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

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 rozumie się prawdopodobieństwo okresowego zalania terenów w granicach analizowanego powiatu, wynikające zarówno z wezbrań rzek i potoków objętych Mapami Zagrożenia Powodziowego (MZP) systemu ISOK (https://wody.isok.gov.pl), jak i z intensywnych opadów powodujących koncentrację spływu powierzchniowego w małych zlewniach, dolinach nieobjętych modelowaniem hydraulicznym oraz lokalnych obniżeniach terenu. Poziom zagrożenia określono jako udział powierzchni potencjalnie narażonej na zalanie wskutek:

- wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10%, 1% i 0,2% zgodnie z MZP ISOK,
- koncentracji spływu powierzchniowego wywołanej opadem projektowym Pmax,
- występowania lokalnych zagłębień bezodpływowych i stref koncentracji odpływu.

Wyniki przedstawiono jako powierzchnię terenów zagrożonych [ha] oraz ich udział procentowy w powierzchni powiatu [%]. Zgodnie z art. 16 pkt 43 ustawy Prawo wodne powódź oznacza czasowe pokrycie wodą terenów, które w normalnych warunkach pozostają suche, spowodowane głównie wezbraniem cieków, zbiorników wodnych, kanałów lub oddziaływaniem morza. Definicja ta nie obejmuje jednak wprost zagrożeń wynikających z intensywnego spływu powierzchniowego po opadach nawalnych. Z tego względu analizę rozszerzono o identyfikację terenów zagrożonych zalaniem wskutek koncentracji odpływu powierzchniowego, która na obszarach górskich i podgórskich południowej Polski stanowi jeden z głównych mechanizmów powstawania lokalnych podtopień. Samo wykorzystanie Map Zagrożenia Powodziowego ISOK jest niewystarczające, ponieważ nie obejmuje zagrożeń związanych z powodziami opadowymi (flash floods), koncentracją odpływu w małych zlewniach oraz podtapianiem lokalnych obniżeń terenu, które często dominują na obszarach górskich i podgórskich.
Obszary zagrożone zalaniem wyznaczono na podstawie analiz Flow Direction i Flow Accumulation, z uwzględnieniem infiltracji oraz współczynników odpływu Curve Number (CN).

Analizy wykonano z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu (NMT) o rozdzielczości ≤1 m (PL-EVRF2007-NH), danych BDOT10k, map gleb IUNG oraz opadów maksymalnych Pmax opracowanych przez IMGW-PIB. Projektowe wartości opadów określono na podstawie modelu probabilistycznego PMAXTP (Precipitation MAXimum Time Probability), udostępnianego przez IMGW-PIB (Ozga-Zieliński i in., 2022). Model umożliwia wyznaczenie wysokości opadu maksymalnego dla określonego czasu trwania i prawdopodobieństwa przewyższenia:

$$Pmax = f(t,p),$$

gdzie t oznacza czas trwania opadu, a p – prawdopodobieństwo jego przewyższenia. Wartość Pmax stanowi kwantyl rozkładu prawdopodobieństwa dopasowanego do wieloletnich obserwacji opadowych. Przykładowo, opad o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% odpowiada zdarzeniu o średnim okresie powtarzalności wynoszącym 100 lat. W analizie wykorzystano wyniki uzyskane metodą Peak Over Threshold (POT), która uwzględnia wszystkie zdarzenia przekraczające określony próg opadowy. W porównaniu z metodą maksimów rocznych (AMS) pozwala ona na bardziej wiarygodne oszacowanie opadów ekstremalnych odpowiedzialnych za powodzie błyskawiczne i intensywny spływ powierzchniowy. Analizę przeprowadzono dla opadów o czasie trwania 1, 6 i 24 godzin, odpowiadających odpowiednio lokalnym opadom nawalnym, gwałtownemu odpływowi ze zlewni górskich oraz rozwojowi powodzi rzecznych. Dla każdego powiatu wyznaczono wartości opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% (T = 100 lat) oraz 50% (T = 2 lata). Wyznaczone wartości Pmax wykorzystano jako dane wejściowe do modelowania spływu powierzchniowego oraz identyfikacji obszarów koncentracji odpływu, rozszerzając ocenę zagrożenia poza zasięg Map Zagrożenia Powodziowego ISOK.
Ostateczne analizy wykonano dla projektowego opadu Pmax o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% (T = 100 lat). Dla powiatów karpackich dodatkowo uwzględniono opad jednogodzinny, natomiast dla wszystkich analizowanych powiatów przeprowadzono obliczenia dla opadów 6- i 24-godzinnych. Ze względu na przestrzenne zróżnicowanie wartości Pmax jako wartość reprezentatywną przyjęto maksymalną wartość występującą w granicach danego powiatu (Tabela 1), co stanowi konserwatywne podejście umożliwiające identyfikację potencjalnie najbardziej niekorzystnych warunków opadowych.

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

Lp.	Powiat	Powierzchnia powiatu [ha]	Powierzchnia przy określonym opadzie maksymalnym w ha/%					
			1h	%	6h	%	24h	%
1	jarosławski	102900			1586,00	1,54	1805,00	1,75

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 wynosi od 1586 do 1805 ha (w zależności od przyjętego czasu trwania opadu projektowego). **Wartość ta nie obejmuje jedynie terenów zagrożonych powodzią rzeczną, wyznaczonych na podstawie map ISOK, lecz stanowi ich uzupełnienie poprzez wskazanie obszarów narażonych na lokalne podtopienia poza dolinami głównych cieków**. W powiecie jarosławskim analizowano podtopienia występujące w trakcie intensywnych opadów trwających 6 i 24 godziny.

Pod względem hydrologicznym powiat jarosławski położony jest w dorzeczu górnej Wisły, a niemal cały jego obszar odwadniany jest przez rzekę San wraz z licznymi dopływami. San stanowi główną oś hydrograficzną powiatu i charakteryzuje się śnieżno-deszczowym reżimem zasilania, typowym dla rzek południowo-wschodniej Polski. Najwyższe stany wód występują najczęściej w okresie wiosennych roztopów oraz podczas letnich opadów nawalnych. W miesiącach letnich wezbrania mogą rozwijać się bardzo dynamicznie, zwłaszcza po intensywnych opadach obejmujących zlewnię górnego Sanu i jego dopływów. Istotnym dopływem Sanu na terenie powiatu jest rzeka Lubaczówka, której zlewnia również wykazuje znaczną podatność na gwałtowne wzrosty przepływu. Ważną rolę odgrywają także mniejsze cieki, takie jak Szkło, Rada oraz liczne bezimienne potoki i rowy melioracyjne odwadniające obszary rolnicze. W zachodniej i południowej części powiatu dominują szerokie doliny rzeczne z rozległymi terasami zalewowymi, które podczas wysokich stanów wody pełnią funkcję naturalnej retencji. Na terenach intensywnie użytkowanych rolniczo lokalna retencja została częściowo ograniczona przez regulację cieków i systemy melioracyjne. Przepływy w rzekach wykazują wyraźną sezonowość, z najniższymi wartościami obserwowanymi najczęściej pod koniec lata oraz w okresach długotrwałej suszy. W ostatnich latach coraz częściej obserwuje się większą zmienność warunków hydrologicznych, przejawiającą się naprzemiennym występowaniem okresów suszy hydrologicznej i gwałtownych wezbrań. Obszary położone w dolinie Sanu należą do terenów najbardziej narażonych na występowanie powodzi rzecznych, szczególnie podczas długotrwałych opadów obejmujących znaczną część karpackiej zlewni. Oprócz powodzi rzecznych na obszarze powiatu występuje również zagrożenie lokalnymi podtopieniami powodowanymi przez intensywne opady konwekcyjne, które przekraczają przepustowość niewielkich cieków i systemów odwodnienia. Znaczący wpływ na kształtowanie

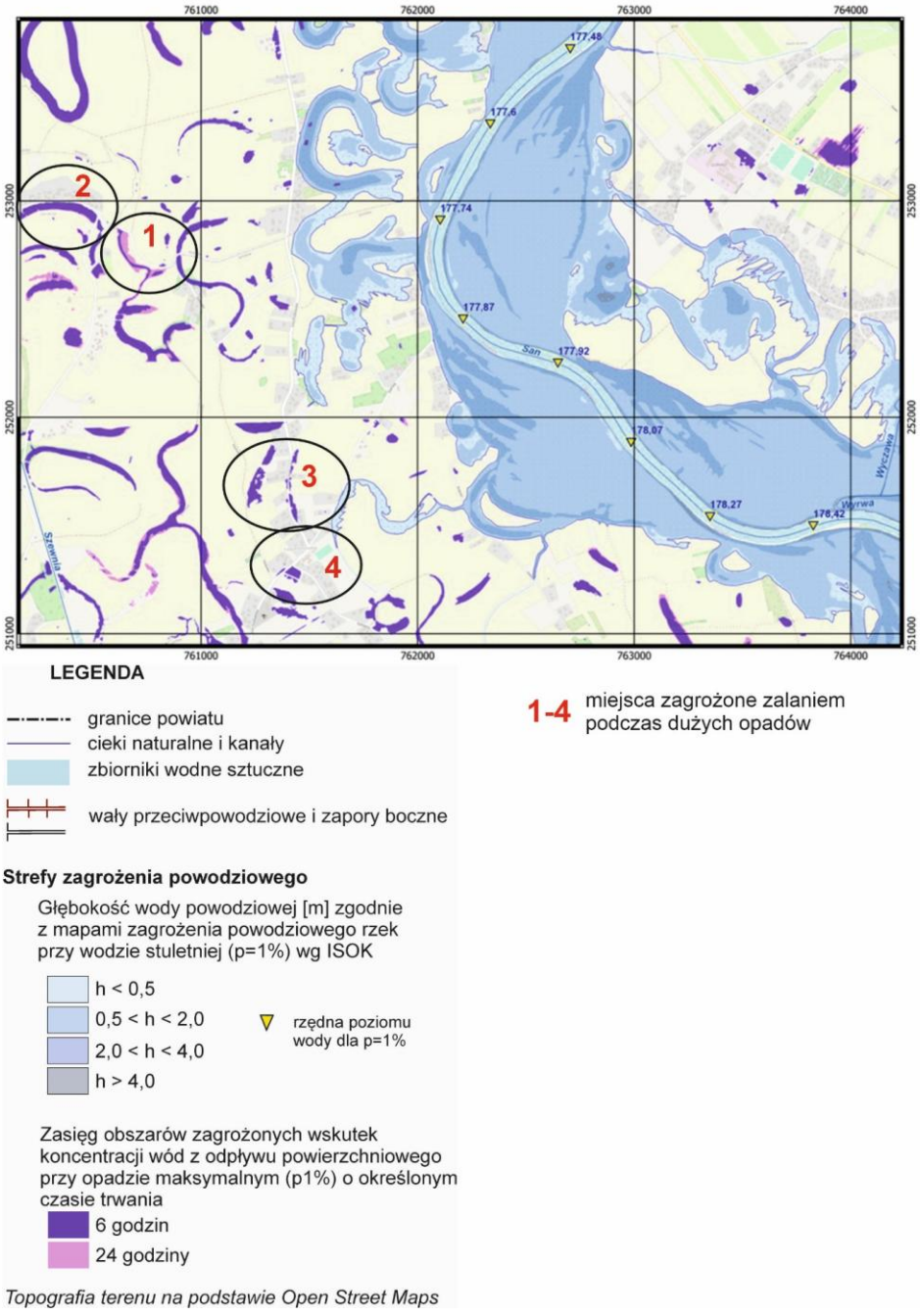
stosunków wodnych wywierają także wody podziemne związane z osadami czwartorzędowymi doliny Sanu, stanowiące ważne źródło zaopatrzenia w wodę. Funkcjonowanie wałów przeciwpowodziowych oraz innych urządzeń hydrotechnicznych ogranicza ryzyko zalania terenów zabudowanych, jednak nie eliminuje zagrożenia podczas wezbrań o bardzo dużym prawdopodobieństwie wystąpienia. Z punktu widzenia gospodarki wodnej powiat jarosławski charakteryzuje się umiarkowanie wysoką zmiennością warunków hydrologicznych, wynikającą z położenia w dolinie dużej rzeki oraz wpływu zjawisk hydrometeorologicznych zachodzących w zlewniach karpackich.

Szczegółową analizę zagrożenia powodziowego przeprowadzono dla dwóch obszarów. Pierwszy z nich zlokalizowany jest w dolinie Sanu, w rejonie miejscowości Wiązownica na wschodzie oraz Kostków i Łazy Kostkowskie na zachodzie (Rysunek 1). W analizowanym obszarze, szczególnie w jego zachodniej części, stwierdzono liczne strefy potencjalnych podtopień, związane z obniżeniami terenu rozwiniętymi w obrębie paleokoryt Sanu, czyli dawnych koryt rzecznych wypełnionych osadami aluwialnymi. Formy te są dobrze widoczne jako łukowate obniżenia odzwierciedlające historyczny przebieg koryta rzeki. Niewykluczone, że część z nich związana jest również z dawnymi przebiegami doliny Szewni, która uchodzi do Sanu na zachód od analizowanego obszaru. Część stref potencjalnie zalewanych podczas intensywnych opadów obejmuje tereny zabudowane. Szczególnie narażone są obszary położone przy ulicy Piaskowej (obszar 1 – Rysunek 1). Podwyższone zagrożenie występuje również w miejscowości Okroługi (obszar 2 – Rysunek 1), jednak w tym przypadku potencjalna strefa akumulacji wód opadowych koncentruje się głównie na południe od zabudowy. Kolejny obszar zagrożony zalaniem obejmuje zabudowę położoną przy ulicy Łazy Kostkowskie, gdzie potencjalna strefa zalewowa rozwija się wzdłuż drogi (obszar 3 – Rysunek 1). Istotne zagrożenie stwierdzono również na południe od Łazów Kostkowskich. W rejonie skrzyżowania dróg zidentyfikowano rozległy obszar predysponowany do okresowego gromadzenia się wód opadowych (obszar 4 – Rysunek 1). Po wschodniej stronie doliny Sanu również występują lokalne strefy potencjalnych podtopień, jednak są one mniej rozległe niż po stronie zachodniej.

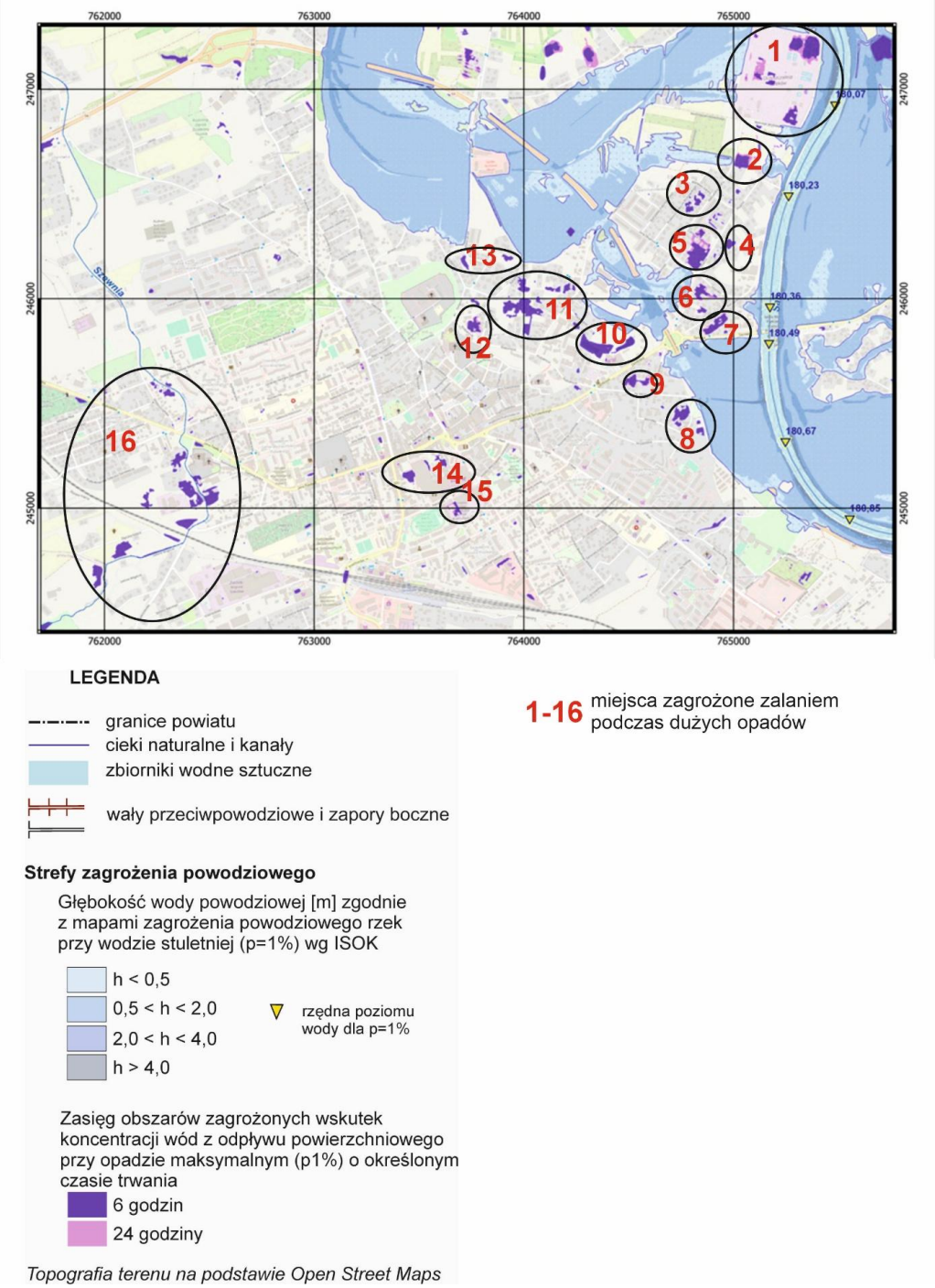
Drugi analizowany obszar przedstawiono na Rysunku 2. Obejmuje on centralną część Jarosławia, położoną na zachód od współczesnego koryta Sanu. Podobnie jak w pierwszym obszarze badawczym, rozmieszczenie wielu stref potencjalnych podtopień jest związane z obecnością dawnych koryt rzecznych. Przez analizowany teren przebiega bowiem paleokoryto Sanu, którego przebieg został w znacznym stopniu zatarty przez rozwój zabudowy miejskiej. W

przeciwieństwie do obszaru przedstawionego na Rysunku 1, identyfikacja dawnych form fluwialnych jest tutaj znacznie utrudniona z uwagi na intensywne zagospodarowanie terenu. Zabudowa maskuje naturalne obniżenia terenu, które podczas intensywnych opadów mogą stanowić miejsca koncentracji spływu powierzchniowego i lokalnych podtopień.

Największa liczba stref zagrożonych zalaniem występuje na północ od ulicy Sanowej (strefy 1–7– Rysunek 2). Obejmują one tereny o zwartej zabudowie miejskiej, zlokalizowane między innymi na południe od ulicy Rybackiej, na południe od ulicy Zwierzyniec, po obu stronach ulicy Zduńskiej, a także w rejonie ulic Miłosza i Fredry. Rozległe obszary potencjalnych podtopień zidentyfikowano również na terenie oczyszczalni ścieków położonej bezpośrednio przy Sanie. Mniejsze, lecz również istotne strefy zagrożenia (strefy 8–13 – Rysunek 2) występują na południowy zachód od drogi numer 94. Szczególnie narażone są tereny położone na południe od ulicy Zamkowej oraz na północ od ulicy Blichowej. Potencjalnym zalaniem mogą zostać objęte również budynki położone na północ od stadionu miejskiego (strefa 14 – Rysunek 2) oraz na północny wschód od stadionu (strefa 15 – Rysunek 2). Dodatkowo zagrożenie podtopieniami występuje wzdłuż doliny Szewni, przede wszystkim na południe od ulicy Jana Pawła II (strefa 16– Rysunek 2). Wyniki analizy wskazują, że rozmieszczenie stref potencjalnych podtopień jest w znacznym stopniu uwarunkowane dawną ewolucją doliny Sanu i zachowanymi formami paleofluwialnymi. Na obszarach zurbanizowanych naturalne obniżenia terenu zostały częściowo zatarte przez działalność człowieka, jednak nadal stanowią miejsca preferencyjnej koncentracji spływu powierzchniowego podczas opadów o dużej intensywności. Z tego względu obszary te powinny być uwzględniane w planowaniu przestrzennym oraz przy opracowywaniu lokalnych planów ograniczania ryzyka powodziowego.



Rysunek 1. Obszary zagrożone zalaniem na terenie powiatu jarosławskiego (obszar rzeka Szewnia Kostków).



Rysunek 2. Obszary zagrożone zalaniem na terenie powiatu jarosławskiego (obszar 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)*

Podsumowując, analiza wykazała, że na terenie powiatu jarosławskiego występuje wiele obszarów predysponowanych do okresowych podtopień podczas intensywnych opadów. Rozmieszczenie tych stref jest w dużej mierze związane z obecnością paleokoryt Sanu oraz innych dawnych form fluwialnych, które stanowią naturalne obniżenia terenu sprzyjające koncentracji spływu powierzchniowego. Szczególnie wysokie zagrożenie zidentyfikowano zarówno na terenach rolniczych w dolinie Sanu, jak i w silnie zurbanizowanej części Jarosławia. W pierwszym z analizowanych obszarów największe zagrożenie występuje w obrębie dawnych koryt rzecznych, gdzie wody opadowe mogą gromadzić się w naturalnych obniżeniach terenu. Część tych stref obejmuje istniejącą zabudowę oraz lokalne drogi, zwiększając ryzyko wystąpienia szkód podczas opadów o dużej intensywności. W Jarosławiu potencjalne strefy zalewowe koncentrują się przede wszystkim w rejonach położonych w obrębie dawnego koryta Sanu, którego przebieg został w znacznym stopniu zamaskowany przez rozwój zabudowy miejskiej. Szczególnie narażone są tereny położone na północ od ulicy Sanowej oraz w sąsiedztwie ulic Rybackiej, Zwierzyniec, Zduńskiej, Miłosza i Fredry. Zagrożenie obejmuje również obszary położone w pobliżu oczyszczalni ścieków, stadionu miejskiego oraz wzdłuż doliny Szewni. Wyniki analiz wskazują, że historyczna ewolucja sieci rzecznej nadal wywiera istotny wpływ na współczesny przebieg spływu powierzchniowego i lokalizację miejsc podatnych na podtopienia. Zidentyfikowane obniżenia terenowe pełnią funkcję naturalnych stref koncentracji wód opadowych, niezależnie od obecnego sposobu użytkowania terenu. W wielu przypadkach obszary te zostały zabudowane, co zwiększa potencjalne straty materialne podczas występowania opadów nawalnych. Analiza potwierdza, że zagrożenie podtopieniami nie ogranicza się wyłącznie do bezpośredniego sąsiedztwa współczesnych koryt rzecznych, lecz obejmuje również tereny oddalone od nich, związane z dawną siecią hydrograficzną. Otrzymane wyniki wskazują na potrzebę uwzględniania paleokoryt i dawnych form

fluwialnych w planowaniu przestrzennym oraz projektowaniu systemów odwodnienia. Istotnym elementem ograniczania ryzyka będzie również zachowanie lub zwiększanie lokalnej retencji oraz unikanie zabudowy terenów o wysokiej podatności na okresowe zalewanie. Przedstawione wyniki mogą stanowić podstawę do wyznaczania priorytetowych obszarów działań związanych z ochroną przeciwpowodziową oraz adaptacją do coraz częściej występujących opadów o wysokiej intensywności.

Katowice, 31.08.2026

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

dr hab. Jerzy Cabała