukturze z rezerwą wyposażony jest w rezerwowe elementy realizujące funkcjonalność elementu podstawowego. Obiekt pozostaje w stanie zdatności do momentu, w którym ostatni element tej struktury jest sprawny. Rezerwowanie może być obciążone, co oznacza, że elementy rezerwowe funkcjonują jednocześnie z elementem podstawowym lub nieobciążone, gdy elementy rezerwowe są w stanie oczekiwania aż do chwili ich włączenia do pracy w miejsce niesprawnego elementu podstawowego. Dla obiektu z rezerwowaniem obciążonym obowiązują te same miary niezawodności jak dla struktury równoległej. Zaś dla rezerwowania nieobciążonego obiektu składającego się z elementu podstawowego i $n-1$ elementów rezerwowych przy $t = \sum_{i=1}^n t_i$ oraz małym prawdopodobieństwem wystąpienia niesprawności $F_i(t)$ elementów funkcja niezawodności obiektu $R(t)$ może zostać przedstawiona w postaci

$$R(t) \cong 1 - \frac{1}{n!} \prod_{i=1}^n F_i(t) \quad (4.26)$$

W większości obiektów technicznych zwiększanie liczby rezerwowych elementów ponad trzy elementy nie wpływa znacząco na wzrost niezawodności obiektu, a zasadniczo podraża koszty budowy takiego obiektu [Pamuła, 2011]. W systemach hydrologicznych struktury z rezerwą raczej nie występują, choć można sobie wyobrazić podwójny system wałów przeciwpowodziowych, np. pierścieniowych, chroniących istotny ze względu na bezpieczeństwo państwa strategiczny obiekt lub zespół kanałów ulgi z zamknięciami, których funkcjonowanie rozpoczyna się w momencie, gdy występuje zagrożenie wylania się wody poza główne koryto rzeki.

Struktura mieszana

Zazwyczaj struktura mieszana obiektu obejmuje połączone szeregowo ze sobą elementy współdziałające z elementami funkcjonującymi równolegle. Przykład struktury mieszanej dla prostego systemu hydrologicznego w postaci zbiornika retencyjnego, koryta głównego rzeki, kanału ulgi, retencji zlewni, retencji doliny rzeki, wałów przeciwpowodziowych i polderu pokazano na rysunku 4.6.



Rys. 4.6. Struktura mieszana prostego systemu hydrologicznego
Fig. 4.6. Mixed structure of simple hydrological system

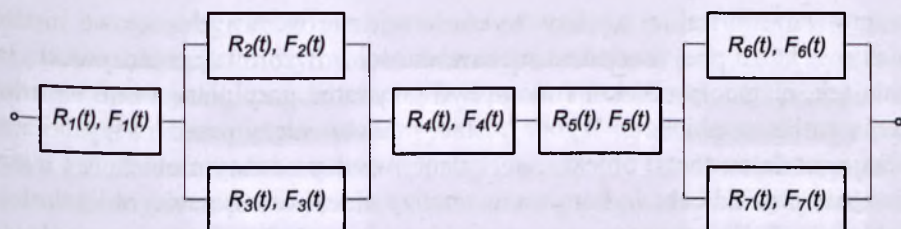
Funkcję niezawodności $R(t)$ dla takiej struktury mieszanej przy założeniu niezależności czasów t_i , $i = 1, 2, \dots, n = 7$ funkcjonowania bez niesprawności poszczególnych elementów tej struktury (rys. 4.7), wykorzystując wzory (4.17) i (4.18) oraz (4.22) i (4.23), można zapisać w postaci

$$R(t) = R_1(t) \{1 - [1 - R_2(t)][1 - R_3(t)]\} R_4(t) R_5(t) \{1 - [1 - R_6(t)][1 - R_7(t)]\} \quad (4.27)$$

a funkcję niezdatności $F(t)$ w postaci

$$F(t) = 1 - \{[1 - F_1(t)][1 - F_2(t)F_3(t)][1 - F_4(t)][1 - F_5(t)][1 - F_6(t)F_7(t)]\} \quad (4.28)$$

Należy wyraźnie podkreślić, że przedstawione powyżej postacie struktur obiektów są odzwierciedleniem funkcjonowania obiektów i ich elementów w sensie niezawodnościowym a nie przedstawiają schematów położenia elementów obiektów w sensie fizycznym.



Rys. 4.7. Struktura mieszana prostego systemu hydrologicznego z zaznaczonymi funkcjami niezawodności $R_i(t)$ i niezdatności $F_i(t)$ poszczególnych jego elementów

Fig. 4.7. Mixed structure of simple hydrological system with reliability $R_i(t)$ and failure $F_i(t)$ functions of system elements i

Przy bardzo złożonych obiektach często niemożliwe jest stworzenie struktury niezawodnościowej takich obiektów, zbudowanej z elementów fizycznych, z których składa się rozpatrywany obiekt.

W niektórych obiektach ich strukturę niezawodnościową mogą tworzyć, oprócz elementów fizycznie istniejących w obiekcie, również elementy traktowane, jako zdarzenia, które mogą pojawiać się w obiekcie. Z taką sytuacją mamy do czynienia w obiekcie, jakim jest system hydrologiczny. Wtedy wygodnym sposobem graficznego przedstawienia struktury niezawodnościowej obiektu i jej analizy jest metoda drzewa niesprawności.

4.3. METODA DRZEWA NIESPRAWNOŚCI W ANALIZIE NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO

System hydrologiczny można zaliczyć do obiektów złożonych o mieszanej strukturze niezawodnościowej, a więc stosunkowo skomplikowanej, choć w niektórych sytuacjach przy rozważaniu wybranych podsystemów tego systemu, może być ona upraszczana do struktury szeregowej lub równoległej. Analiza niezawodnościowa systemu hydrologicznego, w szczególności analiza ilościowa, wymaga znajomości probabilistycznego modelowania jego własności oraz zjawisk występujących w nim samym i jego otoczeniu, które mogą prowadzić do niesprawności systemu. W przypadku systemu hydrologicznego analiza ta może być wykonywana dla już istniejących elementów systemu w trakcie eksploatacji lub może być przeprowadzana w fazie planowania (projektowania) użytkowania i zabudowy zlewni. Podstawowym celem takiej analizy jest wskazanie czynników charakteryzujących system, które mają istotny wpływ na jego niezawodne funkcjonowanie, szczególnie, gdy analiza dotyczy planowanego użytkowania i zabudowy zlewni. Uzyskane wyniki analizy niezawodności umożliwią wybranie najbardziej efektywnych sposobów poprawy poziomu niezawodności systemu hydrologicznego, jako całości i jego elementów. Do

przeprowadzenia takiej analizy wykorzystuje się niezawodnościowe modele obiektów, które pod względem niezawodności odwzorowują rzeczywiste, już istniejące, elementy obiektu i mogą być przydatne przy planowaniu wprowadzenia zmian w obiekcie. Wybór postaci modelu zależy przede wszystkim od rodzaju modelowanego obiektu, posiadanej wiedzy o samym obiekcie i o jego otoczeniu oraz od celu wykonywania analizy niezawodnościowej obiektu. Jeśli w obiekcie złożonym znane są niezawodności jego elementów (w szczególności fizycznych) to jego model niezawodności łatwo przedstawić w postaci struktury niezawodnościowej (analiza jakościowa) i opisać ilościowo za pomocą miar niezawodności podanych w podrozdziale 4.2. W innych przypadkach, w obiektach bardzo złożonych jak systemy hydrologiczne, modelem, który można wykorzystać, jest drzewo niesprawności, w którym opis matematyczny przyjmuje postać zależności prawdopodobieństwa zajścia tzw. *zdarzenia szczytowego* od prawdopodobieństw *zdarzeń podstawowych*.

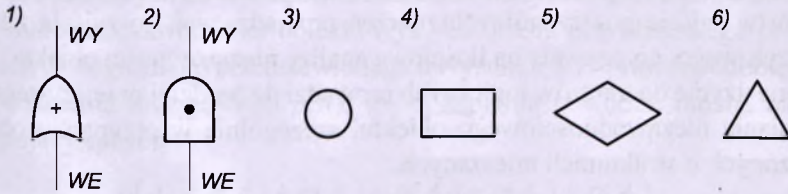
Zdarzenie szczytowe to zdarzenie niepożądane, które powoduje niesprawność obiektu. W przypadku zlewni rzecznej zdarzeniem szczytowym będzie wystąpienie ekstremalnego wezbrania, które spowoduje powódź, a więc niesprawność systemu hydrologicznego.

Zdarzenia podstawowe (pierwotne) to z definicji takie zdarzenia lub niesprawności, w których przyczyny wystąpienia z założenia się nie wnika. Do zdarzeń podstawowych w systemach hydrologicznych można zaliczyć: wystąpienie opadu nawałnego o dużej wydajności, nagły wzrost temperatury powietrza w porze zimowej przy występującej grubej pokrywie śnieżnej obejmującej duży obszar zlewni, przemarznięty grunt, stan wałów powodziowych, wypełniona pojemność przeciwpowodziowa zbiornika retencyjnego, wysoki poziom nawilżenia zlewni i inne.

Celem tworzenia drzewa niesprawności jest określenie przyczyn wystąpienia niesprawności obiektu, czyli zdarzenia szczytowego, które te niesprawności powoduje. Zatem punktem wyjściowym budowy drzewa niesprawności obiektu jest precyzyjne zdefiniowanie, co rozumiane jest pod pojęciem niesprawności obiektu i określenie zdarzenia szczytowego. Następnie identyfikuje się zdarzenia, które są bezpośrednią przyczyną wystąpienia zdarzenia szczytowego. Proces identyfikacji poszczególnych zdarzeń prowadzi się na coraz niższych poziomach aż do osiągnięcia poziomu zdarzeń podstawowych. Zatem budowa drzewa niesprawności jest metodą (sposobem) przedstawienia kombinacji zdarzeń niepożądanych – niesprawności elementów obiektu i zdarzeń podstawowych, które są przyczyną wystąpienia zdarzenia szczytowego powodującego niesprawność całego obiektu.

W drzewie niesprawności zdarzenia podstawowe i kolejne zdarzenia niepożądane A , prowadzące do wystąpienia zdarzenia szczytowego A są przedstawione przy użyciu różnych symboli zdarzeń i są powiązane ze sobą za pomocą różnych operacji logicznych. Wyróżnia się dwie podstawowe operacje logiczne w postaci

sumy i iloczynu logicznego oraz symbole zdarzeń, jako znaki graficzne przedstawiające zdarzenie szczytowe, zdarzenie podstawowe, zdarzenia będące rezultatem operacji logicznych, zdarzenia czasowo nieanalizowane i przeniesienia kontynuacji drzewa niesprawności (rys. 4.8). Pełen wykaz operacji logicznych i znaków zdarzeń można znaleźć w pracy Pamuły [2011]. Do opisu systemów hydrologicznych wystarczające są te, które zostały przedstawione na rysunku 4.8.

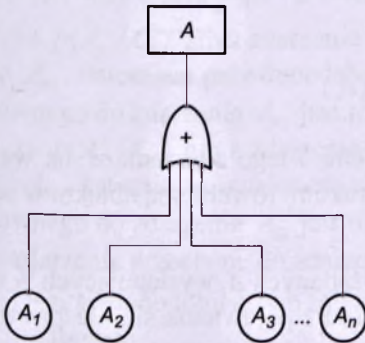


Rys. 4.8. Symbole operacji logicznych i znaki graficzne zdarzeń w metodzie drzewa niesprawności: 1 – suma logiczna, 2 – iloczyn logiczny, 3 – zdarzenie podstawowe, 4 – zdarzenie szczytowe lub zdarzenie będące wynikiem operacji logicznej, 5 – zdarzenie czasowo nieanalizowane, 6 – przeniesienie kontynuacji drzewa niesprawności

Fig. 4.8. Symbols of logical operations and graphical signs of events in fault tree model: 1 – disjunction, 2 – conjunction, 3 – basic event, 4 – top event or event as a result of logical operation, 5 – event temporarily not analyzed, 6 – transfer of fault tree continuation

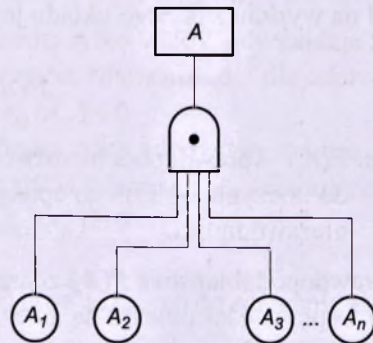
Do opisu niezawodnościowego struktur szeregowych za pomocą drzewa niesprawności stosuje się operator logiczny w postaci sumy logicznej (rys. 4.9).

Zajście zdarzenia będącego wynikiem operacji sumy logicznej jest możliwe, gdy zajdzie co najmniej jedno ze zdarzeń na wejściu do tego operatora. Natomiast operator iloczynu logicznego stosuje się, gdy zdarzenie na wyjściu z tego operatora będzie wynikiem zajścia wszystkich zdarzeń będących na wejściu do iloczynu logicznego. Zatem iloczyn logiczny ma zastosowanie przy opisie struktur równoległych obiektów w sensie niezawodnościowym (rys. 4.10).



Rys. 4.9. Drzewo niesprawności obiektu o strukturze szeregowej

Fig. 4.9. Fault tree for serial structure object



Rys. 4.10. Drzewo niesprawności obiektu o strukturze równoległej

Fig. 4.10. Fault tree for parallel structure object

Zaletami opisu niezawodnościowego struktury obiektu przy wykorzystaniu drzewa niesprawności są [Szopa, 2009]:

- możliwość umieszczenia informacji słownej w znakach graficznych przedstawiających poszczególne zdarzenia,
- znaki graficzne mogą reprezentować nie tylko zdarzenia, ale również elementy fizyczne struktury niezawodnościowej obiektu,
- możliwość przypisania i umieszczenia na gałęziach drzewa prawdopodobieństw zajścia poszczególnych zdarzeń prowadzących do zajścia zdarzenia szczytowego, co pozwala na ilościową analizę niezawodności obiektu,
- jawne użycie operatorów logicznych prowadzi do bardziej przejrzystego opisu działania niezawodnościowego obiektu, szczególnie w przypadku obiektów złożonych o strukturach mieszanych.

Możliwość przypisania do poszczególnych zdarzeń ich prawdopodobieństwa wystąpienia, jak wspomniano wcześniej, pozwoli na ocenę ilościową, a nie tylko jakościową niezawodności funkcjonowania obiektu. W przypadku struktury szeregowej prawdopodobieństwo $P(A)$ zajścia zdarzenia A na wyjściu z takiego układu jest równe

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(A_i)] \quad (4.29)$$

gdzie: $P(A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego zdarzenia A_i na wejściu do sumy logicznej opisującej strukturę szeregową obiektu w sensie niezawodności.

Jeśli prawdopodobieństwa $P(A_i)$ są małe ($P(A_i) \ll 1$) to $P(A)$ można w przybliżeniu przyjąć jako

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (4.30)$$

W przypadku struktury równoległej prawdopodobieństwo $P(A)$ zajścia zdarzenia A na wyjściu z takiego układu jest równe

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (4.31)$$

gdzie: $P(A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego zdarzenia A_i na wejściu do iloczynu logicznego opisującego strukturę równoległą obiektu w sensie niezawodności.

Prawdopodobieństwa $P(A)$ zdarzeń niepożądanych A_i występujących w drzewie niesprawności obiektu są zależne od czasu t pojawienia się niesprawności (wystąpienia zdarzenia niepożądanego) i są równe $P(A_i) = F_i(t) = 1 - R_i(t)$, gdzie $R_i(t)$ jest funkcją niezawodności i -tego elementu obiektu, w którym wystąpiła niesprawność $F_i(t)$ w chwili t .

Dla systemu hydrologicznego przedstawionego na rysunkach 4.6 i 4.7 w postaci struktury mieszanej w sensie niezawodności, opis za pomocą drzewa niesprawności podano na rysunku 4.11.

Jak wspomniano wcześniej jedną z zalet opisu niezawodnościowego struktury obiektu przy wykorzystaniu drzewa niesprawności jest możliwość przypisania i umieszczenia na gałęziach drzewa prawdopodobieństw zajścia poszczególnych zdarzeń prowadzących do wystąpienia zdarzenia szczytowego, co pozwala na ilościową analizę niezawodności obiektu (rys. 4.12). Dla przykładowego prostego systemu hydrologicznego przedstawionego na rysunku 4.11 prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia szczytowego $p(A)$, tj. wystąpienia powodzi, można określić w następujący sposób

$$p(A) = p(A_1) + p(A_2) + p(A_3) + p(A_4) + p(A_5) \quad (4.32)$$

gdzie:

$$p(A_1) = p(A_{11}) + p(A_{12})p(A_{13})p(A_{14}) = p(A_{11}) + p(A_{12}/A_{13})p(A_{13})p(A_{14}/A_{13})$$

$p(A_{12}) = p(A_{12}/A_{13})$ gdyż zdarzenie A_{12} zachodzi tylko wtedy, gdy zajdzie zdarzenie A_{13} , natomiast prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A_{12} dla zdarzenia przeciwnego do zdarzenia A_{13} jest równe $p(A_{12}/\bar{A}_{13}) = 0$

$p(A_{14}) = p(A_{14}/A_{13})$ gdyż zdarzenie A_{14} zachodzi tylko wtedy, gdy zajdzie zdarzenie A_{13} , natomiast prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A_{14} dla zdarzenia przeciwnego do zdarzenia A_{13} jest równe $p(A_{14}/\bar{A}_{13}) = 0$

\bar{A}_{13} – zdarzenie przeciwne do zdarzenia A_{13}

$$p(A_2) = p(A_{21}) + p(A_{22}) + p(A_{23}) + p(A_{24})$$

$$p(A_3) = p(A_{31})[p(A_{32}) + p(A_{33})]$$

$$p(A_4) = p(A_{41}) + p(A_{42}) + p(A_{43})$$

$$p(A_5) = p(A_{51})p(A_{52})p(A_{53}) + p(A_{54}) = p(A_{51})p(A_{52}/A_{51})p(A_{53}/A_{51}) + p(A_{54})$$

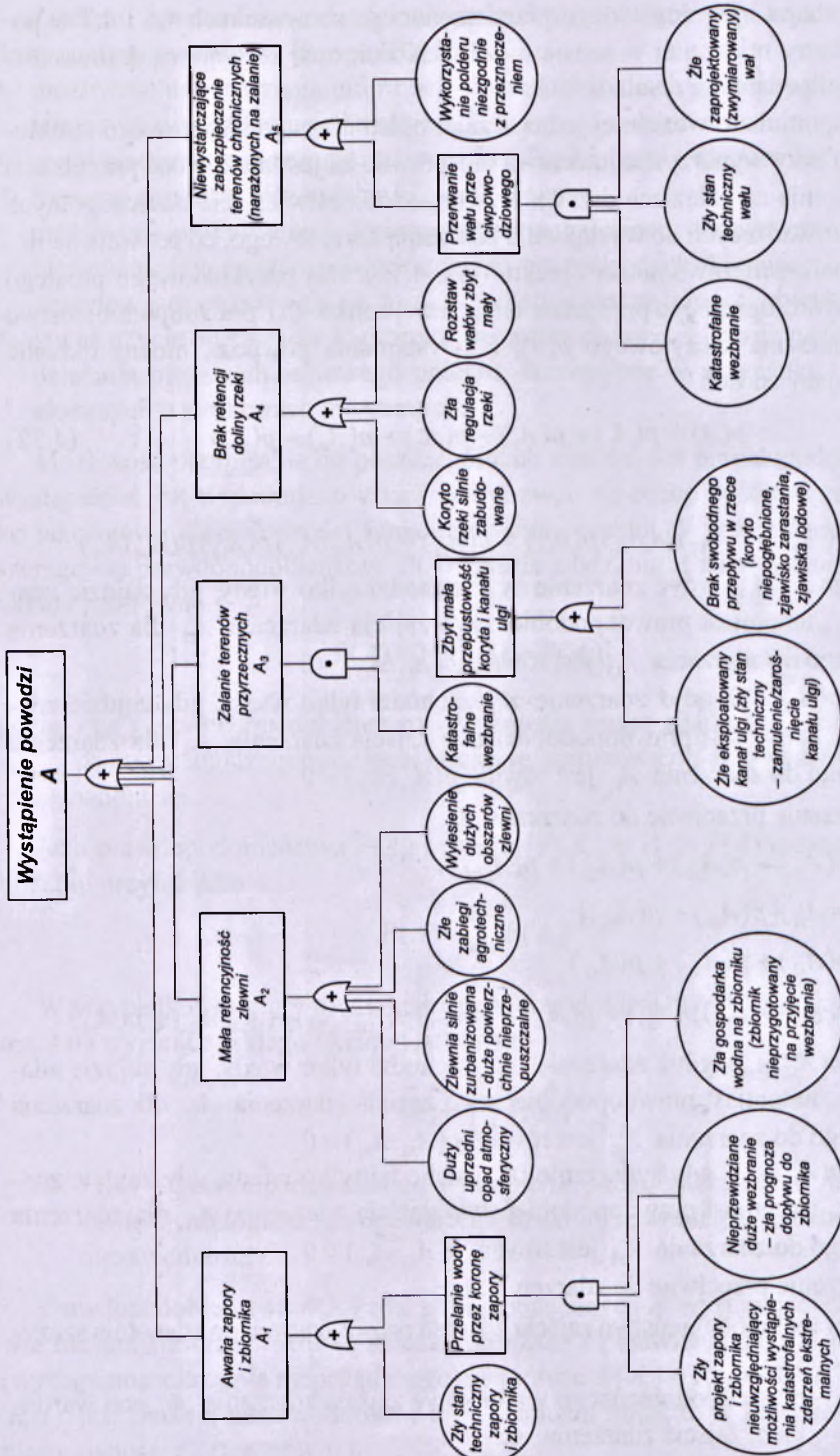
$p(A_{52}) = p(A_{52}/A_{51})$ gdyż zdarzenie A_{52} zachodzi tylko wtedy, gdy zajdzie zdarzenie A_{51} , natomiast prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A_{52} dla zdarzenia przeciwnego do zdarzenia A_{51} jest równe $p(A_{52}/\bar{A}_{51}) = 0$

$p(A_{53}) = p(A_{53}/A_{51})$ gdyż zdarzenie A_{53} zachodzi tylko wtedy, gdy zajdzie zdarzenie A_{51} , natomiast prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A_{53} dla zdarzenia przeciwnego do zdarzenia A_{51} jest równe $p(A_{53}/\bar{A}_{51}) = 0$

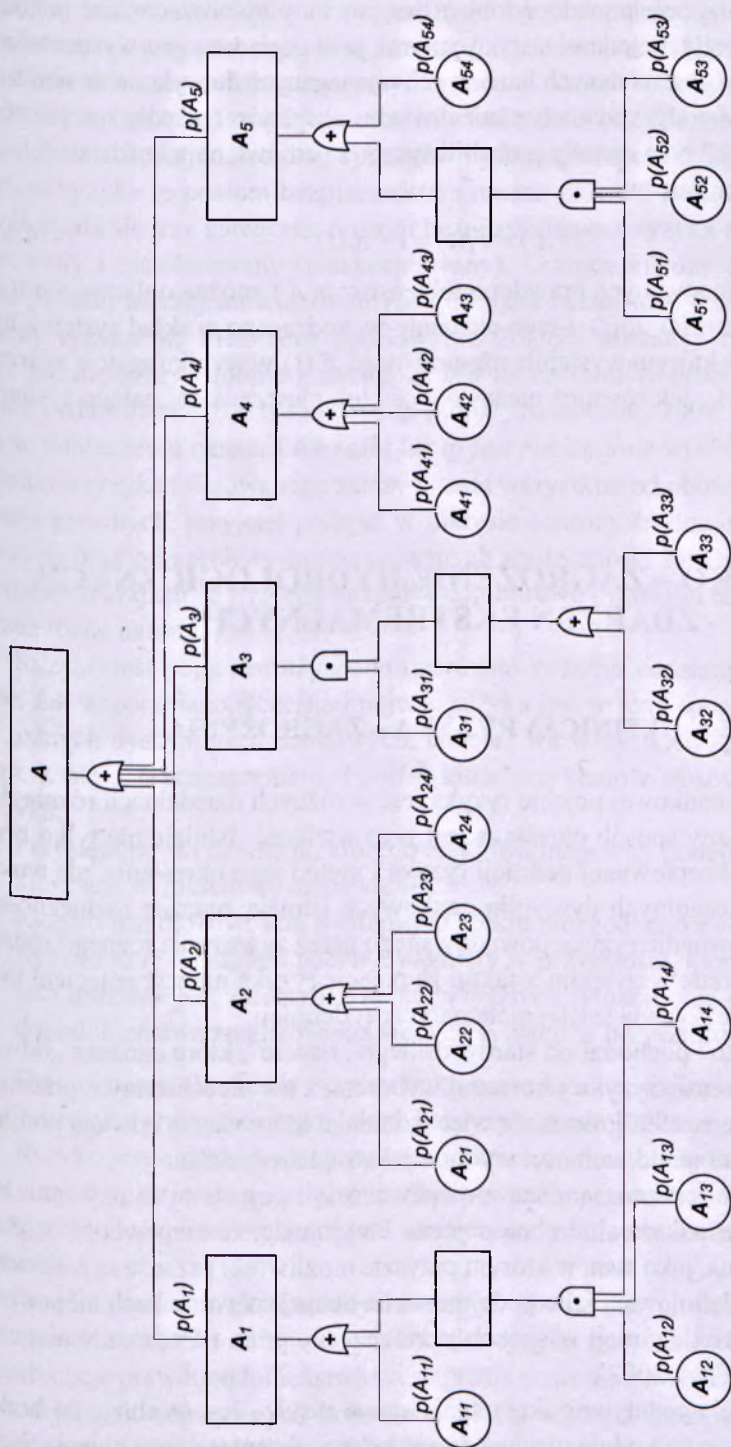
\bar{A}_{51} – zdarzenie przeciwne do zdarzenia A_{51}

$p(A_{ij})$ – prawdopodobieństwo zajścia zdarzeń prowadzących do zdarzenia szczytowego

$p(A_{ij}/A_{ik})$ – prawdopodobieństwo warunkowe zajścia zdarzenia A_{ij} pod warunkiem zajścia zdarzenia A_{ik}



Rys. 4.11. Drzewo niesprawności prostego systemu hydrologicznego
 Fig. 4.11. Fault tree for simple hydrologic system



Rys. 4.12. Drzewo niesprawności prostego systemu hydrologicznego z przypisanymi prawdopodobieństwami zdarzeń prowadzących do wystąpienia zdarzenia szczytowego A

Fig. 4.12. Fault tree for simple hydrologic system with probabilities of events leading to top event A occurrence

Wszystkie powyższe prawdopodobieństwa powinny być oszacowane metodami eksperckimi bądź metodami statystycznymi, jeśli posiadana jest wystarczająca ilość informacji w postaci danych liczbowych wymaganych do wykonania obliczeń statystycznych. Metody z wykorzystaniem wiedzy ekspertów (zespołu specjalistów z różnych dziedzin) oraz metody probabilistyczne są omówione w rozdziale 5.

Wykorzystując zależność

$$P(A_i) = F_i(t) = 1 - R_i(t) \quad (4.33)$$

na podstawie oszacowanych prawdopodobieństw $p(A_i)$ można obliczyć wartość funkcji niezawodności $R_i(t)$ l -tego elementu wchodzącego w skład systemu hydrologicznego, w którym wystąpiła niesprawność $F_i(t)$ w wyniku zajścia zdarzeń niepożądanych A_i , jak również niezawodność lub niesprawność całego systemu hydrologicznego.

5. RYZYKO – ZAGROŻENIE HYDROLOGICZNYCH ZDARZEŃ EKSTREMALNYCH

5.1. DEFINICJA RYZYKA – ZAGROŻENIA

W literaturze naukowej pojęcie ryzyka jest w różnych dziedzinach różnie definiowane i w różny sposób określana jest jego wielkość. Istnieje nie tylko brak jednej, ogólnie akceptowanej definicji ryzyka i metod jego określania, ale nawet w ramach poszczególnych dyscyplin naukowych istnieją znaczne rozbieżności. Utrudnia to porównanie ryzyka powodowanego przez zagrożenia różnego rodzaju. Wynika to przede wszystkim z faktu, że pojęcie ryzyka nie jest pojęciem matematycznym, nie posiada ściślej matematycznej definicji.

Słowo „ryzyko” pochodzi od staro włoskiego „risicare”, które oznacza „odważyć się”, w tym sensie ryzyko jest raczej wyborem, a nie nieuchronnym przeznaczeniem [Bernstein, 1997]. Oznacza więc działania, które ma się odwagę podjąć, działania uzależnione od wolności wyboru, jaką się rozporządza.

Często ryzyko jest utożsamiane z niepewnością i pojęcia te są używane zamiennie. Są to jednak dwa odrębne pojęcia. Przyjmując, że niepewność najczęściej jest określana, jako stan, w którym przyszłe możliwości i szanse są nieznane, ryzyko można zdefiniować, jako podejmowanie decyzji w warunkach niepewności. Przyjęcie takiej definicji w sposób jednoznaczny pozwala odróżnić niepewność od ryzyka [Preś, 2007].

Ponadto istnieje negatywne skojarzenie słowa *ryzyko*. Jest to aluzja do braku bezpieczeństwa, co powoduje niechęć do społecznej akceptacji tego pojęcia. Naj-

ogólniej można stwierdzić, że pojęcie *ryzyko* jest dopełnieniem pojęcia *bezpieczeństwa*, tak więc oba pojęcia są ze sobą ściśle powiązane [Kledyński, 2009].

Poziom bezpieczeństwa może być mierzony. Zatem można stwierdzić, że jeden system hydrologiczny i jego elementy są bardziej bezpieczne niż inny system. Ponieważ z funkcjonowaniem systemów hydrologicznych związane jest zawsze pewne ryzyko to poziom bezpieczeństwa można określić poziomem ryzyka. Na ogół ustala się trzy kategorie: poziom bezpieczeństwa – ryzyka akceptowany, tolerowany i nietolerowany (nieakceptowany). Granica między tymi poziomami jest płynna, inaczej mówiąc rozmyta i ustalana raczej metodami jakościowymi oceny ryzyka niż metodami ilościowymi. Poziom tolerancji ryzyka powinien być jak najniższy zgodnie z zasadą *as low as reasonably practicable* [Borysiewicz i Markowski, 2002; Fiedler i in., 2007; Szymanek, 2008; Lebecki, 2012], co w tłumaczeniu oznacza *tak niski jak to jest racjonalnie wykonalne*. Wysokość poziomu ryzyka tolerowanego zależy przede wszystkim od obowiązujących przepisów prawnych, przyjętej polityki w zakresie ochrony środowiska i dóbr kulturowych oraz od aprobaty zainteresowanych społeczności lokalnych i jest różna w różnych krajach ze względu na tradycje kulturowe i wartości etyczne uznawane przez różne narody.

Ryzyko jest pojęciem używanym zarówno w życiu codziennym jak i w nauce. Jak wspomniano wcześniej pojęcie ryzyka jest w inny sposób formułowane w różnych dyscyplinach naukowych, chociaż we wszystkich łączy się z wyborem, a nie z przeznaczeniem. Poniżej kilka przykładów stosowanych określeń ryzyka:

- Przystępując do działania, którego efekt jest niepewny podejmuje się ryzyko, które jest wynikiem tej niepewności.
- Ryzyko jest możliwością wystąpienia efektu niezgodnego z oczekiwaniem.
- Ryzyko to rezultat, jaki będzie osiągnięty w przyszłości, który nie jest znany, lecz możliwe jest zidentyfikowanie przyszłych sytuacji oraz określenie prawdopodobieństwa zrealizowania się tych sytuacji w przeszłości.

Dwa ostatnie określenia *ryzyka*, traktowane łącznie, najlepiej określają własności ryzyka przyrodniczego, jakim jest ryzyko hydrologiczne.

Ryzyko jest nierozzerwalnie związane z czasem, tzn. z horyzontem czasu, jaki dotyczy rozpatrywanego zdarzenia. Niepewność przewidywań zawsze rośnie wraz z wydłużaniem się horyzontu czasowego, zmniejsza się przewidywalność sytuacji.

W odniesieniu do ekstremalnych wezbrań powodujących powodzie Dyrektywa powodziowa UE definiuje ryzyko jako ryzyko powodziowe, które oznacza kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i związanych z powodzią potencjalnych negatywnych konsekwencji dla zdrowia ludzkiego, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej.

Termin *ryzyko* często mylony jest z terminem *zagrożenie*. W wielu pracach można spotkać się z traktowaniem ryzyka i zagrożenia, jako synonimów. Jednak są to dwa odrębne terminy. Ponieważ w nauce o niezawodności i bezpieczeństwie oba terminy odgrywają istotną rolę, w niniejszej pracy terminy ryzyko i zagrożenie będą rozumiane zgodnie z definicjami podanymi przez Szopę [2009], które jednoznacznie odróżniają ryzyko od zagrożenia:

Ryzyko jest to możliwość pojawienia się określonych strat (szkód) w rozważanym systemie Człowiek-Technika-Otoczenie w określonym czasie jego funkcjonowania.

Natomiast zagrożenie jest to możliwość powstania określonych strat, ustalona dla sytuacji powstałej po zajściu pojedynczego zdarzenia niepożądanego w rozpatrywanym systemie Człowiek-Technika-Środowisko.

Dla systemów hydrologicznych należałoby jeszcze dodać do obu definicji Naturę, a w definicji ryzyka zamiast Otoczenia przyjąć termin bardziej adekwatny, jakim jest Środowisko, a zatem rozważanym systemem będzie układ siły Natury-Człowiek-Technika-Środowisko przyrodnicze (rys. 2.1). Tak więc pod pojęciem *ryzyko hydrologiczne* jest w tej pracy rozumiana *możliwość pojawienia się określonych strat (szkód) w rozważanym systemie: siły Natury-Człowiek-Technika-Środowisko przyrodnicze, w określonym czasie jego funkcjonowania, a ściślej mówiąc możliwość pojawienia się strat w systemie hydrologicznym, traktowanym, jako obiekt złożony, w określonym czasie funkcjonowania tego systemu. Zaś zagrożenie hydrologiczne jest to możliwość powstania określonych strat, ustalona dla sytuacji powstałej po zajściu niepożądanego hydrologicznego zdarzenia ekstremalnego w zlewni rzecznej.*

W odniesieniu do systemów hydrologicznych przykładem pozwalającym odróżnić istotę obu terminów jest sytuacja, gdy na rzece zostanie wybudowana zapora i powstanie zbiornik retencyjny. Wybudowanie zapory i zbiornika wiąże się z pewnym ryzykiem utraty życia i mienia przez mieszkańców osiedlonych poniżej zapory w przypadku wystąpienia katastrofy zapory. Do tej straty zazwyczaj nie dochodzi, gdyż zapora jest dobrze zwymiarowana i zbudowana. Sytuacja zmienia się, gdy dochodzi do awarii urządzeń przepustowych i pojawia się zdarzenie niepożądane w postaci nadchodzącej wysokiej fali wezbraniowej. Możliwość utraty życia i mienia przez mieszkańców gwałtownie wzrasta. Ta możliwość, związana z potencjalną katastrofą zapory wynikającą z faktu jednoczesnego wystąpienia awarii urządzeń przepustowych i zdarzenia niepożądanego, nazywa się zagrożeniem.

W definicji *zagrożenia* pojawia się termin *zdarzenie niepożądane*. W podanym powyżej przykładzie zdarzeniem niepożądanym w systemie hydrologicznym jest wystąpienie dużego wezbrania, które może spowodować niesprawność całego systemu hydrologicznego w postaci pojawienia się powodzi lub niesprawność poszczególnych elementów tego systemu na przykład w postaci katastrofy zapory lub awarii jej podzespołów. Zatem przez zdarzenie niepożądane w niniejszej pracy będzie rozumiane takie zdarzenie, którego zajście w systemie hydrologicznym

wywoła zagrożenie funkcjonowania całego systemu lub jego elementów. W systemie hydrologicznym mogą pojawić się różne zdarzenia niepożądane i wywołać różnego rodzaju zagrożenia, o różnym poziomie, a także spowodować różne straty. Jak wynika z definicji zagrożenia między zagrożeniem, zdarzeniem niepożądanym i stratami istnieje ścisła relacja. Im większa jest możliwość powstania strat w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego, tym poziom zagrożenia jest większy. Zarówno zagrożenie jak i ryzyko są powiązane ze stratami. Zagrożenie występuje w chwili, gdy pojawia się zdarzenie niepożądane w systemie hydrologicznym, natomiast ryzyko związane jest z dłuższym odcinkiem czasowym, w którym system jest narażony na powstanie strat. W nauce o bezpieczeństwie używa się oprócz terminu zagrożenie również terminy takie jak *stan zagrożenia*, *poziom zagrożenia* czy *źródło zagrożenia*. Wszystkie te terminy ściśle powiązane są z terminem *zagrożenie*, choć ich konotacje nie zawsze są takie same. Zarówno zagrożenie, stan zagrożenia czy poziom zagrożenia występują, gdy pojawi się zdarzenie niepożądane. Natomiast, nie występują, gdy nie ma zdarzenia niepożądanego, mimo że źródło zagrożenia może istnieć. Stan zagrożenia nie jest równoznaczny z powstaniem strat. Straty jak i zdarzenie niepożądane są zmiennymi losowymi i mogą pojawiać się z pewnym prawdopodobieństwem. Im wyższy jest poziom zagrożenia tym większe jest prawdopodobieństwo, że nastąpi przejście ze stanu zagrożenia systemu w straty w systemie. Tak więc straty mogą być zerowe nawet przy dużym zagrożeniu i większe od zera, gdy poziom zagrożenia wydawał się niewielki.

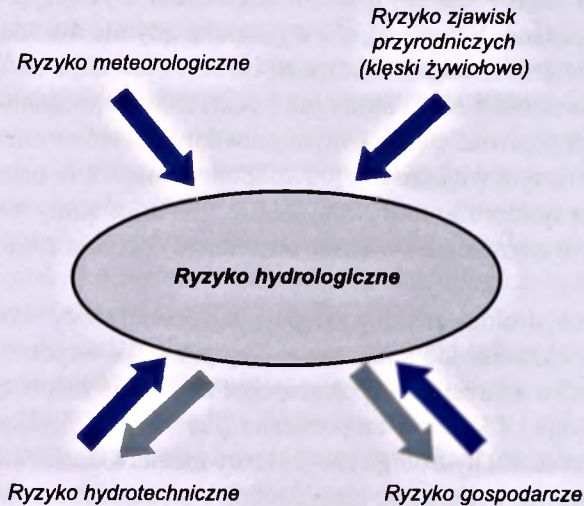
W systemach hydrologicznych występują najczęściej straty ekonomiczne i straty ludzkie, indywidualne lub/i zbiorowe. Straty te, jak wspomniano wcześniej, powstają w wyniku zdarzenia niepożądanego. Zdarzenia niepożądane mogą być dwójakiego rodzaju. Zdarzenia niepożądane pierwotne (inicjujące) powodujące stan zagrożenia systemu hydrologicznego, który można określić mianem *potencjału niebezpieczeństwa*, i zdarzenia niepożądane wtórne, które powstają w wyniku niekontrolowanego wyzwolenia się tego potencjału w postaci sekwencji zdarzeń prowadzących do niesprawności w funkcjonowaniu systemu i pojawienia się strat. Oba rodzaje zdarzeń niepożądanych stanowią istotny element bezpieczeństwa systemów hydrologicznych i są podstawą analizy ryzyka hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych, której metody będą omówione w dalszej części tego rozdziału.

5.2. GENEZA RYZYKA – ZAGROŻENIA

Głównym źródłem (geneza) ryzyka hydrologicznego jest ryzyko meteorologiczne (rys. 5.1), tj. zjawiska meteorologiczne, ich wielkość, przebieg i własności. Są to zjawiska w zasadzie niezależne od człowieka, który nie ma wpływu na ich wielkość i przebieg, choć może w pewnym stopniu wpływać na ich częstotliwość

występowania poprzez oddziaływanie na klimat Ziemi. Człowiek natomiast jest w stanie monitorować te zjawiska, tzn. mierzyć i próbować je przewidywać (prognozować).

Druga grupa zjawisk wpływających na wielkość ryzyka hydrologicznego to ekstremalne zjawiska przyrodnicze, określane często klęskami żywiołowymi, takie jak trzęsienia ziemi, wybuchy wulkanów, tsunami, tornado. Są to zjawiska, podobnie jak zjawiska meteorologiczne, niezależne od człowieka. W odróżnieniu od ryzyka zjawisk meteorologicznych, których występowanie można w pewnym zakresie kontrolować, ryzyko klęsk żywiołowych na ogół nie podlega kontroli człowieka, a w sposób istotny dodatkowo zwiększa ryzyko hydrologiczne (np. zniszczenie zapory, obwałowań, itp.). Tego typu zjawiska w zasadzie nie występują w Polsce i nie przyczyniają się do występowania bardzo groźnych katastrof synergicznych.



Rys. 5.1. Geneza (źródła) ryzyka hydrologicznego

Fig. 5.1. Origin of hydrological risk

Kolejna grupa zjawisk wpływających na wielkość ryzyka hydrologicznego to działalność gospodarcza człowieka. Ze względu na różny wpływ i różną współzależność oddziaływania człowieka na ryzyko hydrologiczne, należy wyróżnić dwa jego podstawowe rodzaje, a mianowicie działalność hydrotechniczną i pozostałe formy działalności gospodarczej. Wyróżnienie tych dwóch rodzajów (form) działalności człowieka ma zasadnicze znaczenie. Głównym celem działalności hydrotechnicznej, poprzez budowę obiektów ochrony przeciwpowodziowej (zbiorników retencyjnych magazynujących wodę, wałów przeciwpowodziowych i in.), jest obniżenie ryzyka hydrologicznego. W odróżnieniu od działalności hydrotechnicznej inne formy działalności gospodarczej nie zawsze są prowadzone pod ką-

tem obniżenia ryzyka hydrologicznego i często przyczyniają się do jego wzrostu. Na przykład obszary zagrożone zalaniem są wykorzystywane pod uprawę roślin, indywidualną zabudowę mieszkaniową, wysypiska odpadów, a w skrajnych przypadkach nawet wykorzystywane są pod budownictwo komunalne lub przemysłowe. Mamy tu do czynienia z pewnym sprzężeniem zwrotnym. Z jednej strony powstaje ryzyko zalania terenów zabudowanych w wyniku wystąpienia niepożądanego zdarzenia hydrologicznego, z drugiej zaś tereny zabudowane narażone na zalanie zwiększają ryzyko poniesienia większych strat niż te, które byłyby poniesione gdyby tereny te nie były zabudowane.

Mimo, że głównym celem technicznej ochrony przed zagrożeniami hydrologicznymi, występowaniem zdarzeń niepożądanych, jest redukcja ryzyka strat ich zajścia, to działalność hydrotechniczna poprzez budowę określonych obiektów hydrotechnicznych również generuje dodatkowe ryzyko hydrologiczne wynikające z możliwości zajścia katastrofy budowli hydrotechnicznej.

5.3. WŁASNOŚCI RYZYKA

Przedmiotem niniejszej pracy jest ryzyko hydrologiczne, którego własności i wielkość zależą od ryzyka otoczenia, tzn. ryzyka wynikającego ze zjawisk mających bezpośredni wpływ na zjawiska hydrologiczne.

Biorąc pod uwagę wyróżnione rodzaje ryzyka wpływające na ryzyko hydrologiczne (rys. 5.1) można je określić jako ryzyko:

- alternatywne – gdyż w wyniku można uzyskać zarówno straty jak i zyski,
- przyrodnicze – ponieważ zagrożenia wywołane są głównie przez siły Natury,
- zmienne – gdyż występuje w zależności od wielkości zagrożenia,
- dynamiczne – ponieważ jest funkcją czasu bieżącego, zmienia się wraz z jego upływem,
- osobowe, majątkowe i gospodarcze – gdyż dotyczy życia i zdrowia człowieka, strat osobistego majątku ludności oraz strat (zniszczeń) obiektów publicznych.

Należy podkreślić główną własność ryzyka hydrologicznego, jako ryzyka zdarzeń ekstremalnych, wynikającą z ryzyka zdarzeń meteorologicznych i ewentualnych katastrofalnych zjawisk przyrodniczych, chociaż te ostatnie w naszej strefie geograficznej odgrywają mniejszą rolę.

Ryzyko hydrologiczne dotyczy głównie dwóch rodzajów zagrożeń: powodzi i susz, wynikających z dwóch głównych rodzajów zagrożeń meteorologicznych, a mianowicie ekstremalnych opadów deszczu lub roztopów śniegu bądź długotrwałego braku opadów. Poza innymi czynnikami meteorologicznymi (temperatura powietrza, silny wiatr) mającymi wpływ na przebieg ekstremalnych zjawisk hydrologicznych, decydujący wpływ na wielkość ryzyka hydrologicznego ma

ryzyko hydrotechniczne, tj. obiekty hydrotechniczne, których podstawowym zadaniem jest zmniejszanie ryzyka hydrologicznego.

Z wystąpieniem zdarzenia ekstremalnego wiąże się zawsze pewne ryzyko. Dążeniem człowieka jest zmniejszenie tego ryzyka, tj. wpływanie na wielkość ryzyka, a więc zarządzanie nim. W obszarze nauk dotyczących zjawisk przyrodniczych w ostatnich dwóch dekadach powstała nowa dziedzina nauki – *zarządzanie ryzykiem*, która dynamicznie rozwija się, co wynika z dążenia człowieka do ograniczenia zagrożeń bądź chociaż do ograniczenia skutków zagrożeń, gdyż wiele zagrożeń występuje niezależnie od człowieka i nie ma on wpływu na ich występowanie i przebieg.

W hydrologii wód powierzchniowych można wyróżnić cztery sytuacje ekstremalne:

- występowanie nadmiaru wody w korycie rzecznym, co powoduje duże wezbrania i związane z nimi powodzie odrzeczne,
- występowanie nadmiarów wody na obszarze zlewni, co w skrajnych sytuacjach skutkuje powodzią obszarową,
- występowanie niedoborów wody w korycie rzecznym, co powoduje głębokie niżówki,
- występowanie niedoborów wody na obszarze zlewni, co skutkuje suszą obszarową.

Jak wspomniano wcześniej wszystkie te zjawiska, wezbrania i niżówki, powodzie i susze, są zjawiskami niekorzystnymi z punktu widzenia gospodarki wodnej.

5.4. OCENA RYZYKA – ZAGROŻENIA

W wielu publikacjach z zakresu szeroko pojętych nauk o środowisku dotyczących problematyki systemów zarządzania bezpieczeństwem, inżynierii zagrożeń i analizy ryzyka [Ryzyko..., 2000; *Environmental ...*, 2004; Opyrchał, 2005; *Regional ...*, 2005; *Economics ...*, 2005; Fiedler i in., 2007; Małaczyński i in., 2007; *Ocena ryzyka ...*, 2007; *Ryzyko...*, 2010; *Zarządzanie...*, 2010; Walczykiewicz, 2010; Grocki, 2012; Rak i in., 2012; Wróbel, 2012] można spotkać się z następującymi pytaniami:

Co złego może się zdarzyć?

Jak często może się to zdarzyć?

Jakie zniszczenia to może spowodować?

Czy ryzyko wystąpienia tego, co może się zdarzyć jest akceptowane a przynajmniej tolerowane?

Na powyższe pytania współczesna nauka próbuje znaleźć odpowiedzi w zależności od dziedziny zainteresowań poszczególnych dyscyplin nauki. Dotyczy to

również hydrologii, która jako nauka stosowana, tj. o charakterze aplikacyjnym, musi znać lub znaleźć odpowiedzi na postawione pytania w zakresie oceny możliwych zagrożeń i bezpieczeństwa podstawowego obiektu jej zainteresowania, jakim jest zlewnia rzeczna i znajdujące się na niej elementy, jak również oceny ryzyka, jakie te zagrożenia niosą ze sobą.

Ocena ryzyka polega na identyfikacji rodzaju ryzyka, określeniu jego wielkości i istotności wpływu na badany obiekt czy planowane przedsięwzięcie. Ocena i oszacowanie wielkości ryzyka stanowi podstawę zarządzania ryzykiem. Nie można poprawnie zarządzać ryzykiem nie znając:

- rodzaju i genezy (źródła) ryzyka oraz własności ryzyka – identyfikacja jakościowa ryzyka,
 - wielkości ryzyka – identyfikacja ilościowa,
- oraz
- sposobu oddziaływania i
 - skutków oddziaływania poszczególnych rodzajów ryzyka na badany obiekt.

Ocena ryzyka obejmuje etap analizy genezy ryzyka (zdefiniowanie zdarzenia niepożądanego i rodzaju strat, jakie to zdarzenie powoduje) oraz etap szacowania wielkości ryzyka (wybór konkretnych miar oceny ryzyka).

Generalnie wartość ryzyka powinna być wyrażana w skali prawdopodobieństwa: od 0 – brak zagrożenia do 1 – zagrożenie pewne.

Identyfikacja jakościowa (analiza) i identyfikacja ilościowa (szacowanie wielkości) ryzyka są niezbędne i to zarówno pod kątem osiągania wyników lepszych, jak i gorszych od zakładanych. Ponadto nigdy nie można z całą pewnością stwierdzić, czy rodzaj i wielkość zmiennych będących podstawą dzisiejszych (bieżących, aktualnych) decyzji i wynikających z nich wielkości ryzyka, nie ulegną w przyszłości zmianie. Mając jednak rozpoznany rodzaj czynników działających na badany obiekt i ich wielkość (co w hydrologii rzadko się zdarza), można na bieżąco określić zmiany wielkości ryzyka i korygować podejmowane decyzje.

W swojej pracy Szopa [2009] wyróżnia 7 etapów modelowania i analizy ryzyka:

1. Rozpoznanie rozważanego układu C-T-O. W hydrologii jak wspomniano wcześniej będzie to układ N-C-T-Ś (rys. 2.1).

Ten etap powinien być poświęcony rozpoznaniu systemu hydrologicznego, już istniejącego lub projektowanego, tj. zdobyciu niezbędnej wiedzy o tym systemie, jako całości i o każdym z jego elementów, a w szczególności o jego strukturze fizycznej i niezawodnościowej oraz zasadach funkcjonowania.

2. Identyfikacja zagrożeń.

Głównym celem tego etapu jest identyfikacja zagrożeń, które mogą się pojawić w systemie hydrologicznym, a które mają istotny wpływ na możliwość zajścia zdarzeń niepożądanych i wystąpienia niesprawności w funkcjonowaniu systemu.

3. Określenie poziomu zagrożenia powodowanego przez każde zdarzenie niepożądane.

Na tym etapie ustala się miary zagrożenia, określa się straty finansowe i ludzkie (indywidualne lub/i zbiorowe).

4. Określenie częstości występowania zdarzeń niepożądanych.

W tym etapie określa się prawdopodobieństwa zajścia wszystkich zdarzeń niepożądanych wskazanych w etapie 2 i zdarzeń, które wystąpiły w wyniku zajścia zdarzenia niepożądanego (zdarzenia inicjującego).

5. Ewentualnie określenie poziomów ryzyka cząstkowego w przypadku obiektów złożonych.
6. Określenie poziomu ryzyka całkowitego.
7. Analiza wyników i wnioskowanie.

5.4.1. Identyfikacja jakościowa i ilościowa ryzyka

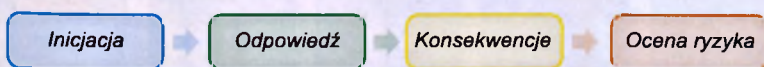
Analiza jakościowa polega na identyfikacji zagrożeń oraz ocenie, jakie sekwencje zdarzeń prowadzą do wystąpienia zdarzenia niepożądanego, za które w hydrologii uważa się hydrologiczne zdarzenie ekstremalne.

Analiza jakościowa może być wykonywana metodą drzewa zdarzeń. Drzewo zdarzeń można określić, jako graficzne przedstawienie chronologicznego ciągu zdarzeń, mających istotny wpływ na działanie obiektu, wywołanego przez zdarzenie inicjujące ten ciąg. Ponieważ metoda drzewa zdarzeń jest wykorzystywana do analizy ciągów zdarzeń prowadzących do niesprawności obiektu, zdarzenie inicjujące nazywane jest również pierwotnym zdarzeniem niebezpiecznym. W metodzie drzewa zdarzeń, zakłada się, że do zaistnienia niesprawności obiektu nie jest wystarczające wystąpienie jednego zdarzenia niepożądanego, musi zajść ciąg zdarzeń, z których każde pojedyncze zdarzenie nie powoduje niesprawności obiektu, dopiero ciąg chronologicznie występujących po sobie zdarzeń, spowoduje nieprawidłowe funkcjonowanie obiektu.

Drzewo zdarzeń, w przeciwieństwie do schematów blokowych struktur i drzewa niesprawności, nie służy do opisu struktury niezawodnościowej obiektu, złożonego z elementów fizycznych bądź zdarzeń niepożądanych, lecz wykorzystywane jest głównie w analizach ryzyka. Niemniej również w analizach ryzyka konieczna jest znajomość struktury rozważanego obiektu, co powoduje, że rozsądnym staje się połączenie obu metod: metody drzewa niesprawności i metody drzewa zdarzeń, w celu pełniejszego opisu funkcjonowania obiektu. Zatem konstruuje się drzewo zdarzeń dla systemu hydrologicznego, który jest czę-

ścią układu N-C-T-Ś powinno się uwzględnić wszystkie elementy takiego systemu i zachodzące między nimi relacje.

Ogólnie schemat budowy drzewa zdarzeń można przedstawić w postaci czterech etapów (rys. 5.2).

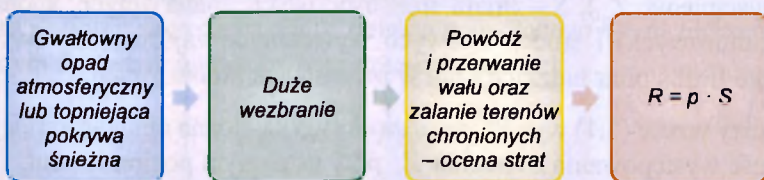


Rys. 5.2. Ogólny schemat budowy drzewa zdarzeń (za Fiedlerem i in. [2007])

Fig. 5.2. General scheme of event tree construction (by Fiedler et al. [2007])

W etapie pierwszym nazywanym *inicjacja* identyfikowane jest zdarzenie inicjujące, tj. zdarzenie, które potencjalnie może wywołać ciąg zdarzeń wtórnych prowadzących do niesprawności obiektu. Na tym etapie rozważa się również warunki, jakie muszą być spełnione, aby wystąpiło zdarzenie inicjujące. W etapie drugim zwanym *odpowiedzią* analizuje się wszystkie możliwe ciągi zdarzeń niezależnie czy prowadzą one do niesprawności obiektu czy też nie powodują zakłócenia poprawnego jego funkcjonowania. W etapie trzecim zwanym *konsekwencje* ocenia się straty wywołane brakiem sprawności obiektu i jego elementów. Ostatni, czwarty etap to *ocena ryzyka* pozwalająca na ujęcie ryzyka w kategoriach ilościowych.

Na rysunku 5.3 pokazano przykładowy schemat drzewa zdarzeń dla obiektu – prostego systemu zlewni rzecznej z istniejącą infrastrukturą przeciwpowodziową w postaci obwałowanego koryta rzecznego.



Rys. 5.3. Ogólny schemat drzewa zdarzeń dla prostego systemu hydrologicznego (R – ryzyko, p – prawdopodobieństwo, S – strata, patrz wzór (5.1))

Fig. 5.3. General scheme of event tree for simple hydrologic system (R – risk, p – probability, S – losses, see equation (5.1))

Bardziej szczegółowa analiza wystąpienia niesprawności powyższego systemu (katastrofy przerwania wału i wystąpienia powodzi) przeprowadzana metodą drzewa zdarzeń, przedstawiona na rysunku 5.4, rozpoczyna się od zidentyfikowania zdarzenia inicjującego w postaci opadu atmosferycznego, w *odpowieź* na który wystąpiło duże wezbranie, które w *konsekwencji* złego stanu wału spowodowało jego przerwanie i powódź, tj. określone straty społeczne i ekonomiczne.



Rys. 5.4. Drzewo zdarzeń dla prostego systemu hydrologicznego

Fig. 5.4. Event tree for simple hydrologic system

Analiza strat i ocena ryzyka pod kątem ilościowym wykonywana jest w procesie identyfikacji ilościowej ryzyka. Klasycznym podejściem do oceny ilościowej ryzyka jest wyrażenie jego wielkości w funkcji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i wielkości strat, jakie to zdarzenie może wywołać, w postaci

$$\text{Ryzyko} = p(Z_n) \cdot S \quad (5.1)$$

gdzie: Z_n – zdarzenie niepożądane, $p(Z_n)$ – miara częstości zajścia Z_n (najczęściej miara probabilistyczna, tj. prawdopodobieństwo przewyższenia wystąpienia Z_n), S – miara strat osobowych, materialnych, społecznych (kulturowych) i środowiskowych wywołanych zajściem Z_n (wyrażana, jako liczba ofiar ludzkich i/lub w jednostkach monetarnych).

Z analizy wzoru (5.1) wynika, że poziom ryzyka można obniżyć zmniejszając:

- częstość występowania zdarzenia Z_n przy ustalonym poziomie strat,
- straty przy ustalonym poziomie częstości występowania zdarzenia Z_n ,
- zarówno straty jak i częstość występowania zdarzenia Z_n .

Ostatni sposób postępowania wydaje się być najlepszym z punktu widzenia bezpieczeństwa systemów hydrologicznych. Podejście pierwsze stosowane jest m.in. w budownictwie hydrotechnicznym. Natomiast sposób drugi jest często wykorzystywany przy opracowywaniu strategii ubezpieczeń i przy planowaniu przestrzennym.

Klasyczne podejście do oceny ilościowej ryzyka w postaci wzoru (5.1) ma zastosowanie dla stosunkowo prostych struktur systemów hydrologicznych, które mogą być opisane jednym scenariuszem prowadzącym do wystąpienia niesprawności systemu. Przy rozważaniu bardziej rozbudowanych systemów hydrologicznych powinno się uwzględnić w ocenie ilościowej ryzyka wiele różnych scena-

riuszy j , a zatem wzór (5.1) powinien być uzupełniony o element uwzględniający różne sekwencje zdarzeń niepożądanych i wyrażony w postaci zależności funkcyjnej nie z dwoma, lecz z trzema argumentami $Ryzyko = f[p(Z_n), S, j]$, która opisana jest szerzej przy omówieniu wzoru (5.20).

Po zbudowaniu drzewa zdarzeń, będącego graficznym odwzorowaniem dających się przewidzieć scenariuszy przebiegu zdarzeń wtórnych, które mogą się wydarzyć po wystąpieniu zdarzenia inicjującego, można przypisać prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnym zdarzeniom wtórnym dla określonych gałęzi drzewa i obliczyć prawdopodobieństwo całej sekwencji zdarzeń prowadzącej do niesprawności obiektu. W ten sposób można stworzyć ilościowy model zagrożenia (ryzyka) wywołanego zajściem zdarzenia inicjującego.

5.4.2. Identyfikacja zagrożeń

Jak wspomniano wcześniej identyfikacja ryzyka pod kątem ilościowym może być wykonana przy wykorzystaniu metody drzewa zdarzeń. Poszczególnym zdarzeniom, wyróżnionym w drzewie zdarzeń, przypisuje się prawdopodobieństwo ich wystąpienia, a następnie dla wyróżnionych sekwencji zdarzeń, prowadzących do niesprawności obiektu, oblicza się prawdopodobieństwo zajścia danej sekwencji i jej poziom zagrożenia PZ . W ten sposób tworzy się model zagrożeń obiektu, inaczej model ryzyka strat powstałych w wyniku zajścia zdarzenia niepożądanego z uwzględnieniem możliwych niesprawności elementów obiektu i zachodzących między nimi relacji (zdarzeń pośrednich, wtórnych).

Miara poziomu zagrożenia $PZ^{(k)}$ obiektu wywołanego k -tym zdarzeniem niepożądanym może być wyrażona w następującej postaci

$$PZ^{(k)} = \sum_{j=1}^{j=m} [PZ^{(kj)} \cdot p^{(kj)}]_j \quad (5.2)$$

$$p^{(kj)} = \prod_{i=1}^{i=n} p_i^{(kj)} \quad (5.3)$$

gdzie: $PZ^{(kj)}$ – poziom zagrożenia j -tej sekwencji zdarzeń wtórnych wywołanych wystąpieniem k -tego zdarzenia niepożądanego, m – liczba sekwencji zdarzeń wtórnych, $p^{(kj)}$ – prawdopodobieństwo zajścia j -tej sekwencji wywołanej wystąpieniem k -tego zdarzenia niepożądanego, $p_i^{(kj)}$ – prawdopodobieństwo zajścia i -tego zdarzenia wtórnego w j -tej sekwencji wywołanego k -tym zdarzeniem niepożądanym, n – liczba zdarzeń wtórnych w j -tej sekwencji.

Miara poziomu zagrożenia obiektu w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego w postaci (5.2) może być wykorzystana do szacowania całego zagrożenia

obiektu (łącnego zagrożenia wynikającego z rozważenia wszystkich sekwencji zdarzeń wtórnych) lub zagrożenia mogącego powstać przy rozważaniu konkretnego scenariusza zdarzeń wtórnych bądź zagrożenia interpretowanego, jako najbardziej prawdopodobne zagrożenie przy m -krotnym wystąpieniu zdarzenia niepożądanego.

Drugą możliwością zastosowania miary poziomu zagrożenia jest wykorzystanie jej do szacowania prawdopodobieństwa strat S w przypadku pojawienia się zdarzenia niepożądanego. Wtedy miara poziomu zagrożenia może być wyrażana w jednostkach monetarnych przy ocenie możliwych strat ekonomicznych – strat wymiernych lub za pomocą liczby ofiar śmiertelnych wystąpienia zdarzenia niepożądanego. W takim przypadku miara poziomu zagrożenia k -tym zdarzeniem niepożądanym przybiera następującą postać

$$PZ(S)^{(k)} = \sum_{j=1}^{j=m} [PZ(S)^{(kj)} \cdot p^{(kj)}]_j \quad (5.4)$$

gdzie: wszystkie oznaczenia jak we wzorach (5.2) i (5.3).

Miary poziomu zagrożenia życia ludzkiego mogą być określane, jako miary zagrożenia zbiorowego lub indywidualnego (utrata życia przez pojedynczego człowieka).

Dla pojedynczego inicjującego zdarzenia niepożądanego wzory (5.2)–(5.4) przyjmują postacie

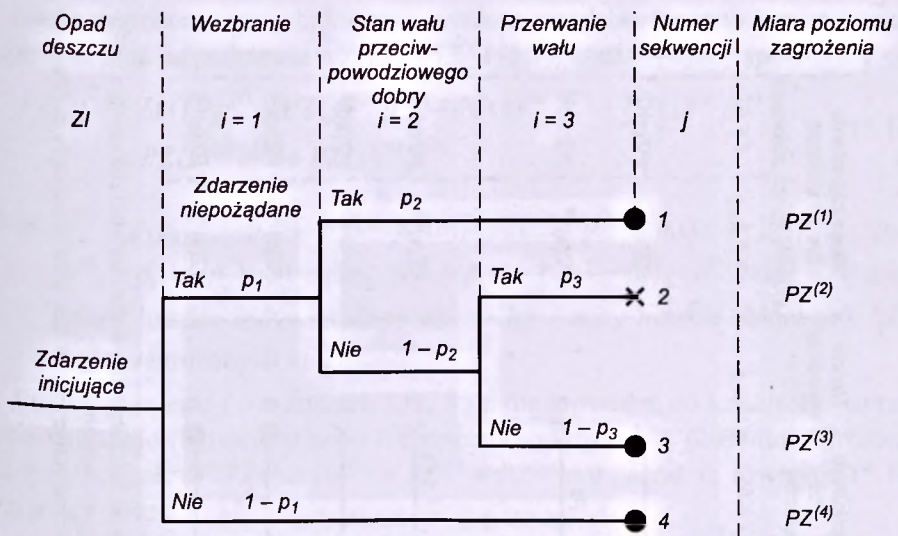
$$PZ = \sum_{j=1}^{j=m} [PZ^{(j)} \cdot p^{(j)}]_j \quad (5.5)$$

$$PZ(S) = \sum_{j=1}^{j=m} [PZ(S)^{(j)} \cdot p^{(j)}]_j \quad (5.6)$$

$$p^{(j)} = \prod_{i=1}^{i=n} p_i^{(j)} \quad (5.7)$$

gdzie: $PZ^{(j)}$ – poziom zagrożenia j -tej sekwencji zdarzeń wtórnych, m – liczba sekwencji zdarzeń wtórnych, $p^{(j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia j -tej sekwencji, $p_i^{(j)}$ – prawdopodobieństwo zajścia i -tego zdarzenia wtórnego w j -tej sekwencji, n – liczba zdarzeń wtórnych w j -tej sekwencji, S – strata w postaci utraty życia przez $s=1$ pojedynczego człowieka lub $s=|z|$ przez określoną liczbę zagrożonych ludzi (w przypadku systemów hydrologicznych liczba mieszkańców i osób tymczasowo przebywających na zagrożonym obszarze zlewni) bądź jako straty ekonomiczne s wyrażone w jednostkach monetarnych.

Przykładowo dla wybranego prostego systemu zlewni rzecznej (rys. 5.4) drzewo zdarzeń uwzględniające miary poziomu zagrożenia tego obiektu można przedstawić w postaci jak na rys. 5.5.



Rys. 5.5. Drzewo zdarzeń dla wybranego systemu zlewni rzecznej wykorzystane w przykładzie obliczeniowym (• – brak katastrofy, × – katastrofa)

Fig. 5.5. Event tree for selected system of river basin, used in example in Chapter 6 (• – lack of disaster, × – disaster)

Miarę zagrożenia tego systemu wywołanego zdarzeniem inicjującym ZI w postaci opadu deszczu o dużej wydajności można określić na podstawie wzorów (5.5) i (5.7) w następujący sposób

$$PZ = PZ^{(1)} p^{(1)} + PZ^{(2)} p^{(2)} + PZ^{(3)} p^{(3)} + PZ^{(4)} p^{(4)} \quad (5.8)$$

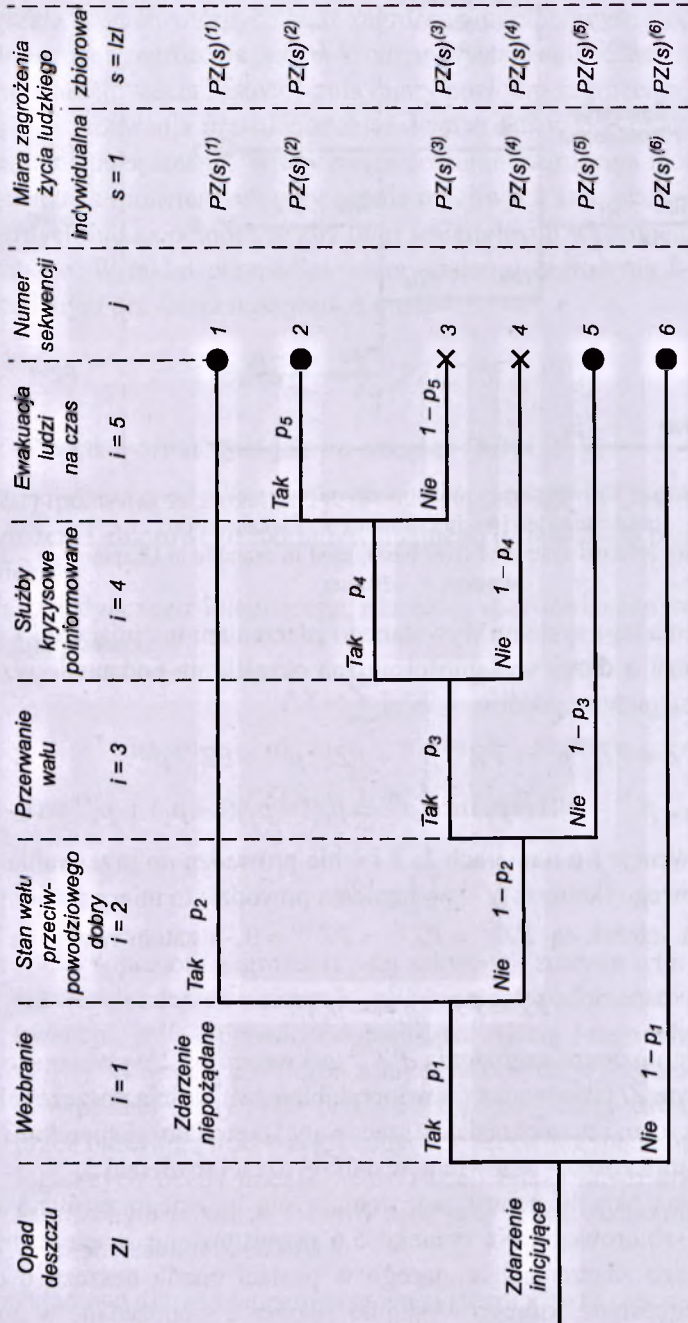
gdzie: $p^{(1)} = p_1 p_2$, $p^{(2)} = p_1 (1 - p_2) p_3$, $p^{(3)} = p_1 (1 - p_2) (1 - p_3)$ i $p^{(4)} = (1 - p_1)$.

Ponieważ sekwencje j o numerach 1, 3 i 4 nie prowadzą do przerwania wału przeciwpowodziowego (katastrofy – wystąpienia powodzi) to miary poziomu zagrożenia dla tych ścieżek są $PZ^{(1)} = PZ^{(3)} = PZ^{(4)} = 0$, a zatem równanie (5.8) przyjmuje postać

$$PZ = PZ^{(2)} p_1 (1 - p_2) p_3 \quad (5.9)$$

Zarówno miara poziomu zagrożenia $PZ^{(2)}$ sekwencji nr 2 wywołanego zdarzeniem inicjującym ZI jak również prawdopodobieństwa zajścia poszczególnych zdarzeń wtórnych p_1 , p_2 i p_3 są określane (szacowane) metodami eksperckimi bądź statystycznymi, które zostaną omówione w dalszej części rozdziału 5.

Podobnie można określić miary zagrożenia życia ludzkiego zarówno indywidualnego jak i zbiorowego. Na rysunku 5.6 przedstawiono schemat drzewa zdarzeń dla jednego zdarzenia inicjującego w postaci opadu deszczu o dużej wydajności w następstwie, którego wystąpiło zdarzenie niepożądane w postaci wezbrania i ciągu zdarzeń wtórnych prowadzących do niesprawności systemu hydrologicznego w postaci wystąpienia powodzi.



Rys. 5.6. Drzewo zdarzeń dla wybranego systemu zlewni rzecznej uwzględniające zagrożenie życia ludzkiego indywidualnego lub zbiorowego wyko-
rzystane w przykładzie obliczeniowym (● – brak katastrofy, x – katastrofa)

Fig. 5.6. Event tree for selected system of river basin taking into account hazard of individual or collective human life, used in example in Chapter 6
(● – lack of disaster, x – disaster)

Miarę zagrożenia życia ludzkiego, systemu przedstawionego na rysunku 5.6, można określić na podstawie wzorów (5.6) i (5.7), w następujący sposób

$$PZ(s) = PZ(s)^{(1)} p^{(1)} + PZ(s)^{(2)} p^{(2)} + PZ(s)^{(3)} p^{(3)} + PZ(s)^{(4)} p^{(4)} + PZ(s)^{(5)} p^{(5)} + PZ(s)^{(6)} p^{(6)} \quad (5.10)$$

gdzie: $p^{(1)} = p_1 p_2$, $p^{(2)} = p_1(1-p_2)p_3 p_4 p_5$, $p^{(3)} = p_1(1-p_2)p_3 p_4(1-p_5)$,
 $p^{(4)} = p_1(1-p_2)p_3(1-p_4)$, $p^{(5)} = p_1(1-p_2)(1-p_3)$, $p^{(6)} = 1-p_1$ i $s=1$
 (straty ludzkie indywidualne) lub $s=lzl$ (straty ludzkie zbiorowe), lzl –
 liczba zagrożonych ludzi.

Ponieważ ścieżki j o numerach 1, 2, 5 i 6 nie prowadzą do katastrofy – utraty życia ludzkiego (indywidualnego lub zbiorowego) to miary poziomu zagrożenia dla tych ścieżek są $PZ^{(1)} = PZ^{(2)} = PZ^{(5)} = PZ^{(6)} = 0$, a zatem równanie (5.10) przyjmuje postać

$$PZ(s) = PZ(s)^{(3)} p_1(1-p_2)p_3 p_4(1-p_5) + PZ(s)^{(4)} p_1(1-p_2)p_3(1-p_4) \quad (5.11)$$

Miara poziomu zagrożenia $PZ(s)^{(3)}$ sekwencji nr 3 i miara poziomu zagrożenia $PZ(s)^{(4)}$ sekwencji nr 4 prowadzących do utraty życia ludzkiego jak i prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego p_1 i poszczególnych zdarzeń wtórnych p_2, p_3, p_4 i p_5 powinny być oszacowane przez ekspertów bądź obliczone za pomocą metod statystycznych.

W przypadku określania poziomu zagrożenia stratami materialnymi, wartości strat s wyrażone będą w jednostkach finansowych.

5.5. ZALEŻNOŚCI MIĘDZY MIARĄ RYZYKA A MIARAMI NIEZAWODNOŚCI I ZAGROŻENIA

Między miarami ryzyka, niezawodności i zagrożenia istnieje ścisły związek, mimo, że jak podano wcześniej, definicje tych pojęć są zasadniczo różne. Ogólnie związek ten można zapisać w następujący sposób

$$\text{miara ryzyka} = \text{miara niezawodności} \cdot \text{miara zagrożenia} \quad (5.12)$$

Jeśli przyjmie się definicję podaną w podrozdziale 5.1, że *ryzyko hydrologiczne jest to możliwość pojawienia się określonych strat w rozważanym systemie hydrologicznym, w określonym czasie jego funkcjonowania* to miarą tego ryzyka jest prawdopodobieństwo pojawienia się strat $S(t)$ nie mniejszych niż s w okresie t funkcjonowania tego systemu. Miarę tę proponuje się oznaczyć symbolem M_{RH} i wyrazić w postaci

$$M_{RH}(s, t) = P[S(t) \geq s] \quad (5.13)$$

Zarówno w przyjętym symbolu oznaczenia jak i definicji powyższej miary wyraźnie zaznaczono istotność wielkości strat s oraz czasu t funkcjonowania systemu hydrologicznego, w którym system ten narażony jest na straty, przy określaniu poziomu ryzyka. A zatem M_{RH} określa poziom ryzyka w czasie t . Ważne jest też, że miara M_{RH} uwzględnia *explicite* losowość występowania strat i ich rozmiar. W przypadku systemów hydrologicznych są to przede wszystkim straty ludzkie, indywidualne lub/i zbiorowe, i straty natury ekonomicznej w postaci zniszczonych obiektów, różnego przeznaczenia, znajdujących się na terenach objętych powodzią jak i samych obiektów hydrotechnicznych służących technicznej ochronie przeciwpowodziowej. Wielkość potencjalnych strat s , ich struktura, zależy od ekspozycji E , tj. stanu zagospodarowania zagrożonego terenu oraz od wrażliwości (podatności) W , tj. stopnia przygotowania ludzi i obiektów do powodzi. Zarówno ekspozycja E jak i wrażliwość W wynikają z uwarunkowań przyrodniczych i społeczno-ekonomicznych zagrożonego terenu [Graf, 2014; Konieczny i in., 2014]. A zatem straty S są funkcją ekspozycji i wrażliwości, $S = f(E, W)$.

Ponieważ miara ryzyka M_{RH} jest miarą probabilistyczną, wyrażaną w postaci prawdopodobieństwa wystąpienia strat, jej zakres zmienności zawiera się w przedziale od 0 do 1, tj. $M_{RH} \in <0, 1>$. Miara ryzyka hydrologicznego maleje wraz ze wzrostem rozmiaru strat $s(t)$, natomiast przy ustalonym poziomie strat s miara ta rośnie wraz z czasem funkcjonowania systemu hydrologicznego, tj. z czasem, w którym system może być narażony na występowanie zdarzeń ekstremalnych – zdarzeń niepożądanych.

W zastosowaniach inżynierskich może być wykorzystany estymator miary ryzyka M_{RH} w postaci

$$\widehat{M}_{RH}(s, t) = \frac{n(s, t)}{N} \quad (5.14)$$

gdzie: $n(s, t)$ – liczba zdarzeń niepożądanych, które wystąpiły w czasie t funkcjonowania systemu i wywołały straty większe bądź równe s , N – liczba wszystkich zdarzeń w tym czasie.

W zlewni rzecznej, przy rozpatrywaniu zjawisk ekstremalnych, jakimi są wezbrania, $n(s, t)$ wyraża liczbę zdarzeń ekstremalnych, tj. liczbę wystąpień przepływów maksymalnych, których wartości są większe lub równe przyjętemu poziomowi granicznemu, od którego wezbranie, a w zasadzie jego przepływ maksymalny będzie uznany za zdarzenie ekstremalne. Za poziom graniczny można przyjąć przepływ dozwolony Q_{doz} lub ochrony powodziowej Q_{op} (rys. 3.2) po przekroczeniu, którego dochodzi do powstania strat ekonomicznych i/lub ludzkich. N natomiast jest liczbą wszystkich wezbrań (ich przepływów maksymalnych), które wystąpiły w przyjętym czasie t funkcjonowania

rozpatrywanego systemu hydrologicznego. Czas t może być przyjmowany, jako tzw. okres podstawowy, co w hydrologii oznacza rok hydrologiczny, lub może być wielokrotnością okresu podstawowego. Gdy dysponuje się dużą liczbą danych statystycznych o wezbraniach, nie tylko o przepływie maksymalnym wezbrania, ale na przykład o jego objętości czy czasie trwania, oraz danych o rozmiarze strat, jakie poszczególne wezbrania uznane za zdarzenia ekstremalne, spowodowały, można zbudować bardziej złożony model oceny ryzyka rozpatrywanego systemu hydrologicznego. Zrozumiałe jest, że taki model będzie dawał znacznie lepszą ocenę poziomu ryzyka występowania zagrożeń zjawiskami ekstremalnymi w danym systemie hydrologicznym. Takie podejście wymaga jednak posiadania dużej liczby wiarygodnych danych pomiarowych hydrologicznych i geograficzno-fizycznych, co aktualnie dla wielu zlewni rzecznych w Polsce (w szczególności tych niekontrolowanych), jest niemożliwe do osiągnięcia ze względów technicznych i ekonomicznych związanych z utrzymaniem gęstej sieci pomiarowo-obszernościowej.

Drugą miarą ryzyka hydrologicznego, która może być wykorzystana do analiz i oceny poziomu ryzyka, jest pochodna po czasie miary $M_{RH}(s, t)$ w postaci

$$p_s(s, t) = \frac{dM_{RH}(s, t)}{dt} \quad (5.15)$$

Miara $p_s(s, t)$ wyraża prawdopodobieństwo wystąpienia strat o rozmiarze s w dowolnej chwili t . Jeśli znany jest przebieg (rozkład) miary $p_s(s, t)$ w czasie to można określić poziom ryzyka skumulowanego dla dowolnego czasu t funkcjonowania systemu hydrologicznego w postaci

$$M_{RH}(s, t) = \int_0^t p_s(s, \tau) d\tau \quad (5.16)$$

Rozkład strat dla systemu hydrologicznego proponuje się obliczać metodami podanymi w podrozdziale 5.8.

Jeśli jednak rozkład strat jest nieznan, tj. nieznaną jest postać funkcji gęstości zmiennej losowej $S(t)$ to w analizach ryzyka można użyć przybliżonej miary oceny ryzyka strat, jaką jest wartość oczekiwana strat $s_0 = E[S(t)]$ w określonym czasie t funkcjonowania systemu. Miarę s_0 można interpretować, jako przewidywany rozmiar strat lub inaczej, jako najbardziej prawdopodobny rozmiar strat, jakie mogą pojawić się w systemie hydrologicznym w czasie t jego funkcjonowania. Zatem miara s_0 może być oszacowana przez grono ekspertów w wyniku analizy struktury niezawodnościowej systemu hydrologicznego i rodzaju zdarzenia niepożądanego lub określona metodami statystyki matematycznej, jeśli jest znana (pomierzona), nawet o niewielkiej liczebności, realizacja zmiennej losowej $S(t)$.

Warta odnotowania jest wielkość $M_{RH}^K(s, t)$, w której miara ryzyka $M_{RH}(s, t)$ odniesiona jest do korzyści $K(t)$ płynących z funkcjonowania systemu hydrologicznego w postaci

$$M_{RH}^K(s, t) = \frac{M_{RH}(s, t)}{K(t)} \quad (5.17)$$

gdzie: $K(t)$ – miara korzyści uzyskanych w okresie t z niezawodnego funkcjonowania systemu hydrologicznego w tym okresie (wyrażana najczęściej w jednostkach monetarnych, ale również w mln m³ wody retencjonowanej w rozpatrywanej zlewni w roku czy w GWh energii elektrycznej uzyskanej z elektrowni wodnych w ciągu roku).

Ważne jest również, że prezentowane miary ryzyka hydrologicznego, choć uwzględniają probabilistyczną naturę występowania i wielkości strat, nie uwzględniają ich rodzaju, co pozwala na uwzględnienie w powyższych miarach zarówno strat ludzkich (indywidualnych lub zbiorowych) jak i strat o charakterze gospodarczym (ekonomicznym – finansowym) oraz na wykorzystanie tych miar w różnych zastosowaniach inżynierskich.

Przyjmując prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego $p(A) = p_1$ jak na rys. 5.5 lub $p(Z_n)$ jak we wzorze (5.1), jako miarę zawodności $F(t)$ systemu hydrologicznego powiązaną ścisłą relacją (podrozdział 4.1) z miarą niezawodności $R(t)$ tego systemu oraz przyjmując, zgodnie z definicją zagrożenia (podrozdział 5.1), że miarą zagrożenia jest prawdopodobieństwo tego, że wystąpienie zdarzenia niepożądanego A spowoduje straty większe bądź równe s , związek w postaci (5.12) między miarami ryzyka M_{RH} , zawodności F (niezawodności R) i zagrożenia Z można wyrazić matematycznie w następujący sposób

$$M_{RH}(s, t) = F(t) \cdot Z(s) = [1 - R(t)]Z(s) \quad (5.18)$$

gdzie: $M_{RH}(s, t)$ – miara ryzyka pojawienia się strat s w systemie hydrologicznym w czasie t jego funkcjonowania, $F(t)$ – funkcja zawodności systemu – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia A w czasie t , $R(t)$ – funkcja niezawodności systemu – prawdopodobieństwo niewystąpienia zdarzenia A w czasie t , $R(t) = 1 - F(t)$, $Z(s)$ – prawdopodobieństwo tego, że zajście zdarzenia niepożądanego A spowoduje straty o wielkości większej bądź równej s , $Z(s) = P[S(t) \geq s/A]$.

W przypadku użycia miary ryzyka strat w postaci wartości oczekiwanej strat s_o , zależność (5.18) można zapisać, jako

$$s_o = [1 - R(t)]Z_o \quad (5.19)$$

gdzie: Z_o – jest wartością oczekiwaną (przewidywaną) lub najbardziej prawdopodobną strat powstałych w systemie hydrologicznym w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego.

Z analizy wzorów (5.18) i (5.19) wynika, że ryzyko wystąpienia strat w systemie hydrologicznym zależy nie tylko od wystąpienia zdarzenia niepożądanego, które stwarza zagrożenie wystąpienia strat, ale również od zawodności lub niezawodności samego systemu, jako całości bądź zawodności (niezawodności) poszczególnych jego elementów. Zawodność systemu lub jego elementów ma bezpośrednie przełożenie na możliwość wystąpienia strat i ich rozmiar reprezentowane w powyższych wzorach przez wielkości $Z(s)$ i Z_0 . Poziom zagrożenia określany przez te miary zależy nie tylko od niezawodności funkcjonowania systemu hydrologicznego i jego elementów, ale w dużym stopniu od gotowości systemu przeciwdziałania zagrożeniu zarówno przed i po pojawieniu się zagrożenia. Do systemu przeciwdziałania zagrożeniom należy zaliczyć systemy monitoringu ekstremalnych zdarzeń hydrologiczno-meteorologicznych i ostrzegania przed ich wystąpieniem, system ratownictwa medycznego, straż pożarną, system zarządzania kryzysowego [Grocki, 2012]. Reasumując, na bezpieczeństwo systemów hydrologicznych mają wpływ dwie podstawowe grupy czynników związane z jednej strony z niezawodnością funkcjonowania rozpatrywanego systemu i jego elementów oraz bezawaryjnością pracy systemów przeciwdziałania zagrożeniom, z drugiej zaś związane z występowaniem zdarzeń niepożądanych. Obiekt złożony, jakim jest system hydrologiczny może być bezpieczny nawet przy małej niezawodności jego elementów, jeśli w fazie planowania, projektowania i eksploatacji zadba się o to, aby jego potencjalne uszkodzenie nie stwarzało dużego zagrożenia.

5.6. MODELOWANIE RYZYKA I NIEZAWODNOŚCI SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO

Istotą zarządzania ryzykiem hydrologicznym jest ograniczenie zagrożeń wynikających z występowania niepożądanych zdarzeń w układzie N-C-T-Ś (rys. 2.1), bądź, chociaż ograniczenie skutków tych zdarzeń. Z analizy genezy ryzyka hydrologicznego (rys. 5.1) wynika, że ryzyko hydrologiczne, jego własności i wielkość, zależą od ryzyka otoczenia, tzn. ryzyka wynikającego z wystąpienia zjawisk mających bezpośredni wpływ na zjawiska hydrologiczne. Rzeczywiste ryzyko wystąpienia tych zjawisk jak i samo ryzyko hydrologiczne nie jest znane, ze względu na dużą złożoność zdarzeń i procesów zachodzących w układzie N-C-T-Ś. A zatem w analizach dotyczących niezawodności i bezpieczeństwa systemów hydrologicznych, które są częścią układu N-C-T-Ś, możliwe jest odwzorowanie jedynie przybliżonego opisu ryzyka wystąpienia poszczególnych zjawisk w nim zachodzących i związanych z nimi potencjalnych strat w systemie, przy wykorzystaniu modelu ryzyka i modelu niezawodności systemu hydrologicznego. Dokładność tego opisu, a tym samym doskonałość modelu (modeli), zależy przede wszystkim od posiadanej wiedzy o systemie. Ryzyko pojawienia się strat w czasie

funkcjonowania systemu hydrologicznego związane jest z możliwością wystąpienia różnego rodzaju zdarzeń i procesów niepożądanych, takich jak ekstremalne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne, awarie i katastrofy obiektów hydrotechnicznych, ale również związanych z działalnością człowieka, w postaci niezamierzonej ingerencji w środowisko wodne. Niezamierzona ingerencja człowieka w środowisko wodne jest bardziej efektem ubocznym realizacji innego celu (np. urbanizacji) niż świadomą zmianą stosunków wodnych w korycie rzeki i na obszarze zlewni (np. budowa zbiorników retencyjnych, regulacje rzek, melioracje wodne). Człowiek, jako jeden z elementów układu N-C-T-Ś, w tym systemie hydrologicznego, często okazuje się być najbardziej zawodnym elementem, głównie ze względu na niedostrzeganie zagrożeń lub łamanie obowiązujących przepisów czy lekceważenie zasad bezpieczeństwa.

Przy ocenie ryzyka wystąpienia potencjalnych strat w wyniku zawodnego funkcjonowania systemu hydrologicznego należy uwzględnić przede wszystkim te zdarzenia i procesy niepożądane, które będą miały największy wpływ na poziom ryzyka, który w końcowym etapie może być oszacowany za pomocą miar podanych w podrozdziale 5.5. Wybór i analiza tych fragmentów systemu, w których mogą pojawić się zdarzenia niepożądane, określenie ich postaci i skutków wystąpienia w modelowaniu ryzyka nazywa się identyfikacją zagrożeń. Jest to najważniejszy i najtrudniejszy etap modelowania ryzyka. Identyfikacja zagrożeń powinna być poprzedzona dobrym rozpoznaniem analizowanego systemu hydrologicznego. Rozpoznanie to dotyczy przede wszystkim poszczególnych elementów wchodzących w skład struktury niezawodnościowej rozpatrywanego systemu, tkwiących w nich źródeł zagrożeń, cech i właściwości oraz zasad funkcjonowania elementów oraz przyczyn i rodzajów zdarzeń niepożądanych, które wystąpiły w historii funkcjonowania systemu, a które stanowiły źródła zagrożeń w przeszłości. Rozpoznanie wstępne, jak również właściwy proces identyfikacji powinny być wykonane na podstawie wiedzy, doświadczenia, a czasami intuicji zespołu ekspertów (specjalistów w dziedzinie funkcjonowania poszczególnych elementów systemu hydrologicznego), jak również na podstawie zgromadzonych danych empirycznych o przyczynach i skutkach zdarzeń niepożądanych zaistniałych w przeszłości (analizy statystyczne).

Wyróżnione w procesie identyfikacji zdarzenia niepożądane mogą być przyczyną wystąpienia strat bezpośrednich lub mogą inicjować sekwencję zdarzeń wtórnych, w ten sposób pośrednio tworząc straty. Jeśli proces identyfikacji został przeprowadzony prawidłowo, to efektem końcowym tego procesu powinien być zbiór wybranych procesów i zdarzeń niepożądanych i związanych z nimi zagrożeń, które mają największy wpływ na ryzyko całkowite wystąpienia strat. Przy złożonych systemach, jakimi są systemy hydrologiczne najczęściej niemożliwe jest określenie ryzyka całkowitego bez uprzedniej analizy ryzyka cząstkowego sekwencji zdarzeń wtórnych wywołanych niepożądanym zdarzeniem inicjującym

(pierwotnym). Jeśli zdarzenia wtórne są zdarzeniami niezależnymi, tj. prawdopodobieństwo wystąpienia jednego zdarzenia nie zależy od prawdopodobieństwa zajścia innego zdarzenia, to korzystając z miar ryzyka podanych w podrozdziale 5.5 (wzór (5.18) i (5.19)) i biorąc pod uwagę złożoną, mieszaną strukturę niezawodnościową systemu hydrologicznego (rozdział 4 np. wzory (4.27) i (4.28)) można określić ryzyko całkowite następująco

$$M_{RH}(s,t) = \sum_{i=1}^{i=k} M_{RH_i}(s,t) = \sum_{i=1}^{i=k} F(t)Z(s)_i = \sum_{i=1}^{i=k} [1 - R(t)_i]Z(s)_i, \quad (5.20)$$

lub

$$s_o = \sum_{i=1}^{i=k} s_{o_i} = \sum_{i=1}^{i=k} F(t)Z_{o_i} = \sum_{i=1}^{i=k} [1 - R(t)_i]Z_{o_i}, \quad (5.21)$$

gdzie: k – liczba zdarzeń wtórnych, pozostałe oznaczenia jak we wzorach (5.18) i (5.19).

Z analizy wzorów (5.20) i (5.21) wynika, że struktura modelu ryzyka systemu hydrologicznego składa się z dwóch części: modelu zawodności (niezawodności) systemu hydrologicznego, dla którego należy dysponować informacją o prawdopodobieństwach zajścia zdarzeń niepożądanych $F(t)_i$, $i = 1, 2, \dots, k$, w systemie oraz z modelu zagrożeń, dla którego trzeba określić miary zagrożenia $Z(s)_i$ lub Z_{o_i} , tj. miary strat – skutków wystąpienia poszczególnych zdarzeń czy procesów niepożądanych.

Reasumując, w niniejszej pracy proponuje się określać ryzyko hydrologiczne przy wykorzystaniu miar ryzyka w dwojaki sposób, mianowicie jako

$$\text{Ryzyko hydrologiczne} = \text{miara wystąpienia zdarzenia niepożądanego} \times \\ \times \text{miara zagrożenia}$$

co w praktyce oznacza

$$M_{RH}(s,t) = P(A_i) \cdot P[S(t) \geq s/A_i] \quad (5.22)$$

gdzie: $P(A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego jako miara zawodności $F(t)$ (niezawodności $R(t)$) systemu hydrologicznego, $P[S(t) \geq s/A_i]$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat większych bądź równych s pod warunkiem zajścia zdarzenia niepożądanego A_i , jako miara zagrożenia wystąpienia strat w systemie hydrologicznym w wyniku jego niesprawnego funkcjonowania,

a w przypadku braku informacji o prawdopodobieństwie zdarzenia niepożądanego lub zawodności (niezawodności) systemu hydrologicznego tylko jako

$$\text{Ryzyko hydrologiczne} = \text{miara strat}$$

co oznacza w praktyce

$$M_{RH}(s,t) = P[S(t) \geq s] \quad (5.23)$$

gdzie: $P[S(t) \geq s]$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat nie mniejszych niż s , wyrażane w postaci estymatorów miar ryzyka hydrologicznego podanych we wzorach (5.14)–(5.17).

Proponowane sposoby w swej istocie zasadniczo różnią się od podejścia klasycznego wyrażonego wzorem (5.1), gdyż uwzględniają probabilistyczną naturę strat, a nie tylko wielkość strat w postaci jednej konkretnej liczby, biorąc jednocześnie pod uwagę niezawodnościową strukturę systemu hydrologicznego. Zdaniem autora niniejszej pracy ryzyko hydrologiczne powinno mieć miano prawdopodobieństwa, a nie jak we wzorze (5.1) miano strat wyrażane w jednostkach monetarnych i/lub jako liczba ofiar ludzkich.

5.7. METODY SZACOWANIA ZAWODNOŚCI (NIEZAWODNOŚCI) W MODELOWANIU RYZYKA

Do analizy i szacowania niezawodności lub zawodności systemu hydrologicznego w modelowaniu ryzyka mogą być wykorzystane miary niezawodności (zawodności) i metoda drzewa niesprawności opisane w rozdziale 4 oraz metoda drzewa zdarzeń opisana w podrozdziale 5.4 (5.4.1 i 5.4.2), pozwalające na wyznaczenie prawdopodobieństw zajścia zdarzeń niepożądanych $F(t)$, (wzory (5.18), (5.20) i (5.21)). Do obliczenia prawdopodobieństw $F(t)$, wykorzystuje się przede wszystkim metody eksperckie bądź metody statystyczne, jeśli dysponuje się ciągami pomiarowymi o dużej liczebności zapewniającymi dużą dokładność oszacowań miar niezawodności.

5.7.1. Metody eksperckie

Metody eksperckie w przeciwieństwie do metod statystycznych (probabilistycznych) nie wymagają dużej liczby danych pomiarowych, gdyż oparte są na opiniach ekspertów o prawdopodobieństwie wystąpienia określonego zdarzenia niepożądanego w trakcie funkcjonowania systemu hydrologicznego. Zazwyczaj opinie ekspertów są wyrażane przy użyciu ankiet. Oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych eksperci dokonują przede wszystkim na podstawie posiadanej wiedzy i doświadczenia, choć czasami ich intuicja również odgrywa istotną rolę. Im więcej ekspertów bierze udział w ankietowaniu, tym bardziej dokładne są oszacowania. Jest rzeczą oczywistą, że ekspertami powinny być osoby znające zasady funkcjonowania rozważanego systemu hydrologicznego i jego elementów oraz posiadające wiedzę o zjawiskach

i procesach, które są przyczyną powstawania zdarzeń niepożądanych w zlewni rzecznej. Zespół ekspertów powinien być kierowany przez najbardziej doświadczonego specjalistę w zakresie rozpatrywanego systemu, który będzie potrafił w końcowym etapie podsumować opinie ekspertów, którzy nie zawsze będą wyrażać swoje opinie w ten sam sposób, na przykład przy określaniu częstości występowania określonego zdarzenia niepożądanego mogą wystąpić inne jednostki czasu przy ocenie okresu powtarzalności (raz na 15 lat lub 4 razy w ciągu 20 lat czy 7 razy w ciągu 50 lat). Ponieważ opinie ekspertów nie pokrywają się, za końcowy wynik oszacowania prawdopodobieństwa $F(t)$, wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego w czasie t , przyjmuje się średnią arytmetyczną z opinii ekspertów w postaci (5.24), zmniejszając w ten sposób subiektywność oceny poszczególnych ekspertów

$$F(t)_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{j=m} F_{\text{eks}_j}(t)_i \quad (5.24)$$

gdzie: $F_{\text{eks}_j}(t)_i$ – oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia i -tego zdarzenia niepożądanego przez j -tego eksperta, m – liczba ekspertów z zespołu.

Rzadziej stosuje się średnią ważoną, choć takie zróżnicowanie między ekspertami może być wykonane przez kierownika zespołu, który uwzględniając różny poziom ich wiedzy i doświadczenia o funkcjonowaniu poszczególnych elementów systemu hydrologicznego, może nadać ich ocenom wagi, np. w skali od 1 do 5 (nadawane subiektywnie przez kierownika zespołu, który jest najbardziej doświadczonym specjalistą). Możliwe jest również podjęcie decyzji większością głosów w głosowaniu ekspertów co do wartości prawdopodobieństwa wystąpienia określonego zdarzenia niepożądanego w trakcie funkcjonowania systemu hydrologicznego. Za Bogdanowicz [2010]: *jeśli każdy z m ekspertów niezależnie podejmie trafną dychotomiczną decyzję z prawdopodobieństwem $p_i > 0,5$ ($i = 1, 2, \dots, m$), które może być interpretowane jako kompetencja do podejmowania tego typu decyzji, to prawdopodobieństwo, że decyzja podjęta większością głosów będzie trafna, dąży do jedności wraz ze wzrostem liczby głosujących*. Przyjmując, że kompetencje ekspertów są jednakowe (np. $p_i = 0,8$) to prawdopodobieństwo trafnej decyzji wynosi 0,97 przy 7 ekspertach, a przy 13 jest większe od 0,99 [Bogdanowicz, 2010].

Prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego $p(A) = p_A$ jak na rys. 5.5 lub $p(Z_n)$ jak we wzorze (5.1), jako miara zawodności $F(t)$ systemu hydrologicznego, jest często określone przez ekspertów opisowo a nie liczbowo. Ekspersi wyrażają swoje „odczucie” o możliwości zajścia zdarzenia niepożądanego, a następnie za pomocą tabeli 5.1, zaproponowanej przez Vicka i Stewarda [1996] (za Fiedlerem i in. [2007]), przypisywane jest temu zdarzeniu określone prawdopodobieństwo.

Tabela 5.1. Związek między odczuciem (słownym opisem) a prawdopodobieństwem wystąpienia zdarzenia (wg Vicka i Stewarda [1996] za Fiedlerem i in. [2007])

Table 5.1. Relationship between sense (verbal characterization) and probability of event occurrence (according to Vick and Steward [1996] by Fiedler et al. [2007])

Opis słowny	Prawdopodobieństwo
Zdarzenie pewne	0,999
Zdarzenie prawie pewne	0,99
Zdarzenie prawdopodobne	0,90
Całkowita niepewność, co do wystąpienia zdarzenia	0,5
Zdarzenie rzadko występujące	0,10
Zdarzenie mało prawdopodobne	0,01
Zdarzenie nieprawdopodobne	0,001

Inny sposób przeliczenia ocen ekspertów zaproponował Opyrchał [2005] wykorzystując w tym celu funkcję przeliczeniową w następującej postaci (zostały zachowane oryginalne oznaczenia autora wzoru)

$$P_e(\bar{W}_e) = 10^{\frac{-\log(P_{\min}) \times (1 - \bar{W}_e)}{9}} \quad (5.25)$$

gdzie: \bar{W}_e – średnia ocena ekspertów dotycząca możliwości spowodowania zdarzenia niepożądanego przez element e budowli hydrotechnicznej, $P_e(\bar{W}_e)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia niepożądanego wywołanego przez element e , $P_{\min} = P_e(10)$ – minimalne prawdopodobieństwo katastrofy w skali ocen ekspertów od 1 – zdarzenie prowadzące do nieuchronnej katastrofy obiektu do 10 – stan obiektu, dla którego prawdopodobieństwo katastrofy jest niewielkie.

Powyzsza metoda została zaproponowana do obliczania cząstkowych prawdopodobieństw P_e zniszczenia budowli hydrotechnicznej wywołanych niesprawnościami jej elementów e . Obliczenie prawdopodobieństwa całkowitego P_{TOT} zniszczenia budowli hydrotechnicznej zaproponowano w powyższej pracy z następującego wzoru (zostały zachowane oryginalne oznaczenia autora wzoru)

$$P_{TOT} = \sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} S_i \quad (5.26)$$

gdzie: N – liczba elementów e , S_i – prawdopodobieństwo, że element e_i spowoduje katastrofę budowli w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i .

W pracy Opyrchała [2005] można znaleźć również propozycje obliczania prawdopodobieństw katastrofy pojedynczych budowli hydrotechnicznych, zespołu budowli hydrotechnicznych, budowli przeciwpowodziowych i kaskady budowli hydrotechnicznych wywołanej wystąpieniem zdarzeń niepożądanych w samej budowli jak i zdarzeń zewnętrznych.

Ponieważ w systemie hydrologicznym występuje duża liczba zagrożeń i związanych z nimi zdarzeń i procesów niepożądanych (w tym niepożądanych zdarzeń wtórnych) w modelowaniu ryzyka systemu hydrologicznego może mieć zastosowanie metoda rankingowa należąca również do grupy metod eksperckich. Metoda ta polega na uszeregowaniu opinii ekspertów odnośnie wystąpienia zdarzenia niepożądanego od najmniej prawdopodobnego (ranga 1) do zdarzenia najbardziej prawdopodobnego (ranga n , gdzie n – liczba rozpatrywanych zdarzeń) w określonym czasie t np. dla roku. Opinie ekspertów w postaci rang, nadawanych poszczególnym zdarzeniom A_p , są zapisywane w tabeli łączącej poszczególne zdarzenia z ich pozycją nadaną przez poszczególnego eksperta (tabela 5.2). Następnie dla poszczególnych zdarzeń sumowane są ich pozycje i obliczana jest średnia pozycja poszczególnego zdarzenia w rankingu. Aby można było określić liczbowe wartości prawdopodobieństwa zajścia poszczególnych zdarzeń w skali od 0 do 1 przeprowadza się kalibrację uszeregowania zdarzeń przy wykorzystaniu następującej zależności

$$\log(p) = a_0 \cdot \overline{poz} + a_1 \quad (5.27)$$

gdzie: p – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego, \overline{poz} – średnia pozycja zdarzenia w rankingu, a_0 i a_1 – współczynniki kalibrujące, które identyfikowane są na podstawie co najmniej dwóch zdarzeń niepożądanych o znanych prawdopodobieństwach ich wystąpienia (w tab. 5.2 zdarzenia B_1 i B_2).

Tabela 5.2. Tabela łącząca zdarzenia niepożądane A_i z rangami ekspertów (za Szopą [2009])

Table 5.2. Conjunctive table of undesirable event A_i and experts' ranks (by Szopa [2009])

Zdarzenie niepożądane Ekspert	Pozycja (ranga) zdarzenia						
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	B_1	B_2
Ekspert 1	1	3	4	6	5	2	7
Ekspert 2	2	1	3	6	7	1	5
Ekspert 3	2	3	4	7	5	1	6
Ekspert 4	1	3	5	4	6	2	7
Ekspert 5	1	2	4	6	5	3	7
Suma pozycji (rang)	7	12	20	29	28	9	32
Średnia pozycja (suma rang/5) \overline{poz}	1,4	2,4	4,0	5,8	5,6	1,8	6,4

B_1 i B_2 – zdarzenia kalibrujące o znanych prawdopodobieństwach wystąpienia $p(B_1)$ i $p(B_2)$

$\log[p(B_1)] = a_0 \cdot 1,8 + a_1$ i $\log[p(B_2)] = a_0 \cdot 6,4 + a_1$ – równania kalibrujące na podstawie, których obliczane są współczynniki $a_0 = \log[p(B_2)/p(B_1)]/4,6$ i $a_1 = \log[p(B_2)] - a_0 \cdot 6,4$

Zdarzeniom B_1 i B_2 eksperci także nadają rangi według własnej oceny włączając je w ten sposób do zbioru rozpatrywanych zdarzeń niepożądanych. Z punktu widzenia dokładności procesu kalibracji najlepiej jest, gdy zdarzenia B_1 i B_2 są

zdarzeniami skrajnymi, tzn. gdy możliwość wystąpienia jednego z nich jest najmniej prawdopodobna a drugiego najbardziej prawdopodobna, wtedy uzyskuje się dobre oszacowanie nieznanymi prawdopodobieństw zdarzeń A_i .

5.7.2. Metody probabilistyczne

W odróżnieniu od metod eksperckich, metody probabilistyczne (statystyczne) szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niepożądanych wymagają dużej liczby danych pomiarowych. Ten wymóg w dużej mierze utrudnia wykorzystanie metod probabilistycznych w praktyce inżynierskiej nie tylko w hydrologii, ale również w innych dziedzinach nauki, w których inżynieria niezawodności ma już szerokie zastosowanie.

Jak wspomniano w rozdziale 4 dobrym estymatorem funkcji niezawodności $R(t)$ jest estymator $\hat{R}(t)$ wyrażony wzorem (4.10). Ponieważ funkcja niezdatności $F(t)$ jest ściśle matematycznie powiązana z funkcją niezawodności $R(t)$, jej estymator $\hat{F}(t)$ przyjmuje następującą postać

$$\hat{F}(t) = \frac{n(t)}{N} \quad (5.28)$$

gdzie: $n(t)$ – liczba zdarzeń powodujących niesprawność obiektu, N – liczba wszystkich zdarzeń zjawiska oddziałyującego na obiekt.

Wykorzystując wzory (4.10) i (5.28) można dokonać estymacji punktowej nieznanymi wartości funkcji niezdatności $F(t)$ i funkcji niezawodności $R(t)$, tzn. określić ich wartości za pomocą jednej liczby (jednej konkretnej wartości liczbowej). Stosując estymację punktową nie jest znana dokładność takiego oszacowania.

Niezawodność czy niesprawność (niezdatność) systemu hydrologicznego w określonym czasie t jego funkcjonowania można traktować, jako cechę tego systemu. Na przykład system w czasie t był $n(t)$ razy niesprawny, a $N - n(t)$ niezawodny. Zatem stosując cechę opisową systemu hydrologicznego, określając częstość występowania tej cechy, przy braku wiedzy o rzeczywistym rozkładzie prawdopodobieństwa funkcji niezdatności $F(t)$ lub funkcji niezawodności $R(t)$, można policzyć przedział ufności dla szacowanej wielkości $\hat{F}(t)$ lub $\hat{R}(t) = 1 - \hat{F}(t)$ przy przyjętym poziomie ufności α taki że [Kaczmarek, 1970; Szopa, 1999]

$$P\left(\hat{F}(t) - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{N} \hat{F}(t)[1 - \hat{F}(t)]} < F(t) < \hat{F}(t) + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{N} \hat{F}(t)[1 - \hat{F}(t)]}\right) = 1 - \alpha \quad (5.29)$$

$$P \left(\frac{n(t)}{N} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\frac{n(t)}{N} \left(1 - \frac{n(t)}{N}\right)}{N}} < F(t) < \frac{n(t)}{N} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\frac{n(t)}{N} \left(1 - \frac{n(t)}{N}\right)}{N}} \right) = 1 - \alpha \quad (5.30)$$

gdzie: $z_{\alpha/2}$ – wartość statystyki z odczytana z tablic dystrybuanty rozkładu normalnego dla $\alpha/2$, α – poziom ufności, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (5.28).

W ten sam sposób można określić przedziały ufności dla oszacowania wartości miary $R(t)$. Łatwo zauważyć, że przy ustalonym poziomie ufności, szerokość przedziału ufności zależy od liczebności N danych pomiarowych. Przy długich próbach losowych szerokość przedziału ufności może być na tyle wąska, że do zastosowań inżynierskich wystarczy oszacowanie uzyskane z estymacji punktowej.

Istnieje szereg innych metod obliczania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego Z_n , ale większość z nich jest raczej na etapie prowadzenia prac badawczych niż możliwości zastosowań inżynierskich [Fiedler i n., 2007]:

- metoda częstotliwościowa wykorzystująca dane historyczne o zaistniałych katastrofach, np. obiektów hydrotechnicznych będących elementami systemu hydrologicznego,
- metoda zbiorów rozmytych wykorzystująca miary zbiorów rozmytych do oceny zajścia zdarzenie niepożądanego,
- metoda symulacji Monte Carlo,
- metoda hybrydowa wykorzystująca metody mieszane: eksperymentalno-aproksymacyjne, probabilistyczno-numeryczne, deterministyczno-korelacyjne.

5.8. METODY SZACOWANIA STRAT W MODELOWANIU RYZYKA

Jak wspomniano w poprzednich podrozdziałach podstawą modelowania ryzyka w systemach hydrologicznych jest modelowanie występujących w nim zagrożeń, które są nierozzerwalnie związane z możliwością wystąpienia strat, jako skutków zajścia zdarzeń niepożądanych. A zatem, analiza ryzyka, jego szacowanie w szczególności pod kątem ilościowym oraz ocena bezpieczeństwa systemów hydrologicznych nie mogą być wykonane bez modelowania strat. Dla potrzeb oceny ryzyka systemów hydrologicznych straty są zazwyczaj określane w postaci strat ludzkich i materialnych, choć obecnie ze względu na zapisy dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim [2007], tzw. Dyrektywy Powodziowej, uwzględniane powinny być również straty w środowisku przyrodniczym i straty dziedzictwa kulturowego. Straty w systemach hydrologicznych pojawiają się nagle, w wyniku wystą-

pienia zdarzenia niepożądanego, jakim jest duże wezbranie powodujące powódź. W niniejszej pracy nie będą omawiane modele strat, które narastają stopniowo w czasie, czyli strat powstających w wyniku długotrwałego działania zdarzenia niepożądanego o małej intensywności. Zatem przedmiotem modelowania będą przede wszystkim straty ludzkie, wyrażone w postaci miar strat indywidualnych i zbiorowych, jak również straty finansowe spowodowane nagłym wystąpieniem zdarzenia niepożądanego o dużej intensywności.

W czasie t funkcjonowania systemu hydrologicznego straty mogą pojawić się w różnych chwilach t_i zajścia zdarzeń niepożądanych. W związku z tym, pojawiające się w chwilach t_i straty można traktować jako zmienną losową $S(t)$, podlegającą pewnemu rozkładowi prawdopodobieństwa. Zmienna losowa $S(t)$ przyjmuje wartości s z przedziału $\langle s_{\min}, s_{\max} \rangle$, gdzie $s_{\min} = 0$ a $s_{\max} = \text{utrata życia}$ w przypadku szacowania strat ludzkich indywidualnych i zbiorowych, a w przypadku strat finansowych s_{\max} wyraża straty powstałe w wyniku najgorszego przebiegu zdarzeń po wystąpieniu zdarzenia niepożądanego. Teoretyczny rozkład prawdopodobieństwa dla ciągłej zmiennej losowej $S(t)$ można przedstawić w ogólnej postaci

$$p[S(t) \geq s] = \int_s^{s_{\max}} f(s) ds \quad (5.31)$$

gdzie: $p[S(t) \geq s]$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat co najmniej s , $f(s)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa $S(t)$.

W przypadku systemów hydrologicznych ustalenie postaci funkcji gęstości teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa dla zmiennej losowej ciągłej $S(t)$ jest stosunkowo trudne, gdyż wymaga posiadania dużej liczby danych o zaistniałych stratach, w wyniku wystąpienia poszczególnych zdarzeń niepożądanych. Dlatego też, w zastosowaniach praktycznych proponuje się dyskretyzację zmiennej losowej $S(t)$. Dyskretyzacja ta polega na podziale strat na rodzaje, w ramach których dokonuje się podziału na kategorie związane z rozmiarami strat. W niniejszej pracy podzielono straty na dwa rodzaje: straty ludzkie (osobowe) indywidualne lub/i zbiorowe oraz straty finansowe zawierające w sobie straty materialne i straty społeczne, kulturowe, środowiska przyrodniczego i polityczne, jeśli są one finansowo możliwe do określenia. Natomiast przy podziale, podawanym w różnych normach i przepisach, na kategorie, odzwierciedlające potencjalny rozmiar strat, dokonywany jest podział na straty niskie, znaczące i wysokie. Jak wspomniano wcześniej poziom strat, ich rozmiar jest ściśle powiązany z poziomem zagrożenia i ryzyka. Na bezpieczeństwo i niezawodność funkcjonowania systemów hydrologicznych, jako całości, istotny wpływ ma bezpieczeństwo i niezawodność działania jego elementów, w tym obiektów hydrotechnicznych służących do ochrony przeciwpowodziowej, a więc obiektów mających za zadanie eliminację, a przynajmniej redukcję zagrożeń wynikających z występowania dużych wezbrań, powodujących

zdarzenia niepożądane w postaci powodzi. A zatem, w analizie strat, jakie może spowodować katastrofa lub niesprawność w funkcjonowaniu obiektów hydrotechnicznych, konieczne jest dokonanie kategoryzacji strat i związanego z nimi zagrożenia i ryzyka oraz przypisanie im prawdopodobieństwa ich wystąpienia, na przykład tak jak w przepisach amerykańskich (tabele 5.3, 5.4 i 5.5) lub polskich [Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. zał. 2 i zał. 4].

Tabela 5.3. Klasyfikacja ryzyka i strat (wg [Guidelines ..., 1979] za Ozga-Zielińska [1995])

Table 5.3. Classification of risk and losses (according to [Guidelines ..., 1979] by Ozga-Zielińska [1995])

Kategoria	Straty ludzkie (liczba ofiar)	Straty ekonomiczne
Niskie	Nie są przewidziane (brak stałych budynków mieszkalnych)	Minimalne (obszary nie zagospodarowane, poza pojedynczymi obiektami i niewielkimi obszarami rolniczymi)
Znaczące	Kilka osób (obszary nie zurbanizowane, nie więcej niż kilka budynków mieszkalnych)	Znaczne (znaczne obszary rolnicze, przemysłowe i zabudowane)
Wysokie	Więcej niż kilka osób	Duże (duże obszary zurbanizowane)

Tabela 5.4. Klasyfikacja zagrożeń poniżej obiektu hydrotechnicznego (wg [Downstream ..., 1988] za Ozga-Zielińska [1995])

Table 5.4. Classification of hazards below water structure (according to [Downstream ..., 1988] by Ozga-Zielińska [1995])

Kategoria	Straty ludzkie (liczba ofiar)	Straty ekonomiczne
Niskie	0	Minimalne (obszary niemieszkalne, minimalne zasoby naturalne)
Znaczące	1–6	Znaczne (znaczne obszary pod zabudowę większą wykorzystywane rolniczo, przemysł, znaczące zasoby naturalne)
Wysokie	6 <	Duże (obszary miejskie, gęsto zaludnione, przemysł, intensywnie wykorzystywane rolniczo, duże zasoby naturalne)

Podane, w tabeli 5.5 i załączniku 4 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r., prawdopodobieństwa rekomendowane do wymiarowania obiektów hydrotechnicznych można potraktować jako prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego w przypadku katastrofy obiektu określonej klasy. Jak również jako prawdopodobieństwa wystąpienia strat o rozmiarach niskich, znaczących lub wysokich w rozumieniu załącznika 2 Rozporządzenia Ministra

Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. i tabel 5.3 i 5.4, w których brano pod uwagę konsekwencje społeczne, ekonomiczne, środowiskowe i polityczne.

Tabela 5.5. Prawdopodobieństwa p przepływów projektowych dla zapór (wg [Guidelines ..., 1979] za Ozga-Zielińska [1995])

Table 5.5. Probability p of design floods for dams (according to [Guidelines ..., 1979] by Ozga-Zielińska [1995])

Potencjalne ryzyko i straty Wielkość zapory	Niskie	Znaczące	Wysokie
Mała	0,02–0,01	0,01–0,5MWW	0,5MWW–MWW
Średnia	0,01–0,5MWW	0,5MWW–MWW	MWW
Duża	0,5MWW–MWW	MWW	MWW
Uwaga: MWW – maksymalne wiarygodne wezbranie za Ozga-Zielińska i Ozga-Zieliński [2003] odpowiednik PMF w USA ($p \approx 0,0001$)			

W przypadku strat ludzkich dyskretyzacji można dokonać dzieląc je na kategorie s_j , $j = 1, 2, \dots, k$, gdzie k jest numerem strat o najwyższej kategorii. Można wtedy rozważać rozmiar strat w poszczególnych kategoriach w zależności od rodzaju i wielkości zagrożenia. Szopa [2009] zaproponował podział strat ludzkich indywidualnych na $k = 5$ kategorii, mianowicie s_1 – zerowe, s_2 – małe, s_3 – średnie, s_4 – duże i s_5 – śmiertelne. Poszczególnym kategoriom strat można przypisać określone szkody osobowe powstałe w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Dla potrzeb modelowania strat ludzkich indywidualnych lub zbiorowych w systemach hydrologicznych proponuje się przypisać poszczególnym kategoriom następujące szkody:

- Do kategorii s_1 – straty zerowe – można zaliczyć straty, które nie powstały, mimo zajścia zdarzenia niepożądanego i wystąpienia zagrożenia, wskutek przyczyn losowych lub/i poprawnego działania systemów przeciwdziałania zagrożeniom.
- Do kategorii s_2 – straty małe – można zaliczyć urazy i choroby, które powodują jedynie krótkotrwałe i niewielkie dolegliwości, np. niewielkie zatrucia powstałe w wyniku spożycia wody powodziowej czy skażonej żywności, małe zranienia i stłuczenia itp.
- Do kategorii s_3 – straty średnie – można zaliczyć urazy i choroby, które powodują małe ale długotrwałe lub narastająco okresowo dolegliwości lecz przemijające, np. urazy układu kostno-mięśniowe, choroby psychiczne wywołane powodziowym szokiem emocjonalnym.
- Do kategorii s_4 – straty duże – można zaliczyć urazy i choroby, które powodują duże, często trwałe ubytki zdrowia, np. poważne uszkodzenie ciała i narządów wewnętrznych.
- Do kategorii s_5 – straty śmiertelne – zalicza się zgony lub takie urazy czy choroby, które z dużym prawdopodobieństwem doprowadzą do śmierci w krótkim czasie.

Określenie strat pod względem ilościowym w niektórych kategoriach jest bardzo trudne ze względu na brak danych statystycznych, lecz wydaje się być konieczne, choćby ze względu na racjonalne wypłacanie odszkodowań powodziarom przez firmy ubezpieczeniowe lub państwo. Ze względu na trudności w uzyskaniu informacji o wystąpieniu szkód w poszczególnych kategoriach strat często straty ludzkie są rozpatrywane tylko w kategorii s_5 .

Straty w systemach hydrologicznych powstają losowo tak jak losowe jest zajście zdarzenia niepożądanego i związanego z nim zagrożenia. Prawdopodobieństwo wystąpienia strat S nie mniejszych niż s w wyniku zajścia zdarzenia niepożądanego A_i wynosi $P(S \geq s/A_i)$ (wzór (5.22)). Ponieważ dokonano dyskretyzacji zmiennej losowej S do $k=5$ kategorii to zmienna losowa S może przyjąć tylko pięć wartości $S = s_j, j = 1, 2, \dots, 5$. Pojawienie się strat w poszczególnych kategoriach jest również losowe, tj. mogą pojawić się one z różnym prawdopodobieństwem p_j , które można przedstawić w ogólnej postaci

$$p_j = P(S = s_j/A_i) \quad (5.32)$$

gdzie: $P(S = s_j/A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat S w kategorii s_j pod warunkiem wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i .

Zatem probabilistyczny model strat ludzkich będzie rozkładem prawdopodobieństwa wystąpienia tych strat w poszczególnych kategoriach s_j , przy czym

$$p_j \in <0, 1> \text{ i } \sum_{j=1}^{j=k} p_j = 1 \text{ oraz}$$

$$p_j = \frac{L_{s_j, A_i}}{L_{A_i}} \quad (5.33)$$

gdzie: L_{s_j, A_i} – liczba ofiar zdarzenia A_i w kategorii s_j , L_{A_i} – liczba wystąpień zdarzenia A_i , lub jeśli znany jest rozkład zmiennej losowej S w ramach kategorii s_j

$$p_j(S \geq s) = \int_s^{s_{\max, j}} f_j(s) ds \quad (5.34)$$

gdzie: $f_j(s)$ – znana postać funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej S w ramach poszczególnych kategorii strat s_j , $s_{\max, j}$ – maksymalna wielkość strat w kategorii s_j .

Szacowanie strat w modelowaniu ryzyka, zagrożeń i bezpieczeństwa systemów hydrologicznych oprócz wspomnianych już strat osobowych indywidualnych czy zbiorowych wchodzących w skład tzw. strat ludzkich, dotyczy również strat społecznych, do których należy zaliczyć straty wartości historycznych i kulturowych, straty materialne (np. budynki mieszkalne, obiekty publiczne takie jak elektrownie, zaopatrzenia w wodę, komunikacji lądowej, straty w produkcji prze-

mysłowej i rolnictwie, koszty odszkodowań), straty środowiskowe (zmiany ekologiczne, w rybołówstwie, w dzikiej zwierzynie, w naturalnej sieci kanałów, itp.) i straty polityczne (np. bezpieczeństwo publiczne, utrata wiarygodności państwa). Większość powyższych strat można wyrazić w środkach finansowych, obliczając na przykład koszty odszkodowań utraty życia lub zdrowia ludzi, koszty odbudowy zniszczonych obiektów, odnowy (rekonstrukcji) środowiska przyrodniczego, itp. Ogólnie straty finansowe S można ująć w następującej postaci

$$S = K_l + K_m + K_k + K_s + K_p \quad (5.35)$$

gdzie: K_l – koszty strat życia i zdrowia ludzi, K_m – koszty strat dóbr materialnych, K_k – koszty strat dóbr kultury, K_s – koszty strat środowiska przyrodniczego, K_p – koszty strat politycznych.

Rozmiar każdego z powyższych składników strat S w systemie hydrologicznym jest zależny od rodzaju i wielkości zdarzenia niepożądanego oraz od wielu innych czynników, takich jak efektywność systemu ostrzegania i ewakuacji ludzi, system zarządzania kryzysowego, system ubezpieczeń, modernizacji i inwestycji ochrony przeciwpowodziowej, organizacja pracy jednostek administracji rządowej i samorządowej, zagospodarowanie przestrzenne terenów podatnych na zalanie, świadomość społeczna, itp. Zarówno samo zdarzenie niepożądane, jak i wpływ innych czynników mają charakter losowy, zatem straty finansowe również należy traktować, jako zmienną losową, która może być opisana funkcją gęstości prawdopodobieństwa $f(s)$ spełniającą następujące warunki

$$f(s) > 0 \quad \text{gdy } s \in (0, s_{\max})$$

i

$$f(s) = 0 \quad \text{gdy } s = 0 \quad \text{lub } s > s_{\max}$$

(5.36)

gdzie: s_{\max} – maksymalne straty finansowe powstałe w wyniku najgorszego przebiegu zdarzeń po wystąpieniu zdarzenia niepożądanego

$$i \quad s_{\max} = \max(K_l + K_m + K_k + K_s + K_p).$$

W zastosowaniach praktycznych funkcję gęstości teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej S można przybliżyć postacią trójkątną i określić najbardziej prawdopodobny rozmiar strat w postaci wartości modalnej $f(Mo_s) = 2/s_{\max}$ lub wartości średniej \bar{s} .

Prawdopodobieństwa p_j proponuje się określać metodami eksperckimi lub statystycznymi, jeśli dostępna jest wystarczająca ilość danych pomiarowych, tj. dostępna jest informacja o liczbie zarejestrowanych przypadków wystąpienia strat w ramach poszczególnych kategorii s_j powstałych w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_j . W tym celu można wykorzystać miary zagrożenia i miary niezawodności (zawodności) systemów hydrologicznych, wspomagane wiedzą o strukturze niezawodnościowej konkretnego systemu hydrologicznego

i znajomością powiązań występujących w nim zdarzeń niepożądanych, opisanych np. metodą drzewa niesprawności i drzewa zdarzeń.

Zgodnie z przyjętą w podrozdziale 5.1 definicją, że zagrożenie jest to możliwość powstania określonych strat s , ustalona dla sytuacji powstałej po zajściu zdarzenia niepożądanego A_i w rozpatrywanym systemie hydrologicznym, zarówno poziom zagrożenia jak i związane z nim potencjalne straty proponuje się określać przy wykorzystaniu następujących wyrażeń:

- Zagrożenie strat ludzkich

$$Z(S \geq s_j / A_i) = \sum_{l=j}^{l=k} p_l(S \geq s_j / A_i) \quad (5.37)$$

Rozwinięciem wzoru (5.37) dla proponowanej dyskretyzacji strat na $k = 5$ kategorii są następujące równania

$$Z(s_1) = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5 = 1$$

$$Z(s_2) = p_2 + p_3 + p_4 + p_5$$

$$Z(s_3) = p_3 + p_4 + p_5$$

$$Z(s_4) = p_4 + p_5$$

$$Z(s_5) = p_5$$

W przypadku, gdy nieznanym jest rozkład strat ludzkich indywidualnych lub/i zbiorowych w poszczególnych kategoriach s , prawdopodobieństwa $p_j(p_l)$ proponuje się obliczać zgodnie ze wzorem (5.33) w następujący sposób

$$p_j(S \geq s_j / A_i) = \frac{n_j}{n_{A_i} \cdot |z|} \quad (5.38)$$

lub

$$p_j(S \geq s_j / A_i) = \frac{n_{A_i}(s_j)}{n_{A_i}} \quad (5.39)$$

gdzie: $p_j(S \geq s_j / A_i)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia strat ludzkich S większych lub równych s w kategorii s_j pod warunkiem wystąpienia zdarzenia niepożądanego A_i , n_j – liczba osób, które wskutek wszystkich wystąpień zdarzenia A_i doznały strat w kategorii s_j , $|z|$ – średnia liczba zagrożonych ludzi w jednym wystąpieniu zdarzenia A_i , $n_{A_i}(s_j)$ – liczba wystąpień zdarzenia A_i , dla których straty ludzkie S były większe bądź równe s w kategorii s_j , n_{A_i} – liczba wszystkich wystąpień zdarzenia A_i .

W przypadku, gdy znany jest rozkład strat w poszczególnych kategoriach s_j , możliwe jest określenie najbardziej prawdopodobnego zagrożenia wystąpienia strat $S = s_o$, jako prawdopodobieństwa wartości modalnej Mo_s , dla której funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa strat ma wartość największą.

Do oszacowań eksperckich prawdopodobieństwa p_j można wykorzystać wzór (5.39) przyjmując za n_{A_i} założoną liczbę wystąpień zdarzenia niepożądanego A_i , a za $n_{A_i}(s_j)$ liczbę wystąpień zdarzenia A_i , które w ocenie eksperta spowodują straty ludzkie S większe bądź równe s w kategorii s_j . Założona liczba n_{A_i} wystąpień zdarzenia niepożądanego A_i powinna być określona np. przez kierownika zespołu ekspertów w zależności od spodziewanego poziomu zagrożenia, a liczba $n_{A_i}(s_j)$ określona przez ekspertów. Ponieważ opinie ekspertów mogą być różniczne (zasadniczo się różnić między sobą) ostateczną (końcową) wartość prawdopodobieństwa p_j określa się jako średnią arytmetyczną z prawdopodobieństw p_{j,e_i} ($i = 1, \dots, m$) uzyskanych od m ekspertów.

▪ **Zagrożenie strat finansowych**

Jeśli znana jest funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa strat finansowych spowodowanych wystąpieniem zdarzenia niepożądanego A_i , to miarę zagrożenia $Z(S \geq s)$, że zdarzenie A_i wywoła straty finansowe S nie mniejsze niż s można wyznaczyć w następujący sposób

$$Z(S \geq s) = \int_s^{s_{\max}} f(s) ds \quad (5.40)$$

Dla funkcji gęstości w postaci trójkątnej zagrożenie wystąpienia strat nie mniejszych niż s wynosi $Z(S \geq s) = f(s)(s_{\max} - s)/2$, a najbardziej prawdopodobny rozmiar strat $Z_o = Mo_s$, dla której funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa $f(Mo_s) = 2/s_{\max}$.

W niniejszej pracy proponuje się traktowanie zagrożenia wystąpieniem strat w wyniku zajścia zdarzenia niepożądanego, jako zmiennej losowej. W wielu pracach można spotkać się jednak z przyjęciem strat, jako wielkości stałej, nielosowej. Tak na przykład w pracy Opyrchała [2005] przy określaniu ryzyka katastrofy obiektu hydrotechnicznego straty potraktowane są jako stałe straty ludności, odszkodowań i materialne. Do oceny strat ludzkich zastosowano wielkość populacji $L(t)$ zamieszkałej poniżej obiektu hydrotechnicznego, wykorzystując w tym celu następujące wyrażenie

$$L(t) = L_0 e^{t \cdot \ln(p_{\text{nat}})} \quad (5.41)$$

gdzie: L_0 – wielkość populacji w chwili początkowej, p_{nat} – przyrost naturalny, t – czas w latach.

Wartości L_0 i p_{nat} określone są na podstawie danych z roczników statystycznych.

Do oceny wartości obiektu hydrotechnicznego $W_b(t)$, w przypadku jego zniszczenia zastosowano księgową wartość początkową W_0 (co roku malejącą o wartość wskaźnika przeceny q uwzględniający amortyzację), koszty remontu W_R (w przypadku wykonania remontu lub modernizacji obiektu podnoszące wartość obiektu). Zatem wartość obiektu, przy uwzględnieniu amortyzacji po czasie t od

wybudowania obiektu i koszty remontu obiektu po czasie t_r od jego zakończenia, można przedstawić jako

$$W_b(t) = W_0(1 - tq) + W_R(1 - t, q) \quad (5.42)$$

Wartości q podane są w Rozporządzeniu Ministra Finansów [1997].

Najbardziej trudną [Opyrchał, 2005] do oceny jest zmienna w czasie wartość majątku $W_M(t)$ zatopionego w czasie katastrofy obiektu hydrotechnicznego, którą można wyznaczyć za pomocą wskaźnika wzrostu inwestycyjnego q_i podawanego w rocznikach statystycznych

$$W_M(t) = W_M(t_0)q_i^t \quad (5.43)$$

gdzie: $W_M(t)$ – wartość majątku po czasie t , $W_M(t_0)$ – wartość majątku początkowego w chwili $t_0 = 0$.

W swojej pracy Opyrchał [2005] przyjął współczynnik przyrostu naturalnego $p_{nat} = 1,0011$, wskaźnik przeceny $q = 0,025$ i wskaźnik przyrostu inwestycyjnego $q_i = 1,035$.

Szersze omówienie nowych kierunków rozwoju zagadnień związanych z bezpieczeństwem obiektów hydrotechnicznych w zakresie ich eksploatacji, informacji technicznej, modernizacji i wpływu na środowisko w ujęciu monograficznym można znaleźć w pracy pod redakcją Wintera, Kosik i Wity [Zapory ..., 2013].

W związku z koniecznością implementacji zapisów Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim, w polskiej literaturze z zakresu hydrologii i gospodarki wodnej pojawiło się szereg propozycji określania strat powodziowych. Ponieważ Polska nie miała w tym zakresie żadnych doświadczeń, rozważano możliwość przeniesienia metod opracowanych w innych krajach europejskich, mianowicie brano pod uwagę dokonania niemieckie i francuskie oraz angielsko-walijskie. W podejściu niemieckim straty materialne określone są na podstawie funkcji strat zależnych od klas użytkowania terenu i wartości majątkowych oraz straty ludności w zależności od głębokości zalania budynków mieszkalnych [Drożdżał i in., 2009]. Natomiast podejście francuskie wykorzystuje normy wrażliwości, opracowane dla terenów wiejskich i zurbanizowanych, na podstawie głębokości i czasu trwania zalewu oraz prędkości przepływu [Plans ..., 1999, Markowska i in., 2010]. Podejście angielsko-walijskie [Hall i in., 2003] zasadniczo różniło się od powyższych dwóch rozwiązań, gdyż uwzględniało w nim również statystyczną analizę prawdopodobieństwa zniszczenia obiektów systemu obrony przeciwpowodziowej w Anglii i Walii, głównie wałów przeciwpowodziowych chroniących tereny narażone na zalanie przez wezbrania rzeczne i sztormowe. W analizach rozważano różne scenariusze zniszczenia obiektów obrony przeciwpowodziowej (w zależności od wielkości wezbrania i parametrów konstrukcyjnych obiektów) oraz straty ekonomiczne i społeczne na terenach przyrzecznych i przymorskich (w zależności od kształtu terenów, prędkości, czasu, objętości i głębokości zale-

wu, zagospodarowania przestrzennego oraz charakterystyki zamieszkałej populacji ludzkiej). Ostatecznie podejście niemieckie znalazło swoje odbicie w prawodawstwie polskim z niewielkimi zmianami uwzględniającymi specyfikę terenów zagrożonych zalaniem w Polsce [Rozporządzenie ..., 2012].

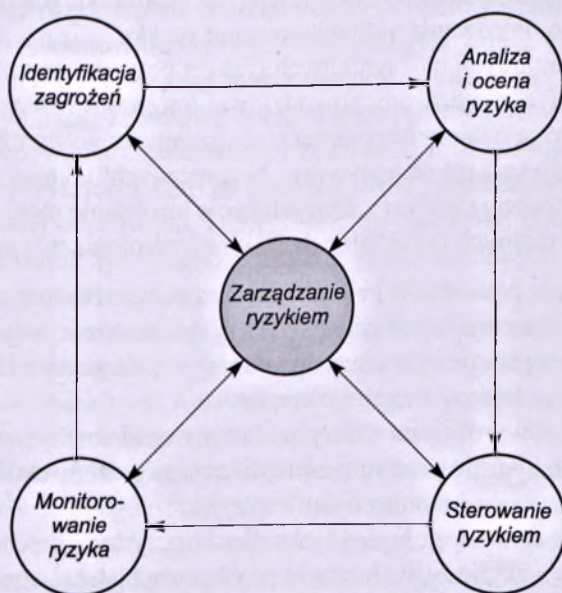
W związku z uruchomieniem prac nad Informatycznym Systemem Osłony Kraju (ISOK) [ISOK, 2010], aktualnie większość prac koncentruje się nad wyznaczaniem map terenów zalewowych (zagrożenia i ryzyka) przy wykorzystaniu numerycznych modeli terenu, narzędzi GIS i modeli hydrodynamicznych [Grzonka, 2009; Kitowski i Nieznański, 2009; Kondziołka i Radoń, 2009; Golba, 2009; Ziółkowski i in., 2011; Topiłko i in., 2012] oraz opracowywaniem programów ochrony przed powodzią [Winter i in., 2010; Bojarski i in., 2011; Program ..., 2012] jako kontynuacji prac koncepcyjnych [Nachlik i in., 2000; Radezuk i Żyszkowska, 2001] rozpoczętych w latach 2000-2001 w ramach projektów „Likwidacja Skutków Powodzi i Ograniczanie skutków powodzi w skali lokalnej” Biura Koordynacji Banku Światowego. Wszystkie powyższe prace wykonywane są w ramach implementacji Dyrektywy powodziowej zgodnie z przyjętymi metodykami [Włodarczyk i Kęsy, 2010]. Ostatnim etapem wdrażania Dyrektywy powodziowej są rozpoczęte w roku 2014 prace nad opracowaniem planów zarządzania ryzykiem powodziowym na podstawie wcześniej opracowanych metodyk IMGW-PIB [2012] i KZGW [2013].

Informację na temat strat i szkód powodziowych można znaleźć w opracowaniach i raportach Ministerstwa Spraw Wewnętrznych (MSW), Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju (MIiR), Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi (MRiRW), Głównego Urzędu Nadzoru Budowlanego (GUNB), Państwowej Inspekcji Weterynaryjnej (PIW), Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej (KZGW), Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) oraz w monografiach Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW-PIB), dotyczących powodzi w dorzeczu Wisły i Odry [Monografia ..., 1999; Monografia ..., 2011]. Dogłębna analiza strat i szkód powodziowych powstałych w wyniku wystąpienia w Polsce powodzi w 2010 roku oraz ocena strat finansowych trzech ostatnich największych powodzi w latach 1997, 2001 i 2010 została przeprowadzona w artykule Biedroń i Bogdańskiej-Warmuz [2012]. Jak wynika z artykułu „*wykonanie kompleksowej analizy szkód i strat powodziowych okazało się skomplikowanym przedsięwzięciem z uwagi na brak spójnego systemu gwarantującego gromadzenie przez jedną instytucję kompleksowych danych dotyczących szkód i strat zarówno w mieniu publicznym, jak również w majątku prywatnym*”. W większości opracowań dokonuje się analizy strat finansowych nie wchodząc szczegółowo w różnego rodzaju straty ludzkie natury psychicznej czy różnego rodzaju obrażenia fizyczne, zazwyczaj podaje się tylko straty śmiertelne, które w powodzi 2010 wynosiły 25 osób przy 70 tysiącach rodzin dotkniętych powodzią, w tym 14 tys. ewakuowanych. Straty finansowe po powodzi 2010 roku oszacowano na 12,8 mld zł, a w latach 2001 i 1997 odpowiednio 4,2 i 21,1 mld zł, według cen z 2010 roku

[Biedroń i Bogdańska-Warmuz, 2012]. Biorąc pod uwagę problemy prezentowane w artykule Biedroń i Bogdańskiej-Warmuz [2012] oraz ostatnio w artykule Koniecznego, Madeja i Siudak [2014], wydaje się konieczne wprowadzenie jednolitego, spójnego systemu gromadzenia danych o szkodach i stratach, nie tylko w majątku publicznym ale także w majątku prywatnym, choćby ze względu na racjonalne wypłacanie odszkodowań powodzianom przez firmy ubezpieczeniowe, a przede wszystkim przez państwo.

5.9. ZARZĄDZANIE RYZYKIEM

Celem nadrzędnym zarządzania ryzykiem jest zapewnienie bezpieczeństwa. Zarządzanie ryzykiem jest określane jako proces świadomego diagnozowania i sterowania ryzykiem. W praktyce zarządzanie ryzykiem oznacza szukanie możliwości jego uniknięcia bądź obniżenia. Maksymalne ograniczanie ryzyka i jak najlepsze zabezpieczenie się przed skutkami zagrożenia są podstawą zarządzania ryzykiem. Wymaga to określenia (rozpoznania) rodzajów ryzyka, z jakim ma się do czynienia, jego wielkości, ciągłej kontroli oraz bieżącej informacji pozwalającej na podejmowanie działań ograniczających ryzyko w celu minimalizacji bieżących strat. Zarządzanie ryzykiem jest więc ciągłym procesem podejmowania decyzji, wymagającym stałej identyfikacji zagrożeń, analizy i oceny ryzyka, sterowania nim i jego monitorowania (rys. 5.7).



Rys. 5.7. Proces zarządzania ryzykiem w systemie hydrologicznym
Fig. 5.7. Procedure of risk management for hydrological system

Biorąc pod uwagę przedstawione w podrozdziałach 5.2 i 5.3 rodzaje i własności ryzyka, należy wyodrębnić te rodzaje ryzyka, które występują lub mogą wystąpić w rozpatrywanym systemie hydrologicznym i stanowią potencjalną przyczynę zagrożenia. Wymaga to dokładnego określenia nie tylko wielkości ryzyka, ale również skutków, tj. strat spowodowanych jego wystąpieniem. Kolejnym etapem w zarządzaniu ryzykiem jest podejmowanie decyzji, a więc przekształcenie informacji o zidentyfikowanych zagrożeniach w informację decyzyjną, tj. liczbową informację o zidentyfikowanym ryzyku w celu jego uniknięcia lub chociaż złagodzenia. Całkowite wyeliminowanie strat jest na ogół trudne lub wręcz niemożliwe. Czym większe jest prawdopodobieństwo występowania danego zagrożenia tym trudniej jest wyeliminować związane z nim ryzyko. Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożenia i jego wielkości, zwiększa świadomość decydentów i przez to prowadzi na ogół do działań zmniejszających straty. Jest to istotny element zarządzania ryzykiem. Ostatnim etapem zarządzania ryzykiem jest określenie jego efektywności i wyciąganie wniosków na przyszłość w celu jego poprawy (tzw. działania korygujące). Wykorzystanie metod statystycznych (probabilistycznych) do oceny ryzyka i jego redukcji umożliwia poprawę metod zarządzania ryzykiem w przyszłości. Zarządzanie ryzykiem jest procesem ciągłym i wciąż doskonalonym na podstawie zdobytych doświadczeń.

Z ryzykiem hydrologicznym spotykamy się już w trakcie projektowania zabudowy doliny rzeki i obszaru zlewni. W odniesieniu natomiast do etapu eksploatacji istniejącego systemu hydrologicznego i obiektów znajdujących się w nim, dominującym jest zarządzanie ryzykiem zdarzeń ekstremalnych (rys. 3.2), co wymaga ciągłego monitorowania aktualnego stanu ryzyka:

- zdarzeń ekstremalnych maksymalnych (zakres powodzi rzecznej),
- tolerowanego (zakres ochrony powodziowej oraz zakres sterowania niżówkami), które określa poziom bezpieczeństwa uznany za wystarczający,
- akceptowalnego (zakres przepływów „bezpiecznych”), które stanowi poziom ryzyka, jaki akceptują wszyscy, których życie lub mienie mogą być zagrożone,
- zdarzeń ekstremalnych minimalnych (zakres hydrologicznej suszy rzecznej).

Ponadto, w celu prawidłowej eksploatacji systemu rzeczno określają się ryzyko rezydualne stanowiące różnicę między ryzykiem rzeczywistym a ryzykiem tolerowanym. Zarządzanie ryzykiem rezydualnym polega na utrzymaniu ryzyka na poziomie ryzyka tolerowanego.

Na rysunku 5.7 wyróżniono cztery podstawowe elementy zarządzania ryzykiem w systemach hydrologicznych: identyfikacja zagrożeń, analiza i ocena ryzyka, sterowanie ryzykiem i monitorowanie ryzyka.

Identyfikacja zagrożeń polega na określeniu przyczyn potencjalnych zagrożeń, jakie mogą wystąpić w systemie hydrologicznym, zarówno w skali mikro, tj. zagrożeń zachodzących w poszczególnych elementach tworzących system hydrologiczny jak i w skali makro, czyli dotyczących zlewni rzecznej, jako całości.

Na tym etapie trzeba określić możliwe scenariusze następstw zajścia zdarzeń niepożądanych i konsekwencje, jakie one mogą wywołać w zlewni rzecznej. Mechanizmy powstawania zagrożeń ekstremalnymi zdarzeniami hydrologicznymi opisano w rozdziale 3, zaś metody ich identyfikacji w rozdziale 4.

Analizie i ocenie jakościowej i ilościowej ryzyka hydrologicznego poświęcony jest w całości rozdział 5. Analiza i ocena ryzyka powinna dotyczyć określania prawdopodobieństw zajścia zdarzeń niepożądanych w systemie hydrologicznym oraz prawdopodobieństwa strat, jakie te zdarzenia mogą spowodować. Powinien być ustalony poziom zagrożenia i związany z nim poziom ryzyka rzeczywistego oraz poziomy ryzyka tolerowanego, akceptowanego i rezydualnego.

Sterowanie ryzykiem polega na przekształceniu informacji o zidentyfikowanym ryzyku w informację decyzyjną oraz na zaplanowaniu działań mających na celu uniknięcie, a przynajmniej złagodzenie, skutków występujących zagrożeń w systemie hydrologicznym. Mogą być tutaj zastosowane różne sposoby postępowania polegające na unikaniu ryzyka, jego redukcji, zatrzymaniu ryzyka i transferze ryzyka.

Unikanie ryzyka realizuje się przede wszystkim poprzez uwzględnienie w planach zagospodarowania przestrzennego terenów szczególnie narażonych na skutki występowania meteorologicznych i hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych. Nie do przecenienia jest tutaj stosowne prawodawstwo zezwalające bądź zabraniające prowadzenia inwestycji na obszarach potencjalnie zagrożonych wystąpieniem zdarzeń niepożądanych – powodzi [Ustawa Prawo wodne, 2001]. Ten sposób sterowania ryzykiem ma charakter długookresowy, bierny i zazwyczaj nie wymaga dużych nakładów finansowych. Nie pozwala jednak chronić już istniejącej infrastruktury przed ewentualnymi stratami. Dodatkowo, postęp cywilizacyjny będzie wymuszał zabudowę coraz większych obszarów, na których dziś, w wyniku występowania ekstremalnych zdarzeń hydrologicznych ponoszone są małe straty, a w przyszłości, jako na terenach silnie zurbanizowanych straty będą znacznie dotkliwiej odczuwane. Dlatego też, na obszarach potencjalnie narażonych na występowanie hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych powinno się prowadzić politykę racjonalnego zagospodarowania [Rucińska i in., 2012].

Redukcja ryzyka w systemach hydrologicznych polega przede wszystkim na wzmocnieniu technicznej ochrony przed występowaniem groźnych zjawisk naturalnych, w postaci ekstremalnych wezbrań powodujących powódzie. Budowa różnego rodzaju obiektów hydrotechnicznych, stosowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i bardziej wytrzymałych materiałów przy budowie obiektów lądowych, tworzenie systemów wczesnego ostrzegania i reagowania wiąże się z dużymi nakładami finansowymi. Ten sposób sterowania ryzykiem stanowi aktywną postawę wobec ryzyka, jednak jest bardziej kosztowny niż unikanie ryzyka. W przypadku występowania zagrożeń o charakterze ekstremalnym również nie zabezpiecza w pełni przed stratami natury materialnej, ale w dużej mierze obniża straty ludzkie.

Zatrzymanie ryzyka w systemach hydrologicznych polega na niedopuszczeniu do powstania zagrożeń ekstremalnych zdarzeń hydrologicznych. Są to przede wszystkim wszelkiego rodzaju działania na rzecz kształtowania i rozwoju retencji zlewni jak również działania zmierzające do zwiększenia retencyjności dolinowej rzek. Ten sposób sterowania ryzykiem jest procesem długotrwałym, kosztownym i wyraża aktywną postawę wobec ryzyka.

Transfer ryzyka jest formą sterowania ryzykiem o charakterze finansowym. Nie wchodząc w zawile meandry rynku ubezpieczeń, które zarządzającym ryzykiem systemów hydrologicznych mogą sprawiać pewne trudności i bez pomocy specjalistów w tej dziedzinie nie będą mogli sobie poradzić, można generalnie stwierdzić, że zarówno osoby fizyczne jak i osoby prawne mogą przenieść ryzyko meteorologicznych i hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych zazwyczaj o charakterze katastroficznym na zakłady ubezpieczeniowe, wykupując odpowiednie polisy ubezpieczeniowe. Zazwyczaj zakłady ubezpieczeniowe same nie są w stanie w pełni zrekompensować powstałych skód, szczególnie w przypadku zdarzeń katastroficznymi, dlatego często transfer ryzyka dokonywany jest na rynek kapitałowy, który charakteryzuje się znacznie większą pojemnością finansową. Na przykład w USA dokonuje się transferu na giełdę CATEX (*Catastrophe Risk Exchange*), gdzie rozliczenia dokonuje się na podstawie amerykańskich indeksów strat katastroficznymi USAA czy PCS lub poprzez wykup państwowych obligacji katastroficznymi, pozwalających na podział ryzyka o ekstremalnie dużych stratach na dużą liczbę drobnych inwestorów [Preś, 2007]. W USA wprowadzono również subsydiowane przez rząd ubezpieczenia od powodzi – National Flood Insurance Program – określane na podstawie oceny indywidualnego ryzyka zainteresowanych [Magnuszewski, 2013]. W warunkach polskich, ryzyko powstania strat rekompensowane jest z celowych funduszy państwowych, przeznaczonych na likwidację skutków zdarzeń ekstremalnych.

Podstawowym zadaniem sterowania ryzykiem jest utrzymanie ryzyka na poziomie ryzyka tolerowanego, przy istniejących ograniczeniach społecznych i ekonomicznych.

Monitorowanie ryzyka (rys. 5.7), ogólnie rzecz biorąc, polega na stworzeniu mechanizmów kontroli statusu zagrożeń oraz działań podjętych w ramach procesu sterowania ryzykiem. Skutki podjętych działań są sprawdzane i oceniane w tzw. analizie *ex post*. W przypadku błędnych decyzji, proces zarządzania ryzykiem powinien być na nowo uformowany. Natomiast użyte metody, które zapewniły sukces, powinny być w dalszym ciągu wykorzystywane. Jednym z elementów monitorowania ryzyka jest hydrologiczno-meteorologiczna sieć pomiarowo-obszernościowa, która pozwala na ciągłe monitorowanie ekstremalnych zjawisk naturalnych i wynikających z nich zagrożeń. Również służba technicznej kontroli zapór (TKZ) ma za zadanie stałą kontrolę stanu technicznego obiektów hydrotechnicznych, wchodzących w skład systemu hydrologicznego. Zarówno sieć po-

miarowo-obserwacyjna, jak i służba TKZ są przykładem podejścia *ex ante* do operacyjnego zarządzania ryzykiem. Stanowią, bowiem podstawę do proaktywnej koncepcji zarządzania ryzykiem hydrologicznych i meteorologicznych zdarzeń ekstremalnych, opartej na uprzedzeniu powstania potencjalnych strat i znaczącej ich redukcji w systemie hydrologicznym. Reasumując, monitorowanie ryzyka zdarzeń ekstremalnych powinno być realizowane w trzech podstawowych płaszczyznach: *zagrożenie*, tj. wielkość i zasięg oddziaływania zdarzenia, *ekspozycja*, tj. zagospodarowanie obszaru będącego w zasięgu oddziaływania zdarzenia oraz *wrażliwość*, tj. odporność na wystąpienie zdarzenia ludzi i obiektów znajdujących się w jego zasięgu. Te trzy płaszczyzny zgodnie z obowiązującą w Polsce Dyrektywą 2007/60/WE w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim, są często określane mianem strategii ograniczania skutków powodzi, nazywanymi odpowiednio strategią odsunięcia powodzi od ludzi, strategią odsunięcia ludzi od powodzi i strategią umiejętności życia z powodzią.

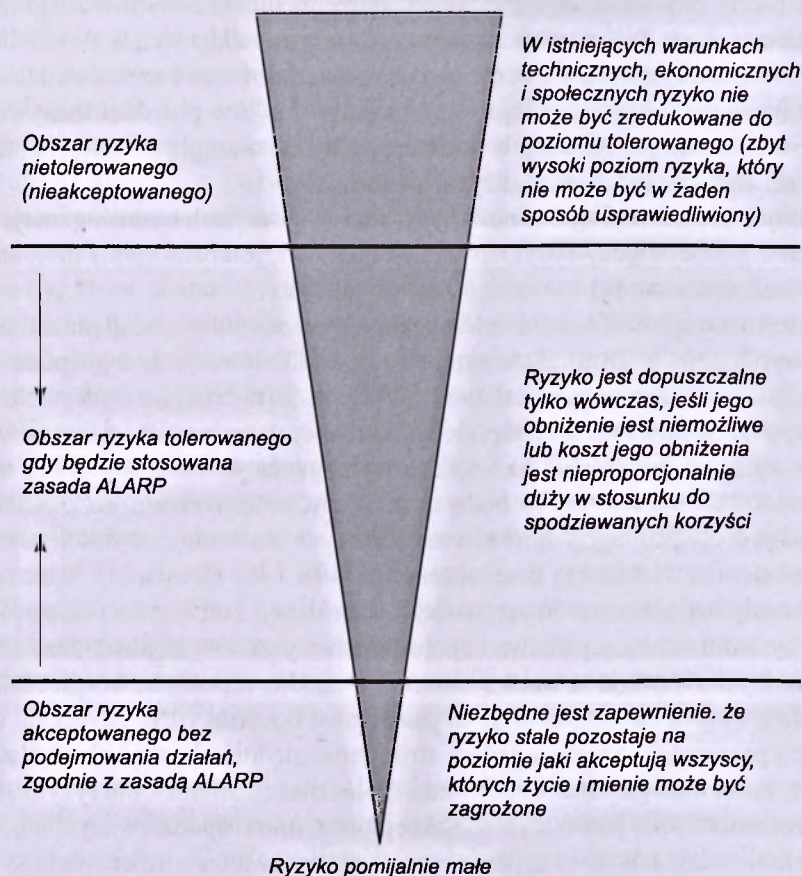
Istotnym elementem zarządzania ryzykiem w systemach hydrologicznych jest określenie granic między ryzykiem akceptowanym, tolerowanym i nietolerowanym (nieakceptowanym).

Kryteria akceptowalności i tolerancji ryzyka powinny uwzględniać wymagania wynikające z uwarunkowań społecznych, kulturowych i gospodarczych Polski. Istotnym elementem jest tutaj istniejąca infrastruktura hydrotechniczna i zagospodarowanie przestrzenne zlewni rzecznej oraz sposób jej użytkowania. Należy wyraźnie podkreślić, że większe wymagania stawiane kryteriom akceptowalności i tolerancji ryzyka będą skutkowały zwiększeniem bezpieczeństwa systemu hydrologicznego i obiektów znajdujących się w nim, co w konsekwencji przynosi się na zwiększenie bezpieczeństwa ludzi i ich mienia, ale jednocześnie powodowały będą większe koszty stałej modernizacji i utrzymania całego istniejącego systemu ochrony państwa i społeczeństwa przed występowaniem zdarzeń ekstremalnych. Kryteria te muszą zatem być zgodne z polityką bezpieczeństwa, prowadzoną przez najwyższe władze państwowe i powinny być określone w stosownych przepisach. Muszą z jednej strony uwzględniać koszty i korzyści z redukcji ryzyka, z drugiej zaś oczekiwania społeczne, co do poziomu ryzyka, którego społeczeństwo nie jest w stanie zaakceptować mimo spodziewanych korzyści.

W wielu dziedzinach do określania ryzyka akceptowanego, tolerowanego i nietolerowanego (nieakceptowanego) wykorzystywana jest, wspomniana już, zasada ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), tj. wyboru ryzyka tak niskiego, jak to jest praktycznie uzasadnione (wykonalne, możliwe) [Borysiewicz i Markowski, 2002; Fiedler i in., 2007; Szymanek, 2008].

W zasadzie ALARP przyjmuje się, że zakres ryzyka dzieli się na trzy obszary: obszar ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego), obszar ryzyka tolerowanego i obszar ryzyka akceptowanego (rys. 5.8). W obszarze ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego) w istniejących warunkach technicznych, ekonomicz-

nych i społecznych ryzyko nie może być zredukowane do poziomu tolerowanego (dopuszczalnego). W obszarze ryzyka tolerowanego ryzyko jest dopuszczalne tylko wówczas, jeżeli jego obniżenie jest niemożliwe lub koszt jego obniżenia jest nieproporcjonalnie duży w stosunku do spodziewanych korzyści, tzn. koszt jego unikania, redukcji, zatrzymania i transferu przewyższa oczekiwane korzyści z jego obniżenia. W obszarze ryzyka akceptowanego niezbędne jest zapewnienie, że ryzyko stale pozostaje na poziomie jaki akceptują wszyscy, których życie lub mienie mogą być zagrożone.



Rys. 5.8. Zasada ALARP (na podstawie rysunku Borysiewicza i Markowskiego [2002])

Fig. 5.8. ALARP principle (on the basis of figure by Borysiewicz and Markowski [2002])

Stosując zasadę ALARP w odniesieniu do systemów hydrologicznych, ustalenie granic między poszczególnymi obszarami ryzyka powinno być wykonane dla poszczególnych systemów hydrologicznych przy uwzględnieniu istniejącej lub projektowanej zabudowy i użytkowania doliny rzeki i obszaru zlewni. Granice między powyższymi trzema obszarami ryzyka mogą być rozważane pod wzglę-

dem występujących zagrożeń hydrologicznych lub strat jakie mogą potencjalnie zaistnieć w wyniku wystąpienia zdarzeń ekstremalnych. Rozważając obszary ryzyka pod względem potencjalnych strat, uwzględniając zaproponowane wartości progowe stref zagrożeń hydrologicznych w korycie rzeki (rys. 3.2), można przyjąć następujące granice obszarów ryzyka:

- obszar ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego) jako zakres występowania zdarzeń ekstremalnych maksymalnych między górnym progiem równym Maksymalnemu Wiarygodnemu Wezbraniu (MWW) a dolnym progiem równym przepływowi ochrony powodziowej (Q_{op}), ustalonym indywidualnie dla konkretnego odcinka rzeki, a dla zdarzeń ekstremalnych minimalnych jako zakres występowania tych zdarzeń między górnym progiem równym przepływowi nienaruszalnemu (Q_n), ustalonym indywidualnie dla konkretnego odcinka rzeki, a dolnym równym zero.
- obszar ryzyka tolerowanego jako zakres ochrony powodziowej (sterowania wezbraniem) między górnym progiem równym przepływowi ochrony powodziowej (Q_{op}), określonym indywidualnie dla konkretnego odcinka rzeki, a dolnym progiem, równym przepływowi dozwolonemu (Q_{doz}), tj. maksymalnemu przepływowi, który nie powoduje szkód powodziowych, oraz zakres sterowania niżówkami między górnym progiem, równym przepływowi granicznemu niżówki, ustalonym przy uwzględnieniu kryterium hydrologicznego, jako wartość przepływu WNQ , a dolnym progiem równym przepływowi nienaruszalnemu (Q_n), określonym indywidualnie dla konkretnego odcinka rzeki.
- obszar ryzyka akceptowanego jako zakres przepływów „bezpiecznych” między górnym progiem równym przepływowi dozwolonemu (Q_{doz}), a dolnym równym przepływowi granicznemu niżówki WNQ , tj. wartości największej rocznej z przepływów minimalnych rocznych z wieloletniego okresu obserwacji $WNQ = \max(NQ_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ – liczba lat obserwacji.

Dla przepływów ekstremalnych maksymalnych w obszarze ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego) miarą zagrożenia bezpieczeństwa systemu hydrologicznego wystąpieniem zdarzenia niepożądanego, uwzględniającą infrastrukturę hydrotechniczną może być wskaźnik zagrożenia bezpieczeństwa WZB w postaci

$$WZB = \frac{MWW - Q_m}{MWW} \quad (5.44)$$

gdzie: Q_m – przepływ miarodajny, tzn. przepływ, na który zostały zaprojektowane obiekty hydrotechniczne, MWW – Maksymalne Wiarygodne Wezbranie, które jak zdefiniowano w podrozdz. 3.1 jest największym wezbraniem, które może wystąpić w ekstremalnych warunkach sprzyjających jednoczesnemu wystąpieniu ekstremalnie wysokiego opadu, tj. Maksymalnego Wiarygodnego Opadu (MWO) i ekstremalnie korzystnych warunków jego spływu na obszarze zlewni, tzn. przy najmniejszych stratach wody

zależnych od lokalnych warunków fizjograficznych i sposobu zagospodarowania zlewni, a zatem stanowi górne ograniczenie wezbrania jakie może wystąpić na rzece, na której zlewnię spadł opad o wysokości MWO , definiowany jako teoretycznie największy opad o określonym czasie trwania (minuty, godzina, kilka godzin, doba, wielokrotność doby itp.), którego wystąpienie jest fizycznie możliwe na obszarze o danej wielkości, w danych warunkach geograficznych i w określonej porze roku, a zatem dotyczy górnego limitu wysokości opadu określanego na podstawie charakterystyk fizycznych mechanizmu tworzenia się opadów [Ozga-Zielińska i Ozga-Zieliński, 2003; Ozga-Zielińska i in., 2003].

W obszarze ryzyka tolerowanego dla przepływów ekstremalnych maksymalnych miarą bezpieczeństwa systemu hydrologicznego uwzględniającą infrastrukturę hydrotechniczną może być wskaźnik gwarancji bezpieczeństwa WGB w postaci

$$WGB = \frac{Q_m}{MWW} \quad (5.45)$$

gdzie: wszystkie oznaczenia jak we wzorze (5.44).

Natomiast miarą zagrożenia powodziowego wskaźnik WZP w postaci

$$WZP = \frac{MWW - Q_{doz}}{MWW} \quad (5.46)$$

gdzie: Q_{doz} – przepływ dozwolony.

Uzupełnieniem wiedzy, w zakresie ryzyka tolerowanego, o możliwych zagrożeniach powodziowych, na podstawie dotychczas zaobserwowanych maksymalnych wartości przepływów jest wskaźnik komplementarnej powodziogenności WKP w postaci

$$WKP = \frac{MWW - WWQ}{MWW} \quad (5.47)$$

gdzie: WWQ – największy obserwowany przepływ w wieloleciu.

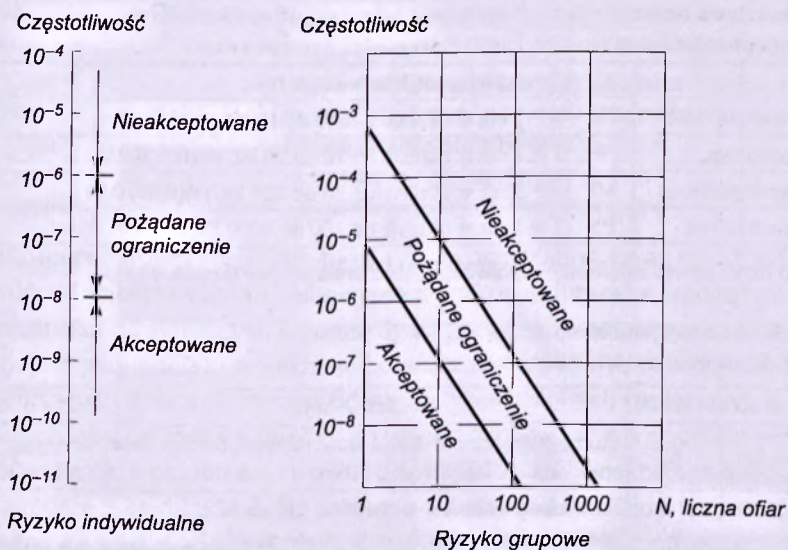
Wskaźnik WKP określa stopień potencjalnej możliwości przekroczenia największego dotychczas obserwowanego przepływu.

Powyższe wskaźniki pozwalają oceniać rzeczywisty stopień bezpieczeństwa lub zagrożenia systemu hydrologicznego, co ma istotne znaczenie w ocenie skuteczności ochrony przeciwpowodziowej oraz zapewnienia bezpieczeństwa na obszarach przyrzecznych. Przyjmując Q_m jako przepływ, na który zaprojektowano ochronę przeciwpowodziową, można z zależności (5.45) określić stopień gwarancji bezpieczeństwa przed powodzią.

Poziom zagrożenia powodziowego i związany z nim poziom ryzyka i bezpieczeństwa systemu hydrologicznego nie wszędzie jest jednakowy. Wartość przepły-

wu odpowiadającego *MWW* można uznać za uzasadnioną fizycznie górną granicę zagrożenia powodziowego i górną granicę obszaru ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego). Natomiast w obszarze ryzyka tolerowanego należy określać ryzyko dla stref zagrożenia powodziowego i związanych z nimi stref ochrony powodziowej opisanych szczegółowo w pracy Ozga-Zielińskiej i Ozga-Zielińskiego [2003].

Z punktu widzenia strat, ryzyko utraty życia przez jedną osobę na tysiąc w ciągu roku jest największą wartością możliwą do zaakceptowania w wielu krajach europejskich. Zatem poziom ryzyka równy $1 \cdot 10^{-3}$ na rok jest górną granicą dopuszczalności ryzyka. Z analiz ryzyka prowadzonych dla poważnych awarii przemysłowych wynika, że poziom ryzyka, który mógłby zdobyć szerszą akceptację społeczną, wynosi $1 \cdot 10^{-6}$ i na przykład w Holandii maksymalne akceptowane ryzyko indywidualne wynosi $1 \cdot 10^{-6}$, a grupowe $1 \cdot 10^{-5}$ (rys. 5.9) [Borysiewicz i Markowski, 2002]. Podaną częstotliwości $1 \cdot 10^{-6}$ na rysunku 5.9 dla obszaru indywidualnego ryzyka akceptowanego (łącznie z pożądanym ograniczeniem) należy interpretować jako prawdopodobieństwo utraty życia jednego człowieka na milion w ciągu roku, a nie jako częstotliwość wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Natomiast dla ryzyka grupowego śmierć np. 10 ofiar w ciągu roku na 10 milionów ludzi jest w obszarze ryzyka akceptowanego, a 10 ofiar na 10 tys. ludzi jest ryzykiem nieakceptowanym.



Rys. 5.9. Kryteria ryzyka stosowane w Holandii za Borysiewiczem i Markowskim [2002]

Fig. 5.9. Risk criteria employed in the Netherlands by Borysiewicz and Markowski [2002]

Aktualnie forsowana wartość ryzyka $1 \cdot 10^{-8}$ jest prawie niemożliwa do osiągnięcia nawet przy zachowaniu najwyższych standardów technicznych. Podobne wartości ryzyka akceptowanego są podawane w normatywach krajów europej-

skich w transporcie [Szymanek, 2008]. Zgodnie z wytycznymi brytyjskiej Agencji Energii Atomowej (UK AEA) przyjęte maksymalne poziomy ryzyka dla zasady ALARP wynoszą dla ryzyka tolerowanego indywidualnego $1 \cdot 10^{-3}$ na rok, grupowego $1 \cdot 10^{-5}$ na rok, a akceptowanego $1 \cdot 10^{-6}$ na rok.

Z punktu widzenia częstości (prawdopodobieństwa) występowania zagrożeń granice między obszarami ryzyka akceptowanego, tolerowanego i nietolerowanego (nieakceptowanego) zgodnie z zasadą ALARP przyjmowane są w inny sposób dla różnych gałęzi gospodarki, na przykład poziomy ryzyka dla potrzeb bezpieczeństwa w górnictwie czy zbiorowego zaopatrzenia w wodę można znaleźć odpowiednio w pracach Lebeckiego [2012] i Raka i in. [2012].

Dla potrzeb bezpieczeństwa systemów hydrologicznych, wykorzystując doświadczenia w górnictwie i zbiorowym zaopatrzeniu w wodę, proponuje się ustalenie zgodnie z zasadą ALARP trzech obszarów (poziomów) ryzyka, tj. ryzyka nietolerowanego (nieakceptowalnego), tolerowanego (w tym niepożądanego i kontrolowanego) i akceptowanego przyjmując skalę prawdopodobieństwa, skalę kategorii strat i szkód (skutków, konsekwencji) i macierz ryzyka podane odpowiednio w tabelach 5.8–5.11.

Tabela 5.8. Skala kategorii prawdopodobieństwa (częstości wystąpienia zdarzenia)

Table 5.8. Scale of probability (frequency of event occurrence)

Jakościowa ocena prawdopodobieństwa		Ilościowa ocena prawdopodobieństwa (częstości występowania)		Waga punktowa
Częste	C	$T =$ częściej niż 1 raz w ciągu roku		5
Bardzo prawdopodobne	BP	$T =$ 1 raz w okresie 1 roku do 10 lat, $p \in (1, 0,1 >$		4
Prawdopodobne	P	$T =$ 1 raz w okresie od 10 do 20 lat, $p \in (0,1, 0,05 >$		3
Mało prawdopodobne	MP	$T =$ 1 raz w okresie od 20 do 100 lat, $p \in (0,05, 0,01 >$		2
Prawie niemożliwe	PN	$T =$ 1 raz w okresie od 100 do 1000 lat, $p < 0,01$		1

T – średni okres powtarzalności, p – prawdopodobieństwo przewyższenia, $T=1/p$.

Tabela 5.9. Skala kategorii strat i szkód

Table 5.9. Scale of losses and damages

Kategoria strat i szkód		Konsekwencje	Waga punktowa
Katastrofalne	K	Straty grupowe z ofiarami śmiertelnymi, bardzo duże straty materialne powyżej 10^6 euro	5
Wysokie	W	Straty indywidualne śmiertelne lub ciężkie grupowe bez ofiar śmiertelnych, duże straty materialne w granicach 10^5 – 10^6 euro	4
Znaczące	Z	Straty ciężkie indywidualne lub lekkie grupowe, straty materialne w granicach 10^4 – 10^5 euro	3
Małe	M	Straty lekkie indywidualne i brak strat grupowych, niewielkie straty materialne w granicach 10^3 – 10^4 euro	2
Pomijalne	PO	Brak strat ludzkich, straty materialne poniżej 1000 euro	1

Tabela 5.10. Matryca ryzyka

Table 5.10. Risk matrix

Kategoria prawdopodobieństwa	Kategoria strat				
	K = 5	W = 4	Z = 3	M = 2	PO = 1
	Poziomy ryzyka				
C = 5	C·K=25, RNT	C·W=20, RNT	C·Z=15, RTN	C·M=10, RTK	C·PO=5, RTK
BP = 4	BP·K=20, RNT	BP·W=16, RTN	BP·Z=12, RTK	BP·M=8, RTK	BP·PO=4, RA
P = 3	P·K=15, RTN	P·W=12, RTN	P·Z=9, RTK	P·M=6, RTK	P·PO=3, RA
MP = 2	MP·K=10, RTK	MP·W=8, RTK	MP·Z=6, RTK	MP·M=4, RA	MP·PO=2, RA
PN = 1	PN·K=5, RTK	PN·W=4, RA	PN·Z=3, RA	PN·M=2, RA	PN·PO=1, RA

Tabela 5.11. Poziomy ryzyka wynikające z zasady ALARP

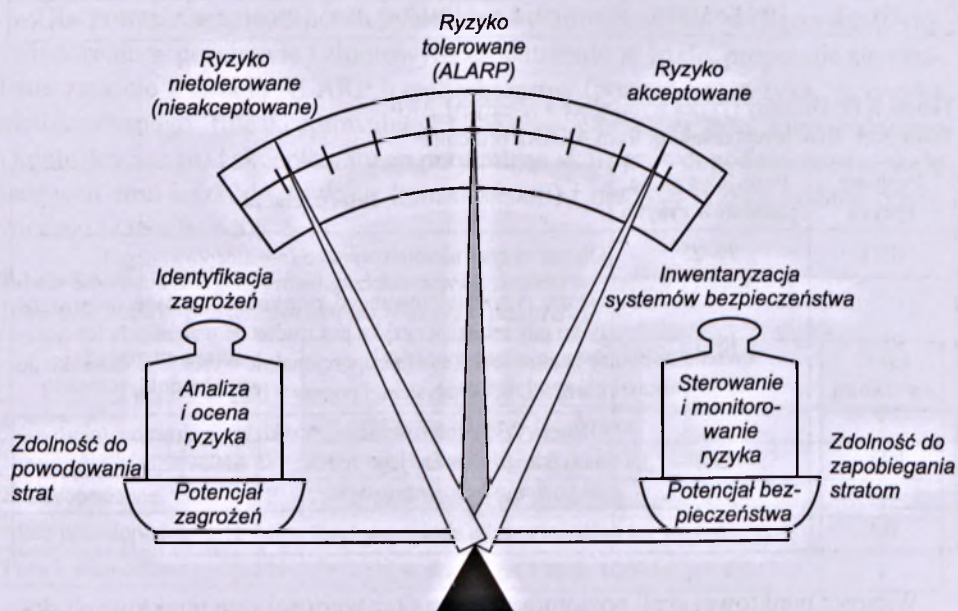
Table 5.11. Risk levels resulting from ALARP principle

Poziomy ryzyka	Punktowa skala poziomów ryzyka	Interpretacja
RNT	20–25	Obszar ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego)
RTN	15–19	Obszar ryzyka tolerowanego, ryzyko niepożądane, tolerowane tylko gdy redukcja ryzyka jest trudna do osiągnięcia lub koszty jego redukcji są nieproporcjonalnie wysokie w stosunku do korzyści, tj. do uzyskanej poprawy bezpieczeństwa
RTK	5–14	Obszar ryzyka tolerowanego, ryzyko kontrolowane, tolerowane tylko, gdy koszty jego redukcji są adekwatne do założonego poziomu bezpieczeństwa
RA	1–4	Obszar ryzyka akceptowanego

Wartości punktowej skali poziomów ryzyka oraz wartości wag punktowych skali prawdopodobieństwa i skali kategorii strat i szkód są umowne i mogą być przyjęte w zależności od aktualnych uwarunkowań prawnych, społecznych i ekonomicznych, tj. przyjętej polityki w zakresie bezpieczeństwa, w tym ochrony środowiska przyrodniczego i dóbr kultury oraz od aprobaty zagrożonych społeczności.

W zależności od różnicy między poziomem ryzyka, wynikającym z potencjalnego zagrożenia, a poziomem ryzyka nietolerowanego (nieakceptowanego) przyjętym zgodnie z zasadą ALARP, powinno się stosować metody jego szacowania adekwatne do wielkości zagrożeń. Im różnica poziomów jest mniejsza, tym wybrana metoda szacowania ryzyka powinna być dokładniejsza. W przypadkach dużych zagrożeń i małych różnic powinno się stosować metody ilościowe np. drzewa zdarzeń (podrozdział 5.4.2). Przy znacznej różnicy między niedopuszczalnym poziomem ryzyka, a poziomem ryzyka, wynikającym z potencjalnego zagrożenia i przy małych zagrożeniach można stosować metody jakościowe wykorzystujące np. matryce ryzyka.

Na zakończenie tego rozdziału należy wyraźnie podkreślić, że proces zarządzania ryzykiem jest doбором skutecznych środków zapewniających bezpieczeństwo i ochronę przed zidentyfikowanymi zagrożeniami, a więc stanowi zdolność do zapobiegania stratom, która określana jest mianem potencjału bezpieczeństwa. Potencjał ten musi równoważyć zdolność systemu hydrologicznego do powodowania strat, która określana jest, jako potencjał zagrożeń. A zatem, zarządzanie ryzykiem, zgodnie z zasadą ALARP, powinno co najmniej utrzymywać równowagę obu potencjałów w obszarze ryzyka tolerowanego przedstawioną na poniższym rysunku:



Rys. 5.10. Równowaga potencjału zagrożeń i bezpieczeństwa systemu hydrologicznego (na podstawie rysunku Borysiewicza i Markowskiego [2002])

Fig. 5.10. Balance of hazard and safety potentials of hydrological system (on the basis of figure by Borysiewicz and Markowski [2002])

Rozwiązaniem idealnym jest takie zarządzanie ryzykiem, które pozwala na utrzymanie wskazówki równowagi potencjału bezpieczeństwa i potencjału zagrożeń (rys. 5.10) w obszarze ryzyka akceptowanego. W przeciwnym razie, w procesie zarządzania ryzykiem należy podjąć odpowiednie działania o charakterze interwencyjnym (np. budowa obiektów technicznej ochrony przeciwpowodziowej, zabezpieczenie budynków przed zalaniem, etc.), planistycznym (np. techniki planowania przestrzennego, plany ewakuacji) lub informacyjno-edukacyjnym oraz należy wprowadzić odpowiednie instrumenty prawne (przepisy zawarte w prawie wodnym dotyczące gospodarowania wodami, planowania przestrzennego lub

ochrony środowiska) i ekonomiczne (system zachęt i sankcji finansowych), które pozwolą na ograniczenie strat oraz doprowadzą do wzrostu bezpieczeństwa życia ludzkiego, środowiska przyrodniczego, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej.

6. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

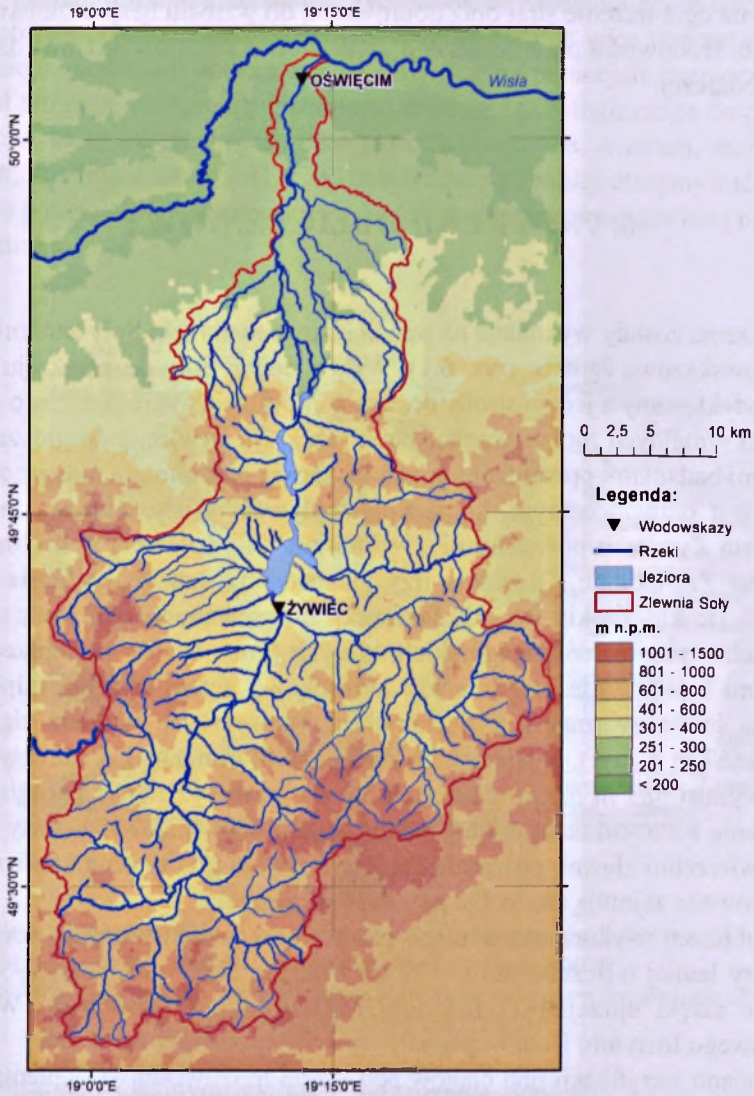
Obliczenia zostały wykonane na przykładzie zlewni rzeki Soły zamkniętej stacją wodowskazową Żywiec (rys. 6.1). Wybór zlewni Soły do przekroju Żywiec został podyktowany z jednej strony dostępną informacją hydrologiczną o przepływach maksymalnych zaobserwowanych w przekroju Żywiec, z drugiej zaś wcześniejszymi badaniami prowadzonymi dla tej zlewni przez autora niniejszej pracy.

Soła jest prawobrzeżnym, karpackim dopływem Wisły. Zlewnia zamknięta przekrojem Żywiec o powierzchni $A = 785 \text{ km}^2$ jest położona w fliszowej części Karpat Zachodnich. Obejmuje trzy jednostki fizycznogeograficzne: Beskid Żywiecki, Beskid Śląski i Beskid Makowski. Zlewnia zbudowana jest z utworów fliszowych – piaskowców magurskich, których grube ławice są poprzedzielane warstwami łupków. Sieć rzeczna jest stosunkowo gęsta. Warunki odpływu ze zlewni są ściśle związane z jej hipsometrią. Najwyższym punktem zlewni jest Pilsko (1557 m n.p.m.), a najniższym Żywiec (342 m n.p.m.), średnia wysokość zlewni wynosi 683 m n.p.m. Zlewnia Soły do przekroju zamykającego Żywiec jest zlewnią leśno-rolniczą w niewielkim stopniu zurbanizowaną. Lasy zajmują 55% powierzchni zlewni, pozostałą część pokrywają grunty orne i łąki. Obszary zurbanizowane zajmują około 1% powierzchni zlewni.

Do obliczeń wykorzystano ciągi przepływów maksymalnych pory zimowej i pory letniej o liczebności $t = 57$ lat z okresu obserwacyjnego 1956–2012, uzyskane dzięki uprzejmości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego.

Dokonano weryfikacji obu ciągów pod kątem możliwości wystąpienia w nich niejednorodności genetycznej i statystycznej. Analizę niejednorodności wykonano zgodnie z procedurą podaną przez Ozga-Zielińskiego [1999] wykorzystaną w Zasadach obliczania przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia [Zasady ..., 2001; Guidelines ..., 2005]. Zarówno ciąg przepływów maksymalnych pory zimowej jak i pory letniej zostały zidentyfikowane jako ciągi aprioryczne genetyczne jednorodne oraz jednorodnie statystycznie.

Obliczenie przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia wykonano Metodą Alternatywy Zdarzeń (MAZ) [Ozga-Zielińska i in., 1999; Banasik i Byczkowski, 2011; Banasik i in., 2012].



Rys. 6.1. Zlewnia Soły
Fig. 6.1. Soła River catchment

Maksymalne Wiarygodne Wezbranie (*MWW*) wywołane Maksymalnym Wiarygodnym Opadem (*MWO*) dla przekroju Żywiec na Sole zostało określone zgodnie z metodyką podaną w pracach [Ozga-Zielińska i in., 2003, 2011].

Przeptyw kulminacyjny *MWW* oraz wybrane charakterystyki przepływów dla Soły w przekroju Żywiec z okresu obserwacyjnego 1956-2012 podano w tabeli 6.1.

Przepływ graniczny Q_g wezbrania, które może spowodować straty powodziowe, przyjęto zgodnie z kryterium gospodarczym dla potrzeb ochrony przeciwpowodziowej na poziomie przepływu dozwolonego Q_{doz} , tj. najwyższej wartości przepływu nie powodującego jeszcze szkód powodziowych, która jest określana na podstawie sytuacji topograficznej doliny rzecznej i stopnia jej zagospodarowania, bądź może być przyjęta w sposób przybliżony jako SWQ lub $Q_{\max, p=50\%}$ [Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1994, 1997].

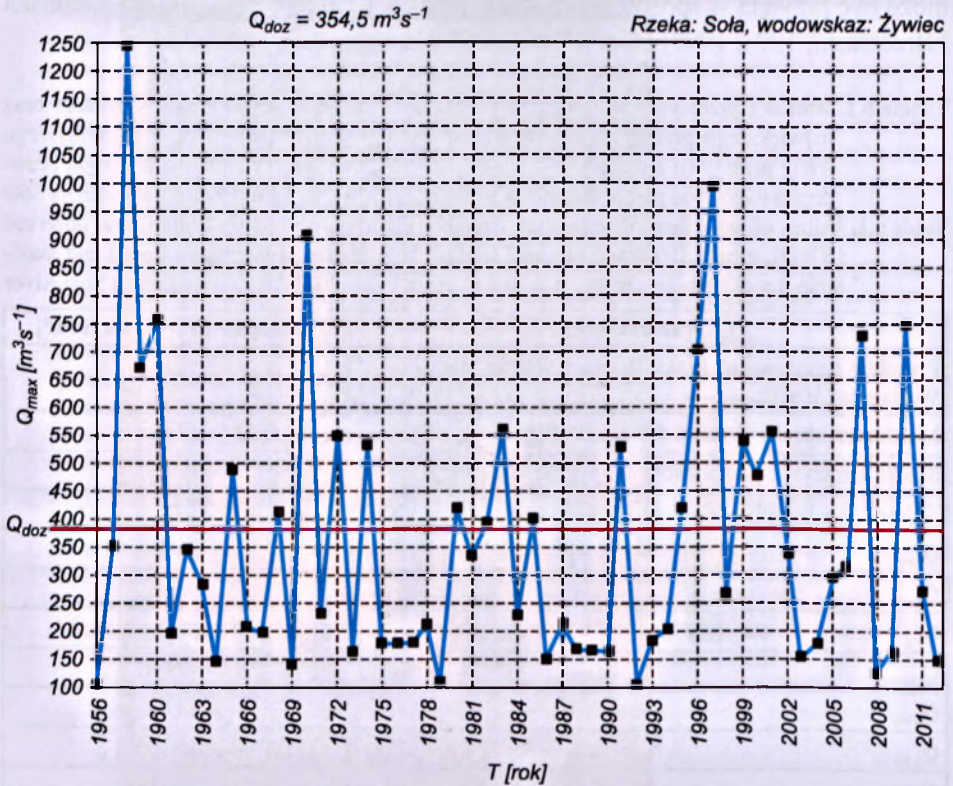
Tabela 6.1. Wartości przepływu kulminacyjnego Maksymalnego Wiarygodnego Wezbrania oraz największego przepływu zaobserwowanego WWQ , średniego SWQ i najmniejszego NWQ przepływu z przepływów maksymalnych oraz przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w wieloleciu 1956–2012 dla przekroju Żywiec na Sole

Table 6.1. Values of peak flow of Maximum Credible Flood as well as maximum flow observed (WWQ), mean (SWQ) and minimal (NWQ) flow of annual maximum floods and maximum floods with T-year return period in years 1956–2012 for Żywiec post in Soła River

Charakterystyka	Natężenie przepływu [m^3s^{-1}]
Przepływ kulminacyjny Maksymalnego Wiarygodnego Wezbrania (MWW)	1833
Maksimum obserwowane w 1958 r. (WWQ)	1250
Średni przepływ z przepływów maksymalnych (SWQ)	354,5
Najmniejszy przepływ z przepływów maksymalnych (NWQ)	92,6
$Q_{50\%}$	285
$Q_{10\%}$	679
$Q_{5\%}$	850
$Q_{1\%}$	1243
$Q_{0,5\%}$	1410
$Q_{0,2\%}$	1631
$Q_{0,1\%}$	1797

Dla przekroju Żywiec $SWQ_{1956-2012}$ równe jest $354,5 m^3s^{-1}$, a $Q_{\max, p=50\%} = 285 m^3s^{-1}$. W niniejszym przykładzie zbiór zdarzeń niepożądanych ograniczono do największych wezbrań rocznych, które wystąpiły w przekroju Żywiec w rozpatrywanym wieloleciu (rys. 6.2). W związku z tym dla przyjętego poziomu granicznego $Q_g = Q_{doz} = SWQ_{1956-2012} = 354,5 m^3s^{-1}$ obliczono liczbę $n(s, t) = 21$ największych zdarzeń niepożądanych, które mogły spowodować straty, tj. liczbę wezbrań, które w czasie $t = 57$ lat funkcjonowania systemu hydrologicznego – zlewni rzeki Soły do przekroju Żywiec, potencjalnie mogły wywołać lub wywołały straty większe bądź równe s . Dla $Q_g = Q_{doz} = Q_{\max, p=50\%} = 285 m^3s^{-1}$ liczba największych zdarzeń niepożądanych powodujących straty $n(s, t)$ równa jest 27. Największe zdarzenia niepożądane rozumiane są jako wezbrania, których przepływy maksymalne w roku były największe.

Oznacza to, że liczba wszystkich największych zdarzeń niepożądanych N jest równa 57, gdyż rozważane są przepływy maksymalne największych wezbrań rocznych w okresie $t = 57$ lat. Są to przepływy maksymalne wszystkich największych wezbrań rocznych, których wartości są równe bądź większe od przepływu $NWQ_{1956-2012} = 92,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.



Rys. 6.2. Przebieg przepływów maksymalnych rocznych w przekroju Żywiec na Sole w okresie 1956–2012

Fig. 6.2. Annual peak flows for Żywiec post on Soła River in years 1956–2012

Dla $N = 57$ wszystkich wystąpień największych wezbrań w okresie obserwacyjnym 1956–2012 i $n(s, t) = 21$ największych wezbrań, które mogły spowodować straty s , wartość funkcji niezawodności $\hat{R}(t)$ powyższego systemu hydrologicznego zgodnie z wzorem (4.10) równa jest 0,63 a funkcja niezdatności $\hat{F}(t) = 1 - \hat{R}(t) = 0,37$. Oznacza to, że zlewnia rzeki Soły do przekroju Żywiec, ze względu na posiadane własności fizyczno-geograficzne, zagospodarowanie, sposób użytkowania zlewni, etc., była niezawodna w swoim funkcjonowaniu tylko w 63% wystąpień zdarzeń niepożądanych, tj. największych wezbrań w rozpatrywanym wieloletniu i aż w 37% wystąpień zdarzeń jakimi były największe wezbrania, które mogły spowodować straty powodziowe, była zawodna. Jest to ogólna ocena tego

systemu hydrologicznego bez uwzględnienia struktury niezawodnościowej zlewni Soły, a więc bez uwzględnienia własności niezawodnościowych elementów (obiektów), które ją tworzą. Ryzyko zagrożenia największymi wezbraniem zgodnie z wzorem (5.14) wynosi $M_{RH} = 0,37$. Miara ta wyraża prawdopodobieństwo pojawienia się strat $S(t)$ nie mniejszych niż s w okresie $t = 57$ lat funkcjonowania tego systemu. Wartość progowa strat s nie jest przyjęta *explicite* dla powyższych rozważań, ale może być określona w zależności od rodzaju strat – ludzkie indywidualne, ludzkie grupowe (zbiorowe) lub finansowe, zgodnie z metodyką proponowaną w podrozdziale 5.8. Niestety dane statystyczne niezbędne dla określenia wartości progowej strat dla rozpatrywanej zlewni nie są dostępne.

W celu sprawdzenia wpływu przyjęcia przepływu granicznego wezbrania na wartości funkcji niezawodności $R(t)$ i zawodności $F(t)$ funkcjonowania systemu hydrologicznego oraz ryzyka zagrożenia spowodowanego występowaniem największych wezbrań M_{RH} , wykonano takie same obliczenia dla $Q_g = Q_{doz} = Q_{\max, p=50\%} = 285 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, dla którego liczba największych zdarzeń niepożądanych mogących powodować straty równa jest $n(s, t) = 27$, a $\hat{R}(t) = 0,53$ i $\hat{F}(t) = 0,47$ oraz $M_{RH} = 0,47$. Łatwo zauważyć, że wraz z obniżeniem przepływu granicznego Q_g , rośnie ryzyko zagrożenia powstania strat w wyniku występowania ekstremalnych wezbrań, a niezawodność funkcjonowania zlewni Soły do przekroju Żywiec maleje. Zatem przyjęcie poziomu granicznego, od którego będzie się uznawać zjawisko wezbrania za zdarzenie niepożądane, ma istotny wpływ na ocenę niesprawności systemu hydrologicznego i w konsekwencji jego bezpieczeństwa. Uwaga ta dotyczy przyjmowania wszystkich poziomów granicznych stref zagrożeń hydrologicznych (rys. 3.2).

Przyjmijmy teraz wyłącznie dla potrzeb ilustracji wskaźników i miar opisanych w rozdziale 5, że ochrona przeciwpowodziowa miasta Żywiec składa się tylko z wału przeciwpowodziowego, który lokalnie chroni miasto przed zalaniem. Wał przeciwpowodziowy, zaliczany do klasy II budowli przeznaczonych do ochrony przeciwpowodziowej, został zaprojektowany na przepływ miarodajny Q_m równy przepływowi maksymalnemu $Q_{\max, 1\%}$ o prawdopodobieństwie przewyższenia $p = 1\%$ zgodnie z przyjętymi normami projektowymi [Załącznik 4 Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r.]. Zatem zgodnie z wzorem (5.44), wskaźnik zagrożenia bezpieczeństwa WZB wystąpieniem zdarzenia niepożądanego, uwzględniając infrastrukturę hydrotechniczną (wał przeciwpowodziowy chroniący miasto Żywiec) systemu hydrologicznego w przekroju Żywiec na Sole, wynosi

$$WZB = \frac{MWW - Q_m}{MWW} = \frac{MWW - Q_{1\%}}{MWW} = \frac{1833 - 1243}{1833} = 0,32 \quad (6.1)$$

gdzie: $Q_{1\%}$ – przepływ miarodajny przy projektowaniu wałów przeciwpowodziowych, MWW – Maksymalne Wiarygodne Wezbranie (tab. 6.1).

Mimo, że podstawowy obiekt ochrony przeciwpowodziowej w postaci wału zapewnia w 68% ochronę terenów na zawału to jednak istnieje 32% ryzyko zagrożenia powodzią, które nie może być zredukowane przez techniczną ochronę, a zatem powinny być podjęte inne działania techniczne lub poza techniczne, umożliwiające zapewnienie bezpieczeństwa na terenach zagrożonych.

Wskaźnik gwarancji bezpieczeństwa WGB systemu hydrologicznego, uwzględniając infrastrukturę hydrotechniczną w przekroju Żywiec, zgodnie ze wzorem (5.45), wynosi

$$WGB = \frac{Q_m}{MWW} = \frac{Q_{1\%}}{MWW} = \frac{1243}{1833} = 0,68 \quad (6.2)$$

gdzie: wszystkie oznaczenia jak we wzorze (6.1).

Oznacza to, że element podstawowej ochrony przeciwpowodziowej (wał) gwarantuje bezpieczeństwo na obszarach chronionych tylko w 68%. Istnieje znaczne zagrożenie w przypadku wystąpienia przepływów większych od przepływu, na który został zaprojektowany wał przeciwpowodziowy, które mogą uszkodzić lub zniszczyć ten obiekt, tj. może dojść do powstania wyrwy w wale lub przelania wody przez koronę wału i w ten sposób do zatopienia obszarów chronionych.

Wskaźnik zagrożenia powodziowego WZP (5.46) w przekroju Żywiec wynosi

$$WZP = \frac{MWW - Q_{\text{doz}}}{MWW} = \frac{MWW - SWQ}{MWW} = \frac{1833 - 354,5}{1833} = 0,81 \quad (6.3)$$

gdzie: Q_{doz} – przepływ dozwolony, którego wartość jest określana na podstawie sytuacji topograficznej doliny rzecznej i stopnia jej zagospodarowania, bądź w sposób przybliżony, np. jako SWQ lub $Q_{\text{max}, p=50\%}$.

W niniejszym przykładzie przyjęto dla przekroju Żywiec jako Q_{doz} wielkość $SWQ=354,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Obliczono również WZP dla $Q_{\text{doz}} = Q_{\text{max}, p=50\%} = 285 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, dla którego $WZP=0,84$.

Oznacza to, że obszary położone w przekroju Żywiec i poniżej mają bardzo wysoki wskaźnik zagrożenia powodziowego. Na obszarach tych nie powinni mieszkać ludzie, ani nie powinno lokalizować się żadnych stałych obiektów gospodarczych bez zabezpieczeń przeciwpowodziowych.

Natomiast wskaźnik komplementarnej powodziogenności WKP (5.47) w przekroju Żywiec wynosi

$$WKP = \frac{MWW - WWQ}{MWW} = \frac{1833 - 1250}{1833} = 0,32 \quad (6.4)$$

gdzie: WWQ – największy obserwowany przepływ w wieloletniu 1956–2012.

Oznacza to, że w przekroju Żywiec przepływ, który wystąpił w 1958 roku, był bardzo duży i tylko o 32% mniejszy od największego z możliwych, czyli od MWW .

Według danych z 31 grudnia 2010 r. miasto Żywiec ma 32056 mieszkańców [Ludność ..., 2011]. Dla potrzeb niniejszego przykładu założono, że 10% ludności zamieszkuje na terenach zagrożonych zalaniem w przypadku przerwania lub przelania się wody przez koronę wału przeciwpowodziowego. Zatem liczba zagrożonych ludzi lzl wynosi 3206 mieszkańców miasta Żywiec. Oszacowano również, że liczba ludności zamieszkującej tereny zagrożone, która może ponieść straty w kategorii s_5 – straty śmiertelne w wyniku wystąpienia zdarzenia niepożądanego A , za które uznano przerwanie lub przelanie się wody przez koronę wału przeciwpowodziowego i wystąpienie powodzi, wynosi $n_{s_5} = 43$ osoby. Liczba wszystkich wystąpień n_A zdarzenia A równa jest liczbie pojawienia się wezbrań, których przepływ maksymalny jest większy od przepływu miarodajnego $Q_m = Q_{1\%} = 1243 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, na który został zaprojektowany i wybudowany wał przeciwpowodziowy. Ponieważ dotychczas w przekroju Żywiec w okresie 1956–2012 ($t = 57$ lat) wystąpiło tylko jedno wezbranie, którego przepływ maksymalny $Q_{\max} = 1250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ był większy od przepływu miarodajnego Q_m , to $n_A = 1$. Zatem prawdopodobieństwo wystąpienia strat ludzkich S większych lub równych s w kategorii s_5 ze wzoru (5.38) jest równe

$$p_{s_5}(S \geq s_5/A) = \frac{n_{s_5}}{n_A \cdot lzl} = \frac{43}{1 \cdot 3206} = 0,0134. \text{ Korzystając ze wzoru (5.23) miara}$$

ryzyka hydrologicznego pojawienia się ofiar śmiertelnych, w wyniku wystąpienia zdarzenia A , wynosi $M_{RH}(s_5, t) = P[S(t) \geq s_5] = p_{s_5}(S \geq s_5/A) = 0,0134$.

Powyższe wskaźniki i miary dają ogólny obraz możliwych zagrożeń powodziowych związanych z występowaniem dużych wezbrań i przyjętą lokalną ochroną przed powodzią w postaci wału przeciwpowodziowego w przekroju Żywiec.

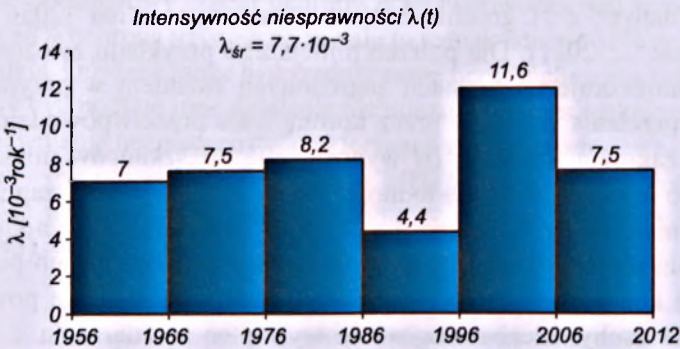
Korzystając ze wzoru (4.13) obliczono intensywność niesprawności $\lambda(t)$ rozpatrywanego systemu hydrologicznego w przedziałach co $\Delta t = 10$ lat. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 6.2 i zilustrowano na rysunku 6.3.

Tabela 6.2. Wartości intensywności niesprawności zlewni Soły do przekroju Żywiec

Table 6.2. Values of failure intensity for Sola River catchment up to Żywiec post

t rok	1956–1965	1966–1975	1976–1985	1986–1995	1996–2005	2006–2012
i	0	1	2	3	4	5
$t+\Delta t$	0+10=10	10+10=20	20+10=30	30+10=40	40+10=50	50+7=57
$n(t, t+\Delta t)$	4	4	4	2	5	2
$N(t)$	57	53	49	45	43	38
$\lambda(t)$	0,0070	0,0075	0,0082	0,0044	0,0116	0,0075

$$N(t = i = 0) = N = 57, N(t = i) = N(t = i - 1) - n(t = i - 1, t = i - 1 + \Delta t), i = 1, 2, 3, \dots$$



Rys. 6.3. Przebieg intensywności niesprawności zlewni Soły do przekroju Żywiec

Fig. 6.3. Run of failure intensity for Soła River catchment up to Żywiec post

Dla badanego systemu hydrologicznego można w przybliżeniu przyjąć, że intensywność niesprawności $\lambda(t)$ jest stała w czasie i równa średniej intensywności $\lambda(t) \approx \bar{\lambda} = 0,0077 \text{ rok}^{-1}$.

Gdy $\lambda(t) = \bar{\lambda}$ oraz $\bar{\lambda}t$ jest małe, można korzystać z zależności przybliżonych przy obliczaniu funkcji niezawodności $R(t) \approx 1 - \bar{\lambda}t \approx 0,56$ i funkcji niezdatności $F(t) \approx \bar{\lambda}t \approx 0,44$. Przybliżone wartości funkcji niezawodności i funkcji niezdatności są bliskie obliczonym wartościom tych funkcji dla wezbrań zdefiniowanych przepływem granicznym $Q_{gr} = Q_{doz} = Q_{\max, p=50\%} = 285 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Korzystając ze wzoru (4.9) lub (4.11) obliczono funkcję niezawodności $R(t)$ wraz z upływem kolejnych dziesięcioleci okresu obserwacyjnego 1956–2012, które przedstawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Wartości funkcji niezawodności $R(t)$ wraz z upływem kolejnych dziesięcioleci okresu obserwacyjnego 1956–2012 zlewni Soły do przekroju Żywiec ($\bar{\lambda} = 0,0077 \text{ rok}^{-1}$)

Table 6.3. Values of reliability function $R(t)$ for consecutive decades of observation period 1956–2012 for Soła River catchment up to Żywiec post ($\bar{\lambda} = 0,0077 \text{ rok}^{-1}$)

t rok	1956–1965	1966–1975	1976–1985	1986–1995	1996–2005	2006–2012
$t + \Delta t$	0+10=10	10+10=20	20+10=30	30+10=40	40+10=50	50+7=57
$R(t)$	0,93	0,86	0,79	0,73	0,68	0,64

$$R(t = 0) = 1$$

Z analizy wzorów (4.9) i (4.11) oraz otrzymanych rezultatów obliczeń (tab. 6.2 i 6.3) wynika, że funkcja niezawodności $R(t)$ zależy od rozważanego czasu t funkcjonowania systemu hydrologicznego i intensywności niesprawności $\lambda(t)$. Przy stałej intensywności niesprawności $\lambda(t)$, niezawodność systemu zależy od przyjętego do badań czasu jego funkcjonowania i wraz z wydłużającym się czasem system staje się coraz bardziej zawodny. Jednak gdy $\lambda(t)$ maleje funkcja nie-

zawodności systemu rośnie. Zmniejszenie intensywności niesprawności systemu hydrologicznego można uzyskać przez podjęcie działań zmniejszających występowanie i oddziaływanie ekstremalnych zdarzeń hydrologicznych. Są to działania związane z zabudową i użytkowaniem zlewni, zwiększające jej możliwości retencyjne na obszarze zlewni i w korycie rzeki (retencja dolinowa rzeki) oraz budową obiektów hydrotechnicznych służących ochronie powodziowej (w szczególności zbiorników retencyjnych, zbiorników suchych, polderów, etc.), opisanych szerzej w rozdziale 3. Gdyby zlewnia naturalnie nie odnawiała swoich możliwości retencyjnych i człowiek nie podejmował żadnych działań zmierzających do zwiększenia bezpieczeństwa powodziowego oraz zmniejszenia ryzyka wystąpienia powodzi, poprzez określone działania głównie w zakresie technicznej ochrony przeciwpowodziowej, system hydrologiczny z czasem wyczerpałby swoją niezawodność funkcjonowania (zmniejszanie się funkcji niezawodności z upływem czasu przy stałej intensywności niesprawności (tab. 6.3)). Tak się jednak nie dzieje, gdyż mimo zdarzeń inicjujących w postaci opadu deszczu o dużej wydajności, czy gwałtownych wzrostów temperatury w okresie wiosennym przy jednoczesnym występowaniu grubej pokrywy śnieżnej, nie wszystkie wezbrania, choć są zdarzeniami niepożądanymi, powodują niesprawność systemu hydrologicznego w postaci powodzi. Funkcje niezawodności zlewni Soły do przekroju Żywiec dla poszczególnych okresów 10-letnich są stosunkowo duże (tab. 6.4) i osiągają średni poziom równy 0,930.

Tabela 6.4. Wartości funkcji niezawodności $R(t)$ dla poszczególnych okresów dziesięcioletnich w zlewni Soły do przekroju Żywiec

Tabela 6.4. Values of reliability function $R(t)$ for individual decades of observation period 1956–2012 for Soła River catchment up to Żywiec post

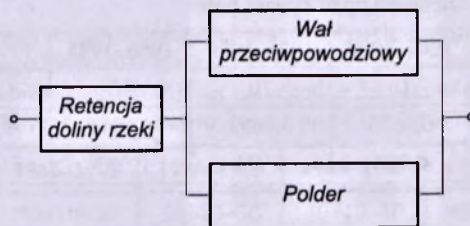
t [rok]	1956–1965	1966–1975	1976–1985	1986–1995	1996–2005	2006–2012
Δt	10	10	10	10	10	7
$\lambda(t)$	0,0070	0,0075	0,0082	0,0044	0,0116	0,0075
$R(t)$	0,932	0,928	0,921	0,957	0,890	0,949

Wartość oczekiwana czasu funkcjonowania tego systemu bez niesprawności zgodnie ze wzorem (4.15) dla $\bar{\lambda} = 0,0077 \text{ rok}^{-1}$ jest równa $ET = \frac{1}{\bar{\lambda}} \approx 130 \text{ lat}$. Wartość ta jest mało wiarygodna z uwagi na dotychczasowy przebieg występowania niesprawności w okresie 57 lat. Wydaje się, że lepszą miarą w ocenie czasu funkcjonowania systemu hydrologicznego jest skumulowana intensywność uszkodzeń $\Lambda(t)$ (wzór (4.14)), która dla $\bar{\lambda} = 0,0077 \text{ rok}^{-1}$ wynosi $0,439 \text{ rok}^{-1}$, a dla niej oczekiwany czas funkcjonowania bez niesprawności zlewni Soły do przekroju Żywiec wynosi $ET = \frac{1}{\Lambda(t)} = 2 \text{ lata i 4 miesiące}$.

W celu zilustrowania wykorzystania metod drzewa niesprawności i drzewa zdarzeń do oceny bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania systemu hydrologicznego, przyjmijmy dla potrzeb niniejszego przykładu, że struktura niezawodnościowa systemu hydrologicznego – zlewni Soły w przekroju Żywiec, składa się wyłącznie z retencji doliny rzeki, wału przeciwpowodziowego i polderu (rys. 6.4). Struktura ta może być opisana przy wykorzystaniu drzewa niesprawności (rys. 6.5), w którym zidentyfikowano niepożądane zdarzenia podstawowe A_{11} – silnie zabudowane koryto rzeki, A_{12} – złą regulację rzeki, A_{13} – zbyt mały rozstaw wałów, powodujących łącznie wystąpienie zdarzenia niepożądanego A_1 – brak retencji doliny rzeki oraz zdarzeń pierwotnych A_{21} – wystąpienie katastrofalnego wezbrania, A_{22} – zły stan techniczny wału i w związku z tym jego przerwanie oraz A_{23} – wykorzystanie polderu niezgodnie z przeznaczeniem, które łącznie były przyczyną zajścia zdarzenia niepożądanego A_2 – niewystarczające zabezpieczenie terenów chronionych (narażonych na zalanie). Zdarzenia A_1 i A_2 – łącznie doprowadziły do wystąpienia zdarzenia szczytowego A , czyli wystąpienia powodzi w Żywcu, dla którego korzystając ze wzorów (4.29)–(4.31), obliczono prawdopodobieństwo jego zajścia jako

$$\begin{aligned} p(A) &= p(A_1) + p(A_2) = p(A_{11}) + p(A_{12}) + p(A_{13}) + p(A_{21})p(A_{22}) + p(A_{23}) = \\ &= p(A_{11}) + p(A_{12}) + p(A_{13}) + p(A_{21})p(A_{22}/A_{21}) + p(A_{23}) \end{aligned} \quad (6.5)$$

gdzie: $p(A_{22}) = p(A_{22}/A_{21})$ gdyż zdarzenie A_{22} zachodzi tylko wtedy, gdy zajdzie zdarzenie A_{21} , natomiast prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia A_{22} dla zdarzenia przeciwnego \bar{A}_{21} do zdarzenia A_{21} jest równe $p(A_{22}/\bar{A}_{21}) = 0$.

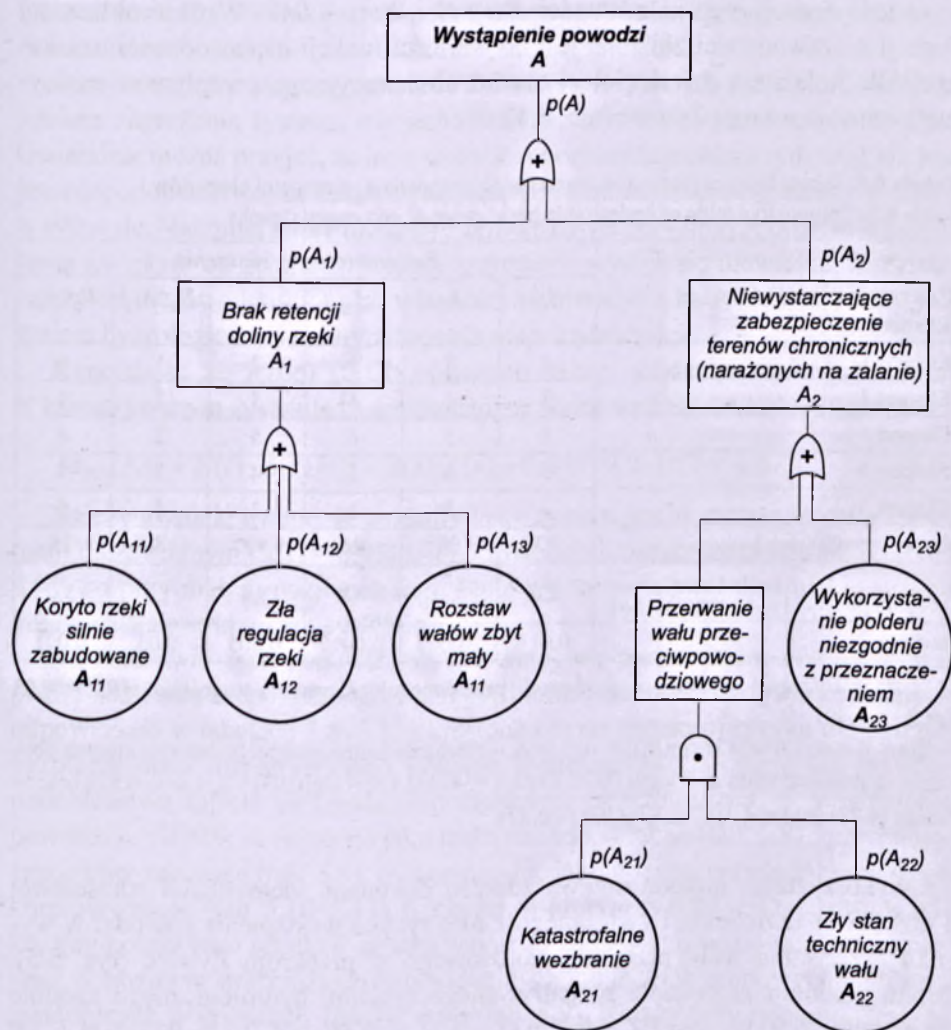


Rys. 6.4. Założona struktura niezawodnościowa systemu hydrologicznego – zlewni Soły w przekroju Żywiec

Fig. 6.4. Assumed reliable structure of hydrological system of Sola River catchment up to Żywiec post

Grupa pięciu ekspertów metodą rankingową (podrozdz. 5.7.1) określiła pozycję poszczególnych niepożądanych zdarzeń pierwotnych A_{11} , A_{12} i A_{13} oraz A_{21} , A_{22} i A_{23} nie znając prawdopodobieństw ich zajścia. Prawdopodobieństwa dwóch zdarzeń A_{12} i A_{21} , odpowiednio $p(A_{12}) = 0,03$ i $p(A_{21}) = 0,001$, zostały oszacowane

przez kierownika zespołu pięciu ekspertów metodą statystyczną na podstawie posiadanych przez niego danych pomiarowych. Zdarzenia te zostały wykorzystane do kalibracji zależności (5.27) i oznaczone jako B_1 i B_2 . Obliczenia zestawiono w tabeli 6.5.



Rys. 6.5. Drzewo niesprawności dla założonej struktury niezawodnościowej systemu hydrologicznego – zlewni Soły w przekroju Żywiec

Fig. 6.5. Fault tree for assumed structure of hydrological system of Sola River catchment up to Żywiec post

Wstawiając do wyrażenia (6.5) oszacowane metodą rankingową wartości prawdopodobieństw zdarzeń A_{11} , A_{13} , A_{22} i A_{23} , odpowiednio $p(A_{11}) = 0,011$, $p(A_{13}) = 0,0027$, $p(A_{22}) = 0,0012$ i $p(A_{23}) = 0,005$ oraz znane prawdopodobieństwa

$p(A_{12}) = 0,03$ i $p(A_{21}) = 0,001$, otrzymano prawdopodobieństwo zdarzenia szczytowego $p(A)$ równe $0,049$.

Wartość funkcji niezawodności systemu hydrologicznego, o powyżej przyjętej strukturze, obliczona na podstawie wzoru (4.33) równa jest $R(t) = 1 - P(A) = 0,951$, a wartość funkcji jego niezdatności $F(t) = 1 - R(t) = 0,049$. Wartość obliczonej funkcji niezawodności zbliżona jest do wartości funkcji niezawodności uzyskanych dla kolejnych dziesięcioleci okresu obserwacyjnego przepływów maksymalnych w przekroju Żywiec (tab. 6.4).

Tabela 6.5. Tabela łącząca pierwotne zdarzenia niepożądane A_j z rangami ekspertów
Table 6.5. Conjunctive table of undesirable basic event A_j and experts' ranks

Zdarzenie niepożądane Ekspert	Pozycja (ranga) zdarzenia					
	A_{11}	A_{13}	A_{22}	A_{23}	$B_1=A_{12}$	$B_2=A_{21}$
Ekspert 1	4	3	5	2	1	6
Ekspert 2	3	4	4	3	2	4
Ekspert 3	1	5	6	5	2	6
Ekspert 4	3	3	5	4	2	4
Ekspert 5	2	5	4	3	1	5
Suma pozycji (rang)	13	20	24	17	8	25
Średnia pozycja (suma rang/5) \overline{poz}	2,6	4,0	4,8	3,4	1,6	5,0
$p(A_j)$	0,011	0,0027	0,0012	0,005	0,03	0,001

B_1 i B_2 – zdarzenia kalibrujące o znanych prawdopodobieństwach wystąpienia $p(B_1) = 0,03$ i $p(B_2) = 0,001$

$\log[p(B_1)] = a_0 \cdot 1,6 + a_1$ i $\log[p(B_2)] = a_0 \cdot 5,0 + a_1$ – równania kalibrujące na podstawie, których obliczane są współczynniki $a_0 = \log(0,001/0,03)/3,4 = -0,434$ i $a_1 = \log(0,03) - a_0 \cdot 1,6 = -0,828$ oraz ze wzoru (4.27) $\log[p(A_j)] = -0,434(\overline{poz}) - 0,828$.

Wykorzystując metodę drzewa zdarzeń dokonano identyfikacji jakościowej i ilościowej zagrożenia i związanego z nim ryzyka wystąpienia powodzi w wyniku przerwania wału przeciwpowodziowego w przekroju Żywiec (rys. 5.5). Miara poziomu zagrożenia rozpatrywanego systemu hydrologicznego zgodnie ze wzorem (5.9) wynosi $PZ = PZ^{(2)}p_1(1-p_2)p_3 = WZP \cdot p(A_{21}) \cdot (1-WGB) \cdot p(A_{22}) = 0,81 \cdot 0,001 \cdot (1-0,68) \cdot 0,0012 = 3,1 \cdot 10^{-7}$, a miara poziomu zagrożenia życia ludzkiego w przypadku przerwania wału przeciwpowodziowego (rys. 5.6) zgodnie ze wzorem (5.11) wynosi

$$\begin{aligned}
 PZ(s) &= PZ(s)^{(3)}p_1(1-p_2)p_3p_4(1-p_5) + PZ(s)^{(4)}p_1(1-p_2)p_3(1-p_4) = \\
 &= WZP \cdot p(A_{21}) \cdot (1-WGB) \cdot p(A_{22}) \cdot p_4 \cdot (1-p_5) + WZP \cdot p(A_{21}) \cdot (1-WGB) \cdot p(A_{22}) \cdot (1-p_4) = \\
 &= 0,81 \cdot 0,001 \cdot (1-0,68) \cdot 0,0012 \cdot 0,99 \cdot (1-0,80) + \\
 &+ 0,81 \cdot 0,001 \cdot (1-0,68) \cdot 0,0012 \cdot (1-0,99) = 6,1 \cdot 10^{-8} + 3,1 \cdot 10^{-8} = 9,2 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

WGB i *WZP* przyjęto zgodnie ze wzorami odpowiednio (6.2) i (6.3). Jednocześnie grupa ekspertów na podstawie posiadanej wiedzy o procedurach pracy systemów przeciwdziałania zagrożeniom oszacowała prawdopodobieństwo p_4 ostrzeżenia służb kryzysowych o możliwości zajścia zagrożenia przerwania wału na wartość 0,99 oraz prawdopodobieństwo p_5 ewakuacji zagrożonej ludności na czas na wartość 0,80.

Otrzymane poziomy zagrożenia PZ i $PZ(s)$ wydają się niewielkie. Wysoki poziom zagrożenia systemu nie jest równoznaczny z powstaniem w nim strat. Generalnie można przyjąć, że im wyższy jest poziom zagrożenia tym większe jest prawdopodobieństwo, że nastąpi przejście ze stanu zagrożenia systemu w straty w systemie. Niemniej straty mogą być zerowe nawet przy dużym poziomie zagrożenia i większe od zera, gdy poziom zagrożenia wydaje się niewielki. Wszystko zależy od niezawodnościowych własności elementów z których zbudowany jest system hydrologiczny i natury zdarzenia niepożądanego.

Korzystając ze wzoru (5.18) obliczono miarę ryzyka pojawienia się strat w rozpatrywanym systemie hydrologicznym, która wynosi

$$M_{RH}(s,t) = F(t) \cdot Z(s) = [1 - R(t)]Z(s) = 0,049 \cdot 9,2 \cdot 10^{-8} = 4,5 \cdot 10^{-9} \quad (6.6)$$

Należy zwrócić uwagę, że rozpatrywany system jest w dużym stopniu systemem niezawodnym ($R(t) = 0,951$), jego zawodność oszacowana została tylko na 4,9% co przy małym poziomie zagrożenia wystąpienia strat daje niskie ryzyko pojawienia się strat w tym systemie.

Na podstawie zaproponowanych skal kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego i kategorii strat oraz matrycy ryzyka podanych odpowiednio w tabelach 5.8–5.11 określono obszar (poziom) ryzyka dla potrzeb bezpieczeństwa rozpatrywanego systemu hydrologicznego, który dla prawdopodobieństwa zajścia zdarzenia niepożądanego szczytowego A , tj. wystąpienia powodzi $p = 0,049$, ocenianego jako mało prawdopodobne (tab. 5.8) i powodującego straty znaczące (tab. 5.9), można przyjąć jako poziom ryzyka tolerowanego kontrolowanego (tab. 5.10–5.11), tj. obszar, w którym ryzyko jest tolerowane tylko, gdy koszty jego redukcji są adekwatne do założonego poziomu bezpieczeństwa, tj. poziomu strat ciężkich indywidualnych lub lekkich grupowych lub/i strat materialnych w granicach 10^4 – 10^5 euro (tab. 5.9). Należy przy tym pamiętać, że przy określaniu wag skali kategorii prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego (tab. 5.8), w ilościowej ocenie prawdopodobieństwa (częstości występowania) brany jest pod uwagę średni okres powtarzalności T zdarzenia niepożądanego i związane z nim prawdopodobieństwo przewyższenia p , tj. prawdopodobieństwo zdarzenia polegającego na osiągnięciu lub przekroczeniu wartości p w każdym roku funkcjonowania systemu hydrologicznego.

Zaprezentowany w niniejszym rozdziale przykład obliczeniowy miał na celu przedstawienie możliwości wykorzystania teorii niezawodności i bezpieczeństwa

do opisu systemów hydrologicznych. Zlewnia rzeki Soły do przekroju Żywiec posłużyła wyłącznie do prezentacji proponowanego w pracy aparatu matematycznego do oceny zagrożeń i ryzyka hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych jakimi są duże wezbrania powodujące powodzie. Autor nie dysponował wieloma szczegółowymi danymi pomiarowymi, głównie dotyczącymi zagospodarowania zlewni i jej użytkowania, jak również pełną informacją o przebiegu poszczególnych incydentów wezbraniowych i stratach, które mogły powstać w wyniku ich wystąpienia. Dane te pozwoliłyby z pewnością na bardziej wnikliwą analizę niezawodności funkcjonowania rozpatrywanego systemu hydrologicznego.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy podjęto próbę matematycznego opisu niezawodności działania zlewni rzecznej, przy wykorzystaniu narzędzi inżynierii niezawodności, która stanowi praktyczny aspekt teorii niezawodności i bezpieczeństwa. Zlewnia rzeczna została potraktowana, jako system hydrologiczny, w którym występują różnego rodzaju zagrożenia wynikające z wzajemnych relacji między siłami Natury, Człowiekiem, Techniką i Środowiskiem przyrodniczym, stanowiące układ powiązań N-C-T-Ś, mających wpływ na bezpieczeństwo człowieka i środowiska, w którym funkcjonuje. Relacje między tymi czterema obszarami zostały opisane z punktu widzenia zachodzących w zlewni rzecznej ekstremalnych zdarzeń hydrologicznych (głównie wezbrania-powodzie), będących wynikiem występowania ekstremalnych zdarzeń meteorologicznych (rozd. 2).

Ekstremalne zjawiska hydrologiczne w postaci wezbrań powodujących powodzie zostały potraktowane, jako zdarzenia niepożądane (zagrożenia) z punktu widzenia bezpieczeństwa człowieka, jego życia i zdrowia oraz mienia jak również, jako przejaw niezdatności systemu hydrologicznego do niezawodnego funkcjonowania. Przy tak postawionej tezie, w pierwszym rzędzie należy zidentyfikować mechanizmy powstawania ekstremalnych zagrożeń hydrologicznych oraz techniczne i nietechniczne działania obronne, właściwe dla tych zagrożeń (rozd. 3). Następnie należy określić strukturę niezawodnościową systemu hydrologicznego i opisać ją modelem matematycznym, za który w niniejszej pracy proponuje się przyjąć drzewo niesprawności, pozwalające na probabilistyczny opis zdarzeń niepożądanych, zachodzących w systemie hydrologicznym (rozd. 4). Znając model niezawodnościowy badanego systemu hydrologicznego można ocenić powstające w nim zagrożenia i związane z nimi ryzyko hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych, wykorzystując w tym celu metodę drzewa zdarzeń. Proponowane miary niezawodności, zagrożenia i ryzyka posłużą do oceny ilościowej ryzyka i strat

powstałych w wyniku zajścia zdarzeń niepożądanych. Mając zidentyfikowane ryzyko hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych można nim zarządzać, tzn. świadomie diagnozować i sterować tym ryzykiem, w celu zapewnienia bezpieczeństwa ludzi i samego systemu hydrologicznego (rozdz. 5).

Zagrożenia występujące w systemie hydrologicznym mogą być pochodzenia naturalnego i pochodzenia antropogenicznego, w tym antropotechnicznego. Występowanie zagrożeń pochodzenia naturalnego (siły Natury) jest niezależne od człowieka i w zasadzie człowiek może je jedynie monitorować i próbować łagodzić ich skutki. Natomiast występowanie zagrożeń antropogenicznych jest związane z działalnością człowieka w dolinie rzeki i na obszarze zlewni, z budowanymi przez niego różnego rodzaju obiektami technicznymi. W związku z tym zagrożenia te mogą być w dużym stopniu kontrolowane, a w konsekwencji ryzyko ich zajścia może być w dużej mierze zarządzane. W przypadku zagrożeń naturalnych, do których należą ekstremalne zdarzenia hydrologiczne i meteorologiczne, zarządzanie ich ryzykiem jest znacznie trudniejsze. Bezpieczeństwo systemów hydrologicznych zależy przede wszystkim od przyjętych procedur i regulacji zarządzania ryzykiem hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych, które powinny być ujęte w planach bezpieczeństwa systemów hydrologicznych i uwzględnić następujące zagadnienia:

- identyfikacja mechanizmów powstawania zagrożeń,
- identyfikacja struktury niezawodnościowej systemu hydrologicznego,
- jakościowa ocena ryzyka i hierarchizacja poziomów ryzyka zidentyfikowanych zagrożeń,
- ilościowa ocena ryzyka zagrożeń poprzez oszacowanie częstości i konsekwencji ich występowania,
- sterowanie ryzykiem (unikanie, redukcja, zatrzymanie i transfer ryzyka),
- monitorowanie działań podjętych w procesie sterowania ryzykiem (skuteczność, ocena kosztów i korzyści),
- opracowanie scenariuszy awaryjnych na wypadek sytuacji kryzysowej,
- szkolenia służb kryzysowych i edukacja społeczeństwa o możliwych zagrożeniach hydrologiczno-meteorologicznych,
- informacja o ryzyku hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych i poziomie jego tolerancji bądź jej braku.

Bezpieczeństwo i niezawodność funkcjonowania zlewni rzecznej i jej elementów pod kątem ochrony powodziowej zależy w dużej mierze od przemyślanej i zrównoważonej działalności człowieka w korycie rzeki i na obszarze zlewni, tj. podjętych przez człowieka inwestycji w zakresie zabudowy hydrotechnicznej, zabudowy obszaru zlewni obiektami infrastruktury lądowej (planowanie przestrzenne) oraz sposobu użytkowania powierzchni zlewni (wykorzystanie naturalnej retencji zlewni i retencji dolinowej rzeki). Źle zaplanowane inwestycje, szczególnie w zakresie technicznej obrony przed powodziami, będą pogarszały skuteczność

ochrony przeciwpowodziowej zamiast ją polepszać i tym samym będą generowały dodatkowe koszty społeczne, poza kosztami inwestycji, mogące znacznie przewyższać potencjalne korzyści i powodować, że poziom ochrony przed powodzią nie będzie spełniał oczekiwań społeczeństwa w zakresie bezpieczeństwa powodziowego.

Przedstawione w przykładzie wyniki obliczeń stanowią niewielki wycinek możliwości zastosowania inżynierii niezawodności, analizy zagrożeń i związanego z nimi ryzyka i bezpieczeństwa systemów hydrologicznych. Gdy dysponuje się dużą liczbą danych statystycznych o wezbraniach, nie tylko o przepływie maksymalnym wezbrania, ale na przykład o jego objętości czy czasie trwania, oraz danych o rozmiarze strat, jakie poszczególne wezbrania, uznane za zdarzenia ekstremalne, spowodowały, można budować bardziej złożone modele oceny ryzyka rozpatrywanych systemów hydrologicznych. Takie modele będą dawały znacznie lepszą ocenę poziomu ryzyka występowania zagrożeń zjawisk ekstremalnych w danym systemie hydrologicznym. Podejście to wymaga jednak posiadania dużej liczby wiarygodnych danych pomiarowych, nie tylko o ekstremalnych zdarzeniach hydrologicznych, stratach, które mogą one powodować, ale również danych o obiektach (elementach), z których składają się niezawodnościowe struktury systemów hydrologicznych. Takimi danymi pomiarowymi autor niniejszej pracy nie dysponował. Niemniej, w pracy zaproponowano pewne rozwiązania, które już teraz mogą być wykorzystane w hydrologicznej praktyce inżynierskiej, mimo braku w niektórych sytuacjach danych pomiarowych niezbędnych do ich zastosowania (część danych będzie dostępna po zakończeniu projektu Informatyczny System Osłony Kraju [ISOK, 2010]). Nowe, proponowane podejście powinno nie tylko bazować na aktualnych możliwościach pomiarowych, ale również wymuszać podjęcie takich działań w zakresie uzyskiwania wiedzy o ilościowym opisie systemów hydrologicznych, które pozwolą na lepszą ocenę ryzyka występowania hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych oraz większe bezpieczeństwo samych systemów hydrologicznych jak i ludzi i infrastruktury gospodarczej będących ich częścią. Otrzymane wyniki zachęcają do prowadzenia dalszych badań nad wykorzystaniem teorii niezawodności i bezpieczeństwa w hydrologii.

BIBLIOGRAFIA

- Banasik K., Byczkowski A., 2011, *Prediction of T-year flood in gauged and partially gauged small catchments*, In: Prediction and Reduction of Diffuse Pollution, Solid Emission and Extreme Flows from Rural Areas – case study of small agricultural catchment, (eds. Banasik K., Oygarden L. & Hejduk L.), Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 47–59.
- Banasik K., Byczkowski A., Hejduk L., Gładecki J., 2012, *Obliczanie przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małej zlewni z zastosowaniem*

- metod statystycznych oraz metod pośrednich*, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach, Tom 12, z. 3(39)), 17–26.
- Banasik K., Hejduk L., Barszcz M., 2008, *Flood flow consequences of land use changes in a small urban catchment of Warsaw*, Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 1–10.
- Banasik K., Ostrowski J., 2010, *Estimation of Extreme Flood Flows in a Small Carpathian River*, In: Cultural Landscapes of River Valleys, No. 16, (eds. Radecki-Pawlik A., Hernik J.), Publishing House of the University of Agriculture, Kraków, 221–227.
- Banasik K., Pham N., 2010, *Modelling of the effects of land use changes on flood hydrograph in a small catchment of the Płaskowicka, southern part of Warsaw, Poland*, Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation No. 42 (2), 229–240.
- Barszczyńska M., Bogdańska-Warmuz R., Konieczny R., Madej P., Siudak M., 2005, *Zdążyć przed powodzią. Przewodnik metodyczny na temat lokalnych systemów monitoringu i ostrzeżeń powodziowych*, IMGW, Kraków.
- Berenstein P.L., 1997, *Przeciw Bogom. Niezwykłe dzieje ryzyka*, WIG-Press, Warszawa.
- Biedroń I., Bogdańska-Warmuz R., 2012, *Powódź 2010 – analiza strat i szkód powodziowych w Polsce*, Gospodarka Wodna, Nr 4, 147–153.
- Bobiński E., Żelaziński J., 1996, *Czy można przerwać błędne koło ochrony przeciwpowodziowej*, Gospodarka Wodna, Nr 4, 99–107.
- Bogdanowicz E., 2010, *Podjęcie wielomodelowe w zagadnieniach estymacji kwantyli rozkładu wartości maksymalnych*, w: Hydrologia w Inżynierii i Gospodarce Wodnej Tom 1 (red. Więzik B.), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 68, 57–70.
- Bojarski A., Gręplowska Z., Nachlik E., Kondel B., Zaleski J., 2011, *Program ochrony przed powodzią w dorzeczu górnej Wisły – geneza i przyjęte rozwiązania*, Gospodarka Wodna, Nr 10, 407–413.
- Bojarski A., Jeleński J., Jelonek M., Litewka T., Wyżga B., Zalewski J., 2005, *Zasady dobrej praktyki w utrzymaniu rzek i potoków górskich*, Ministerstwo Środowiska, Departament Zasobów Wodnych, Warszawa.
- Borysiewicz M., Markowski A.S., 2002, *Kryteria akceptowalności ryzyka poważnych awarii przemysłowych*, (red. Michalik J.S.), Wyd. CIOP, Warszawa.
- Bucior J., 2004, *Podstawy teorii i inżynierii niezawodności*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Downstream hazard classification guidelines*, 1988, Bureau of Reclamation, US Department of the Interior, Washington D.C.
- Drożdżał E., Grabowski M., Kondziolka K., Olbracht J., Piórecki M., Radoń R., Ryłko A., 2009, *Mapy ryzyka powodziowego – projekt pilotażowy w zlewni Silnicy*, Gospodarka Wodna, Nr 1, 19–29.
- Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim*, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 288 z 6.11.2007.
- Economics and Ecological Risk Assessment – Applications to Watershed Management*, 2005, (eds. Bruins R.J.F., Heberling M.T.), CRC Press, B.R, London, N.Y., Washington D.C.
- Environmental Protection and Disaster Risk Reduction – A Community Leader's Guide*, 2004, UN/ISDR, UNEP.

- Fiedler K., Gamdzyk J., Jankowski W., Opyrczał L., Selerski S., Wita A., Wróblewski M., 2007, *Awarie i katastrofy zapór – zagrożenia, ich przyczyny i skutki oraz działania zapobiegawcze*, (red. Fiedler K.), Monografie IMGW, Warszawa.
- Golba R., 2009, *Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i danych teledetekcyjnych do wyznaczenia stref zalewowych obszaru Nowego Miasta Lubawskiego i okolic*, *Gospodarka Wodna*, Nr 8, 315–319.
- Graf R., 2014, *Minimalizowanie ryzyka powodziowego w Polsce*, w: *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Tom II, (red. Magnuszewski A.), z. XX, Warszawa, 247–260.
- Grocki R., 2012, *Zarządzanie kryzysowe. Dobre praktyki*, Difin SA, Warszawa.
- Gromiec M., 2014, *Zagrożenia związane z jakością wody – zanieczyszczenia i propozycje rozwiązań*, *Gospodarka Wodna*, Nr 10, 377–383.
- Gromiec M., Sadurski A., 2014, *Wpływ oddziaływań antropogenicznych na jakość wód*, *Gospodarka Wodna*, Nr 10, 384–388.
- Gromiec M., Sadurski A., Zalewski M., Rowiński P., 2014, *Zagrożenia związane z jakością wody*, *Nauka*, Nr 1, PAN, Warszawa, 99–122.
- Grzonka B., 2009, *Zastosowanie dwuwymiarowego modelu MIKE FLOOD do wyznaczenia stref zalewowych w obrębie Poznania*, *Gospodarka Wodna*, Nr 3, 101–105.
- Guidance on Flash Flood Management – Recent Experiences from Central and Eastern Europe*, 2007, WMO/GWP Associated Programme on Flood Management, Geneva.
- Guidelines for Flood Frequency Analysis. Long Measurement Series of River Discharge*, 2005, Institute of Meteorology and Water Management, Warsaw, Poland, WMO HOMS Component 181.3.01.
- Guidelines of the US Army Corps of Engineers*, 1979, Department of The Army Corps of Engineers Institute for Water Resources-Hydrologic Engineering Center, Davis CA.
- Gutry-Korycka M., Sadurski A., Kundzewicz Z.W., Pociask-Karteczka J., Skrzypczyk L., 2014, *Zasoby wodne i ich wykorzystanie*, *Nauka*, Nr 1, PAN, Warszawa, 77–98.
- Hall J.W., Dawson R.J., Sayers P.B., Rosu C., Chatterton J.B., Deakin R., 2003, *A methodology of national-scale flood risk assessment*, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water & Maritime Engineering* 156 Issue WM3, 235–247.
- IMGW-PIB, 2012, *Metodyka opracowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych Etap I*, IMGW-PIB, Oddział Kraków.
- Informacyjny System Ostony Kraju*, 2010, <http://www.isok.gov.pl>.
- Inżynieria niezawodności – Poradnik*, 1992, (red. Migdalski J.), ART Bydgoszcz, ZETOM Warszawa.
- Iwanicki J., Kindler J., Kundzewicz Z.W., 2014, *Zagrożenia związane z wodą*, *Nauka*, Nr 1, PAN, Warszawa, 63–76.
- Jaźwiński J., Ważyńska-Fiok K., 1993, *Bezpieczeństwo systemów*, PWN, Warszawa.
- Kaczmarek T.T., 2008, *Ryzyko i Zarządzanie Ryzykiem. Ujęcie Interdyscyplinarne*, Centrum Doradztwa i Informacji Difin, Warszawa.
- Kaczmarek Z., 1970, *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*, WKiŁ, Warszawa.
- Kędziora A., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczak P., Kundzewicz Z.W., Miler A.T., Pierzgałski E., Tokarczyk T., 2014, *Zagrożenia związane z niedoborem wody*, *Nauka*, Nr 1, PAN, Warszawa, 149–172.

- Kędziora A., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczak P., Kundzewicz Z.W., Miler A.T., Pierzgański E., Tokarczyk T., 2014a, *Zagrożenia związane z niedoborem wody*, Gospodarka Wodna, Nr 10, 373–376.
- Kępińska-Kasprzak M., 2013, *Zmienność niżówek w Polsce i ich wpływ na gospodarowanie wodą*, Rozprawa doktorska, IMGW-PIB, Warszawa.
- Kępińska-Kasprzak M., 2014, *Zagrożenie występowaniem niżówek w Polsce*, w: Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Tom I, (red. Banasik K., Hejduk L., Kaznowska E.), z. XX, Warszawa, 163–172.
- Kindler J., 2001, *Polityka gospodarki wodnej*, w: Ekoinnowacyjność dokumentów strategicznych. Próba oceny, (red. Kamieniecki K.), Warszawa, 79–89.
- Kindler J., 2009, *Gospodarka wodna i jej powiązania z inżynierią i ochroną środowiska w kontekście działań na rzecz trwałego i zrównoważonego rozwoju*, w: Polska inżynieria środowiska pięć lat po wstąpieniu do unii europejskiej Tom 3, (red. Dudzińska M. R., Pawłowski L.), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 60, Lublin, 7–15.
- Kindler J., Iwanicki J., Kundzewicz Z.W., Matczak P., Miłaszewski R., Żelazo J., 2014, *Zagrożenia instytucjonalne*, Nauka, Nr 1, PAN, Warszawa, 173–195.
- Kindler J., Iwanicki J., Kundzewicz Z.W., Matczak P., Miłaszewski R., Żelazo J., 2014a, *Zagrożenia instytucjonalne gospodarki wodnej i proponowane przeciwdziałania*, Gospodarka Wodna, Nr 10, 358–365.
- Kindler J., Okruszko T., 2014, *Integrated Drought Management Programme in Central and Eastern Europe (IDMP CEE)*, Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation No 46 (3), 167–179.
- Kitowski K., Nieznański P., 2009, *Mapy terenów zalewowych w dolinie Odry na obszarze województwa dolnośląskiego*, Gospodarka Wodna, Nr 3, 110–112.
- Kledyński Z., 2009, *Stan i perspektywy analizy bezpieczeństwa zapór w Polsce*, w: Bezpieczeństwo zapór – bezpieczeństwo ludności i środowiska, seria: Monografie IMGW, (red. Jankowski W., Wita A.), IMGW, Warszawa, 3–11.
- Kledyński Z., 2011, *Ochrona przed powodzią i jej infrastruktura w Polsce*, XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane 2011, Międzyzdroje 24–27 maja 2011, 243–254.
- Kondziolka K., Radoń R., 2009, *Zastosowanie oprogramowania MIKE FLOOD do zintegrowanego jedno- i dwuwymiarowego modelowania wezbrań powodziowych w zlewni rzeki Rudawy*, Gospodarka Wodna, Nr 3, 106–109.
- Konieczny R., Madej P., Bogdańska-Warmuz R., Żelaziński J., 2006, *Planowanie skutków powodzi w Polsce. Ocena dotychczasowych programów, planów i strategii w dorzeczu Wisły*, Materiały Badawcze IMGW, Seria: Gospodarka Wodna i Ochrona Wód, z. 22, Warszawa, 1–70.
- Konieczny R., Madej P., Siudak M., 2014, *Dyrektywa powodziowa a praktyka ograniczania skutków powodzi w Polsce*, w: Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Tom II, (red. Magnuszewski A.), z. XX, Warszawa, 233–246.
- Konieczny R., Siudak M., Bogdańska-Warmuz R., Madej P., Walczykiewicz T., 2012, *Opracowanie systemu zapobiegania i sposoby ograniczania skutków powodzi oraz zasad funkcjonowania systemu ostrzeżeń*, w: Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo – zmiany, skutki i sposoby ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego, Tom 3 Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju, (red. Lorenc H.), IMGW-PIB, Warszawa, 281–303.

- Kubrak J., Żelazo J., Koziol A., Kubrak E., Kiczko A., 2014, *O usuwaniu roślinności z terenów zalewowych rzek*, Gospodarka Wodna, Nr 3, 95–102.
- Kundzewicz Z.W., 2014, *Konsekwencje zmian klimatu dla zasobów wodnych*, w: Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Tom I, (red. Banasik K., Hejduk L., Kaznowska E.), z. XX, Warszawa, 7–16.
- Kundzewicz Z.W., Iwanicki J., Kindler J., Gromiec M., Matczak P., 2014, *Zagrożenia związane z wodą*, Gospodarka Wodna, Nr 10, 353–358.
- Kundzewicz Z.W., Kindler J., 1995, *Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resources systems*, w: Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems (Proceedings of a Boulder Symposium, July 1995), IAHS Publ., No. 231, 217–224.
- Kwietniewski M., 1999, *Metodyka badań eksploatacyjnych sieci wodociągowych pod kątem niezawodności dostawy wody do odbiorców*, Prace naukowe „Inżynieria Środowiska”, z. 28, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Kwietniewski M., 2008, *GIS w wodociągach i kanalizacji*, PWN, Warszawa.
- Kwietniewski M., Rak J., 2010, *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*, Studia z zakresu inżynierii, nr 67, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa.
- Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczkiwicz H., 1993, *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*, Arkady, Warszawa.
- KZGW, 2013, *Metodyka opracowania planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszarów dorzeczy i regionów wodnych*, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Lebecki K., 2012, *Zagrożenie wybuchem pyłów a bezpieczeństwo funkcjonalne*, Kwartalnik techniczny Magazyn Ex Bezpieczeństwo w strefach zagrożonych wybuchem, Nr 26.
- Ludność. Stan i struktura w przekroju terytorialnym (Stan w dniu 31 XII 2010 r.)*, 2011, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa.
- Łoś M.J., 2013, *Ochrona przed powodzią – niektóre wątpliwości*, Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, Zagadnienia Inżynierii Środowiska Wiejskiego, nr 4 (437), 165–167.
- Madej P., Konieczny R., Barszczyńska M., Siudak M., Saalmueller J., 2009, *Zarządzanie szybkimi powodziąmi. Doświadczenia Europy Środkowo-Wschodniej*, IMGW, Warszawa.
- Magnuszewski A., 2013, *Procesy korytowe rzek nizinnych a bezpieczeństwo powodziowe*, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Magnuszewski A., 2014, *Procesy korytowe w jeziorze Zegrzyńskim*, w: Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN Tom II, (red. A. Magnuszewski), z. XX, Warszawa, 299–306.
- Magnuszewski A., Gutry-Korycka M., Mikulski Z., 2012, *Historyczne i współczesne warunki przepływu wód wielkich Wisły w Warszawie cz. I i II*, Gospodarka Wodna, nr 1, 9–17 i nr 2, 58–63.
- Małaczyński M., Bańkowska B., Wieszczezyński T., 2007, *Metodologia określania bezpiecznych lokalizacji zakładów mogących powodować poważne awarie*, Główny Inspektoriat Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Markowska J., Urbański M., Zdralewicz M., Radczuk L., 2010, *Ryzyko i zagrożenie w świetle dyrektywy powodziowej*, w: Hydrologia w Inżynierii i Gospodarce Wodnej Tom I, (red. Więzik B.), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 68, 327–335.
- Metodyka opracowania map ryzyka powodziowego*, 2009, DHI Polska, Warszawa.
- Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego*, 2009, DHI Polska, Warszawa.

- Metodyka Wstępnej Oceny Ryzyka Powodziowego*, 2010, (red. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej), Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy Oddział w Krakowie, Warszawa.
- Migdalski J., 1992, *Inżynieria niezawodności obiektów technicznych i biotechnicznych*, w: *Inżynieria niezawodności – Poradnik*, (red. Migdalski J.), ART Bydgoszcz, ZETOM Warszawa.
- Monografia powodzi lipiec 1997. Dorzecze Odry*, 1999, (red. Dubicki A., Słota H., Zieliński J.), IMGW, Warszawa.
- Monografia powodzi lipiec 1997. Dorzecze Wisły*, 1999, (red. Grela J., Słota H., Zieliński J.), IMGW, Warszawa.
- Monografia powodzi maj-czerwiec 2010. Dorzecze Wisły*, 2011, (red. Maciejewski M., Ostojki M. S., Walczykiewicz T.), IMGW-PIB, Warszawa.
- Monografia powodzi 2010. Dorzecze Odry*, 2011, (red. Maciejewski M., Ostojki M. S., Tokarczyk T.), IMGW-PIB, Warszawa.
- Nachlik E., Kostecki S., Gądek W., Stochmal R., 2000, *Strefy zagrożenia powodziowego – Rodzaje stref, podstawy ich ustalania i doświadczenia praktyczne*, Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, Wrocław.
- Nott J., 2006, *Extreme Events. A Physical Reconstruction and Risk Assessment*, Cambridge University Press.
- Ocena ryzyka w zarządzaniu bezpieczeństwem zapór. Przegląd korzyści, metod i najnowszych zastosowań*, 2007, Biuletyn 130 CIGB-ICOLD 2005, POLCOLD 2007, IMGW, Warszawa.
- Opyrczał L., 2005, *Metoda analizy i oceny ryzyka awarii opracowana dla polskich budowli hydrotechnicznych*, Materiały Badawcze IMGW, Seria: Inżynieria Wodna, z. 17, Warszawa, 1–66.
- Ostrowski J., Czarnecka H., Głowacka B., Krupa-Marchlewska J., Zaniewska M., Sasim M., Moskwiński T., Dobrowolski A., 2012, *Nagle powodzie lokalne (flash flood) w Polsce i skala ich zagrożenia*, w: *Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo – zmiany, skutki i sposoby ograniczania, wnioski dla nauki, praktyki inżynierskiej i planowania gospodarczego*, Tom 3 Klęski żywiołowe a bezpieczeństwo wewnętrzne kraju (red. Lorenc H.), IMGW-PIB, Warszawa.
- Ozga-Zielińska M., 1995, *Podstawy hydrologiczne wymiarowania obiektów hydrotechnicznych*, *Gospodarka Wodna*, Nr 7, 170–176.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1994, 1997, *Hydrologia stosowana*, PWN, Warszawa.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., Ozga-Zieliński B., 1999, *Zasady obliczania największych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia przy projektowaniu obiektów budownictwa hydrotechnicznego. Długie ciągi pomiarowe przepływów*, Materiały Badawcze IMGW, Seria: Hydrologia i Oceanologia, nr 27, 1–44.
- Ozga-Zielińska M., Kupczyk E., Ozga-Zieliński B., Suligowski, R., Brzeziński J., Niedbała J., 2003, *Powodziogenność rzek pod kątem bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych i zagrożenia powodziowego. Podstawy metodyczne*, Materiały Badawcze IMGW, Seria: Hydrologia i Oceanologia, z. 29, Warszawa, 1–91.
- Ozga-Zielińska M., Kupczyk E., Ozga-Zieliński B., Suligowski, R., Brzeziński J., Niedbała J., 2011, *River-Flooding Potential in terms of Water Structures Safety and Flooding Hazard – Introduction to Methodology*, Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute, Warsaw, 1–89.
- Ozga-Zielińska M., Ozga-Zieliński B., 2003, *Powodziogenność rzek jako miara zagrożenia obiektów hydrotechnicznych i ustalania stref ochrony przeciwpowodziowej*, *Gospodarka Wodna*, Nr 1, 10–17.

- Ozga-Zieliński B., 1999, *Metody analizy niejednorodności ciągów pomiarowych zjawisk hydrologicznych*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, z. 2, 13–32.
- Ozga-Zieliński B., 2010, *Ryzyko hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych*, w: *Hydrologia w Inżynierii i Gospodarce Wodnej Tom 1* (red. Więzik B.), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 68, 319–325.
- Ozga-Zieliński B., Szkutnicki J., Chudy Ł., 2013, *Zmiany zależności stan wody – przepływ a strefy zagrożenia powodziowego*, w: *Wybrane problemy sterowania i zarządzania zasobami wodnymi na tle zadań gospodarki wodnej* (red. Walczykiewicz T.), Monografie IMGW-PIB, Warszawa, 21–34.
- Ozga-Zieliński B., Szkutnicki J., Chudy Ł., 2014, *Krzywa napięcia przepływu a przepływy ekstremalne*, *Przegląd Geofizyczny*, nr 3–4, 85–110.
- Ozga-Zieliński B., Szkutnicki J., Kadłubowski A., Chudy Ł., 2010, *Wista w Warszawie – wybrane problemy hydrologiczne*, *Gospodarka Wodna*, Nr 12, 490–493.
- Pamuła W., 2011, *Niezawodność i Bezpieczeństwo Wybór Zagadnień*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Plans de prevention des risques naturels (PPR) – Risques d’inondation. Guide Methodologique*, 1999, La Documentation française, Paris.
- Podstawy konstrukcji maszyn – Tom 1*, 1999, (red. Dietrich M.), WNT, Warszawa.
- Preś J., 2007, *Zarządzanie ryzykiem pogodowym*, CeDeWu.PL Wydawnictwa Fachowe, Warszawa.
- Program bezpieczeństwa powodziowego w regionie wodnym Środkowej Wisły – projekt*, 2012, zespół autorów pod przewodnictwem J. Żelazo i M. Balcerowicza, Mazowiecki Urząd Wojewódzki w Warszawie.
- Radczyk L., Żyszkowska W., 2001, *Sposoby wykorzystania stref zagrożenia powodziowego*, w: *Ograniczanie skutków powodzi w skali lokalnej*, Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, Wrocław.
- Rak J.R., Kwietniewski M., 2011, *Bezpieczeństwo i zagrożenia systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Rak J., Tchórzewska-Cieślak B., Studziński A., Pietrucha-Urbanik K., Boryczko K., 2012, *Niezawodność i bezpieczeństwo systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów.
- Raport IPCC Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2>.
- Raport z wykonania Wstępnej Oceny Ryzyka Powodziowego*, 2011, Projekt ISOK, IMGW-PIB, Warszawa.
- Regional Scale Ecological Risk Assessment – Using the Relative Risk Model*, 2005, (ed. Landis W.G.), CRC Press, B.R, London, N.Y., Washington D.C.
- Romanowicz R.J., Nachlik E., Januchta-Szostak A., Kundzewicz Z.W., Żelaziński J., 2014, *Zagrożenia powodziowe*, *Gospodarka Wodna*, Nr 10, 366–372.
- Romanowicz R.J., Nachlik E., Januchta-Szostak A., Starkel L., Kundzewicz Z.W., Byczkowski A., Kowalczak P., Żelaziński J., Radczyk L., Kowalik P., Szamałek K., 2014a, *Zagrożenia związane z nadmiarem wody*, *Nauka*, Nr 1, PAN, Warszawa, 123–148.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie*, Dz. U. z 2007 r. Nr 86, poz 579.

- Rozporządzenie Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego, Dz. U. z 2013 r., poz. 104.
- Rucińska D., 2012, *Ekstremalne zjawiska przyrodnicze a świadomość społeczna*, Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa.
- Rucińska D., Osówniak J., Kacprzak A., 2012, *Racjonalność zagospodarowania obszaru potencjalnie narażonego na powódź na przykładzie Wrocławia*, w: *Cywilizacja a środowisko – wyzwania i dylematy* (red. Kantowicz E., Roge-Wiśniewska M.), Wydawnictwo Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 92–117.
- Rutkowski T., 2005, *Teoria niezawodności i bezpieczeństwa*, Preskrypt do wykładu na prawach rękopisu, <http://www.transportpolibuda.cal.pl/downloads/niezaw.pdf>.
- Ryzyko w gospodarce wodnej, 2000, (red. Maciejewski M.), Monografie KGW PAN, zeszyt 17, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Ryzyko w problemach zagrożeń środowiska, 2010, (red. Maciejewski M. i Ostojski M.S.), Monografie IMGW, Warszawa.
- Stolarska M., Sowińska K., Absalon D., Banaszak K., Gurwin J., Stachura A., Wąsik M., 2012, *Projekt planu przeciwdziałania skutkom suszy – Etap I*, Pectore-Eco sp. z o.o., Gliwice.
- Szopa T., 1999, *Niezawodność i bezpieczeństwo*, w: *Podstawy konstrukcji maszyn* (red. Dietrich M.), Tom I, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 158–281.
- Szopa T., 2001, *Możliwości analizy ryzyka w przypadku nadzwyczajnych zagrożeń*, w: *Materiały z III Ogólnopolskiej Szkoły Współczesne Problemy Ekstremalnych Zagrożeń Środowiska* Jachranka 5–7 listopada 2001, (red. Maciejewski M.), IMGW, Warszawa, 139–158.
- Szopa T., 2004, *Koncepcja graficznego przedstawiania terytorialnego rozkładu ryzyka i zagrożeń*, w: *Monitoring zagrożeń i metody osłony środowiska* (red. Maciejewski M.), IMGW, Warszawa, 53–68.
- Szopa T., 2009, *Niezawodność i bezpieczeństwo*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Szymanek A., 2001, *Nauka o bezpieczeństwie jako wiązana dyscyplina naukowa*, Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwa i Niezawodności, KONBiN 2001, 22–25 maja 2001, Szczyrk, 337–350.
- Szymanek A., 2008, *Risk Acceptation Principles in Transport – Zasady akceptowalności ryzyka w transporcie*, Journal of KONBiN 2(5), Wyd. ITWL, Warszawa, 271–290.
- Tarczyński W., Mojsiewicz M., 2001, *Zarządzanie ryzykiem*, PWE, Warszawa.
- Titowicz A., 2010, *Ryzyko i zarządzanie ryzykiem w przedsiębiorstwie – na przykładzie firmy deweloperskiej*, Praca magisterska, Wydział Ekonomii i Zarządzania, Wyższa Szkoła Handlu i Prawa im. R. Łazarskiego w Warszawie.
- Tokarczyk T., 2010, *Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej*, Monografie IMGW, Warszawa.
- Topiłko J., Letkiewicz B., Mykita M., 2012, *Opracowanie mapy zagrożenia powodziowego dla Nowego Miasta Lubawskiego nad Drwęcą na podstawie wyników modelowania matematycznego – realizacja Dyrektywy Powodziowej*, Gospodarka Wodna, Nr 8, 326–331.
- Tyszewski S., Herbich P., Indyk W., Jarząbek A., Pusłowska-Tyszewska D., Rutkowski M., 2008, *Metodyka opracowywania warunków korzystania z wód regionu wodnego i z wód zlewni*, Pracownia Gospodarki Wodnej „PRO-WODA”, Warszawa, 1–66.

- Ustawa Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r., Dz.U. 2001 Nr 115 poz. 1229, z późniejszymi zmianami, Dz. U. z 2012 r., poz. 145, 951, 1513, z 2013 r. poz. 21, 165.*
- Vick S., Steward R., 1996, *Risk analysis in dam safety practice. Uncertainty in the Geologic Environment: from Theory to Practice*, Geotechnical Special Publications.
- Walczkiewicz T., 2010, *Ryzyko w zintegrowanym zarządzaniu zasobami wodnymi*, Monografie IMGW, Warszawa.
- Wieczysty A., 1990, *Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych cz. I i II*, Teoria niezawodności i jej zastosowania, Skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Winter J., Chudy Ł., Marcinkowski M., 2010, *Program ochrony przed powodzią górnej Wisły*, Biuletyn Informacji Publicznej Małopolskiego Urzędu Wojewódzkiego w Krakowie.
- Włodarczyk A., Kęsy R., 2010, *Główne założenia metodyk dotyczących opracowania map zagrożenia powodziowego*, w: *Hydrologia w Inżynierii i Gospodarce Wodnej Tom I* (red. Więzik B.), Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Nr 68, 309–317.
- Wolanin J., 2004, *Wybrane zagadnienia zarządzania ryzykiem*, w: *Mapy terytorialnego rozkładu ryzyka*, Wydawnictwo Fundacja Edukacja i Technika Ratownictwa, Warszawa.
- Wróbel B., 2012, *Zarządzanie ryzykiem w procesie zbioru i zakiszania runi łąkowej*, Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie, Tom 12, zeszyt 2 (39), Wydawnictwo ITP, Falenty, 227–244.
- Wyźga B., Radecki-Pawlik A., 2011, *Jak zmniejszyć zagrożenie i ryzyko powodziowe w dorzeczu górnej Wisły?*, *Gospodarka Wodna*, Nr 10, 414–421.
- Zapory – bezpieczeństwo i kierunki rozwoju*, 2013, (red. Winter J., Kosik A. i Wita A.), IMGW-PIB, Warszawa.
- Zarządzanie kryzysowe – różne oblicza*, 2010, (red. Grocki R.), Dolnośląska Wyższa Szkoła Służb Publicznych „Asesor”, Wrocław.
- Zasady obliczania największych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia. Długie ciągi pomiarowe przepływów*, 2001, IMGW, Warszawa.
- Ziółkowski L., Szczęśniak M., Paluszkiwicz B., Będkowski M., 2011, *Narzędzia GIS jako podstawowy instrument pomocniczy wykorzystywany przy wyznaczaniu zasięgu stref zalewowych*, *Gospodarka Wodna*, Nr 2, 58–64.

SAFETY AND RELIABILITY OF HYDROLOGIC SYSTEMS

Summary

An attempt of application of the theory of reliability, in fact application of its practical aspect, i.e. reliability engineering and its tools of mathematical description of technical objects and systems, was undertaken in order to describe a reliable structure of a quasinnatural system – hydrologic system, its safety as well as hazards in the river basin caused by extreme hydrological and meteorological events treated as undesired events causing risk of human lives and financial losses. Such approach to problems of safety and reliability in the functioning of hydrologic systems including protection against extreme hydrological events, e.g. huge floods causing flooding, has never been developed in Polish hydrology until now.

The suggested methods of hazard, risk and losses assessment connected with occurrence of extreme hydrological and meteorological events are aimed at enhancing capabilities of protection against these events and improving management of flood risk, as well as at strengthening the currently used methods of flood protection in accordance with the Flood Directive.

The river basin is treated as a hydrologic system, where various hazards appear as a result of mutual relations between forces of Nature, Human, Technology (Engineering) and natural Environment, constituting the system of connection N-H-T-E, which has direct influence on the safety of people and economy.

Extreme hydrological events in the form of huge floods causing floodings were treated as undesired events from the point of view of safety of life and health, and property of human beings, as well as a sign of failure of the hydrologic system to function efficiently (reliably).

For such statement, first of all, it was necessary to identify the mechanism of occurrence of extreme hydrological hazards, as well as technical and nontechnical activities of protection typical for these hazards (Chapter 3). Then, it was necessary to define a reliable structure of a hydrologic system and describe it with a mathematical model; for that a fault tree is proposed, which enables probabilistic description of undesired events occurring in the hydrologic system (Chapter 4). Once the reliable model of the hydrologic system is known, the hazard and risk of extreme hydrological events can be assessed with the method of the event tree. The proposed reliability, hazard and risk measures can be used for quantitative assessment of risk and losses resulting from undesired events occurrence.

When the risk of extreme hydrological events is identified, ensuring safety of people and the hydrologic system itself can be managed (Chapter 5). The process of risk management is a selection of effective means ensuring safety and protection against identified hazards, i.e. capability of prevention of losses, the so-called safety potential. The safety potential has to balance capabilities of the hydrologic system to losses causing, the so-called hazard potential. So, according to the ALARP principle, risk management should keep balance of both potentials in the zone of tolerated risk. The presented example (Chapter 6) employs only a fragment of possibilities of reliability engineering, hazard analysis and risk and safety of hydrologic systems associated with them. The obtained results encourage to carry on further research on development of the reliability and safety theory in hydrology.

Keywords: hydrologic system, river basin, water resources management, safety, reliability, risk, hazard, losses, flood, flooding, drought.

SPIS TREŚCI

Wykaz oznaczeń	3
1. Cel i zakres pracy	9
2. Wprowadzenie	12
3. Identyfikacja mechanizmów powstawania ekstremalnych zagrożeń hydrologicznych	17
3.1. Zagrożenia w korytach rzek	18
3.2. Zagrożenia na obszarze zlewni	22
3.3. Techniczne i nietechniczne mechanizmy obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych	22
3.3.1. Techniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych w dolinach rzek	23
3.3.2. Techniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych na obszarze zlewni	25
3.3.3. Nietechniczne działania obronne właściwe dla zagrożeń hydrologicznych w dolinach rzek i na obszarze zlewni	27
4. Niezawodność i bezpieczeństwo działania systemu hydrologicznego	29
4.1. Podstawowe pojęcia i miary teorii niezawodności i bezpieczeństwa	31
4.2. Struktura niezawodnościowa systemu hydrologicznego	39
4.3. Metoda drzewa niesprawności w analizie niezawodności systemu hydrologicznego	45
5. Ryzyko – zagrożenie hydrologicznych zdarzeń ekstremalnych	52
5.1. Definicja ryzyka – zagrożenia	52
5.2. Geneza ryzyka – zagrożenia	55
5.3. Własności ryzyka	57
5.4. Ocena ryzyka – zagrożenia	58
5.4.1. Identyfikacja jakościowa i ilościowa ryzyka	60
5.4.2. Identyfikacja zagrożeń	63
5.5. Zależności między miarą ryzyka a miarami niezawodności i zagrożenia	67
5.6. Modelowanie ryzyka i niezawodności systemu hydrologicznego	71
5.7. Metody szacowania zawodności (niezawodności) w modelowaniu ryzyka	74
5.7.1. Metody eksperckie	74
5.7.2. Metody probabilistyczne	78
5.8. Metody szacowania strat w modelowaniu ryzyka	79
5.9. Zarządzanie ryzykiem	89
6. Przykład obliczeniowy	101
7. Podsumowanie i wnioski końcowe	114
Bibliografia	116
Summary	124

