Raport z testu badawczego dotyczącego zagrożenia powodziowego poprzez modelowanie dla powiatu Krosno

Nadzór merytoryczny:
Dr hab. Michał Habel

1. *Plan badawczy zawierający przebieg badań z podziałem na prace terenowe i laboratoryjne, wraz ze wskazaniem kolejny kroków przebiegu prac badawczych*

Prace terenowe

- identyfikacja obszarów dolinnych w terenie,
- identyfikacja stref obniżeń o genezie antropogenicznej w terenie,
- identyfikacja stref i punktów w przeszłości zalewanych podczas powodzi,
- określenie granic, w których zostanie przeprowadzona analiza powodziowa.

Prace laboratoryjne

- identyfikacja terenów zagrożonych podtopieniami na podstawie MZP ISOK, analiz geoprzestrzennych „Flow Direction" i „Flow Accumulation", z uwzględnieniem infiltracji i współczynników odpływu Curve Number (CN),
- wyznaczenie obszarów zagrożonych ze strony spływu powierzchniowego na podstawie numerycznego modelu terenu (NMT) o rozdzielczości ≤ 1 m (PL-EVRF2007-NH z 2004 i 2025 roku), użytkowania terenu BDOT10k oraz występowania gleb na bazie map IUNG, a także opadów maksymalnych Pmax według IMGW-PIB
- oszacowanie wartości opadu maksymalnego jako wartości referencyjnych na terenie powiatu,
- modelowanie odpływu efektywnego metodą SCS-CN,

- analiza kumulacji wód na powierzchni terenu i wyznacznie kierunków spływu powierzchniowego za pomocą narzędzi GIS (QuantumGIS v. 3.4.13) oraz algorytmów River Network, Watershed Basins i Flow Accumulation..
- wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego z podziałem na klasy.

2. *Opis przebiegu prac badawczych z uwzględnianiem założeń teoretycznych, opisu metody, ewentualnego poboru prób w terenie i kolejnych kroków prac laboratoryjnych.*

Założenia teoretyczne

Przez zagrożenie powodziowe rozumiano prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk prowadzących do okresowego zalania terenów zlokalizowanych na obszarze analizowanego powiatu. Uwzględniono zarówno zagrożenie wynikające z wezbrań rzek i potoków objętych mapami zagrożenia powodziowego (MZP) opracowanymi w ramach systemu ISOK (Hydroportal ISOK: https://wody.isok.gov.pl), jak i zalania wywołane intensywnymi opadami atmosferycznymi powodującymi koncentrację spływu powierzchniowego w małych zlewniach, dolinach nieobjętych mapowaniem hydraulicznym oraz lokalnych obniżeniach terenu.

Stopień zagrożenia powodziowego określono na podstawie udziału powierzchni potencjalnie narażonej na zalanie w wyniku:

- wystąpienia wezbrań o prawdopodobieństwie 10%, 1% oraz 0,2%, zgodnie z mapami zagrożenia powodziowego ISOK,
- koncentracji odpływu powierzchniowego wywołanego opadem projektowym Pmax,
- obecności lokalnych obniżeń bezodpływowych oraz stref akumulacji spływu.

Wyniki analiz przedstawiono w postaci powierzchni terenów zagrożonych [ha] oraz ich udziału procentowego w powierzchni danego powiatu [%].

Zgodnie z art. 16 pkt 43 ustawy Prawo wodne, powódź definiowana jest jako czasowe pokrycie wodą terenów, które w normalnych warunkach pozostają suche, spowodowane w szczególności wezbraniem wód w ciekach naturalnych, zbiornikach wodnych, kanałach lub napływem wód od strony morza. Definicja ta nie obejmuje jednak wprost zagrożeń związanych z intensywnym spływem powierzchniowym powstającym podczas opadów nawalnych. Z tego względu zakres analiz rozszerzono o identyfikację terenów narażonych na zalanie wskutek koncentracji odpływu powierzchniowego, co ma szczególne znaczenie na obszarach górskich i podgórskich południowej Polski.

W przypadku analizowanego powiatu wykorzystanie wyłącznie map zagrożenia powodziowego ISOK nie pozwala na pełną ocenę ryzyka powodziowego. Wynika to z faktu, że na terenach górskich i podgórskich dominują różne mechanizmy powstawania zagrożenia, obejmujące:

1. powodzie rzeczne rozwijające się w głównych dolinach, częściowo uwzględnione w systemie ISOK,
2. powodzie opadowe (flash floods) rozwijające się w małych zlewniach wskutek intensywnego spływu powierzchniowego,
3. koncentrację odpływu w dolinach nieobjętych mapami zagrożenia powodziowego,
4. podtapianie lokalnych obniżeń terenu oraz obszarów bezodpływowych.

Dla powiatu Krosno wyznaczono obszary zagrożone zalaniem wskutek spływu powierzchniowego na podstawie map zagrożenia powodziowego ISOK oraz analiz geoprzestrzennych wykonanych z wykorzystaniem narzędzi **Flow Direction** i **Flow Accumulation**. W modelowaniu uwzględniono proces infiltracji oraz współczynniki odpływu Curve Number (CN). Analizy przeprowadzono na bazie numerycznego modelu terenu (NMT) o rozdzielczości ≤ 1 m (układ PL-EVRF2007-NH; dane z lat 2004 i 2025), danych o użytkowaniu terenu BDOT10k, map gleb opracowanych przez IUNG oraz wartości opadów maksymalnych Pmax udostępnianych przez IMGW-PIB.

Projektowe wysokości opadów maksymalnych określono z wykorzystaniem modelu probabilistycznego PMAXTP (Precipitation MAXimum Time Probability), udostępnionego przez IMGW-PIB w serwisie „Opady maksymalne" oraz szczegółowo opisanego w monografii pod redakcją B. Ozgi-Zielińskiego i współautorów (2022). Model PMAXTP stanowi obecnie podstawowe narzędzie służące do wyznaczania przestrzennego rozkładu opadów ekstremalnych na obszarze Polski i umożliwia estymację wysokości opadów dla określonego czasu trwania oraz zadanego prawdopodobieństwa ich przekroczenia.

Model opisuje zależność:

Pmax(t,p)

gdzie:

- **Pmax** – maksymalna wysokość opadu [mm],
- **t** – czas trwania opadu,
- **p** – prawdopodobieństwo przewyższenia wartości opadu.

Wartość funkcji **Pmax(t,p)** odpowiada kwantylowi teoretycznego rozkładu prawdopodobieństwa dopasowanego do wieloletnich obserwacji opadowych. Oznacza to możliwość określenia wysokości opadu odpowiadającej przyjętemu poziomowi prawdopodobieństwa dla dowolnego analizowanego czasu trwania. Przykładowo, opad o prawdopodobieństwie przewyższenia równym 10% może wystąpić lub zostać przekroczony średnio raz na 10 lat, natomiast opad o

prawdopodobieństwie 1% odpowiada zdarzeniu o średnim okresie powtarzalności wynoszącym 100 lat.

W niniejszym opracowaniu wykorzystano wyniki uzyskane metodą **Peak Over Threshold (POT)**, polegającą na analizie wszystkich zdarzeń opadowych przekraczających określoną wartość progową. W odróżnieniu od klasycznej metody maksimów rocznych (Annual Maximum Precipitation – AMP), uwzględniającej jedynie największy opad w każdym roku hydrologicznym, metoda POT wykorzystuje większą liczbę zdarzeń ekstremalnych. Pozwala to na bardziej wiarygodne oszacowanie wartości opadów o małym prawdopodobieństwie wystąpienia. Ma to szczególne znaczenie w analizach zagrożenia powodziowego, gdyż umożliwia lepsze odwzorowanie intensywnych opadów odpowiedzialnych za rozwój powodzi błyskawicznych oraz gwałtownego spływu powierzchniowego.

W analizie zagrożenia podtopieniami wykorzystano projektowe wysokości opadów maksymalnych dla różnych czasów trwania, odpowiadających odmiennym mechanizmom rozwoju zjawisk powodziowych:

- opady 1-godzinne, reprezentujące opady nawalne odpowiedzialne za lokalne podtopienia,
- opady 6-godzinne, charakterystyczne dla gwałtownego odpływu w zlewniach górskich i podgórskich,
- opady 24-godzinne, związane z rozwojem wezbrań w większych zlewniach rzecznych.

Dla każdego analizowanego powiatu wyznaczono wartości opadów maksymalnych odpowiadające prawdopodobieństwom przewyższenia wynoszącym 1% (T = 100 lat) oraz 50% (T = 2 lata).

Wyznaczone przy użyciu modelu PMAXTP wartości Pmax wykorzystano jako dane wejściowe do modelowania spływu powierzchniowego oraz identyfikacji obszarów potencjalnej koncentracji odpływu. Dzięki temu możliwe było rozszerzenie oceny zagrożenia powodziowego poza obszary objęte mapami ISOK, obejmując analizą również niewielkie zlewnie górskie, okresowe cieki oraz lokalne obniżenia terenu, gdzie dominującym mechanizmem powstawania zagrożenia są intensywne opady oraz szybki odpływ powierzchniowy.

Analizy zagrożenia powodziowego przeprowadzono dla projektowego opadu **Pmax** o prawdopodobieństwie przewyższenia wynoszącym **1% (T = 100 lat)**. W przypadku powiatów karpackich dodatkowo uwzględniono opady jednogodzinne, natomiast dla wszystkich analizowanych jednostek wykonano obliczenia dla opadów o czasie trwania 6 i 24 godzin. Na podstawie analizy przestrzennego zróżnicowania wartości Pmax przyjęto maksymalną wartość występującą w granicach danego powiatu (tab. 1). Zastosowanie takiego podejścia ma charakter

konserwatywny i pozwala na ocenę zagrożenia w warunkach odpowiadających najbardziej niekorzystnym scenariuszom opadowym, jakie mogą wystąpić na analizowanym obszarze.

Tabela 1. Proponowane wartości opadu maksymalnego jako wartości referencyjne dla na terenie powiatu Krosno

Lp.	**Powiat**	Powierzchnia powiatu [ha]	**Powierzchnia przy określonym opadzie maksymalnym w ha/%**					
			1h	**%**	**6h**	**%**	**24h**	**%**
1	miasto Krosno	4400			56,00	1,27	60,00	1,36

Dobór czasu trwania opadu do obliczeń w analizowanych powiatach powinien zależeć od wielkości zlewni, ponieważ w tym przypadku występują trzy mechanizmy powodziowe.

- Typ I – powodzie błyskawiczne, gdy małe zlewnie mają powierzchnię 1–20 km², wtedy czas koncentracji spływu wynosi 1–3 h. Najbardziej reprezentatywny czas obliczeń wynosi 1 h.
- Typ II – małe zlewnie górskie, gdy ich powierzchnia to 20–100 km² to czas koncentracji wynosi 3–6 h. Najbardziej reprezentatywny opad 6 h.
- Typ III – większe zlewnie. Najbardziej reprezentatywny opad 24 h

Odpływ efektywny wyznaczono metodą SCS-CN, która uwzględnia zdolność retencyjną gleb oraz pokrycie terenu, metoda opisana przez K. Banasik i in. (2016). Metoda ta zakłada, że tylko część opadu atmosferycznego przekształca się w odpływ powierzchniowy, natomiast pozostała część infiltruje do gruntu lub zostaje zatrzymana w retencji powierzchniowej. Spływ na każdej komórce numerycznego modelu terenu jest wyznaczany jako różnica pomiędzy opadem a infiltracją, przy wykorzystaniu parametrów infiltracyjnych oraz koncepcji CN. Dla potrzeb regionalnej analizy zagrożenia powodziowego i modelu SCS-CN można przyjąć standardowe wartości CN zgodne z wytycznymi USDA-NRCS (1986).

Retencję obliczano w sposób następujący:

$$S = \frac{254}{\mathrm{CN}} - 254$$

Obliczenie odpływu efektywnego:

$$Q = \frac{(P - 0{,}2S)^2}{P + 0{,}8S}$$

gdzie:

- P – opad projektowy,
- Q – odpływ efektywny.

Kluczowym elementem w końcowej fazie modelowania była kumulacji wód na powierzchni terenu. Kierunki spływu powierzchniowego wyznaczono za pomocą narzędzi GIS (QuantumGIS v. 3.4.13) oraz algorytmów River Network, Watershed Basins i Flow Accumulation. Model został oparty na wysokorozdzielczym numerycznym modelu terenu pochodzącym ze skaningu laserowego (NMT) – siatce o rozdzielczości ≤ 1,0 m , danych o użytkowaniu terenu (BDOT10k), mapach glebowo-rolniczych, sieci cieków wodnych MPHP oraz przepustów drogowych (BDOT10k). Powstałe na bazie modelowania naturalne linie drenażu oraz obszary kumulacji spływu powierzchniowego. Uzyskane wyniki umożliwiły identyfikację okresowych cieków, dolin koncentracji odpływu oraz lokalnych obniżeń terenowych.

3. *Wyniki badań w postaci obliczeniowej wraz z niezbędną dokumentacją w postaci tabel, wykresów i rysunków*

Łączna powierzchnia terenów potencjalnie zagrożonych podtopieniami spowodowanymi koncentracją odpływu powierzchniowego na obszarze miasta Krosna wynosi od 56 do 60 ha, w zależności od przyjętego czasu trwania opadu projektowego. **Wartość ta nie obejmuje terenów zagrożonych powodzią rzeczną wyznaczonych na podstawie map zagrożenia powodziowego ISOK, lecz stanowi ich uzupełnienie poprzez identyfikację obszarów narażonych na lokalne podtopienia poza dolinami głównych cieków.** W przypadku Krosna analizę przeprowadzono dla opadów o czasie trwania 6 i 24 godzin.

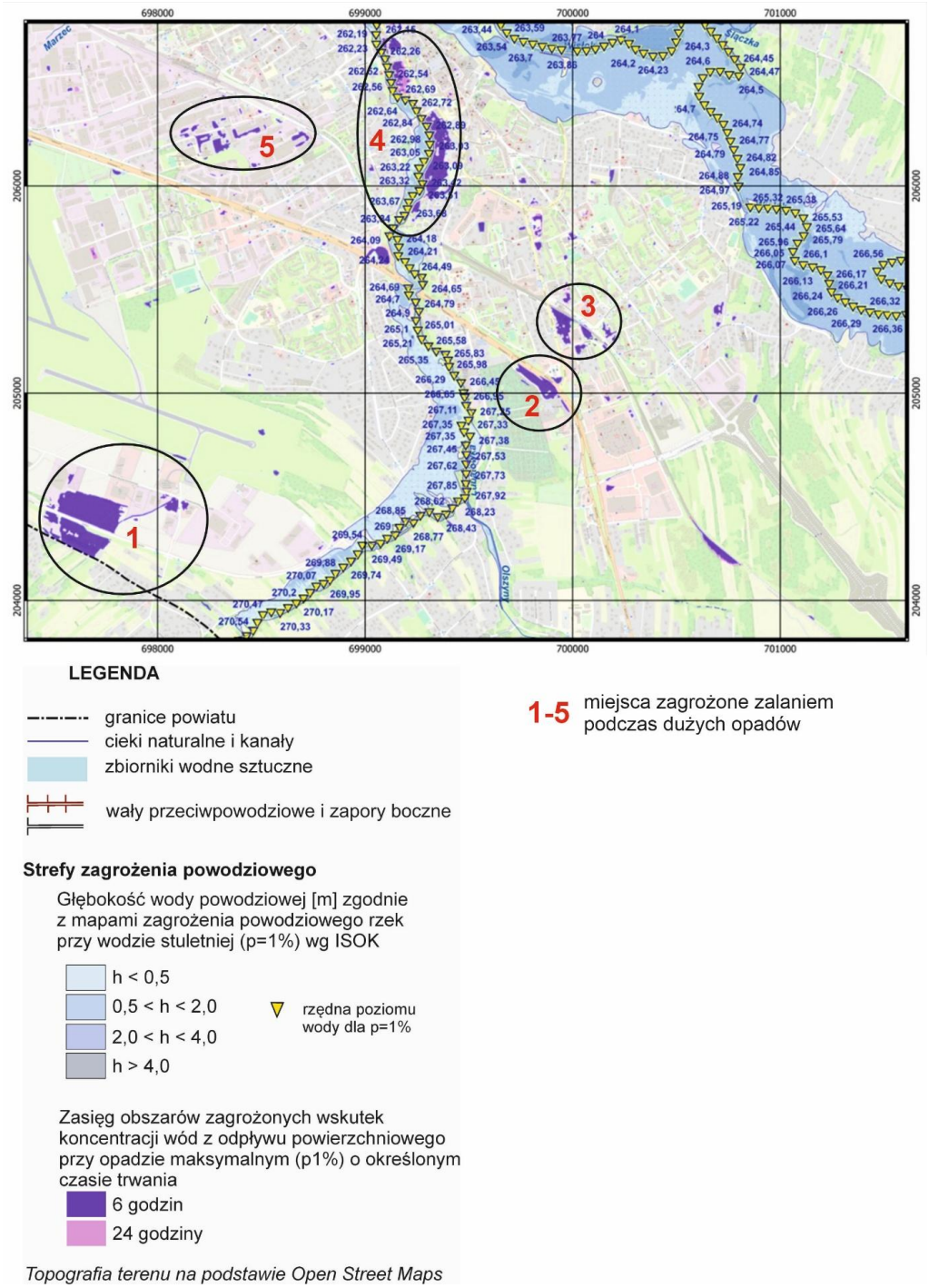
Powiat miejski Krosno położony jest w zlewni górnego biegu Wisłoka, który stanowi główny ciek odwadniający obszar miasta. Reżim hydrologiczny Wisłoka ma charakter deszczowo-śnieżny z wyraźnym udziałem wezbrań opadowych, typowych dla rzek karpackich. Najwyższe przepływy występują zazwyczaj podczas wiosennych roztopów oraz w okresie letnich opadów nawalnych, natomiast najniższe obserwowane są pod koniec lata oraz zimą podczas długotrwałych okresów bezopadowych. Ze względu na położenie u podnóża Beskidu Niskiego zlewnia Wisłoka charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem koncentracji odpływu, co sprzyja szybkiemu rozwojowi fal wezbraniowych. Istotną rolę w kształtowaniu warunków hydrologicznych odgrywają liczne dopływy Wisłoka, w tym Lubatówka oraz niewielkie potoki odwadniające stoki otaczające miasto. Cieki te reagują bardzo szybko na intensywne opady atmosferyczne, powodując lokalne wezbrania i podtopienia. Znaczny udział powierzchni uszczelnionych w granicach miasta ogranicza infiltrację wód opadowych i zwiększa wielkość oraz tempo spływu powierzchniowego. W rezultacie podczas opadów nawalnych dochodzi do gwałtownego wzrostu przepływów zarówno w Wisłoku, jak i w jego dopływach. W dolinie Wisłoka zachowały się fragmenty naturalnych terenów zalewowych, jednak ich powierzchnia została miejscami ograniczona przez rozwój zabudowy oraz infrastruktury komunikacyjnej. Warunki hydrologiczne miasta pozostają również pod wpływem urządzeń hydrotechnicznych oraz systemów przeciwpowodziowych, które zmniejszają ryzyko zalania podczas wezbrań o umiarkowanej intensywności. Mimo to występowanie krótkotrwałych, bardzo intensywnych opadów może prowadzić do lokalnych podtopień, zwłaszcza w obniżeniach terenu oraz wzdłuż niewielkich cieków. Istotnym elementem funkcjonowania zlewni są również procesy retencji naturalnej związane z terenami leśnymi i rolniczymi położonymi w górnych częściach zlewni Wisłoka, które częściowo ograniczają wielkość odpływu. W ostatnich latach

obserwuje się wzrost znaczenia opadów o dużej intensywności, co zwiększa częstotliwość występowania gwałtownych wezbrań i powodzi błyskawicznych. Z hydrologicznego punktu widzenia największe zagrożenie dla Krosna stanowią jednoczesne wezbrania Wisłoka oraz jego mniejszych dopływów, którym towarzyszy intensywny spływ powierzchniowy z terenów zurbanizowanych. W konsekwencji warunki hydrologiczne powiatu miejskiego Krosno cechują się znaczną zmiennością sezonową oraz wysoką podatnością na występowanie zarówno klasycznych powodzi rzecznych, jak i lokalnych podtopień wywołanych opadami nawalnymi.

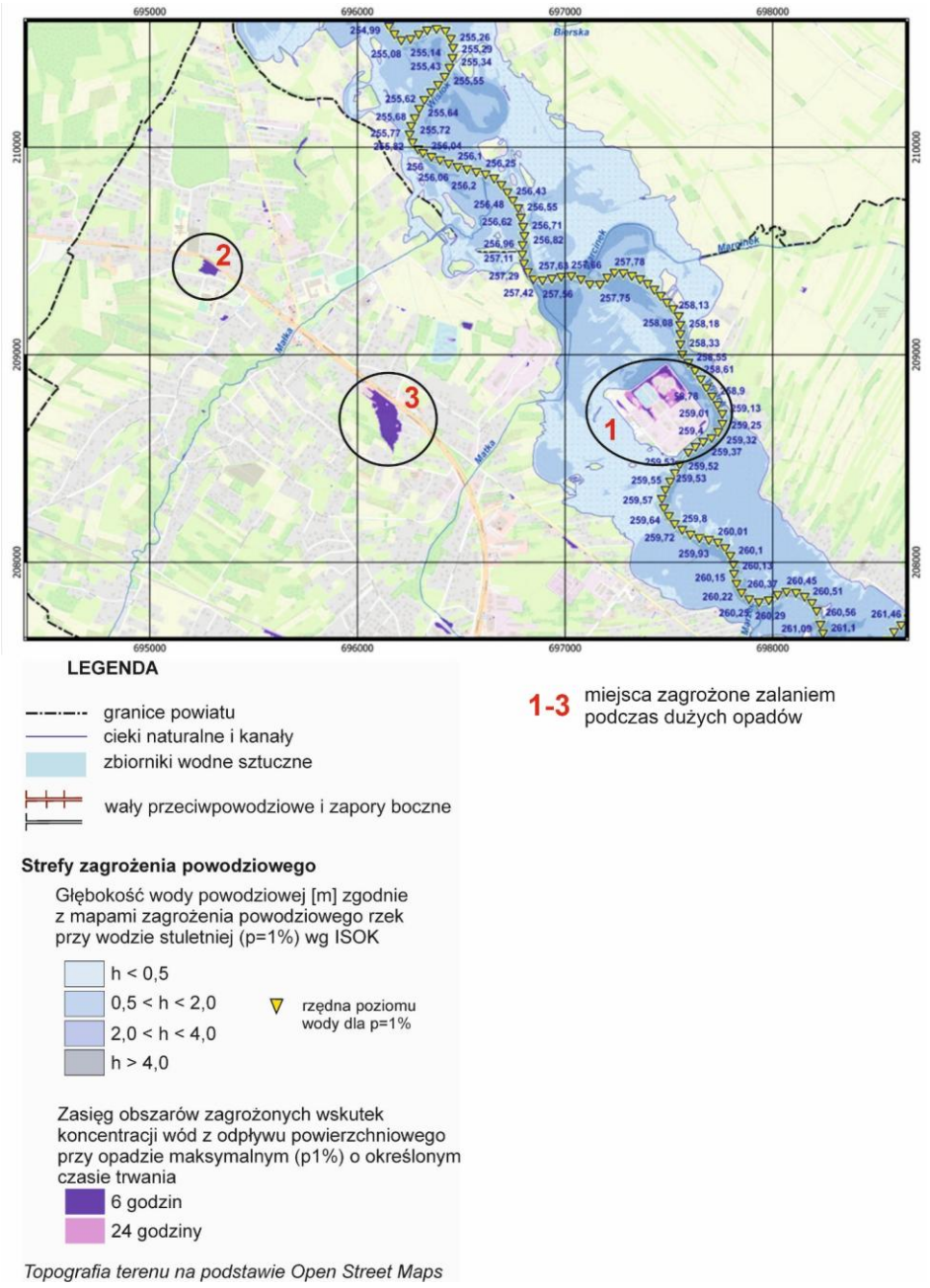
Szczegółową analizę zagrożenia podtopieniami wykonano dla dwóch obszarów zlokalizowanych na terenie miasta Krosna. Pierwszy z nich obejmuje centralną część miasta, w rejonie ujścia rzeki Lubatówki do Wisłoka (rys. 1). Na analizowanej mapie widoczne są obszary zagrożenia powodziowego wyznaczone na podstawie systemu ISOK, oznaczone kolorem jasnoniebieskim. Oprócz nich zidentyfikowano liczne strefy potencjalnych podtopień wywołanych intensywnymi opadami, zlokalizowane głównie na terenach zabudowanych. W wielu przypadkach znajdują się one w znacznej odległości od koryta Wisłoka, nawet kilku kilometrów, i nie zostały uwzględnione na mapach zagrożenia powodziowego ISOK.

Pierwszy z obszarów potencjalnie narażonych na zalanie podczas intensywnych opadów zlokalizowany jest w obrębie lotniska, w jego południowej części (obszar 1 – rys. 1). Jest to największa spośród zidentyfikowanych stref podtopień na analizowanym obszarze. Drugi obszar położony jest przy ulicy Podkarpackiej, na wschód od rzeki Lubatówki (obszar 2 – rys. 1). Strefa ta przebiega wzdłuż drogi, która podczas intensywnych opadów może zostać okresowo zalana, powodując utrudnienia komunikacyjne. Na północ od obszaru 2 zlokalizowano kolejną strefę zagrożenia (obszar 3 – rys. 1), przebiegającą wzdłuż linii kolejowej. Obejmuje ona nie tylko infrastrukturę kolejową, lecz również tereny położone na południe od torów, gdzie znajdują się budynki mieszkalne. Kolejny obszar położony jest na wschód od koryta Lubatówki (Rysunek 1 – obszar 4). Ze względu na możliwość zalania mieszkaniowej, jest to jeden z najbardziej narażonych obszarów analizowanego fragmentu miasta. Dodatkowo strefa ta położona jest w sąsiedztwie Starego Miasta oraz wzdłuż doliny Lubatówki, co zwiększa jej znaczenie z punktu widzenia potencjalnych strat. Ostatni z większych obszarów zagrożonych podtopieniami znajduje się na zachód od rzeki Lubatówki, na południe od linii kolejowej (obszar 5 – rys. 1). Występuje tam zwarta zabudowa mieszkaniowa, dlatego ewentualne zalanie może prowadzić do znaczących szkód materialnych oraz utrudnień w funkcjonowaniu lokalnej infrastruktury.

Drugi analizowany obszar położony jest w północno-zachodniej części Krosna (rys. 2). Obejmuje on fragment doliny Wisłoka, do którego od wschodu uchodzi potok Marcinek, natomiast od zachodu potoki Małka i Matka. W porównaniu z pierwszym analizowanym obszarem liczba stref potencjalnych podtopień jest tutaj wyraźnie mniejsza. Pierwszy z wyznaczonych obszarów zagrożenia (obszar 1 – rys. 2) zlokalizowany jest w rejonie oczyszczalni ścieków, położonej bezpośrednio przy korycie Wisłoka. Strefa ta w dużej mierze pokrywa się z obszarem zagrożenia powodziowego wyznaczonym na mapach ISOK, co potwierdza wysokie ryzyko zalania tego fragmentu doliny rzecznej. Drugi obszar zagrożony podtopieniami położony jest na południe od ulicy Bema, w sąsiedztwie Młodzieżowego Ośrodka Wychowawczego (obszar 2 – rys. 2). W przypadku wystąpienia intensywnych opadów istnieje możliwość zalania kilku budynków znajdujących się w tej strefie. Trzeci z wyznaczonych obszarów zlokalizowany jest pomiędzy Aleją Jana Pawła II oraz ulicami Długą i Jana Kochanowskiego (obszar 3 – rys. 2). Jest to rozległa strefa potencjalnych podtopień obejmująca zwarty obszar zabudowy, w której podczas intensywnych opadów zagrożonych zalaniem może być wiele budynków. Z uwagi na gęstość zabudowy oraz charakter zagospodarowania terenu obszar ten należy uznać za jeden z najbardziej wrażliwych na skutki lokalnych podtopień w północno-zachodniej części Krosna.



Rysunek 1. Obszary zagrożone zalaniem na terenie powiatu Krosno (obszar centrum).



Rysunek 2. Obszary zagrożone zalaniem na terenie powiatu Krosno (obszar na północny-zachód od centrum).

4. *Wnioski z przeprowadzonych badań w formie opracowania zawierającego szczegółowe analizy wraz z szacunkiem dotyczącym zagrożenia występującego w testowanym terenie (osuwiskowego, powodziowego, związanego z zanieczyszczeniem powietrza zależnie od typu testu badawczego)*

Przeprowadzona analiza wykazała, że na terenie powiatu Krosno występują liczne obszary potencjalnie zagrożone podtopieniami wywołanymi koncentracją odpływu powierzchniowego. Łączna powierzchnia terenów zagrożonych wynosi od 56 do 60 ha, w zależności od czasu trwania analizowanego opadu projektowego. Zidentyfikowane strefy stanowią uzupełnienie map zagrożenia powodziowego ISOK, ponieważ obejmują obszary nieuwzględnione w standardowych analizach zagrożenia powodzią rzeczną. Wyniki wskazują, że znaczna część zagrożonych terenów zlokalizowana jest poza doliną Wisłoka oraz jego głównych dopływów. Oznacza to, że lokalne podtopienia są w dużym stopniu determinowane przez koncentrację spływu powierzchniowego oraz ukształtowanie terenu, a nie wyłącznie przez wezbrania rzeczne. Największe zagrożenie dotyczy terenów o zwartej zabudowie mieszkaniowej oraz obszarów o wysokim stopniu urbanizacji. Szczególnie narażone są również elementy infrastruktury transportowej, w tym drogi oraz linie kolejowe, których zalanie może powodować poważne utrudnienia komunikacyjne. Wśród analizowanych lokalizacji istotne znaczenie mają także tereny usługowe i przemysłowe, w tym rejon lotniska oraz oczyszczalni ścieków. Analiza wykazała, że część stref potencjalnych podtopień pokrywa się z obszarami zagrożenia powodziowego wyznaczonymi na mapach ISOK, jednak wiele z nich znajduje się poza ich zasięgiem. Potwierdza to konieczność uwzględniania w ocenach ryzyka powodziowego również zagrożeń wynikających z intensywnych opadów atmosferycznych i gwałtownego spływu powierzchniowego. W warunkach miejskich, gdzie znaczna część powierzchni jest uszczelniona, procesy te mogą prowadzić do szybkiego powstawania lokalnych podtopień. Uzyskane wyniki wskazują również na potrzebę uwzględnienia niewielkich cieków oraz lokalnych obniżeń terenu podczas planowania działań z zakresu ochrony przeciwpowodziowej. Identyfikacja nowych stref zagrożenia może stanowić podstawę do aktualizacji lokalnych planów zarządzania ryzykiem powodziowym oraz dokumentów planistycznych. Szczególnego znaczenia nabiera rozwój systemów retencji wód opadowych oraz działania ograniczające wielkość spływu powierzchniowego na terenach zurbanizowanych. Przeprowadzone analizy potwierdzają, że

kompleksowa ocena zagrożenia powodziowego w Krośnie powinna łączyć informacje wynikające z map ISOK z analizami spływu powierzchniowego opartymi na wysokorozdzielczych danych wysokościowych i projektowych opadach maksymalnych.

Katowice, 31.08.2026
PREZES ZARZĄDU
Oddział Górnośląski, Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi
Dr hab. Jerzy Cabała
dr hab. Jerzy Cabała