

Prof. dr hab. ZBIGNIEW W. KUNDZEWICZ, dr IWONA PIŃSKWAR, mgr ADAM CHORYŃSKI

– Instytut Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN, Poznań

dr hab BARTŁOMIEJ WYŻGA, prof. IOP PAN

– Instytut Ochrony Przyrody PAN

Powodzie ciągle groźne

Floods still Pose a Hazard

Zakończony we wrześniu 2016 roku polsko-szwajcarski projekt badawczy „Zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr” (FLORIST) umożliwił uzyskanie wartościowych wyników, zwiększających wiedzę na temat ryzyka powodziowego na północ od Tatr. Pokazano, jak zmieniło się zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr w przeszłości, a także dokonano próby odpowiedzi na pytanie, jak zagrożenie powodziowe może się zmienić w przyszłości. Na przedpolu Tatr opady są najwyższe w Polsce i wielokrotnie powodowały powstawanie groźnych powodzi, np. w roku 1934, 1997, 2001, 2010.

Rozważono różne mechanizmy powstawania powodzi oraz czynniki, wywołujące zmiany ryzyka powodziowego. Zmiana klimatu, a szczególnie postępujące ocieplenie, powoduje wzrost częstości i intensywności wysokich opadów. Istotne są też zmiany zagospodarowania zlewni – użytkowania terenu i lesistości.

Unikatowym elementem projektu jest szerokie uwzględnienie znaczenia drzew i to zarówno w kontekście transportu rumoszu drzewnego, jak i uzyskania wartościowych informacji o przeszłych zjawiskach powodziowych, dzięki dendrochronologii.

Rozważono strategię redukcji ryzyka powodziowego, w tym strategię tradycyjnie dominującą – budowę strukturalnych zabezpieczeń przed powodzią, wałów i zbiorników.

Completed in 2016, the Polish-Swiss research project “Flood hazards in the foothills of the Tatra Mountains” (FLORIST) provided valuable results that extend knowledge of the flood hazard to the north of the Tatra Mts. It has been shown how the flood hazard in the foothills of the Tatra changed in the past, and an attempt to predict how the flood hazard will evolve in the future. Precipitation in the foothills of the Tatra Mts. is the highest in Poland, and it led to many hazardous floods, e.g., in 1934, 1997, 2001, and 2010.

There are various mechanisms of flood occurrence and other contributors affecting the flood hazard. Climate change, especially warming, increases the frequency and intensity of precipitation. Changes in the management of the drainage basins, including land use and forest cover, are also significant.

Under the project, the significance of trees in relation to the transport of rubble and its importance as a source of information on the future flood occurrences (dendrochronology) have been widely studied.

Flood hazard reduction options have been considered, including the traditional dominant strategy, e.g., the construction of protective facilities, embankments, and reservoirs.

Mimo wielkich inwestycji w dziedzinie ochrony przeciwpowodziowej, powodzie rzeczne stanowią nadal poważny problem, z którym nie radzi sobie zadowalająco żadne państwo na świecie. Powodzie przyczyniają się do wysokich strat materialnych, zagrażają ludziom, powodując cierpienia wielu osób, a także generując liczne ofiary śmiertelne. W ciągu ostatnich trzech dekad globalne straty powodziowe (z uwzględnieniem inflacji) wzrosły ponad trzykrotnie, osiągając przeciętnie poziom dziesiątek miliardów dolarów w ciągu roku. Jest tak, mimo wysiłków w celu redukcji ryzyka.

Powodzie mają wyjątkowo dramatyczne konsekwencje, jeśli zdarzają się w zamieszkałych dolinach. Niekorzystne skutki powodzi obejmują bezpośrednie niszczenie mienia, wpływ na zdrowie, dobrostan i produktywność, a pośrednie skutki odczuwalne są w różnych sektorach gospodarki: rolnictwie, transporcie, zaopatrzeniu w wodę, ochronie zdrowia, przemyśle i turystyce. W ostatnich dwóch dziesięcioleciach Polska szczególnie ucierpiała podczas wielkich powodzi w latach 1997 i 2010.

Na przedpolu Tatr największym zagrożeniem naturalnym dla ludzi i mienia są



Rys. 1. Mapa obszaru badawczego analizowanego w projekcie FLORIST

właśnie powodzie i osuwiska. Polsko-szwajcarski projekt badawczy „Zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr” (FLORIST, PSPB 153/2010) koncentruje się na powodziach, występujących na ciekach wypływających z polskich Tatr [3]. Projekt umożliwił uzyskanie wartościowych wyników naukowych, opisanych m.in. w książce pod redakcją Kundzewicza i in. [4]. Jednocześnie, wyniki projektu mogą podnieść świadomość i wiedzę na temat ryzyka powodziowego

na przedpolu Tatr u przedstawicieli władz centralnych i samorządowych oraz sektora pozarządowego, w tym podejmujących decyzje i mających wpływ na podejmujących decyzje. Celem projektu FLORIST jest stwierdzenie, jak zmieniło się zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr w przeszłości, a także próba odpowiedzi na pytanie, jak zagrożenie powodziowe może wyglądać w przyszłości.

Projekt FLORIST uzupełnia więc wiedzę o dotychczasowych powodziach na przedpolu Tatr. W projekcie wykorzystano obserwacyjne dane hydrologiczne i meteorologiczne z sieci IMGW-PIB, wyniki badań terenowych, zapisy archiwalne, analizę dostępnej literatury, a także przeprowadzono warsztaty z reprezentantami kluczowych instytucji dla badanego obszaru.

Tatry i ich podnóże stanowią obszar mający ogromne znaczenie w stosunkach wodnych Polski. Tu rodzą się powodzie, które mogą przemieszczać się daleko w dół Wisły. Zasoby wodne na tym obszarze są najbogatsze w całym kraju. Dynamika obiegu wody w obszarach górskich jest bardzo wysoka ze względu na stromą rzeźbę terenu i niską przepuszczalność gruntu, a więc powstająca powódź rozwija się szybko. Intensywnemu spływowi powierzchniowemu i podpowierzchniowemu sprzyja gęsta sieć dróg rolniczych i leśnych.

■ Wysokie opady i powodzie na przedpolu Tatr

Opady w Wysokich Tatrach są obfite, wyższe niż gdzie indziej w Polsce. Średnie roczne sumy opadów na wysokości 1400 m n.p.m. i powyżej przekraczają 1500 mm. Najwyższe roczne sumy opadów zanotowano w roku 2001 w Dolinie Pięciu Stawów (2770 mm), na Hali Gąsienicowej (2628 mm) i na Kasprowym Wierchu (2599 mm). Rekordy opadu dobowego na 6 stacjach przekraczają 150 mm, przy czym zanotowane w roku 1973 rekordy wynoszą: na Hali Gąsienicowej 300 mm, na Kasprowym Wierchu 232, a na Hali Ornak 205,3. Analogiczna jest kolejność stacji z rekordowymi 5-dniowymi sumami opadów, odno-



Fot. 1. Powódź w Nowym Targu w roku 1934. Źródło: Narodowe Archiwum Cyfrowe

townymi w 1980 roku: Hala Gąsienicowa 425,2 mm, Kasprowy Wierch – 388,7 i Hala Ornak 343,6. Suma opadów rocznych na północnych stokach Tatr jest o około 200 mm wyższa niż na południowych stokach, gdzie zachodzi zjawisko cienia opadowego.

Najstarsze pomiary stanów wody w rzekach u podnóża Tatr sięgają drugiej połowy XIX wieku. Wykorzystując informacje historyczne (zapisy w archiwach, księgach parafialnych itd.) oraz dendrochronologię, można rozszerzyć okres, dla którego mamy wiedzę o dawnych powodziach. Drzewa, rosnące na brzegach koryt, stanowią archiwum informacji o warunkach, w których żyły, są więc naturalnym wodowskazem.

Z danych z IMGW-PIB wynika, że w lipcu 1970 i czerwcu 1973 (czyli wtedy, kiedy odnotowano maksymalne opady dobowe) wystąpiły wysokie przepływy na wszystkich

trzech analizowanych rzekach (Białka, Cicha Woda i Czarny Dunajec). Bardziej współczesne wystąpienia wysokich przepływów, plasujące się na liście 5 najwyższych w okresie 1961-2011, datowane są na lipiec 2008 (Białka), lipiec 1997 (Białka i Cicha Woda) oraz lipiec 2010 (Czarny Dunajec).

Duże powodzie mogą spowodować istotną zmianę morfologii koryta i znaczne straty ekonomiczne. W dół od górskich odcinków rzek, ogromne masy wód powodziowych płyną doliną Wisły, przerywając obwałowania i powodując zalanie rozległych obszarów w różnych miejscach, nawet w odległości 400 km od gór.

W XX wieku najdotkliwsza w skutkach powódź w dorzeczu górnej Wisły wystąpiła 11-18 lipca 1934 r. Powódź spowodowały kilkudniowe intensywne deszcze. Na skutek napływu wilgotnych mas powietrza z północy, miały miejsce najwyższe zanotowane dobowe opady atmosferyczne po północnej stronie Karpat. Opady skupiały się głównie nad górnym Dunajcem, Rabą, a także ich dopływami. Najwyższe 3-dniowe opady zanotowano 16-18 lipca 1934 r. na Hali Gąsienicowej (422 mm), podczas gdy miesięczna suma opadów w lipcu wyniosła 684 mm. Podczas powodzi w 1934 roku 55 osób straciło życie.

Kolejna wielka powódź, która objęła rejon przedpola Tatr, wystąpiła w lipcu 1997 r. [5]. Choć w skali Polski była to powódź katastrofalna (55 ofiar śmiertelnych i straty w wysokości kilkunastu miliardów złotych), szczególnie na Odrze i jej dopływach, straty na przedpolu Tatr relatywnie nie były wysokie. Oddany kilka miesięcy wcześniej Zbiornik Czorszyński na Dunajcu, wypełniając się, zmniejszył potencjalne zniszczenia zabudo-

Fot. 2. Powódź w Zakopanem w roku 1934. Źródło: Narodowe Archiwum Cyfrowe



wań wzdłuż Dunajca i odcinka Wisły poniżej ujścia Dunajca.

W maju 2010 r. Polska znajdowała się pod wpływem układów niskiego ciśnienia atmosferycznego, z którymi związane były intensywne i długotrwałe opady deszczu, w szczególności w południowej części kraju, które spowodowały powstanie 16 maja 2010 r. fali powodziowej m.in. na rzekach Podhala. Najwyższe opady dobowe zanotowano 15 maja 2010 r. na Hali Gąsienicowej (121,3 mm) oraz na Polanie Chochołowskiej (116 mm). W województwie małopolskim ucierpiały łącznie 12 093 rodziny [1].

■ Mechanizmy powstawania powodzi

Powodzie są sporadycznymi zdarzeniami, zazwyczaj o rzadkiej powtarzalności w danym miejscu. Powodzie rzeczne są zjawiskami naturalnymi, manifestującymi naturalną przestrzenną i czasową zmienność takich elementów geofizycznych, jak poziom i przepływ wody w rzece, które od czasu do czasu mogą przyjąć bardzo wysokie wartości.

Wysokie przepływy rzeczne w dorzeczu górnej Wisły mogą być generowane przez trzy zasadnicze mechanizmy, związane z czasem wystąpienia powodzi (porą roku), lokalizacją i zasięgiem terytorialnym: • deszcz o umiarkowanej intensywności, który trwa kilka dni na dużym obszarze i powoduje powódź o wielkiej skali, • deszcz o krótkim czasie trwania i wysokiej intensywności, np. opad konwekcyjny zazwyczaj w okresie letnim, powodujący lokalne powodzie, oraz • topnienie śniegu, któremu lokalnie mogą towarzyszyć zatory lodowe.

Występowanie powodzi u podnóża Tatr wykazuje znaczną zmienność między latami i dziesięcioleciami, jednak widoczne są pewne regularności, np. w sensie zmiany sezonowego rozkładu przepływów, zmniejszenia amplitud wysokich przepływów w zimie i zwiększenia jesienią i wiosną.

Powodzie na przedpolu Tatr zależą od wielu czynników: klimatu, systemów hydrologicznych (geologia, gleby, ewolucja geomorfologiczna, struktura krajobrazu, użytkowanie gruntów, w tym: wylesienie, urbanizacja, i regulacja rzek), a także zapór i wałów. Wszystko to wpływa na kształtowanie transformacji opadu w odpływ rzeczny. Osuwiska są często wywoływane przez te same opady, które powodują poważne powodzie, ale może je również aktywować wysoka suma opadów o mniej-



Fot. 3. Most na Czarnym Dunajcu w Długopolu może łatwo zostać zablokowany przez napławiony w czasie powodzi rumosz drzewny. Sprzyja temu niewielka szerokość koryta i obecność filaru w jego obrębie
Fot. Bartłomiej Wyżga

szej intensywności, występujących przez dłuższy czas.

Ważne dla wywołania powodzi są warunki poprzedzające, na przykład nasycenie naturalnej retencji w zlewni (magazynowanie wody powierzchniowej i wilgoci w glebie), wynikające z wcześniejszych opadów czy roztopów. Jeśli pojemność dostępnej retencji jest ograniczona z powodu wysokiego poziomu wód gruntowych i wilgotności gleby, nawet umiarkowane ilości opadów mogą generować dużą powódź (jak to było w Polsce w maju i czerwcu 2010). Kombinacja czynników może przyczynić się do powstawania dużej powodzi (np. jeśli wystąpiły opady i roztopy).

Regulacja oraz wcięcie koryta znacznie zmodyfikowały morfologię koryta Czarnego Dunajca, która teraz obejmuje wiele typów morfologicznych (koryto pojedyncze, wielonurtowe, wcięte lub koryto regulacyjne). Obecnie duże ilości materiału drzewnego dostają się w czasie powodzi z zalesionych brzegów koryt i kęp do cieków wodnych i mogą powodować szkody powodziowe, jeżeli osiadają w bardziej wrażliwych miejscach, zatykając wąskie odcinki rzek i blokując mosty, co w efekcie może prowadzić do zalania obszarów nadrzecznych i zniszczenia mostów.

Wzrost lesistości na badanym obszarze ma wyraźny wpływ na przepływy powodziowe w zlewniach górskich, a i budowa zbiorników zaporowych umożliwiła pewne zmniejszenie szczytowych przepływów fal powodziowych, chociaż wielofunkcyjność

zbiorników może ograniczać ich efektywność w redukcji przepływów maksymalnych. Z kolei, powszechna regulacja koryt i wcinanie się rzek powodują tendencję do zmniejszenia retencji wód powodziowych na terenach zalewowych i przyspieszenia przepływu fal powodziowych, czego konsekwencją jest wzrost zagrożenia powodziowego w niższym biegu rzeki. Budowa wałów przeciwpowodziowych znacznie ograniczyła powierzchnię aktywnych teras zalewowych, zachęcając do intensywnego zagospodarowywania dolin rzecznych, zwiększając w ten sposób potencjał strat powodziowych.

Kilkuletni monitoring transportu grubego rumoszu drzewnego w potoku Kamienica w Gorczańskim Parku Narodowym wykazał, że drzewa powalone do koryta są tam przenoszone na niewielkie odległości i nie stanowią zagrożenia dla niższych, zamieszkałych odcinków doliny. W dolinie Czarnego Dunajca inwentaryzacja grubego rumoszu drzewnego, eksperyment monitorowania ruchu kłód z użyciem nadajników radiowych oraz modelowanie numeryczne wskazują na wysoki potencjał transportu drewna w wąskim korycie rzeki górskiej, a w szerokich korytach wielonurtowych, które funkcjonują jako naturalne pułapki na drewno, wysoki potencjał depozycji drewna. Wegetatywna regeneracja żywego drewna wierzb znacznie zmniejsza możliwość jego mobilizacji w czasie kolejnych powodzi. Wyniki tego badania pomagają zrozumieć skomplikowane relacje między powodziami a ruchem drewna.

■ Czynniki zmian ryzyka powodzi

Pojęcie ryzyka powodziowego zazwyczaj ilustruje się iloczynem prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i potencjalnych negatywnych skutków związanych z jej wystąpieniem. Pojęcie to łączy prawdopodobieństwo różnych możliwych klas powodzi i ich negatywne konsekwencje (dotyczące zdrowia, dobrostanu człowieka, ekosystemów, infrastruktury, wartości gospodarczych, społecznych i kulturalnych oraz usług). Zazwyczaj ryzyko powodziowe nie jest problemem, którym trzeba się natychmiast zająć. Chodzi o realny problem, który pojawi się w jakiejś nieokreślonej i niepewnej przyszłości. Ryzyko może być „uśpione” lub potencjalne, ale kiedy staje się aktywne, możemy mieć do czynienia z poważną klęską żywiołową. Mówiąc krótko, powódź wynika z wystąpienia dwóch elementów – niszczącej obfitości wody i potencjału strat w tym samym miejscu i czasie.

Istnieje wiele czynników, wyjaśniających wzrost ryzyka powodziowego, a mianowicie: prawdopodobieństwo wystąpienia wysokich stanów wody, ekspozycja i wrażliwość populacji i jej aktywów, potencjał strat (zależny od liczby ludności i bogactwa), rozwój gospodarczy obszarów zagrożonych powodzią, zdolność adaptacyjna, świadomość i postrzeganie ryzyka [2]. Na ryzyko powo-

dziowe wpływają zmiany w systemach społeczno-ekonomicznych, hydrologicznych i klimatycznych. Powszechnie dostępne i szczegółowe raportowanie katastrof przez media odgrywa również pewną rolę. Czasami określa się to jako tzw. efekt CNN – jeśli gdzieś na świecie wystąpi wielka powódź, mamy globalnego newsa w wieczornym serwisie informacyjnym w telewizji.

Klimat jest z pewnością bardzo ważnym czynnikiem, wpływającym na zagrożenie powodziowe, które zależy od różnych cech systemów klimatycznych i atmosferycznych, takich jak zdolność retencji wody (i zawartość pary wodnej) w atmosferze, różne charakterystyki opadu – intensywność, czas trwania, łączna suma, faza opadu (deszcz lub śnieg), rozkład przestrzenny i czasowy opadu, a także takich, jak determinanty cyrkulacji atmosferycznej oraz zjawiska niskich temperatur (wpływające na topnienie, zamrażanie). Zmiany klimatu mogą więc zmienić wiele czynników wpływających na powódź, wymienionych wyżej.

Raport specjalny Międzyrządowego Panelu ds. Zmian Klimatu, IPCC [6] orzeka o wpływie antropogenicznych zmian klimatu na niektóre zmienne wpływające na powódź. Nie ustalono jednak do tej pory bezpośredniego związku statystycznego między antropogenicznymi zmianami klimatycznymi i charakterystykami wielkości i / lub częstotliwości powodzi. Nie stwierdzono

możliwości przypisania odpowiedzialności za zaobserwowane trendy zmian przepływów maksymalnych antropogenicznym zmianom klimatu. Niemniej, w oparciu o prawa fizyki, można spodziewać się wzrostu częstotliwości i intensywności obfitych opadów w cieplejszym klimacie, co spowoduje wzrost ryzyka wystąpienia lokalnych powodzi (np. tzw. powodzi „błyskawicznych” i miejskich).

W klimacie, gdzie sezonowa pokrywa śnieżna i topnienie śniegu odgrywają znaczną rolę w rocznym odpływie, zmiany temperatury wpływają na reżim hydrologiczny. Istnieją liczne dowody na wcześniejsze wystąpienie przepływów szczytowych w rzekach o zasilaniu roztopowym. Sonia I. Senéviratne i in. [6] uznają za prawdopodobne, że częstość występowania intensywnych opadów i udział takich opadów w sumie całkowitej opadów wzrośnie w XXI wieku. Analiza pokazuje ogólną tendencję do zmniejszania się okresów powtarzalności intensywnych opadów – staną się one powszechniejsze.

Opady o wysokiej intensywności występują w Tatrach i u ich podnóża zwykle podczas ciepłej części roku, od maja do września, z maksimum w lipcu. Kilkuniedniowe intensywne deszcze nie tylko powodowały poważne powodzie i osuwiska ziemi w małych zlewniach, ale także katastrofalne powodzie na wielką skalę w dorzeczu górnej Wisły i dalej w dół rzeki. Najdotkliwsze powodzie

Fot. 4. Rozległy zwał drewna zdeponowany w szerokim, wielonurtowym korycie Czarnego Dunajca w czasie powodzi w maju 2014 roku. Depozycji rumoszu drzewnego sprzyjała tu stosunkowo mała głębokość i prędkość wód powodziowych w szerokim korycie

Fot. Bartłomiej Wyżga



wystąpiły w lipcu 1903, 1934, 1960, 1970, 1997, 2001 oraz w maju i czerwcu 2010.

Zmiany czynników klimatycznych ukształtowały zagrożenie powodziowe w dorzeczu górnej Wisły. Wzrost temperatury, wyraźnie dostrzegany już od kilkudziesięciu lat i przewidywany w dalszym ciągu w XXI wieku, wywołuje tendencję do zmniejszania częstości i amplitudy powodzi roztopowych oraz zwiększenia częstości występowania powodzi lokalnych, generowanych przez opady konwekcyjne o wysokiej intensywności. Zgodnie z prawem Clausiusa-Clapeyrona, w wyższych temperaturach rośnie ciśnienie nasycone pary wodnej w atmosferze. W związku z tym wzrost temperatury może prowadzić do występowania intensywniejszych opadów atmosferycznych, powodujących powodzie. Chociaż badania dotyczące intensywnych opadów w dwóch stacjach na północnych zboczach Tatr (Kasprowy Wierch i Zakopane) wskazują na brak istotnych statystycznie trendów, w obu stacjach stwierdzono słabe tendencje wzrostowe w maksymalnych dobowych, pięciodniowych i półrocznych (dla półrocza ciepłego) sumach opadów atmosferycznych, jak również w częstości dni z występowaniem opadu dobowego przekraczającego 50 mm.

Występowanie opadów powodujących powódź na analizowanym obszarze jest silnie powiązane z częstotliwością napływu powietrza z północy i północnego wschodu, pozostającego pod wpływem systemu niskiego ciśnienia. Występowanie typów cyrkulacji atmosferycznej, które uznaje się za najbardziej sprzyjające opadom powodującym powódź, nie jest częste, ale zazwyczaj przypada na przełom wiosny i lata, kiedy powodzie są bardziej prawdopodobne. Obserwuje się tendencję wzrostu częstotliwości występowania tych typów cyrkulacji.

Występowanie powodzi roztopowych zależy od czasu trwania pokrywy śnieżnej i jej grubości, a także od tempa wzrostu temperatury. W drugiej połowie XX wieku zanotowano słabą tendencję spadkową takich zmiennych, jak czas trwania pokrywy śnieżnej i jej grubość. Powodzie letnie różnią się pod względem czasu trwania i amplitudy, w zależności od opadów wywołujących powódź. Opad trwający kilka dni o łącznej sumie kilkuset milimetrów, czasami poprzedzony dłuższym okresem zwiększonego opadu, który nasycą płytką glebę, powoduje powódzie obejmujące całe podnóże Tatr lub znaczną jego część, a nawet całe dorzecze górnej Wisły. Cztery największe powodzie, które wystąpiły w lipcu 1934, 1970, 1997 oraz w maju 2010, były wywołane przez kilkudniowe serie opadów

o średnim natężeniu 8-10 mm/godz. Takie sytuacje zazwyczaj występowały przy cyrkulacji atmosfery transportującej masę powietrza z regionu Morza Śródziemnego do Europy Środkowo-Wschodniej, gdzie chmury z wielkim ładunkiem wody zatrzymywały się i powodowały długotrwałe opady o znacznej intensywności.

Określenie wpływu klimatu na występowanie i rozmiar powodzi nie jest łatwe ze względu na dynamikę i nieprzewidywalność zmian klimatycznych.

Wyniki badań przeprowadzonych na podstawie analizy szeregów czasowych wartości maksymalnych przepływów na Dunajcu pozwoliły stwierdzić, że:

- wysokość przepływów na rzece waha się między latami i dziesięcioleciami;
- obserwacje przepływów maksymalnych nie zwiększały się regularnie w kolejnych dziesięcioleciach, choć roczne przepływy maksymalne zwiększyły się w ostatnich latach;
- tendencje wzrostowe przepływów maksymalnych na Dunajcu obserwuje się dla wiosny, lata i jesieni. W zimie wysokość przepływów maksymalnych jest coraz mniejsza.

Duży wpływ na różnice w maksymalnych przepływach rocznych ma wysokość opadów. Można stwierdzić nieregularność związaną z okresami suchymi i wilgotnymi. W okresie 1951-1957 zanotowano mniejsze opady, podczas gdy okres 1958-1980 był dużo wilgotniejszy. Lata 1981-1996 znów można określić jako dość suche.

W projekcie FLORIST dokonano analizy modelowych projekcji klimatycznych na odległą przyszłość, umożliwiających uchwycenie zmian opadów, jakie mogą nastąpić. Modele wskazują, że w przyszłości (w perspektywie lat 2061-2100) w analizowanych stacjach meteorologicznych wzrosną średnie sumy roczne opadów atmosferycznych. Oczekuje się także wzrostu opadów intensywnych. Wzrost opadów może być mniej widoczny dla wartości średnich (np. suma roczna), jednak wyraźny w przypadku wskaźników ekstremalnych, takich jak: maksymalna suma 1-, 5-, 10-dniowa czy miesięczna opadów atmosferycznych, a także dla częstości dni z intensywnymi opadami (30 mm i 50 mm na dobę). Ten wzrost przewiduje się zwłaszcza dla stacji położonych powyżej 1000 m n.p.m., takich jak Kasprowy Wierch, Hala Gąsienicowa, Morskie Oko, Hala Ornak i Kuźnice.

Wiedza na temat zmian opadów ekstremalnych jest bardzo ważna dla adaptacji do zmian klimatu oraz redukcji przyszłego zagrożenia powodziowego. Zmiany maksymalnej sumy dobowej i sumy 5-dniowej

opadów są szczególnie ważne ze względu na możliwość spowodowania przez takie opady gwałtownych powodzi i osuwisk w małych zlewniach, zaś zmiany bardziej długotrwałych opadów (sumy 10-dniowe lub miesięczne) mogą mieć znaczenie dla występowania powodzi na większym obszarze.

Tak więc każdy wzrost ekstremalnych opadów może przyczynić się do wzrostu zagrożenia powodziowego w przyszłości. Pamiętać jednak należy, iż projekcje zmian ekstremów opadowych są związane z wielkimi niepewnościami. Duża jest także naturalna zmienność klimatu. Niemniej jednak w niedawnym czasie zaobserwowano szereg rekordów opadów w zlewni górnej Wisły, w latach wielkich powodzi – 2001 i 2010.

Ponieważ na ryzyko powodzi wpływa wiele czynników, zmiana któregośkolwiek z nich może prowadzić do wzrostu bądź spadku ryzyka powodziowego. Niewątpliwie odpowiedzialność za wzrost ryzyka powodziowego można w znacznym stopniu przypisać działaniom ludzi, którzy – mówiąc językiem mechaniki – zwiększyli obciążenie i obniżyli odporność systemu. Wzrost obciążenia można interpretować jako wzrost wielkości powodzi odpowiadającej określonemu opadowi atmosferycznemu, a spadek odporności można rozumieć jako wzrost potencjału strat powodziowych.

Istnieje wiele czynników antropogenicznych, które miały wpływ na ryzyko powodziowe na przedpolu Tatr. W średniowieczu osadnictwo powodowało wzmożony przepływ rumowiska ze stoków w kierunku dolin rzecznych. Ten proces transportu i akumulacji wywołał zmiany w dolinach i korytach rzecznych i zwiększenie powierzchni zalanej podczas intensywnych opadów letnich. Wzrost liczby ludności doprowadził do masowego wylesiania zlewni i powiększania powierzchni upraw. Wylesianie zlewni na przedpolu Tatr postępowało aż do początku XIX wieku, a następnie lesistość pozostawała na niskim poziomie, co sprzyjało szybkiemu odpływowi powodziowemu i powstawaniu wysokich fal powodziowych. W drugiej połowie XX wieku lesistość znacznie wzrosła. Na przykład, w górnej części zlewni Dunajca lesistość wzrosła z 27% w 1901 do 42% w roku 2000. Wzrost lesistości wiązał się ze zmniejszeniem powierzchni gruntów ornych. W górnej części zlewni Dunajca powierzchnia użytków rolnych zmniejszyła się z 42% w 1901 do 17,5% w 2000 roku, częściowo na korzyść łąk.

W ostatnim stuleciu w dorzeczu górnej Wisły zmieniło się znacznie zagospodarowanie przestrzenne i zarządzanie rzekami, wpływające na poziom zagrożenia powo-

dziwego. Wzrost lesistości i ograniczenie gospodarki rolnej oraz budowa zbiorników zaporowych opóźniały odpływ i sprzyjały zmniejszaniu szczytowych przepływów powodziowych. Z kolei regulacje koryt, wcinanie się rzek i ich obwałowanie ograniczały retencję wód powodziowych i prowadziły do zwiększania szczytowych przepływów. W efekcie tych przeciwstawnych oddziaływań nie obserwuje się regularnego wzrostu maksymalnych rocznych przepływów w czasie. Ponieważ jednak rośnie zagospodarowanie den dolin i wartość znajdującego się tam majątku, rośnie też ryzyko powodziowe w skali całego regionu.

Wzrost lesistości zlewni i ekspansja lasów nadrzecznych w dolinach spowodowały, że obecnie dostawa powalonych drzew do koryt rzek jest znacznie większa niż kilkadziesiąt lat temu. Niewielkie, nieuregulowane potoki cechuje mała mobilność grubego rumoszu drzewnego i nie stanowi on w nich istotnego zagrożenia powodziowego dla niższych, zagospodarowanych odcinków dolin. Natomiast szerokie, wielonurtowe odcinki rzek górskich są miejscem preferencyjnej depozycji rumoszu drzewnego, sprzyjając wychwytywaniu drewna z wód powodziowych i ograniczając jego przenoszenie do niższych odcinków dolin. Z kolei, wąskie odcinki rzek górskich, uformowane w wyniku regulacji koryta i wcinania się rzek, sprzyjają przenoszeniu rumoszu drzewnego na wielokilometrowe odległości. W rezultacie, w czasie powodzi może dochodzić do formowania się niebezpiecznych zatorów z napławionego drewna, np. w przekrojach mostowych.

Straty gospodarcze w wyniku powodzi znacznie wzrosły w ciągu ostatnich dziesięcioleci, głównie z powodu rosnącej ekspozycji zagrożonych aktywów, i to nie tylko w dorzeczu górnej Wisły, ale też w skali całego kraju, kontynentu europejskiego i globu.

■ Zabezpieczenia przed powodzią

Na terenach zagrożonych powodzią jest niemal pewne, że kiedyś woda pojawi się tam, gdzie zwykle jej nie ma i gdzie się jej nie spodziewamy. Nie można w pełni zabezpieczyć się przed wystąpieniem powodzi, ale można i trzeba zredukować ryzyko powodziowe. Potrzebna jest poprawa świadomości zagrożenia, możliwych konsekwencji powodzi i sposobów postępowania, zarówno wśród instytucji odpowiedzialnych za osłonę przed powodzią, jak i mieszkańców i użytkowników zagrożonych terenów.

Można wyróżnić pięć strategii składających się na kompleks zarządzania ryzykiem powodziowym: • zapobieganie – trzyma-

nie ludzi z dala od groźnej wody, • obronę – trzymanie groźnej wody z dala od ludzi, • łagodzenie powodzi, • przygotowanie do powodzi, oraz • odbudowę po powodzi (choć oczywiście jest szereg innych klasyfikacji, niemniej niemal wszystkie obejmują przedstawione strategie, inaczej je nazywając). Druga z tych strategii, wykorzystująca metody techniczne, obwałowania i zbiorniki, tradycyjnie dominuje na przedpolu Tatr (i ogólnie – w Polsce). Strategie zarządzania ryzykiem powodziowym powinny być odpowiednie do kontekstu, w którym są stosowane, a także, w zależności od skuteczności działań, realizowane łącznie.

Wśród różnych metod redukcji ryzyka powodzi, najkorzystniejsze wydaje się połączenie różnych rozwiązań. Poza tradycyjnie dominującymi rozwiązaniami hydrotechnicznymi (np. obwałowania) należy wziąć pod uwagę możliwość innych działań. Chodzi o rozwiązania planistyczne (adekwatne planowanie przestrzenne, wyłączenie terenów zagrożonych wystąpieniem powodzi z planów zabudowy), odpowiednie przygotowanie (plany ewakuacji, magazyny, przeszkolenie) czy zabezpieczenie na wypadek wystąpienia powodzi (ubezpieczenia, działania w kierunku ograniczania spływu powierzchniowego w obszarach zurbanizowanych i magazynowania wody opadowej).

Od końca XIX wieku działania przeciwpowodziowe na przedpolu Tatr oraz w całym dorzeczu górnej Wisły były oparte na koncepcji szybkiego odprowadzania wód powodziowych, które wiązało się ze znacznym zmniejszeniem retencji wód powodziowych w dolinach rzecznych. Taka polityka zarządzania ryzykiem powodziowym wynikała nie tylko z nieznamości innych metod i z ogólnie technokratycznego podejścia do natury, ale także z konieczności ochrony gruntów ornych w sąsiedztwie rzek. W owym czasie rolnictwo zapewniało utrzymanie większości społeczeństwa. Na przełomie XIX i XX wieku zostały zbudowane wały przeciwpowodziowe wzdłuż górnej Wisły i w dolnym biegu jej głównych górskich dopływów. W ciągu XX wieku wały przeciwpowodziowe zostały również zbudowane wzdłuż krótkich partii środkowych i górnych biegów karpacczych dopływów Wisły. Liczne odcinki wałów zostały zmodyfikowane przez zwiększenie wysokości lub wyprostowanie, szczególnie na górnej Wiśle, gdzie w ciągu ostatniego stulecia zostały odcięte liczne meandry rzeczne. Zmniejszenie szerokości terasy zalewowej, spowodowane budową obwałowań, zwiększyło stany wody, odpowiadające określonym przepływom wezbraniowym.

Katastrofalna powódź z lipca 1934 roku spowodowała przyspieszenie prac projektowych i budowlanych, dotyczących obwałowań rzek, zapór i zbiorników zaporowych, a także regulacji potoków i rzek na obszarach górskich. Zbiornik w Porąbce na Sole oddano do użytku w 1936 roku. W porównaniu z dzisiejszymi warunkami, w niezwykle krótkim czasie zdecydowano o budowie pierwszego na Dunajcu zbiornika w Rożnowie. Następny miał być zbiornik czorszyński, dla którego dokumentację przygotowano już przed wojną. W okresie PRL-u wspomnienie o powodzi 1934 było wciąż żywe i w 1964 roku władze zdecydowały o usytuowaniu zapory w Niedzicy, której budowa rozpoczęła się w 1969 roku. Inwestycja ciągnęła się przez wiele lat i została ukończona w 1997 roku, przed wielką powodzią.

Zbiorniki retencyjne zostały zbudowane dla zatrzymywania wody podczas dużych opadów oraz zapobieżenia powodziom przez redukcję najwyższych przepływów rzecznych. Efektywność ograniczenia przepływu szczytowej fali powodziowej przez poszczególne zbiorniki zaporowe jest bardzo zróżnicowana, w zależności od położenia danego zbiornika, jego funkcji oraz przebiegu dopływu do zbiornika podczas konkretnej fali powodziowej. Z biegiem czasu zbiorniki nabyły nowych funkcji, a obecnie większość z nich ma charakter zbiorników wielozadaniowych, przy czym zadaniami dominującymi są zazwyczaj ochrona przed powodzią i wykorzystanie energii wodnej. Niemniej, zdarzają się sytuacje, gdy zbiornik wielozadaniowy, ze względu na ochronę środowiska czy rekreację, ma ograniczoną możliwość ochrony przeciwpowodziowej.

Jeszcze innym efektem regulacji rzek, zwłaszcza prostowania meandrów, było skrócenie czasu ruchu fal powodziowych. Od początku XX wieku do roku 1980, czas ruchu fal powodziowych na Wiśle pomiędzy ujściem dopływów Skawy i Raby zmniejszył się o połowę (z 44 godzin do 22 godzin). Zmieniło to synchronizację fal powodziowych na Wiśle i jej górskich dopływach, szczególnie na Dunajcu. W efekcie, szczyt fali powodziowej na dopływach mógł nakładać się na szczytowy przepływ na Wiśle, zwiększając zagrożenie poniżej ujścia dopływów.

Obwałowania rzeki zapewniają tylko lokalną ochronę przed powodzią, a zagrożenie powodziowe jest przesunięte w dół rzeki, gdzie szczytowe przepływy zwiększają się w wyniku zmniejszonej możliwości magazynowania wód powodziowych w zwężonych terasach zalewowych w przekrojach powyżej. Zmniejszenie szerokości zalewowej prowadzi do wzrostu stanów wody osiągnię-

tych przy określonym przepływie w obrębie obwałowanego odcinka rzeki.

Przeprowadzona regulacja rzek i transformacja systemu rzecznoego (skrócenie biegu rzeki) oraz intensywna urbanizacja zwiększyły prędkość przepływu wody w korytach. Inżynieria wodna odpowiadała i na potrzeby dotyczące wykorzystania rzeki do transportu produktów, i ochrony przeciwpowodziowej obszarów w pobliżu rzeki, na których zostało rozwinięte osadnictwo. Najpoważniejsze zmiany hydrauliki koryt obejmowały skrócenie biegu rzeki oraz zwężenie naturalnej doliny przez obwałowania. Regulacje rzek i górskich potoków służyły i nadal służą jako zabezpieczenie przed zalaniem oraz erozją brzegów podczas powodzi. Ponieważ budowa wałów (a w efekcie stworzenie iluzji bezpieczeństwa na terenach chronionych wałami) spowodowała intensywny rozwój obszarów przyległych, usunięcie obwałowań chroniących miasta jest niemożliwe. Wątpliwa jest jednak sensowność podnoszenia istniejących obwałowań lub budowy nowych w górskim i podgórskim biegu rzek. Podnoszenie wałów powoduje wzrost ciśnienia wody podczas powodzi, a zatem zwiększa prawdopodobieństwo rozmycia wałów. Powstanie nowych wałów w górskich i podgórskich odcinkach dolin uniemożliwia zalanie obszarów słabiej rozwiniętych, głównie rolniczych. Z budowy obwałowań wynika nieunikniony wzrost zagrożenia powodziowego w partiach biegu rzeki poniżej obwałowanego odcinka.

Dzięki możliwości przechwycenia części objętości fal powodziowych, zbiorniki zaporowe mogą znacznie zmniejszyć zagrożenie powodziowe w dolnym biegu rzeki. Jednak ta ważna rola zbiorników zaporowych, umożliwiających redukcję zagrożenia powodziowego, jest ograniczona w wyniku przerwania ciągłości transportu materiału dennego do rzeki w dół od zbiornika. Prowadzi to do degradacji dna koryta, a to, z kolei, prowadzi do zwiększenia pojemności koryta i ogranicza magazynowanie wody powodziowej na dnie doliny. Problem ten może być rozwiązany przez zasilanie odcinka rzeki poniżej zbiornika materiałem dennym osadzonym na wlocie rzeki do zbiornika.

Skuteczne zarządzanie ryzykiem powodziowym wymaga odpowiedniego rozpoznania częstotliwości występowania przepływów powodziowych o określonej wielkości oraz charakterystyki parametrów hydraulicznych rzek. Powodzie powstające w zlewniach małych potoków górskich u podnóża Tatr mogą stanowić istotne zagrożenie dla odcinków rzek poniżej, gdzie istnieje wysoki potencjał strat powodziowych i powodzie mogą rozwinąć się bardzo szybko.

W XX wieku rzeki u podnóża Tatr wcinają się w podłoże, zwiększając przepustowość koryt i znacznie zmniejszając możliwości retencji wód powodziowych na obszarach zalewowych. Jest zatem konieczne przywrócenie potencjału retencji wód powodziowych na terasach zalewowych. Można to osiągnąć przez obniżenie powierzchni teras. Wzrost retencji na terasach zalewowych może być uzyskany przez usunięcie części osadów z dna doliny i utworzenie nowych terenów zalewowych o niższej wysokości.

Metody zarządzania ryzykiem powodziowym, zarówno w całej Polsce jak i na przedpolu Tatr, koncentrują się na technicznych rozwiązaniach infrastrukturalnych (wały przeciwpowodziowe, zbiorniki retencyjne). Odpowiada to tradycyjnemu paradygmatowi, wynikającemu z przeszłych doświadczeń i silnej pozycji specjalistów z dziedziny hydrotechniki. W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się jednak tendencję do uzupełniania metod infrastrukturalnych o działania podejmowane w trakcie powodzi, związane głównie z pomocą kierowaną do mieszkańców terenów zalewowych (np. działania ostrzegawcze i plany ewakuacyjne ludności, sprawne funkcjonowanie służb ratunkowych). Na uwagę zasługuje też istnienie coraz bogatszej informacji o nadchodzących zjawiskach meteorologicznych i hydrometeorologicznych, dostępnej dla każdego w Internecie. Na internetowym portalu IMGW-PIB: <http://pogodynka.pl/radary> można śledzić, jak przesuwają się opady i jaka jest ich intensywność, z kolei na stronie: <http://monitor.pogodynka.pl/> sprawdzić aktualne stany wód. Bardzo istotną funkcję pełni też doraźna ochrona mienia (worki z piaskiem, wypompowywanie wody).

Projekt FLORIST skupia się na przedpolu Tatr, jednak nie sposób pominąć zmiany w sposobach zarządzania ryzykiem powodziowym na poziomie krajowym. Uczymy się na błędach (swoich lub cudzych), które uświadamiamy sobie podczas wielkich powodzi, po to, by w przyszłości radzić sobie lepiej. Wystąpienie zdarzenia kryzysowego pozwala zmienić sposób myślenia o niebezpieczeństwie w takim kierunku, by w przyszłości podobna sytuacja nie stanowiła już zagrożenia, a cały system był bardziej odporny. Istotną rolę w ulepszeniu systemu odegrała powódź z 1997 roku, która doprowadziła do wprowadzenia reform na poziomie legislacyjnym i organizacyjnym, łącznie z uchwaleniem w 2001 r. ustawy Prawo wodne. Legislacyjne pokłosie tej katastrofalnej powodzi obejmuje również wprowadzenie ustawy o klęskach żywiołowych (2002) oraz ustawy o zarządzaniu kryzysowym (2007).

Powyższe zmiany w legislacji uzupełniły swoją lukę w prawie dotyczącym działań w kontekście zagrożenia powodziowego. Niemniej, wielokrotnie modyfikowane Prawo wodne z czasem stworzyło poczucie braku stabilności przepisów, co z kolei zachęciło decydentów do sięgania po sprawdzone, tradycyjne – rozwiązania hydrotechniczne, mające na celu radzenie sobie z ryzykiem powodziowym.

Wejście Polski do Unii Europejskiej także miało znaczny wpływ na zmiany ustawodawstwa krajowego. Ramowa Dyrektywa Wodna i Dyrektywa Powodziowa doprowadziły w Polsce do bardziej zintegrowanej oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim. W praktyce oznaczało to, że implementacja Dyrektywy Powodziowej obligowała jednostki odpowiedzialne za administrowanie rzekami do przygotowania map zagrożenia i ryzyka powodziowego, które zostały opracowane dla głównych rzek karpackich oraz dla większości ich największych dopływów. Efekt prac, z możliwością wglądu w to, które tereny mogą być potencjalnie zalane, jest dostępny na portalu internetowym: <http://mapy.isok.gov.pl/imap/>.

Projekcje przyszłych opadów dla obszaru północnego skłonu i przedpola Tatr, uzyskane przy użyciu modeli klimatycznych, wskazują, że w wyniku ocieplenia klimatu może nastąpić wzrost częstości i wielkości intensywnych opadów. To oznacza, że przyszłe powodzie mogą występować częściej i być gwałtowniejsze. Zmiany klimatu mogą więc stać się istotnym czynnikiem wzrostu zagrożenia powodziowego, wymuszając stosowne działania adaptacyjne. ♦

Literatura

- [1] Biedroń I., Bogdańska-Warmuz R., Kwiecień M., 2011, *Szkody i straty powodziowe w dorzeczu Wisły*. [w:] Maciejewski M., Ostojki S.M., Walczykiwicz T., (red.): *Dorzecze Wisły – monografia powodzi 2010*. IMGW PIB, Warszawa. s. 171-182.
- [2] Kundzewicz Z.W. (red.), 2012, *Changes in flood risk in Europe*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, IAHS Special Publications 10.
- [3] Kundzewicz Z.W., Stoffel M., Kaczka R.J. i in., 2014, *Floods at the northern foothills of the Tatra Mountains - A Polish-Swiss research project*. Acta Geophysica 62(3), 620-641.
- [4] Kundzewicz Z.W., Stoffel M., Niedźwiedz T., Wyżga B. (red.), 2016, *Flood risk in the Upper Vistula Basin*. Springer.
- [5] Kundzewicz Z.W., Szamalek K., Kowalczak P., 1999, *The Great Flood in 1997 in Poland*. Hydrological Sciences Journal 44 (6), 855-870.
- [6] Seneviratne, S.I. i in., 2012, *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*. [w:] C.B. Field, i in. (red.) *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press.