

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

NOWOCZESNE METODY STOSOWANE W ZAKRESIE PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM POWODZI

Opracowanie wykonane zostało według następującego schematu wynikającego z opisu przedmiotu zamówienia:

- a) opis techniczny metody przeciwdziałania powodziom wraz założeniami teoretycznymi
- b) opis wad i zalet każdej metody
- c) ocena przydatności zastosowania metody
- d) korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod przeciwdziałania powodziom w stosunku do rozwiązania metodami konwencjonalnymi stosowanymi przez samorządy terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia (przedstawiono łącznie dla wszystkich metod).

Zgodnie z zamówieniem, celem tego opracowania nie było wskazanie nowoczesnych metod przeciwdziałania skutkom powodzi. Opracowanie przygotowano w oparciu o publikacje naukowe i analizę stron internetowych. Zamieszczono wykaz wykorzystanej literatury. Informacje pozyskano także u pracowników Uniwersytetów Śląskiego i w Żylinie.

I. Modelowanie hydrauliczne i hydrologiczne.

A. Opis techniczny metody przeciwdziałania powodziom wraz założeniami teoretycznymi

Modelowanie hydrauliczne koncentruje się na fizycznym przepływie wody w określonych strukturach, takich jak koryta rzek, kanały czy systemy kanalizacyjne, natomiast **modelowanie hydrologiczne** skupia się na procesach związanych z obiegiem wody w środowisku naturalnym.

Modelowanie hydrauliczne odnosi się do zjawisk fizycznych związanych z mechaniką płynów. Przykładem może być analiza zachowania wody w korytach rzek oraz na obszarach zalewowych. Dzięki temu można określić rzędne zwierciadła wody, a także prędkości, głębokości i kierunki jej przepływu.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Modelowanie hydrauliczne i hydrodynamiczne obejmuje nowoczesne techniki analityczne, które umożliwiają prognozowanie przepływów wód w danym rejonie. Dzięki zaawansowanym modelom można przeprowadzać szczegółowe symulacje, które uwzględniają zmienne warunki hydrologiczne, takie jak intensywność opadów, spływy powierzchniowe oraz efektywność istniejącej infrastruktury odwadniającej. Wyniki tych analiz pozwalają na identyfikację potencjalnych zagrożeń, takich jak obszary narażone na podtopienia czy problemy z wydolnością sieci kanalizacyjnej. **Modelowanie hydrauliczne jest obecnie jedną z najpopularniejszych metod wyznaczania map ryzyka i zagrożenia powodziowego.**

Rodzaje modeli hydraulicznych stosowanych w analizie wezbrań, oparte o modele matematyczne:

- jednowymiarowe (1D),
- dwuwymiarowych (2D),
- hybrydowe (sprzężone) (1D/2D, pseudo-2D),
- trójwymiarowe (3D).

Modele jednowymiarowe (1D) bazują na przekrojach poprzecznych rzeki. Obejmują one zarówno koryto rzeki, jak i obszary narażone na potencjalne powodzie. Przekroje te powstają w wyniku interpolacji danych wysokościowych z numerycznego modelu terenu (NMT) oraz danych batymetrycznych. Zbudowane na tych przekrojach modele hydrauliczne pozwalają na analizę prędkości przepływu wody w korycie, uwzględniając składową prędkości związaną z kierunkiem biegu rzeki (jeden wymiar). Wyniki modelowania jednowymiarowego dostarczają informacji na temat maksymalnego poziomu zwierciadła wody oraz średniej prędkości przepływu w odniesieniu do danego przekroju, w kierunku prostopadłym do niego. Zasięg fali wezbraniowej uzyskiwany jest w wyniku przecięcia poziomu wody z numerycznym modelem terenu (Bakuła, 2014). Modele te są stosowane głównie w prostych układach hydrograficznych – np. model HEC-RAS (1D).

Główne cechy modelu HEC-RAS (1D) (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), wykorzystywanego do symulacji wezbrań oraz oceny zagrożeń powodziowych to:

- obliczenia w stanie ustalonym (analiza przepływu dla stałego poziomu wody) i nieustalonym (dynamiczne zmiany poziomu wody w czasie)
- możliwość wizualizacji danych na mapach dzięki integracji z danymi GIS
- darmowy, co wpływa na jego szerokie zastosowanie.

Modele dwuwymiarowe (2D) obliczają przepływ wód o swobodnym zwierciadle, uśredniając w pionie prędkość przepływu, co polega na rozwiązaniu równań zachowania masy i pędu. Rezultatem

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

takiego podejścia jest określenie zasięgu fali wezbraniowej oraz głębokości wody. Dodatkowo, modele te pozwalają na określenie kierunku, zwrotu i wartości wektora prędkości wody w precyzyjnie zdefiniowanej siatce obliczeniowej, obejmującej praktycznie cały analizowany obszar. NMT nie ogranicza się jedynie do interpolacji wysokości w przyjętych przekrojach; po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń hydraulicznych, wykorzystuje się go do odjęcia wartości od numerycznego modelu powierzchni wody, podobnie jak miało to miejsce w modelowaniu jednowymiarowym (Bakuła, 2014).

Modelowanie 2D to skuteczna metoda do określenia zasięgu strefy zalewowej (Rycina 1, 2). Wykorzystując numeryczny model terenu, precyzyjnie identyfikuje obszar narażony na zalanie, prędkości chwilowe oraz kierunki przepływu wody. Co więcej, uwzględnia bilans objętości wody, która wpływa do i wypływa z terenów zalewowych (Radoń i Piórecki, 2012). Przykłady tego typu modeli to: **HEC-RAS (2D)**, **MIKE 21**, **TUFLOW**.

Stosuje się także **modele hybrydowe (1D/2D)**, będące kombinacją modelowania jedno- i dwuwymiarowego.

Trójwymiarowe modele hydrauliczne (3D) to zaawansowane narzędzia, które umożliwiają symulację przepływów wodnych w trzech wymiarach. Dzięki nim można przeprowadzać szczegółowe analizy skomplikowanych zjawisk hydrodynamicznych, takich jak turbulencje, wiry czy interakcje przepływów z infrastrukturą hydrotechniczną (badanie wpływu konstrukcji, takich jak mosty czy zapory, na lokalne warunki przepływu). Służą także do oceny zjawisk erozyjnych i sedymentacyjnych (przewidywanie miejsc podatnych na erozję oraz akumulację osadów), czy projektowania i optymalizacji infrastruktury wodnej. Przykłady oprogramowania do modelowania 3D: **FLOW-3D**, **ANSYS Fluent**, **TELEMAC-3D**, **OpenFOAM**.

Stosuje się także **modele hydrodynamiczne sprzężone z modelami meteorologicznymi, wykorzystującymi prognozy opadów do przewidywania wezbrań**. Integracja modeli hydrodynamicznych z meteorologicznymi, przy użyciu narzędzi takich jak **MIKE FLOOD** czy **LISFLOOD-FP**, jest niezwykle istotnym aspektem nowoczesnego zarządzania ryzykiem powodziowym oraz planowania zasobów wodnych.

Opracowywania modelu hydraulicznego obejmuje następujące czynności (Radoń i Piórecki, 2012):

- przygotowanie danych wejściowych (obsługiwanych przez model);

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- opracowanie przekrojów poprzecznych;
- opracowanie numerycznego modelu terenu (z uwzględnieniem linii nieciągłości takich jak obiekty kubaturowe, obwałowania, skarpy czy nasypy, które w istotny sposób mogą wpływać na zasięg terenów zalewowych);
- wprowadzenie parametrów obiektów mostowych i hydrotechnicznych (ustalenie elementów istotnych z punktu widzenia modelowania hydraulicznego takich jak współczynniki kontrakcji, wydatku lub strat szczególnie dla obiektów mostowych oraz hydrotechnicznych);
- określenie wartości współczynników szorstkości (podstawowy parametr służący kalibracji w modelu hydrodynamicznym);
- określenie warunków brzegowych procesu modelowania związanych z hydrogramami stanów wody;
- kalibracja modelu (wykonywana dla określonego wezbrania powodziowego, dla którego znany jest rozkład czasowy i przestrzenny przepływów oraz stanów wody; polegająca na określeniu parametrów modelu w taki sposób, aby otrzymać zgodny stan z powodziowym wezbraniem historycznym);
- weryfikacja modelu.

Dane wejściowe do modelowania hydraulicznego obejmują:

- dane topograficzne – numeryczny model terenu,
- dane hydrologiczne – przepływy i stany wody,
- dane meteorologiczne – intensywność i rozkład opadów,
- dane infrastrukturalne – mosty, wały, zapory, systemy odwadniające,
- dane o użytkowaniu terenu – roślinność, zabudowa, gleby.

W celu pełniejszej oceny zagrożenia powodziowego stosuje się **modele** hydrauliczne zintegrowane z modelami **hydrologicznymi**. Pozwala to m.in. na kompleksową analizę przepływów wód, tak niezbędną przy analizie zagrożenia powodziowego. Modelowanie hydrologiczne wspierane jest przez oprogramowanie GIS oraz specjalistyczne oprogramowanie pozwalające na symulację różnych procesów związanych z obiegiem wody, takich jak np. HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*), czy SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

Bardzo istotnymi elementami wpływającymi na jakość modelowania hydraulicznego i hydrologicznego są dokładne NMT (numeryczny model terenu) i NMPT (numeryczny model pokrycia terenu).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Numeryczne modele terenu opierają się na danych:

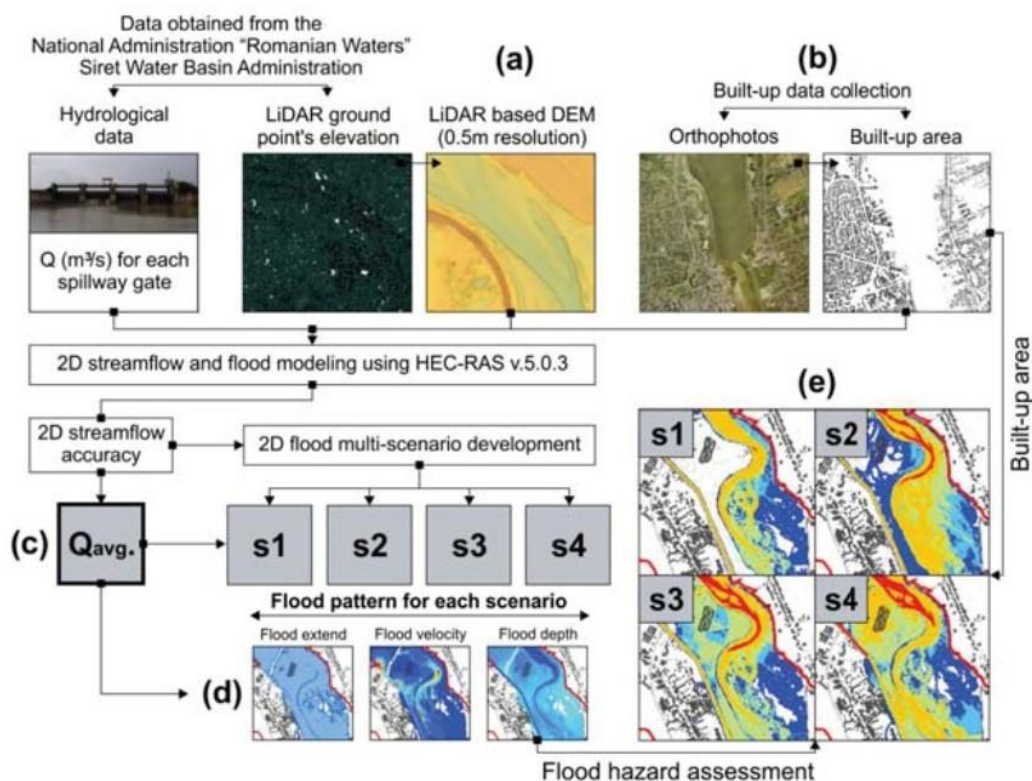
- pomiary terenowe z wykorzystaniem niwelatorów i odbiorników GPS,
- skaning laserowy (LiDAR) z wykorzystaniem skanera laserowego, który emituje impulsy laserowe i mierzy czas ich powrotu po odbiciu od powierzchni ziemi. W tym celu wykorzystuje się skanery lotnicze i naziemne,
- digitalizacja map topograficznych (przekształcanie map analogowych w cyfrowe),
- pomiary fotogrametryczne (przetwarzanie zdjęć lotniczych i naziemnych w celu uzyskania dokładnych danych wysokościowych),
- obrazy radarowe dostarczające informacji o wysokości terenu (dane z misji takich jak SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*).

Podstawowym NMT w Polsce jest model w siatce 1m x 1m, przygotowany na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego (ang. *Airborne Laser Scanning – ALS*), dla obszaru miast także na podstawie pomiarów stereoskopowych w ramach produkcji ortofotomapy o pikselu 10 cm i mniejszym (geoportal.gov.pl). Na podstawie danych lidarowych powstały także NMPT, które zawierają informacje o użytkowaniu terenu.

Dane hydrologiczne i meteorologiczne pochodzą ze stacji pomiarowych prowadzonych przez państwową służbę hydrometeorologiczną lub lokalnych systemów monitoringu prowadzonych przez inne podmioty. Postęp technologiczny umożliwił zastosowanie czujników IoT na stacjach pomiarowych. Czujniki IoT umożliwiają obiektom fizycznym wymianę danych, automatyzację zadań oraz interakcję zarówno z systemami centralnymi, jak i między sobą.

Polska – Słowacja

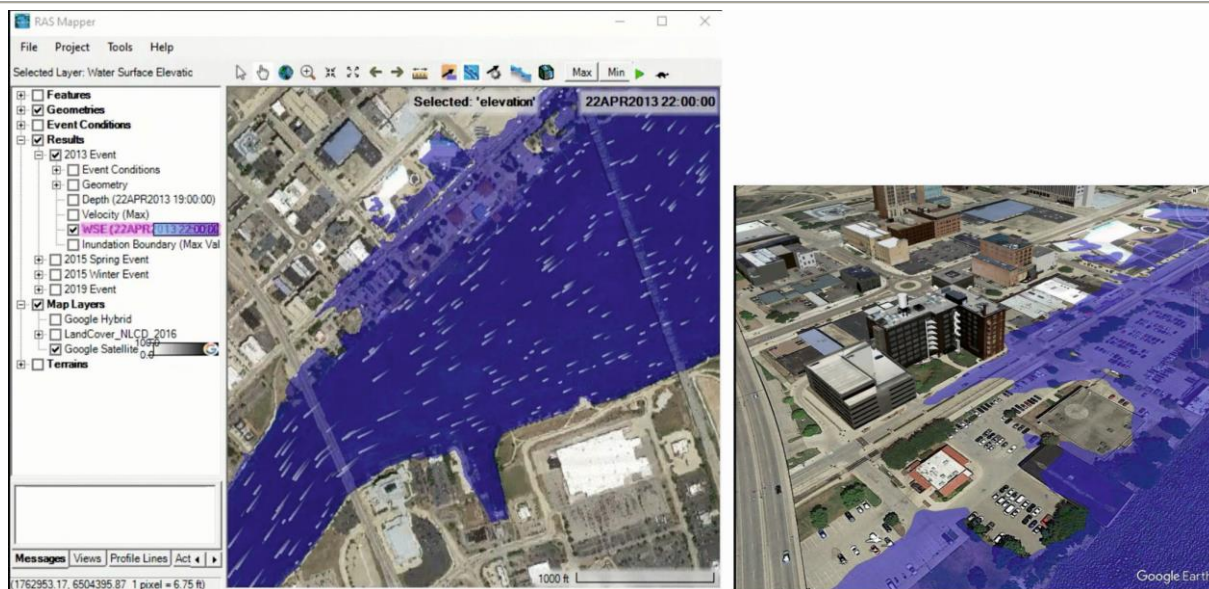
Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 1. Przykład schematu postępowania w procesie 2D- modelowania HEC-RAS przebiegu powodzi, w celu poprawy map zagrożenia powodzią miejską. (a) generowanie NMT (ang. DEM) na podstawie danych LiDAR; (b) ręczna digitalizacja budynków; (c) generowanie czterech scenariuszy 2D (s1–s4), z uwzględnieniem różnej wielkości przepływu; (d) generowanie schematu powodzi dla każdego obliczonego scenariusza i eksportowanie poszczególnych warstw (np. zasięgu powodzi, prędkości powodzi, głębokości powodzi); (e) ocena zagrożenia powodziowego na podstawie zgromadzonych danych i klasyfikacji głębokości (Mihu-Pintilie et al., 2019)

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 2. Widok rzeki Illinois w Peorii (stan Illinois), podczas powodzi w 2013 r., uzyskany przy użyciu modelu hydraulicznego (HEC-RAS) górnego biegu rzeki Missisipi. Obok wizualizacja fragmentu obszaru w widoku 3D Google Earth. <https://www.mvr.usace.army.mil/Missions/Flood-Risk-Management/UMRS-Hydraulic-Model-Update/>

B. Opis wad i zalet metody

Dzięki symulacjom mamy możliwość przewidywania ekstremalnych zjawisk hydrologicznych, co umożliwia podjęcie odpowiednich działań zaradczych i ograniczenie strat. Wykorzystanie modeli hydrologicznych i hydraulicznych umożliwia efektywne zaprojektowanie kluczowych elementów infrastruktury, takich jak mosty, przepusty, systemy odwadniające, zbiorniki retencyjne czy wały przeciwpowodziowe. Dzięki tym narzędziom można optymalizować parametry projektowanych obiektów oraz analizować różne scenariusze, co pozwala na znalezienie najkorzystniejszych rozwiązań. Modelowanie pozwala zwizualizować zagrożenie, co ułatwia przygotowanie strategii działania na wypadek wystąpienia zjawiska powodzi. Do zalet metody należy zaliczyć także znaczną ilość specjalistów z zakresu modelowania zjawisk hydrologicznych oraz dużą dostępność darmowego oprogramowania.

Stworzenie precyzyjnego modelu hydraulicznego jest zadaniem niezwykle czasochłonnym i wymagającym znacznego wysiłku. Proces ten wiąże się z gromadzeniem szczegółowych danych, ich analizą oraz kalibracją modelu. Należy pamiętać, że precyzja modelu jest ściśle związana z jakością i dokładnością danych wejściowych. Niedokładne lub niekompletne informacje mogą

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

prowadzić do błędnych wyników symulacji, co z kolei wpływa na wiarygodność całego modelu. Modele hydrauliczne powinny być regularnie aktualizowane, aby uwzględniały wszystkie istotne zmiany w systemie, takie jak rozwój infrastruktury czy zmiany w warunkach środowiskowych – w przeciwnym razie może dojść do nieścisłości w symulacji zjawiska i do wyciągania mylnych wniosków.

C. Ocena przydatności zastosowania metody

Nowoczesne modele komputerowe umożliwiają efektywniejsze zarządzanie ryzykiem powodziowym oraz podejmowanie odpowiednich działań ochronnych. Korzyści jakie niesie ta metoda to możliwość modelowania dowolnego obszaru, w zależności od potrzeb. W każdym powiecie są tereny szczególnie narażone na podtopienia wywołane intensywnymi opadami deszczu i/lub pojawieniem się przepływów powodziowych w rzekach. Modelowanie wybranych obszarów może być oparte o stale uaktualnianą bazę danych topograficznych, hydrologicznych, meteorologicznych i infrastrukturalnych, co pozwoli na dysponowanie najlepszą prognozą w razie wystąpienia zagrożenia, a tym samym zwiększy możliwość ograniczenia negatywnych konsekwencji powodzi.

II. Metody ekologiczne ograniczające skutki powodzi – retencja naturalna.

Spośród najskuteczniejszych metod przeciwdziałania skutkom powodzi jest sztuczna retencja powodziowa, czyli czasowe przetrzymanie nadmiaru wód (i spłaszczenie fali powodziowej) w zbiornikach zaporowych. Jak już wspomniano powyżej, najskuteczniejsze pod tym względem są suche zbiorniki przeciwpowodziowe, których cała objętość jest przeznaczona na przyjęcie fali powodziowej. Taką samą zaletę posiadają poldery w obwałowanych dolinach rzecznych. Jak jednak wykazały ostatnie katastrofalne powodzie w dorzeczu Odry i Wisły, możliwości sztucznej, sterowanej retencji są ograniczone. Dzieje się tak z powodu niewielkiej pojemności zbiorników w porównaniu do objętości fali powodziowej. Skutki zmian klimatycznych oraz wypływanie zbiorników retencyjnych sprawiają, że ich zdolność do łagodzenia kulminacji fali powodziowej, a tym samym obniżania poziomu wód powodziowych na obszarach chronionych znacznie się zmniejszyła i wciąż maleje.

Rozwiązaniem wspomagającym w znacznym stopniu retencję sztuczną jest retencja naturalna – retencja w glebie, roślinności, mokradłach, jeziorach i nieskanalizowanych systemach rzecznych.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Im większa jest ich powierzchnia, tym większa zdolność zlewni do czasowego zatrzymywania wody. Zjawisko to spowalnia cykl obiegu wody, co z kolei poprawia bilans wodny danej zlewni. Zasoby wodne zwiększają się, ponieważ szybki spływ powierzchniowy ustępuje miejsca wolniejszemu odpływowi gruntowemu. Podobna redukcja prędkości dotyczy także wody płynącej w naturalnych korytach rzek. To spowolnienie obiegu wody w środowisku sprawia, że im wolniej woda odpływa ze zlewni, tym więcej jest jej w stanie zlewnia zgromadzić. W ten sposób najskuteczniejszą, najtańszą i najbardziej trwałą metodą ochrony przed powodzią jest przywrócenie rzece jej naturalnej przestrzeni na niektórych odcinkach. Kluczową rolę w efektywnej ochronie przeciwpowodziowej odgrywają szerokie rozlewiska, tereny podmokłe, nadrzeczne łąki oraz lasy łęgowe. Te naturalne obszary działają jak gąbka, spowalniając przepływ wody i łagodząc skutki powodzi. Gdy rzeka wylewa, nie szkodzi otaczającym terenom, a wręcz przeciwnie – przyczynia się do ich lepszego funkcjonowania.

W rozrastających się miastach obserwuje się zjawisko powodzi błyskawicznych, czyli zjawisk spowodowanych nawalnymi opadami deszczu na obszarze o ograniczonej przepuszczalności. W takim wypadku całość wód opadowych jest kierowana do kanalizacji miejskiej nieprzygotowanej na przyjęcie tak wielkiej objętości wody i dochodzi do podtopień. Wiąże się to zazwyczaj z dużymi stratami materialnymi (zalane budynki mieszkalne, szkoły, szpitale itp.). Powódzie miejskie, znane jako tzw. *urban flood*, całkowicie destabilizują funkcjonowanie miast oraz codzienne życie ich mieszkańców. Przykładowo w 2022 roku tego typu incydenty miały miejsce wielokrotnie. W lipcu m. in. w Szczecinie i Częstochowie, gdzie w ciągu doby spadło blisko 70 mm deszczu. W sierpniu w Opolu, po tym jak przez 24 godziny zanotowano sumę opadową wynoszącą 100 mm. Ten miesiąc był dla historycznej stolicy Górnego Śląska w ogóle wyjątkowy, ponieważ pięciokrotnie została przekroczona norma opadowa (w sumie spadło przez miesiąc 273 mm deszczu). Jeszcze większe opady, które spowodowały zalania i podtopienia, wystąpiły 7 września w Gorzowie Wielkopolskim – w ciągu doby spadło tam ponad 130 mm deszczu (<https://wodnesprawy.pl/powodz-blyskawiczna-jak-sie-uchronic-przed-zywiolem/>). Metodą na ograniczenie skutków powodzi błyskawicznych w miastach jest tzw. błękitno-zielona infrastruktura. Jej elementami są rozwiązania prowadzące do retencji wód opadowych albo do umożliwienia im przesiąknięcia do wód gruntowych. Błękitno-zielona infrastruktura, której zasadniczym celem jest zatrzymywanie wody deszczowej w miejscu opadu, ma jednocześnie zdolność do absorbowania dwutlenku węgla, redukcji zanieczyszczenia powietrza oraz łagodzenia efektu miejskiej wyspy ciepła.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

A. Opis techniczny metod przeciwdziałania powodziom wraz założeniami teoretycznymi

Renaturyzacja rzek

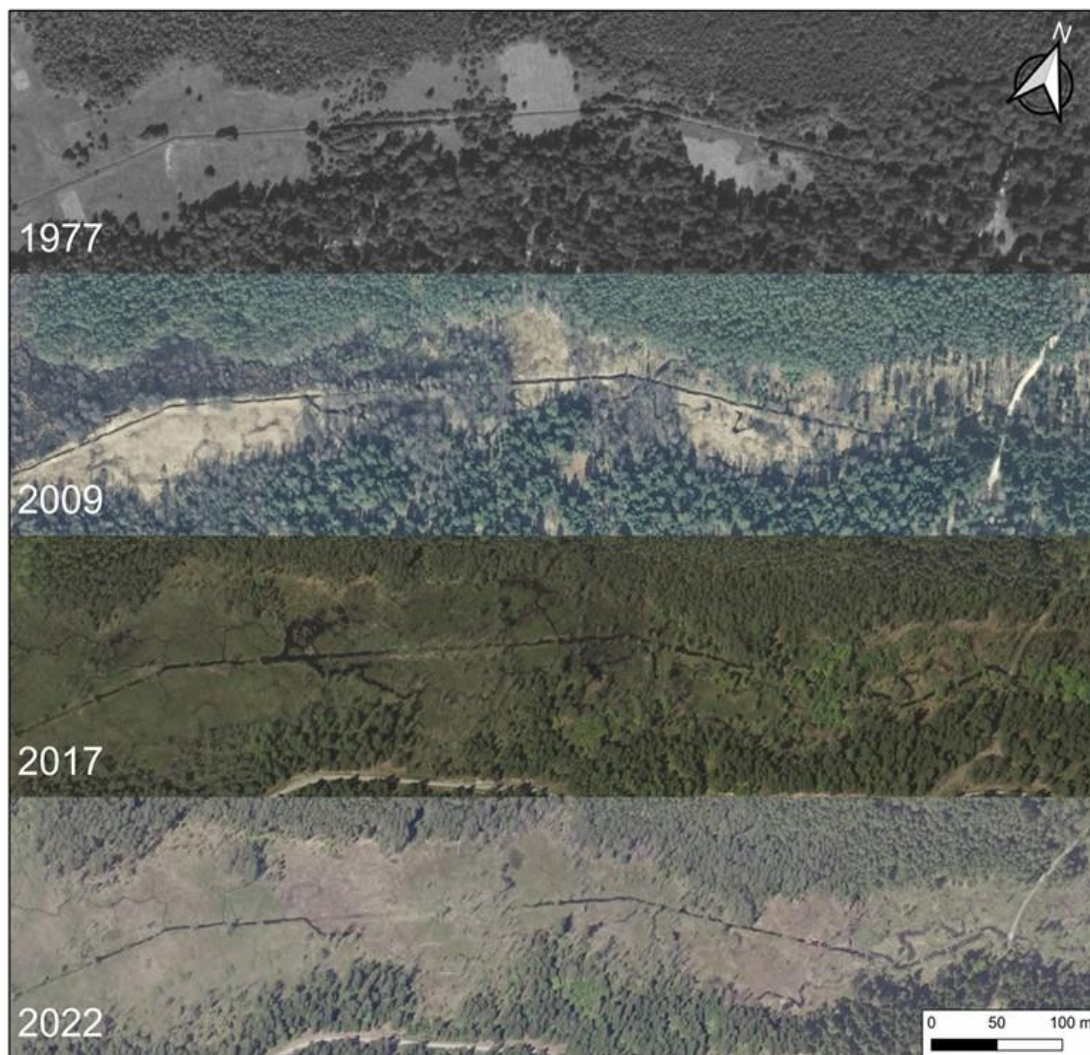
Najskuteczniejszym sposobem ochrony przed powodzią jest stworzenie tzw. „przestrzeni dla rzek”, co oznacza utrzymanie naturalnej szerokości dolin rzecznych na długich odcinkach. Prowadzi do tego proces **renaturalizacji rzek** - przywrócenie im pierwotnego charakteru. Renaturyzacja to proces, który ma na celu wspieranie odbudowy ekosystemu lub przywracanie naturalnych procesów zachodzących w obszarach, które uległy degradacji, uszkodzeniu lub zniszczeniu (Gann i in., 2019). W przeciwieństwie do rzek uregulowanych, cechami rzek naturalnych są:

- duża krętość rzek potencjalnie meandrujących lub wielokorytowość (koryta roztokowe, anastomozujące),
- duża heterogeniczność warunków panujących w rzece- szerokości, głębokości, przekroju poprzecznego, spadku podłużnego, materiału brzegów i dna oraz typu nurtu,
- duża aktywność morfodynamiczna rzeki i świadczące o tym różnorodne jednostki hydromorfologiczne i formy korytowe,
- występowanie drzew i krzewów w strefie przybrzeżnej i wynikające z tego zacienienie koryta, korzenie stabilizujące skarpy i rumosz drzewny w korycie,
- zachowanie łączności rzeki z doliną (Biedroń, 2020).

Renaturyzacja, czyli przywrócenie rzece cech naturalnych może być realizowana różnymi metodami, bardziej lub mniej ingerującymi w jej stan obecny. Jedną z metod jest na przykład całkowite zaniechanie ingerencji pozwalające rzece na samoistny powrót do pierwotnego charakteru (Rycina 3). Jest to możliwe na ciekach przepływających przez obszary leśne, nieużytki, gdzie nie ma ograniczeń ze strony właścicieli gruntów.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 3. Dolina Czartosowej (woj. lubelskie). Na ortofotomapach z lat 1977-2022 widocznych jest kilka procesów, które można nazwać spontaniczną renaturyzacją. Już w 2002 r. dolina nie była użytkowana rolniczo. Zrzucenie użytkowania łąk w dolinie Czartosowej sprawiło, że na otwarte, rolnicze tereny zaczął wkraczać las. Sama rzeka wciąż była jednak uregulowana, jak od linijki, a możliwości powrotu do meandrującego przebiegu koryta nie były wielkie. Rzeka o małych przepływach, małym nachyleniu i niewielkiej dostawie materiału ma małe możliwości samoczynnej renaturyzacji. Chyba, że trafią do niej bobry. Duża bobrowa tama na widocznym odcinku Czartosowej powstała w 2010 lub 2011 r. Bobry przegrodziły uregulowane koryto i fragment doliny. W kolejnych latach powstały dodatkowe bobrowe tamy. Do dawnych, odciętych wcześniej meandrów powróciła woda, ale główny nurt wciąż prowadzony był uregulowanym, prostym korytem. Wraz z głównym nurtem niesiony był materiał, piasek i organiczny muł. Akumulacja materiału w korycie doprowadziła do tego, że aktualnie na niektórych odcinkach główny nurt rzeki płynie

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

odtworzonymi w ten sposób meandrami, a uregulowane koryto uległo odcinkowemu zasypaniu. Gęsty las, którego sukcesja nastąpiła po zaprzestaniu koszenia łąk, wraz z podniesieniem poziomu wody, ustąpił miejsca otwartym i półotwartym siedliskom bagiennym (Bednarek i Tworek Ł., 2024).

Renaturyzacja rzek zazwyczaj jednak odbywa się poprzez staranne zaplanowanie, realizację oraz monitorowanie efektywności działań technicznych, które mają na celu zwiększenie bioróżnorodności w obrębie rzek. W ramach tych działań do naturalnego koryta rzeki wprowadza się elementy sprzyjające tworzeniu siedlisk, takie jak głazy czy deflektory wykonane z lokalnego materiału. Często stosowanym zabiegiem renaturyzacyjnym jest przywracanie rzece meandrów, które wcześniej zostały od niej odcięte (Rycina 4).

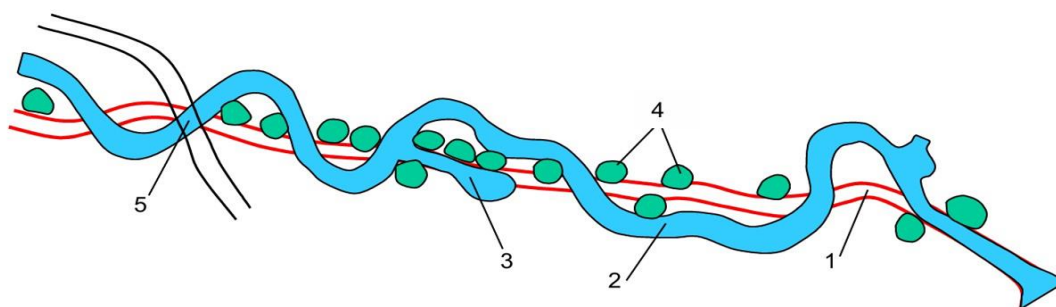


Rycina 4. Przywrócenie dawnego meandrującego biegu Narewki w Białowieży przez zablokowanie przepływu w uregulowanym korycie i skierowanie wody do odtworzonych starorzeczy (<https://inzynierbudownictwa.pl/renaturyzacja-rzek/>).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

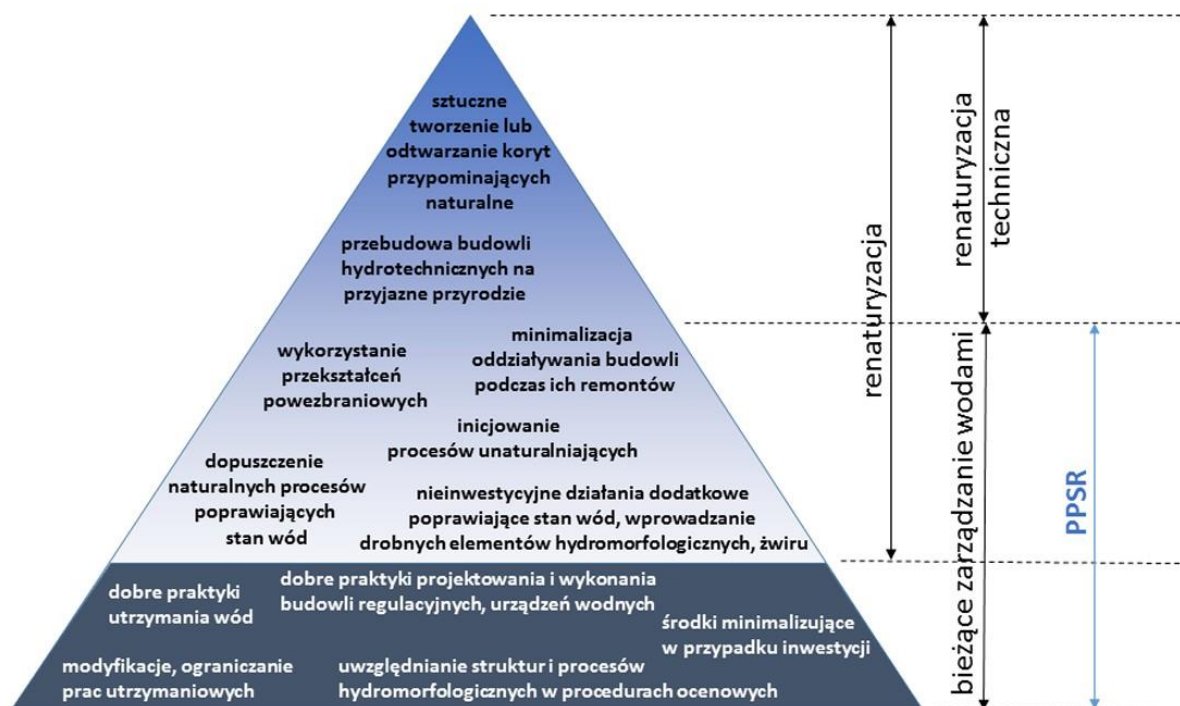
Przebudowa jazów i progów na tzw. bystrotoki, które pozwalają symulować naturalne zmiany w morfologii koryta, również wpisuje się w działania renaturyzacyjne – dzięki nim możliwe jest odtworzenie sekwencji bystrzy i plos. Ważnym aspektem jest również usuwanie przeszkód wodnych, czyli rozbiórka zapór, co stanowi istotny element renaturyzacji. Zakres prac związanych z tym procesem jest bardzo szeroki. Oprócz działań wymagających skomplikowanego przygotowania formalnego i projektowego, takich jak usunięcie piętrzeń, istnieje wiele regularnych prac utrzymaniowych, które nie potrzebują dodatkowych pozwoleń i analiz. Należy do nich m. in. ograniczenie wykaszania rzek na rzecz selektywnego usuwania roślinności w miejscach kluczowych dla zapobiegania powstawaniu zatorów (<https://inzygnierbudownictwa.pl/renaturyzacja-rzek/>).



Rycina 5. Plan sytuacyjny fragmentu dolnego odcinka rzeki Cole po wykonaniu renaturyzacji: 1- koryto uregulowane, 2- nowe koryto, 3- zatoka, 4- istniejące skupiska drzew i krzewów, 5- bród na szlaku do jazdy konnej. Projekt trasy koryta meandrującego uwzględniał zachowanie istniejących dojrzałych wierzb, które wyrosły na brzegach koryta uregulowanego (Żelazo i Popek, 2002). Stare, wyprostowane koryto zostało w większości zasypane, a tylko niewielki fragment został wykorzystany do uformowania zastoiskowej zatoki. Dno rzeki poprowadzono ze zmiennym spadkiem w zakresie 1–1,35 ‰. Wymiary przekrojów poprzecznych i ich kształt dostosowano do układu poziomego rzeki oraz do maksymalnej przepustowości koryta, wymaganej dla letnich wezbrań opadowych. W celu zabezpieczenia koryta przed erozją wgłębną, na początku odcinka wykonano próg gabionowy. Funkcję stabilizacji dna spełniają również 2 brody zlokalizowane na przecięciu nowego koryta ze szlakiem do jazdy konnej. W miejscach brodów dno rzeki i łagodnie nachylone skarpy zostały wzmocnione narzutem kamienno-żwirowym na geowłókninie. Na pozostałym odcinku koryta, praktycznie nie wykonano żadnych umocnień skarp – jedynie w kilku miejscach na brzegach wklęsłych posadzono drzewa, a na skarpach ułożono maty faszynowe (Bańkowska, 2010).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 6. Miejsce renaturyzacji wód w zintegrowanym zarządzaniu wodami z punktu widzenia środowiska. PPSR= podstawowy program środków renaturyzacyjnych, którego wdrażanie powinno być stosunkowo powszechne, jeżeli faktycznie chcemy w realnej perspektywie czasowej osiągnąć cele środowiskowe dla wód (Biedroń, 2020).

Błękitno-zielona infrastruktura

Według katalogu technicznego „Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu”- publikacja wydanej w ramach projektu „Climate NBS Polska: Rozwiązania oparte na przyrodzie służące adaptacji miast do zmian klimatu”, będącego częścią Europejskiej Inicjatywy Klimatycznej (EUKI) elementami błękitno-zielonej infrastruktury mogą być stawy retencyjne, niecki bioretencyjne, rowy bioretencyjne, rowy infiltracyjne, ogrody deszczowe w pojemnikach, zielone przystanki, zielone dachy, zielone fasady i ściany, nawierzchnie przepuszczalne, podłoża strukturalne. Z punktu widzenia redukcji zagrożenia podtopieniami podczas ulewnych deszczów najbardziej istotnymi są rozwiązania pozwalające na retencję wód opadowych, lub ich infiltrację do wód gruntowych- stawy retencyjne, niecki i rowy bioretencyjne, rowy infiltracyjne oraz nawierzchnie przepuszczalne.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Stawy retencyjne- zbiorniki, które mają dodatkową pojemność retencyjną, umożliwiającą zatrzymywanie i oczyszczanie wody opadowej. Są one tworzone w istniejących lub specjalnie wykopanych zagłębieniach i obsadzone roślinnością.

Niecki bioretencyjne- obniżenia bogato pokryte roślinnością, gdzie gromadzi się woda opadowa. Woda ta oczyszcza się, przesiąkając przez kolejne warstwy podłoża. Niecki stosuje się w miejscach, gdzie powierzchnia jest silnie uszczelniona, a spływ jest zanieczyszczony.



Rycina 7. Przykładowy schemat gromadzenia i wykorzystania wody deszczowej dzięki elementom Błękitno-zielonej infrastruktury (<https://builderpolska.pl/2024/08/12/rewitalizacja-terenow-poprzemyslowychczyli-sposob-na-regeneracji-integracji-tkanki-miejskiej/>).

Rowy bioretencyjne - płytkie, porośnięte roślinnością zagłębienia, które służą do liniowego odprowadzania wód. Zbierają one wodę opadową, którą następnie stopniowo infiltrują do gleby, spowalniając tym samym spływ powierzchniowy.

Rowy infiltracyjne - płytkie wykopy wypełnione tłuczniem, które zwiększają naturalną zdolność gleby do absorpcji wody. Przyczyniają się one do podniesienia poziomu wód gruntowych (Rycina 8).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



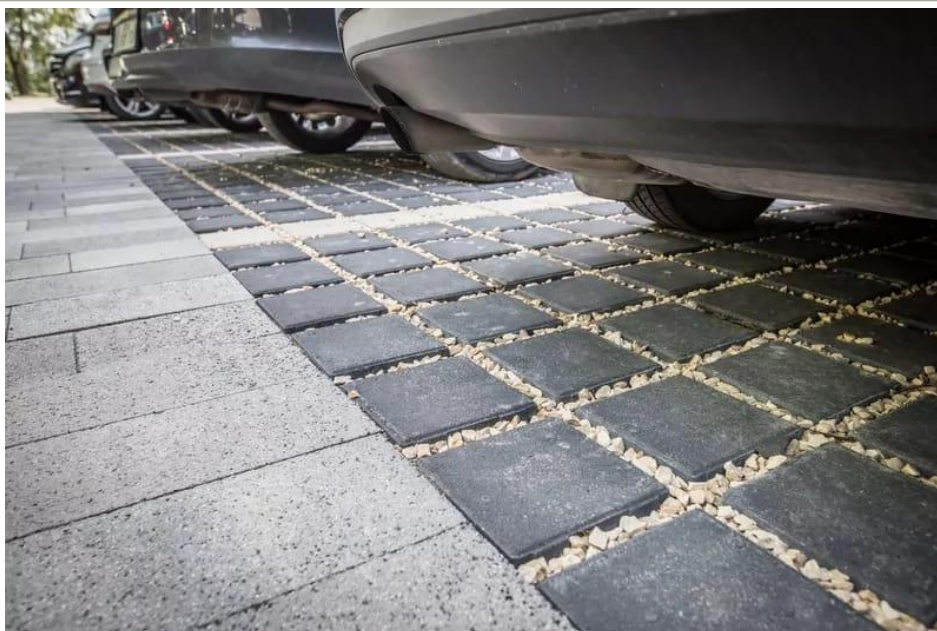
Rycina

8. Rów infiltracyjny (po lewej) i rowy bioretencyjne („Drogownictwo” 4/2017).

Nawierzchnie przepuszczalne - nawierzchnia przepuszczalna umożliwia przenikanie wody ze spływu powierzchniowego do gruntu. Ułatwiają to znajdujące się w niej otwory lub porowaty materiał, z którego została wykonana. Istnieje wiele rodzajów nawierzchni przepuszczalnych, a ich konstrukcja różni się znacząco w zależności od planowanego zastosowania. Na przykład nawierzchnie stosowane na ścieżkach i chodnikach, placach zabaw czy w prywatnych ogrodach mogą być wykonane z betonowej kostki ułożonej w większych odstępach (przerwy dylatacyjne), betonowych płyt ażurowych, zrębków drzewnych lub żwiru. Na intensywnie użytkowanych drogach i parkingach można użyć innych materiałów, takich jak kruszywa naturalne łączone żywicami syntetycznymi, betony porowate, kostki układane w większych odstępach, nawierzchnie ażurowe klinkierowe czy żwir. (Rycina 9). Zastosowanie nawierzchni przepuszczalnej niesie za sobą szereg korzyści, takich jak ograniczenie spływu powierzchniowego, zasilanie wód gruntowych, filtrowanie zanieczyszczeń i obniżanie temperatury powierzchni. Stosując nawierzchnie tego typu, ograniczamy także potrzebę budowy zbiorników retencyjnych czy innych systemów magazynowania wody deszczowej (Iwaszuk i in., 2019)

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 9. Sposób ułożenia kostki brukowej sprzyjający infiltracji wód opadowych (<https://bzg.pl/poradnik/artukul/nawierzchnie-parkingowe-przepuszczalne-dla-wody/id/40892>).

Na terenach miejskich pewne obszary przestrzeni publicznej można przystosować do funkcji suchych zbiorników przeciwpowodziowych o dużej pojemności. Mogą to być na przykład place, części parków, itp. Tak przygotowane obiekty mogą skutecznie zapobiegać podtopieniom w przypadku intensywnych opadów deszczu.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 10. Plac wodny Bentheplein w Rotterdamie (Holandia). Zbudowany w 2013 r. jest przykładem suchego zbiornika przeciwpowodziowego na terenie osiedla mieszkaniowego. Podczas nadmiernych opadów może on pomieścić około 2 miliony litrów wody, spływającej z pobliskich obszarów. W czasie bezdeszczowych dni zbiornik pełni rolę otwartej przestrzeni publicznej, chętnie wykorzystywanej przez okolicznych mieszkańców (Suchocka i Siedlecka, 2017).

B. Opis wad i zalet metody

Naturalna retencja to proces, który umożliwia zatrzymywanie i gromadzenie wody w ekosystemie przez systemy rzeczne rzek, mokradła, lasy, glebę oraz inne naturalne elementy krajobrazu. Stanowi ona kluczowy sposób na łagodzenie skutków powodzi i suszy, a także poprawę zarządzania zasobami wodnymi. Jak każdy rodzaj ingerencji w tak złożony system, posiada zarówno wady, jak i zalety.

Największą zaletą metody jest ochrona przed powodzią terenów położonych poniżej poprzez czasowe zatrzymanie nadmiaru wód i spowalnianie ich odpływu. W odróżnieniu od sztucznych zbiorników i infrastruktury hydrotechnicznej, naturalna retencja nie wymaga kosztownych prac konserwacyjnych, a w niektórych przypadkach nie wymaga żadnych nakładów finansowych. Naturalna retencja, oprócz roli przeciwpowodziowej spełnia szereg nie mniej ważnych funkcji. Jest to sposób na gromadzenie wody na czas suszy, co pozwala utrzymać stabilny poziom wód gruntowych. Jakość gromadzonej wody jest dobra, ponieważ mokradła, lasy i gleba są naturalnymi filtrami, które zatrzymują zanieczyszczenia. Naturalna retencja to długoterminowe rozwiązanie, które harmonijnie współgra z naturą tworząc siedliska dla wielu gatunków, roślin i zwierząt, wzmacnia ekosystemy i zwiększają ich zdolność adaptacji do zmian klimatu.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Do wad naturalnej retencji trzeba zaliczyć konieczność działania na dużych powierzchniach- aby była skuteczna, potrzebne są rozległe obszary lasów, mokradeł czy terenów zalewowych, co może być trudne do osiągnięcia. Możliwości jej zastosowania są ograniczone w silnie zurbanizowanych lub intensywnie użytkowanych rolniczo terenach. Przywracanie terenów zalewowych może wiązać się z ryzykiem okresowego podtapiania niektórych obszarów wcześniej suchych, co może budzić opór mieszkańców i rolników.

C. Ocena przydatności zastosowania metody

Naturalna retencja jest jednym z najskuteczniejszych i najbardziej proekologicznych rozwiązań służących poprawie ochrony przed powodzią wykorzystującym naturalne procesy zachodzące w przyrodzie. Efektywność przeciwpowodziowa może być osiągnięta poprzez jej zastosowanie na dużych obszarach, co nie zawsze jest możliwe do osiągnięcia. Zapobieganie skutkom powodzi najlepiej zatem będzie realizowane przez połączenie naturalnej i sztucznej retencji. Wartościami dodanymi naturalnej metody są: odnawianie zasobów wód gruntowych (przeciwdziałanie suszy) i liczne korzyści dla środowiska oraz niskie koszty utrzymania infrastruktury. Pomimo długotrwałości procesu renaturyzacji rzek efekt końcowy będzie przyjazny zarówno przyrodzie, jak i człowiekowi.

III. Wykorzystanie bezałogowych statków powietrznych.

A. Opis techniczny metody przeciwdziałania powodziom wraz założeniami teoretycznymi

Bezałogowy statek powietrzny (BSP, ang. UAV- *unmanned aerial vehicle*), znany również jako dron, to zaawansowany statek powietrzny, który nie wymaga obecności załogi na pokładzie. Obecnie ta technologia bardzo szybko się rozwija i znajduje bardzo szerokie zastosowanie.

Klasyfikacja dronów.

Pod względem **budowy** wyróżniamy (Rycina 11):

- wielowirnikowce (tzw. multicopter) – jedno z najczęściej używanych z uwagi na łatwość obsługi i stabilność. Wśród nich: **quadcoptery (4 wirniki)**, **hexacoptery (6 wirników)** i **octocoptery (8 wirników)**,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- **stałopłatowe (ang. Fixed-wing)** - przypominają samoloty, stosowane w monitoringu długodystansowym

- **hybrydowe (ang. VTOL - Vertical Take-Off and Landing)** - łączą cechy multikopterów i stałopłatów,



Rycina 11. Typy dronów (Yan Li, Chunlu Liu, 2018).

Ze względu na **sposób sterowania** wyróżniamy drony: **manualne** (sterowanie dronem w czasie rzeczywistym przez pilota), **półautonomiczne** (sterowanie częściowo automatyczne) oraz **autonomiczne** (sterowanie automatyczne – lot zaprogramowany).

Z uwagi na zasięg, wśród dronów wyróżnić można:

-drony krótkiego zasięgu (do 5 km) – są niewielkich rozmiarów i lekkie, służą głównie do celów rekreacyjnych,

-drony średniego zasięgu (5-10 km) - nadają się do BVLOS (lot poza zasięgiem wzroku), zaopatrzone w różne sensory, stosowane do monitoringu, czy mapowania terenu (fotogrametria),

- drony dalekiego zasięgu (powyżej 50 km) – mają napęd spalinowy lub hybrydowy; odbywają loty w trybie autonomicznym, stosowane w misjach wojskowych, ale także w mapowaniu.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Bezzałogowe statki powietrzne odgrywają ogromną rolę w ograniczaniu skutków powodzi przede wszystkim poprzez:

1. możliwość monitorowania przebiegu powodzi w czasie rzeczywistym (m. in. monitorowanie stanu infrastruktury hydrotechnicznej, obszarów zalanych, stanu koryta rzecznej) w celu poprawy jakości zarządzania kryzysowego,
2. umiejętność mapowania, także w celu uzupełnianie danych o terenie i jego zmianach (drony fotogrametryczne, skaner laserowy, dokumentacja fotograficzna).

Drony są niezwykle pomocne we wczesnym wykrywaniu zagrożenia powodziowego – umożliwiają monitorowanie poziomu wody w rzekach i zbiornikach wodnych oraz wykrywają uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych czy zapór.

Drony są niezwykle pomocne we wczesnym wykrywaniu zagrożenia powodziowego – umożliwiają monitorowanie poziomu wody w rzekach i zbiornikach wodnych oraz wykrywają uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych czy zapór.

Aby dron mógł spełniać różnorakie zadania, musi stać się wielosensorowa, bezzałogową platformą pomiarowo-obszaryjną wyposażoną w różnorodne sensory obrazowe i pomiarowe, które będą pełnił szereg funkcji związanych z pomiarami i obserwacjami.

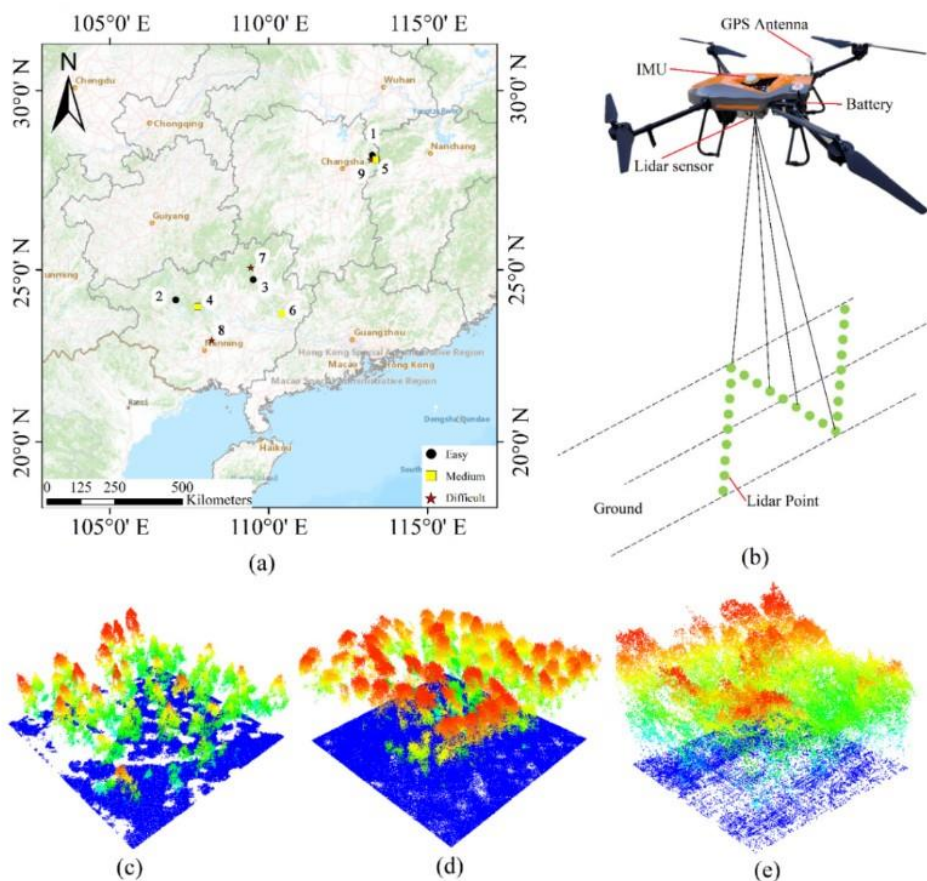
Wśród zastosowanych sensorów powinny znaleźć się:

- skaner laserowy, wspierany systemami pozycjonowania (GNSS/INS), który umożliwi pozyskiwanie precyzyjnych danych wysokościowych (Rycina 12),
- kadrowe kamery pomiarowe, które pozwolą na uzyskiwanie zdjęć fotogrametrycznych, niezbędnych do dalszego opracowania pomiarowego, w tym modeli wysokościowych, przekrojów czy ortofotomap (Rycina 13),
- kamera wielospektralna, zdolna do rejestrowania obrazów w zakresie widzialnym oraz bliskiej podczerwieni. Jej zastosowanie obejmuje m. in. detekcję uszkodzeń wałów, identyfikując miejsca braku roślinności na tych strukturach, co może wskazywać na ich uszkodzenia (Rycina 14),
- kamera obserwacyjna, która okaże się przydatna podczas akcji ratunkowych,

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

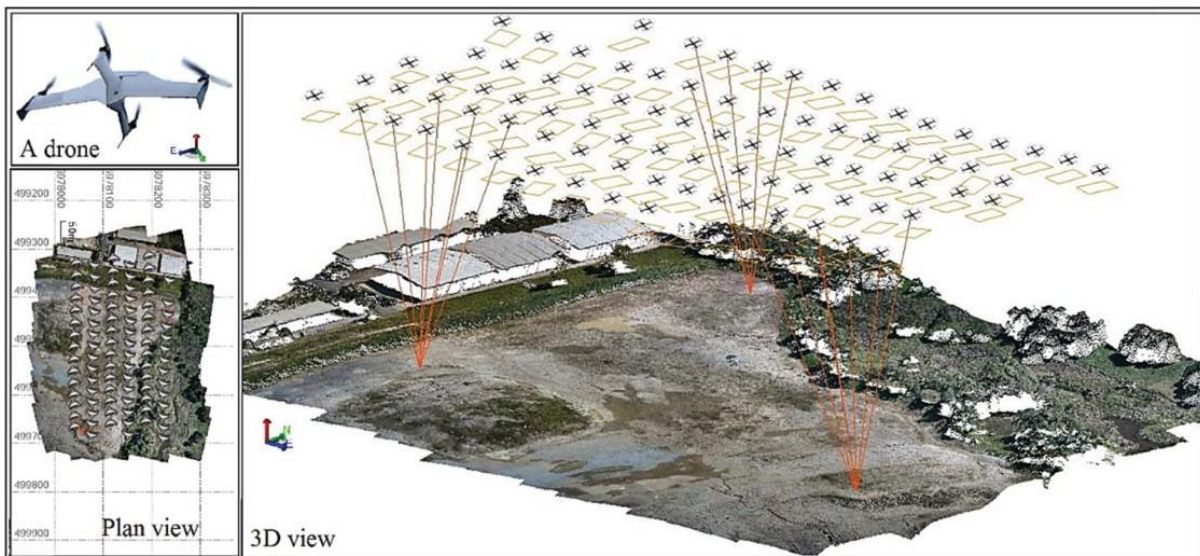
- kamera termowizyjna do wykorzystania w akcjach ratunkowych, także w warunkach nocnych (Rycina 15).



Rycina 12. System UAV-LiDAR (b); (c–e) wykresy z trzema typami chmur punktów UAV-LiDAR: easy, medium, difficult (Ma K..et al., 2022).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 13. Schemat procedury badania fotogrametrycznego na placu budowy. Lewy dolny obrazek pokazuje widok z góry placu budowy i wskazuje ścieżkę lotu nad placem. Prawy obrazek pokazuje, że kamera zamontowana na dronie jest skierowana w dół, w kierunku ziemi, aby mierzyć współrzędne wymiarowe 3D (Yan Li, Chunlu Liu, 2018).



Rycina 14. Przykład obrazu uzyskanego przez nałożenie modelu cieniowanego i barw hipsometrycznych-uzyskano szczegółową topografię wału przeciwpowodziowego (Kurczyński Z., Bakuła K., 2016).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

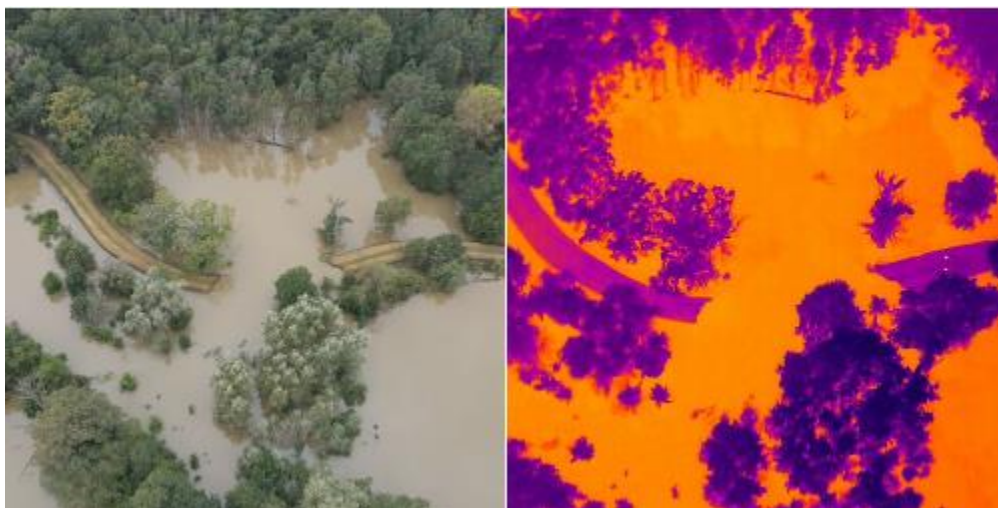
Obrazy uzyskane z dronów pozwalają ocenić rozmiary i skutki wezbrania poprzez obserwację poziomu wody i przewidywanie dalszego rozlewu wód powodziowych, identyfikację obiektów zniszczonych przez powódź, czy tworzenie ortofotomap zalanych terenów. Jest to możliwe dzięki dronom wyposażonym w kamery o wysokiej rozdzielczości i analizę wykonanych fotografii w czasie rzeczywistym. Drony są bardzo pomocne w koordynowaniu pracy służb ratunkowych. Wyposażone w kamerę termowizyjną pomagają w wykrywaniu osób poszkodowanych w wyniku powodzi i potrzebujących pilnej pomocy. Dzięki nowoczesnym kamerom z zoomem optycznym przekazują obraz na żywo do centrów kryzysowych. Pomagają także w transporcie niezbędnego sprzętu ratunkowego.

W mapowaniu sprawdzają się drony geodezyjne. Na uwagę zasługuje tutaj zwłaszcza mapowanie z systemem RTK (ang. *Real-Time Kinematic*), które zapewnia maksymalną dokładność przy niezwykle krótkim czasie uzyskiwania danych. Drony z systemem RTK posiadają światłoczułe matryce, dostosowujące jakość obrazu do warunków oświetleniowych. Tego typu urządzenia umożliwiają wykonywanie precyzyjnych pomiarów i modelowanie 3D za pomocą oprogramowania fotogrametrycznego. Za pomocą nalotu fotogrametrycznego można uzyskać informacje o nowej infrastrukturze i nieudokumentowanych formach zagospodarowania terenu bez potrzeby wejścia na niekiedy niedostępny teren. Monitorowanie wszelkich zmian w topografii, warunkującej kierunek odpływu wód jest szczególnie ważne jest na terenach zurbanizowanych, będących obszarem wielu nowych inwestycji, np. murów ogrodzeń, nasypów itp.

Zmiana użytkowania terenu w obszarach zurbanizowanych wywołuje zmiany w warunkach hydrologicznych. Aby określić kierunek tych zmian na stosunkowo małych powierzchniach, skutecznym rozwiązaniem jest wykorzystanie narzędzi GIS. Umożliwiają one szybką identyfikację miejsc, w których mogą pojawić się problemy z odwodnieniem terenu (Szumińska i in., 2015).

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien



Rycina 15. Obraz z drona z kamerą termowizyjną. (<https://www.swiatdronow.pl/drony-a-powodz-na-poludniu-polski-09-2024>).

B. Opis wad i zalet metody

Zaletą dronów jako bezzałogowej platformy do ograniczania skutków powodzi jest przede wszystkim **szybkość działania** - w kilka minut dostarczają dane z obszaru objętego powodzią i to w sposób bezpieczny, bez narażania życia ludzkiego. Dane uzyskane z dronów, dzięki zaawansowanym technicznie sensorom są precyzyjne i umożliwiają różnorodne analizy w czasie rzeczywistym. Ponadto są wielokrotnie tańszą i najczęściej lepszą technicznie alternatywą dla śmigłowców, czy samolotów. Drony stanowią przyszłość ochrony przed powodzią- umożliwiają lepsze prognozowanie, skuteczniejsze działania ratunkowe oraz długoterminowe planowanie w zakresie ochrony przed żywiołem powodzi.

Choć drony oferują wiele korzyści, ich zastosowanie w ochronie przeciwpowodziowej wiąże się również z pewnymi ograniczeniami oraz wyzwaniem. Główne wady dronów:

- Ograniczony czas lotu i zasięg. Większość dronów działa na akumulatorach, które umożliwiają loty trwające od 20 do 60 minut. W przypadku dłuższych misji konieczne jest częste wymienianie baterii lub używanie większej liczby dronów. Dodatkowo, zasięg lotu jest zazwyczaj ograniczony do kilku kilometrów, co może być problematyczne podczas monitorowania rozległych terenów zalewowych.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- Wrażliwość na warunki atmosferyczne. Silny wiatr, intensywne opady deszczu oraz śniegu mogą uniemożliwić lot drona lub znacząco obniżyć jakość zbieranych danych.

- Konieczność specjalistycznej obsługi. Obsługa zaawansowanych dronów wymaga odpowiedniego przeszkolenia operatorów. Ponadto, analiza zebranych danych, takich jak obrazy z kamer termowizyjnych czy modele 3D, wymaga zastosowania specjalistycznego oprogramowania i fachowej wiedzy.

- Ryzyko awarii i zakłóceń sygnału. Drony mogą ulegać awariom w trudnych warunkach lub zderzać się z przeszkodami, takimi jak linie energetyczne czy drzewa. W sytuacjach kryzysowych zakłócenia sygnału GPS oraz komunikacji mogą utrudniać skuteczne sterowanie dronem.

- Ograniczona ładowność i funkcjonalność. Standardowe drony są przeznaczone głównie do monitorowania i zbierania danych – nie są w stanie transportować dużych ładunków ani bezpośrednio wpływać na sytuację powodziową. Drony ratunkowe mają ograniczone możliwości dostarczania sprzętu ze względu na niewielką ładowność.

- Koszty zakupu i eksploatacji. Zaawansowane drony, wyposażone w kamery termowizyjne, lidar czy sensory meteorologiczne, mogą być kosztowne zarówno w zakupie, jak i w utrzymaniu. Dodatkowo, konieczność regularnej konserwacji, zakupu baterii oraz szkolenia operatorów zwiększa wydatki związane z długoterminowym użytkowaniem tych urządzeń.

Pomimo wad dronów, korzyści, jakie płyną z ich wykorzystania są wielokrotnie większe. Poza tym technologie stosowane w tych obiektach latających bardzo szybko się rozwijają (np. AI), przez co stają się one coraz doskonalsze.

C. Ocena przydatności zastosowania metody

Drony stają się coraz bardziej popularnym narzędziem w walce z powodzią, wspierając działania prewencyjne, monitorowanie sytuacji kryzysowych oraz zarządzanie skutkami tych zdarzeń. Chociaż ich efektywność zależy od wielu czynników, takich jak warunki atmosferyczne, dostępność sprzętu, ograniczenia techniczne, to stanowią bardzo przydatne i niezastąpione narzędzie w ochronie przeciwpowodziowej.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Korzyści płynące z zastosowania nowatorskich metod przeciwdziałania powodziom w stosunku do rozwiązania metodami konwencjonalnymi stosowanymi przez samorządy terytorialne działające na terenie obszaru wsparcia.

Zastosowanie nowoczesnych metod ochrony przeciwpowodziowej to przede wszystkim długofalowa inwestycja prowadząca do poprawy bezpieczeństwa mieszkańców, ich dobytku oraz majątku samorządów, oraz obniżenia kosztów utrzymania infrastruktury przeciwpowodziowej.

Korzyści z metody **modelowania hydraulicznego** powodzi to przede wszystkim:

- Lepsze planowanie przestrzenne – pozwala na precyzyjne wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego oraz dostosowanie planów zagospodarowania przestrzennego.
- Szybsza reakcja na zagrożenia – umożliwia prognozowanie poziomu wód w oparciu o symulacje oraz aktualne dane meteorologiczne.
- Optymalizacja inwestycji – ocena efektywności różnych metod ochrony przed powodziami przed ich wdrożeniem.
- Wsparcie w pozyskiwaniu funduszy – szczegółowe analizy ryzyka powodziowego ułatwiają aplikowanie o środki z unijnych i krajowych programów.
- Zwiększenie bezpieczeństwa mieszkańców – lepsze prognozy pozwalają na wcześniejsze ostrzeżenie i ewakuację ludności.

Korzyści z zastosowania **naturalnej retencji** w zlewniach:

- Niższe koszty ochrony przeciwpowodziowej – naturalne metody są tańsze w utrzymaniu niż infrastruktura hydrotechniczna.
- Ograniczenie skutków powodzi i suszy – spowalnia odpływ wody, zmniejszając ryzyko nagłych wezbrań oraz zapewniając dostęp do wody w okresach suszy.
- Poprawa jakości środowiska – wspiera bioróżnorodność, powiększa tereny zielone oraz poprawia jakość wody.
- Zwiększenie atrakcyjności regionu – nowe tereny rekreacyjne, takie jak odtworzone mokradła i parki, mogą przyciągać turystów oraz inwestorów.
- Wsparcie w realizacji polityki klimatycznej – naturalna retencja stanowi pomoc w adaptacji do zmian klimatu, co jest istotne w kontekście strategii krajowych oraz unijnych.

Korzyści wynikające z wykorzystanie **bezzałogowych statków powietrznych** w ochronie przeciwpowodziowej:

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

- Błyskawiczne monitorowanie zagrożeń – drony umożliwiają szybkie skanowanie terenów zalewowych oraz identyfikację miejsc wymagających interwencji.
- Dokładne analizy w czasie rzeczywistym – umożliwiają rejestrowanie poziomu wód, ocenę stanu wałów przeciwpowodziowych i lokalizację obszarów zalanych.
- Bezpieczeństwo służb ratunkowych – pozwalają na ocenę sytuacji bez konieczności wysyłania ludzi w niebezpieczne miejsca.
- Niższe koszty monitoringu – stanowią tańszą alternatywę dla samolotów i śmigłowców w patrolowaniu rzek oraz terenów zagrożonych.
- Wsparcie w planowaniu i odbudowie – zdjęcia i modele 3D wykonane przez drony pomagają w ocenie skutków powodzi oraz w planowaniu przyszłych inwestycji ochronnych.

Połączenie tych nowoczesnych metod pozwoli samorządom terytorialnym obszaru wsparcia skuteczniej i taniej chronić mieszkańców, minimalizować straty w infrastrukturze oraz efektywniej zarządzać wodami.

LITERATURA

Bakula K., 2014. Efektywne wykorzystanie danych lidar w dwuwymiarowym modelowaniu hydraulicznym. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 26, 23-37

Bańkowska A, Sawa K, Zbigniew Popek Z. Michał Wasilewicz M, Jan Żelazo J. 2010, *Studia wybranych przykładów renaturyzacji rzek. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich* nr 9/2010. PAN o. w Krakowie.

Bednarek P., Tworek Ł. 2024. *Projekt renaturyzacji Bukowej. Jak naprawić rzekę i stosunki wodne w jej zlewni? Podkarpackie Towarzystwo Przyrodników Wolne Rzeki.*

Biedroń I, Brzóska P., Dondajewska-Pielka R., Furdyna A., Ryszard Gołdyn G., Grygoruk M., Grześkowiak A., Horsk-Schwarz S., Jusik S., Klósek K., Krzysiński K., Ligieza L., Łapuszek M., Okrański K., Pawlaczyk P., Przesmycki P., Popek Z., Szalkiewicz E., Suska K., Żak J. 2020. *Renaturyzacja wód. Podręcznik dobrych praktyk renaturyzacji wód powierzchniowych*, Kraków.

Gann G.D., McDonald T., Walder B., Aronson J., Nelson C.R., Jonson J., Hallett J.G., Eisenberg C., Guariguata M.R., Liu J., Hua F., Echeverría C., Gonzales E., Shaw N., Decler K., Dixon K.W., 2019. *International Principles & Standards for the Practice of Ecological Restoration*, 2nd edition. Society for Ecological Restoration, Washington, D.C., USA. s. 101.

Polska – Słowacja

Testowanie i wdrażanie nowoczesnych metod zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w dobie zmian klimatycznych / Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien

Iwaszuk E, Rudik G, Duin L, Mederake L, Davis M, Naumann S. (Ecologic Institute); Iwona Wagner I (FPP Enviro). 2019. Błękitno-zielona infrastruktura dla łagodzenia zmian klimatu – katalog techniczny. Ecologic Institute & Fundacja Sendzimira, Berlin – Kraków.

Kurczyński Z., Bakula K., 2016. SAFEDAM - zaawansowane technologie wspomagające przeciwdziałanie zagrożeniom związanym z powodzią. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 28, Warszawa

Ma K.; Chen, Z.; Fu, L.; Tian, W.; Jiang, F.; Yi, J.; Du, Z.; Sun, H., 2022. Performance and Sensitivity of Individual Tree Segmentation Methods for UAV-LiDAR in Multiple Forest Types. Remote Sens. 2022, 14, 298.

Mihu-Pintilie A., Cîmpianu C.I., Stoleriu C.C., Pérez M.N., Paveluc L.E., 2019. Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. Water 11, 1832; 89-112

Radoń R., Piórecki M., 2012. Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego w aglomeracjach miejskich. Ogólnokrajowe Sympozjum - HYDROTECHNIA XIV 2012. Ustroń, RZGW Kraków.

Suchocka M., Siedlecka M., 2017 Powierzchniowe systemy infiltracyjne z możliwością retencji wody jako metoda odwadniania nawierzchni dróg i ulic. „Drogownictwo”, 4/2017

Szumińska D., Giętkowski T., Czapiewski S., 2015. Ocena zmiany warunków hydrologicznych na terenach zurbanizowanych z wykorzystaniem technik. Journal of Education, Health and Sport 5(5), 173-182

Yan Li, Chunlu Liu, 2018. Applications of multirotor drone technologies in construction management. International Journal of Construction Management, DOI:10.1080/15623599.2018.1452101

Żelazo J., Popek Z. Podstawy renaturyzacji rzek. Wyd. SGGW, Warszawa 2002