

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

METODY ZAPOBIEGANIA I PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM KLĘSK ŻYWIOŁOWYCH DOSTĘPNE POZA OBSZAREM WSPARCIA PROJEKTU

WPROWADZENIE

Opracowanie ma na celu zaznajomienie gremiów decyzyjnym z metodami zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych w obszarze osuwisk, powodzi i zanieczyszczenia powietrza dostępnymi poza obszarem wsparcia. Opracowanie ma uświadomić powiatom położonym na obszarze wsparcia projektu o możliwości zastosowania metod, które nie są tam obecnie stosowane, lub stosowane w niewielkim zakresie albo wręcz eksperymentalnie. Wraz z rozwojem technologii odkrywane są coraz to nowsze metody, które pozwalają na coraz dokładniejsze przewidywanie i przeciwdziałanie skutkom klęsk żywiołowych.

Opisano różne metody zapobiegania i przeciwdziałania skutkom klęsk żywiołowych nie stosowane przez powiaty w tzw. obszarze wsparcia na terenie Polski oraz na terenie Słowacji (powiaty położone w Polsce: w województwie śląskim: pszczyński, cieszyński, bielski, miasto na prawach powiatu Bielsko-Biała, żywiecki, w województwie małopolskim: olkuski, chrzanowski, oświęcimski, wadowicki, suski, myślenicki, tatrzański, nowotarski, limanowski, nowosądecki, miasto na prawach powiatu Nowy Sącz, gorlicki, w województwie podkarpackim: bieszczadzki, leski, sanocki, brzozowski, krośnieński, miasto na prawach powiatu Krosno, jasielski, rzeszowski, miasto na prawach powiatu Rzeszów, przeworski, przemyski, miasto na prawach powiatu Przemyśl, jarosławski, lubaczowski. Powiaty położone na Słowacji: w Żylińskim Kraju Samorządowym: Čadca, Kysucké Nové Mesto, Bytča, Žilina, Martin, Turčianske Teplice, Ružomberok, Dolný Kubín, Námestovo, Tvrdošín, Liptovský Mikuláš, w Preszowskim Kraju Samorządowym: Poprad, Kežmarok, Stará Ľubovňa, Levoča, Sabinov, Bardejov, Svidník, Prešov, Vranov nad Topľou, Stropkov, Medzilaborce, Humenné, Snina, w Koszyckim Kraju Samorządowym: Spišská Nová Ves).

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

METODY ZAPOBIEGANIA I PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM POWODZI DOSTĘPNE POZA OBSZAREM WSPARCIA PROJEKTU

1. Inteligentne, samoorganizujące się systemy retencji wody oparte na sztucznej inteligencji (AI-Driven Adaptive Retention Systems)

Nowoczesne systemy retencyjne oparte na sztucznej inteligencji wykorzystują gęstą sieć czujników, modelowanie hydrologiczne oraz samouczące się algorytmy do przewidywania lokalnych zjawisk powodziowych z dużą precyzją. Dzięki temu potrafią one reagować w czasie rzeczywistym, dynamicznie otwierając i zamykając zbiorniki, przepusty czy retencyjne pojemności podziemne, zanim jeszcze dojdzie do niebezpiecznego wzrostu poziomu rzek. Takie rozwiązania mają o wiele większą skuteczność niż tradycyjne, sztywno zaprojektowane systemy melioracji. Inteligentna retencja wody opiera się na przetwarzaniu dużych zbiorów danych dotyczących opadów, parowania, wilgotności gleby, przepływu rzek, prognoz meteorologicznych i danych satelitarnych. Sieć algorytmów analizuje nie tylko aktualny stan hydrologiczny, ale także przewiduje, jak zmieni się on w najbliższym czasie (Rysunek 1).

Dzięki temu infrastruktura może działać prewencyjnie, odciążając układ odwadniający jeszcze zanim pojawi się realne ryzyko powodzi. Jedną z głównych zalet takich systemów jest ich zdolność do optymalizacji pracy zbiorników retencyjnych w skali całej zlewni, a nie tylko lokalnie. Na przykład jeden zbiornik może zostać częściowo opróżniony w oczekiwaniu na nadchodzący opad, podczas gdy inny – położony niżej w dolinie – zostaje napełniony tylko do poziomu, który nie będzie groził wylaniem w przypadku gwałtownego przyboru wód. Całość jest koordynowana automatycznie. Nowoczesne układy AI uczą się także sezonowych wzorców przepływu oraz wyjątków od tych wzorców. Dzięki temu potrafią wykryć anomalie hydrologiczne, które mogą świadczyć o zagrożeniu, na przykład nagły wzrost splywu powierzchniowego w wyniku topnienia

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

śniegu lub intensywnych opadów na wysychającym wcześniej podłożu. W tradycyjnych systemach takie zmiany często są zauważane z opóźnieniem.



Rysunek 1. Schemat systemu zarządzania infrastrukturą z wykorzystaniem IT.

Istotny element tej technologii stanowi integracja modelowania 3D terenu z symulacją przepływu wód, co pozwala przewidzieć, które obszary wymagają natychmiastowej interwencji. Algorytmy mogą sterować nie tylko żelbetowymi zaporami, lecz również nowymi typami retencji – jak zielone dachy, porowate zbiorniki podziemne, czy modułowe komory retencyjne wbudowane w infrastrukturę miejską. Niektóre systemy wykorzystują technologie blockchain do rejestrowania operacji na danych hydrologicznych, co zwiększa ich wiarygodność, przejrzystość i odporność na błędy. Szczególnie istotne jest to w sytuacjach krytycznych, gdy lokalne władze muszą mieć pewność co do źródła i poprawności informacji.

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

Zaletą sztucznej inteligencji w zarządzaniu retencją jest jej zdolność do pracy w warunkach, w których tradycyjne modele matematyczne zawodziły — na przykład w zlewniach z dużą antropopresją, gdzie zabudowa zmienia układy przepływu, lub w obszarach górskich o stromych stokach i krótkich czasach reakcji hydrologicznej. Systemy te mogą być zintegrowane z inteligentną infrastrukturą miejską, dzięki czemu potrafią sterować przepustowością kanalizacji burzowej czy ilością wody zatrzymywanej w miejskich terenach zielonych. Mogą również wysyłać ostrzeżenia do mieszkańców poprzez automatyczne powiadomienia oparte na analizie lokalnych danych.

W praktyce rozwiązania te wdraża m.in. Holandia, gdzie projekt **Digital Delta** za pomocą sztucznej inteligencji integruje dane hydrologiczne z całego kraju. Podobne systemy eksperymentalne istnieją również w Japonii i Korei Południowej, a Singapur wdrożył zaawansowaną sieć sensorów i modeli AI wspierających zarządzanie wodami opadowymi. Dzięki zautomatyzowanej, inteligentnej retencji miasta i regiony zyskują nowy poziom odporności na powódzie. Technologia ta nie zastępuje klasycznej infrastruktury, lecz ją wzmacnia, czyniąc gospodarkę wodną zdolną do reakcji w czasie rzeczywistym – praktycznie bez udziału człowieka.

2. Pływające miasta i adaptacyjne struktury miejskie (Floating & Amphibious Urban Systems)

Pływające miasta to jedna z najbardziej futurystycznych i jednocześnie realnych koncepcji ochrony przed powodzią. Zamiast walczyć z wodą, zakładają one pełną adaptację do jej obecności poprzez budowę infrastruktury unoszącej się na powierzchni (Rysunek 2). Dzięki temu nawet ekstremalne powódzie nie powodują zniszczeń – zabudowa podnosi się razem z poziomem wody. Współczesne konstrukcje pływające powstają z wykorzystaniem lekkich, wytrzymałych materiałów kompozytowych, które sprawiają, że budynki mogą funkcjonować zarówno na wodzie, jak i przy niskim poziomie rzek lub mórz. Często stosuje się również pontony betonowe o ekstremalnej wytrzymałości, wypełnione niezatapialnymi strukturami. Systemy te nie są już wyłącznie koncepcją teoretyczną – istnieją w pełni funkcjonujące pływające osiedla mieszkaniowe, szkoły i budynki administracyjne, które przeszły próbę działania podczas realnych powodzi. Jednym z najbardziej

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

znanych przykładów są pływające dzielnice w Holandii, takie jak Schoonschip w Amsterdamie. Obok stałych, pływających konstrukcji rozwija się technologia budynków amfibijnych. Budynki te pozostają normalnie osadzone na ziemi, lecz w czasie powodzi wypływają na powierzchnię dzięki specjalnym fundamentom działającym jak łódź. Tego typu rozwiązania testuje się w Wielkiej Brytanii oraz w USA, gdzie amfibijne domy są alternatywą dla kosztownych wałów przeciwpowodziowych.

Pływające miasta są często projektowane jako ekologiczne – wyposażone w systemy filtracji wody, odnawialne źródła energii oraz zielone dachy poprawiające retencję. Umożliwia to ich funkcjonowanie w duchu samowystarczalności, co zwiększa odporność całych społeczności na klęski żywiołowe. Jedną z najbardziej zaawansowanych koncepcji jest Oceanix City, projekt wspierany przez ONZ. Zakłada on budowę modułowych pływających platform, które mogą pomieścić tysiące mieszkańców i dostosować się do lokalnych warunków klimatycznych. Konstrukcje te są projektowane tak, aby wytrzymać huragany kategorii 5.



Rysunek 2. Wizualizacja budynków położonych na wodzie, będących częścią zabudowy miejskiej.

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

Japonia planuje budowę dużych pływających kampusów badawczych odpornych na tsunami, natomiast Korea Południowa rozwija projekty pływających lotnisk i centrów logistycznych. Holandia, która ma setki lat doświadczeń w ochronie przed wodą, jest światowym liderem pływającej architektury mieszkalnej. Koncepcja pływających miast oznacza rewolucję w urbanistyce – zakłada rezygnację z walki z żywiołem na rzecz pełnej adaptacji. Miasta przyszłości mogą ulegać sezonowym zmianom układu, przemieszczając się, łącząc lub odłączając moduły zależnie od potrzeb społeczności. Pływająca architektura otwiera nowe możliwości dla regionów nadbrzeżnych zagrożonych podnoszeniem się poziomu morza. Zamiast przesiedlać miliony ludzi, możliwe staje się przenoszenie zabudowy na wodę, gdzie powódzie nie stanowią już zagrożenia, a wręcz są naturalnym elementem życia. Choć technologia ta nadal jest kosztowna, szybko się rozwija, a kolejne kraje inwestują w pływające jednostki mieszkalne, szkoły i budynki publiczne. W przyszłości pływające miasta mogą stać się standardem w regionach najbardziej narażonych na powódzie i podnoszenie się poziomu oceanów.

3. Błękitno-zielona infrastruktura wysokiej przepuszczalności (High-Permeability Blue-Green Infrastructure)

Błękitno-zielona infrastruktura to połączenie rozwiązań hydrologicznych (błękitnych) i ekologicznych (zielonych), które wspólnie redukują ryzyko powodzi poprzez retencję, infiltrację i spowolnienie spływu wód (Rysunek 3). Nowoczesne podejścia koncentrują się na zwiększaniu przepuszczalności miast – wbrew tradycyjnym metodom betonowania powierzchni. Jednym z najbardziej innowacyjnych rozwiązań są powierzchnie hiperprzepuszczalne, zbudowane z materiałów kompozytowych o strukturze kapilarnej. Pozwalają one wchłaniać nawet nawalne deszcze, a następnie powoli oddawać wodę do gleby. Ich skuteczność jest wielokrotnie większa niż tradycyjnej kostki brukowej.

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

W ramach błękitno-zielonej infrastruktury rozwija się trend tworzenia tzw. ulic gąbkowych, które nie odprowadzają wody do kanalizacji, lecz magazynują ją w porowatych warstwach pod powierzchnią. Tego typu rozwiązania stosuje się m.in. w Chinach w ramach koncepcji Sponge City. Istotnym elementem są także zielone dachy nowej generacji: wielowarstwowe, wysokoretencyjne konstrukcje potrafią magazynować ogromne ilości wody. Niektóre systemy są wyposażone w czujniki, które automatycznie spuszczały część wody przed nadejściem ulewy, aby zwiększyć zdolność absorpcji opadów.

Współczesne parki retencyjne pełnią podwójną funkcję – są terenami rekreacji, ale w razie potrzeby zamieniają się w rozległe zbiorniki retencyjne. Przykładem jest Bishan-Ang Mo Kio Park w Singapurze, który podczas ulewnych deszczy przejmuje rolę basenu przeciwpowodziowego. Kanały retencyjne montowane wzdłuż głównych arterii komunikacyjnych mogą przyjąć nadmiar wody podczas nawałnic, dzięki czemu ulice nie są zalewane. Nowoczesne kanały są często zazielenione i pełnią funkcję korytarzy ekologicznych.

Interesującym rozwiązaniem są także miejskie bagna – sztucznie odtworzone ekosystemy podmokłe, które działają jak naturalne filtry i zbiorniki retencyjne. W Seulu odtworzenie mokradeł wzdłuż rzeki Cheonggyecheon znacząco zmniejszyło ryzyko lokalnych powodzi. Błękitno-zielone rozwiązania pozwalają na przekształcenie betonowych miast w obszary, które funkcjonują jak gąbka – pochłaniają wodę, zatrzymują ją i powoli uwalniają. Dzięki temu powodzie miejskie mogą być ograniczane nawet bez dużej ingerencji w istniejącą infrastrukturę.

Regiony takie jak Australia, Singapur, Holandia, Kanada i Skandynawia należą do liderów w tej dziedzinie. Tworzą one kompleksowe sieci zielonych terenów połączonych z systemami wodnymi, dzięki czemu naturalne procesy hydrologiczne są przywracane w centrach miejskich.

(10) Błękitno-zielona infrastruktura jest przyszłością urbanistyki – odchodzi od traktowania wody jako zagrożenia, a zamiast tego traktuje ją jako zasób, który w odpowiednio zaprojektowanym środowisku może być bezpiecznie magazynowany, oczyszczany i wykorzystywany przez mieszkańców.

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



Rysunek 3. Wizualizacja efektów zagospodarowania przestrzeni z wykorzystaniem błękitno-zielonej infrastruktury o wysokiej przepuszczalności.

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

4. Automatyczne bariery i konstrukcje hydrodynamiczne nowej generacji (Autonomous Hydrodynamic Flood Barriers)

W odróżnieniu od tradycyjnych zapór i wałów, nowoczesne bariery powodziowe działają autonomicznie, a ich mechanizm aktywuje się dopiero w momencie zagrożenia. Najbardziej rozpoznawalnym przykładem jest technologia barier samopodnoszących się, która wykorzystuje siłę napierającej wody do podnoszenia paneli ochronnych (Rysunek 4). Bariery te osadza się w specjalnych kanałach pod powierzchnią dróg lub nabrzeży. W normalnych warunkach są niewidoczne i nie zakłócają ruchu ani krajobrazu. Dopiero w momencie, gdy woda zaczyna napierać, panele unoszą się, tworząc szczelną ścianę przeciwpowodziową. To rozwiązanie genialne w swojej prostocie i wyjątkowo tanie w utrzymaniu.

Nowoczesne konstrukcje hydrodynamiczne obejmują również bariery o zmiennej geometrii, które dostosowują swój kształt do prędkości napływającej wody. Ich powierzchnia jest zoptymalizowana aerodynamicznie, co minimalizuje ryzyko uszkodzeń oraz rozpraszanie fali w sposób kontrolowany. W niektórych systemach stosuje się inteligentne panele z wbudowanymi czujnikami ciśnienia, które monitorują stan konstrukcji i przekazują dane do centrów operacyjnych. Dzięki temu infrastruktura jest stale nadzorowana, a ewentualne uszkodzenia wykrywane na wczesnym etapie. Największym sukcesem tej technologii jest jej skala zastosowań: od pojedynczych ulic, poprzez centra handlowe, aż po całe wybrzeża. Jednym z najbardziej znanych przykładów jest system MOSE w Wenecji, który chroni miasto przed falami powodziowymi, choć działa w inny sposób niż bariery podnoszące się samoczynnie. W Wielkiej Brytanii i Holandii stosuje się mniejsze, modułowe bariery hydrodynamiczne, które można instalować wokół pojedynczych budynków lub dzielnic. Konstrukcje takie są szczególnie popularne w miejscach narażonych na sztormy i gwałtowne przypływy.

Interesującą nowinką technologiczną są bariery robotyczne, które mogą być rozkładane automatycznie przez mobilne jednostki. Pojazdy takie są sterowane algorytmami AI i mogą w kilka minut zbudować zaporę o długości kilkuset metrów, wykorzystując segmenty przechowywane w

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

lokalnych magazynach. Niektóre kraje eksperymentują z barierami wykonanymi z elastycznych kompozytów, które potrafią pochłaniać energię fal i rozpraszać ją w sposób kontrolowany. Dzięki temu są odporne na uszkodzenia powodowane przez fale niosące gruz lub ciężkie przedmioty.

Automatyczne bariery doskonale łączą się z innymi systemami, takimi jak sztuczna inteligencja i predykcyjne modele hydrologiczne. Gdy system przewiduje ryzyko powodzi, bariery mogą aktywować się zanim jeszcze pojawi się realne zagrożenie, co znacząco zwiększa skuteczność ochrony. Technologia ta stoi na pograniczu robotyki, hydrodynamiki i inżynierii materiałowej. Jej największą zaletą jest fakt, że nie wymaga angażowania dużej liczby ludzi w momentach kryzysowych. To sprawia, że nowoczesne bariery są jednym z najbardziej obiecujących elementów przyszłej ochrony 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



Rysunek 4. Przykład automatycznych barier i konstrukcji hydrodynamicznych nowej generacji.

METODY ZAPOBIEGANIA I PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA DOSTĘPNE POZA OBSZAREM WSPARCIA PROJEKTU

1. Inteligentne, samoorganizujące się systemy biofiltracji powietrza (AI-Driven Adaptive Biofiltration Systems)

Nowoczesne systemy biofiltracji wykorzystują połączenie biologii syntetycznej, sztucznej inteligencji oraz inżynierii środowiska, aby kontrolować skład i aktywność mikroorganizmów zdolnych do neutralizowania zanieczyszczeń powietrza. W odróżnieniu od tradycyjnych filtrów chemicznych czy mechanicznych, rozwiązania te potrafią adaptować się do zmian poziomu

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

zanieczyszczeń, samoczynnie regulować swoją pojemność sorpcyjną oraz efektywność pochłaniania. Biofiltry tego typu mogą usuwać zarówno lotne związki organiczne (LZO), jak i tlenki azotu czy zanieczyszczenia przemysłowe. Systemy te są oparte na wyspecjalizowanych konsorcjach mikroorganizmów, dobieranych tak, aby rozkładać konkretne typy zanieczyszczeń. Dzięki algorytmom sztucznej inteligencji monitoring biologiczny działa w czasie rzeczywistym: jeśli wzrasta poziom np. NO₂ lub aldehydów, wówczas system może zmienić ilość dopływającego powietrza, temperaturę lub wilgotność, aby zmaksymalizować aktywność właściwych mikroorganizmów. Jedną z największych zalet takich biofiltrów jest ich zdolność do regeneracji. Mikroorganizmy namnażają się naturalnie, więc nie ma potrzeby wymiany całych modułów filtrujących. Dzięki temu koszty eksploatacji są niższe, a efektywność filtracji wyższa. W wielu przypadkach biofiltry radzą sobie z substancjami, których tradycyjne filtry nie wychwytyją. Współczesne biofiltry mogą przyjmować formę kompaktowych instalacji kontenerowych, modułów przy budynkach lub ogromnych zielonych wież, pokrytych mikrobiologicznymi panelami filtrującymi (Rysunek 5). Ich modułowość umożliwia skalowanie w zależności od potrzeb – od osiedli mieszkaniowych po przemysł ciężki.

Dzięki precyzyjnemu sterowaniu parametrami środowiskowymi (takimi jak pH, wilgotność, natlenienie) systemy AI przewidują, jak zmieni się aktywność mikroorganizmów przy określonym poziomie zanieczyszczeń i działają wyprzedzająco. Oznacza to, że biofiltry zaczynają działać intensywnie jeszcze zanim stężenie zanieczyszczeń przekroczy dopuszczalne normy. Tego typu instalacje mogą działać również wewnątrz budynków – w biurach, szkołach czy galeriach handlowych. W takich miejscach często gromadzą się zanieczyszczenia powstające wewnątrz (farby, meble, kosmetyki, środki czystości). Systemy biofiltracyjne eliminują je, tworząc mikrośrodowiska znacznie zdrowsze niż przy użyciu filtrów mechanicznych.

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



Rysunek 5. System biofiltracji powietrza.

Biofiltry adaptacyjne są wykorzystywane także w tunelach drogowych i przy drogach ekspresowych. Dzięki temu mogą neutralizować spaliny generowane bezpośrednio przez ruch pojazdów. Takie rozwiązania testuje się już m.in. w Seulu oraz w okolicach Tokio, gdzie natężenie ruchu jest bardzo wysokie. W miastach Ameryki Południowej, zwłaszcza w Bogocie i Medellín, stosuje się prototypowe wieże biofiltracyjne, które redukują stężenia pyłów i gazów w miejskich centrach. Te konstrukcje, zwane „zielonymi kominami”, ułatwiają walkę z zanieczyszczeniem powietrza w gęsto zabudowanych obszarach. Przykładem sztanarowym jest projekt **CityTree**, rozwijany w Niemczech – to modułowe zielone ściany z mikroorganizmami i mchem, które mogą oczyszczać tyle powietrza, ile dojrzałe drzewa, lecz na ułamku ich powierzchni. Instalacje te pojawiły się w Paryżu, Oslo, Hongkongu i Londynie.

Inteligentne biofiltry stanowią obiecujące rozwiązanie, ponieważ są samoregenerujące, niskoenergetyczne, ekologiczne i nieszkodliwe dla środowiska. Mogą stać się standardem w

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

nowoczesnych miastach, w których walka z zanieczyszczeniami wymaga rozwiązań aktywnych i precyzyjnych.

2. Architektura antysmogowa: budynki pochłaniające zanieczyszczenia (Anti-Smog Architectural Systems)

Nowoczesne budynki mogą pełnić funkcję gigantycznych filtrów powietrza, a ich elewacje stają się aktywnymi powierzchniami usuwającymi zanieczyszczenia (Rysunek 6). Stosuje się do tego fotokatalityczne powłoki, które pod wpływem światła słonecznego rozkładają szkodliwe substancje, takie jak NO_x i VOC, na nieszkodliwe związki. Dzięki temu powierzchnia budynku staje się narzędziem w walce o czystsze powietrze. Powłoki fotokatalityczne najczęściej wykorzystują dwutlenek tytanu (TiO₂), który pod wpływem promieni UV aktywuje reakcję rozkładu tlenków azotu. Jednak najnowocześniejsze projekty stosują tlenki wanadu, mieszaniny nanocząsteczek oraz materiały hybrydowe o znacznie wyższej skuteczności i trwałości.

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



Rysunek 6. Makieta budynku pochłaniającego zanieczyszczenia.

Włoski projekt Palazzo Italia to jeden z najbardziej znanych przykładów architektury antysmogowej. Budynek posiada elewację wykonaną ze specjalnego materiału fotokatalitycznego, który może neutralizować nawet kilkadziesiąt kilogramów tlenków azotu rocznie. Jego powierzchnia oczyszcza powietrze w całej okolicy. W Chinach i Indiach rozwijane są koncepcje drapaczy chmur pokrytych „zielonymi panelami”, w których rosną rośliny i mchy. Takie pionowe lasy nie tylko filtrują powietrze, lecz także pochłaniają CO₂ i produkują tlen. Najbardziej znane realizacje znajdują się w Nankinie (projekt Stefano Boeri) oraz w Mediolanie (Bosco Verticale).

Nowoczesna architektura antysmogowa obejmuje również chodniki, tunele piesze, wiadukty i ekrany akustyczne powleczone materiałami oczyszczającymi powietrze. W Japonii stosuje się już beton fotokatalityczny na elewacjach mostów, a w Meksyku wykorzystuje się go do budowy

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

antysmogowych murali miejskich. Budynki antysmogowe mogą być wyposażone w aktywne systemy pochłaniania, takie jak „odwrócone kominy”. Zasysają one powietrze z ulicy, przepuszczają je przez filtry elektrostatyczne, a następnie wypuszczają oczyszczoną masę powietrza kilkanaście metrów wyżej. Systemy takie istnieją m.in. w Nowej Zelandii i Holandii. W Holandii testuje się fasady wyposażone w mikrokanały, przez które przepływa powietrze. Wewnątrz znajdują się zestawy wymiennych filtrów, a całość jest zasilana energią słoneczną. Takie elewacje mogą przefiltrować nawet miliony metrów sześciennych powietrza rocznie.

Innowacyjne projekty miejskie wykorzystują również ulice z nawierzchni fotokatalitycznych. W Londynie testowano asfalt, który przy dużym nasłonecznieniu neutralizował część tlenków azotu powstających podczas spalania paliw. Antysmogowe projekty architektoniczne pozwalają integrować ochronę powietrza z przestrzenią miejską w sposób estetyczny, niezauważalny dla mieszkańców. Możliwe jest w ten sposób tworzenie całych dzielnic, w których powietrze oczyszczane jest pasywnie. Takie technologie mają ogromny potencjał, ponieważ każde nowe osiedle, biurowiec czy galeria handlowa może stać się aktywnym elementem systemu redukcji zanieczyszczeń, zmieniając strukturę miasta w gigantyczną sieć filtrującą.

3. Wieże smogowe i systemy korytarzy powietrznych (Urban Airflow Engineering & Smog Towers)

Wieże smogowe to jedne z najbardziej spektakularnych rozwiązań łagodzących skutki zanieczyszczonego powietrza (Rysunek 7). To wysokie konstrukcje wyposażone w potężne wentylatory i filtry, które zasysają powietrze i oczyszczają je z pyłów zawieszonych PM2.5 i PM10. Mogą poprawić jakość powietrza w promieniu kilkuset metrów. Najsłynniejszą wieżą smogową jest instalacja Smog Free Tower w Chinach, zaprojektowana przez Daan'a Roosegaarde. Ta konstrukcja oczyszcza dziesiątki tysięcy metrów sześciennych powietrza na godzinę i zużywa energię równą kilku czajnikom elektrycznym. W Indiach powstała największa wieża smogowa świata w Delhi. Jej zadaniem jest zmniejszanie szczytowego stężenia pyłów, które w okresie zimowym 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

przekraczać normy ponad dwudziestokrotnie. Podobne rozwiązania mają być budowane w innych indyjskich metropoliach.



Rysunek 7. Wizualizacja wieży smogowej.

Wieże smogowe drugiej generacji wykorzystują filtry elektrostatyczne oraz technologie jonizacji powietrza. Wytwarzają chmury jonów, które wiążą pył, powodując jego opadanie. Dzięki temu powietrze na poziomie ulicy staje się dużo czystsze. Jednak najnowsze rozwiązania nie ograniczają się tylko do pionowych wież. Miasta zaczynają projektować korytarze powietrzne, czyli specjalne ciągi ulic, parków i placów, które umożliwiają naturalny przepływ powietrza. Dzięki temu zanieczyszczenia nie zalegają między budynkami. Korytarze powietrzne są projektowane na

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

podstawie analiz komputerowych przepływów wiatru (CFD – computational fluid dynamics). Pozwalają one przewidzieć, gdzie powietrze stagnuje i jak przemieszczać masy powietrza tak, by stale „przewietrzać” miasto. Najbardziej rozwinięte systemy korytarzy powietrznych istnieją w Singapurze, Hongkongu i Frankfurcie nad Menem, gdzie całe dzielnice zaprojektowano tak, by wiatr mógł przenikać pomiędzy budynkami. Smog towers są także hybrydowane z zielonymi technologiami – np. pokrywane roślinami filtrującymi, co zwiększa zdolność do pochłaniania CO₂ i mikrocząstek. W Seulu powstają konstrukcje pokryte mchami i roślinnością pionową.

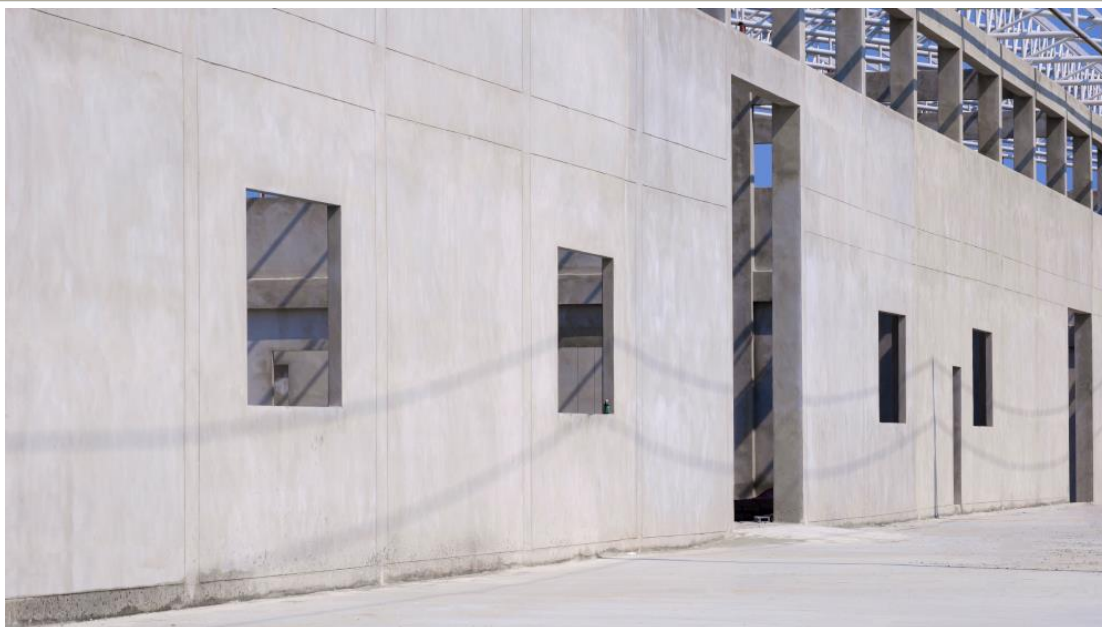
Energooszczędne wieże trzeciej generacji wykorzystują energię słoneczną i efekt kominowy – rozgrzane powietrze unosi się, zasysając zanieczyszczenia z okolicy. Takie prototypy testuje się w Australii i ZEA. Choć wieże smogowe nie rozwiązują problemu u źródła, stanowią niezwykle skuteczny sposób na zmniejszenie skutków ekspozycji na pyły w najbardziej zanieczyszczonych miastach świata.

4. Nanopowłoki i inteligentne materiały filtrujące powietrze (Nanocoating & Smart Air-Purifying Materials)

Jedną z najbardziej zaawansowanych technologii w walce z zanieczyszczeniem jest wykorzystanie inteligentnych materiałów, które same oczyszczają powietrze (Rysunek 8). Nanopowłoki mogą być aplikowane na budynki, samochody, przystanki autobusowe, a nawet ubrania. Mają zdolność rozkładania szkodliwych substancji oraz przyciągania i wiązania cząstek stałych.

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



Rysunek 8. Budynek wykonany z betonu na który naniesiono nanopowłoki przechwytyjące zanieczyszczenia.

Nanomateriały często wykorzystują nanocząsteczki srebra, miedzi, dwutlenku tytanu lub grafenu. Te materiały aktywnie reagują ze szkodliwymi gazami i pyłami, rozkładając je lub neutralizując. Wiele z nich regeneruje się samoistnie pod wpływem światła słonecznego. Ciekawym zastosowaniem są tkaniny antysmogowe. Prototypy takich materiałów są testowane w Korei Południowej – ubrania mogą pochłaniać pyły PM2.5 podczas noszenia ich przez człowieka. Powłoki te są bezpieczne i niewyczuwalne. Nanopowłoki stosowane na karoseriach samochodów mogą zmniejszać ilość spalin i pyłów z ulic, ponieważ przyczepiają się one do powierzchni i są stopniowo neutralizowane. W Japonii niektóre producenci testują takie rozwiązania w postaci powłok samooczyszczających. Inteligentne materiały filtrujące mogą być montowane wewnątrz systemów wentylacyjnych. Zachowują się jak klasyczne filtry, ale ich powierzchnia chemiczna nie ulega zużyciu, ponieważ aktywnie rozkłada zanieczyszczenia. Takie filtry mają wielokrotnie dłuższą trwałość.

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

W Holandii i Kanadzie testuje się „malowane filtry powietrza” – farby zawierają nanocząsteczki aktywne fotokatalitycznie. Gdy zostaną naniesione na ściany wewnętrzne, oczyszczają powietrze w pomieszczeniach, redukując poziom formaldehydu, benzenu i innych VOC. W Hiszpanii powstały chodniki pokryte nanopowłoką pochłaniającą NOx. Używa się ich w najbardziej ruchliwych częściach Barcelony, gdzie zanieczyszczenia od pojazdów są szczególnie uciążliwe. Smart materials mogą reagować dynamicznie na zmieniające się warunki. Niektóre powłoki zmieniają swoją strukturę przy wysokim stężeniu zanieczyszczeń, co zwiększa ich powierzchnię aktywną i przyspiesza oczyszczanie powietrza. Systemy te mają zastosowanie również w przemyśle – nanopowłoki mogą być stosowane w kominach fabrycznych, aby neutralizować część zanieczyszczeń przed ich uwolnieniem. Nowoczesne zakłady w Niemczech i Japonii już testują takie rozwiązania. Inteligentne materiały filtrujące powietrze to przyszłość pasywnej ochrony przed zanieczyszczeniami. W przeciwieństwie do filtrów mechanicznych nie wymagają stałej wymiany, są energooszczędne, a często samoistnie regenerują się, co czyni je unikalnym narzędziem w walce o czystsze środowisko.

METODY ZAPOBIEGANIA I PRZECIWDZIAŁANIA SKUTKOM OSUWANIA DOSTĘPNE
POZA OBSZAREM WSPARCIA PROJEKTU

1. Autonomiczne systemy stabilizacji zboczy oparte na sieciach czujników i sztucznej inteligencji (AI-Driven Autonomous Slope Stabilization)

Nowoczesne systemy autonomiczne wykorzystują gęste sieci czujników (m.in. inklinometry, tensometry, czujniki wilgoci, lidar, radar naziemny) połączonych z algorytmami sztucznej inteligencji, które analizują stan zbocza w czasie rzeczywistym. Ich zadaniem jest wykrywanie najmniejszych deformacji, przyspieszeń mas gruntu czy zmian ciśnienia porowego, które mogą zwiastować osuwisko. Systemy te nie ograniczają się do biernego monitoringu —

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

potrafią także aktywnie reagować. Gdy algorytmy wykryją niebezpieczne zmiany, automatycznie uruchamiają działania stabilizacyjne, takie jak sterowane odwodnienie, napinanie kotew gruntowych, aktywację barier energochłonnych lub zamykanie dróg zlokalizowanych poniżej zbocza.

Sztuczna inteligencja analizuje historyczne dane geotechniczne, lokalne opady, wilgotność, wstrząsy sejsmiczne oraz deformacje gruntu, ucząc się specyficznych wzorców zachowań danego zbocza. Dzięki temu model predykcyjny nie tylko ostrzega przed osuwiskiem, ale także określa najbardziej prawdopodobny kierunek ruchu mas ziemnych i potencjalny zasięg. W niektórych systemach stosuje się autonomiczne moduły odwodnienia – inteligentne dreny i pompy, które włączają się, gdy wilgotność w głębszych warstwach gruntu przekracza wartości krytyczne. Odwodnienie kontrolowane algorytmicznie jest często skuteczniejsze niż tradycyjne, które działa w sposób stały i nieadaptacyjny. Systemy AI są skalowalne — mogą zabezpieczać zarówno pojedyncze osuwiska zagrażające drogom, jak i całe obszary górskie. Platforma analityczna zbiera dane z wielu punktów pomiarowych, tworząc jedną zintegrowaną mapę ryzyka, która aktualizuje się co kilka minut.

W niektórych krajach systemy autonomiczne powiązано z dronami i skanerami lidarowymi. Drony monitorują zmiany w strukturze zboczy po intensywnych opadach, wykonując precyzyjne pomiary 3D, które są automatycznie analizowane pod kątem nieciągłości i mikropęknięć. W Japonii, która zmaga się z licznymi osuwiskami podczas tajfunów, działają systemy AI analizujące dane z ponad 200 tysięcy czujników rozlokowanych w regionach górskich. Na Tajwanie wdrożono podobne rozwiązania wzdłuż autostrad górskich, szczególnie narażonych na ruchy masowe. W Alpach, zwłaszcza w Szwajcarii i Austrii, stosuje się autonomiczne systemy radarowe, które potrafią wykryć ruch gruntu rzędu milimetrów i w razie potrzeby włączają systemy ostrzegania oraz sterują zaporami przeciwrumowiskowymi. Istotne jest, że te systemy są samouczące — wraz z każdym sezonem opadów ich przewidywania stają się bardziej precyzyjne. Dzięki temu zmniejsza się liczba fałszywych alarmów, a działania podejmowane są z dużą efektywnością.

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

Autonomiczne systemy AI zmieniają sposób myślenia o geotechnice: zamiast budować drogie, statyczne zabezpieczenia, umożliwiają dynamiczne zarządzanie ryzykiem. Efektem jest wysoka skuteczność i niższe koszty długoterminowe, szczególnie na terenach górskich i wzdłuż tras komunikacyjnych.

2. Biotechnologiczne umacnianie gruntu z użyciem mikroorganizmów (Microbial Induced Calcite Precipitation – MICP)

Biotechnologiczne wzmacnianie gruntu polega na wykorzystaniu mikroorganizmów, które w naturalny sposób wytwarzają kalcyt działający jak „cement” zwiększający spójność gruntu. Proces ten, znany jako MICP, jest jedną z najbardziej obiecujących metod stabilizacji osuwisk w sposób ekologiczny. Mikroorganizmy są wprowadzane do gleby poprzez system zastrzyków lub drenaż infiltracyjny. W odpowiednich warunkach zaczynają wytwarzać związki mineralne, które sklejają ziarna gleby i zwiększają jej wytrzymałość na ścinanie. Dzięki temu zbocze staje się sztywniejsze i bardziej odporne na ruchy masowe. Technika ta może być stosowana w szerokiej gamie gruntów — od piasków, przez gliny, aż po skały zwietrzałe. W wielu przypadkach stanowi alternatywę dla ciężkiego sprzętu i ogromnych konstrukcji inżynierskich, co znacząco redukuje koszty oraz wpływ na środowisko. Mikroorganizmy używane w MICP są nieszkodliwe i pochodzą z natury. Ich zdolności do mineralizacji gleby są jedynie ukierunkowane przez odpowiednio dobrane warunki środowiskowe. W przeciwieństwie do betonowych umocnień działają one od wewnątrz struktury gruntu, zachowując jego naturalny charakter.

Systemy MICP można stosować punktowo — np. w miejscach największej deformacji, jak i obszarowo, obejmując całe zbocza o powierzchni kilkudziesięciu hektarów. Technologia pozwala tworzyć „biologiczne bariery”, które w naturalny sposób ograniczają przesuwanie się mas ziemnych. Istotnym atutem jest to, że grunt ustabilizowany mikrobiologicznie posiada zdolność samoregeneracji — w razie ponownego uwodnienia lub pęknięć, żywe mikroorganizmy mogą ponownie wytworzyć kalcyt, wzmacniając strukturę.

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

W Australii i Nowej Zelandii technologię MICP testuje się w celu stabilizacji klifów nadmorskich, które ulegają erozji pod wpływem fal. W Japonii używa się jej do wzmacniania podłoża w rejonach sejsmicznych, ponieważ poprawia odporność gruntu na wstrząsy. W Stanach Zjednoczonych prowadzi się prace nad wykorzystaniem MICP do stabilizacji uskoków skalnych przy drogach szybkiego ruchu w rejonach górskich, np. w Kolorado. W Indiach z kolei technologia wspomaga zabezpieczanie osuwisk w Himalajach. Badania w Holandii wykazały, że MICP może zwiększyć wytrzymałość gruntu nawet o 50–250%, co czyni ją jedną z najbardziej obiecujących metod naturalnej stabilizacji. W dodatku jest to metoda przyjazna środowisku. Biotechnologiczne metody umacniania gruntu są przyszłością geotechniki, łącząc ekologię, niskie koszty i wysoką skuteczność. Mogą odegrać kluczową rolę w ochronie obszarów zagrożonych osuwiskami, szczególnie w rejonach chronionych, gdzie ingerencja ciężkiego sprzętu jest ograniczona.

3. Inteligentne konstrukcje elastyczne i biomimetyczne (Bio-Inspired Flexible Slope Protection)

Tradycyjne zabezpieczenia przeciwosuwiskowe polegają na stosowaniu sztywnych konstrukcji: murów oporowych, kotew czy siatek stalowych. Nowoczesne podejścia wykorzystują jednak elastyczne struktury oparte na wzorcach z natury — m.in. systemy przypominające korzenie drzew, pajęczyny czy tkanki roślin (Rysunek 9). Konstrukcje biomimetyczne dopasowują się do ruchów gruntu, zamiast im się opierać. Dzięki temu nie pękają pod wpływem deformacji, lecz stopniowo rozpraszają energię i stabilizują masy ziemne. To radykalnie zwiększa ich trwałość w porównaniu z sztywnymi zabezpieczeniami. Współczesne elastyczne struktury składają się z kompozytowych włókien o dużej wytrzymałości, w tym włókien bazaltowych, polimerowych i grafenowych. Są one zakotwiczone w podłożu w sposób przypominający korzenie drzew, dzięki czemu tworzą trójwymiarową sieć ograniczającą ruch gruntu. Systemy te są często integrowane z roślinnością — włókna stanowią matrycę, przez którą mogą przerastać korzenie roślin, wzmacniając zbocze w sposób naturalny. W efekcie powstają biohybrydowe konstrukcje odporniejsze niż klasyczne

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

geowłókniny. Elastyczne systemy są idealne w miejscach, gdzie grunt jest bardzo aktywny — np. w rejonach o dużych różnicach temperatur, częstych opadach lub ruchach sejsmicznych. W takich warunkach tradycyjne mury oporowe często ulegają uszkodzeniom.

Inteligentne konstrukcje elastyczne i biomimetyczne stosowane są m.in. w Szwajcarii i Austrii, gdzie zabezpiecza zbocza wzdłuż linii kolejowych i dróg górskich. W Stanach Zjednoczonych testuje się ją na osuwiskach wywołanych zmianami klimatycznymi w rejonie wybrzeża Pacyfiku. W Norwegii powstają systemy biomimetyczne inspirowane strukturą pancerza kraba królewskiego i tkanki morskich roślin. Zastosowanie włókien bazaltowych zwiększa odporność na zmiany wilgotności oraz mrozy.



Rysunek 9. Konstrukcja elastyczna i biomimetyczna na stoku osuwiskowym.

Systemy te można instalować bez użycia ciężkiego sprzętu – często wystarczają lekkie maszyny i montaż ręczny. Dzięki temu idealnie nadają się do regionów trudno dostępnych lub chronionych przyrodniczo. Oprócz stabilizacji gruntu, konstrukcje biomimetyczne poprawiają

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

również mikroretencję wody. Dzięki temu ograniczają szybkie przesiąkanie opadów i zmniejszają ryzyko powstania ciśnienia porowego, które często prowadzi do osuwisk. Biomimetyczne podejścia stanowią przykład synergii technologii i natury. Ich elastyczność, możliwość integracji z roślinnością i wysoka wytrzymałość na zmienne warunki czynią je przyszłościowym narzędziem walki z zagrożeniami osuwiskowymi.

4. Megastruktury przeciwośuwiskowe: ruchome bariery, tunele ochronne i robotyczne systemy utrzymywania zboczy (Robotic & Megastructure Landslide Control)

W najbardziej niebezpiecznych lokalizacjach stosuje się megastruktury ochronne, które mają za zadanie przechwycić lub przekierować ogromne masy ziemi. Najnowszym trendem są ruchome bariery przeciwośuwiskowe, które mogą zmieniać swoje położenie w zależności od poziomu zagrożenia. Bariery te wykonane są ze stalowych i kompozytowych paneli, które są wysuwane automatycznie w momencie wykrycia ruchu gruntu. W normalnych warunkach są schowane, dzięki czemu nie ingerują w krajobraz i nie zmniejszają estetyki przestrzeni.

W Alpach włoskich i austriackich stosuje się ruchome zapory przeciwrumowiskowe zabezpieczające miasta przed sypłymi błotnymi. Sterowanie ich pracą jest oparte na radarach i sejsmometrach.

Kolejną innowacją są tunele ochronne — specjalne osłony nad drogami i liniami kolejowymi, które mogą zatrzymać ogromne ilości rumoszu skalnego lub błota. Nowoczesne konstrukcje są lekkie, wykonane z kompozytów o bardzo wysokiej wytrzymałości. W Japonii tunele takie buduje się wzdłuż linii kolejowych Shinkansen, a w Norwegii stosuje się je przy drogach biegnących nad fiordami, gdzie ryzyko osuwisk jest wysokie.

Megastruktury przeciwośuwiskowe często współpracują z robotycznymi systemami konserwacyjnymi. Autonomiczne roboty mogą usuwać luźne odłamy skalne, czyścić rowy odwadniające i instalować kotwy w miejscach trudno dostępnych dla ludzi. Roboty wspinaczkowe wykorzystywane są już w Korei Południowej i Szwajcarii — potrafią poruszać się po pionowych

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

ścianach skalnych, wykonywać odwierty i umacniać skały siatkami ochronnymi. W Chinach testuje się zdalnie sterowane pojazdy gaśnicowe, które potrafią zasypywać pęknięcia lub przeprowadzać prace wzmacniające bez udziału ludzi — szczególnie cenne podczas zagrożenia osuwiskiem. Megastruktury i robotyka ograniczają ryzyko wypadków, ponieważ wiele prac wykonywanych jest automatycznie, bez konieczności narażania ludzi na przebywanie w strefie zagrożenia. Choć technologie te są kosztowne, w regionach wysokiego ryzyka stają się standardem. To połączenie zaawansowanej mechaniki, inżynierii materiałowej i robotyki stanowi jeden z najbardziej skutecznych sposobów przeciwdziałania skutkom osuwisk.

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

METÓDY PREVENČIE A ZMIERŇOVANIA NÁSLEDKOV PRÍRODNÝCH POHRÔM DOSTUPNÉ MIMO OBLASŤ PODPORY PROJEKTU

ÚVOD

Cieľom spracovania je oboznámiť rozhodovacie orgány s metódami prevencie a zmiernovania následkov prírodných pohrôm v oblasti zosuvov pôdy, povodní a znečistenia ovzdušia, ktoré sú dostupné mimo oblasti podpory. Spracovanie má zároveň upozorniť okresy nachádzajúce sa v oblasti podpory projektu na možnosť využitia metód, ktoré sa tam v súčasnosti nepoužívajú, používajú sa len v obmedzenom rozsahu alebo iba experimentálne. S rozvojom technológií sa objavujú čoraz novšie metódy, ktoré umožňujú presnejšie predpovedať a zmiernovať následky prírodných pohrôm.

Popísané sú rôzne metódy prevencie a zmiernovania následkov prírodných pohrôm, ktoré sa nepoužívajú v okresoch v tzv. oblasti podpory na území Poľska a Slovenska (okresy v Poľsku: v Sliezskej vojvodstve: pszczyński, cieszyński, bielski, mesto na právach okresu Bielsko-Biala, żywiecki; v Malopoľskom vojvodstve: olkuski, chrzanowski, oświęcimski, wadowicki, suski, myślenicki, tatrzański, nowotarski, limanowski, nowosądecki, mesto na právach okresu Nowy Sącz, gorlicki; v Podkarpatskom vojvodstve: bieszczadzki, leski, sanocki, brzozowski, krośnieński, mesto na právach okresu Krosno, jasielski, rzeszowski, mesto na právach okresu Rzeszów, przeworski, przemyski, mesto na právach okresu Przemyśl, jarosławski, lubaczowski. Okresy na Slovensku: v Žilinskom samosprávnom kraji: Čadca, Kysucké Nové Mesto, Bytča, Žilina, Martin, Turčianske Teplice, Ružomberok, Dolný Kubín, Námestovo, Tvrdošín, Liptovský Mikuláš; v Prešovskom samosprávnom kraji: Poprad, Kežmarok, Stará Ľubovňa, Levoča, Sabinov, Bardejov, Svidník, Prešov, Vranov nad Topľou, Stropkov, Medzilaborce, Humenné, Snina; v Košickom samosprávnom kraji: Spišská Nová Ves).

METÓDY PREVENČIE A ZMIERŇOVANIA NÁSLEDKOV POVODNÍ DOSTUPNÉ MIMO OBLASŤ PODPORY PROJEKTU

1. Inteligentné, samoorganizujúce sa systémy retencie vody založené na umelej inteligencii (AI-Driven Adaptive Retention Systems)

Moderné retenčné systémy založené na umelej inteligencii využívajú hustú sieť senzorov, hydrologické modelovanie a samoučiace sa algoritmy na presné predpovedanie lokálnych povodňových javov. Vďaka tomu dokážu reagovať v reálnom čase a dynamicky otvárať a zatvárať nádrže, priepusty či podzemné retenčné priestory ešte predtým, než dôjde k nebezpečnému zvýšeniu hladiny riek. Takéto riešenia sú oveľa účinnejšie než tradičné, rigidne navrhnuté melioračné systémy.

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

Inteligentná retencia vody je založená na spracovaní veľkých dátových súborov týkajúcich sa zrážok, odparovania, vlhkosti pôdy, prietoku riek, meteorologických predpovedí a satelitných údajov. Sieť algoritmov analyzuje nielen aktuálny hydrologický stav, ale aj predpovedá jeho vývoj v blízkej budúcnosti (Obrázok 1).

Vďaka tomu môže infraštruktúra fungovať preventívne a odľahčiť odvodňovací systém ešte pred vznikom reálneho rizika povodne. Jednou z hlavných výhod takýchto systémov je ich schopnosť optimalizovať fungovanie retenčných nádrží v rámci celého povodia, nielen lokálne. Napríklad jedna nádrž môže byť čiastočne vyprázdnená v očakávaní prichádzajúcich zrážok, zatiaľ čo iná – nachádzajúca sa nižšie v údolí – je naplnená len do takej úrovne, ktorá nepredstavuje riziko vylitia pri náhlom zvýšení hladiny vody. Celý proces je koordinovaný automaticky.

Moderné systémy umelej inteligencie sa tiež učia sezónne vzorce prietoku a ich odchýlky. Vďaka tomu dokážu odhaliť hydrologické anomálie, ktoré môžu signalizovať hrozbu – napríklad náhly nárast povrchového odtoku v dôsledku topenia snehu alebo intenzívnych zrážok na predtým vysušenom podlaží. V tradičných systémoch sú takéto zmeny často zaznamenané oneskorene.



Obrázok 1. Schéma systému riadenia infraštruktúry s využitím IT.

Dôležitým prvkom tejto technológie je integrácia 3D modelovania terénu so simuláciou prúdenia vody, čo umožňuje predvídať, ktoré oblasti si vyžadujú okamžitý zásah. Algoritmy môžu riadiť nielen železobetónové priehrady, ale aj nové typy retencie – ako zelené strechy, porézne podzemné

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

nádrže či modulárne retenčné komory integrované do mestskej infraštruktúry. Niektoré systémy využívajú technológie blockchain na zaznamenávanie operácií s hydrologickými dátami, čo zvyšuje ich dôveryhodnosť, transparentnosť a odolnosť voči chybám. Obzvlášť dôležité je to v krízových situáciách, keď miestne orgány musia mať istotu o pôvode a správnosti informácií.

Výhodou umelej inteligencie pri riadení retencie je jej schopnosť fungovať v podmienkach, kde tradičné matematické modely zlyhávajú – napríklad v povodiach s vysokou mierou antropogénneho zaťaženia, kde zástavba mení režimy prúdenia, alebo v horských oblastiach so strmými svahmi a krátkymi časmi hydrologickej odozvy. Tieto systémy môžu byť integrované s inteligentnou mestskou infraštruktúrou, vďaka čomu dokážu regulovať priepustnosť dažďovej kanalizácie či množstvo vody zadrživanej v mestských zelených plochách. Môžu tiež zasielať varovania obyvateľom prostredníctvom automatických notifikácií založených na analýze lokálnych dát.

V praxi tieto riešenia zavádza napríklad Holandsko, kde projekt Digital Delta pomocou umelej inteligencie integruje hydrologické údaje z celej krajiny. Podobné experimentálne systémy existujú aj v Japonsku a Južnej Kórei a Singapur zaviedol pokročilú sieť senzorov a AI modelov podporujúcich riadenie dažďových vôd. Vďaka automatizovanej inteligentnej retencii získavajú mestá a regióny novú úroveň odolnosti voči povodňam. Táto technológia nenahrádza klasickú infraštruktúru, ale ju posilňuje, čím robí vodné hospodárstvo schopné reagovať v reálnom čase – prakticky bez zásahu človeka.

2. Plávajúce mestá a adaptívne mestské štruktúry (Floating & Amphibious Urban Systems)

Plávajúce mestá predstavujú jednu z najfuturistickejších, a zároveň reálnych koncepcií ochrany pred povodňami. Namiesto boja s vodou predpokladajú úplnú adaptáciu na jej prítomnosť prostredníctvom výstavby infraštruktúry plávajúcej na vodnej hladine (Obrázok 2). Vďaka tomu ani extrémne povodne nespôsobujú škody – zástavba sa zdvíha spolu s hladinou vody.

Moderné plávajúce konštrukcie vznikajú s využitím ľahkých a odolných kompozitných materiálov, ktoré umožňujú budovám fungovať tak na vode, ako aj pri nízkej hladine riek alebo morí. Často sa používajú aj betónové pontóny s extrémnou pevnosťou, vyplnené nepotopiteľnými štruktúrami. Tieto systémy už nie sú len teoretickým konceptom – existujú plne funkčné plávajúce obytné štvrte, školy a administratívne budovy, ktoré prešli skúškou počas reálnych povodní. Jedným z najznámejších príkladov sú plávajúce štvrte v Holandsku, napríklad Schoonschip v Amsterdame.

Popri stabilných plávajúcich konštrukciách sa rozvíja aj technológia amfíbických budov. Tieto budovy sú za bežných podmienok umiestnené na zemi, no počas povodne sa vďaka špeciálnym základom fungujúcim ako loď zdvihnú na hladinu. Takéto riešenia sa testujú vo Veľkej Británii a v USA, kde predstavujú alternatívu k nákladným protipovodňovým hrádzam.

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

Plávajúce mestá sú často navrhované ako ekologické – vybavené systémami filtrácie vody, obnoviteľnými zdrojmi energie a zelenými strechami zlepšujúcimi retenciu. To umožňuje ich fungovanie v duchu sebestačnosti, čo zvyšuje odolnosť celých komunít voči prírodným katastrofám. Jednou z najpokročilejších koncepcií je Oceanix City, projekt podporovaný OSN. Predpokladá výstavbu modulárnych plávajúcich platforiem, ktoré môžu ubytovať tisíce obyvateľov a prispôbiť sa miestnym klimatickým podmienkam. Tieto konštrukcie sú navrhnuté tak, aby odolali hurikánom kategórie 5.



Obrázok 2. Vizualizácia budov umiestnených na vode ako súčasť mestskej zástavby.

Japonsko plánuje výstavbu veľkých plávajúcich výskumných kampusov odolných voči cunami, zatiaľ čo Južná Kórea rozvíja projekty plávajúcich letísk a logistických centier. Holandsko, ktoré má stovky rokov skúseností s ochranou pred vodou, je svetovým lídrom v oblasti plávajúcej obytnej architektúry.

Koncepcia plávajúcich miest predstavuje revolúciu v urbanizme – predpokladá opustenie boja so živlom v prospech úplnej adaptácie. Mestá budúcnosti sa môžu sezónne meniť, presúvať, spájať alebo oddeľovať jednotlivé moduly podľa potrieb komunity. Plávajúca architektúra otvára nové možnosti pre pobrežné regióny ohrozené stúpaním hladiny mora. Namiesto presídľovania miliónov ľudí sa stáva možným presun zástavby na vodu, kde povodne už nepredstavujú hrozbu, ale prirodzenú súčasť života.

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

Hoci je táto technológia stále nákladná, rýchlo sa rozvíja a čoraz viac krajín investuje do plávajúcich obytných jednotiek, škôl a verejných budov. V budúcnosti sa plávajúce mestá môžu stať štandardom v regiónoch najviac ohrozených povodňami a stúpaním hladiny oceánov.

3. Modro-zelená infraštruktúra s vysokou priepustnosťou (High-Permeability Blue-Green Infrastructure)

Modro-zelená infraštruktúra predstavuje kombináciu hydrologických (modrých) a ekologických (zelených) riešení, ktoré spoločne znižujú riziko povodní prostredníctvom retencie, infiltrácie a spomaľovania odtoku vody (Obrázok 3). Moderné prístupy sa zameriavajú na zvyšovanie priepustnosti miest – na rozdiel od tradičných metód betónovania povrchov.

Jedným z najinovatívnejších riešení sú hyperpriepustné povrchy vyrobené z kompozitných materiálov s kapilárnou štruktúrou. Dokážu absorbovať aj prívalové dažde a následne vodu postupne uvoľňovať do pôdy. Ich účinnosť je niekoľkonásobne vyššia než pri tradičnej dlažbe.

V rámci modro-zelenej infraštruktúry sa rozvíja aj trend tzv. „špongiových ulíc“, ktoré neodvádzajú vodu do kanalizácie, ale ju ukladajú v poréznych vrstvách pod povrchom. Takéto riešenia sa využívajú napríklad v Číne v rámci koncepcie Sponge City. Dôležitým prvkom sú aj zelené strechy novej generácie – viacvrstvové konštrukcie s vysokou retenčnou schopnosťou dokážu zadržať veľké množstvo vody. Niektoré systémy sú vybavené senzormi, ktoré automaticky vypúšťajú časť vody pred príchodom dažďa, aby zvýšili absorpčnú kapacitu.

Moderné retenčné parky plnia dvojitú funkciu – slúžia ako rekreačné priestory, no v prípade potreby sa menia na rozsiahle retenčné nádrže. Príkladom je park Bishan-Ang Mo Kio v Singapure, ktorý počas silných dažďov funguje ako protipovodňová nádrž. Retenčné kanály budované pozdĺž hlavných dopravných ťahov dokážu zachytiť prebytočnú vodu počas prívalových dažďov, čím zabráňujú zaplaveniu ulíc. Moderné kanály sú často zazelenené a plnia aj funkciu ekologických koridorov.

Zaujímavým riešením sú aj mestské mokrade – umelo obnovené mokradňové ekosystémy, ktoré fungujú ako prirodzené filtre a retenčné nádrže. V Soule obnovenie mokradí pozdĺž rieky Cheonggyecheon výrazne znížilo riziko lokálnych povodní. Modro-zelené riešenia umožňujú transformáciu betónových miest na prostredia fungujúce ako špongia – absorbujú vodu, zadržiavajú ju a postupne uvoľňujú. Vďaka tomu možno mestské povodne obmedziť aj bez výrazných zásahov do existujúcej infraštruktúry.

Regióny ako Austrália, Singapur, Holandsko, Kanada a škandinávské krajiny patria medzi lídrov v tejto oblasti. Vytvárajú komplexné siete zelených plôch prepojených s vodnými systémami, čím obnovujú prirodzené hydrologické procesy v mestských centrách.

Modro-zelená infraštruktúra predstavuje budúcnosť urbanizmu – prestáva vnímať vodu ako hrozbu a namiesto toho ju chápe ako zdroj, ktorý možno v dobre navrhnutom prostredí bezpečne zadržiavať, čistiť a využívať obyvateľmi.

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



Obrázok 3. Vizualizácia efektov využitia územia s použitím modro-zelenej infraštruktúry s vysokou priepustnosťou.

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

4. Automatické bariéry a hydrodynamické konštrukcie novej generácie (Autonomous Hydrodynamic Flood Barriers)

Na rozdiel od tradičných priehrad a hrádzi fungujú moderné protipovodňové bariéry autonómne a ich mechanizmus sa aktivuje až v momente ohrozenia. Najznámejším príkladom je technológia samovztyčujúcich sa bariér, ktorá využíva silu tlačiacej vody na zdvíhanie ochranných panelov (Obrázok 4). Tieto bariéry sú umiestnené v špeciálnych kanáloch pod povrchom ciest alebo nábreží. Za bežných podmienok sú neviditeľné a nenarúšajú dopravu ani krajinu. Až keď voda začne tlačiť, panely sa zdvihnú a vytvoria tesnú protipovodňovú stenu. Ide o riešenie geniálne vo svojej jednoduchosti a zároveň veľmi nenáročné na údržbu.

Moderné hydrodynamické konštrukcie zahŕňajú aj bariéry s premenlivou geometriou, ktoré prispôbujú svoj tvar rýchlosti prichádzajúcej vody. Ich povrch je aerodynamicky optimalizovaný, čo minimalizuje riziko poškodenia a umožňuje kontrolované rozptýlenie vlny. V niektorých systémoch sa používajú inteligentné panely so zabudovanými senzormi tlaku, ktoré monitorujú stav konštrukcie a odosielajú údaje do riadiacich centier. Vďaka tomu je infraštruktúra neustále monitorovaná a prípadné poškodenia sú odhalené v počiatočnom štádiu.

Najväčším úspechom tejto technológie je rozsah jej využitia – od jednotlivých ulíc, cez obchodné centrá až po celé pobrežia. Jedným z najznámejších príkladov je systém MOSE v Benátkach, ktorý chráni mesto pred povodňovými vlnami, hoci funguje odlišne než samovztyčujúce sa bariéry. Vo Veľkej Británii a Holandsku sa používajú menšie, modulárne hydrodynamické bariéry, ktoré možno inštalovať okolo jednotlivých budov alebo mestských častí. Takéto konštrukcie sú obzvlášť populárne v oblastiach ohrozených búrkami a prudkými prílivmi.

Zaujímavou technologickou novinkou sú robotické bariéry, ktoré možno automaticky rozmiestniť pomocou mobilných jednotiek. Takéto vozidlá sú riadené algoritmami umelej inteligencie a dokážu v priebehu niekoľkých minút vytvoriť zábranu dlhú niekoľko stoviek metrov z modulov uložených v miestnych skladoch. Niektoré krajiny experimentujú aj s bariérami vyrobenými z flexibilných kompozitov, ktoré dokážu absorbovať energiu vln a kontrolovane ju rozptýľovať. Vďaka tomu sú odolné voči poškodeniu spôsobenému vlnami nesúcimi trosky alebo ťažké predmety.

Automatické bariéry sa výborne integrujú s ďalšími systémami, ako sú umelá inteligencia a prediktívne hydrologické modely. Keď systém predpovedá riziko povodne, bariéry sa môžu aktivovať ešte pred vznikom reálneho ohrozenia, čo výrazne zvyšuje účinnosť ochrany. Táto technológia stojí na rozhraní robotiky, hydrodynamiky a materiálového inžinierstva. Jej najväčšou výhodou je, že si nevyžaduje zapojenie veľkého počtu ľudí v krízových situáciách. Preto patria moderné bariéry medzi najperspektívnejšie prvky budúcej protipovodňovej ochrany.

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



Obrázok 4. Príklad automatických bariér a hydrodynamických konštrukcií novej generácie.

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

METÓDY PREVENČIE A ZMIERŇOVANIA NÁSLEDKOV ZNEČISTENIA OVZDUŠIA DOSTUPNÉ MIMO OBLASŤ PODPORY PROJEKTU

1. Inteligentné, samoorganizujúce sa systémy biofiltrácie vzduchu (AI-Driven Adaptive Biofiltration Systems)

Moderné systémy biofiltrácie využívajú kombináciu syntetickej biológie, umelej inteligencie a environmentálneho inžinierstva na riadenie zloženia a aktivity mikroorganizmov schopných neutralizovať znečistenie ovzdušia. Na rozdiel od tradičných chemických alebo mechanických filtrov sa tieto riešenia dokážu prispôbovať zmenám úrovne znečistenia, automaticky regulovať svoju sorpčnú kapacitu a účinnosť absorpcie.

Takéto biofiltre dokážu odstraňovať prchavé organické zlúčeniny (VOC), oxidy dusíka aj priemyselné znečisťujúce látky. Systémy sú založené na špecializovaných konzorciách mikroorganizmov, ktoré sú vyberané tak, aby rozkladali konkrétne typy znečistenia. Vďaka algoritmom umelej inteligencie prebieha biologický monitoring v reálnom čase – ak sa napríklad zvýši koncentrácia NO₂ alebo aldehydov, systém dokáže upraviť prietok vzduchu, teplotu či vlhkosť tak, aby maximalizoval aktivitu vhodných mikroorganizmov.

Jednou z najväčších výhod týchto biofiltrov je ich schopnosť regenerácie. Mikroorganizmy sa prirodzene rozmnožujú, takže nie je potrebné meniť celé filtračné moduly. Vďaka tomu sú prevádzkové náklady nižšie a účinnosť filtrácie vyššia. V mnohých prípadoch si biofiltre dokážu poradiť aj so znečisťujúcimi látkami, ktoré tradičné filtre nezachytia.

Súčasný biofiltre môžu mať podobu kompaktných kontajnerových zariadení, modulov integrovaných do budov alebo veľkých zelených veží pokrytých mikrobiologickými filtračnými panelmi (Obrázok 5). Ich modularita umožňuje škálovanie podľa potrieb – od obytných štvrtí až po ťažký priemysel.

Vďaka presnému riadeniu environmentálnych parametrov (ako sú pH, vlhkosť či oksyľčenie) systémy umelej inteligencie dokážu predvídať, ako sa bude meniť aktivita mikroorganizmov pri určitej úrovni znečistenia, a reagujú preventívne. To znamená, že biofiltre začínajú pracovať intenzívnejšie ešte predtým, než koncentrácie znečistenia prekročia povolené limity.

Takéto systémy môžu fungovať aj v interiéroch – v kancelárskych budovách, školách či nákupných centrách. Práve v týchto priestoroch sa často hromadia znečisťujúce látky vznikajúce vo vnútri (farby, nábytok, kozmetika, čistiace prostriedky). Biofiltračné systémy ich odstraňujú a vytvárajú mikroprostredie výrazne zdravšie než pri použití mechanických filtrov.

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



Obrázok 5. Systém biofiltrácie vzduchu.

Adaptívne biofiltre sa využívajú aj v cestných tuneloch a pri rýchlostných komunikáciách. Vďaka tomu dokážu neutralizovať emisie vznikajúce priamo z dopravy. Takéto riešenia sa testujú napríklad v Soule a v okolí Tokia, kde je intenzita dopravy veľmi vysoká. V mestách Južnej Ameriky, najmä v Bogote a Medellíne, sa používajú prototypové biofiltračné veže, ktoré znižujú koncentrácie prachových častíc a plynov v mestských centrách. Tieto konštrukcie, nazývané „zelené komíny“, uľahčujú boj proti znečisteniu ovzdušia v husto zastavaných oblastiach.

Významným príkladom je projekt CityTree vyvíjaný v Nemecku – ide o modulárne zelené steny s mikroorganizmami a machom, ktoré dokážu čistiť také množstvo vzduchu ako dospelé stromy, avšak na zlomku ich plochy. Tieto inštalácie sa objavili v Paríži, Osle, Hongkongu a Londýne.

Inteligentné biofiltre predstavujú sľubné riešenie, pretože sú samoregeneračné, energeticky nenáročné, ekologické a neškodné pre životné prostredie. Môžu sa stať štandardom v moderných mestách, kde boj proti znečisteniu vyžaduje aktívne a presné riešenia.

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

2. Antismogová architektúra: budovy pohlcujúce znečistenie (Anti-Smog Architectural Systems)

Moderné budovy môžu fungovať ako obrovské filtre vzduchu a ich fasády sa stávajú aktívnymi povrchmi odstraňujúcimi znečistenie (Obrázok 6). Na tento účel sa používajú fotokatalytické povlaky, ktoré pod vplyvom slnečného žiarenia rozkladajú škodlivé látky, ako sú NO_x a VOC, na neškodné zlúčeniny. Vďaka tomu sa povrch budovy stáva nástrojom v boji za čistejšie ovzdušie.

Fotokatalytické povlaky najčastejšie využívajú oxid titaničitý (TiO₂), ktorý pod vplyvom UV žiarenia aktivuje rozklad oxidov dusíka. Najmodernejšie projekty však používajú oxidy vanádu, zmesi nanočastíc a hybridné materiály s výrazne vyššou účinnosťou a životnosťou.



Obrázok 6. Maketa budovy pohlcujúcej znečistenie.

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

Taliansky projekt Palazzo Italia patrí medzi najznámejšie príklady antismogovej architektúry. Budova má fasádu vyrobenú zo špeciálneho fotokatalytického materiálu, ktorý dokáže neutralizovať aj niekoľko desiatok kilogramov oxidov dusíka ročne. Jej povrch čistí vzduch v širokom okolí.

V Číne a Indii sa rozvíjajú koncepcie mrakodrapov pokrytých „zelenými panelmi“, na ktorých rastú rastliny a machy. Takéto vertikálne lesy nielen filtrujú vzduch, ale aj absorbujú CO₂ a produkujú kyslík. Najznámejšie realizácie sa nachádzajú v Nankingu (projekt Stefana Boeriho) a v Miláne (Bosco Verticale).

Moderná antismogová architektúra zahŕňa aj chodníky, pešie tunely, viadukty a protihlukové steny pokryté materiálmi čistiacimi vzduch. V Japonsku sa už používa fotokatalytický betón na fasádach mostov a v Mexiku sa využíva pri tvorbe mestských antismogových muralov. Antismogové budovy môžu byť vybavené aj aktívnymi systémami čistenia, napríklad tzv. „obrátenými komínmi“. Tie nasávajú vzduch z ulíc, prechádzajú ho cez elektrostatické filtre a následne vypúšťajú vyčistený vzduch o niekoľko metrov vyššie. Takéto systémy existujú napríklad na Novom Zélande a v Holandsku.

V Holandsku sa testujú aj fasády vybavené mikrokanálmi, ktorými prúdi vzduch. Vo vnútri sa nachádzajú vymeniteľné filtre a celý systém je napájaný solárnou energiou. Takéto fasády dokážu prefiltrovať milióny kubických metrov vzduchu ročne.

Inovatívne mestské projekty využívajú aj ulice s fotokatalytickým povrchom. V Londýne sa testoval asfalt, ktorý pri silnom slnečnom žiarení neutralizoval časť oxidov dusíka vznikajúcich pri spaľovaní palív. Antismogové architektonické riešenia umožňujú integrovať ochranu ovzdušia do mestského priestoru esteticky a nenápadne. Takto možno vytvárať celé mestské štvrte, v ktorých sa vzduch čistí pasívne.

Tieto technológie majú obrovský potenciál, pretože každé nové sídlisko, kancelárska budova či obchodné centrum sa môže stať aktívnou súčasťou systému redukcie znečistenia, čím sa mestská štruktúra mení na rozsiahlu filtračnú sieť.

3. Smogové veže a systémy prúdenia vzduchu (Urban Airflow Engineering & Smog Towers)

Smogové veže patria medzi najvýraznejšie riešenia zmierňovania následkov znečisteného ovzdušia (Obrázok 7). Ide o vysoké konštrukcie vybavené výkonnými ventilátormi a filtrami, ktoré nasávajú vzduch a odstraňujú z neho prachové častice PM_{2.5} a PM₁₀. Dokážu zlepšiť kvalitu ovzdušia v okruhu niekoľkých stoviek metrov.

Najznámejšou smogovou vežou je zariadenie Smog Free Tower v Číne, navrhnuté Daanom Roosegaardem. Táto konštrukcia čistí desiatky tisíc kubických metrov vzduchu za hodinu a spotrebuje energiu porovnateľnú s niekoľkými rýchlovarnými kanvicami.

V Indii bola v Dillí postavená najväčšia smogová veža na svete. Jej cieľom je znižovať špičkové koncentrácie prachových častíc, ktoré v zimnom období môžu prekračovať normy aj viac než dvadsaťnásobne. Podobné riešenia sa plánujú aj v ďalších indických metropolách.

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



Obrázok 7. Vizualizácia smogovej veže.

Smogové veže druhej generácie využívajú elektrostatické filtre a technológie ionizácie vzduchu. Vytvárajú oblaky iónov, ktoré viažu prachové častice a spôsobujú ich usadzovanie. Vďaka tomu je vzduch na úrovni ulíc výrazne čistejší. Najnovšie riešenia sa však neobmedzujú len na vertikálne veže.

Mestá začínajú navrhovať tzv. vzdušné koridory – špeciálne usporiadanie ulíc, parkov a námestí, ktoré umožňuje prirodzené prúdenie vzduchu. Vďaka tomu sa znečistenie nehromadí medzi budovami. Tieto koridory sa navrhujú na základe počítačových analýz prúdenia vzduchu (CFD – computational fluid dynamics), ktoré umožňujú identifikovať miesta stagnácie a optimalizovať pohyb vzdušných hmôt tak, aby mesto bolo neustále „vetrané“.

Najrozvinutejšie systémy vzdušných koridorov existujú v Singapure, Hongkongu a vo Frankfurt nad Mohanom, kde sú celé mestské štvrte navrhnuté tak, aby vietor mohol voľne prúdiť medzi budovami. Smogové veže sa tiež kombinujú so zelenými technológiami – napríklad sú pokryté rastlinami filtrujúcimi vzduch, čo zvyšuje ich schopnosť absorbovať CO₂ a jemné častice. V Soule vznikajú konštrukcie pokryté machmi a vertikálnou vegetáciou.

Energeticky úsporné veže tretej generácie využívajú solárnu energiu a komínový efekt – ohriaty vzduch stúpa a nasáva znečistenie z okolia. Takéto prototypy sa testujú v Austrálii a Spojených arabských emirátoch. Hoci smogové veže neriešia problém pri jeho zdroji, predstavujú

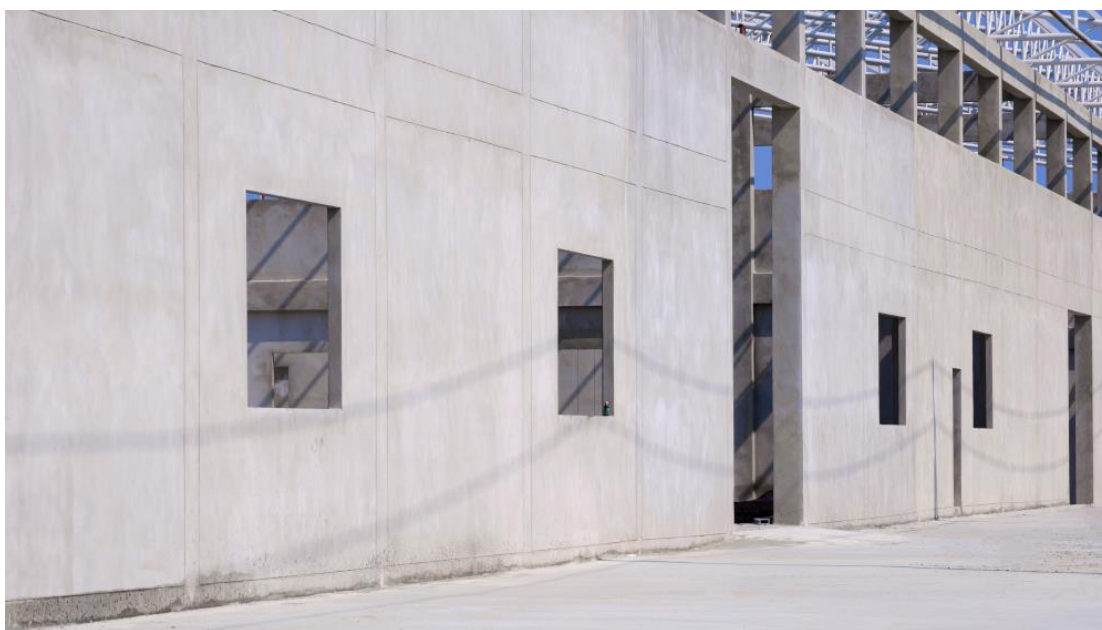
Polska – Słowacja

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

veľmi účinný spôsob, ako znížiť negatívne účinky vystavenia znečistenému ovzdušiu v najviac zasiahnutých mestách sveta.

4. Nanopovlaky a inteligentné materiály na čistenie vzduchu (Nanocoating & Smart Air-Purifying Materials)

Jednou z najpokročilejších technológií v boji proti znečisteniu je využitie inteligentných materiálov, ktoré samy čistia vzduch (Obrázok 8). Nanopovlaky možno aplikovať na budovy, vozidlá, autobusové zastávky a dokonca aj na oblečenie. Majú schopnosť rozkladať škodlivé látky a zároveň priťahovať a viazať pevné častice.



Obrázok 8. Budova z betónu s aplikovanými nanopovlakmi zachytávajúcimi znečistenie.

Nanomateriály často využívajú nanočastice striebra, medi, oxidu titaničitého alebo grafénu. Tieto materiály aktívne reagujú so škodlivými plynmi a prachovými časticami, rozkladajú ich alebo neutralizujú. Mnohé z nich sa samy regenerujú pôsobením slnečného žiarenia.

Zaujímavou aplikáciou sú antismogové textílie. Prototypy takýchto materiálov sa testujú v Južnej Kórei – oblečenie dokáže počas nosenia absorbovať častice PM2.5. Tieto povlaky sú bezpečné a pre človeka nepostrehnuteľné. Nanopovlaky aplikované na karosérie automobilov môžu znižovať množstvo výfukových plynov a prachu v uliciach, keďže znečisťujúce látky sa viažu na povrch a

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

postupne sa neutralizujú. V Japonsku niektorí výrobcovia testujú takéto riešenia vo forme samočistiacich povrchov.

Inteligentné filtračné materiály môžu byť inštalované aj vo ventilačných systémoch. Správajú sa podobne ako klasické filtre, avšak ich chemický povrch sa neopotrebuje, pretože aktívne rozkladá znečistenie. Takéto filtre majú výrazne dlhšiu životnosť.

V Holandsku a Kanade sa testujú tzv. „maľované filtre vzduchu“ – farby obsahujú fotokatalyticky aktívne nanočastice. Po nanosení na vnútorné steny čistia vzduch v interiéri a znižujú koncentrácie formaldehydu, benzénu a ďalších VOC. V Španielsku vznikli chodníky pokryté nanopovlakom absorbujúcim NO_x, ktoré sa využívajú najmä v najrušnejších častiach Barcelony.

Inteligentné materiály dokážu dynamicky reagovať na meniace sa podmienky. Niektoré povlaky menia svoju štruktúru pri vysokých koncentráciách znečistenia, čím zvyšujú svoju aktívnu plochu a urýchľujú proces čistenia vzduchu. Tieto systémy majú využitie aj v priemysle – nanopovlaky možno aplikovať na komíny tovární, aby neutralizovali časť emisií ešte pred ich vypustením do ovzdušia. Moderné závody v Nemecku a Japonsku už takéto riešenia testujú.

Inteligentné materiály na čistenie vzduchu predstavujú budúcnosť pasívnej ochrany pred znečistením. Na rozdiel od mechanických filtrov nevyžadujú pravidelnú výmenu, sú energeticky úsporné a často sa samy regenerujú, čo z nich robí jedinečný nástroj v boji za čistejšie životné prostredie.

METÓDY PREVENČIE A ZMIERŇOVANIA NÁSLEDKOV ZOSUVOV PÔDY DOSTUPNÉ MIMO OBLASŤ PODPORY PROJEKTU

Autonómne systémy stabilizácie svahov založené na sieťach senzorov a umelej inteligencii (AI-Driven Autonomous Slope Stabilization)

Moderné autonómne systémy využívajú husté siete senzorov (napr. inklinometre, tenzometre, senzory vlhkosti, lidar, pozemný radar) prepojené s algoritmami umelej inteligencie, ktoré analyzujú stav svahu v reálnom čase. Ich úlohou je detegovať aj najmenšie deformácie, zrýchlenia pohybu zemných hmôt či zmeny pórového tlaku, ktoré môžu signalizovať zosuv.

Tieto systémy sa neobmedzujú len na pasívne monitorovanie – dokážu aj aktívne reagovať. Keď algoritmy zaznamenajú nebezpečné zmeny, automaticky spúšťajú stabilizačné opatrenia, ako je riadené odvodnenie, napínanie zemných kotiev, aktivácia energeticky absorbujúcich bariér alebo uzavretie ciest nachádzajúcich sa pod svahom.

Umelá inteligencia analyzuje historické geotechnické údaje, lokálne zrážky, vlhkosť, seizmické otrasy a deformácie pôdy, pričom sa učí špecifické vzorce správania daného svahu. Vďaka tomu model nielen upozorňuje na hroziaci zosuv, ale aj určuje najpravdepodobnejší smer pohybu zemných hmôt a potenciálny rozsah.

V niektorých systémoch sa používajú autonómne drenážne moduly – inteligentné odvodňovacie systémy a čerpadlá, ktoré sa aktivujú pri prekročení kritickej vlhkosti v hlbších vrstvách pôdy.

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

Takéto riadené odvodnenie je často účinnejšie než tradičné, ktoré funguje nepretržite bez adaptácie na aktuálne podmienky.

Systémy umelej inteligencie sú škálovateľné – môžu chrániť jednotlivé svahy ohrozujúce komunikácie aj rozsiahle horské oblasti. Analytická platforma zhromažďuje údaje z mnohých meracích bodov a vytvára integrovanú mapu rizík, ktorá sa aktualizuje každých niekoľko minút.

V niektorých krajinách sú tieto systémy prepojené s dronmi a lidarovými skenermi. Drony monitorujú zmeny v štruktúre svahov po intenzívnych dažďoch a vykonávajú presné 3D merania, ktoré sa automaticky analyzujú na prítomnosť porúch a mikrotrhlín.

V Japonsku, ktoré čelí častým zosuvom počas tajfúnov, fungujú systémy umelej inteligencie analyzujúce údaje z viac ako 200 000 senzorov rozmiestnených v horských oblastiach. Na Taiwane boli podobné riešenia implementované pozdĺž horských diaľnic, ktoré sú obzvlášť ohrozené svahovými pohybmi. V Alpách, najmä vo Švajčiarsku a Rakúsku, sa používajú autonómne radarové systémy schopné detegovať pohyby pôdy v rozsahu milimetrov a v prípade potreby aktivovať varovné systémy a riadiť ochranné bariéry proti zosuvom.

Dôležité je, že tieto systémy sa samy učia – s každou sezónou zrážok sa ich predikcie spresňujú. Znižuje sa tak počet falošných poplachov a zásahy sú efektívnejšie.

Autonómne systémy umelej inteligencie menia prístup ku geotechnike: namiesto budovania drahých statických zabezpečení umožňujú dynamické riadenie rizika. Výsledkom je vysoká účinnosť a nižšie dlhodobé náklady, najmä v horských oblastiach a pozdĺž dopravných trás.

2. Biotechnologické spevňovanie pôdy pomocou mikroorganizmov (Microbial Induced Calcite Precipitation – MICP)

Biotechnologické spevňovanie pôdy spočíva vo využití mikroorganizmov, ktoré prirodzene produkujú kalcit pôsobiaci ako „cement“, čím zvyšujú súdržnosť pôdy. Tento proces, známy ako MICP, patrí medzi najperspektívnejšie ekologické metódy stabilizácie zosuvov.

Mikroorganizmy sa do pôdy zavádzajú prostredníctvom injektážnych systémov alebo infiltračnej drenáže. Za vhodných podmienok začnú produkovať minerálne zlúčeniny, ktoré spájajú častice pôdy a zvyšujú jej šmykovú pevnosť. Vďaka tomu sa svah stáva pevnejším a odolnejším voči pohybu zemných hmôt.

Táto technológia je použiteľná pre široké spektrum pôd – od pieskov cez íly až po zvetrané horniny. V mnohých prípadoch predstavuje alternatívu k ťažkej technike a rozsiahlym inžinierskym konštrukciám, čím výrazne znižuje náklady aj dopad na životné prostredie. Používané mikroorganizmy sú neškodné a prirodzene sa vyskytujú v prírode. Ich schopnosť mineralizácie pôdy je riadená vhodne nastavenými environmentálnymi podmienkami. Na rozdiel od betónových spevnení pôsobia zvnútra štruktúry pôdy, pričom zachovávajú jej prirodzený charakter.

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

Systémy MICP možno aplikovať lokálne – napríklad v miestach najväčších deformácií – aj plošne, na celé svahy s rozlohou desiatok hektárov. Technológia umožňuje vytvárať „biologické bariéry“, ktoré prirodzene obmedzujú pohyb zemných hmôt. Dôležitou výhodou je schopnosť samoregenerácie – v prípade opätovného zvlhčenia alebo vzniku trhlin môžu živé mikroorganizmy opätovne produkovať kalcit a spevňovať štruktúru.

V Austrálii a na Novom Zélande sa MICP testuje na stabilizáciu pobrežných útesov erodovaných vlnami. V Japonsku sa využíva na spevňovanie podložia v seizmických oblastiach, kde zvyšuje odolnosť pôdy voči otrasom. V Spojených štátoch prebieha výskum využitia MICP na stabilizáciu skalných svahov pri rýchlostných komunikáciách v horských oblastiach, napríklad v Colorade. V Indii technológia pomáha pri zabezpečovaní zosuvov v Himalájach.

Výskumy v Holandsku ukázali, že MICP môže zvýšiť pevnosť pôdy o 50 až 250 %, čo z nej robí jednu z najperspektívnejších metód prirodzenej stabilizácie. Navyše ide o environmentálne šetrné riešenie. Biotechnologické metódy spevňovania pôdy predstavujú budúcnosť geotechniky, ktorá spája ekológiu, nízke náklady a vysokú účinnosť. Môžu zohrávať kľúčovú úlohu pri ochrane území ohrozených zosuvmi, najmä v chránených oblastiach, kde je použitie ťažkej techniky obmedzené.

3. Inteligentné flexibilné a biomimetické konštrukcie (Bio-Inspired Flexible Slope Protection)

Tradičné zabezpečenia proti zosuvom využívajú pevné konštrukcie, ako sú oporné múry, kotvy či oceľové siete. Moderné prístupy však čoraz viac využívajú flexibilné štruktúry inšpirované prírodou – napríklad systémami pripomínajúcimi korene stromov, pavučiny alebo rastlinné tkanivá (Obrázok 9).

Biomimetické konštrukcie sa prispôbujú pohybu pôdy namiesto toho, aby im odporovali. Vďaka tomu nepraskajú pri deformáciách, ale postupne rozptyľujú energiu a stabilizujú zemné masy. To výrazne zvyšuje ich životnosť v porovnaní s tradičnými rigidnými riešeniami.

Moderné flexibilné systémy sú tvorené kompozitnými vláknami s vysokou pevnosťou, vrátane bazaltových, polymérových a grafénových vlákien. Sú zakotvené v podloží spôsobom pripomínajúcim koreňový systém stromov, čím vytvárajú trojrozmernú sieť obmedzujúcu pohyb pôdy. Tieto systémy sa často kombinujú s vegetáciou – vlákna slúžia ako matrica, cez ktorú prerastajú korene rastlín, čím prirodzene spevňujú svah. Výsledkom sú biohybridné konštrukcie odolnejšie než klasické geotextílie.

Flexibilné systémy sú ideálne najmä v oblastiach s vysokou dynamikou pôdy – napríklad tam, kde dochádza k veľkým teplotným výkyvom, častým zrážkam alebo seizmickej aktivite. V takýchto podmienkach tradičné oporné múry často zlyhávajú.

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

Inteligentné flexibilné a biomimetické konštrukcie sa využívajú napríklad vo Švajčiarsku a Rakúsku na zabezpečenie svahov pozdĺž železníc a horských ciest. V Spojených štátoch sa testujú na zosuvoch spôsobených klimatickými zmenami na pobreží Tichého oceánu. V Nórsku vznikajú systémy inšpirované štruktúrou panciera kraba kráľovského a tkanivami morských rastlín. Použitie bazaltových vlákien zvyšuje odolnosť voči vlhkosti a mrazu.



Obrázok 9. Flexibilná a biomimetická konštrukcia na zosuvnom svahu.

Tieto systémy možno inštalovať bez použitia ťažkej techniky – často postačujú ľahké stroje a manuálna montáž. Vďaka tomu sú ideálne pre ťažko dostupné alebo prírodne chránené oblasti. Okrem stabilizácie pôdy biomimetické konštrukcie zlepšujú aj mikroretenciu vody. Tým obmedzujú rýchle presakovanie zrážok a znižujú riziko vzniku pórového tlaku, ktorý často vedie k zosuvom. Biomimetické prístupy predstavujú príklad synergie technológie a prírody. Ich flexibilita, možnosť integrácie s vegetáciou a vysoká odolnosť voči meniacim sa podmienkam z nich robia perspektívny nástroj v boji proti zosuvovým rizikám.

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

4. Megaštruktúry proti zosuvom: pohyblivé bariéry, ochranné tunely a robotické systémy údržby svahov (Robotic & Megastructure Landslide Control)

V najrizikovejších lokalitách sa využívajú ochranné megakonštrukcie, ktorých cieľom je zachytiť alebo presmerovať obrovské masy zeminy. Najnovším trendom sú pohyblivé bariéry proti zosuvom, ktoré dokážu meniť svoju polohu v závislosti od úrovne ohrozenia. Bariéry sú vyrobené z oceľových a kompozitných panelov, ktoré sa automaticky vysúvajú pri zaznamenaní pohybu pôdy. V bežných podmienkach sú skryté, takže nenarúšajú krajinu ani estetiku prostredia.

V talianskych a rakúskych Alpách sa používajú pohyblivé bariéry proti splaveninám, ktoré chránia mestá pred bahennými prúdmi. Ich riadenie je založené na radaroch a seizmometroch.

Ďalšou inováciou sú ochranné tunely – špeciálne kryty nad cestami a železničnými traťami, ktoré dokážu zachytiť veľké množstvo skalného materiálu alebo bahna. Moderné konštrukcie sú ľahké a vyrobené z vysokopevnostných kompozitov. V Japonsku sa takéto tunely budujú pozdĺž tratí Shinkansen a v Nórsku sa využívajú na cestách vedúcich popri fjordoch, kde je riziko zosuvov vysoké.

Megaštruktúry proti zosuvom často spolupracujú s robotickými systémami údržby. Autonómne roboty dokážu odstraňovať uvoľnené skalné bloky, čistiť odvodňovacie kanály a inštalovať kotvy na miestach ťažko dostupných pre človeka. Lezecké roboty sa už využívajú v Južnej Kórei a Švajčiarsku – dokážu sa pohybovať po vertikálnych skalných stenách, vykonávať vrty a spevňovať skaly ochrannými sieťami.

V Číne sa testujú diaľkovo riadené pásové vozidlá, ktoré dokážu zasypávať trhliny alebo vykonávať spevňovacie práce bez prítomnosti ľudí – čo je mimoriadne cenné počas bezprostredného ohrozenia zosuvom. Megaštruktúry a robotika výrazne znižujú riziko nehôd, keďže mnohé práce prebiehajú automaticky bez nutnosti vystavovať ľudí nebezpečenstvu.

Hoci sú tieto technológie finančne náročné, v oblastiach s vysokým rizikom sa stávajú štandardom. Kombinácia pokročilej mechaniky, materiálového inžinierstva a robotiky predstavuje jeden z najúčinnejších spôsobov, ako zmierniť následky zosuvov pôdy.