Interreg

Współfinansowany przez UNIĘ EUROPEJSKĄ

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

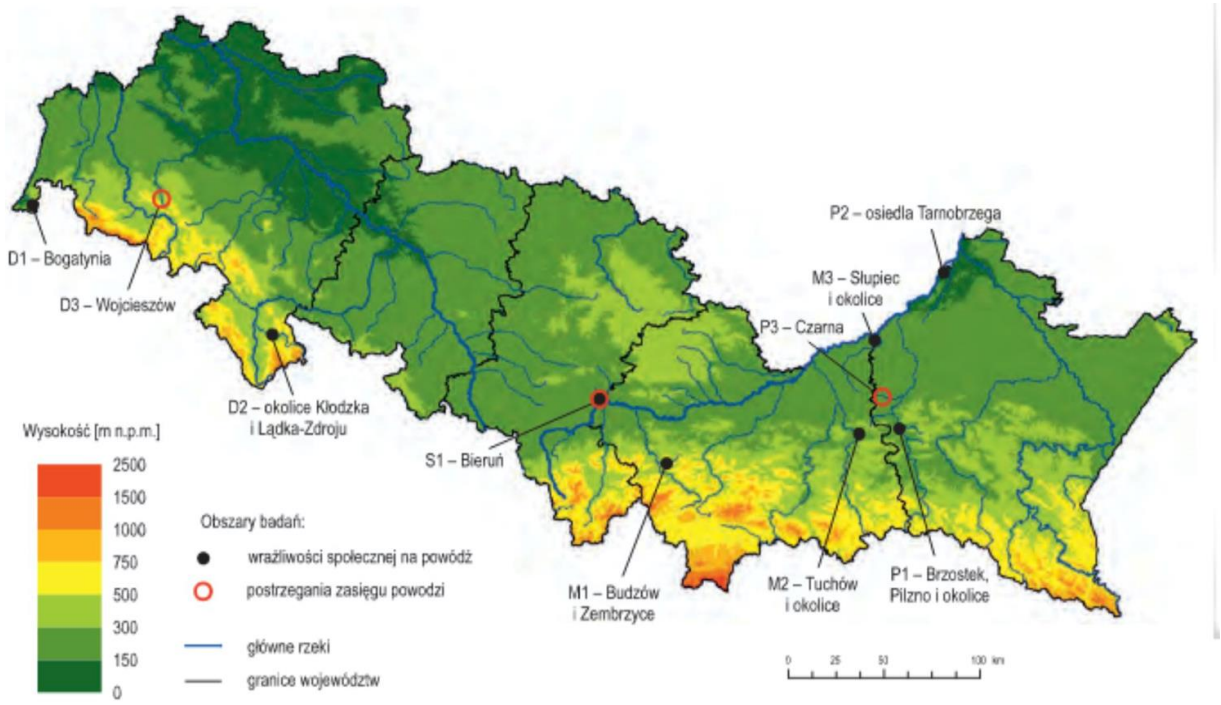
INSTRUKCJA DO PRZEPROWADZENIA OCENY ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO Z ZASTOSOWANIEM METODY UŻYCIA SYSTEMÓW MONITORINGU I WCZESNEGO OSTRZEGANIA OPARTEGO NA SIECI CZUJNIKÓW IoT I SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Opis techniczny analizy zagrożenia powodziowego z zastosowaniem metody systemów monitoringu i wczesnego ostrzegania opartego na sieci czujników IoT i sztucznej inteligencji

I. Instrukcja pozwalająca ocenić zagrożenie powodziowe z zastosowaniem metody systemów monitoringu i wczesnego ostrzegania opartego na sieci czujników IoT i sztucznej inteligencji

Krok 1. **Ustalenie zakresu i celów systemu**

Na początek kluczowe jest precyzyjne zdefiniowanie obszaru, który będzie poddany monitorowaniu, aby system funkcjonował efektywnie i był dostosowany do specyfiki lokalnych warunków. Należy zidentyfikować najbardziej zagrożone lokalizacje, takie jak budynki usytuowane w dolinach rzecznych, mosty oraz kluczowe elementy infrastruktury, których uszkodzenie mogłoby prowadzić do poważnych skutków. (Rys. 1.) Precyzyjne określenie obszaru umożliwia efektywne posadowienie czujników i pozostałych składników systemu pomiarowego. Istotne jest również zdefiniowanie celów systemu, na przykład minimalnego czasu powiadomień, aby ostrzeżenia mogły dotrzeć do odbiorców, zanim zagrożenie stanie się rzeczywiste. Należy dokładnie określić, które rodzaje zjawisk hydrologicznych powinny zostać zidentyfikowane. Czy będą to tylko wezbrania i powodzie, czy również lokalne podtopienia oraz awarie systemów wodnych. Takie podejście pozwala na dostosowanie algorytmów analizy danych do charakterystyki zagrożeń. Wyraźnie ustalone cele umożliwiają także ocenę efektywności funkcjonowania systemu na późniejszym etapie jego użytkowania. W wyniku tego, system monitoringu nie tylko podnosi poziom bezpieczeństwa mieszkańców, ale także pomaga w podejmowaniu decyzji w sytuacjach kryzysowych.

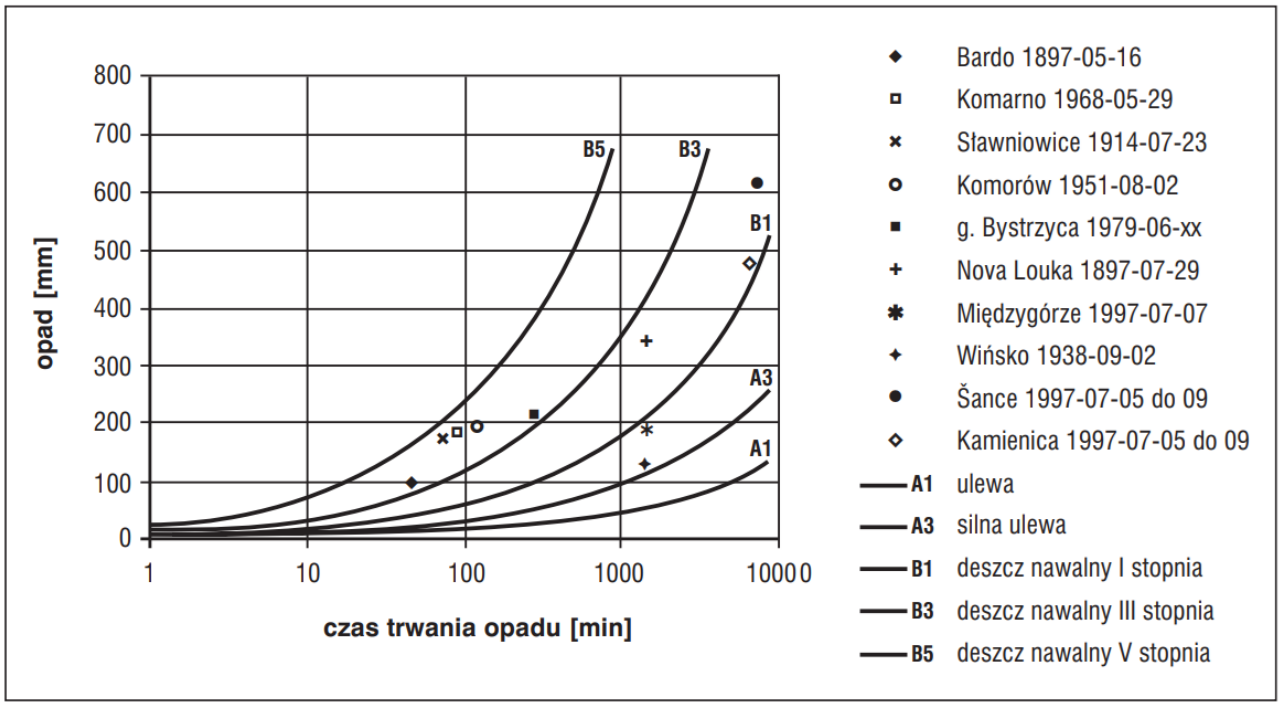


Rys. 1. Obszary badań terenowych
Uwagi : obszarom nadano kody, w których litera oznacza województwo : D – dolnośląskie, S – śląskie, M – małopolskie, P – podkarpackie. Obszar M3 położony jest na granicy województw małopolskiego i podkarpackiego.

Źródło: Działek, J., Biernacki, W., Konieczny, R., Fiedeń, Ł., Franczak, P., Grzeszna, K., & Listwan-Franczak, K. (2017). *Zanim nadejdzie powódź: wpływ wyobrażeń przestrzennych, wrażliwości społecznej na klęski żywiołowe oraz komunikowania ryzyka na przygotowanie społeczności lokalnych do powodzi*.

Krok 2. **Zbieranie danych wejściowych**

Konieczne jest zebranie danych historycznych, które zawierają informacje na temat opadów deszczu przepływu wód w rzekach, poziomu wód oraz map przedstawiających ukształtowanie terenu, dane te mogą pochodzić ze źródeł różnego typu (Rys. 2.). Informacje tego rodzaju umożliwiają badanie wydarzeń, które wystąpiły się w przeszłości, oraz pozwalają na formułowanie wniosków na temat możliwych scenariuszy przyszłych zdarzeń. Istotne jest, aby zgromadzone dane były jak najbardziej kompletne, rzetelne oraz obejmowały wystarczająco długi okres, co podnosi precyzję przewidywań. Tak samo ważne jest zdobycie dostępu do aktualnych danych operacyjnych, takich jak prognozy numeryczne dotyczące pogody oraz obrazy z radarów meteorologicznych. Te informacje stanowią podstawę prognoz w czasie rzeczywistym, co umożliwia błyskawiczne dostosowanie się do nagłych zmian warunków hydrometeorologicznych. Integracja danych historycznych oraz operacyjnych stanowi silny fundament do opracowywania prognozujących modeli o dużej efektywności. Analiza przestrzenna, która opiera się na mapach terenu, umożliwia uwzględnienie lokalnych warunków, takich jak kształt dolin rzecznych czy sposób wykorzystania gruntów. Baza danych stworzona w ten sposób staje się istotnym elementem skutecznego systemu nadzoru oraz wczesnego ostrzegania.

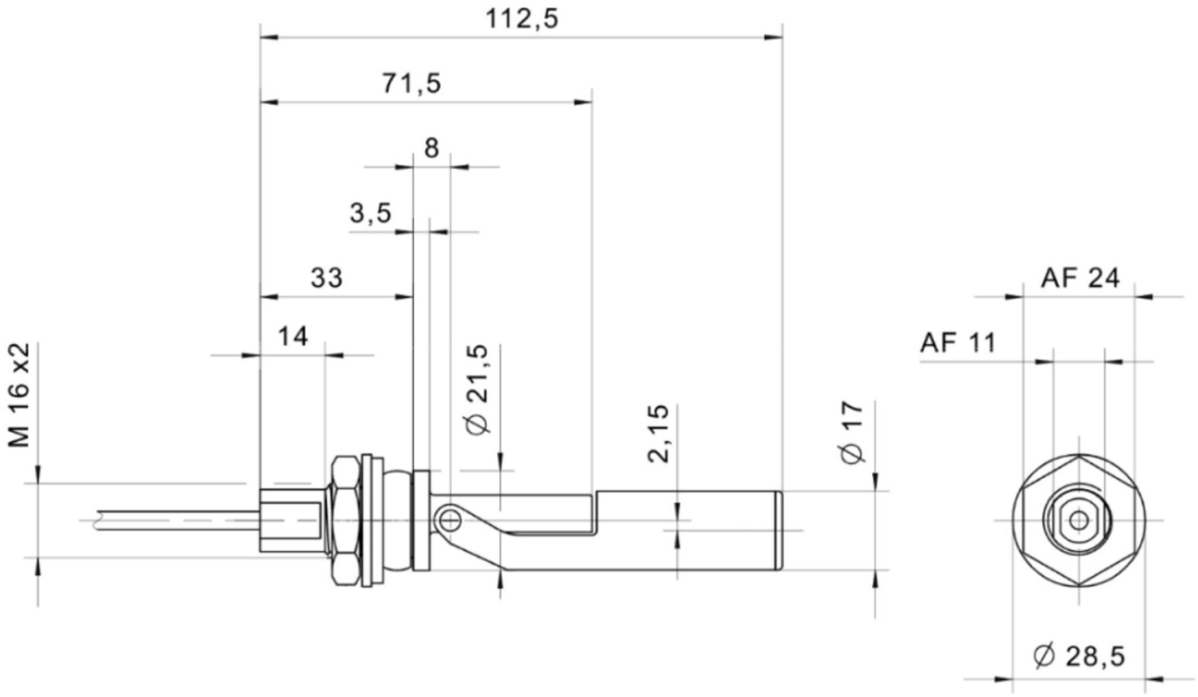


Rys. 2. Wybrane zdarzenia opadowe o najwyższej intensywności w zlewni górnej i środkowej Odry na tle klasyfikacji Chomicza; zaznaczono wysokość opadów atmosferycznych w odniesieniu do czasu ich trwania (skala logarytmiczna)

Źródło: Miasta, R. S. (2016). *Klęski żywiołowe w postaci zdarzeń powodziowych i ich pochodnych na Śląsku od XIV do XX wieku*. E. Kościk, & B. Konopska (Eds.). Polskie Towarzystwo Historyczne.

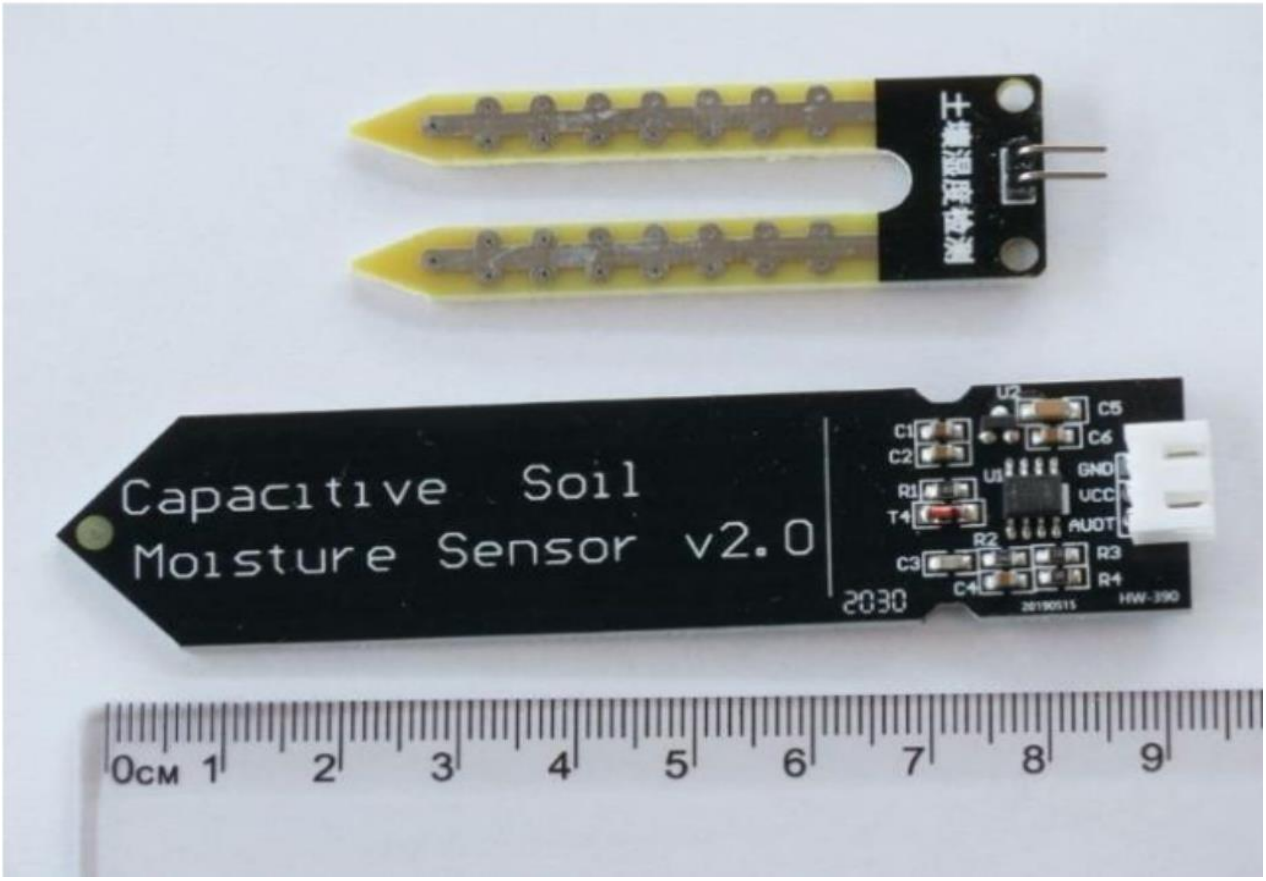
Krok 3. **Projektowanie sieci czujników IoT**

Na tym etapie jest niezbędne wybranie odpowiednich czujników, które będą fundamentem całego systemu monitorowania. Mogą to być czujniki m. in. do mierzenia poziomu wody (Rys. 3.), deszczomierze, oraz przyrządy do oceny wilgotności gleby (Rys. 4.), a także urządzenia do pomiaru prędkości wody w rzekach i kanałach. Każdy rodzaj czujnika spełnia inną, lecz równie istotną rolę, dlatego właściwy wybór tych urządzeń jest kluczowy dla jakości zbieranych informacji. Ważne jest także określenie liczby urządzeń, które należy umieścić w sposób, który jak najlepiej odwzorowuje lokalne warunki hydrologiczne. Odpowiednie umiejscowienie w terenie umożliwia detekcję różnorodności zjawisk, np. rozbieżności w ilości opadów oraz prędkości przepływu w różnych częściach rzeki. Istotnym aspektem planowania jest także uwzględnienie redundancji systemu, co oznacza posiadanie dodatkowych pomiarów w istotnych miejscach. Dzięki temu można zapobiec przerwom w monitorowaniu, gdy jedno z urządzeń ulegnie uszkodzeniu lub utraci połączenie. Taki układ czujników został zaprojektowany w sposób, który gwarantuje ciągłość oraz wiarygodność zbieranych danych, stanowiących podstawę efektywnych prognoz i ostrzeżeń.



Rys. 3. Czujnik poziomu cieczy

Źródło: Bożek, S. Optymalizacja warunków klimatycznych w ekologicznej uprawie pod osłonami.



Rys. 4. Czujnik wilgotności gleby. U góry czujnik rezystywny, poniżej czujnik pojemnościowy.

Źródło: Słomka, A. (2022). *Projekt i wykonanie systemu sterowania klimatem* (Bachelor's thesis).

Krok 4. **Przesyłanie i gromadzenie danych**

Informacje pozyskiwane z czujników muszą być przesyłane z zastosowaniem nowoczesnych technologii komunikacyjnych, takich jak LoRaWAN, LTE-M lub 5G, co umożliwia szybki oraz stabilny transfer danych w czasie rzeczywistym (Tab. 1). Wybór właściwej technologii jest uzależniony od lokalnych warunków, zasięgu sieci oraz potrzeb dotyczących przepustowości i efektywności energetycznej. Wykorzystanie różnych kanałów komunikacji w tym samym czasie poprawia odporność systemu na zakłócenia oraz usterki. Lokalne bramy IoT mogą mieć duże znaczenie, ponieważ działają jako elementy pośredniczące pomiędzy czujnikami, a główną bazą danych. Te bramy mogą wykonywać wstępne obliczenia oraz selekcję danych, usuwając błędne wartości i odciążając główny system obliczeniowy. Dzięki temu można zmniejszyć czas odpowiedzi na zdarzenia hydrologiczne oraz ograniczyć ilość przesyłanych informacji do tych, które są najważniejsze. Tego rodzaju architektura czyni system bardziej stabilnym oraz odpornym na przeciążenia w warunkach kryzysowych. W rezultacie informacje, które są przesyłane do centralnej bazy, odznaczają się wysoką jakością i mogą być natychmiast zastosowane w procesie przewidywania oraz podejmowania decyzji.

Technologia	NB-IoT (LTE CAT NB)	LTE-M (LTE CAT M)	EC-GSM-IoT
Topologie	*Gwiazda*	*Gwiazda*	*Gwiazda*
Maksymalna przepływność	*250 kb/s*	*1 Mb/s*	*490 kb/s*
Częstotliwości	*LTE*	*LTE*	*GSM*
Zasięg	*10 km*	*10 km*	*15 km*
Zastrzeżone warstwy	*Cały stos*	*Cały stos*	*Cały stos*
Liczba urządzeń na jedną bramę	*> 50 tyś (Rel 13)* *> 800 tyś (Rel 14)*	*> 50 tyś (Rel 13)* *> 800 tyś (Rel 14)*	*> 50 tyś (Rel 13)* *> 800 tyś (Rel 14)*
Szyfrowanie	*128-256 bit 3GPP*	*128-256 bit 3GPP*	*128-256 bit 3GPP*
Poziom dojrzałości technologii	*W użyciu komercyjnym*	*W użyciu komercyjnym*	*W fazie wdrażania*
Opóźnienie	*0,3-10 s*	*0,2-10 s*	*0,6-10 s*

Tab. 1. Zestawienie wybranych energooszczędnych technologii sieci komórkowych.

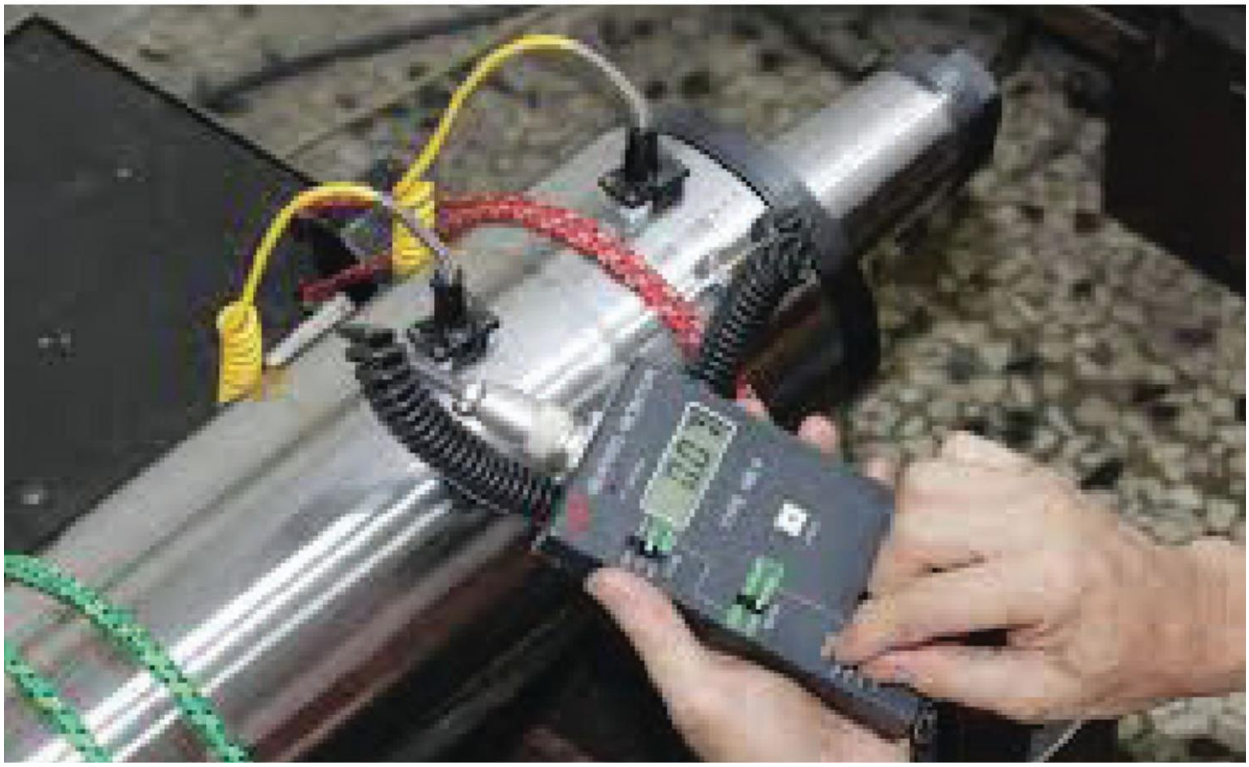
Źródło: Michta, E., Eljasz, D., & Lewandowski, W. (2023). Standardy komunikacyjne stosowane w systemach Smart Lighting. *Przegląd Elektrotechniczny*, *99*.

Krok 5. **Kontrola jakości i wstępna obróbka danych**

Wszystkie zgromadzone informacje muszą przejść proces weryfikacji jakości, aby zidentyfikować wartości nietypowe, błędne lub brakujące, które mogłyby wpłynąć na błędy w trakcie dalszej analizy. Proces walidacji obejmuje zarówno weryfikację dokładności pomiarów, jak i porównywanie ich z danymi odniesienia uzyskanymi z różnych źródeł. Dzięki temu umożliwione jest błyskawiczne rozpoznawanie nieprawidłowości, takich jak niezwykle wysokie wartości opadów lub nagłe zmniejszenie poziomu wody. W sytuacji, gdy zajdzie taka potrzeba, krótkoterminowe luki należy wypełniać przy użyciu metod interpolacyjnych lub predykcyjnych, aby zapewnić nieprzerwaną ciągłość szeregów czasowych. Użycie tych technik umożliwia ograniczenie utraty informacji oraz zapewnienie spójności baz danych. Istotne jest również rejestrowanie wszelkich zmian i uzupełnień, aby zapewnić całkowitą przejrzystość w procesie przetwarzania danych. Dzięki temu osoby korzystające z systemu mogą być pewne, że informacje, które są analizowane, są wiarygodne i opracowane zgodnie z ustalonymi normami. Dokładna kontrola jakości jest podstawą wiarygodnych prognoz hydrologicznych i jest niezbędnym składnikiem każdego profesjonalnego systemu monitorowania.

Rys. 5. Ekran nadzoru nad narzędziami i zarządzania programami obróbki technologicznej.

Źródło: Szulewski, P. (2019). „Oprogramowanie i systemy czujników fundamentem koncepcji przemysłu 4.0”. *Mechanik*, *92*.



Rys. 6. Kontrola czujników wbudowanych we wrzeciono.

Źródło: Szulewski, P. (2019). „Oprogramowanie i systemy czujników fundamentem koncepcji przemysłu 4.0”. *Mechanik*, *92*.

Krok 6. **Modelowanie przepływu i zmiana danych**

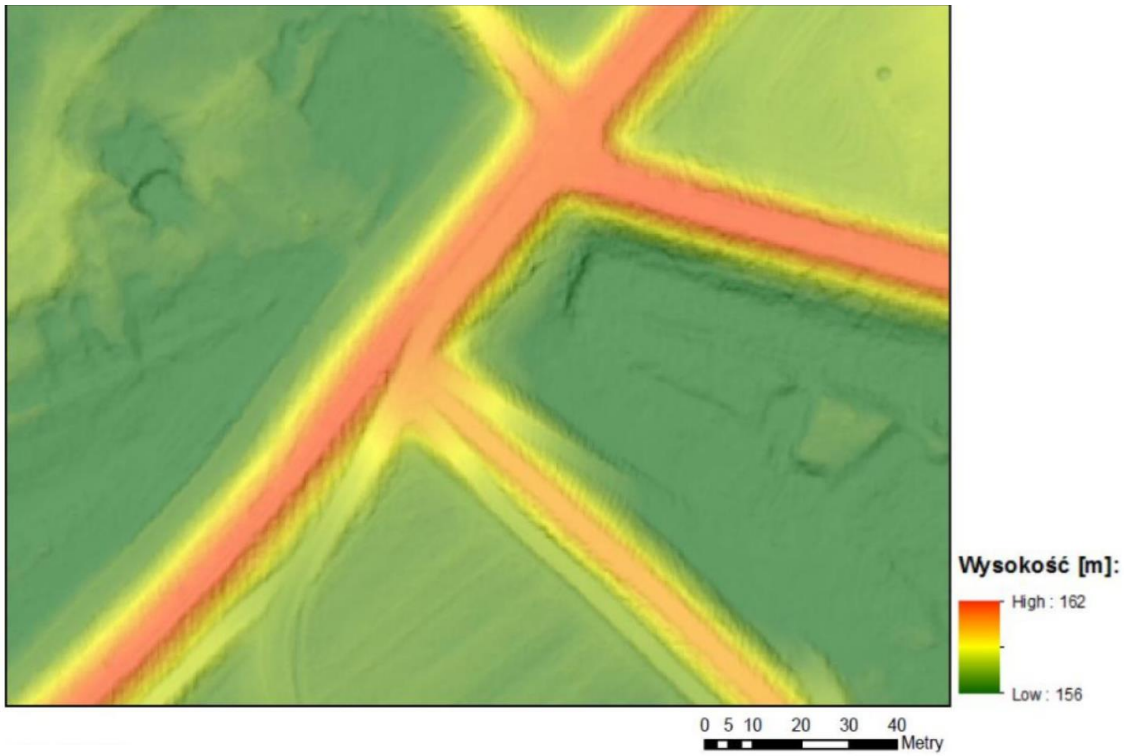
Pomiary poziomu wody powinny być przekształcane w szacowane przepływy za pomocą lokalnych krzywych korelacyjnych, znanych jako krzywe ratingowe. Krzywe te przedstawiają związek pomiędzy poziomem zwierciadła wody, a odpowiadającym mu natężeniem przepływu, co pozwala na przekształcanie podstawowych pomiarów hydrometrycznych w bardziej przydatne wskaźniki. Właściwy wybór i kalibracja tych krzywych są istotne dla precyzji prognoz hydrologicznych oraz oceny ryzyka powodziowego. Ich parametry powinny być systematycznie dostosowywane, ponieważ warunki rzeki zmieniają się z powodu erozji, gromadzenia się osadów oraz działań hydrotechnicznych. Szczególnie ważne jest wykonanie nowych kalibracji po wystąpieniu silnych powodzi, które mogą znacząco wpłynąć na kształt przekroju rzeki. Nieaktualizowanie prowadziłoby do zniekształcenia wyników oraz zmniejszenia wiarygodności całego systemu. W związku z tym, istotne jest nieprzerwane obserwowanie zmian w korycie oraz gromadzenie dodatkowych pomiarów w różnych warunkach przepływu. Dzięki temu otrzymane dane będą rzetelne, a system nadzorczy będzie w stanie dostarczać dokładne i bieżące informacje.
Do realizacji węzła trzeba wybrać „właściwe” rozwiązania sprzętowe co oznacza poszukiwania pośród spośród setek modeli, typów i rodzajów mikrokontrolerów i mikroprocesorów, układów transmisyjnych i zasilających. Ponadto w wyniku nieustannego postępu omówienie konkretnych elementów elektronicznych obarczone jest ryzykiem szybkiej dezaktualizacji się takiego tekstu. Dlatego przegląd rozwiązań obecnych na rynku będzie zmierzał w stronę podkreślenia istotnych cech, na które zdaniem autora warto zwracać uwagę. Na zużycie energii przez pojedyncze urządzenie, oprócz zastosowanych podzespołów, ma wpływ implementacja algorytmów cyklu pomiarowego, dynamicznego doboru częstotliwości próbkowania sygnału, predykcji pomiarów i natychmiastowej analizy ich wiarygodności, przechowywania i przesyłania.

Krok 7. **Prognozowanie z zastosowaniem sztucznej inteligencji**

Na podstawie zgromadzonych danych historycznych oraz bieżących, konieczne jest rozwijanie modeli sztucznej inteligencji, które będą w stanie uchwycić skomplikowane zależności między opadami, poziomami wód a przepływami. Zaleca się korzystanie z architektur opartych na sieciach LSTM, które wykazują wysoką skuteczność w analizie danych czasowych, oraz z modeli CNN, zdolnych do efektywnej analizy układów przestrzennych danych, takich jak mapy opadów lub obrazy radarowe. Dzięki nim można przewidywać poziom wody oraz przepływ z wyprzedzeniem od kilku godzin do nawet kilku dni, co znacznie wydłuża czas na reakcję i przygotowanie działań ochronnych. Modele te mogą wytwarzać prognozy deterministyczne, przedstawiające jedną przewidywaną wartość, a także prognozy probabilistyczne, które ilustrują szereg potencjalnych scenariuszy wraz z ich prawdopodobieństwem wystąpienia. Zastosowanie podejścia opartego na prawdopodobieństwie umożliwia dokładniejszą analizę ryzyka oraz wspomaga proces podejmowania decyzji w sytuacjach, gdzie panuje brak pewności. Kluczowym aspektem rozwoju tych modeli jest ich ciągłe uczenie się oraz dostosowywanie w oparciu o nowe informacje, które napływają z systemu monitorującego. Systematyczna walidacja oraz zestawianie prognoz z rzeczywistymi danymi pozwala na stopniowe podnoszenie precyzji stosowanych algorytmów. W rezultacie sztuczna inteligencja staje się istotnym narzędziem w nowoczesnym systemie przewidywania hydrologicznego oraz zarządzania ryzykiem powodziowym.

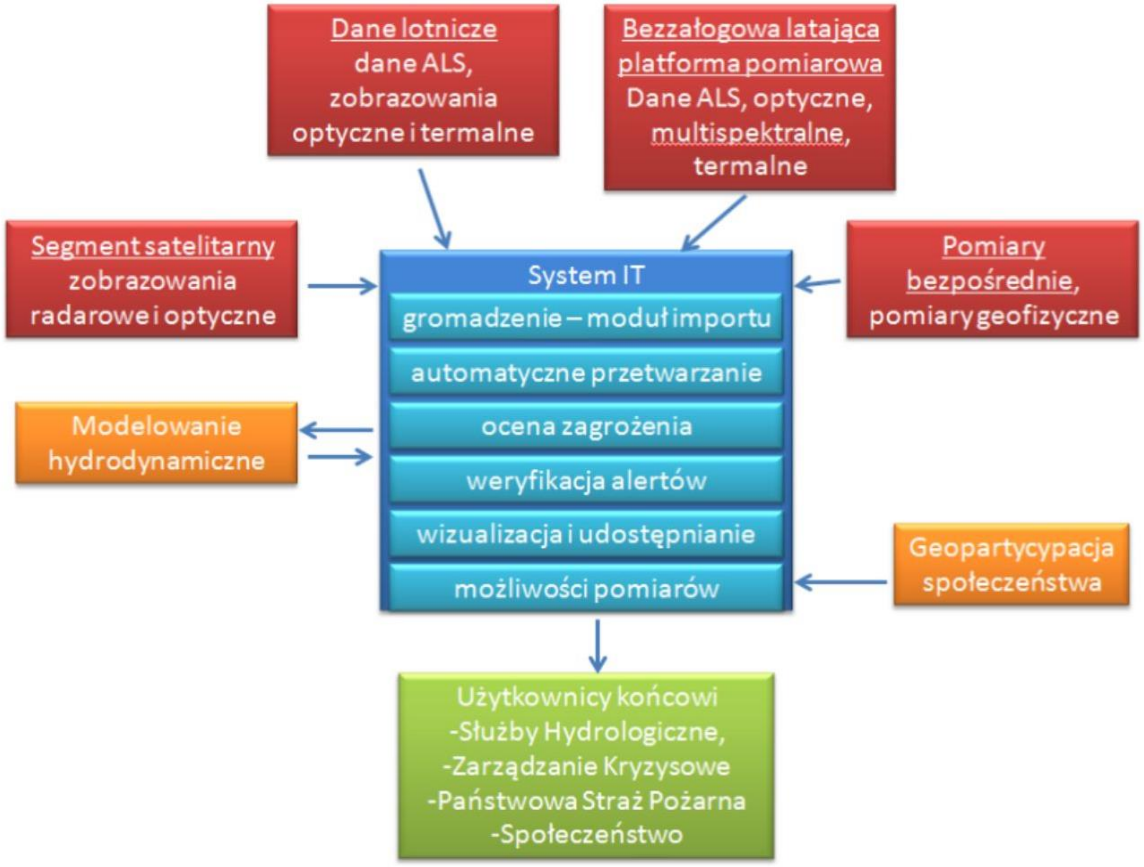
Krok 8. **Analiza ryzyka oraz ustalanie progów ostrzegawczych**

System powinien samodzielnie oceniać ryzyko przekroczenia ustalonych limitów niebezpieczeństwa, korzystając z analizowanych danych pomiarowych oraz prognoz. Istotne jest, aby ocena ryzyka była przeprowadzana w czasie rzeczywistym, co umożliwi szybkie reagowanie na nagłe zmiany w sytuacji hydrologicznej. System powinien tworzyć alarmy dostosowane do skali zagrożenia, co umożliwia uporządkowanie informacji i wspiera proces decyzyjny. Na przykład, żółte ostrzeżenie może być ogłaszane w sytuacji umiarkowanego ryzyka, pomarańczowe przy znacznym ryzyku, a czerwone w przypadku ryzyka bardzo wysokiego, które wymaga natychmiastowego działania (Rys. 7). Zróżnicowanie poziomów ostrzeżeń pozwala odbiorcom lepiej zrozumieć zakres zagrożenia oraz odpowiednio przygotować się do sytuacji. Istotne jest, aby system dostarczał informacji nie tylko na temat poziomu ryzyka, lecz również dotyczących przewidywanego terminu pojawienia się zagrożenia oraz jego możliwych konsekwencji (Rys. 8). Dzięki temu mieszkańcy, służby ratunkowe oraz lokalna administracja są w stanie działać w bardziej zorganizowany sposób. Tego rodzaju system alarmowy jest istotnym składnikiem efektywnego zarządzania kryzysowego oraz redukcji strat spowodowanych przez powodzie.



Rys. 7. Widok nałożenia barwnej prezentacji wysokościowej wału przeciwpowodziowego (m. n.p.m.; układ wysokości Kronsztadt 86) i modelu cieniowanego prezentującego topografię wału przeciwpowodziowego (źródło danych ISOK).

Źródło: Kurczyński, Z., & Bakuła, K. (2016). SAFEDAM-zaawansowane technologie wspomagające przeciwdziałanie zagrożeniom związanym z powodziami. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, *28*, 39-52.



Rys. 8. Schemat systemu monitoringu wałów przeciwpowodziowych SAFEDAM.

Źródło: Kurczyński, Z., & Bakuła, K. SAFEDAM. (2023). Zaawansowane technologie wspomagajce przeciwdziałanie zagrozeniom zwiazanym z powodziami safedam-advanced technologies in the prevention of flood hazard.

Krok 9. **System powiadamiania oraz komunikacja**

Ostrzeżenia powinny być przekazywane przez różne środki komunikacji, aby osiągnąć jak najszerszą publiczność, niezależnie od ich wieku, lokalizacji czy możliwości korzystania z technologii. W tym celu stosuje się wiadomości SMS (Rys. 9), aplikacje na telefon, alarmy dźwiękowe oraz media lokalne, takie jak radio i telewizja (Ryc. 10). Istotne jest, aby wiadomości były przekazywane w spójnej formie, co zmniejsza ryzyko różnic w treści i zapewnia jednolitość przekazu. Każde ostrzeżenie powinno zawierać kluczowe dane dotyczące miejsca zagrożenia, przewidywanej pory jego wystąpienia oraz potencjalnych skutków dla ludności. Wykorzystanie wielu kanałów informacji o niebezpieczeństwie zwiększa prawdopodobieństwo, że ostrzeżenie zostanie przekazane na czas, nawet w sytuacji awarii jednego z systemów. Takie podejście znacznie zwiększa efektywność całego systemu ostrzegania oraz wspiera bezpieczeństwo w zakresie lokalnym.

Rys. 9. Alert RCB - Przykładowe wiadomości (SMS)

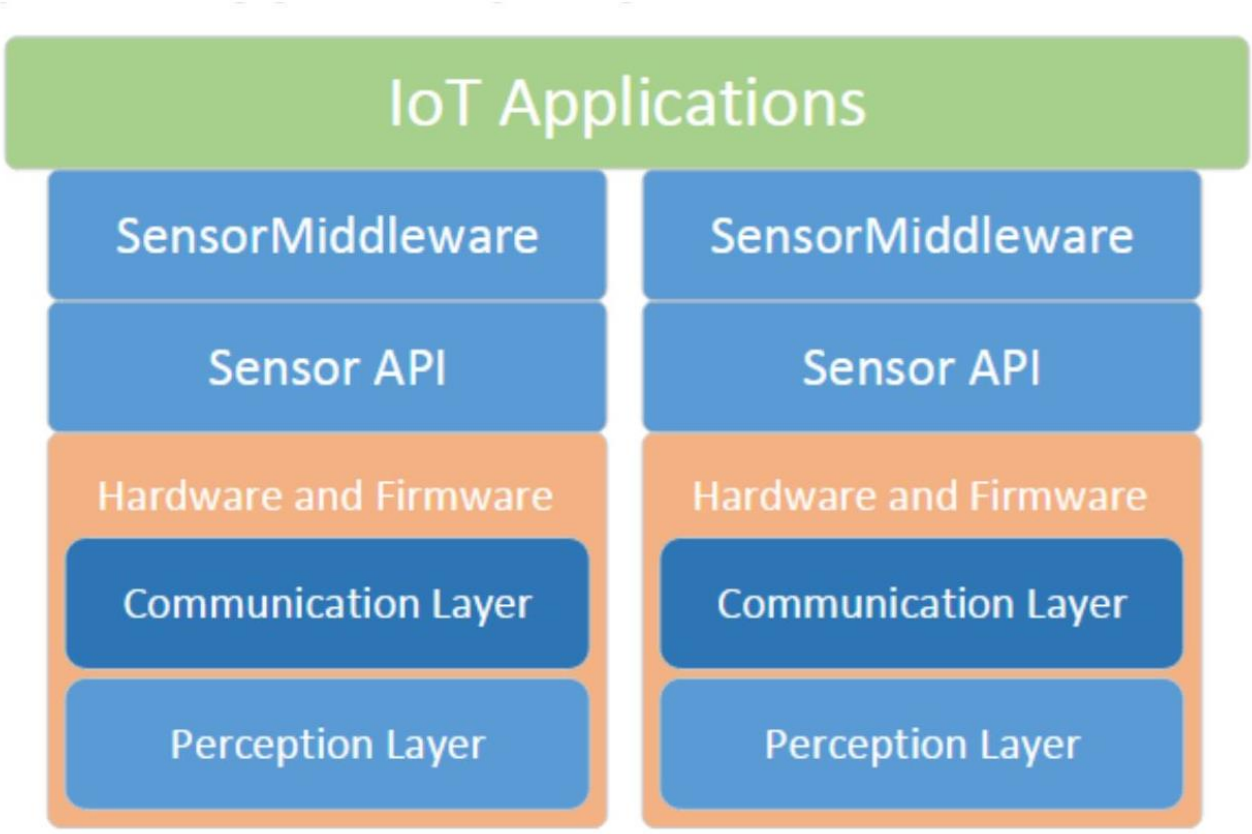
Źródło: https://www.gov.pl/web/rcb/alert-rcb---przykladowe-wiadomosci-sms

Rys. 10. Grafika zamieszczona na stronie Gminy Mstów na temat alarmu powodziowego, 6 luty, 2024r.

Źródło: https://www.mstow.pl/art/4888,pogotowie-przeciwpowodziowe

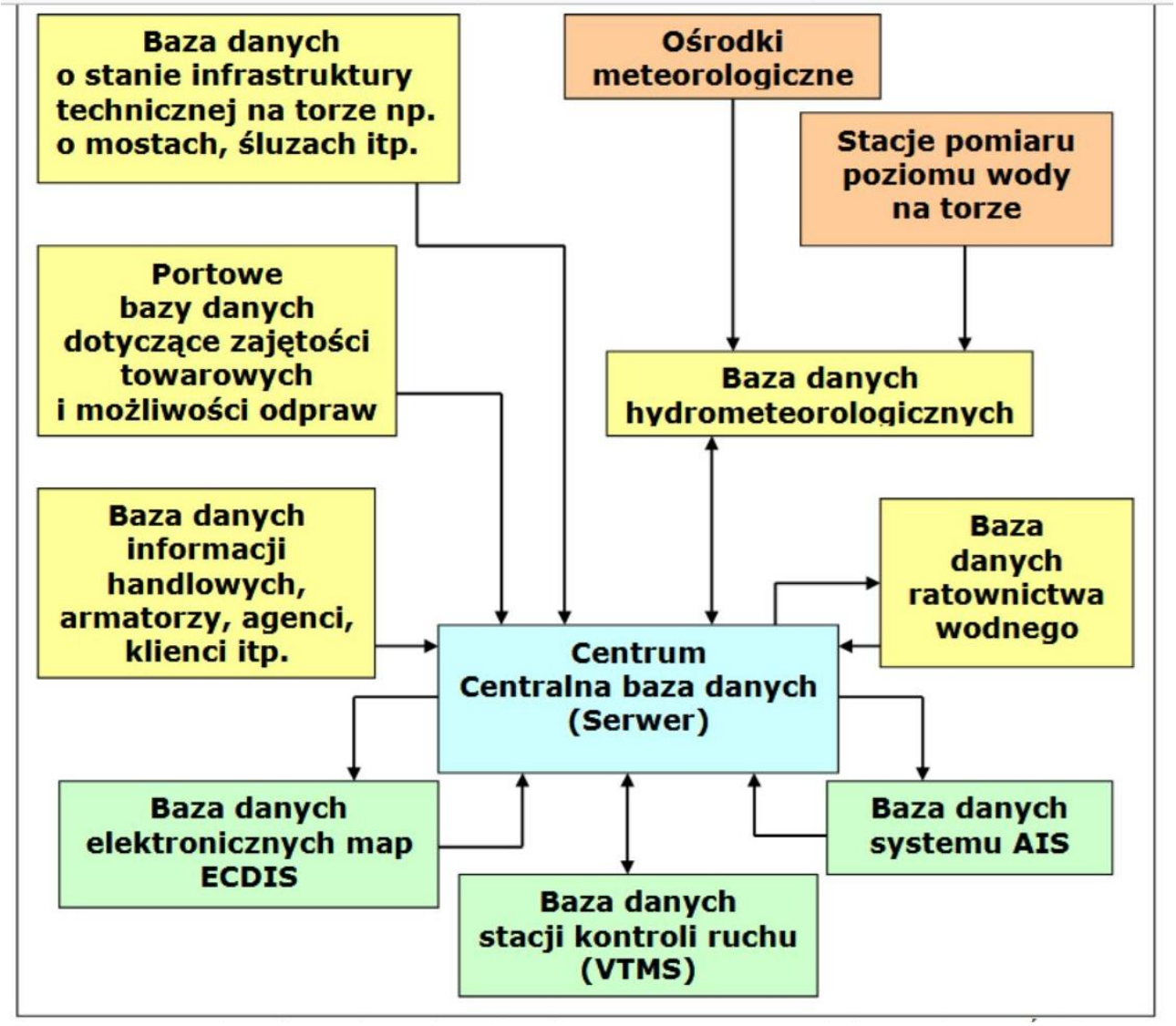
Krok 10. **Weryfikacja, utrzymanie i ulepszanie systemu**

Ostatni etap polega na nieustannym sprawdzaniu prawidłowości działania systemu, co umożliwia bieżącą ocenę jego efektywności oraz niezawodności. W tym celu stosuje się zarówno symulacje historyczne, które opierają się na informacjach z minionych powodzi i wezbrań, jak i ćwiczenia terenowe, które oceniają reakcję systemu w warunkach przypominających rzeczywiste sytuacje. Służą do tego między innymi symulatory sensora w SenseSim (Rys. 11). Systematyczne testowanie pozwala na identyfikację potencjalnych usterek oraz niedociągnięć w systemach ostrzegawczych, zanim wystąpi realne zagrożenie. Ważnym aspektem jest także obserwowanie skuteczności prognoz poprzez zestawienie ich wyników z rzeczywistymi danymi hydrologicznymi. Dzięki temu możliwe jest systematyczne doskonalenie algorytmów oraz podnoszenie dokładności prognoz. Istotne jest również regularne serwisowanie czujników, co zapewnia ich właściwe funkcjonowanie oraz zmniejsza ryzyko awarii w istotnych momentach. Jednocześnie należy systematycznie aktualizować modele prognozowania, aby odzwierciedlały one zmiany w warunkach środowiska i hydrologii (Rys.12), przedstawia strukturę baz danych rzecznego systemu informacyjnego.



Rys. 11. Architektura sensora w SenseSim.

Źródło: Najgebauer, A., Dyk, M., & Pierzchała, D. (2015). Modelowanie i symulacja sieci IoT w symulatorze SenseSim. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, *6*(1), 35-44.



Rys. 12. Struktura baz danych rzecznego systemu informacyjnego.

Źródło: Miciuła, I. (2010). *Model systemy wspomagania decyzji w oparciu o dane geoprzestrzenne na potrzeby rzecznego systemu informacyjnego z wykorzystaniem dynamicznej domeny 3D* (Doctoral dissertation, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie).

Ograniczenia i preferencje użycia systemów monitoringu i wczesnego ostrzegania opartych na sieci czujników IoT i sztucznej inteligencji

Systemy nadzoru i wczesnego ostrzegania, które wykorzystują technologię Internetu Rzeczy (IoT) oraz sztuczną inteligencję (AI), stają się coraz bardziej popularnym narzędziem wspierającym bezpieczeństwo, zarządzanie ryzykiem oraz ochronę kluczowej infrastruktury. Dzięki połączeniu rozproszonych sieci czujników, analizy danych w czasie rzeczywistym oraz algorytmów uczenia maszynowego, możliwe jest szybkie identyfikowanie anomalii, prognozowanie zagrożeń oraz podejmowanie działań prewencyjnych. Mimo dużego potencjału tych rozwiązań, ich efektywne wprowadzenie i użytkowanie wymaga uwzględnienia wielu ograniczeń technicznych, organizacyjnych oraz etycznych.

1. **Ograniczenia związane z technologią**

Najważniejszym ograniczeniem jest pewność działania oraz precyzyjność czujników IoT. Urządzenia te, szczególnie w warunkach trudnych (np. przemysłowe, leśne lub morskie systemy) mogą być wystawione na uszkodzenia mechaniczne, zakłócenia sygnału oraz ograniczenia w dostępie do energii. Ponadto, różnorodne standardy komunikacyjne oraz niewystarczająca interoperacyjność pomiędzy urządzeniami różnych producentów mogą sprawiać trudności w integracji systemu i wymianie danych. Kolejnym ważnym ograniczeniem jest efektywność przetwarzania informacji. Systemy sztucznej inteligencji potrzebują znacznych zasobów obliczeniowych oraz niezawodnej infrastruktury sieciowej, aby mogły przetwarzać dane w czasie rzeczywistym. W sytuacji problemów lub opóźnień w przekazywaniu informacji efektywność systemu wczesnego ostrzegania może ulec znacznemu obniżeniu.

2. **Ograniczenia dotyczące zabezpieczeń i ochrony prywatności**

Systemy oparte na technologii IoT są narażone na ataki cybernetyczne, takie jak przechwytywanie danych w trakcie transmisji, modyfikacja pomiarów oraz nieautoryzowany dostęp do sieci. Dodatkowo, w kontekście systemów nadzorujących (osoby lub prywatne przedmioty) występuje kwestia ochrony danych osobowych oraz spełnienia wymogów regulacyjnych (np. RODO). Wprowadzenie właściwych mechanizmów szyfrowania, autoryzacji oraz audytu staje się zatem koniecznym aspektem w procesie projektowania tych systemów.

3. **Ograniczenia w zakresie organizacji oraz finansów**

Implementacja nowoczesnego systemu monitoringu wymaga dużych inwestycji finansowych, zarówno na zakup sprzętu i oprogramowania, jak i na konserwację infrastruktury oraz szkolenie pracowników. Niedostateczne zasoby techniczne oraz finansowe mogą wpływać na możliwości realizacji projektu lub jego niezawodność. Ponadto, efektywność systemu jest uzależniona od umiejętności użytkowników oraz stopnia zaufania do algorytmów podejmujących decyzje. Preferencje oraz obszary rozwoju Pomimo wspomnianych ograniczeń, zainteresowanie wdrażaniem systemów wykorzystujących IoT oraz AI wzrasta w wielu dziedzinach – od zarządzania kryzysowego, poprzez ochronę środowiska, aż po inteligentne miasta i przemysł 4. 0. Coraz częściej wybiera się rozwiązania hybrydowe, które łączą lokalne przetwarzanie danych (edge computing) z analizą w chmurze, co umożliwia skrócenie czasu reakcji oraz redukcję obciążenia sieci. Zaleca się wybór systemów modułowych i łatwych do rozbudowy, które umożliwiają dodawanie nowych czujników i funkcji, a także otwartych rozwiązań, które korzystają z ustandaryzowanych protokołów komunikacyjnych (np. MQTT, LoRaWAN). Rosnące znaczenie ma także przejrzystość działania algorytmów AI, co pozwala na audyt podejmowanych decyzji oraz zrozumienie wyników przez końcowych użytkowników.

Przykład zastosowania metody: System obserwacji zagrożeń powodziowych w obrębie doliny rzeki Wisłok

Krok 1. **Ustalenie zakresu i celów systemu**

Cel projektu:

Opracowanie zintegrowanego systemu wczesnego ostrzegania przed powodzią dla gmin znajdujących się w dolinie rzeki Wisłok, obejmującego miasta Krosno i Rzeszów oraz sąsiadujące wioski.

Zakres systemu:

• Obszar, który jest przedmiotem monitoringu: dolina Wisłoka na długości 70 km (od Krosna do Rzeszowa).

• Składniki infrastruktury kluczowej:

- Mosty transportowe w Krośnie, Strzyżowie oraz Rzeszowie.
- Oczyszczalnie ścieków znajdujące się w Krośnie oraz Zwięczycy.
- Pobór wody pitnej z rzeki.

· Strefy szczególnego zagrożenia: tereny zalewowe w miejscowościach Kombornia, Frysztak, Czudec i Boguchwała.

Cele systemu:

• Zredukowanie czasu informowania mieszkańców o nadchodzącej fali powodziowej do najwyżej 15 minut od chwili zauważenia niebezpieczeństwa.

• Automatyczne rozpoznawanie zjawisk:
- nagłe podniesienia poziomu wody po intensywnych opadach,
- lokalne zalania spowodowane przez zatory,
- problemy z wałami ochronnymi przed powodziami.

• Dostarczenie dokładnych informacji dla organów zarządzania kryzysowego oraz jednostek samorządowych.

• Możliwość oceny efektywności funkcjonowania systemu po zakończeniu sezonu powodziowego (np. liczba ostrzeżeń vs. rzeczywiste zdarzenia).

Krok 2. **Projektowanie systemu pomiarowego**

Na podstawie określonych wymagań i celów, stworzono sieć czujników oraz system zarządzania danymi.

Składniki systemu pomiarowego:

- Czujniki do pomiaru poziomu wody – umieszczone w 12 punktach pomiarowych wzdłuż rzeki, z większą gęstością w rejonach o podwyższonym ryzyku powodzi.
- Automatyczne deszczomierze – 8 stacji pomiarowych do monitorowania intensywności opadów oraz ich oddziaływania na poziom wody.
- Kamery do monitorowania obrazu – pięć miejsc w strategicznych lokalizacjach (mosty, węzły komunikacyjne).
- Czujniki do pomiaru przepływu oraz ciśnienia – w systemach odprowadzania wody w miastach.

Integracja danych:

Wszystkie urządzenia przesyłają informacje do centralnej platformy nadzorującej w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie bada zmiany w poziomie wody, prędkość wzrostu fali oraz porównuje te informacje z prognozami pogody.

Krok 3. **Ustalenie procedur działania i powiadamiania**

Procedury systemowe:

- Informacje z czujników są analizowane automatycznie co pięć minut.
- Po osiągnięciu określonych limitów alarmowych (np. W przypadku wzrostu poziomu wody o 30 cm w ciągu 10 minut, system uruchamia alarm.
- Ostrzeżenie jest bezzwłocznie przekazywane do:
  - Centrum kryzysowego zarządzania,
  - Urzędów gmin,
  - Mieszkańców (za pośrednictwem SMS-a oraz aplikacji mobilnej).

Poziomy alarmów:

- Informacyjny – podniesienie poziomu wody ponad normę, brak ryzyka.
- Ostrzegawczy – możliwość wystąpienia lokalnych zalewów, aktywacja służb.
- Alarmowy – istniejące niebezpieczeństwo powodziowe, aktywacja syren alarmowych oraz przeprowadzenie ewakuacji.

Skutki:

System pozwala na błyskawiczne reagowanie na zmieniające się warunki hydrologiczne. Dzięki precyzyjnie zdefiniowanym celom oraz procedurom, zmniejsza się ryzyko utraty mienia i niebezpieczeństwa dla życia obywateli.

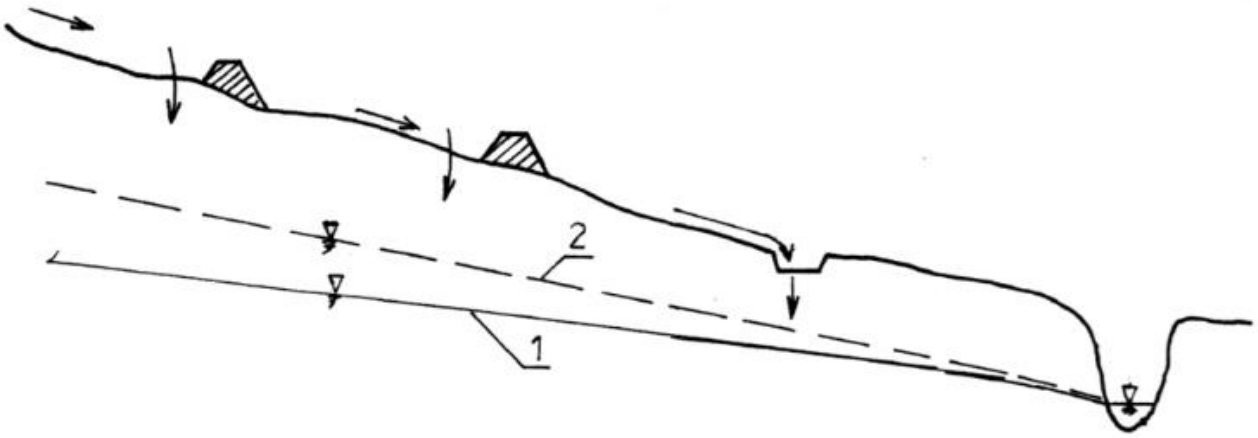
INSTRUKCJA DO PRZEPROWADZENIA OCENY ZAGROŻENIA POWODZIOWEGO POPRZEZ ROZWIĄZANIA OPARTE NA PRZYRODZIE

Opis techniczny analizy zagrożenia powodziowego poprzez rozwiązania oparte na przyrodzie

II. Instrukcja pozwalająca ocenić zagrożenie powodziowe poprzez rozwiązania oparte na przyrodzie

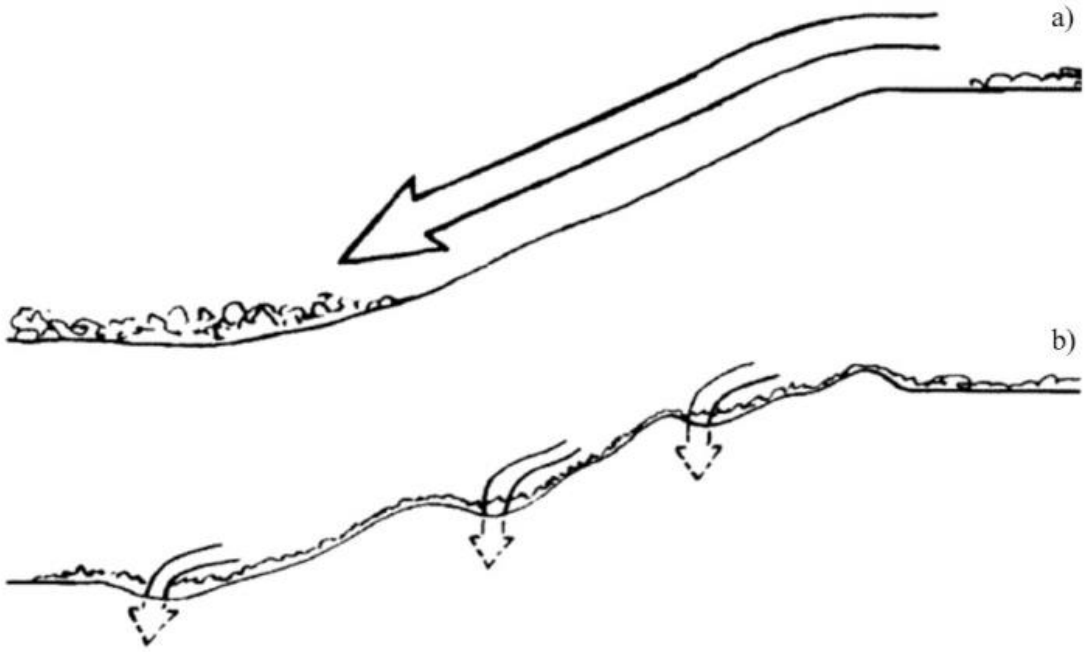
Krok 1. **Ustalanie celów i zasięgu działań**

Pierwszym etapem w tym procesie jest ustalenie celów, które mają zostać osiągnięte dzięki wykorzystaniu rozwiązań inspirowanych przyrodą, co stanowi podstawę kolejnych działań. Możliwe działania obejmują na przykład zmniejszenie wysokości fali wezbraniowej, zwiększenie naturalnych zdolności zatrzymywania wody (Rys. 1., Rys. 2., Rys. 3.), poprawę stanu ekosystemów w dolinach rzek, a także redukcję skutków erozji oraz zwiększenie bioróżnorodności. Dokładne zdefiniowanie priorytetów umożliwia skuteczniejsze dostosowanie planowanych działań do lokalnych warunków hydrologicznych oraz społecznych. Ważne jest również ustalenie obszaru działania, który może obejmować całą zlewnię wodną, pojedynczy dopływ lub konkretny fragment doliny rzeki. Dokładne określenie zakresu pozwala na ocenę możliwych zalet oraz zagrożeń związanych z wdrożeniem inwestycji. Konieczne jest również określenie wskaźników skuteczności działań, takich jak redukcja strat spowodowanych powodzią, polepszenie jakości wód oraz zwiększenie powierzchni obszarów podmokłych. Te kryteria muszą być mierzalne i możliwe do obserwacji, aby w przyszłości można było obiektywnie ocenić efektywność przyjętych działań. Dzięki temu proces planowania staje się bardziej przejrzysty, a podejmowane działania mają większą szansę na długoterminowy i pozytywny wpływ na środowisko oraz społeczności lokalne.



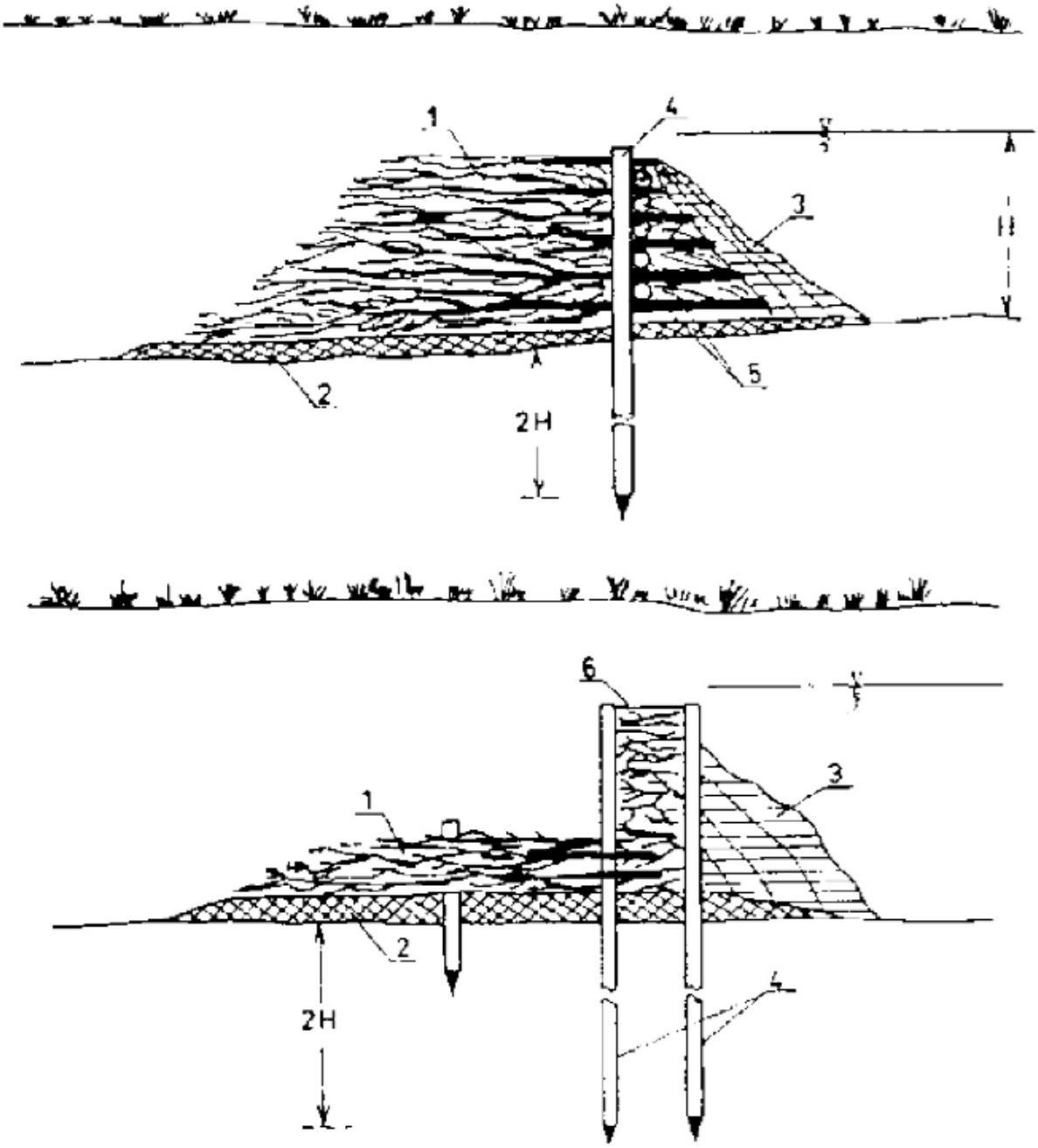
Rys. 1. Usytuowanie grobelek lub rowków w celu zwiększenia infiltracji; 1 – poziom wód gruntowych naturalny, 2 – po wybudowaniu grobelek (rowków).

Źródło: Mioduszewski, W. (2025). Mała retencja elementem gospodarki wodnej. file:///C:/Users/U%C5%BCytkownik/Downloads/Ma%C5%82a_retencja_elementem_gospodarki_.pdf



Rys. 2. Po „gładkim” stoku (a) woda szybko spływa, podczas gdy po wytworzeniu tarasów (b) spływ jest powolniejszy; więcej wody infiltruje i nawadnia zbocze, przez co zmniejsza się zagrożenie powodzią.

Źródło: Mioduszewski, W. (2025). Mała retencja elementem gospodarki wodnej. file:///C:/Users/U%C5%BCytkownik/Downloads/Ma%C5%82a_retencja_elementem_gospodarki_.pdf



Rys. 3. Przykładowe proste progi, które mogą być wykorzystywane przy zabudowie jarów i wąwozów erozyjnych; 1 – chroniące dolne stanowisko przed rozmyciem przelewającą się wodą, 2 – umocnienie podłoża (glina lub włóknina), 3 – warstwa uszczelniająca konstrukcję, 4 – palisada z drewnianych kołków, 5 – części grubsze gałęzi, 6 – wypełnienie przestrzeni pomiędzy palisadami; przy wąwozach o małych prognozowanych przepływach konstrukcja może być uproszczona do dwu rzędów palisad (4) z wypełnieniem gałęziami (6) [Mioduszewski 2014]

Źródło: Mioduszewski, W. (2025). Mała retencja elementem gospodarki wodnej. file:///C:/Users/U%C5%BCytkownik/Downloads/Ma%C5%82a_retencja_elementem_gospodarki_.pdf

Krok 2. **Zbieranie danych podstawowych**

Następny krok to zgromadzenie informacji na temat danych przestrzennych oraz środowiskowych, które są kluczowe dla efektywnego zaplanowania działań inspirowanych naturą. Na tym etapie zbiera się dane dotyczące hydrologii i meteorologii, a także dokładne mapy użytkowania gruntów, które ilustrują sposób zagospodarowania terenu. Istotnym źródłem informacji są także dane dotyczące typów gleb, ich zdolności do przepuszczania wody oraz retencji, jak również szczegóły na temat pokrycia terenu roślinnością, co ma wpływ na procesy infiltracji i parowania. Nie można zignorować danych historycznych o powodzi (Tab. 1), które umożliwiają wskazanie najbardziej narażonych terenów oraz częstotliwości występowania ekstremalnych zjawisk. Wszystkie te informacje są zbierane w postaci jednolitej bazy wiedzy, która umożliwia analizę warunków początkowych oraz identyfikację istotnych problemów. Tego rodzaju baza danych upraszcza opracowywanie scenariuszy działań oraz ocenę ich możliwych wyników. Ważne jest, że połączenie danych geograficznych z danymi o środowisku umożliwia lepsze zrozumienie wzajemnych relacji między procesami naturalnymi a ludzką aktywnością. W ten sposób można stworzyć rozwiązania, które są efektywne pod względem hydrologicznym oraz korzystne dla ekosystemów.

Lp.ª	Indeks powodzi *M*	Data	Kraje dotknięte powodzią	Wezbrane rzeki	Geneza	Czas trwania [dni]	Liczba ofiar	Liczba dotkniętych powodzią [w tys.]	Straty [mln USD]
144	7,2	III-IV 2005	Rumunia, Polska, Czechy, Słowacja, Węgry, Chorwacja, Bułgaria	Odra i jej dopływy, Wisła i jej dopływy, Pasłęka, Dunaj, Cisa, Morawa	roztopy/ opady	23	62	30	1 500
519	6,4	VII-VIII 1997	Polska, Czechy, Niemcy	Odra i jej dopływy, Wisła, San i ich dopływy oraz Beczwa, Morawa i inne	opady	38	115	163	4 500
549	6,4	V-VI 2010	Polska, Węgry, Słowacja, Austria, Niemcy, Serbia, Ukraina	górna Wisła i jej dopływy, Olza, Odra, Beczwa, Ostrawica, Żitava, Cisa, Sajó, Hornád	opady	14	37	23	3 000
558	6,4	VI-VII 1999	Rumunia, Słowacja Czechy, Polska	Ipel, Morava, Karvina	opady	10	19	0,9	36 500
935	6,0	VII-VIII 2010	Niemcy, Czechy, Polska	Miedzianka, Witka, Jeřica, Nysa Łużycka	opady	13	15	3,0	b.d.
1039	5,9	VII-VIII 2001	Polska	Biała, Odra, Wisła, Czarna, San, Dunajec, Poprad	opady	15	30	16,0	250

Tab. 1. Największe powodzie w Polsce w latach 1985–2010

Źródło: Dartmouth Flood Observatory (aktualizacja – sierpień 2011); poprawione, ; Bartnik, A., & Jokiel, P. (2012). *Geografia wezbrań i powodzi rzecznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

Krok 3. **Ocena sytuacji wyjściowej**

Na podstawie uzyskanych informacji opracowuje się modele hydrologiczne oraz hydrauliczne, które pozwalają na rekonstrukcję procesów zachodzących w zlewni i rzekach. Te modele umożliwiają symulację różnych scenariuszy związanych z opadami i przepływem wody, co pozwala na ocenę poziomu ryzyka powodziowego w zależności od panujących warunków atmosferycznych. Dzięki nim

można nie tylko przedstawić obecny stan ryzyka, ale także prognozować jego zmiany w nadchodzących okresach. Rezultatem przeprowadzonej analizy są m. in. mapy ryzyka powodziowego, które ukazują obszar możliwych zalewów oraz siłę wpływu wody na konkretnym terenie. Te mapy pokazują również miejsca, które są szczególnie zagrożone skutkami powodzi (Rys. 4), jak doliny rzek, obszary zabudowane oraz elementy infrastruktury. Stworzone zasoby są ważnym narzędziem do planowania i mogą być stosowane przez zarówno lokalne władze, jak i zespoły reagowania kryzysowego. Umożliwiają one podjęcie decyzji w sprawach związanych z inwestycjami, zabezpieczeniem przed powodziami oraz potencjalnymi działaniami ewakuacyjnymi. W konsekwencji modele hydrologiczne i hydrauliczne są istotnym elementem w procesie zarządzania ryzykiem powodziowym oraz w planowaniu działań opartych na przyrodzie.

Rys. 4. Mapa obszarów narażonych na niebezpieczeństwo powodzi dla odcinka rzeki Odry.

Źródło: Tokarczyk, T., Chudzik, B., Garncarz-Wilk, B., Pasiecznik-Dominiak, A., & Wojczakowska, Z. (2012). Wstępna ocena ryzyka powodziowego jako element wdrażania dyrektywy powodziowej. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, (3/III).

Krok 4. **Ocena możliwości rozwiązań przyrodniczych**

Na tym etapie prowadzi się identyfikację potencjalnych rozwiązań inspirowanych przyrodą, które mogą pomóc zmniejszyć skutki powodzi oraz poprawić jakość środowiska. Do tych działań można zaliczyć między innymi: przywracanie naturalnego stanu rzek, odbudowę terenów bagiennych, wprowadzanie lasów łęgowych oraz tworzenie łąk zalewowych na obszarach szczególnie zagrożonych powodziami. Każde z wymienionych rozwiązań ma swoje szczególne cechy i przynosi

różne skutki, dlatego istotne jest, aby były one odpowiednio dopasowane do lokalnych warunków. Analizie poddawany jest głównie możliwy wpływ na retencję wody, czyli umiejętność obszaru do jej zatrzymywania oraz spowalniania jej odpływu. Jednocześnie dokonuje się oceny efektywności pojedynczych działań w redukcji zagrożenia powodziowego, zarówno na poziomie lokalnym, jak i na poziomie całej zlewni. Istotnym elementem jest także rozpoznanie innych korzyści dla środowiska, takich jak zwiększenie bioróżnorodności lub regeneracja naturalnych ekosystemów. Równie ważne są korzyści społeczne, które obejmują zwiększenie atrakcyjności krajobrazu, dostępność rekreacji oraz polepszenie jakości życia mieszkańców. Poprzez dokładną analizę można zidentyfikować rozwiązania, które łączą funkcję ochrony przed powodziami z korzystnym wpływem na środowisko oraz lokalną społeczność.

Rys. 5. Przykłady ekosystemów o różnym stopniu przekształcenia, wymagających podjęcia zróżnicowanych działań renaturyzacyjnych.
A – wyżynna rzeka o niskim stopniu przekształcenia hydromorfologicznego – widoczna sekwencja bystrze-ploso, zróżnicowane profile brzegów, drzewa zacieniające koryto (rz. Belnianka, Fot. Mateusz Grygoruk),
B – nizinna rzeka o średnim stopniu przekształcenia hydromorfologicznego – zróżnicowana hydromorfologia, duże zróżnicowanie warunków przepływu, silna presja rolnicza do samego koryta rzeki (rz. Nietupa, Fot. Mateusz Grygoruk),
C – nizinna rzeka o znacznym stopniu przekształcenia hydromorfologicznego – wyprostowane koryto o trapezoidalnym przekroju, brak zróżnicowania głębokości i warunków przepływu, brak zadrzewień i naturalnych elementów hydromorfologicznych w korycie (rz. Żebrówka, Fot. Mikołaj Piniewski)

Źródło: Biedroń, I., Brzóska, P., Dondajewska-Pielka, R., Furdyna, A., Gołdyn, R., Grygoruk, M., ... & Wybraniec, K. Podręcznik opracowano w ramach przedsięwzięcia „Opracowanie krajowego programu renaturyzacji wód powierzchniowych", na zamówienie Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie–.

Krok 5. **Angażowanie interesariuszy w proces planowania**

Fundamentalnym elementem jest zaangażowanie lokalnych społeczności (Tab. 2), właścicieli działek, przedstawicieli samorządu oraz organizacji non-profit, gdyż to oni bezpośrednio odczuwają konsekwencje działań związanych z planowaniem przestrzennym oraz ochroną przed powodziami. Zaangażowanie interesariuszy od początkowych etapów planowania umożliwia wykorzystanie ich praktycznej wiedzy oraz doświadczeń zdobytych w danej dziedzinie. W wyniku tego możliwe jest dokładniejsze dopasowanie sugerowanych rozwiązań do lokalnych potrzeb oraz rzeczywistości gospodarczych. Istotnym wynikiem współpracy jest również podniesienie akceptacji społecznej dla zamierzonych działań, co redukuje ryzyko konfliktów oraz sprzeciwów wobec inwestycji. Konsultacje społeczne mogą przybierać różnorodne formy, takie jak warsztaty, spotkania informacyjne lub internetowe platformy do zgłaszania uwag i sugestii. Włączenie różnych grup interesariuszy wspiera opracowywanie bardziej złożonych i wielofunkcyjnych rozwiązań, które integrują cele hydrologiczne, ekologiczne oraz społeczne. Zaangażowanie społeczności w proces podejmowania decyzji także podnosi poczucie odpowiedzialności mieszkańców za realizowane działania. W efekcie powstają rozwiązania, które nie tylko zabezpieczają przed powodzią, ale także wzmacniają relacje społeczne oraz budują zaufanie pomiędzy obywatelami a instytucjami.

A – „Jest”	**B – „Powinno być”**
• Odcięty dopływ wody (tylko woda opadowa). • Zaśmiecona, część zarośnięta, częściowo zasypana i spłycona. • Nieuregulowane brzegi, zamulona. • Niedrożne przepusty, mosty, mostki (niektóre zanikły, zapadnięte). • Ujście do Gróbki przez przepompownię. • Wypływa z lasu, dwa zasilania: kanał II; Koszyca. • Pozostałości stopni wodnych. • Dawniej faszynowana, obecnie nie. • Początek czyszczony. • Obydwa zasilania odcięte od Młynówki, woda płynie do kanałów melioracyjnych, a potem do Uszewki (na wys. szkoły). • Przebieg Młynówki: od początki przy lesie, równolegle do drogi, przecięcie z drogą, równolegle do drogi, do wielkiego stawu, przez młyn na tereny z poszerzonym korytem (małe rozlewiska, mały staw), przez drogę i pola w kierunku przepompowni. • Stwarza zagrożenie podtopień, nie służy zabezpieczeniu przeciwpowodziowemu. • Nie ma alternatywnego zasilania ze strony Uszewki. • W obecnym stanie nie spełnia zadań, które spełniała 50 lat temu. • Mosty zbyt wąskie. • Najstarsze drzewa – nasadzane, reszta – samosiewy.	• Dopływy skierować do Młynówki (z kanału II oraz z Koszycy); alternatywnie z Uszewki. • Oczyścić, udrożnić przepływ. • Uregulować brzegi, odmulić, pogłębić. • Udrożnić przepusty, wyremontować i poszerzyć mosty. • Pielęgnacja zieleni na całej długości (usunąć drzewa i krzewy z koryta rzeki; uzupełnić system zieleni przy rzece); gatunki liściaste, rodzime, dostosowane do krajobrazu. • Zabezpieczenie skarp, faszynowanie. • Odnowić stopnie wodne w celu uzyskania możliwości regulacji przepływu wody. • Zachować historyczny przebieg, wykonać alternatywne poldery. • Możliwość regulacji przepływu, zamknięcia dopływu – budowa baszt przepływowych. • Drugi, alternatywny przepływ przez stawy dworskie. • System zintegrowanej zieleni, ławki, grill, bar, smażalnia ryb. • Zadania Młynówki: - zabezpieczenie przeciwpowodziowe, - poprowadzenie wody do stawu (staw przepływowy), - odciążenie zlewni Uszewki, - dociążenie zlewni Gróbki, - osuszenie kanałów i pól, - rekreacja – spacery, spływy, ścieżki rowerowe, ew. zarybienie.

Tab. 2. Wyniki pracy grupy roboczej „Krajobraz i ekologia terenów zabudowanych i rolnych” - „Młynówka”.

Źródło: Pijanowski, J. M., Przegon, W., & Szewczyk, R. (2017). Podstawy zintegrowanego rozwoju obszarów wiejskich. *Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków*.

Krok 6. **Analiza opcji i ustalenie priorytetów**

Na podstawie analiz modelowych opracowuje się różnorodne scenariusze implementacji rozwiązań ekologicznych, które mogą różnić się pod względem zakresu, lokalizacji oraz skali wpływu. Te scenariusze umożliwiają analizę możliwych wyników różnych opcji działań oraz wskazanie tych, które najlepiej spełniają lokalne wymagania (Tab. 3). Każda możliwość jest analizowana szczegółowo pod względem efektywności hydraulicznej, co oznacza jej zdolność do zmniejszenia ryzyka powodzi oraz poprawy retencji wody. Jednocześnie ocenia się wydatki związane z wprowadzeniem oraz utrzymaniem różnych rozwiązań, co umożliwia dokonanie analizy ich rentowności w dłuższej perspektywie. Istotnym wskaźnikiem jest również zdolność do wdrożenia, która obejmuje kwestie techniczne, prawne oraz poziom akceptacji w społeczeństwie. Dodatkowo uwzględniane są inne korzyści, takie jak polepszenie jakości ekosystemów, wzrost bioróżnorodności oraz utworzenie nowych miejsc do rekreacji dla mieszkańców. Poprzez gruntowną analizę można zidentyfikować opcje, które łączą efektywność hydrologiczną z aspektami środowiskowymi i społecznymi. W wyniku tego, wybierane są kluczowe rozwiązania o najwyższym potencjale do zastosowania, które mogą stać się fundamentem dla kolejnego etapu wdrażania.

C – „Problemy”	D – „Rozwiązania”
• Ogrodzenia wstawione na teren Młynówki. • Zatarte granice pasa Młynówki. • Zarośnięty teren pasa Młynówki, częściowo wysokimi drzewami – uzyskanie zgody na wycinkę. • Kanał melioracyjny w poprzek Młynówki – problem głębokości. • Konieczne pełne oczyszczenie i udrożnienie Młynówki. • Utrzymywanie koryta rzeki w dobrym stanie (po „uruchomieniu” Młynówki). • Konieczność wyczyszczenia i „odkopania” dawnego, piaszczystego dna. • Konieczność odtworzenia przepustu za stawem i przepływu przez prywatne stawy i dokonanie prawnych uregulowań. • Szamba i ścieki wpływające do Młynówki. • Obawy przed potencjalnymi podtopieniami przez Młynówkę. • Utrzymanie otoczenia Młynówki.	• Geodezyjne uregulowanie granic, ewentualnie zawężenie pasa Młynówki, ale przy zachowaniu dostępności do terenu gminnego rzeki. • Pozostawienie wartościowych drzew w pasie Młynówki, wycięcie całkowicie zawadzających, np. w korycie rzeki. • Rozwiązanie melioracyjne skrzyżowania kanału melioracyjnego z Młynówką (syfon?). • Nadzór władz nad drożnością. • Kwestia rozwiązań prawnych/zgoda właścicieli na przepływ wody. • Przydomowe oczyszczalnie, kanalizacja. • Podtopienia: zachowanie przepompowni, zachowanie terenu zalewowego (koryto + teren rozlewiskowy), śluzy przy wpływie wody do Młynówki.

Tab. 3. Efektywność ekologiczna jako składowa efektywności społecznej.

Źródło: Smolińska, A. (2011). *Efektywność inwestowania w oczyszczalnie ścieków w Polsce a wykorzystanie zewnętrznych środków pomocowych.[Effectiveness of investment in sewage treatment plants in Poland and the use of external aid]* (Doctoral dissertation, PhD Thesis, Poznań University of Economics, Poznań. URL: www. wbc. poznan. pl/Content/187923/SmolinskaAnnaS4248. pdf).

Krok 7. **Przygotowanie dokumentacji projektowej**

Po dokonaniu wyboru rozwiązań, opracowywana jest szczegółowa dokumentacja, która będzie podstawą do wdrożenia zaplanowanych rozwiązań. Dokument ten przedstawia zarys zamierzonych prac inżynieryjnych i ekologicznych, biorąc pod uwagę zarówno kwestie techniczne, jak i środowiskowe. W dokumencie tym określa się precyzyjnie miejsce interwencji, co umożliwia dokładne wskazanie obszarów, na których prowadzone są prace. Kluczowym aspektem jest również wybór zalecanych rodzajów roślin, które mają wspierać proces renaturalizacji, zwiększać zatrzymywanie wody oraz wzmacniać stabilność ekosystemów. Zakres działań związanych z przywracaniem naturalnych warunków obejmuje między innymi: odtwarzanie naturalnych zakrętów

rzek, odbudowę obszarów mokrych oraz rekultywacja terenów w złym stanie. Jednocześnie opracowywane są wymagane dokumenty formalne i prawne, które pozwolą na rozpoczęcie działań zgodnie z obowiązującymi regulacjami. Dokumentacja ta może zawierać pozwolenia dotyczące wód, decyzje związane z ochroną środowiska oraz ustalenia z lokalnymi organami i właścicielami nieruchomości. Opracowane materiały zapewniają, że wdrażanie rozwiązań opartych na naturze odbywa się w sposób zorganizowany, przejrzysty oraz zgodny z obowiązującymi przepisami prawnymi.

Krok 8. **Realizacja działań w terenie**

Następnym krokiem jest wprowadzenie wybranych rozwiązań w praktyce, co oznacza przejście od fazy planowania i dokumentacji do rzeczywistych działań terenowych. Zadania obejmują między innymi renowację zakoli rzek, które wspierają naturalny bieg wody i podnoszą pojemność retencyjną dolin rzecznych. Istotnym aspektem jest także budowanie obszarów zalewowych, które umożliwiają chwilowe zatrzymywanie nadmiaru wody, a tym samym ograniczają ryzyko wystąpienia powodzi w dolnych partiach zlewni. Sadzenie roślinności w lasach łęgowych ma kluczowe znaczenie, ponieważ stabilizuje brzegi rzek, podnosi jakość wody oraz tworzy siedliska dla licznych gatunków. Rewitalizacja mokradeł przyczynia się do wzrostu bioróżnorodności, poprawy zatrzymywania wody oraz redukcji emisji dwutlenku węgla z gruntów organicznych. Ważne jest, aby wszelkie działania były realizowane w sposób jak najmniej inwazyjny oraz z uwagą na naturalne procesy ekologiczne. Oznacza to korzystanie z metod pracy, które są zgodne z naturalnym rytmem przyrody, np. zaleca się unikanie wykonywania prac w czasie lęgu ptaków oraz okresu wzrostu roślin. Dzięki temu sposobowi działania możliwe jest zharmonizowanie celów związanych z hydrologią i ochroną przed powodziami z dbałością o środowisko i zrównoważonym rozwinięciem ekosystemów.

Krok 9. **Monitorowanie i ocena**

Po zakończeniu implementacji przeprowadzany jest regularny monitoring rezultatów, co umożliwia ocenę efektywności wprowadzonych rozwiązań. Zawiera on szczegółowe badania hydrologiczne, takie jak monitorowanie poziomu wody, prędkości przepływu oraz częstotliwości występowania wezbrań. Jednocześnie przeprowadzane są badania dotyczące zmian zachodzących w ekosystemach, które obejmują ocenę różnorodności biologicznej, stanu siedlisk (Rys. 6). Kluczowym aspektem monitorowania jest również badanie wpływu działań na społeczności lokalne, np. poprzez przeprowadzenie ankiet dotyczących poczucia bezpieczeństwa lub dostępności terenów rekreacyjnych. Na tej podstawie można przeprowadzić dokładną ocenę skuteczności wprowadzonych rozwiązań, biorąc pod uwagę aspekty hydrologiczne, społeczne oraz ekologiczne. Wyniki monitorowania umożliwiają także zidentyfikowanie potencjalnych problemów oraz wskazanie obszarów, które wymagają poprawek. W rezultacie, proces wprowadzania rozwiązań opartych na naturze zyskuje na dynamice, elastyczności oraz dostosowaniu do zmieniających się warunków środowiskowych i potrzeb społecznych.

Rys. 6. Schemat uformowania bocznego koryta Wisły i wysp w rejonie Saskiej Kępy.

Źródło: Bankowska, A., Sawa, K., Popek, Z., Wasilewicz, M., & Zelazo, J. (2010). Studia wybranych przykładów renaturyzacji rzek. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*.

Ograniczenia i preferencje oceny zagrożenia powodziowego poprzez rozwiązania oparte na przyrodzie

Rozwiązania oparte na naturze (Nature-Based Solutions, NBS) w zakresie zarządzania ryzykiem powodziowym są nowatorskim oraz coraz częściej wykorzystywanym sposobem ochrony obszarów narażonych na zalanie. Oparte są na zastosowaniu naturalnych procesów ekosystemowych – takich jak gromadzenie wód w mokradłach, przywracanie naturalnych koryt rzek, rekonstrukcja terenów zalewowych czy sadzenie lasów w zlewniach – w celu redukcji skutków powodzi, ulepszenia jakości środowiska oraz zwiększenia odporności ekosystemów. Pomimo wielu korzyści, ocena efektywności takich rozwiązań wiąże się z poważnymi ograniczeniami technicznymi, organizacyjnymi oraz poznawczymi.

1. **Metodyczne i techniczne ograniczenia**

Jednym z najważniejszych problemów jest trudność w dokładnym ocenianiu efektywności rozwiązań przyrodniczych w zakresie zmniejszania ryzyka powodziowego. W odróżnieniu od tradycyjnych struktur inżynieryjnych (np. w przypadku wałów lub zbiorników retencyjnych, skutki zastosowania metody są mocno uzależnione od lokalnych warunków hydrologicznych, glebowych, klimatycznych oraz biologicznych). U modeli hydrodynamicznych używanych do analizy ryzyka powodziowego często brakuje precyzyjnego uwzględnienia procesów ekosystemowych, takich jak wnikanie wody w glebę, transpiracja roślinna oraz zmiany w układzie krajobrazu.
Dodatkowym ograniczeniem jest brak długoterminowych danych empirycznych, które mogłyby potwierdzić skuteczność rozwiązań przyrodniczych w różnych warunkach geograficznych oraz klimatycznych. Analiza skutków zastosowania metod opartych na przyrodzie w zakresie zmniejszenia ryzyka powodzi wymaga długotrwałego monitorowania, a zjawiska przyrodnicze zachodzą z opóźnieniem, co utrudnia szybkie uzyskanie jednoznacznych rezultatów.

2. **Ograniczenia związane z instytucjami oraz z życiem społecznym**

Zastosowanie rozwiązań przyrodniczych zazwyczaj wymaga współpracy różnych grup – administracji publicznej, właścicieli ziemi, organizacji non-profit oraz lokalnych społeczności. Niedostatek wyraźnych przepisów prawnych oraz środków finansowych na działania związane z naturą stanowi

istotne ograniczenie. Dodatkowo, w społecznym postrzeganiu wciąż uwidacznia się przekonanie, że tradycyjne rozwiązania inżynieryjne są bardziej „bezpieczne" i przewidywalne niż naturalne sposoby ochrony przed powodziami. To może zatem utrudniać społeczną akceptację oraz wdrażanie projektów opartych na przyrodzie w większej skali.

3. **Ekonomiczne ograniczenia**

Mimo że rozwiązania ekologiczne zazwyczaj są bardziej opłacalne w dłuższym okresie niż klasyczne infrastruktury, ich wprowadzenie wiąże się z istotnymi kosztami inwestycyjnymi na etapie planowania oraz rewitalizacji terenu. Ponadto, zalety ich wykorzystania (takie jak zwiększenie bioróżnorodności, zatrzymywanie wody, możliwości rekreacyjne) są pośrednie i niełatwe do bezpośredniej wyceny w analizach kosztów i korzyści. Niedobór narzędzi ekonomicznych do pełnej oceny wartości ekosystemów stanowi zatem kolejne utrudnienie.

4. **Preferencje oraz zalecane metody działania**.

W dzisiejszych czasach w ocenie ryzyka powodziowego zaleca się stosowanie zintegrowanych systemów analizy, które łączą metody hydrologiczne, geoinformacyjne oraz ekologiczne. Coraz częściej wykorzystuje się modelowanie scenariuszowe, które umożliwia porównanie efektywności klasycznych i naturalnych metod ochrony, jak również ocenę ich współpracy. Zaleca się również stosowanie metod partycypacyjnych, które angażują lokalne społeczności w proces planowania oraz w monitorowanie wyników zastosowania metod opartych na przyrodzie. Zaangażowanie mieszkańców oraz użytkowników terenów w proces podejmowania decyzji zwiększa akceptację wśród społeczeństwa, a także wspiera lepsze dostosowanie działań do rzeczywistych potrzeb i warunków środowiskowych. Zwiększa się również znaczenie narzędzi cyfrowych, takich jak systemy GIS, zdalne czujniki oraz drony, które umożliwiają dokładne śledzenie zmian hydrologicznych i ekologicznych. Ich zastosowanie wspiera bezstronną ocenę efektywności działań opartych na naturze oraz umożliwia bieżące aktualizowanie modeli ryzyka powodziowego.