



# PORADNIK DLA MIAST

**Identyfikacja obszarów  
zagrożonych wodami opadowymi  
na terenach zurbanizowanych**

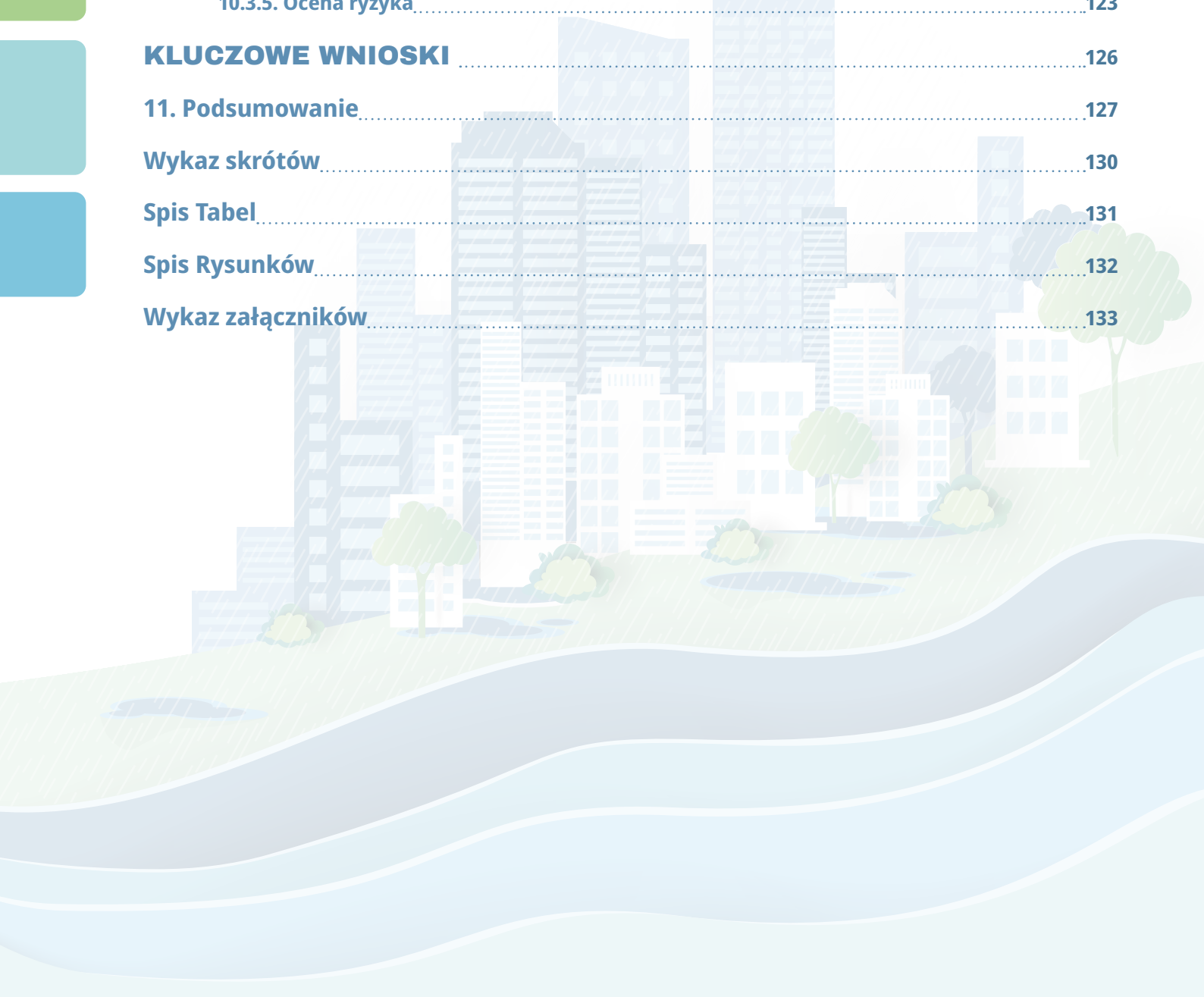
# Spis treści

<b>WPROWADZENIE DO ZAGADNIENIA</b> .....	6
Terminologia .....	7
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	8
1.1. Cel i zakres opracowania .....	9
1.2. Podstawy prawne .....	10
1.2.1. Prawo europejskie .....	10
1.2.2. Prawo krajowe .....	10
1.3. Wprowadzenie do modelowania .....	11
1.3.1. Model hydrologiczny .....	12
1.3.2. Model hydrauliczny .....	12
1.3.3. Rodzaje modeli hydraulicznych .....	13
1.3.4. Określenie sposobu przepływu wody .....	14
1.3.5. Przebieg prac analitycznych .....	15
<b>2. Wody opadowe w mieście - jak nimi zarządzać?</b> .....	15
<b>DOSTĘPNE METODY I NARZĘDZIA</b> .....	18
<b>3. Przegląd metod oraz narzędzi wykorzystywanych do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi</b> .....	19
3.1. Przegląd metod do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi .....	19
3.2. Przegląd dostępnego oprogramowania do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi w poszczególnych wariantach .....	21
<b>4. Wariantowe podejście do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi</b> .....	24
<b>NIEZBĘDNE DANE WEJŚCIOWE</b> .....	26
<b>5. Dane wykorzystywane do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi w poszczególnych wariantach</b> .....	27
5.1. Dane dotyczące powierzchni terenu .....	29
5.2. Dane dotyczące zagospodarowania terenu .....	29
5.3. Ortofotomapa .....	30
5.4. Dane opadowe .....	31
5.5. Istotne parametry topologii sieci kanalizacyjnej .....	32
5.6. Dane pomiarowe przepływów, napełnień oraz wielkości opadów .....	34
5.7. Inwentaryzacja geodezyjna .....	36
5.8. Dane techniczne dotyczące obiektów punktowych .....	38

<b>WYTYCZNE METODYCZNE WYZNACZANIA OBSZARÓW ZAGROŻONYCH WODAMI OPADOWYMI</b> .....	<b>40</b>
<b>6. Wariant 1 - Podejście uproszczone bez uwzględnienia modelu kanalizacyjnego</b> .....	<b>41</b>
6.1. Scenariusze obliczeniowe .....	41
6.2. Wybór modeli .....	41
6.3. Siatki obliczeniowe.....	42
6.4. Narzędzia do budowy modeli.....	44
6.5. Dane wejściowe.....	45
6.6. Etapy budowy modeli i modelowania.....	45
6.6.1. Mapa szorstkości .....	46
6.6.2. Dane o ukształtowaniu terenu .....	46
6.6.3. Obniżenie dróg .....	46
6.6.4. Odwzorowanie przepustów i mostów .....	48
6.6.5. Odwzorowanie cieków, rowów i sztucznych kanałów .....	48
6.6.6. Przygotowanie danych opadowych .....	49
6.6.7. Siatki obliczeniowe .....	49
6.6.8. Wprowadzanie danych do modeli 2D .....	51
6.7. Wyznaczanie obszarów bezodpływowych na podstawie wyników modelowania.....	54
6.8. Wyznaczanie obszarów zagrożonych wodami opadowymi.....	56
6.9. Wyznaczanie obszarów potencjalnej retencji.....	56
6.10. Wyznaczanie obszarów intensywnego spływu powierzchniowego.....	57
6.11. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników.....	57
6.12. Rekomendacje metodyczne.....	58
6.13. Podsumowanie.....	58
<b>7. Wariant 2 - Podejście uwzględniające model kanalizacji w sposób uproszczony</b> .....	<b>60</b>
7.1. Scenariusze obliczeniowe .....	60
7.2. Wybór modeli .....	60
7.3. Siatki obliczeniowe.....	61
7.4. Narzędzia do budowy modeli.....	62
7.5. Dane wejściowe.....	62
7.6. Etapy budowy modeli i modelowania.....	63
7.6.1. Mapa szorstkości .....	64
7.6.2. Dane o ukształtowaniu terenu.....	64
7.6.3. Obniżenie dróg .....	64
7.6.4. Odwzorowanie mostów.....	65
7.6.5. Odwzorowanie cieków, rowów i sztucznych kanałów .....	66
7.6.6. Poziom zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach.....	66
7.6.7. Budynki.....	66

7.6.8. Przygotowanie danych opadowych.....	66
7.6.9. Wybrane zagadnienie metodyczne. Siatki obliczeniowe .....	66
7.6.10. Infiltracja.....	70
7.6.11. Przepusty.....	70
7.6.12. Wpusty .....	70
7.6.13. Wprowadzanie danych do modeli 2D.....	70
7.6.14. Wyniki modelowania .....	74
7.7. Wyznaczanie obszarów zagrożonych wodami opadowymi.....	78
7.8. Wyznaczanie obszarów potencjalnej retencji.....	78
7.9. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników.....	79
7.10. Rekomendacje metodyczne.....	80
7.11. Podsumowanie .....	81
<b>8. Wariant 3 - Podejście szczegółowe uwzględniające model kanalizacji w sposób kompleksowy.....</b>	<b>82</b>
8.1. Scenariusze obliczeniowe .....	82
8.2. Zastosowane modele.....	82
8.3. Wykorzystane narzędzia do budowy modeli.....	82
8.4. Dane wejściowe.....	86
8.4.1. Dane opadowe.....	87
8.5. Wyznaczenie i parametryzacja zlewni hydrologicznych.....	87
8.5.1. Geometria zlewni hydrologicznych.....	87
8.5.2. Parametry hydrologiczne zlewni.....	88
8.5.3. Infiltracja.....	89
8.6. Etapy budowy modeli i modelowania .....	89
8.6.1. Dane opracowane na potrzeby budowy modeli 1D.....	89
8.6.2. Dane opracowane na potrzeby budowy modeli 2D.....	91
8.6.3. Wprowadzanie danych do modeli 1D+2D.....	93
8.6.4. Połączenie modelu 1D z modelem 2D.....	95
8.6.5. Ustawienie symulacji.....	97
8.6.6. Kalibracja i weryfikacja modelu.....	97
8.6.7. Wyniki modelowania .....	103
8.7. Sposób wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi .....	103
8.8. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników.....	104
8.9. Podsumowanie.....	104

<b>DODATKOWE REKOMENDACJE METODYCZNE</b> .....	106
<b>9. Wytyczne metodyczne do opracowania scenariuszy dla prognozowanych zmian zagospodarowania terenu oraz prognozowanych zmian wielkości i częstotliwości opadów w wyniku zmian klimatycznych</b> .....	107
9.1. Aktualny stan wiedzy i dostępne wyniki .....	107
9.2. Wytyczne do opracowania scenariuszy .....	110
<b>10. Sposób analizy i oceny zagrożenia od wód opadowych, oceny podatności oraz ryzyka</b> .....	111
10.1. Dokumenty planistyczne wynikające z wdrażania Dyrektywy Powodziowej.....	111
10.2. Metodyka do opracowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu.....	113
10.3. Proponowane podejście do oceny podatności.....	114
10.3.1. Analiza ekspozycji .....	114
10.3.2. Analiza wrażliwości.....	116
10.3.3. Analiza potencjału adaptacyjnego .....	121
10.3.4. Analiza podatności.....	123
10.3.5. Ocena ryzyka.....	123
<b>KLUCZOWE WNIOSKI</b> .....	126
<b>11. Podsumowanie</b> .....	127
<b>Wykaz skrótów</b> .....	130
<b>Spis Tabel</b> .....	131
<b>Spis Rysunków</b> .....	132
<b>Wykaz załączników</b> .....	133



# WPROWADZENIE DO ZAGADNIENIA



## Terminologia

<b>Zmiany klimatu wg IPCC<sup>1</sup></b>	długotrwałe przekształcenia elementów klimatu, które potrafią utrzymać się przez długi okres, mogący trwać lata, dekady lub nawet stulecia.
<b>Powódź</b>	czasowe pokrycie przez wodę terenu, który w normalnych warunkach nie jest pokryty wodą, w szczególności wywołane przez wezbranie wody w ciekach naturalnych, zbiornikach wodnych, kanałach oraz od strony morza, z wyłączeniem pokrycia przez wodę terenu wywołanego przez wezbranie wody w systemach kanalizacyjnych.
<b>Powódź opadowa</b>	powódź związana z zalaniem terenu wodami pochodzącymi bezpośrednio z opadów deszczu lub z topnienia śniegu, może obejmować miejskie powodzie burzowe lub nadmiar wody na obszarach pozamiejskich.
<b>Powódź błyskawiczna</b>	rodzaj powodzi charakteryzujący się bardzo szybkim przebiegiem, którego czas koncentracji fali powodziowej wynosi do kilku godzin po wystąpieniu opadów nawalnych, występuje zwykle w małych zlewniach.
<b>Powódź miejska</b>	powódź błyskawiczna występująca na obszarze zurbanizowanym, gdzie nadmierne uszczelnienie powierzchni terenu w miastach powoduje intensyfikację spływu powierzchniowego, a istniejąca sieć kanalizacyjna ma za niską przepustowość i wydajność, aby szybko odprowadzić wodę.
<b>Ryzyko powodziowe</b>	kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i potencjalnych negatywnych skutków powodzi dla życia i zdrowia ludzi, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej.
<b>Obszary zagrożone wodami opadowymi</b>	miejsca, w których może dojść do zalania terenu wodami, pochodzącymi bezpośrednio z intensywnych lub długotrwałych opadów deszczu lub z topnienia śniegu (spływ powierzchniowy), które nie dostały się jeszcze do cieku wodnego lub wynikają z przeciążenia systemu odwadniającego; obszary zagrożone wodami opadowymi nie obejmują terenów zalanych w wyniku wezbrania wody w ciekach oraz podtopień wynikających z podniesienia poziomu wód gruntowych.
<b>Obszary potencjalnej retencji</b>	obszary, które w sposób naturalny predysponują do przetrzymania wód opadowych na tym obszarze, zarówno w sposób naturalny (tereny zielone) lub z wykorzystaniem odpowiedniej infrastruktury.
<b>Kanalizacja deszczowa</b>	kanalizacja służąca do odprowadzania wód opadowych i roztopowych (ścieki opadowe i roztopowe) ze szczelnych nawierzchni terenów zurbanizowanych – dachów, dróg, chodników, podjazdów, parkingów.
<b>Odpiływy komunalne</b>	oznaczają wody opadowe, śnieg lub wodę powstałą wskutek topnienia lodu z aglomeracji, zbierane przez kanalizację ogólnospławną lub oddzielną.

<sup>1</sup> IPCC - Międzypaństwowy Zespół ds. Zmian Klimatu, przygotowuje regularnie raporty, które w syntetyczny sposób podsumowują najważniejsze ustalenia naukowe dotyczące podatności społeczeństw na obecną zmianę klimatu, a także sposoby i możliwości adaptacji do niej.

# 1. Wprowadzenie

Zagadnienia związane z zagrożeniem i ryzykiem powodziowym oraz zarządzaniem nimi obejmuje ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne (Dz. U. 2023 poz. 1478 t.j.), która implementowała w 2010 r. ustalenia Dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (Dz. Urz. UE L288/27). Dyrektywa nałożyła na państwa członkowskie Unii Europejskiej obowiązek sporządzania dokumentów planistycznych i koordynacji działań w obszarze zarządzania ryzykiem powodziowym w 6-letnich cyklach planistycznych.

Zgodnie z ustawą Prawo wodne, **powódź** jest to czasowe pokrycie przez wodę terenu, który w normalnych warunkach nie jest pokryty wodą, w szczególności wywołane przez wezbranie wody w ciekach naturalnych, zbiornikach wodnych, kanałach oraz od strony morza, z wyłączeniem pokrycia przez wodę terenu wywołanego przez wezbranie wody w systemach kanalizacyjnych. To oczywiście dość szeroka definicja, która jest odpowiednio doprecyzowana w zależności od typu powodzi.

Powodzie można klasyfikować ze względu na ich genezę, zasięg lub przebieg. Na potrzeby wdrażania Dyrektywy Powodziowej<sup>2</sup> powodzie zostały podzielone między innymi ze względu na ich genezę, wskazując: powodzie rzeczne, opadowe, od wód podziemnych, od strony morza, od infrastruktury hydrotechnicznej i wodno-kanalizacyjnej. Z punktu widzenia niniejszego poradnika istotna jest definicja powodzi opadowej. **Powódź opadowa** (pluwialna) to powódź związana z zalaniem terenu wodami pochodzącymi bezpośrednio z opadów deszczu lub z topnienia śniegu, może obejmować miejskie powodzie burzowe lub nadmiar wody na obszarach pozamiejskich. Zgodnie z ww. wytycznymi powodzie opadowe stanowią odrębny od powodzi rzecznych typ powodzi. **Powodzie rzeczne** związane są przede wszystkim z wezbraniem wód rzecznych, strumieni, potoków górskich, kanałów, jezior, wynikających również z nagłego topnienia śniegu.

Szczególnym przypadkiem powodzi opadowych są **powodzie błyskawiczne**, czyli powodzie o lokalnym zasięgu, bardzo szybkim przebiegu i krótkim czasie trwania (zwykle poniżej 6 godz.), wywołane opadami deszczu o dużej wydajności, często o charakterze burzowym. Powodzie błyskawiczne mogą wystąpić w każdym miejscu, ale najczęściej mają miejsce w obszarach górskich oraz na terenach miejskich.

**Obszary zagrożone wodami opadowymi** to miejsca, w których może dojść do zalania terenu wodami, pochodzącymi bezpośrednio z intensywnych lub długotrwałych opadów deszczu lub z topnienia śniegu (spływ powierzchniowy), które nie dostały się jeszcze do cieku wodnego lub wynikają z przeciążenia systemu odwadniającego. Obszary zagrożone wodami opadowymi nie obejmują terenów zalanych w wyniku wezbrania wody w ciekach oraz podtopień wynikających z podniesienia poziomu wód gruntowych.

Z uwagi m.in. na lokalny charakter tych zjawisk, zakres kompetencji oraz konsekwencje prawne wprowadzenia ograniczeń inwestycyjnych na tych obszarach, nie sporządza się map zagrożenia powodziowego dla tego typu powodzi w skali całego kraju.

Kompetencje w zakresie zarządzania ryzykiem powodziowym w kraju są podzielone, tak jak cała ochrona przed powodzią, między Wody Polskie, administrację rządową i samorządową. Na podstawie art. 163 ust. 2 ustawy Prawo wodne, Wody Polskie zapewniają ochronę ludności i mienia przed powodzią wywołaną przez wody publiczne stanowiące własność Skarbu Państwa. W związku z art. 212 ust. 1 pkt 1 ustawy, Wody Polskie wykonują prawa właścicielskie w stosunku do śródlądowych wód płynących oraz wód podziemnych.

Kluczową rolę w zakresie zapobiegania negatywnym skutkom nadmiaru wód opadowych oraz ich zagospodarowania na obszarze miast pełnią przede wszystkim poszczególne jednostki samorządu terytorialnego, jest to związane bezpośrednio z prowadzeniem właściwej polityki przestrzennej w miastach, która należy do zadań własnych gminy. Jednocześnie, zgodnie z art. 6 oraz art. 7 ust. 1 pkt 1 ustawy o samorządzie gminnym<sup>3</sup>, do zadań własnych gminy należą również sprawy gospodarki wodnej. Ponadto Wójt, burmistrz lub prezydent miasta – zgodnie z art. 14 ust. 1 ustawy Prawo wodne – są również organami właściwymi w sprawach gospodarowania wodami.

2 Floods Directive Reporting Guidance 2018, [https://cdr.eionet.europa.eu/help/Floods/Floods\\_2018/GuidanceDocuments/FD\\_ReportingGuidance.pdf](https://cdr.eionet.europa.eu/help/Floods/Floods_2018/GuidanceDocuments/FD_ReportingGuidance.pdf).

3 Ustawa z dnia 8 marca 1990 r. o samorządzie gminnym. Dz. U. 1990 Nr 16 poz. 95, tekst jednolity.



W kwestii zmian klimatu, scenariusze klimatyczne dla Polski analizowane między innymi w projekcie KLIMADA, wskazują na prognozowane zmiany w częstotliwości i intensywności opadów. W niektórych regionach spodziewane jest zwiększenie liczby dni z opadami, a w innych zwiększenie intensywności opadów w krótszym czasie. Całkowita liczba dni z opadem wzrośnie nieznacznie. Do roku 2060 prognozowany jest wzrost rocznej sumy opadów średnio od 30 mm (wg scenariusza klimatycznego RCP4.5<sup>4</sup>) do 50 mm (RCP8.5<sup>6</sup>). Wzrost rocznej sumy opadu wynika przede wszystkim ze zwiększenia się liczby dni z opadem ekstremalnym > 20 mm/dobę. W scenariuszu RCP8.5 wzrost jest wyższy o około 1 dzień w porównaniu do RCP4.5.

Widać to już wyraźnie na obszarze naszego kraju, gdzie w ciągu ostatnich lat obserwowany jest wzrost częstotliwości występowania intensywnych opadów deszczu. Niestety równoległe postępujące procesy urbanizacyjne zwiększają powierzchnię uszczelnioną, a tym samym zwiększają zagrożenie od strony wód opadowych, poprzez ograniczoną zdolność powierzchni terenu do infiltracji wód opadowych. Te zjawiska najczęściej występują na małych obszarach, gdzie spływ powierzchniowy przeważa nad infiltracją i retencją, a ich negatywne skutki są lokalne i niezwiązane bezpośrednio z ciekami wodnymi. Kluczowym krokiem w ograniczaniu tych zagrożeń jest identyfikacja obszarów zagrożonych wodami opadowymi.

Świadomość zagrożenia oraz wiedza na temat identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi, jest niezwykle istotna dla władz i mieszkańców miast. Niniejszy poradnik ma na celu dostarczyć konkretne rozwiązania i rekomendacje do wyznaczenia obszarów zagrożonych powodziami opadowymi, a te z kolei stanowić mogą podstawę dla dalszych działań w obszarach miejskich. Rzetelne rozpoznanie problemu pozwoli zaplanować skuteczne działania, które odpowiedzą na potrzeby, zminimalizują potencjalne straty, ale także pozwolą dobrać optymalne rozwiązania, mające na celu zagospodarowanie wód opadowych i ich retencji, tak aby ograniczyć skutki powodzi opadowych.

## 1.1. Cel i zakres opracowania

Aktualnie w Polsce nie ma jednoznacznie wskazanych, rekomendowanych metodyk w zakresie wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Nie ma także jasnych wymogów prawnych, które nakładałyby obowiązek przeprowadzenia takich analiz na obszarze miast. Natomiast kwestie te może zmienić procedowana obecnie przez Parlament Europejski aktualizacja Dyrektywy Ściekowej<sup>7</sup>. Niniejszy poradnik ma na celu przede wszystkim wesprzeć mniej zaawansowane w tym obszarze miasta i gminy, w rozpoczęciu prac nad problematyką powodzi opadowych na ich obszarach. Może stanowić punkt wyjścia do planowania dalszych działań w zakresie ograniczania negatywnych skutków powodzi opadowych. Pozwoli to także ujednolicić stosowane podejście w skali kraju.

Poradnik może służyć władzom samorządowym do identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi we własnym zakresie, do wsparcia w przygotowaniu dokumentacji przetargowych czy rozmów z właściwymi jednostkami lub zarządcami infrastruktury w mieście.

Opracowanie poradnika zostało poprzedzone przeglądem literatury oraz pilotażowym opracowaniem kompletu analiz dla dwóch miast: Puław i Nowego Sącza.

Ze względu na różny poziom zapotrzebowania na tego typu analizy oraz zakres posiadanych danych, przedstawione podejście metodyczne zakłada 3 różne warianty, tak aby możliwie jak najlepiej odpowiedzieć na różne potrzeby miast.

4 RCP ang. Representative Concentrations Pathways – Reprezentatywne ścieżki stężeń. Nazwy poszczególnych RCP pochodzą od przypisanych im wartości globalnego wymuszenia radiacyjnego w górnych warstwach atmosfery, prognozowanego na koniec XXI w. (aktualnie 3 W/m<sup>2</sup>). Wielkość ta jest zależna od zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze (410 ppm CO<sub>2</sub> w 2020 r.).

5 Scenariusz RCP 4.5 – zakłada wprowadzanie nowych technologii w celu uzyskania wyższej niż obecnie redukcji emisji gazów cieplarnianych. Zakładany jest wyraźny spadek zawartości GHG w atmosferze w połowie stulecia oraz osiągnięcie w roku 2100 stężeń CO<sub>2</sub> ok. 540 ppm i wymuszenia radiacyjnego 4.5 [W/m<sup>2</sup>]. Wzrost średniej temperatury globalnej wyniesie ok. 2.5° pod koniec XXI w.

6 RCP 8.5 – utrzymanie aktualnego tempa wzrostu emisji gazów cieplarnianych, w formule „business as usual”. Pod koniec wieku zakłada się osiągnięcie poziomu stężeń CO<sub>2</sub> ok. 940 ppm oraz wymuszenia radiacyjnego 8.5 [W/m<sup>2</sup>]. Średnia temperatura Ziemi wzrośnie o 4.5° względem epoki przedindustrialnej. Scenariusz ten z 95% prawdopodobieństwem oznacza nieodwracalną destabilizację klimatu Ziemi.

7 Parlament Europejski, [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0355\\_PL.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0355_PL.html) (data wejścia: 28.12.2023 r.)

W ramach poradnika przedstawiono: przegląd istniejących metod wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi na terenach zurbanizowanych i analizy ryzyka, opis analiz przeprowadzonych w zlewniach pilotażowych, rekomendowane metody dla 3 wariantów oraz ujęcie zagadnienia zmian klimatu.

Ze względu na różny poziom zapotrzebowania na tego typu analizy oraz zakres posiadanych danych, przedstawione podejście metodyczne zakłada 3 różne warianty, tak aby możliwie jak najlepiej odpowiedzieć na różne potrzeby miast.

## 1.2. Podstawy prawne

### 1.2.1. Prawo europejskie

#### Dyrektywa Powodziowa

Na poziomie prawodawstwa europejskiego kwestie zarządzania ryzykiem powodziowym reguluje wspomniana już wyżej Dyrektywa Powodziowa (Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim).

Nie odnosi się ona jednak bezpośrednio do kwestii powodzi opadowych, miejskich. Powodzie te mają odmienny charakter od powodzi rzecznych, czy od strony morza, w związku z czym podejście do zarządzania tym ryzykiem jest zupełnie inne i wymaga podjęcia działań na poziomie lokalnym. Dyrektywa ta wymaga planowania i koordynacji działań na szczeblu krajowym i międzynarodowym, uwzględniając przy tym cele środowiskowe.

#### Dyrektywa Ściekowa

Inną dyrektywą powiązaną z wodami opadowymi jest Dyrektywa Rady 91/271/EWG z dnia 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych (Dz.U.U.E.L.1991.135.40). W tym kontekście należy zwrócić szczególną uwagę na procedowany obecnie przez Komisję Europejską projekt nowej Dyrektywy Ściekowej<sup>8,9</sup>, która obejmuje kwestie gospodarki ściekami komunalnymi, w tym także zagospodarowania wód opadowych na terenach zurbanizowanych. Państwa członkowskie będą zobowiązane do ustanowienia i wdrożenia zintegrowanych planów gospodarowania ściekami komunalnymi w celu zwalczania zanieczyszczeń pochodzących z wód opadowych we wszystkich dużych aglomeracjach (powyżej 100 000 RLM<sup>10</sup>) oraz w mniejszych aglomeracjach 10 000 – 100 000 RLM, gdzie istnieje zagrożenie dla środowiska lub zdrowia publicznego ze względu na przelewy wód burzowych i odpływ komunalnych. Plany powinny zawierać ocenę wrażliwości systemów zbierania i oczyszczania ścieków komunalnych w oparciu o scenariusze zmian klimatu w warunkach skrajnych. Analizy powinny być prowadzone z wykorzystaniem modelowania hydraulicznego i hydrologicznego. Ponadto priorytet zostanie nadany działaniom zapobiegawczym, rozwiązaniom opartym na naturze i błękitno-zielonej infrastrukturze, optymalizacji istniejących systemów, ponownemu wykorzystaniu wody. Zmiany te są o tyle istotne, że oprócz dotychczasowego skupienia nad kwestiami ilościowymi, zwiększona zostanie uwaga na kwestiach jakościowych wód.

### 1.2.2. Prawo krajowe

#### Ustawa Prawo wodne

Na szczeblu krajowym kwestie gospodarki wodnej, w tym ochrony przed powodzią reguluje ustawa Prawo wodne (Dz. U. 2023 poz. 1478 t.j.). Kwestiom powodzi i suszy poświęcony jest DZIAŁ IV Zarządzanie ryzykiem powodziowym i przeciwdziałanie skutkom suszy. Poza częścią dotyczącą opracowania i uzgodnienia opracowań planistycznych, znajdują się tam też regulacje związane z niezbędnymi uzgodnieniami w zakresie zabudowy obszarów zagrożenia powodziowego. W DZIALE VI, w rozdziale 5 Instrumenty ekonomiczne

8 Propozycja Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych (wersja przekształcona) z dnia 26.10.2022 r. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0541>, dostęp: 15.11.2022 r.)

9 Opinia Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego „Wniosek dotyczący dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych, (COM(2022) 541 final - 2022/0345 (COD) (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022AE5433>, dostęp: 27.03.2023)

10 RLM - równoważna liczba mieszkańców

w gospodarowaniu wodami, można odnaleźć wskazania dotyczące konieczności wnoszenia opłaty za usługi wodne w zakresie odprowadzania wód opadowych lub roztopowych ujętych w otwarte lub zamknięte systemy kanalizacji deszczowej służących do odprowadzania opadów atmosferycznych albo systemy kanalizacji zbiorczej w granicach administracyjnych miast, do wód śródlądowych. Jest to o tyle istotne z perspektywy niniejszego poradnika, iż poza wskazywaniem miejsc zagrożonych powodzią, prezentowane są także miejsca potencjalnej retencji, które pozwolą ograniczyć ilość odprowadzanej wody i zatrzymać ją lokalnie, często, aby wykorzystać ją ponownie. Informacje o taryfikatorze usług wodnych dostępne są w Rozporządzeniu Rady Ministrów z 22 grudnia 2017 r. w sprawie jednostkowych stawek opłat za usługi wodne (Dz.U. 2022 poz. 2438 t.j.).

Ustawie Prawo wodne towarzyszy wiele rozporządzeń. Warunki, jakie należy spełnić przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód reguluje Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych (Dz.U. 2019 poz. 1311). Kwestie samej możliwości odprowadzania wód opadowych do wód i szczegółowego użytkowania urządzeń regulują indywidualnie uzyskiwane przez inwestorów pozwolenia wodnoprawne.

### Ustawa o samorządzie gminnym

W zakresie funkcjonowania samorządu gminnego i jego zobowiązań w zakresie gospodarki wodnej oraz zarządzania wodami opadowymi czytamy w ustawie o samorządzie gminnym (Dz.U. 2023 poz. 40 t.). Kwestie te nie są szczegółowo opisane, natomiast jasno wskazują, iż gospodarka wodna i ochrona środowiska stanowią element zbiorowych potrzeb wspólnoty i są jednym z podstawowych zadań, podobnie jak zaopatrzenie w wodę czy utrzymanie sieci wodociągowej i kanalizacyjnej. Wśród tych podstawowych zadań jest także ochrona przeciwpowodziowa. Jak już wskazano wyżej jest to zadanie wspólne władz rządowych i samorządowych, natomiast lokalnie w zakresie zdarzeń niepowiązanych z wodami śródlądowymi za których administrację odpowiadają Wody Polskie, kompetencje te w pełni leżą w gestii miast, które zwykle reagują i działają wspólnie ze Strażą Pożarną. Jednostki samorządu terytorialnego pełnią również kluczową funkcję w zakresie planowania i zagospodarowania przestrzennego, zatem mają jedno z ważniejszych narzędzi w kreowaniu proretencyjnej polityki przestrzennej, aby optymalizować możliwości zagospodarowania wód opadowych także w tym obszarze.

### Ustawa Prawo budowlane

Prawo budowlane (Dz.U. 2023 poz. 682 t.j.) reguluje kwestie obiektów budowlanych oraz wskazuje warunki użytkowe zgodne z przeznaczeniem obiektu w zakresie między innymi usuwania ścieków, wody opadowej i odpadów. Szczegóły techniczne odnajdziemy w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Kwestie samego projektowania kanalizacji reguluje norma PN-EN 752:2017 „Zewnętrzne systemy odwadniające i kanalizacyjne”.

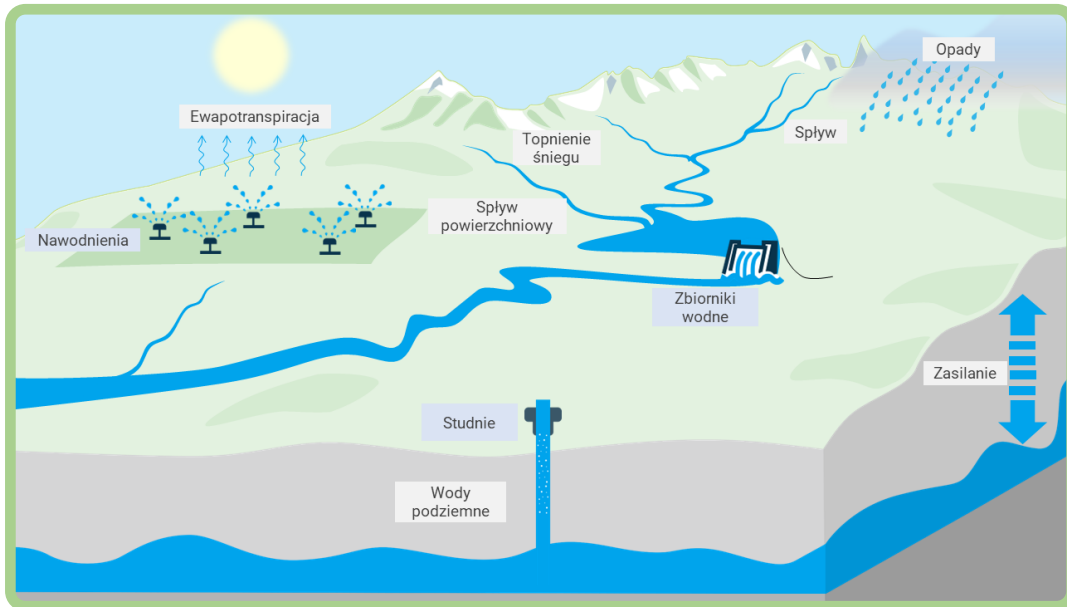
## 1.3. Wprowadzenie do modelowania

W dobie coraz to bardziej zaawansowanych technologii, modelowanie hydrologiczne i hydrauliczne ma obecnie dość powszechne zastosowanie, jeśli chodzi o wyznaczanie obszarów zagrożonych powodzią czy prognozowanie zmian przepływów wody w ekosystemach, zarówno naturalnych (cieki, jeziora, morza), jak i sztucznych (sieci kanalizacyjnej, sieci wodociągowe, kanały). Analizy modelowe są skomplikowanym procesem, wymagającym dużej ilości danych, odpowiednich narzędzi, t.j. oprogramowania, wydajnego sprzętu komputerowego, jak również doświadczonych specjalistów.

### 1.3.1. Model hydrologiczny

Model hydrologiczny stanowi model cyklu hydrologicznego lub jego części, jak również może stanowić model odcinka rzeki lub kanału otwartego, opisujący ruch masy wody w sposób uproszczony. Przedstawia relację opadów do przepływów w odbiorniku w skali danej zlewni. Modele te wykorzystywane są do przygotowania modeli prognostycznych, w oparciu o które, zasilane aktualnymi danymi wyznaczane są prognozy przepływów i potencjalne ostrzeżenia o zagrożeniach. Wyniki modeli hydrologicznych mogą stanowić dane wejściowe do modeli hydraulicznych.

Rysunek 1 Rysunek prezentujący ideę modeli hydrologicznych



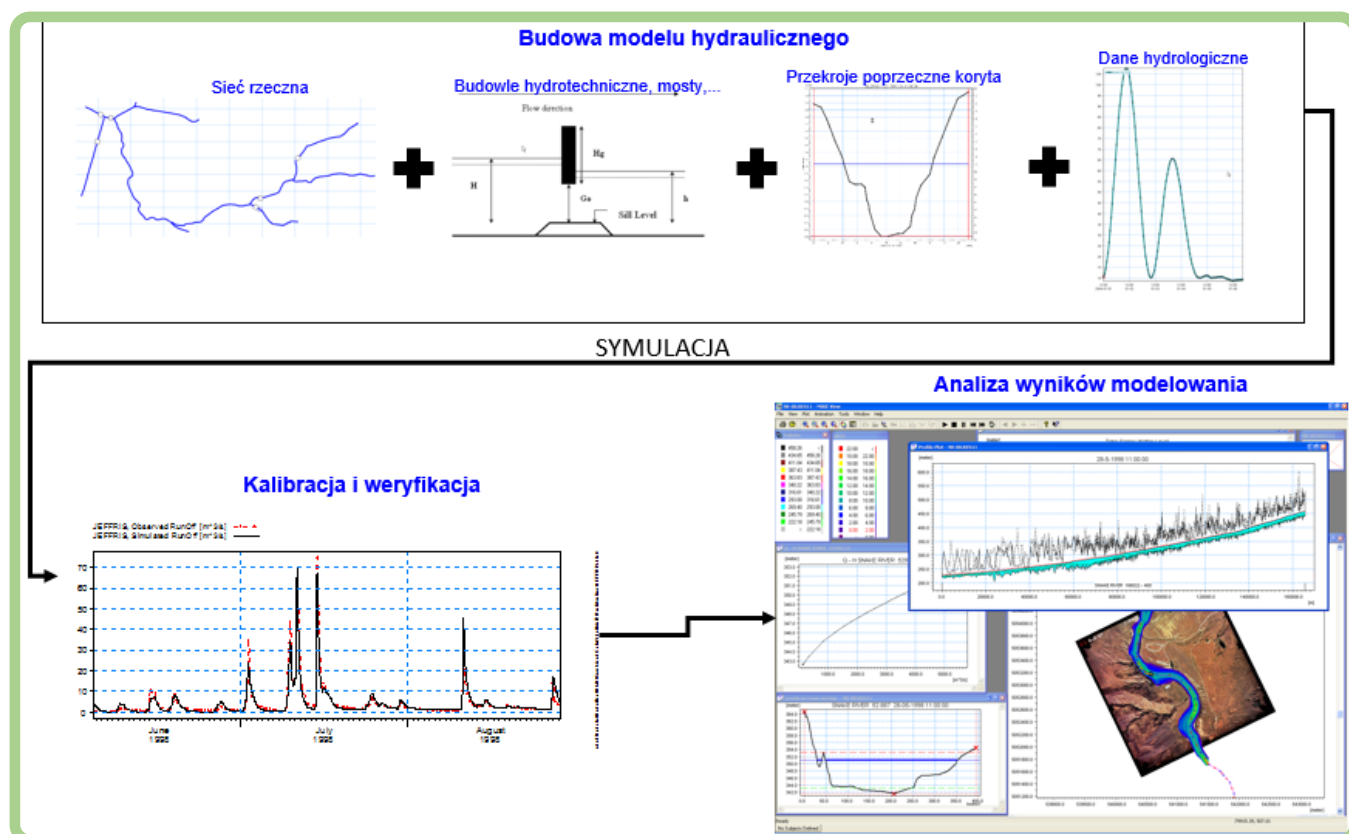
źródło: opracowanie własne

### 1.3.2. Model hydrauliczny

Model hydrauliczny, określany także modelem hydrodynamicznym, stanowi model matematyczny odzwierciedlający rzeczywiste warunki fizyczne (ukształtowanie koryt cieków, pokrycie terenu i wynikające z tego opory przepływu wody, budowle inżynierskie mające wpływ na przepływ wód, sieć kanalizacyjna lub wodociągowa), opisujący ruch wody równaniami opartymi o fizykę procesu. Przebieg procesu budowy modelu i modelowania dla przykładu modelu rzecznej przedstawiono na [Rysunek 2](#).

Wybór elementów, z których może składać się model jest zależny od rodzaju budowanego modelu. Inne elementy będą składały się na model sieci rzecznej, a inne na model sieci kanalizacyjnej lub morza.

Rysunek 2 Schemat etapu prac nad modelem hydraulicznym dla rzeki



źródło: opracowanie własne

### 1.3.3. Rodzaje modeli hydraulicznych

Zanim rozpocznie się te właściwe prace modelowe i budowę samego modelu, należy podjąć decyzję o wyborze rodzaju modelu. W zależności od analizowanego terenu lub rodzaju analiz, można wykonać modele jednowymiarowe (1D), dwuwymiarowe (2D), trójwymiarowe (3D) lub hybrydowe (połączenie 1D i 2D). Wymiarowość modeli hydraulicznych odnosi się do liczby wymiarów przestrzennych, które są istotne pod względem przeprowadzanych analiz. Ma istotne znaczenie dla zakresu zjawisk, które mogą zostać uwzględnione w modelu. Modele jednowymiarowe (1D) pozwalają na analizę przepływu tylko w jednym kierunku. Przykładem zastosowania modeli jednowymiarowych są modele sieci kanalizacyjnej, sieci wodociągowej oraz rzek. Modele hybrydowe i dwuwymiarowe (2D) są preferowane w przypadku obszarów zurbanizowanych, ale także dla miejsc o skomplikowanym ukształtowaniu terenów zalewowych, lub też konieczności uzyskania dokładniejszych informacji na temat np. rozkładu prędkości przepływu wody. Modele trójwymiarowe (3D) są wykorzystywane w przypadku analiz przepływu w trzech kierunkach np. dla modeli fal morskich.

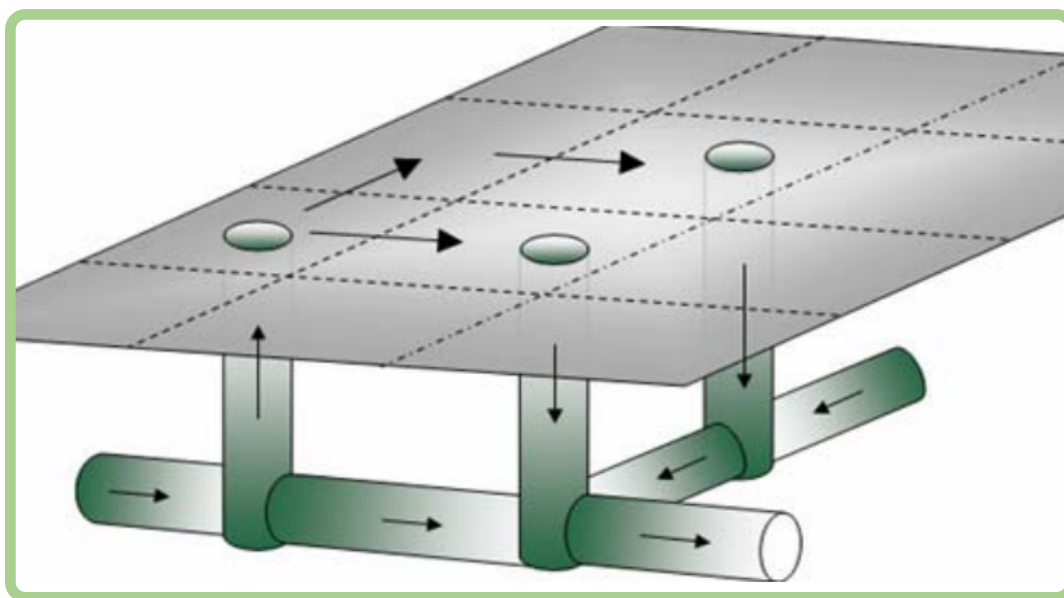
Współcześnie najefektywniejszym narzędziem wykorzystywanym do modelowania spływu po powierzchni i sieci kanalizacji deszczowej lub ogólnospławnej są aplikacje umożliwiające wykonanie, zarówno modelu jednowymiarowego (1D), jak i modeli zintegrowanych (połączone modele jedno- i dwuwymiarowe, 1D+2D).

Modele niezintegrowane wymagają przeprowadzenia osobnych symulacji modelu powierzchniowego: jedna z przelewem z systemu kanalizacyjnego i jedna bez. Objętość wody jest obliczana przez samodzielny model systemu kanalizacyjnego. Brak integracji modeli może powodować nakładanie się wyników, co w konsekwencji powoduje zawyżanie wartości przepływu powierzchniowego<sup>11</sup>. Sposób wyznaczania obszarów dla tej metody jest identyczny jak w przypadku modeli zintegrowanych, z tą różnicą, że model 1D i 2D nie są ze sobą zintegrowane, a informacje o objętości wylania przenoszone są z modelu 1D do modelu 2D za pomocą warunków brzegowych. Wszystkie wymagane dane do opracowania modeli niezintegrowanych są takie same jak w przypadku modeli zintegrowanych. Poszczególne kroki budowy modeli również są analogiczne jak w przypadku modelu zintegrowanego z tą różnicą, że nie wykonuje się ostatniego kroku przed rozpoczęciem symulacji, czyli nie wykonuje się integracji modelu 1D z modelem 2D.

11 Prof. Dr.-Ing. Jana von Horn i inni, Praxisleitfaden „Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen“, HSB, 2017.

Modele zintegrowane 1D/2D wykorzystują obliczenia przepływu nieustalonego 1D do symulacji przepływu w rurach, kanałach, przepustach i innych zdefiniowanych strukturach geometrycznych oraz obliczenia przepływu po powierzchni terenu z wykorzystaniem modelu 2D, gdzie przepływ jest dwuwymiarowy, czyli występują dwa kierunki przepływu. Model 1D to ten sam system odcinków i węzłów używany w tradycyjnych modelach jednowymiarowych, natomiast model 2D jest zdefiniowany przez siatkę o określonym nachyleniu i chropowatości. Węzły z modelu 1D są połączone z siatką 2D. To połączenie może być statyczne lub dynamiczne. [Rysunek 3](#) przedstawia elementy 1D i 2D w obszarze miejskim, gdzie przepływ powierzchniowy wpływa do podziemnej sieci odwadniającej przez wpusty. W czasie burzy nadmiar przepływu może gromadzić się w pobliżu kratki lub może przelać się do sąsiedniego wpustu. W sieci kanalizacji odwadniającej przeszkody lub nieodpowiednia przepustowość mogą powodować cofanie się lub zmianę kierunku przepływu.

Rysunek 3 Schemat obrazujący połączenie modelu 1D i modelu 2D



źródło: Thomas E. Barnard, Anthony W. Kuch, Geoffrey R. Thompson, Sudesh Mudaliar and Brett C. Phillips, Evolution of an Integrated 1D/2D Modeling Package for Urban Drainage

Modelowanie zintegrowane 1D+2D daje nieporównywalnie szersze możliwości analiz, zarówno zjawiska przepływu wody po powierzchni terenu, jak i genezy powstawania zagrożenia powodziowego np. przeciążenie sieci ze względu na zbyt małe średnice kanałów, niepoprawne spadki, zjawisko cofki itp.

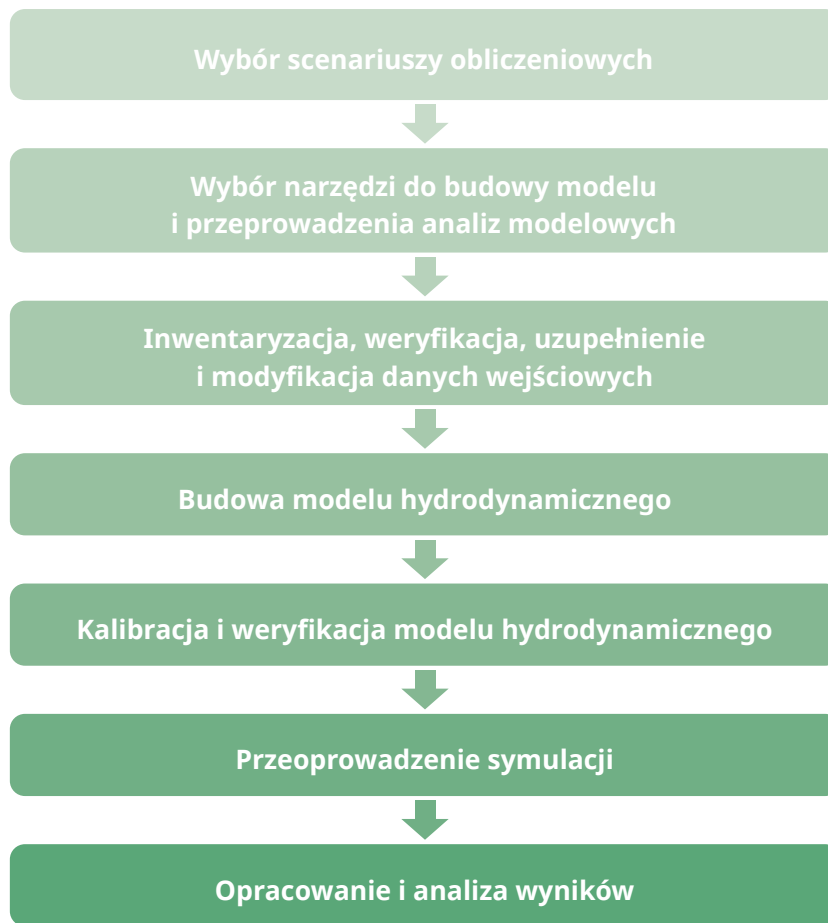
Modele zintegrowane, ze względu na swoją szczegółowość wymagają jednak dużego nakładu czasu na przeprowadzenie symulacji. Czas ten będzie uzależniony od stopnia skomplikowania modelu 1D, ilości wprowadzonych do niego obiektów, ilości połączeń pomiędzy modelem 1D a 2D oraz skomplikowaniem i ilością elementów siatki obliczeniowej modelu 2D. Czas ten będzie wahał się od kilkudziesięciu minut do nawet kilku dni.

#### 1.3.4. Określenie sposobu przepływu wody

Kolejnym istotnym elementem, który należy określić przystępując do analiz modelowych to określenie sposobu przepływu wody w modelu. Kryterium tej klasyfikacji przepływu jest czas. Przepływ uznaje się za ustalony (ang. steady flow), jeżeli na określonym odcinku rzeki lub kanału nie zmienia się w czasie jego natężenie i związane z tym inne parametry hydrauliczne, takie jak głębokość i średnia prędkość przepływu. Z przepływem nieustalonym (ang. unsteady flow) mamy do czynienia, gdy natężenie przepływu, głębokość i prędkość średnia zmieniają się w czasie. Przykładem przepływu nieustalonego jest przejście fali powodziowej wzdłuż odcinka koryta rzecznej lub przez budowlę hydrotechniczną<sup>12</sup>. Ruch ustalony w zasadzie nie występuje w rzeczywistości. Z uwagi na charakter i cel analiz powodziowych, zdecydowanie częściej rekomendowany jest ruch nieustalony, aby jak najlepiej ująć zmienność przepływów i reakcję zlewni/sieci lub odbiornika na te przepływy.

### 1.3.5. Przebieg prac analitycznych

Proces budowy modelu, jak i samego modelowania, można podzielić na kilka etapów:



Szczegóły w zakresie niezbędnych do modelowania danych, jak i samego procesu ich przygotowania i przeprowadzenia analiz modelowych, przedstawiono w części metodycznej Poradnika (Rozdziały [6](#), [7](#) i [8](#)).

## 2. Wody opadowe w mieście - jak nimi zarządzać?

Powodzie, podtopienia, jak również okresy suszy występują w miastach coraz częściej. Z uwagi na lokalny charakter problemu, władze samorządowe kwestie te muszą porządkować we własnym zakresie. Wody opadowe jeszcze do niedawna traktowane jako ścieki, teraz stanowią ważny zasób w całym obiegu wody i kluczowy element ekosystemów miejskich. Proces porządkowania kwestii zagospodarowania wodami opadowymi jest zwykle czasochłonny. Niezwykle ważne jest kompleksowe podejście. Często reaguje się ad hoc na pojawiające się problemy, rozwiązując je punktowymi inwestycjami lub zmianami w zagospodarowaniu. Jednakże miasto to jeden ekosystem i fakt rozwiązania problemu w jednym miejscu, może przenieść go gdzie indziej. Nie mając pełnej informacji na temat skali problemu na obszarze całego miasta, można podjąć złe decyzje, np. zainwestować środki w działania, które już za kilka lat będą musiały być ponownie realizowane. Poza tym, powinno się podchodzić do problemu szerzej, aniżeli z perspektywy wyłącznie problemów z nadmiarem wody i dobierać rozwiązania, które wspierać będą zarówno ochronę przed powodzią, jak i suszą w mieście.

Jak postępować w kwestii zagospodarowania wód opadowych? Szczegóły, krok po kroku, przedstawiono poniżej.

### Identyfikacja skali problemu - obszary zagrożone wodami opadowymi

Pierwsze i najważniejsze jest zidentyfikowanie problemu i określenie jego skali. Zdarzenia historyczne dostarczają pewnej informacji w zakresie zagrożenia, natomiast nie definiują go kompletnie, gdyż warunki się zmieniają, zarówno w zakresie zagospodarowania przestrzennego, jak i warunków meteorologicznych. Brak powodzi lub podtopień na danym obszarze w przeszłości, nie gwarantuje jego bezpieczeństwa w przyszłości. Dlatego identyfikację zagrożenia powodzią i podtopieniem wykonuje się dla obszaru całego miasta. W tym zakresie warto wykonać tzw. screening poprzez wykorzystanie informacji o powierzchni terenu i potencjalnym intensywnym opadzie. Ta dość prosta metoda pozwala uzyskać jednolite dla całego obszaru wyniki i daje przestrzeń do dalszych analiz. Szerzej o konkretnych propozycjach metod i podejściu do tych analiz zostało opisane w dalszej części poradnika.

### Identyfikacja ryzyka

Jeśli znamy już skalę problemu na poziomie całego miasta, powinno się zidentyfikować ryzyko powodziowe, t.j. ocenić potencjalne konsekwencje w zakresie przede wszystkim strat w mieniu, infrastrukturze lub środowisku, ograniczeniu dostępności szlaków komunikacyjnych lub wystąpieniu innych istotnych negatywnych konsekwencji dla ludzi lub gospodarki.

### Identyfikacja obszarów problemowych wymagających interwencji

Identyfikacja ryzyka pozwoli na wytypowanie obszarów najbardziej problemowych. Dostępne analizy wykazują, że zwykle miejsc problemowych w obszarze średniej wielkości miasta, takiego jak Nowy Sącz, otrzymuje się setki. Z uwagi na limity budżetowe wskazana jest priorytetyzacja wyników, tak aby sklasyfikować obszary i wyłonić te wymagające najpilniejszej interwencji. Kryteriów oceny może być wiele, powinny być ustalane indywidualnie, z uwagi na warunki lokalne i potrzeby w danym mieście. Do przeprowadzenia rzetelnej analizy wielokryterialnej wymagane są zwykle dodatkowe dane oraz badania, choćby w zakresie planowanego zagospodarowania przestrzennego czy weryfikacji danych od Państwowej Straży Pożarnej.

### Planowanie i analiza skuteczności proponowanych działań

Do tego momentu Poradnik przedstawia proponowane podejście metodyczne i konkretne wskaźniki. Jednak na tym działania w zakresie zagospodarowania wód opadowych oczywiście się nie kończą. W kolejnych akapitach przedstawiono dalsze działania możliwe do podjęcia przez miasta, z wykorzystaniem uzyskanych w wyniku analiz informacji.

Kolejny krok to identyfikacja działań minimalizujących problem i analiza ich skuteczności. I nie chodzi tu tylko o kwestie hydrauliczne czy hydrologiczne, ale w szerokim ujęciu – także finansowym, środowiskowym, gospodarczym. Dlatego tak ważne jest, żeby rozpatrywać obszar miasta w szerszym ujęciu i weryfikować wpływ proponowanych rozwiązań, nie tylko na lokalne małe zlewnie, ale także te sąsiadujące. Proponowane działania należy ocenić w analizach wielokryterialnych i kosztów-korzyści, tak aby dobór rozwiązań był optymalny.

Aby działać kompleksowo przydatne jest opracowanie dla miast planów lub programów działań, obejmujących planowane budowy, rozbudowy i modernizację istniejącej sieci kanalizacji i zielono-błękitnej infrastruktury czy zmiany zagospodarowania przestrzennego. Dobrze wykonany plan, zawierający stosowną analizę ekonomiczną i środowiskową, może z powodzeniem funkcjonować przez wiele lat i jedynie w razie potrzeby być aktualizowany.

### Wdrożenie działań - realizacja inwestycji

Realizacja działań to zdecydowanie najtrudniejszy element całego procesu, najbardziej kosztochłonny, ale też najważniejszy, gdyż zbliżający nas do rozwiązania problemu. Największe wyzwanie w dzisiejszych czasach dla wielu miast, to dostępność środków finansowych na zabezpieczenie kluczowych działań statutowych swoich jednostek. Środki własne zwłaszcza w mniejszych miastach są ograniczone, dlatego tak cenne są inne dostępne środki, przede wszystkim środki europejskie. Programy



operacyjne od lat ukierunkowane są na walkę ze zmianami klimatu i zwiększeniem adaptacji do tychże zmian, w ramach których zagospodarowanie wód opadowych i wdrażanie błękitno-zielonej infrastruktury wpisuje się idealnie. Oczywiście jak dla wszystkich ograniczonych do konkretnych kwot funduszy, programy operacyjne mają określone kryteria oceny wniosków o dofinansowanie, pozwalające je rzetelnie ocenić. Co istotne w zakresie wniosków związanych z zagospodarowaniem wód opadowych ważna jest, w części analitycznej, m.in. identyfikacja stanu istniejącego, potwierdzenie wykonania bilansu wód opadowych, wykonania modeli hydrologicznych, wykazania optymalizacji zagospodarowania wód opadowych. W części technicznej istotne jest wykazanie, iż projekt i proponowana zielono-niebieska infrastruktura oparte są na przyrodzie, zatrzymują i retencjonują wodę w zlewniach miejskich, ponownie wykorzystują zebraną wodę, a obiekty wykazują wielofunkcyjność. W bieżącym okresie finansowania istotne jest także zachowanie zgodności z miejskimi planami adaptacji do zmian klimatu. Podsumowując, im lepiej przygotowany projekt/koncepcja, tym większe szanse na uzyskanie dofinansowania. Sam proces inwestycyjny przebiega w określonym porządku prawnym, regulowanym przez Prawo budowlane.

Problem powodzi opadowych i konieczności retencjonowania wody jest istotny nie tylko w kwestii ilościowej, jednak również w kwestii jakościowej. Aktualizowana obecnie Dyrektywa Ściekowa zwiększa nacisk na planowanie i kontrolowanie odprowadzanych z wodami opadowymi zanieczyszczeń. Identyfikacja zagrożenia i konsekwencji dla środowiska, jakie niesie za sobą zrzut ścieków poburzowych szczególnie w przypadku, kiedy mamy do czynienia z kanalizacją ogólnospławną jest kluczowa. Dla organów wydających pozwolenia i kontrolujących posiadane przez użytkowników zgody i pozwolenia także cenne są rzetelnie przygotowane wnioski, gdyż z pewnością ułatwiają proces samego wydawania pozwolenia, a także wskazywania konkretnych wytycznych monitorujących nałożone ograniczenia wodnoprawne. W dobie nasilających się zdarzeń ekstremalnych, wiele z wydanych przed laty pozwoleń przestaje być realnych do dotrzymania (przede wszystkim w zakresie ilości zrzutów przez przelewy burzowe).

# DOSTĘPNE METODY I NARZĘDZIA



### 3. Przegląd metod oraz narzędzi wykorzystywanych do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi

#### 3.1. Przegląd metod do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi

W literaturze polskiej i zagranicznej znaleźć można wiele opracowań, publikacji, wyników projektów związanych z wyznaczaniem obszarów zagrożonych wodami opadowymi. W ramach projektu dokonano przeglądu opracowań i publikacji europejskich, jak również z Azji i Ameryki. Za najbardziej znaczące uznano opracowania z Wielkiej Brytanii, Austrii, Niemiec oraz Polski. Poniżej zestawiono kluczowe metody, wraz z istotnymi elementami różnicującymi.

Tabela 1 Zestawienie metod do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi

Metoda	Niezbędne dane	Zalety	Wady	Obszar zastosowania
Metoda uproszczona z wykorzystaniem NMT	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numeryczny Model Terenu,</li> <li>• Opcjonalnie, lokalizacja przepustów.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza stosunkowo szybka i prosta do wykonania,</li> <li>• Do przeprowadzenia analizy konieczna niewielka ilość danych,</li> <li>• Analiza możliwa do wykonania na darmowym oprogramowaniu,</li> <li>• W Wariancie podstawowym, bez uwzględniania przepustów, analizę można wykonać wyłącznie z wykorzystaniem NMT, dostępnego w zasobach GUGiK.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza wskazuje jedynie obszary bezodpływowe,</li> <li>• Metoda statyczna – nie ma możliwości przeprowadzenia symulacji,</li> <li>• Metoda nie uwzględnia objętości opadu, zakłada wypełnienie obszarów bezodpływowych,</li> <li>• Nie uwzględnia wpływu kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej,</li> <li>• Wiarygodność wyników zależna od stopnia zurbanizowania terenu (metoda dostarcza wiarygodnych wyników poza terenami zurbanizowanymi i mniej reprezentatywnych wyników w terenach zurbanizowanych).</li> </ul>	<p>Metoda możliwa do zastosowania dla opracowań o dużym stopniu ogólności, ogólnych strategii i koncepcji.</p> <p>Przydatna do wstępnej identyfikacji miejsc potencjalnie problematycznych.</p> <p>Nie jest rekomendowana w przypadku konieczności otrzymania dokładnych wyników.</p>
Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numeryczny Model Terenu,</li> <li>• Informacje o pokryciu terenu (np. BDOT10k), Dane opadowe,</li> <li>• Opcjonalnie, lokalizacja krawężników, murków, przelewów, przepustów, mostów itp.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niezbędne dane w dużej mierze są ogólnodostępne (wymagają jednak modyfikacji),</li> <li>• Symulacja dynamiczna (za pomocą tej metody można oszacować głębokości zalania w zależności od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu oraz czasu jego trwania),</li> <li>• Dokładne odwzorowanie spływu wód opadowych po terenie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• Nie uwzględnia wpływu kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej.</li> </ul>	<p>Metoda ta nadaje się do zastosowania w przypadku konieczności otrzymania możliwie jak najdokładniejszych wyników w obszarach, w których nie ma kanalizacji ogólnospławnej czy deszczowej.</p> <p>Wyniki tej metody w obszarach, w których występuje kanalizacja ogólnospławna czy deszczowa mogą być jednak zawyżone, ze względu na brak odzwierciedlenia jej w modelu.</p>

Metoda	Niezbędne dane	Zalety	Wady	Obszar zastosowania
Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D i z uwzględnieniem wpływu działania istniejącej sieci kanalizacji deszczowej w sposób uproszczony	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numeryczny Model Terenu,</li> <li>• Informacje o pokryciu terenu (np. BDOT10k),</li> <li>• Dane opadowe,</li> <li>• Przebieg sieci kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej,</li> <li>• Opcjonalnie, lokalizacja krawężników, murków, przelewów, przepustów, mostów itp.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Niezbędne dane w dużej mierze są ogólnodostępne (wymagają jednak modyfikacji),</li> <li>• Symulacja dynamiczna (za pomocą tej metody można oszacować głębokości zalania w zależności od prawdopodobieństwa wystąpienia opadu oraz czasu jego trwania),</li> <li>• Dokładne odwzorowanie spływu wód opadowych po terenie,</li> <li>• Uwzględnienie wód opadowych odprowadzanych do kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• Wymaga posiadania komercyjnego oprogramowania,</li> <li>• Kanalizacja uwzględniona jedynie w sposób uproszczony.</li> </ul>	Metoda ta dobrze nadaje się do przeprowadzenia symulacji w obszarach, w których występuje kanalizacja ogólnospławna czy deszczowa, a pełne modelowanie sieci nie jest konieczne, ponieważ nie obserwuje się wylewów spowodowanych przeciążeniem kanalizacji deszczowej
Metoda szczegółowa z wykorzystaniem modelu 1D + 2D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Numeryczny Model Terenu,</li> <li>• Informacje o pokryciu terenu (np. BDOT10k),</li> <li>• Dane opadowe,</li> <li>• Szczegółowe dane dotyczące sieci kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej (średnice/ wymiary odcinków, rzędne początków i końców odcinków, materiał odcinków, lokalizacja i średnica studni, lokalizacja i parametry obiektów na kanalizacji itd.),</li> <li>• Opcjonalnie, lokalizacja krawężników, murków, przelewów, przepustów, mostów itp.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokładne odwzorowanie spływu/ rozptyłu wód opadowych po terenie, wpływu i ewentualnego wypływu wód opadowych z kanalizacji,</li> <li>• Pełne modelowanie hydrauliczne kanalizacji,</li> <li>• Największa dokładność wyników ze wszystkich dostępnych metod.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• Wymaga posiadania komercyjnego oprogramowania,</li> <li>• Wymaga bardzo dużej ilości danych,</li> <li>• Wymaga opracowania i przypisania parametrów zlewni hydrologicznych ciężących do wpustów kanalizacyjnych,</li> <li>• dłuższy czas symulacji.</li> </ul>	<p>Metoda z wykorzystaniem modelu 1D + 2D jest najdokładniejszą ze wszystkich metod. Jej zastosowanie rekomendowane jest tam, gdzie wymagane jest jak najwierniejsze odzwierciedlenie rzeczywistości.</p> <p>Warunkiem otrzymania wyników o wysokiej dokładności jest posiadanie danych wsadowych wysokiej jakości.</p>

źródło: opracowanie własne

Każda z opisanych wyżej metod cechuje się inną dokładnością oraz innymi niezbędnymi danymi potrzebnymi do jej przeprowadzenia. Metoda uproszczona z wykorzystaniem NMT rekomendowana jest do wstępnej identyfikacji miejsc potencjalnie problematycznych. Metoda ta znajduje zastosowanie w przypadku opracowań o dużym stopniu ogólności, ogólnych strategii i koncepcji. Jest stosunkowo szybka w wykonaniu, wymaga niewielkiej ilości danych i możliwa jest do opracowania na darmowym oprogramowaniu. W przypadku konieczności uzyskania możliwie jak najdokładniejszych wyników rekomenduje się zastosowanie metody uproszczonej z wykorzystaniem modelu 2D i z uwzględnieniem wpływu działania istniejącej sieci kanalizacji deszczowej w sposób uproszczony (jeśli pełne modelowanie kanalizacji deszczowej nie jest konieczne, ponieważ nie obserwuje się wylewów spowodowanych przeciążeniem kanalizacji) lub metody szczegółowej z wykorzystaniem modelu 1D + 2D (jeśli występują wylania spowodowane przeciążeniem kanalizacji deszczowej).

Metoda uproszczona bazująca na obszarach bezodpływowych wyznaczonych na podstawie NMT jest metodą najmniej czasochłonną i wymagającą najmniejszej ilości danych ze wszystkich opisanych metod, ale również jest metodą najmniej dokładną. Nie jest to jednak podejście rekomendowane, także z uwagi na fakt, że metoda ta jest metodą statyczną – nie ma możliwości przeprowadzenia symulacji. W metodzie tej nie uwzględnia się opadu i jego spływu po powierzchni terenu. Obszary bezodpływowe wyznaczane są jedynie w oparciu o ukształtowanie terenu, co w efekcie daje możliwość określenia jedynie maksymalnej głębokości wody, zgodnej z ukształtowaniem terenu. Nie jest możliwe określenie zasięgu zalania i głębokości wody dla konkretnego prawdopodobieństwa wystąpienia opadu czy czasu jego trwania. Określenie obszarów intensywnego spływu, również opiera się jedynie o ukształtowanie terenu i jego spadki bez uwzględnienia prędkości przepływu czy szorstkości terenu, po którym woda opadowa spływa.

Metoda ta nie została wykorzystana na potrzeby realizacji prac analitycznych dla wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla obszarów pilotażowych: Nowy Sącz i Puławy. Pozostałe opisane metody zastosowano i przetestowano w ramach zrealizowanych prac analitycznych.

### 3.2. Przegląd dostępnego oprogramowania do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi w poszczególnych wariantach

Na rynku istnieje wiele dostępnych narzędzi informatycznych wspierających proces wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Oczywiście, w zależności od poziomu szczegółowości analiz są to różne narzędzia.

Tabela 2 Zestawienie dostępnych narzędzi wspierających proces wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi

Metoda	Dostępne narzędzie komercyjne	Dostępne narzędzie open-source
Metoda uproszczona z wykorzystaniem NMT	ArcGIS, ScalgoLive	QGIS
Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D	MIKE21, MIKE+, InfoWorks, Flood Modeller, TUFLOW, CCHE2D	HEC-RAS
Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D i z uwzględnieniem wpływu działania istniejącej sieci kanalizacji deszczowej w sposób uproszczony	MIKE21, MIKE+, InfoWorks	HEC-RAS
Metoda szczegółowa z wykorzystaniem modelu 1D + 2D	MIKE Urban+MIKE21, MIKE+, InfoWorks, PCSWMM	Brak dostępnych narzędzi open-source

źródło: opracowanie własne

Szczegółowej analizie poddano kilka dostępnych narzędzi, umożliwiających wyznaczenie obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Informacje i parametry opisujące narzędzia, przedstawiono według wybranych do dalszych analiz metod, pod względem istotnych dla procesu kryteriów.

Tabela 3 Zestawienie kluczowych funkcjonalności i założeń wybranych narzędzi wspierających wyznaczenie obszarów zagrożonych wodami opadowymi

Narzędzie	Model hydrauliczny	Model hydrologiczny	Złożoność danych wejściowych	Ruch	Integracja z ciekami otwartymi	Integracja z GIS	Przeglądanie wyników	Wsparcie dla użytkownika
MIKE+	1D, 1D+2D	Dostępny w oprogramowaniu	Zależna od zakresu prowadzonych analiz i wymaganej dokładności wyników	Ustalony i nieustalony	TAK	Pełna integracja z GIS (edycja modelu w GIS, import, eksport)	W oprogramowaniu do modelowania lub w darmowej przeglądarce wyników Mike View	Tak, w szerokim zakresie
InfoWorks	1D, 1D+2D	Dostępny w oprogramowaniu	Zależna od zakresu prowadzonych analiz i wymaganej dokładności wyników	Ustalony i nieustalony	TAK	Brak pełnej integracji z GIS (import, export)	W oprogramowaniu do modelowania	Tak, w szerokim zakresie
Flood Modeller	1D, 1D+2D	Dostępny w oprogramowaniu	Zależna od zakresu prowadzonych analiz i wymaganej dokładności wyników	Ustalony i nieustalony	TAK	Brak pełnej integracji z GIS (import, export)	W oprogramowaniu do modelowania	Tak, w szerokim zakresie
HEC-RAS	1D, 1D+2D	Brak – konieczne przeprowadzenie obliczeń w osobnym oprogramowaniu, np.: HEC-HMS	Zależna od zakresu prowadzonych analiz i wymaganej dokładności wyników, ale niższa złożoność niż w pozostałych programach z uwagi na brak możliwości uwzględnienia w obliczeniach sieci kanalizacyjnej	Ustalony i nieustalony	TAK	Brak pełnej integracji z GIS (import, export)	W oprogramowaniu do modelowania	Tak, ale ograniczone z uwagi na fakt, że jest to oprogramowanie open-source

W poniższej tabeli (Tabela 4) przedstawiono podstawowe wady i zalety zastosowania oprogramowania komercyjnego oraz oprogramowania open-source.

Tabela 4 Zestawienie wad i zalet oprogramowania komercyjnego oraz oprogramowania open-source

Rodzaj oprogramowania	Zalety	Wady
Oprogramowanie komercyjne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oprogramowanie posiadające bardzo wiele zaawansowanych funkcji podnoszących dokładność analiz i zakres uzyskanych wyników</li> <li>• Wsparcie użytkowników w szerokim zakresie</li> <li>• Oprogramowanie testowane i stale rozwijane</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konieczne poniesienie kosztów</li> <li>• Oprogramowanie zbyt zaawansowane, aby możliwe było samodzielne przeprowadzenie analiz bez odpowiedniego przeszkolenia</li> </ul>
Oprogramowanie open-source	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Szerokie grono użytkowników z możliwością wymiany wiedzy i doświadczenia</li> <li>• Nie wymaga ponoszenia kosztów</li> <li>• Możliwe samodzielne przeprowadzenie analiz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brak możliwości przeprowadzenia zintegrowanego modelowania sieci rzecznej, kanalizacyjnej i spływu powierzchniowego</li> <li>• Mniejsza funkcjonalność w zakresie prowadzonych analiz i przeglądania wyników</li> <li>• Brak pełnego wsparcia dla użytkowników</li> <li>• Oprogramowanie w dużej mierze testowane przez użytkowników, zatem mogą pojawiać się błędy w działaniu</li> </ul>

## 4. Wariantowe podejście do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi

W obecnych czasach i dostępności do różnorodnych narzędzi informatycznych, wspierających prace analityczne jest wiele możliwości i metod pozwalających wyznaczyć obszary zagrożone wodami opadowymi. Także samą analizę można przeprowadzić na różne sposoby i poziomy szczegółowości, w zależności od dostępnych danych, potrzeb w zakresie wyników lub celu opracowania. Należy pamiętać, że nie zawsze uproszczone analizy są gorsze od tych najbardziej zaawansowanych, zależy to od celu, w jakim realizujemy naszą analizę. Metoda uproszczona pozwala w pierwszej kolejności na identyfikację miejsc problemowych na obszarze miasta, w których w dalszej kolejności prowadzone byłyby pogłębione prace analityczne.

W poradniku zaprezentowano 3 różne warianty (w zależności od potrzeb oraz posiadanych danych), prac analitycznych.



Wariant 1 jest wariantem najbardziej uproszczonym i polega na wyznaczeniu obszarów zagrożonych wodami opadowymi poprzez wskazanie obszarów bezodpływowych w wyniku dwuwymiarowego modelowania hydrodynamicznego (2D), ale bez uwzględnienia sieci kanalizacji deszczowej.

Jest to wariant, który nie wymaga znacznej ilości danych.

Wariant 2 jest rozszerzeniem Wariantu 1. Polega również na identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi w wyniku dwuwymiarowego modelowania hydrodynamicznego (2D), jednak zakłada uwzględnienie wpływu działania sieci kanalizacyjnej w sposób uproszczony. W ramach tego wariantu sieć kanalizacji deszczowej nie podlega modelowaniu, a jedynie uwzględnia się w modelu ilość wód opadowych, które tą kanalizacją mogą odpływać. Wariant ten wymaga większej ilości danych niż Wariant 1, w tym ogólne dane dotyczące istniejącej kanalizacji deszczowej.



Wariant 3 polega na identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi z uwzględnieniem działania istniejącej pełnej sieci kanalizacyjnej. Obszary wyznacza się w oparciu o modele zintegrowane (1D+2D), składające się z dwuwymiarowego modelu hydrodynamicznego (2D) dla powierzchni terenu oraz jednowymiarowego modelu (1D) sieci kanalizacyjnej. Do skalibrowania takich modeli potrzebne są pomiary napętnienia i przepływu w sieci. Wariant ten wymaga dużo większej ilości danych niż pozostałe warianty, ale uzyskane wyniki są najdokładniejsze.

W dalszej części opracowania prezentowane będą szczegółowe wytyczne metodyczne dla wskazanych wyżej wariantów – rozdziały [6](#), [7](#) i [8](#). Wytyczne zostały opracowane w oparciu o analizy przeprowadzone w pilotażowych miastach: Nowym Sączu i Puławach.



# NIEZBĘDNE DANE WEJŚCIOWE



## 5. Dane wykorzystywane do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi w poszczególnych wariantach

Istotą dobrze wykonanego modelu hydrodynamicznego jest przygotowanie bazy danych wejściowych. Uzupełnienie danych w sposób szczegółowy jest gwarantem właściwych wyników modelu. Poniżej przedstawiono ogólne zestawienie niezbędnych danych do wykonania poszczególnych wariantów.

Tabela 5 Zestawienie niezbędnych do opracowania modeli danych wejściowych dla poszczególnych wariantów

Lp.	Dane	Wariant	Możliwe źródła danych	Inne informacje (dokładność, komentarz)
1	Numeryczny model terenu (NMT) (podrozdział 5.1)	1, 2, 3	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym <a href="https://mapy.geoportal.gov.pl/">https://mapy.geoportal.gov.pl/</a>	Zazwyczaj rozdzielczość 1m, błąd średni wysokości <0,2m, aktualność różna w zależności od obszaru
2	Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k) (podrozdział 5.2)	1, 2, 3	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym <a href="https://mapy.geoportal.gov.pl/">https://mapy.geoportal.gov.pl/</a>	Treść i szczegółowość bazy BDOT10k odpowiada w ogólności tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000
3	Ortofotomapy (podrozdział 5.3)	1, 2, 3	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym <a href="https://mapy.geoportal.gov.pl/">https://mapy.geoportal.gov.pl/</a>	Ortofotomapy w RGB. Większość ortofotomapy dostępnej w CZGiK jest zrealizowana w standardzie 25 x 25 cm, a na terenach miast w standardzie 10 x 10 cm oraz mniejszym
4	Dane o opadach prawdopodobnych (podrozdział 5.4)	1, 2, 3	Projekt PMAxTP, IMGW-PIB <a href="https://klimat.imgw.pl/opady-maksymalne/">https://klimat.imgw.pl/opady-maksymalne/</a>	Dane bezpłatne, projekt zrealizowany w 2022 r.
			Polski Atlas Natężeń Deszczów (PANDa) <a href="https://retencja.pl/aplikacje/panda/">https://retencja.pl/aplikacje/panda/</a>	Dane płatne, projekt zakończony w 2020 r.
			Opracowane modele opadów o zasięgu lokalnym	Dla niektórych obszarów/miast w Polsce są dostępne publikacje naukowe, w których wyznaczono modele opadów
			Opracowanie własne w oparciu o dane opadowe	Wymagane rzetelne dane opadowe z wielolecia
5	Dane o sieci kanalizacji deszczowej i kanalizacji ogólnospławnej (podrozdział 5.5 i 5.8)	2, 3	Mapa zasadnicza, dostępna w starostwach powiatowych	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
			Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu (GESUT), dostępna w starostwach powiatowych <a href="https://mapy.geoportal.gov.pl/">https://mapy.geoportal.gov.pl/</a>	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
			Dane o sieci kanalizacyjnej dostępne w urzędach miast i gmin lub u lokalnych administratorów wodociągów i kanalizacji	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
6	Pomiary napełnienia i przepływu w kanałach oraz pomiary wysokości opadu (podrozdział 5.6)	3	Dedykowane pomiary wykonane w trakcie kampanii pomiarowej	Dodatkowe pomiary wykonywane na potrzeby kalibracji i weryfikacji modelu hydrodynamicznego, uzyskiwane dzięki instalacji przepływomierzy na sieci i deszczomierza na obszarze danej zlewni

Lp.	Dane	Wariant	Możliwe źródła danych	Inne informacje (dokładność, komentarz)
7	Pomiary geodezyjne obiektów infrastruktury kanalizacyjnej (podrozdział 5.7)	3	Dedykowane pomiary wykonane w terenie na potrzeby analiz	Dodatkowe pomiary wykonywane w celu uzyskania lepszej dokładności modelu lub weryfikacji zinwentaryzowanych danych

źródło: opracowanie własne

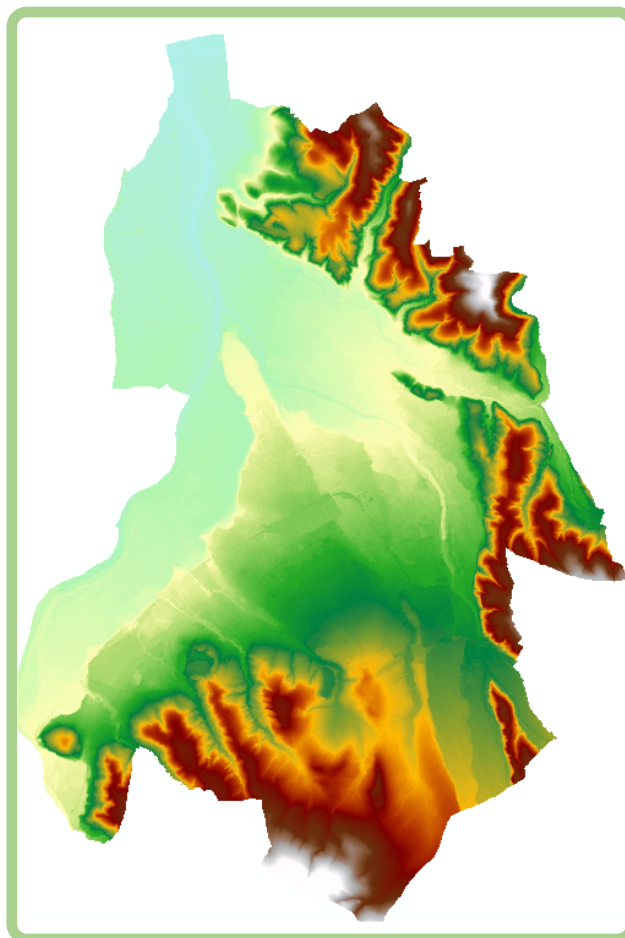
Należy podkreślić, iż w tabeli zestawiono kluczowe dla analiz modelowych informacje, natomiast pełna charakterystyka miasta i ocena ryzyka powodziowego powinna obejmować również inne dostępne źródła danych i informacje, aby uzyskać kompleksową ocenę problemu powodzi opadowych w mieście.

Warto także dodać, iż na etapie prac projektowych zweryfikowano możliwość wykorzystania danych satelitarnych do mapowania powodzi historycznych. Analizowano możliwość wykrycia zasięgów opisanych zdarzeń powodziowych w miastach pilotażowych przy pomocy zdjęć satelitarnych (w dzień wystąpienia zdarzenia oraz dzień po zdarzeniu). Dostępna rozdzielczość i zachmurzenie nie pozwoliły na wiarygodną analizę pozyskanych danych. Zachmurzenie, zdarzenia, które występują nocą lub w warunkach słabego oświetlenia, a także występowanie budynków, dróg, elementów infrastruktury, wpływa na precyzję danych o niskiej rozdzielczości. Występujące cienie, odbicia i przysłonięcia mogą wprowadzać zakłócenia w mapowaniu powodzi. Niska rozdzielczość utrudnia rozróżnienie tych cieni i precyzyjne zobrazowanie konkretnych obiektów. Prowadzi to do zniekształceń i utraty informacji. Podjęte próby w ramach niniejszego projektu nie przyniosły oczekiwanych rezultatów, jednak rozwój i dostęp do coraz lepszej rozdzielczości zdjęć satelitarnych, pozostawia nadzieję, iż w niedalekiej przyszłości dane te będą dostępne także dla obszarów zurbanizowanych. Szczegółowe informacje dotyczące poszczególnych kategorii danych wskazanych w tabeli zostały przedstawione w poniższych podrozdziałach.

## 5.1. Dane dotyczące powierzchni terenu

Podstawowym źródłem informacji na temat powierzchni terenu jest numeryczny model terenu (NMT), dotyczy to każdego z analizowanych wariantów. Zdarza się, iż dla obszaru opracowania dostępne są dane z różnych lat/okresów, warto je wówczas zweryfikować. Może się bowiem okazać, że nowsze dane w konkretnym obszarze nie będą lepsze, z uwagi np. na występowanie w trakcie pomiarów robót ziemnych (wykopy, nasypy), dla których teren docelowo zostanie przywrócony do stanu pierwotnego. W takim przypadku lepsze okazuje się nieco starsze NMT lub konieczna jest modyfikacja nowszego NMT. Dane NMT na potrzeby analiz każdorazowo powinny zatem zostać zrewidowane i w określonych obszarach zmodyfikowane. Modyfikacja numerycznego modelu terenu na potrzeby identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi może polegać np. na obniżeniu rzędnych w miejscu występowania dróg z krawężnikami oraz uwzględnieniu w numerycznym modelu terenu mostów, przepustów, zakrytych odcinków rowów.

Rysunek 4 Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (NMT)

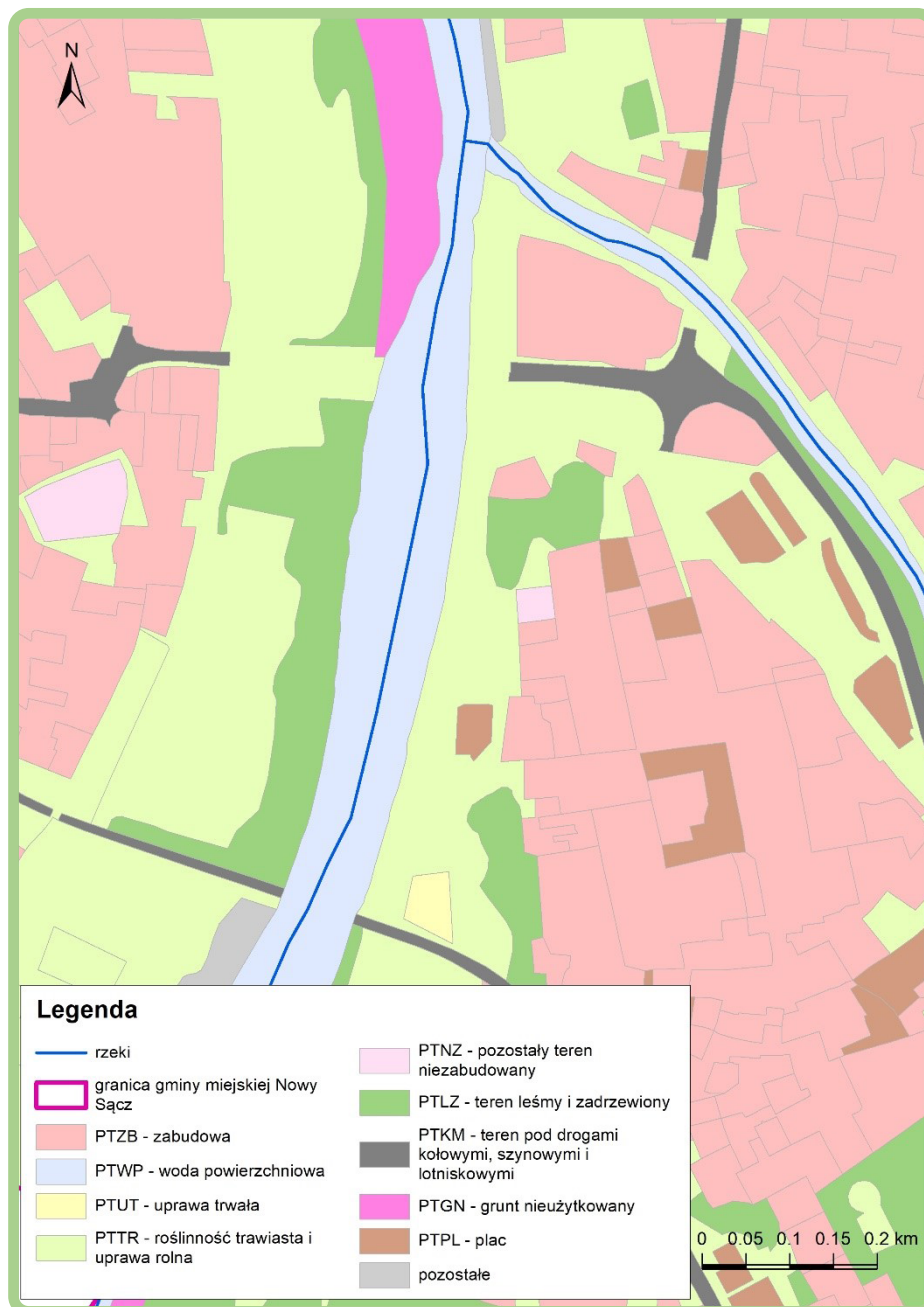


źródło: opracowanie własne

## 5.2. Dane dotyczące zagospodarowania terenu

Podstawowym źródłem informacji o zagospodarowaniu terenu, dotyczącym każdego z analizowanych wariantów jest Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k). BDOT10k to wektorowa baza danych zawierająca lokalizację przestrzenną obiektów topograficznych wraz z ich podstawową charakterystyką opisową. Treść i szczegółowość bazy BDOT10k odpowiada w ogólności tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000. Baza BDOT10k wykorzystywana jest do opracowania mapy szorstkości. Jest to mapa, która zawiera informacje o chropowatości terenu w zależności od zagospodarowania. Informacje z tej mapy wykorzystywane są do obliczenia prędkości przepływu wód opadowych po terenie. Na rysunku poniżej przedstawiono wizualizację bazy BDOT10k dla Nowego Sącza.

Rysunek 5 Przykładowy wizualizacja pokrycia terenu z bazy BDOT10k dla Nowego Sącza



źródło: opracowanie własne

### 5.3. Ortofotomapa

Ortofotomapa jest rastrowym obrazem powierzchni terenu, który powstał w wyniku przetworzenia zdjęć lotniczych lub satelitarnych. W Polsce organem, który jest odpowiedzialnym za prowadzenie bazy danych dotyczącej ortofotomapy na mocy ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne jest Główny Geodeta Kraju. Większość ortofotomapy dostępnej w PZGIK jest zrealizowana w standardzie 25 x 25 cm, a na terenach miast w standardzie 10 x 10 cm oraz mniejszym.

Rysunek 6 Przykładowy fragment ortofotomapy dla Nowego Sącza



źródło: <https://mapy.geoportal.gov.pl/>

## 5.4. Dane opadowe

Dane opadowe są wymagane dla wszystkich analizowanych wariantów. Przygotowanie danych opadowych do modelowania hydrodynamicznego przebiega w dwóch krokach:

1. opracowanie lub pozyskanie danych o opadach maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia (prawdopodobieństwo przewyższenia opadu to parametr dotyczący prawdopodobieństwa wystąpienia deszczu np. dla prawdopodobieństwa wystąpienia opadu równego 50% prawdopodobieństwo przewyższenia opadu będzie wynosiło 0,5),
2. przeprowadzenie rozkładu opadu miarodajnego.

**Opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika, Wybrane zagadnienia metodyczne, natomiast poniżej przedstawiono dostępne źródła danych.**

Dane o opadach maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia można pozyskać jako gotowe wartości z dostępnych źródeł danych: bezpłatnych (projekt PMAxTP) lub płatnych (PANDa), z publikacji naukowych, w których opracowano modele opadów, jeśli takie dane dla danego obszaru są dostępne lub można takie dane opracować w oparciu o rzetelne dane pomiarowe z wielolecia. Dane opadowe z projektu PMAxTP, zrealizowanego przez IMGW-PIB w 2022 r., uzyskano w oparciu o opracowane lokalne modele probabilistyczne dla stu punktów pomiarowych w miarę równomiernie rozłożonych na obszarze Polski, na podstawie zweryfikowanych szeregów czasowych opadów maksymalnych dla różnych przedziałów czasowych z okresu 1986-2015. Źródłem danych była baza danych Rain-Brain, którą wykonano w ramach opracowania i wdrożenia Polskiego Atlasu Natężeń Deszczów (PANDa). Wynikami modelu PMAxTP są wartości maksymalnych opadów o określonym czasie trwania  $t \in \{5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 360, 720, 1080, 1440, 2160, 2880, 4320\}$  (min) i określonym prawdopodobieństwie przewyższenia  $p \in \{99,9, 99,5, 99, 98,5, 98, 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 3, 2, 1, 0,5, 0,3, 0,2, 0,1, 0,05, 0,03, 0,02, 0,01\}$  (%). Dane wynikowe z tego projektu są ogólnodostępne i bezpłatne.

PANDa (Polski Atlas Natężeń Deszczów) to cyfrowa platforma, która zawiera informacje o natężeniach deszczów miarodajnych dla wszystkich miast w Polsce. Atlas PANDa powstał w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 – 2020, w Poddziałaniu 1.1.1 „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”. Został opracowany na podstawie danych opadowych z sieci stu deszczomierzy z 30 lat (1986-2015), obejmuje swoim zasięgiem cały kraj i jest w pełni dostosowany do wymogów praktyki projektowania i modelowania systemów odwodnienia. Odczytywane dla dowolnej lokalizacji wartości natężeń maksymalnych opadów, dla zadanych czasów trwania od 5 do 4320 minut i dla prawdopodobieństw od  $p = 1\%$

do 100%, nie są determinowane przez rejestracje z pojedynczego, najbliższego deszczomierza, ale są efektem modelowania przestrzennych rozkładów opadów występujących w obszarze kilku pobliskich stacji opadowych. Atlas opadów PANDa został wykonany dla rozdzielczości przestrzennej 5 x 5 km, oznacza to, że zawarte w nim dane odzwierciedlają lokalną zmienność opadu, która występuje także w skali jednego miasta. Dane wynikowe z tego projektu są płatne.

Publikacje naukowe, w których opracowano modele opadów powinny spełniać pewne kryteria i wymagania, tak aby były one wiarygodne i użyteczne. Do takich kryteriów można zaliczyć głównie dokładność, zgodność z rzeczywistymi obserwacjami, uwzględnienie czynników atmosferycznych oraz przeprowadzenie procesu walidacji i weryfikacji takiego modelu w celu sprawdzenia jego skuteczności. W publikacjach naukowych, w których opracowano modele opadów ich autorzy przedstawiają szczegółowe informacje na temat przyjętej metodologii, danych wejściowych, procesu walidacji i interpretacji wyników, aby odbiorcy sami mogli ocenić wiarygodność i użyteczność tych modeli.

Do opracowania danych o opadach maksymalnych, o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia, wymagane są rzetelne dane opadowe zebrane przez dłuższy okres czasu. Im więcej danych opadowych, tym bardziej reprezentatywne modele można opracować. Minimalny zalecany okres zbierania danych to co najmniej 30 lat. Zebrane dane opadowe muszą zostać poddane analizie w celu wykrycia błędnych lub niekompletnych danych, a następnie przeprowadzenia korekty ewentualnych anomalii. Jeżeli posiadane dane są w różnych interwałach czasowych to konieczne jest dostosowanie ich do potrzebnego interwału dla analizy opadów maksymalnych. Przygotowane dane powinny zostać poddane analizie statystycznej. Aby wykonać analizę statystyczną należy zastosować różne rozkłady, a następnie na ich podstawie wybrać najlepiej dopasowany.

W przypadku wybranego rozkładu statystycznego należy estymować jego parametry na podstawie danych, co pozwoli na prognozowanie opadów maksymalnych dla określonych prawdopodobieństw i czasów trwania. Do opracowania wykresów intensywności opadu w zależności od czasu trwania i prawdopodobieństwa przewyższenia dla konkretnych okresów powtarzalności można wykorzystać modele opadowe w postaci zależności typu IDF (Intensywność – Częstość – Czas). Na podstawie estymowanych rozkładów statystycznych lub wykresów IDF można obliczyć opady maksymalne dla różnych scenariuszy czasowych i prawdopodobieństw. Opracowane opady maksymalne dla różnych czasów trwania i prawdopodobieństw muszą zostać poddane weryfikacji i walidacji. Należy porównać je z faktycznymi ekstremalnymi opadami jakie miały miejsce w badanym okresie, poddając je analizie statystycznej, która pozwoli ocenić wiarygodność opracowanych modeli.

Do obliczenia opadu miarodajnego najlepiej wykorzystać gotowe dostępne dane. Rekomendowanym jest wykorzystanie modeli probabilistycznych opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia, stanowiące wyniki projektu PMAOTP, zrealizowanego przez IMGW-PIB.

## 5.5. Istotne parametry topologii sieci kanalizacyjnej

Na potrzeby Wariantu 3 wykorzystywana jest pełna informacja o sieci kanalizacyjnej, natomiast w zakresie Wariantu 2 część informacji na temat przepustów i studni również jest wykorzystywana.

Podstawową informacją dla pełnego modelu sieci kanalizacji są dane z jej inwentaryzacji. Poniżej wskazano niezbędne dane do modelowania dla wylotów, studni i odcinków sieci.

Dla wylotów niezbędne dane to:

- rzędna terenu [m],
- rzędna dna [m].

Dla studni niezbędne dane to:

- rzędna terenu [m],
- rzędna dna [m],
- średnica [m], bądź wymiary poziome studni (dla studni o przekroju innym niż kołowy).

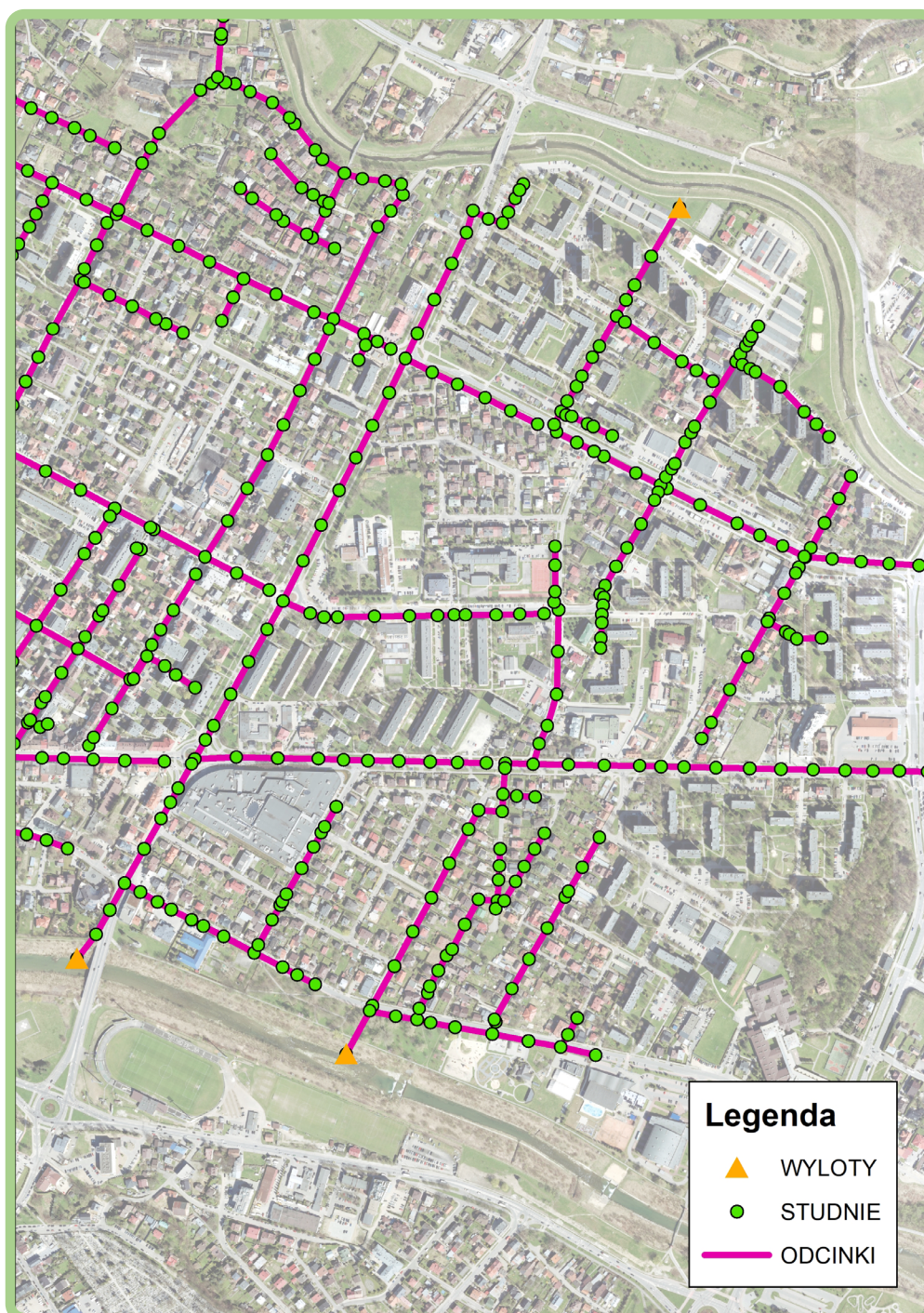


Dla odcinków sieci kanalizacji niezbędne dane to:

- kształt przekroju,
- średnica/wymiar [m],
- rzędna początku odcinka [m],
- rzędna końca odcinka [m],
- długość [m],
- spadek [%] bądź [‰],
- materiał, z jakiego wykonany jest kanał.

W celu wczytania danych do modelu 1D kanalizacji rekomenduje się przygotowanie warstw przestrzennych .shp z wprowadzonymi atrybutami zgodnymi ze wskazanymi powyżej niezbędnymi danymi.

Rysunek 7 Wizualizacja warstw przestrzennych z elementami sieci kanalizacyjne



Do kluczowych elementów, które mogą wpływać na dalsze etapy analiz i wyniki modelowania należą:

- poprawna topologia (powtarzające się błędy to np.: kilka odcinków pomiędzy dwiema studniami jako odcinki niepołączone, kilku studni na jednym odcinku jako odcinki nie podzielone, odcinki zaczynają się lub kończą obok studni),
- poprawne rzędne początków i końców odcinków lub studni (powtarzające się błędy to np.: odcinki poniżej dna studni, odcinki z przeciwnospadkiem, strop odcinków powyżej terenu),
- poprawny kształt przekroju (możliwa sytuacja problematyczna: przyjęcie kształtu kanału jedynie na podstawie wymiarów może spowodować np. przyjęcie dla kanału przekroju jajowego zamiast prostokątnego),
- poprawne wymiary kanału (możliwa sytuacja problematyczna: omyłkowa zamiana szerokości i wysokości dla kanałów o przekroju nietypowym),
- uwzględnienia informacji o renowacji kanału (w trakcie renowacji wymiar oraz kształt kanału mogą ulec zmianie).

Przed przystąpieniem do jakichkolwiek dalszych analiz rekomenduje się, aby sieć kanalizacyjna została skrupulatnie zweryfikowana pod kątem ewentualnych błędów. W przypadku wykrycia nieprawidłowości najdokładniejszym rozwiązaniem są pomiary w terenie. W przypadku braku dostępu do danego obiektu dopuszcza się przeprowadzenie interpolacji na podstawie informacji z obiektów sąsiadujących.

## 5.6. Dane pomiarowe przepływów, napełnień oraz wielkości opadów

Informacje w tym podrozdziale dotyczą wyłącznie Wariantu 3, dla którego przygotowano kompletny model sieci kanalizacyjnej. Dane te umożliwią jego kalibrację i weryfikację.

Kampania pomiarowa, obok pomiarów geodezyjnych, to bardzo ważny element przygotowania wiarygodnego modelu. Z uwagi na brak danych dotyczących napełnienia i przepływu w kanałach oraz danych o wysokości opadu w posiadaniu miast lub przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych, kampania pomiarowa to często jedyne źródło danych, które są niezbędne do kalibracji modelu.

Kampania pomiarowa pozwala na zebranie informacji o danych opadowych zarejestrowanych przez deszczomierze i reakcję punktów pomiaru przepływu i napełnienia na występujące opady. Kampanie zwykle przeprowadza się w okresie wiosennym i jesiennym, kiedy opady są najczęstsze, jednakże zmiana natężenia zjawisk opadowych w ostatnich latach pozwala z powodzeniem przeprowadzać kampanie także w miesiącach letnich, kiedy mamy do czynienia ze zdarzeniami burzowymi znacznie częściej niż w pozostałych miesiącach roku. Z uwagi na specyfikę miesięcy „zimowych” (listopad – marzec), nie zaleca się prowadzenia kampanii w tym okresie. Minimalny czas prowadzenia kampanii pomiarowej to 4 tygodnie, jednakże w przypadku braku intensywnych zjawisk opadowych w danym okresie, wskazane jest wydłużenie tego okresu. Istotne jest, aby w trakcie kampanii uzyskać dane o więcej niż 1 zdarzeniu opadowym, aby móc wybrać dane do kalibracji modelu, nie polegając wyłącznie na 1 wyniku.

Kampanię pomiarową dla sieci kanalizacyjnej przeprowadza się równolegle mierząc napełnienie i przepływ na wybranych odcinkach sieci kanalizacji (z wykorzystaniem kilku przepływomierzy i sond radarowych) oraz wysokość opadu (z wykorzystaniem deszczomierza w reprezentatywnym dla zlewni miejscu). Dane o napełnieniu oraz przepływie wód opadowych zbieranych przez system kanalizacji deszczowej, a także wysokości opadu pomierzonego przez deszczomierze są rejestrowane i gromadzone na potrzeby przeprowadzenia procesu kalibracji i weryfikacji modeli.

Wybór ilości urządzeń pomiarowych jest uzależniony od pożądanego stopnia dokładności modelu. Im więcej punktów pomiarowych tym dokładność modelu będzie wyższa. Rekomenduje się co najmniej jeden punkt pomiarowy na każdej hydraulicznie niepołączonej sieci kanalizacji deszczowej. Pomiary powinny być przeprowadzane w miejscach reprezentatywnych dla sieci kanalizacyjnej analizowanego obszaru. Umiejscowienie punktów pomiarowych powinno zostać tak dobrane, aby możliwa była kalibracja modelu dla obszarów o różnym zagospodarowaniu terenu np. obszary zabudowy jednorodzinnej, wielorodzinnej, przemysłowej itp. Im większy stopień skomplikowania sieci kanalizacyjnej, tym większa ilość punktów będzie potrzebna do przeprowadzenia kalibracji modelu.

Istotne znaczenie przy wyborze lokalizacji punktów pomiarowych ma układ geometryczny sieci kanalizacyjnej. Rekomenduje się wykonywanie pomiarów na prostych odcinkach sieci, aby uniknąć zaburzeń, które mogą być spowodowane przez napływające wody opadowe z innych włączających się odcinków sieci kanalizacyjnej. Istotna jest również dostępność. Niektóre studnie mogą nie być dostępne (tereny prywatne, zasypane lub zaasfaltowane włązy), co uniemożliwi zamontowanie urządzeń pomiarowych.

Zgromadzone na etapie kampanii pomiarowej dane o wielkości opadu oraz dane o przepływach i napełnieniach w kanałach stanowią podstawę do kalibracji modelu. Dane o wielkości opadu wykorzystywane są jako warunek brzegowy modelu, natomiast dane o przepływach i napełnieniach pozwalają na porównanie wyników symulacji z rzeczywistymi warunkami hydraulicznymi panującymi w sieci. Do celów kalibracji modelu okresu bezdeszczowego wykorzystuje się następujące dane:

- profil przepływu (wskaźnik nierównomierności) dla okresu bezdeszczowego z każdego profilu pomiarowego dla kanalizacji ogólnospławnej,
- przepływ i wysokość napełnienia w profilach pomiarowych,
- wielkość przepływu dla okresu bezdeszczowego, wielkość spływu powierzchniowego oraz kształt hydrogramu są uzależnione od wartości i parametrów modelu. Parametry te są określone indywidualnie dla każdego profilu pomiarowego.

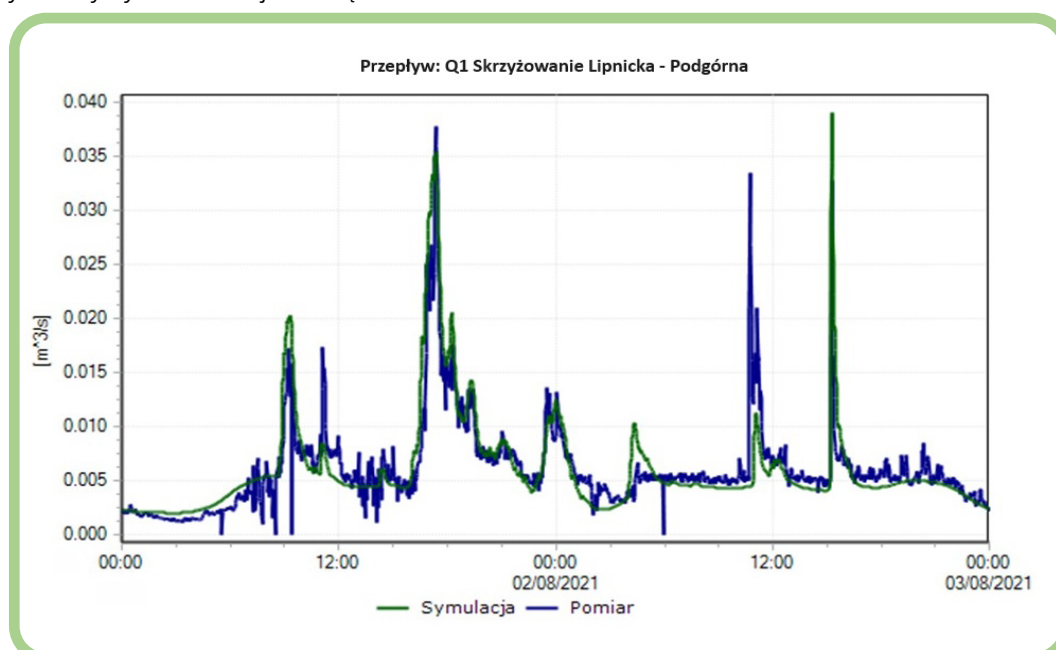
W procesie kalibracji modelu sieci kanalizacyjnej dla okresu deszczowego należy modyfikować parametry modelu opad - odpływ tak, aby uzyskać zbieżności pomiędzy każdym pomierzonym i obliczonym profilem. Parametry hydrologiczne podlegające kalibracji to:

- powierzchnia zlewni,
- procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych,
- procentowy udział powierzchni przepuszczalnych,
- długość zlewni,
- straty początkowe i zwilżenie powierzchni nieprzepuszczalnych i przepuszczalnych,
- parametry Hortona dla powierzchni przepuszczalnych.

Szczegóły procesu kalibracji opisano w [rozdziale 8](#), dotyczącym Wariantu 3.

Poniżej przedstawiono przykładowy wykres kalibracji w narzędziu wykorzystanym do analiz zlewni pilotażowych MIKE+ ([Rysunek 8](#)):

Rysunek 8 Przykładowy wykres kalibracji w narzędziu MIKE+



## 5.7. Inwentaryzacja geodezyjna

Informacje w tym podrozdziale dotyczą wyłącznie Wariantu 3, dla którego przygotowano kompletny model sieci kanalizacyjnej, w którym ważne są dokładne informacje o sieci i jej kluczowych obiektach oraz możliwość ich weryfikacji, korekty w postaci dedykowanych uzupełniających pomiarów, aby uniknąć nieprawidłowości w modelu.

W celu uzupełnienia brakujących informacji dotyczących sieci kanalizacyjnej, przeprowadza się uzupełniające pomiary geodezyjne. Im bardziej prawidłowe odwzorowanie sieci w modelu, tym wyższa jakość wyników, dlatego też uzupełnianie lub często też weryfikacja starych danych jest ważne, gdyż minimalizuje ryzyko nieprawidłowych danych wpływających na parametry hydrauliczne modelowanej kanalizacji. Najczęściej brakujące lub nieprawidłowe dane o sieci dotyczą: danych wysokościowych kluczowych elementów np. studzienek, średnic studzienek, danych o przekroju i wymiarach kanałów czy danych o materiale kanałów.

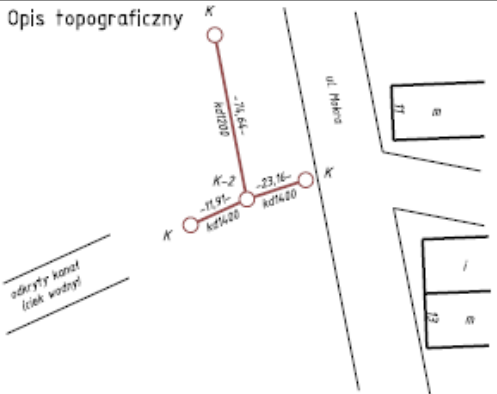
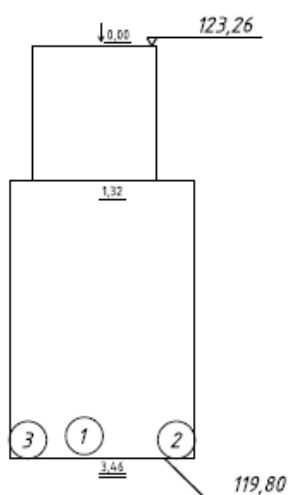
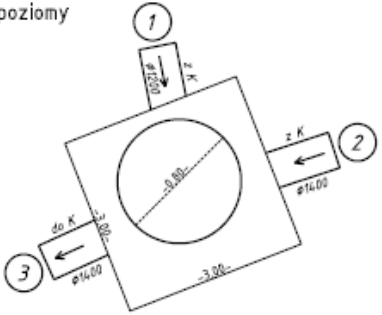
Miejsca wymagające dodatkowych pomiarów zostają wytypowane zwykle po inwentaryzacji sieci kanalizacji w GIS, weryfikacji ich kompletności i ciągłości topologicznej. W przypadku wykrycia nieprawidłowości lub braków danych rekomenduje się wykonanie w tych punktach pomiarów geodezyjnych obejmujących swoim zakresem wszystkie niezbędne dane do modelowania. Dodatkowo rekomenduje się, aby nawet pomimo posiadanego kompletu informacji dla obiektów mających istotny wpływ na parametry hydrauliczne w kanalizacji dokonać pomiarów geodezyjnych sprawdzających. Takie obiekty to: przelewy burzowe, przelewy wewnętrzne (przewały), studnie rozdziału przepływu czy studnie kaskadowe. W zależności od rodzaju obiektu wymagającego pomiaru, zakres danych do pomiaru jest różny. Szczegółowo dane opisujące poszczególne obiekty wprowadzane do modelu opisano w części dotyczącej topologii sieci kanalizacyjnej ([podrozdział 5.1](#) powyżej). W przypadku braku dostępu do danego obiektu dopuszcza się przeprowadzenie interpolacji na podstawie informacji z obiektów sąsiadujących.

Istotną kwestią oprócz samych pomiarów geodezyjnych jest również sposób przekazania danych. Nawet najdokładniejsze pomiary geodezyjne nie będą pomocne, jeśli zostaną przygotowane w sposób uniemożliwiający jednoznaczne określenie, którego obiektu dotyczą oraz jakiej wielkości jest to pomiar. Rekomenduje się, aby pomiary geodezyjne przygotowywane były w postaci pakietów, na które składać się będą następujące elementy:

- karty studni dla studzienek i komór kanalizacyjnych,
- dokumentacja fotograficzna dla zinwentaryzowanych obiektów (3 zdjęcia dla każdej studni/komory kanalizacyjnej),
- pliki SHP z danymi z inwentaryzacji.

Na poniższym rysunku ([Rysunek 9](#)) przedstawiono przykładową kartę studni.

Rysunek 9 Przykładowa karta inwentaryzacyjna studzienki

KARTA INWENTARYZACYJNA STUDZIENKI					sanitarna; deszczowej; ogólnospławnej	
Nr studzienki: K-2		Mapa			EX GEO	
Współrzędne środka pokrywy		7.155.29.13.3.3 (Nr gościa mapy zasadniczej)			Gallusa 12	
X=5697105,88 Y=7567490,81					40-594 Katowice	
Opis położenia studzienki		Puławy, ul. Mokra <small>(inaste, ul., nr domu, pkt, charakterystyczny)</small>			Opis topograficzny 	
Stan techniczny studzienki		dobry <small>(dobry, zły = popękane ściany, brak pokrywy)</small>				
Uwagi		brak <small>(studzienka zalana, zamulona, niedrożna, brak, inne)</small>				
Dane wysokościowe dotyczące studzienki					Rzut poziomy	
Wyszczególnienie	Oznaczenie	Dane H [m] EVRF=2007	Rok wykonania Id, zgł:	Wykonawca prac polewowych prac kanalizacyjnych		
Rzędna góry pokrywy	Hp	123,26	29.08.2023	EX GEO		
Rzędna dna	Hd	119,80	29.08.2023	EX GEO		
Dane dotyczące wlotów i wylotów						
Oznaczenie wg rzutu planowego	Głębokość odniesienia do góry pokrywy	Średnica [mm]	Rodzaj materiału			
1	3,25	1200	Beton			
2	3,46	1400	Beton			
3	3,46	1400	Beton			
Rzut pionowy					Rzut poziomy	
						

źródło: opracowanie własne

Na poniższych rysunkach ([Rysunek 10](#), [Rysunek 11](#)) przedstawiono przykładową dokumentację fotograficzną dla jednej ze studni kanalizacyjnych.

Rysunek 10 Przykładowa dokumentacja fotograficzna dla jednej ze studni – zdjęcie 1



źródło: opracowanie własne

Rysunek 11 Przykładowa dokumentacja fotograficzna dla studni – zdjęcie 2 i 3



źródło: opracowanie własne

## 5.8. Dane techniczne dotyczące obiektów punktowych

Informacje w tym podrozdziale dotyczą wyłącznie Wariantu 3, dla którego przygotowano kompletny model sieci kanalizacyjnej, w którym ważne są dokładne informacje o sieci i jej kluczowych obiektach.

W przypadku, gdy na sieci kanalizacyjnej oprócz studni i odcinków znajdują się inne obiekty, mogące mieć wpływ na parametry hydrauliczne w kanałach należy takie obiekty odwzorować w modelu. Należą do nich:

- przelewy burzowe,
- pompownie,
- zbiorniki retencyjne.

Poniżej wskazano niezbędne dane do modelowania dla przelewów burzowych, pompowni i zbiorników retencyjnych.

Dla przelewów burzowych niezbędne dane to:

- rzędna krawędzi przelewowej [m],
- rzędna dna kanału przy przelewie [m],
- długość krawędzi przelewowej [m],
- usytuowanie przelewu (czołowy, boczny),
- kształt przelewu pozwalający na oszacowanie wydatku przelewu.

Dla pompowni niezbędne dane to:

- rzędną terenu [m],
- rzędna dna komory pompowni [m],
- wymiary komory pompowni [m],
- ilość zainstalowanych pomp [szt.],
- wydajność pomp [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- rzędna załączenia pomp [m],
- rzędna wyłączenia pomp [m],
- sterowanie pracą pomp.

Dla zbiorników retencyjnych niezbędne dane to:

- rzędna stropu [m],
- rzędna dna [m],
- rzędna wlotu i wylotu ze zbiornika [m],
- średnica kanału dopływowego i odpływowego [m],
- wymiary zbiornika [m],
- objętość retencyjna [ $\text{m}^3$ ],
- informacja o sposobie opróżniania zbiornika (pompownia, regulator).

Dane te powinny być podane w dokumentacji projektowej i powykonawczej dla tych obiektów. W przypadku braku części danych rekomenduje się wizję terenową połączoną z ewentualnymi pomiarami geodezyjnymi. Odwzorowanie tych obiektów w modelu może mieć kluczowe znaczenie dla przeprowadzanych analiz, dlatego niezwykle istotne jest posiadanie prawidłowych danych.

# WYTYCZNE METODYCZNE WYZNACZANIA OBSZARÓW ZAGROŻONYCH WODAMI OPADOWYMI





## 6. Wariant 1 - Podejście uproszczone bez uwzględnienia modelu kanalizacyjnego

### 6.1. Scenariusze obliczeniowe

Kluczowe dla wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi jest dobór odpowiednich scenariuszy obliczeniowych. Mając na uwadze cel Wariantu 1, rekomenduje się, aby obliczenia prowadzono w oparciu o dwa scenariusze obliczeniowe:

- opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (raz na 100 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min,
- opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (raz na 10 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min.

Do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi rekomenduje się wykorzystanie prawdopodobieństwa wystąpienia opadu  $p=10\%$  i  $p=1\%$ . W ramach Wariantu 1 nie sugeruje się analizy innych prawdopodobieństw, np. prawdopodobieństwa 20% zgodnego z normą PN-EN 752:2008:2017, która wskazuje wytyczne do przeprowadzenia obliczeń dotyczących wymiarowania kanałów deszczowych, gdyż sieć kanalizacji deszczowej w tym Wariacie nie była uwzględniana.

Do obliczeń rekomenduje się przyjęcie czasu trwania opadu wynoszący 120 min. Czas ten pozwoli na przeprowadzenie analiz dla najmniej korzystnych warunków t.j. osiągnięcia pełnego nasycenia gruntu wodą (wyczerpania się zdolności infiltracyjnych).

### 6.2. Wybór modeli

W ramach prac analitycznych w tym Wariacie modele można przygotować dla różnych siatek obliczeniowych. Poniżej przedstawiono na podstawie prac analitycznych w zlewniach pilotażowych, możliwe podwarianty, różniące się między sobą właśnie zastosowaną siatką obliczeniową – 1.1 oraz 1.2. Pozwoliło to wskazać odpowiednie rekomendacje w zakresie każdej z siatek ([Tabela 6](#)).

Tabela 6 Kluczowe założenia dla poszczególnych podwariantów

Podwariant	Siatka	Inne elementy
1.1	Regularna (tzw. prostokątna)	- Budowa siatki na podstawie NMT - Uwzględnienie stopnia uszczelnienia na mapie szorstkości - Infiltracja uwzględniona w opadzie (opad netto)
1.2	Nieregularna (tzw. flexible mesh)	

źródło: opracowanie własne

Siatka obliczeniowa to podstawowy element modeli 2D umożliwiający przeprowadzenie obliczeń. Stworzenie siatki obliczeniowej polega na podzieleniu całego analizowanego obszaru na małe elementy prostokątne, trójkątne lub prostokątne i trójkątne. Im mniejsze będą owe elementy tym rozwiązanie będzie dokładniejsze, jednocześnie obliczenia będą trwały więcej czasu.

Dla analizowanych zlewni pilotażowych, w Podwariacie 1.1 wykorzystano siatkę regularną prostokątną o rozdzielczości 4x4 m. W Podwariacie 1.2 zastosowano siatkę nieregularną trójkątną o powierzchni trójkąta nie większej niż 16 m<sup>2</sup>. Wielkość trójkątów jest uzależniona od złożoności ukształtowania powierzchni, dlatego dla większości obszarów powierzchnie trójkątów są znacznie mniejsze niż 16 m<sup>2</sup> (średnia powierzchnia trójkąta to ok. 10 m<sup>2</sup>).

Oba podwarianty zakładają zastosowanie mapy szorstkości, aby prawidłowo odzwierciedlić spływ wód opadowych po powierzchni terenu. Mapa szorstkości dla każdego elementu siatki obliczeniowej stanowi podstawę do obliczenia prędkości przepływu. W celu stworzenia mapy szorstkości dla różnego rodzaju zagospodarowania terenu przyjęto odpowiadające im współczynniki Manninga. Współczynnik ten określa jak szorstka jest powierzchnia. Im współczynnik ten jest większy, tym szorstkość powierzchni jest mniejsza, zatem wody opadowe po takim terenie przemieszczają się z większą prędkością. Szczegółowy opis przygo-

towania map szorstkości oraz stosowane współczynniki Manninga znajdują się w dalszej części rozdziału ([podrozdział 6.6](#)), oraz w Załączniku nr 1 do Poradnika.

Oba podwarianty zakładają również uwzględnienie infiltracji poprzez zastosowanie opadu netto.

Opad netto to opad brutto pomniejszony o obliczoną wielkość infiltracji na terenach nieuszczelnionych. Szczegółowy opis znajduje się w dalszej części rozdziału ([podrozdział 6.5](#)).

### 6.3. Siatki obliczeniowe

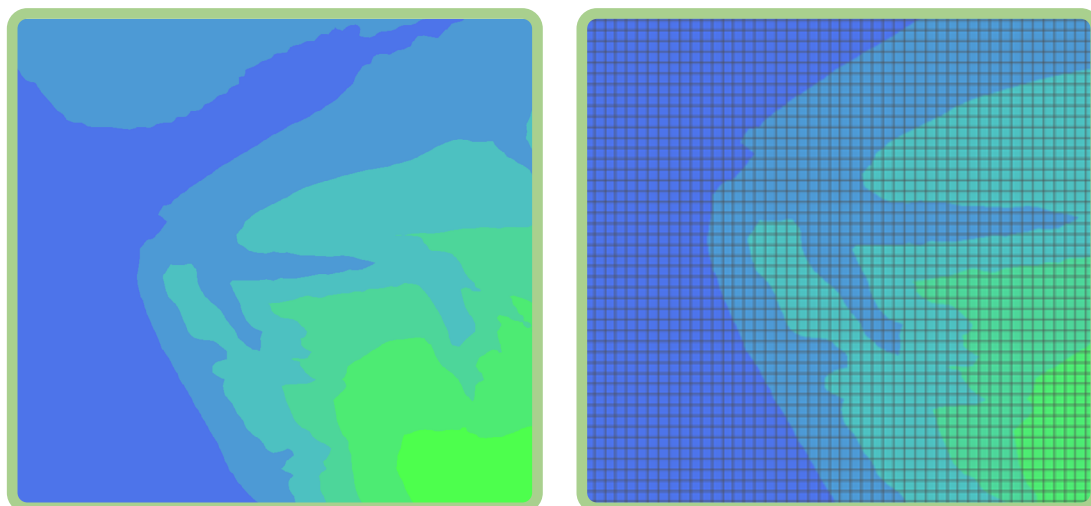
Do modeli 2D można wprowadzić dwa rodzaje siatek obliczeniowych:

- siatkę regularną (tzw. prostokątna),
- siatkę nieregularną (tzw. trójkątna).

Siatka prostokątna (GRID) jest to siatka regularna o zadanej szerokości i długości elementu. W siatce tej każdy jej element jest taki sam – ma takie same wymiary i taką samą powierzchnię.

Elementy prostokątne lepiej odwzorowują obiekty liniowe: drogi, nasypy, rowy, koryta rzek, itp.

Rysunek 12 Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki regularnej (po prawej)



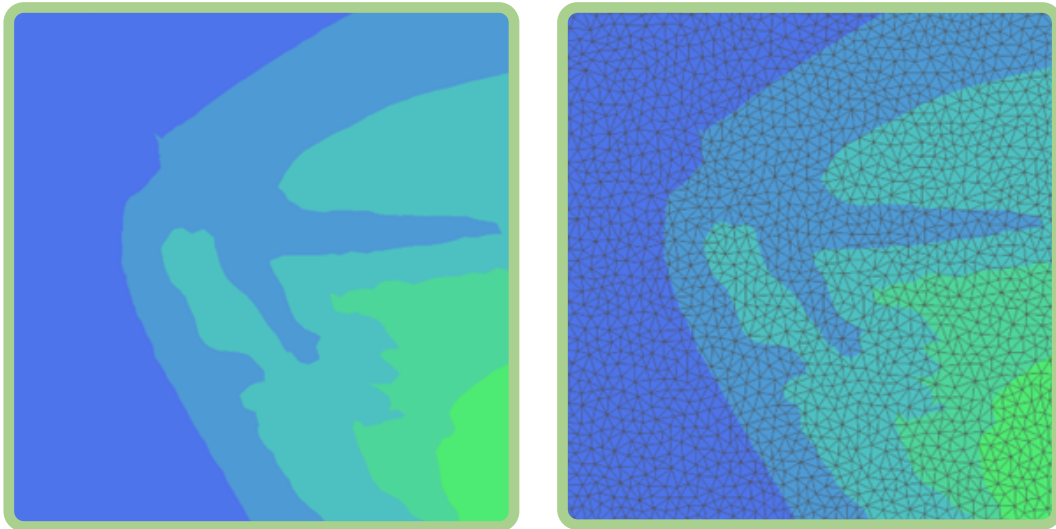
źródło: opracowanie własne

Ważne jest, aby zachować tożsamą rozdzielczość siatki jak rozdzielczość NMT, dlatego zwykle konieczne jest wcześniejsze odpowiednie przygotowanie NMT np. poprzez generalizację. Rozdzielczość siatki obliczeniowej ma wpływ na ilość jej elementów, a co za tym idzie na czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Im mniejsza liczba elementów siatki (większa generalizacja) tym mniejszy czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Jednak im większa generalizacja, tym mniejsza dokładność otrzymanych wyników, dlatego wybór rozdzielczości siatki jest pewnym kompromisem, pomiędzy jakością wyników, a czasem przeprowadzania obliczeń.

Siatka nieregularna składa się z trójkątów, które mogą mieć różne wymiary, a co za tym idzie różne powierzchnie.

Dzięki zastosowaniu siatki nieregularnej można w sposób bardziej reprezentatywny odwzorować rzeźbę terenu, gdyż nieregularność siatki pozwala na różnicowanie wielkości elementów w zależności od złożoności ukształtowania powierzchni.

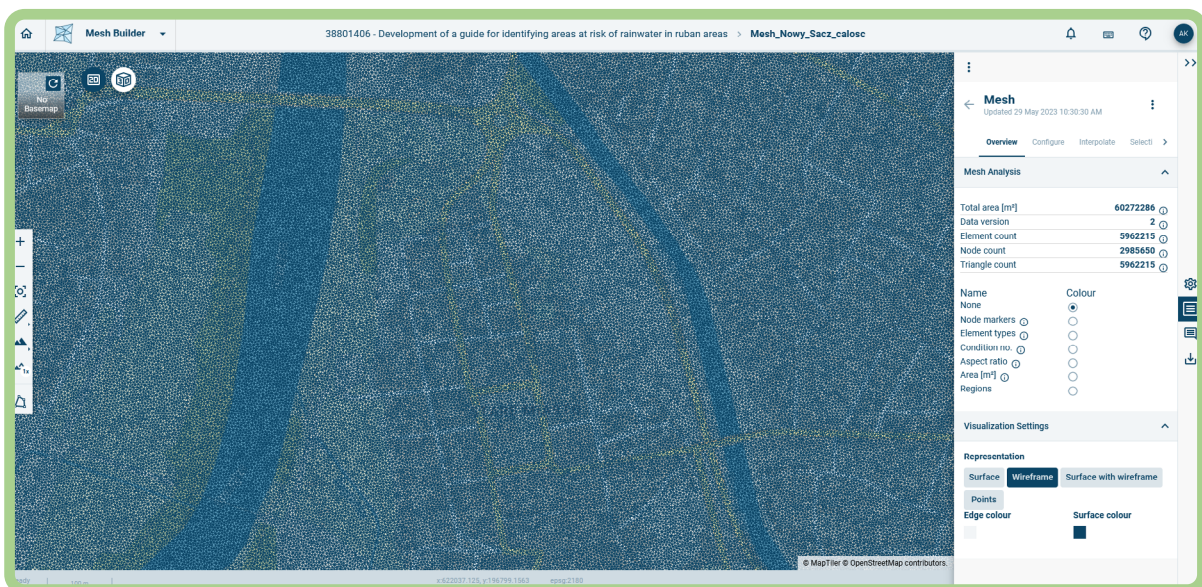
Rysunek 13 Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki nieregularnej trójkątnej (po prawej)



źródło: opracowanie własne

Ważne jest, aby precyzyjnie wskazać na siatce zasięg obszaru opracowania, występujące na nim drogi, wały itp. Na potrzeby przygotowania tych danych, można wykorzystać aplikację Mesh Builder.

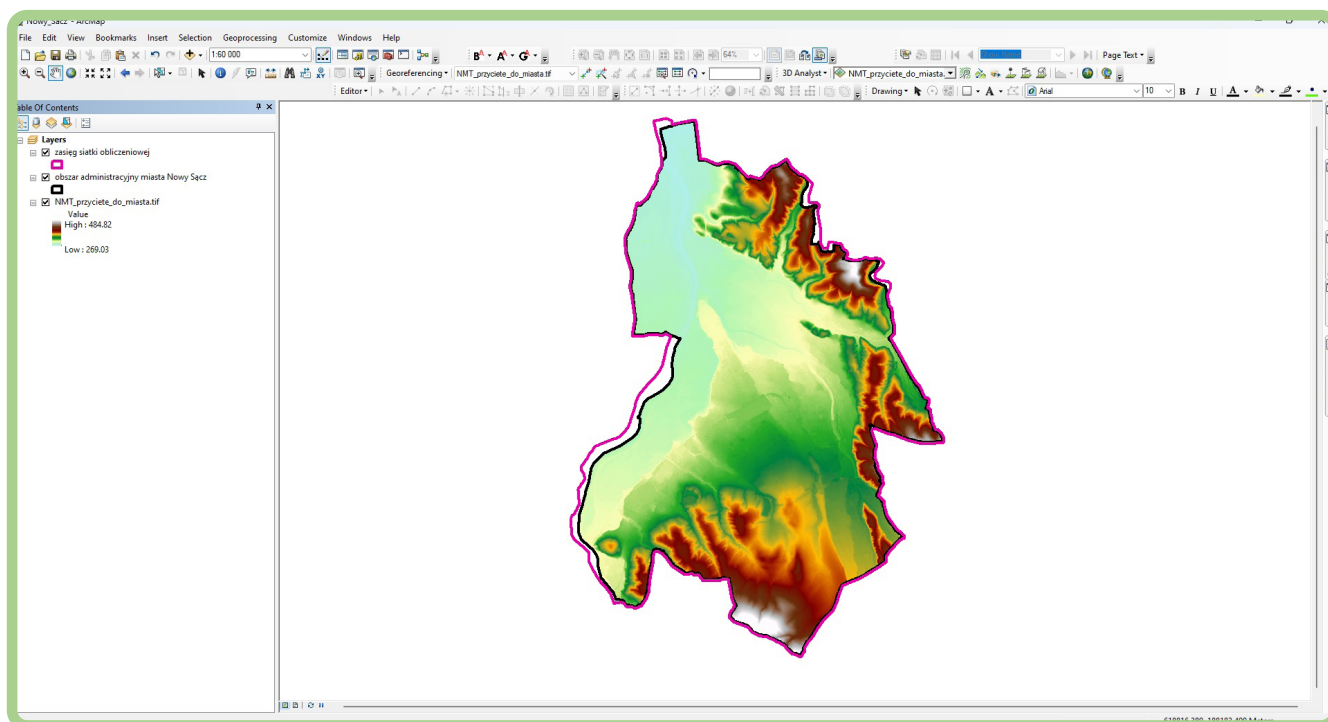
Rysunek 14 Widok okna aplikacji Mesh Builder



źródło: opracowanie własne

Do opracowania plików przestrzennych (.shp) wykorzystano oprogramowanie firmy Esri – ArcGIS ([Rysunek 15](#)).

Rysunek 15 Widok okna aplikacji ArcGIS



źródło: opracowanie własne

## 6.4. Narzędzia do budowy modeli

Możliwe jest wykorzystanie różnego oprogramowania do wykonania przedmiotowych analiz (jak wskazano w [podrozdziale 3.2](#)). W ramach niniejszego poradnika przedstawiono wytyczne metodyczne na przykładzie wykorzystania oprogramowania MIKE i ArcGIS.

Oprogramowanie MIKE+ stanowi najnowsze dostępne oprogramowanie firmy DHI (wersja z 2023 r.). Na potrzeby analiz wykorzystano także inne programy wspierające, takie jak Mesh Builder (aplikacja webowa firmy DHI) oraz program GIS (ArcGIS, ESRI). MIKE+ jest rozbudowanym narzędziem do modelowania i projektowania środowiska wodnego w tym sieci kanalizacji sanitarnych czy deszczowych, sieci wodociągowej oraz sieci rzecznych. Dodatkowo program pozwala na hydrodynamiczne symulacje rozlewu wód opadowych, dzięki zastosowaniu modelowania 2D. Modelowanie 2D opiera się na obliczeniach hydrodynamicznych pomiędzy poszczególnymi elementami siatki obliczeniowej, która odwzorowuje numeryczny model terenu (NMT) przy zachowaniu pewnej generalizacji. Generalizacja ta polega na tym, że dla każdego elementu siatki przyjmowana jest uśredniona wartość wysokości ze wszystkich pikseli NMT znajdujących się w zakresie danego elementu siatki.

Modelowanie 2D przeprowadzić można również w innych dostępnych na rynku programach, między innymi: InfoWorks, Flood Modeller, TUFLOW czy CCHE2D. Dobór narzędzia do modelowania jest kluczowy dla poprawności i dokładności wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi, obszarów potencjalnej retencji czy obszarów intensywnego spływu powierzchniowego.

Oprogramowanie ArcGIS wykorzystuje się do przetworzenia danych wynikowych symulacji.

Jest to oprogramowanie komercyjne, jednak zakres przeprowadzonych analiz można wykonać również przy użyciu oprogramowania darmowego np. QGIS. Dobór narzędzia GIS nie jest kluczowy dla poprawności i dokładności wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi, obszarów potencjalnej retencji czy obszarów intensywnego spływu powierzchniowego.

## 6.5. Dane wejściowe

W poniższej tabeli (Tabela 7) przedstawiono zestawienie danych niezbędnych do przygotowania modeli na potrzeby identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi poprzez wskazanie obszarów bezodpływowych:

Tabela 7 Zestawienie danych wejściowych wykorzystywanych w Wariancie 1

Lp.	Dane	Źródło	Inne (dokładność, dodatkowy komentarz)
1	Dane o opadach prawdopodobnych	Np. IMGW-PIB	Projekt PMAOTP
2	Numeryczny model terenu (NMT)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Rozdzielczość 1m, błąd średni wysokości <0,2m, układ wysokościowy Kronsztad, LIDAR, lotniczy skaning laserowy
3	Ortofotomapy	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	RGB o rozdzielczości 0,25 m i 0,1m
4	Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Treść i szczegółowość bazy BDOT10k odpowiada w ogólności tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000

źródło: opracowanie własne

W zakresie danych opadowych niezbędnych do opracowania na potrzeby Wariantu 1, zakłada się uwzględnienie infiltracji w sposób uproszczony poprzez zastosowanie do obliczeń hydrodynamicznych opadu netto. Aby uzyskać opad netto konieczne jest na początku pozyskanie opadu brutto. Opad brutto można pozyskać z projektu PMAOTP.

Pełen opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

## 6.6. Etapy budowy modeli i modelowania

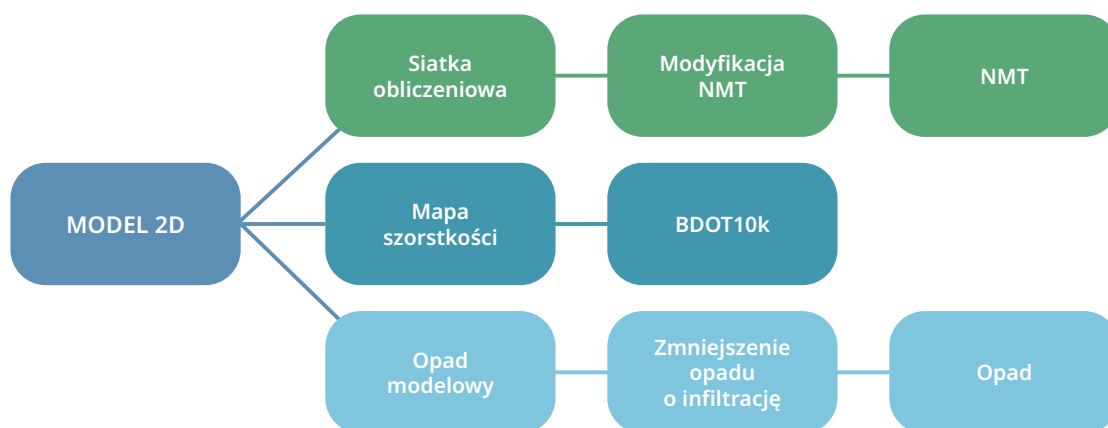
Przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych wodami opadowymi w ramach Wariantu 1 rekomenduje się zastosowanie stosunkowo uproszczonej procedury, w ramach której kluczowe pozostaje przygotowanie danych poza samym narzędziem do modelowania.

Podstawowe elementy do przygotowania stanowią: mapa szorstkości, siatka obliczeniowa oraz informacje o ukształtowaniu terenu z jak najlepszym odwzorowaniem istotnych dla analizy obiektów, w tym przepustów, mostów, cieków, rowów czy obniżeń dróg. Dodatkowo przed budową modelu konieczne jest przygotowanie danych opadowych.

Budowa modelu ogólnie rzecz ujmując, polega na wczytaniu przygotowanych danych oraz ustawieniu parametrów symulacji.

Na poniższym rysunku przedstawiono poszczególne kroki składające się na budowę modelu w Wariancie 1.

Rysunek 16 Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu



źródło: opracowanie własne

### 6.6.1. Mapa szorstkości

W celu odwzorowania hydrodynamiki spływu powierzchniowego należy opracować mapę szorstkości (w wykorzystywanym przy analizie pilotażowej modelu MIKE+ została opracowana mapa w postaci pliku dfs2). Informacje dotyczące przestrzennego rozmieszczenia pokrycia terenu oraz klas użytkowania terenu można pozyskać z bazy danych obiektów topograficznych (BDOT10k). Natomiast wartości współczynników szorstkości Manninga „n” należy przypisać do odpowiednich klas użytkowania, zgodnie z „Metodyką opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym (2020)<sup>13</sup>.

Pełen opis procedury przygotowania mapy szorstkości ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 6.6.2. Dane o ukształtowaniu terenu

Podstawowym źródłem informacji na temat ukształtowania terenu jest NMT. Na potrzeby budowy modeli 2D należy wykorzystać najlepiej najnowsze NMT dostępne dla danego obszaru. Dane w nim zawarte na potrzeby analiz powinny zostać zrewidowane i w razie potrzeby zmodyfikowane. Modyfikacja numerycznego modelu terenu może polegać m.in. na obniżeniu rzędnych w miejscu występowania dróg z krawężnikami oraz uwzględnieniu w numerycznym modelu terenu przepustów i mostów. Szczegółowy opis niezbędnych do przeprowadzenia modyfikacji znajduje się w poniższych podrozdziałach. Zmodyfikowany NMT stanowi podstawę do określenia wysokości dla elementów siatki obliczeniowej. Siatka obliczeniowa stanowi schematyzację numerycznego modelu terenu.

### 6.6.3. Obniżenie dróg

Obniżenie numerycznego modelu terenu w miejscu dróg z krawężnikami wykonuje się, aby lepiej odwzorować spływ powierzchniowy po tych drogach. Woda opadowa nie rozlewa się poza jezdnię, aż do momentu osiągnięcia głębokości wyższej niż głębokość zagłębienia. Analogiczna sytuacja występuje w rzeczywistości. Woda opadowa, która znajduje się na jezdni nie rozlewa się poza krawężniki, jeśli głębokość wody jest niższa niż wysokość krawężników. W przypadku niektórych dróg już w podstawowym NMT widać obniżenie jezdni względem chodników. Obniżenie to jest jednak kilkucentymetrowe. Dodatkowo błąd średni wysokości w wykorzystanym NMT to 0,2 m.

Niezbędne jest zatem przygotowanie warstwy wyznaczającej przebieg dróg posiadających krawężniki. Jezdnie dróg z krawężnikami znajdują się niżej niż otaczający je teren, więc warstwa ta określa zasięg, w którym numeryczny model terenu zostanie następnie obniżony. Do wyznaczenia tego zasięgu wykorzystuje się wcześniej przygotowaną warstwę opracowaną na etapie budowy mapy szorstkości.

13 Raport z wykonania przeglądu i aktualizacji MZP i MRP – Załącznik nr 1 do Poradnika, <https://powodz.gov.pl/www/powodz/Mapy/raport%202022/aMZPiMRP%20Zal1%20Metodyka%20RZEKI%2020200617%20v7.00%20pub.pdf>, 2020

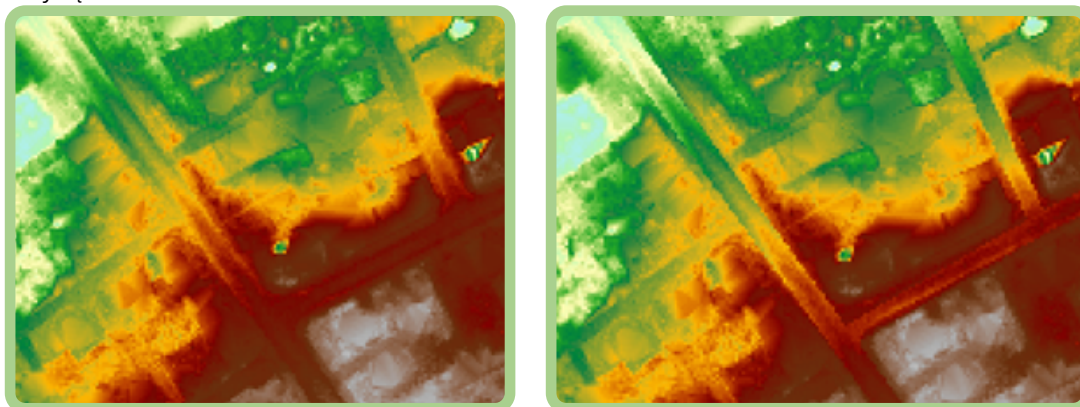
Należy przyjąć odpowiednie założenia do wprowadzenia zmian w NMT. Na podstawie informacji zawartych w tabeli atrybutów (kolumna z informacją o szerokości nawierzchni i kolumna z informacją o materiale nawierzchni), można przyjąć założenie, że drogi o szerokości powyżej 4 m oraz o materiale pokrycia: masa bitumiczna, kostka perforowana oraz beton posiadają krawężniki. Proponowana szerokość 4 m może zostać zweryfikowana, w zależności od wyników analizy dróg występujących na obszarze opracowania.

W dalszej kolejności należy usunąć poligony, które nie posiadają połączenia hydraulicznego z pozostałymi drogami. Obniżenie NMT dla tych poligonów skutkowało by stworzeniem sztucznych obszarów bezodpływowych. Dodatkowo należy także usunąć drogi spełniające założone kryteria szerokości i nawierzchni, jednak leżące w miejscach, gdzie występowanie krawężników jest mało prawdopodobne np. szerokie drogi z płyt betonowych w lasach.

Przy pomocy tak przygotowanych poligonów można obniżyć numeryczny model terenu o założoną wartość wynoszącą 15 cm. Jest to najczęściej stosowana w Polsce wysokość krawężnika.

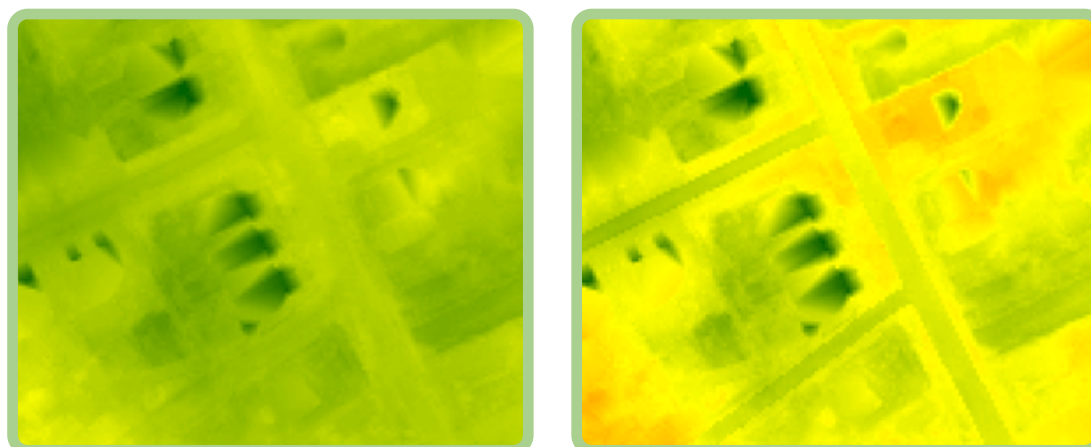
Porównanie numerycznego modelu przed i po obniżeniu dróg dla zlewni pilotażowych przedstawia [Rysunek 17](#) oraz [Rysunek 18](#).

Rysunek 17 Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po obniżeniu dróg (po prawej) dla miasta Nowy Sącz



źródło: opracowanie własne

Rysunek 18 Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po obniżeniu dróg (po prawej) dla miasta Puławy



źródło: opracowanie własne

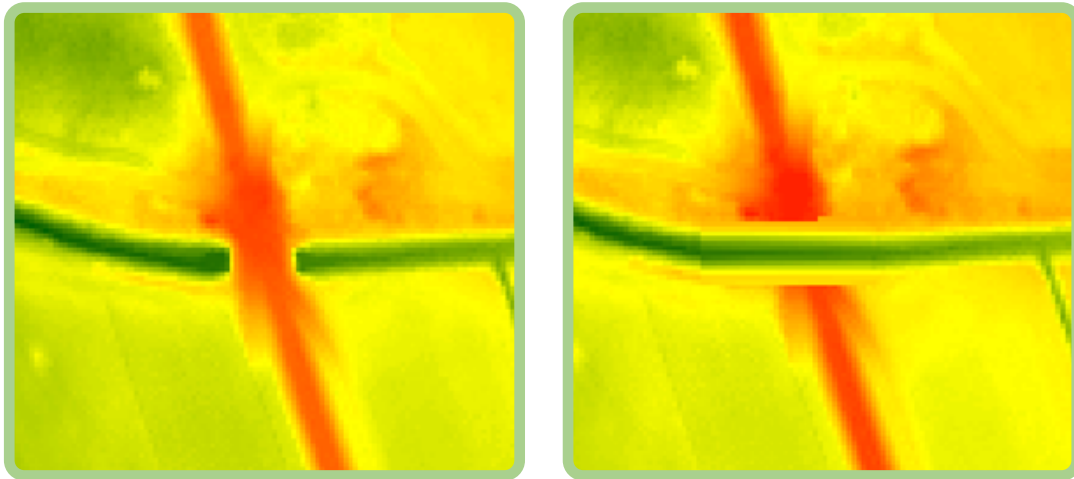
### 6.6.4. Odwzorowanie przepustów i mostów

Kolejny istotny krok, który pozwoli prawidłowo odwzorować zjawiska hydrodynamiczne w miejscu ich lokalizacji, to uwzględnienie struktur (obiektów). Istnieją dwa sposoby umożliwiające odwzorowanie istotnych obiektów, takich jak przepusty i mosty.

[1] Jednym z nich jest wprowadzenie obiektu w oprogramowaniu, w tym przypadku MIKE+, za pomocą modułu „2D culverts”.

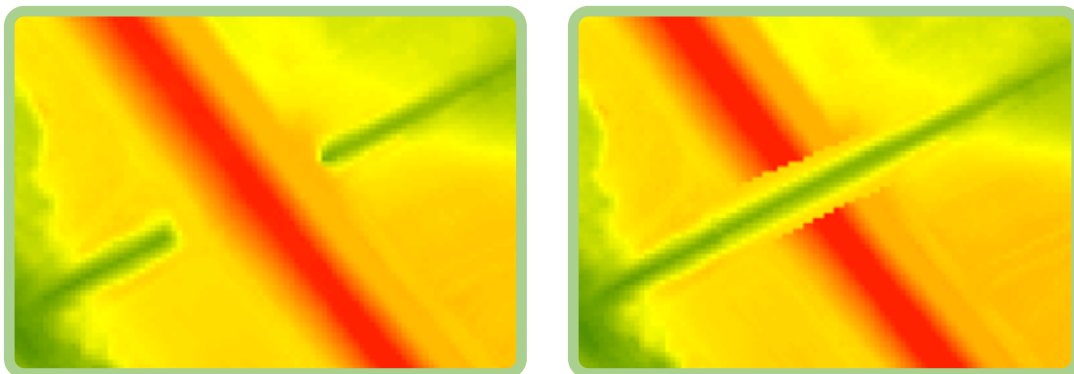
[2] Drugim sposobem jest zmodyfikowanie („wypalenie”) obiektów w numerycznym modelu terenu. W tym celu tworzy się przekrój bezpośrednio przed i za obiektem w miejscach, w których NMT odwzorowuje koryta. Następnie na przekrojach generuje się punkty w odległościach umożliwiającym prawidłowe odwzorowanie koryta i odczytuje się dla nich wysokości z numerycznego modelu terenu. W kolejnym kroku z przygotowanych punktów tworzy się TIN, który następnie konwertuje się na raster. Ostatnim krokiem jest połączenie NMT z wygenerowanym rastrem. Podejście to zastosowano także w modelowaniu zlewni pilotażowych w Wariancie 1. Przy stopniu generalizacji terenu zastosowanym w Wariancie 1 uznano, że takie założenie odwzorowuje zjawiska hydrodynamiczne w wystarczającym stopniu. Porównanie numerycznego modelu terenu przed i po modyfikacji w miejscu budowl przedstawia [Rysunek 19](#) oraz [Rysunek 20](#).

Rysunek 19 Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji przepustu (po prawej) dla miasta Nowy Sącz



źródło: opracowanie własne

Rysunek 20 Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji przepustu (po prawej) dla miasta Puławy



źródło: opracowanie własne

### 6.6.5. Odwzorowanie cieków, rowów i sztucznych kanałów

Cieki, rowy i sztuczne kanały oczywiście są już odwzorowane w numerycznym modelu terenu. Należy natomiast zweryfikować poprawność ich odwzorowania. Pierwszym etapem weryfikacji cieków, rowów i sztucznych kanałów jest wizualny przegląd NMT na całej długości cieków. Następnie w programie GIS bazując na NMT, można wygenerować profile cieków oraz rowów, które umożliwią analizę poprawności ich odwzorowania. Na podstawie weryfikacji wizualnej NMT i weryfikacji profili wytypować można miejsca, które budzą wątpliwość. Następnie sprawdza się je, generując przekroje na podstawie NMT, czy coś wymaga modyfikacji NMT, czy nie.



### 6.6.6. Przygotowanie danych opadowych

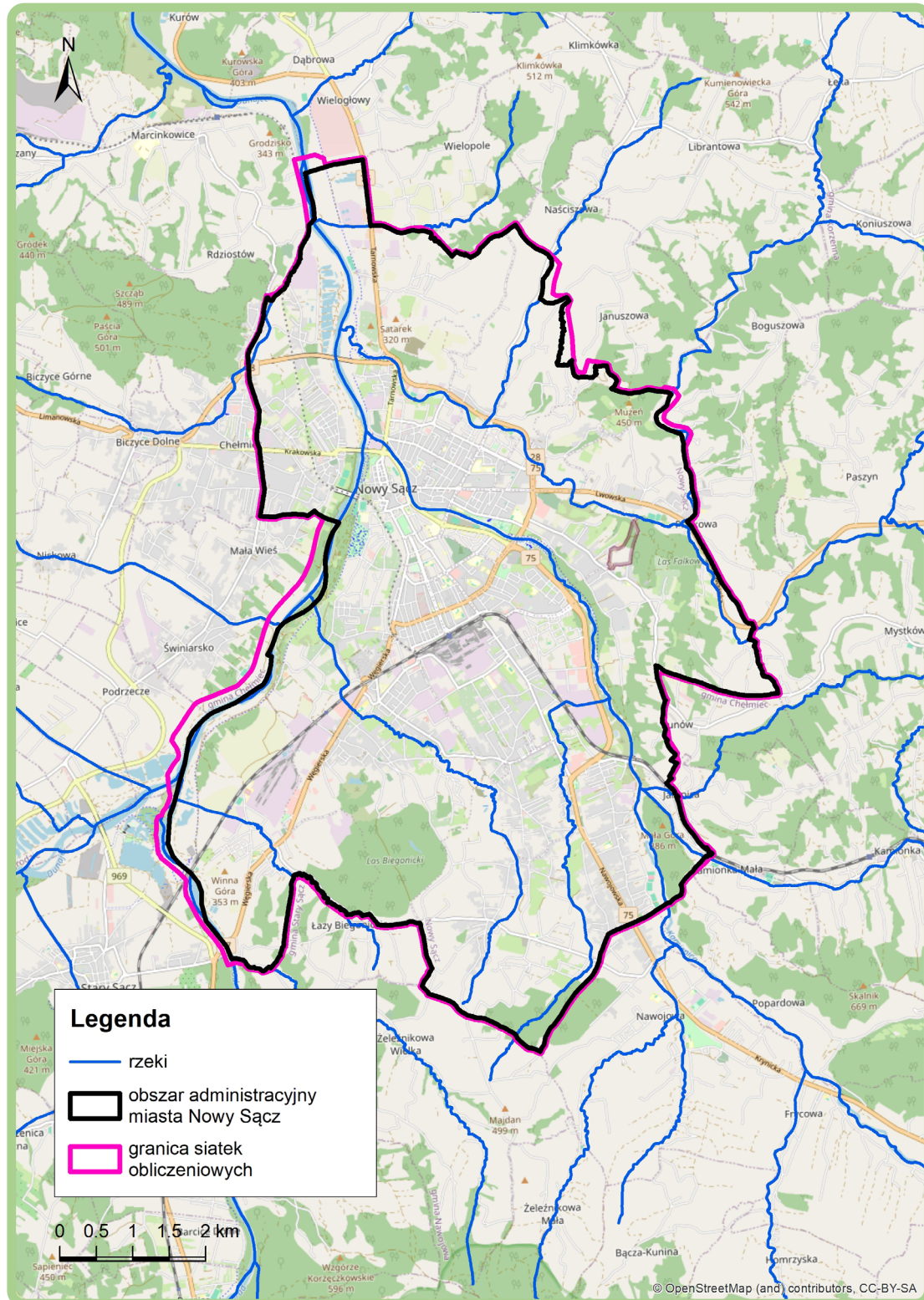
Wariant 1 zakłada uwzględnienie infiltracji w sposób uproszczony poprzez zastosowanie do obliczeń hydrodynamicznych opadu netto. Aby uzyskać opad netto konieczne jest na początku pozyskanie opadu brutto. Opad ten pozyskać można m.in. z wyników projektu PMAxTP, zrealizowanego przez IMGW-PIB. Następnie należy obliczyć wielkość infiltracji na terenach nieuszczelnionych wykorzystując do obliczeń model Hortona. Po odjęciu od opadu brutto wielkości infiltracji otrzymuje się opad netto. Następnie należy dokonać rozkładu opadu netto, wykorzystując w tym celu rozkład Eulera typu II.

Pełen opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 6.6.7. Siatki obliczeniowe

Siatka obliczeniowa stanowić powinna schematyzację numerycznego modelu terenu, który w sposób jak najbardziej reprezentatywny odwzorowywać będzie ukształtowanie terenu. Warstwą bazową do wyznaczania zasięgu siatki jest obszar administracyjny obszaru opracowania. Dodatkowo wykonuje się poszerzenie tego obszaru (dostępna w narzędziach funkcja buffer) o zadaną wartość. Wartość ta powinna stanowić kilkukrotność szerokości elementu siatki obliczeniowej w celu uzyskania odpowiedniej strefy buforowej. Różnicę pomiędzy zasięgiem granicy administracyjnej a zasięgiem wykonanych siatek obliczeniowych przedstawia [Rysunek 21](#). Krawędź siatki obliczeniowej z zasady jest barierą, która zatrzymuje wodę. Wykorzystany w analizach pilotażowych program MIKE+ umożliwia „otwarcie” zewnętrznych węzłów obliczeniowych w celu odprowadzenia wód poza siatkę. Taki zabieg nie jest stosowany na całej długości (obrysie) krawędzi zewnętrznych, ale w wybranych fragmentach, w których znaczne ilości wód opadowych w rzeczywistości odpływają np.: ujście rzeki, rów odwadniający, itp. Dzięki temu zabiegowi nie następuje sztuczne zalanie obszarów, które w rzeczywistości nie są zalewane przez wody opadowe. Ponadto poszerzony obszar zasięgu siatki obliczeniowej powinien zostać poddany weryfikacji i ewentualnej modyfikacji. Siatka powinna obejmować teren, który w sposób jak najbardziej poprawny odprowadzi wody opadowe do odbiornika.

Rysunek 21 Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Nowy Sącz



źródło: opracowanie własne

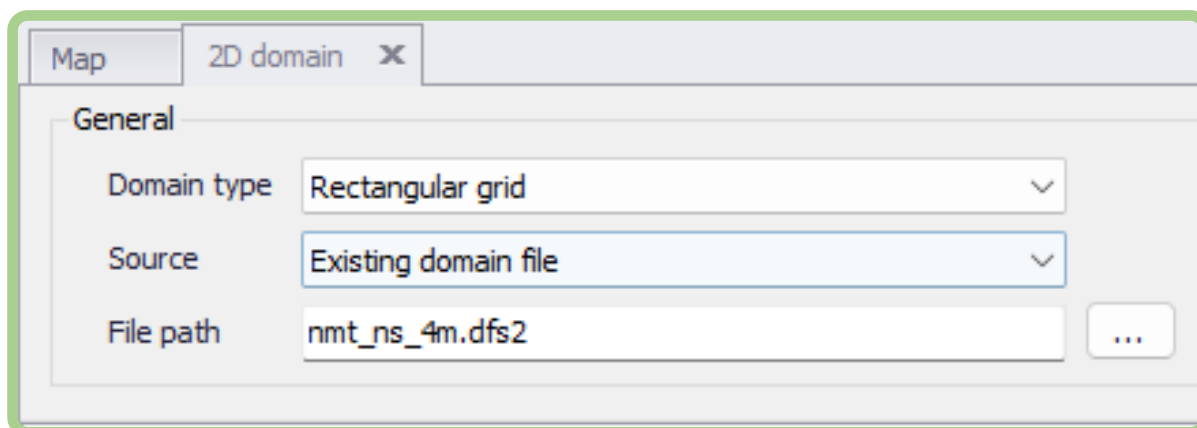
### 6.6.8. Wprowadzanie danych do modeli 2D

Po przygotowaniu danych wejściowych, należy wprowadzić je do modelu. Poniżej, szczegółowo przedstawiono kolejne kroki importu danych do modelu, w oparciu o wykorzystane do analiz pilotażowych oprogramowanie MIKE. W zależności od zastosowanego narzędzia proces może się nieznacznie różnić, jak również widok okien narzędzia będzie inny.

W pierwszym kroku należy wczytać do modelu przygotowane zgeneralizowane NMT (w przypadku siatki GRID) lub wcześniej przygotowaną siatkę MESH.

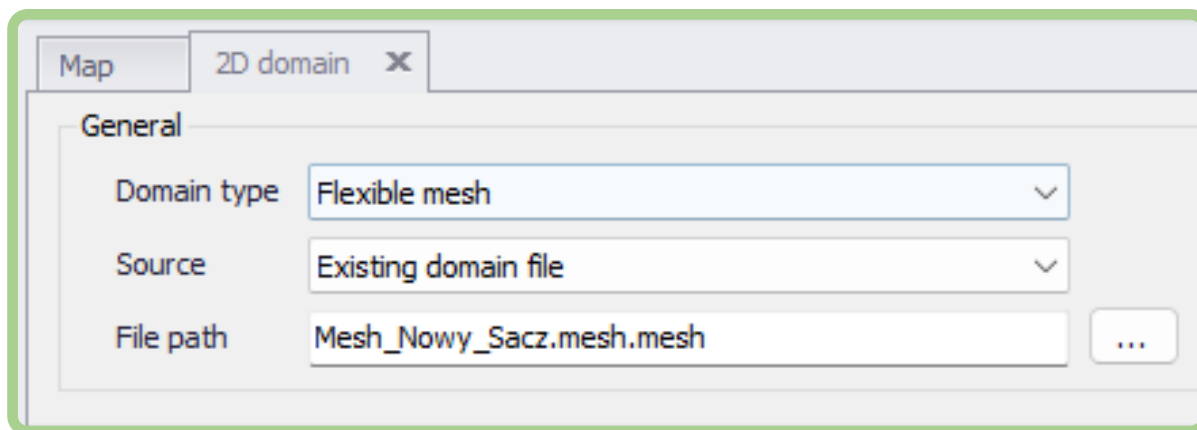
W wykorzystanym do analiz oprogramowaniu MIKE, w tym celu w zakładce 2D domain należy wskazać odpowiedni typ, źródło oraz ścieżkę do pliku. Na poniższym rysunku ([Rysunek 22](#)) przedstawiono ustawienie programu dla siatki GRID natomiast na kolejnym rysunku ([Rysunek 23](#)) przedstawiono ustawienia dla siatki MESH.

Rysunek 22 Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki GRID



źródło: opracowanie własne

Rysunek 23 Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH



źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku, w zakładce 2D surface roughness wczytuje się wcześniej przygotowany raster szorstkości. Na poniższym rysunku ([Rysunek 24](#)) przedstawiono ustawienie programu dla rastra szorstkości.

Rysunek 24 Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami

źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku w zakładce 2D precipitation and evaporation wczytuje się wcześniej przygotowany plik. dfs0 z opadem. Na poniższym rysunku ([Rysunek 25](#)) przedstawiono ustawienie programu dla pliku z opadem.

Rysunek 25 Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami

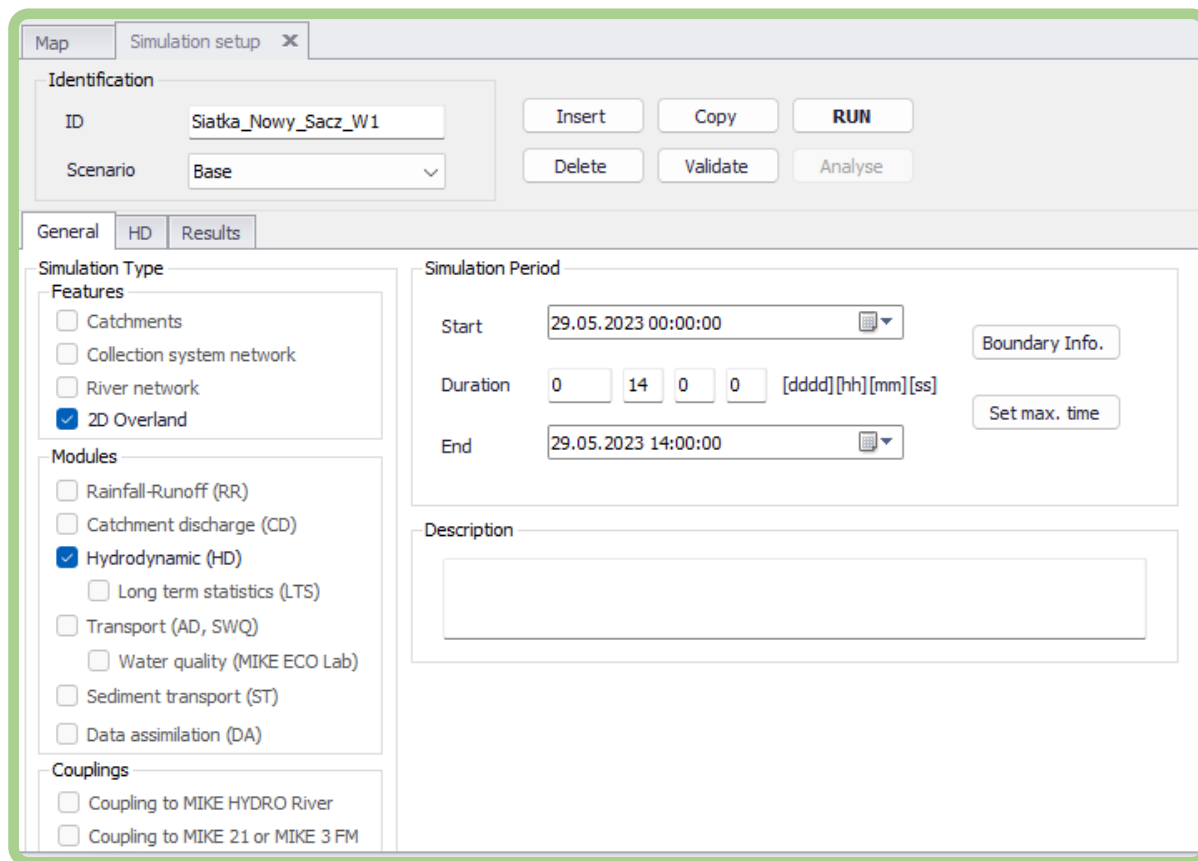
źródło: opracowanie własne

Ostatnim wymaganym krokiem jest ustawienie parametrów symulacji w zakładce Simulation setup.

W MIKE+ sprowadza się to do ustawienia typu symulacji (2D Overland i Hydrodynamic (HD)) oraz czasu symulacji. Czas symulacji powinien być na tyle długi, aby wody opadowe całkowicie spłynęły po powierzchni, a te które na niej pozostały były jedynie wodami opadowymi zgromadzonymi w zagłębieniach terenu (obszarach bezodpływowych). Czasy te dobiera się iteracyjnie na podstawie analizy wyników kolejnych symulacji. Przykładowo, dla opracowanych modeli w ramach Wariantu 1 przyjęto czas symulacji wynoszący 14 godzin.

Na poniższym rysunku ([Rysunek 26](#)) przedstawiono ustawienia symulacji.

Rysunek 26 Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

Dodatkowo w zakładce HD program MIKE+ umożliwia zmianę minimalnego i maksymalnego kroku czasowego symulacji. W przypadku siatek o dużej liczbie elementów często konieczne jest zmniejszenie maksymalnego kroku obliczeniowego, aby symulacje zakończyły się bez błędów. Wartości domyślne dla minimalnego kroku czasowego to 0,01 s, a dla maksymalnego 10 s.

Każdy model składa się zatem z plików głównych oraz plików wczytywanych do modelu.

Pliki główne modelu to:

- baza danych SQLite – plik o rozszerzeniu .sqlite,
- model w programie MIKE+ – plik o rozszerzeniu .mupp.

Pliki podczytywane do modelu to:

- numeryczny model terenu (dla Podwariantu 1.1) – plik o rozszerzeniu .dfs2,
- siatka MESH (dla Podwariantu 1.2) – plik o rozszerzeniu .mesh,
- informacja o szorstkości powierzchni – plik o rozszerzeniu .dfs2,
- dane o opadzie – plik o rozszerzeniu .dfs0.

## 6.7. Wyznaczanie obszarów bezodpływowych na podstawie wyników modelowania

Po zakończeniu analiz modelowych, należy przystąpić do rewizji wyników i przygotowania niezbędnych informacji, na potrzeby których wykonywano modelowanie. W przypadku Wariantu 1, podstawą do dalszych prac analitycznych są wyznaczone obszary bezodpływowe.

W wyniku przeprowadzonych symulacji dla każdego elementu siatki obliczeniowej i dla każdego kroku symulacji otrzymuje się informację o głębokości zalania wodą oraz o prędkości przepływu.

Na podstawie wyników głębokości zalania dla ostatniego kroku obliczeniowego należy wygenerować rastry głębokości oraz rastry numerycznego modelu powierzchni wody dla dwóch prawdopodobieństw wystąpienia opadu –  $p = 1\%$  oraz  $p = 10\%$  i czasie trwania  $t = 120$  min. Rastry te generuje się dla ostatniego kroku symulacji, ponieważ mają one wskazywać obszary bezodpływowe. W ostatnim kroku czasowym na siatce obliczeniowej pozostaje jedynie woda opadowa, wypełniająca zagłębienia terenu.

Na rysunku poniżej przedstawiono przykład rastra głębokości dla prawdopodobieństwa  $p = 1\%$  i siatki obliczeniowej MESH ([Rysunek 27](#)).

Rastry następnie najlepiej przekonwertować do warstw przestrzennych w formacie shp.

W celu identyfikacji obszarów bezodpływowych, otrzymane wydzielone wartości warto przefiltrować, pozostawiając jedynie te istotne z perspektywy prowadzonej analizy.

Na potrzeby prowadzonych analiz dla zlewni pilotażowych i uzyskanych wyników, przyjęto następujące założenia:

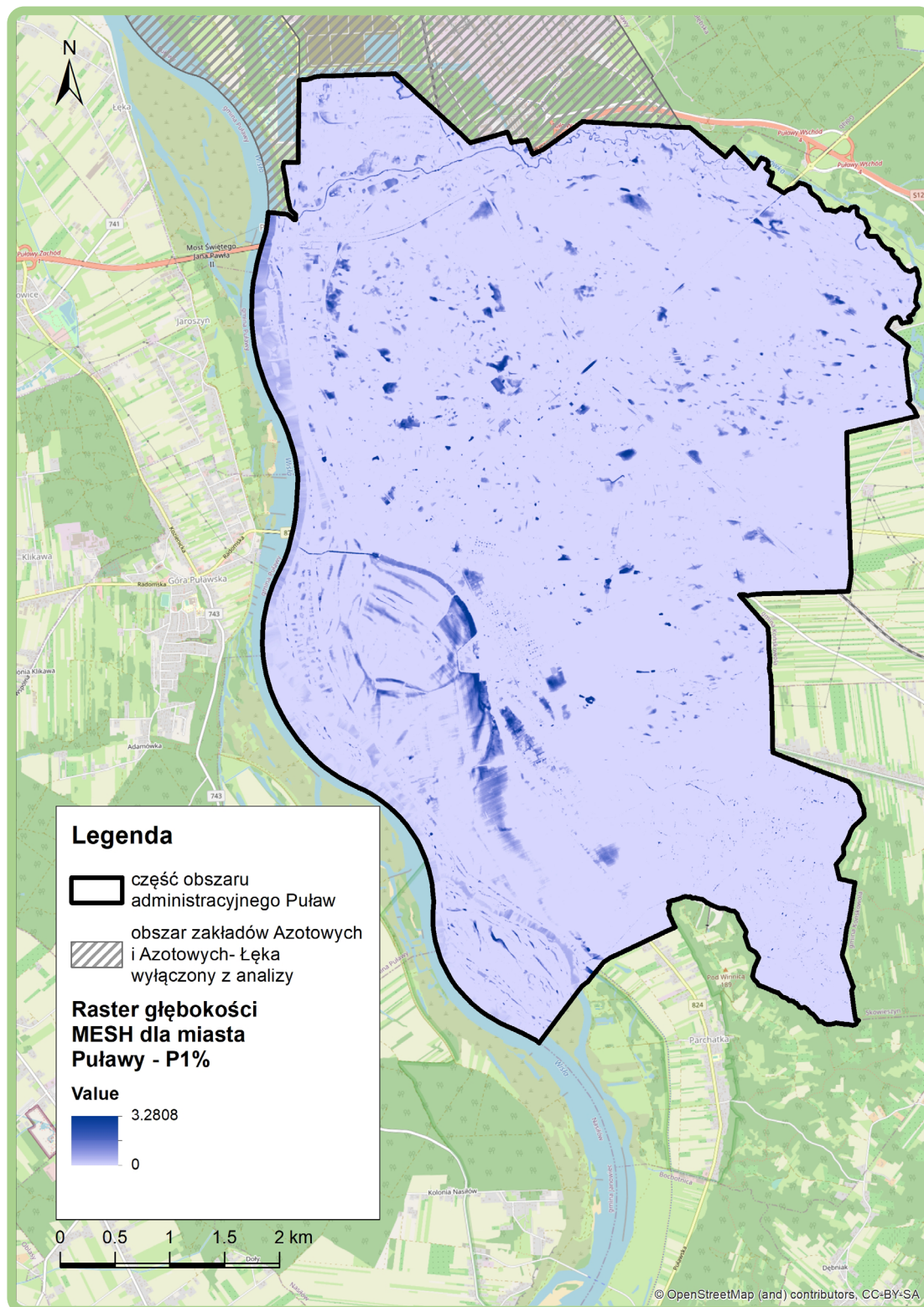
- głębokość zalania powyżej 30 cm,
- obszar zalania powyżej 30 m<sup>2</sup>.

Kryterium głębokości zalania oraz kryterium obszaru zalania zostały dobrane, mając na uwadze dokładność NMT oraz przyjęte na etapie modelowania uproszczenia: brak uwzględnienia sieci kanalizacji deszczowej, uwzględnienie mostów i przepustów poprzez korektę NMT czy infiltrację odwzorowaną za pomocą opadu netto.

Oczywiście kryteria te powinny zostać dobierane indywidualnie do potrzeb i wyników otrzymanych dla danego obszaru i miasta.

Wynikami są warstwy przestrzenne w formacie shp ze zidentyfikowanymi obszarami bezodpłowymi, które służą do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi.

Rysunek 27 Wyniki identyfikacji obszarów bezodpływowych na siatce MESH dla opadu o prawdopodobieństwie 1% i czasie trwania 120 min dla Puław



źródło: opracowanie własne

## 6.8. Wyznaczanie obszarów zagrożonych wodami opadowymi

Obszary, które zdecydowanie są najcenniejszym wynikiem analiz Wariantu 1, to obszary zagrożone wodami opadowymi. Wyznacza się je w oparciu o obszary bezodpływowe, dla rekomendowanego prawdopodobieństwa wystąpienia opadu 1% i 10 % i czasie trwania 120 min. W tym celu w pierwszej kolejności z wszystkich obszarów bezodpływowych wybiera się jedynie te, które znajdują się na terenach zabudowanych, zidentyfikowanych na podstawie BDOT10k. W kolejnym kroku wybiera się tylko te obszary bezodpływowe, dla których powierzchnia zalania wynosiła powyżej 500 m<sup>2</sup>. Analogicznie do innych kryteriów – wskazywane wartości są zwykle sugestią, wynikają z dobrej praktyki, natomiast mogą być dostosowywane według potrzeb. Kryterium powierzchni zalania należy dobrać w oparciu o analizę wyników dla danego obszaru. Dla miast pilotażowych zauważono bowiem, że dla obszarów o powierzchni mniejszej niż 500 m<sup>2</sup>, długość zalanych ciągów komunikacyjnych czy ilość zagrożonych obiektów jest niewielka, stąd wybór takiej wartości.

Celem niniejszej analizy jest wskazanie istotnych lokalizacji dla obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Zastosowanie optymalnego dla danego obszaru kryterium powierzchni jest do tego celu odpowiednie. Wytypowane obszary zagrożone wodami opadowymi, należy w kolejnym kroku zweryfikować i realnie wskazać, dla których należy podjąć działania zabezpieczające. Należy oczywiście brać pod uwagę bilans przyszłych kosztów inwestycyjnych i unikniętych strat materialnych w wyniku działań zaradczych. W związku z powyższym ograniczenie liczby obszarów zagrożonych wodami opadowymi do lokalizacji tych najbardziej istotnych / problematycznych jest jak najbardziej zasadne.

Reasumując jako ostateczne kryteria do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi przyjęto dla miast pilotażowych następujące założenia:

- obszar bezodpływowy znajduje się na terenie zabudowanym,
- głębokość zalania powyżej 30 cm,
- obszar zalania powyżej 500 m<sup>2</sup>.

Wartości te powinny być dobierane indywidualnie, po uzyskaniu wyników dla danego obszaru.

Wyniki analizy można w dalszej kolejności pozostawić jako materiał bazodanowy (pliki shp.) lub opracować dla tych obszarów dedykowane karty obszarów zagrożonych wodami opadowymi.

Pełen opis wytycznych w zakresie baz danych i prezentacji kartograficznych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

## 6.9. Wyznaczanie obszarów potencjalnej retencji

Obszary potencjalnej retencji wskazuje się na podstawie wcześniej wyznaczonych obszarów bezodpływowych wyznaczonych dla prawdopodobieństwa wystąpienia opadu 10%, z uwagi na fakt, że częstość ich występowania jest większa niż deszczy o prawdopodobieństwie wystąpienia opadu 1%.

Obszarami potencjalnej retencji będą obszary, które swoim zakresem obejmują tereny niezabudowane, zidentyfikowane na podstawie BDOT10k. Obszary te, ze względu na położenie na obszarach niezabudowanych mogą przy stosunkowo niewielkich kosztach zostać przystosowane do gromadzenia nadmiaru wód opadowych ograniczając bądź eliminując dalszy spływ powierzchniowy wód opadowych.

Jako lokalizacje istotne można uznać obszary bezodpływowe o powierzchni powyżej 1000 m<sup>2</sup> i głębokości zalania powyżej 30 cm. W zależności od potrzeb i możliwości parametry te można dostosować do optymalnych dla uzyskanych wyników warunków.

Obszary zakwalifikowane jako obszary potencjalnej retencji należy poddać ocenie eksperckiej pod kątem objętości zgromadzonej wody oraz własności gruntu.

Należy pozyskać informacje o własności gruntu, dostępne na stronie [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl), a konkretnie z warstwy prezentującej informacje ze Zintegrowanego systemu informacji o nieruchomościach (ZSIN). Na podstawie tych informacji możliwe jest określenie, czy dany obszar potencjalnej retencji znajduje się na gruntach Skarbu Państwa. Informację tę warto zawrzeć w plikach przestrzennych z wynikami analizy.



W przypadku oceny eksperckiej dla wstępnie wyznaczonych obszarów potencjalnej retencji dokonuje się analizy pod względem m.in. lokalizacji w stosunku do innych obiektów. Sam fakt położenia danego obszaru na terenie niezabudowanym nie wskazuje ostatecznie na możliwość łatwego i niezbyt kosztownego przekształcenia terenu na obszar retencji. Przykładem może być wstępnie wyznaczony obszar retencji znajdujący się blisko nasypu torów kolejowych. Na podstawie analizy eksperckiej taki obszar zostaje odrzucony, ze względu na niebezpieczeństwo niekorzystnego wpływu na stateczność skarp. Oczywiście możliwe jest specjalne zabezpieczenie skarp nasypu kolejowego, jednak wiązałoby się to z dużymi nakładami inwestycyjnymi, których można uniknąć wybierając inny obszar potencjalnej retencji znajdujący się w pobliżu. W trakcie analizy eksperckiej dokonuje się również wstępnego rozeznania sieci uzbrojenia terenu na danym obszarze potencjalnej retencji. Przystosowanie terenu do pełnienia funkcji retencyjnej może wymagać robót ziemnych. Dodatkowo dno i skarpy będą wymagały dostosowania do pełnionej funkcji. Może wiązać się to z koniecznością przebudowy infrastruktury podziemnej. Ocenia się zatem, czy takowa przebudowa byłaby technicznie możliwa i jaki byłby jej koszt.

## 6.10. Wyznaczanie obszarów intensywnego spływu powierzchniowego

W wyniku przeprowadzonych symulacji dla każdego elementu siatki obliczeniowej i dla każdego kroku symulacji otrzymuje się informację o głębokości zalania wodą oraz o prędkości przepływu.

Na podstawie wyników prędkości przepływu można wygenerować rastry z maksymalnych prędkości dla każdego elementu siatki obliczeniowej dla dwóch prawdopodobieństw wystąpienia opadu:  $p = 1\%$  oraz  $p = 10\%$  i czasie trwania  $t = 120$  min (niewątpliwa zaleta modelu 2D). W kolejnym kroku dokonuje się konwersji rastrów na warstwy przestrzenne shp. W celu wyznaczenia obszarów intensywnego spływu powierzchniowego z tej warstwy przestrzennej wybrano obszary, dla których prędkość przepływu była równa lub wyższa niż  $1$  m/s. W związku z wyznaczeniem dużej ilości bardzo małych obszarów, których znaczenie nie było istotne do wyboru obszarów intensywnego spływu powierzchniowego, zastosowano dodatkowe kryterium oparte o powierzchnie. W przypadku analiz w zlewniach pilotażowych jako istotne uznano obszary o powierzchni powyżej  $30$  m<sup>2</sup>.

Reasumując jako ostateczne kryteria dla miast pilotażowych do wyznaczenia obszarów intensywnego spływu powierzchniowego przyjęto następujące założenia:

- prędkość przepływu równa lub wyższa niż  $1$  m/s,
- obszar powyżej  $30$  m<sup>2</sup>.

Wartości te powinny oczywiście być dobierane indywidualnie, po uzyskaniu wyników dla danego obszaru.

## 6.11. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników

W wyniku doświadczenia w opracowywaniu modeli hydrodynamicznych zidentyfikowano kilka kluczowych kwestii, które mają istotny wpływ na jakość i dokładność obliczeń i analiz dla Wariantu 1. Kwestie te także zostały stwierdzone w analizach dla zlewni pilotażowych.

Najistotniejszą kwestią jest uwzględnienie w analizie wszystkich istotnych przepustów. Dzięki temu wyeliminowane zostają miejsca fałszywie bezodpływowe. Jako istotne przepusty należy przyjąć te, które znajdują się na ciekach i rowach, którymi przepływają duże ilości wód opadowych. W przypadku niewielkich rowów brak uwzględnienia przepustu spowoduje powstanie miejsca bezodpływowego, ale nie nastąpi zalew otaczającego terenu, gdyż woda opadowa pozostanie w korycie rowu. Dla tego miejsca bezodpływowego nie zostanie zatem wyznaczony obszar zagrożony wodami opadowymi. Obszary potencjalnej retencji podlegają dodatkowej analizie, więc nawet jeśli takowy zostałby wstępnie wyznaczony w takim miejscu, to i tak docelowo zostanie usunięty po przeprowadzeniu analizy.

W trakcie analizy wyników, również istotne jest odnalezienie miejsc bezodpływowych, które powstały ze względu na fakt, że z NMT w sposób automatyczny „usuwane” są budynki. Takie obszary w rzeczywistości nie są obszarami bezodpływowymi, a w trakcie obliczeń woda opadowa gromadzi się w tych miejscach tylko dlatego, że NMT w obrębie usuwanego budynku mógł zostać nieznacznie obniżony w stosunku do otaczają-

cego budynek terenu. Takie obszary bezodpływowe powinny zostać pominięte przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych wodami opadowymi oraz obszarów potencjalnej retencji.

Również kryteria wyboru istotnych obszarów zagrożonych wodami opadowymi mają znaczenie.

Na etapie analiz w zlewniach pilotażowych okazało się, że pierwotnie zastosowane kryteria (głębokość zalania powyżej 30 cm i powierzchnia zalania powyżej 100 m<sup>2</sup>) nie jest w pełni adekwatne dla analizowanych miast. Zastosowane kryterium spowodowało wyznaczenie bardzo dużej ilości stosunkowo małych obszarów zagrożonych wodami opadowymi, które powstały ze względu na dokładność NMT oraz przyjęte na etapie modelowania uproszczenia: brak uwzględnienia sieci kanalizacji deszczowej, uwzględnienie mostów i przepustów poprzez korektę NMT czy infiltrację odwzorowaną za pomocą opadu netto. Kryteria te, a w szczególności minimalna powierzchnia zalania powinny zostać dobrane indywidualnie do konkretnego analizowanego obszaru. Oczywiście kryteria te powinny być dobierane indywidualnie po analizie uzyskanych wyników na danym obszarze.

W przypadku obszarów potencjalnej retencji pierwotnie przyjęte kryteria w ramach analiz w zlewniach pilotażowych (głębokość zalania powyżej 30 cm i powierzchnia zalania powyżej 1000 m<sup>2</sup>) okazały się być w pełni adekwatne do analizowanego obszaru. Dlatego ważne jest, aby nie określać sztywnych kryteriów, a pozostawić tę decyzję do czasu analizy uzyskanych wyników na danym obszarze.

Jako obszary potencjalnej retencji powinny zostać wyznaczone tereny, dla których poniesienie kosztów inwestycyjnych będzie miało realny wpływ na obniżenie zagrożenia wodami opadowymi na możliwie jak największym obszarze. Wyznaczenie dużej ilości bardzo małych obszarów potencjalnej retencji wiązałoby się z dużymi nakładami finansowymi i ograniczeniem zagrożenia wodami opadowymi na stosunkowo niewielkim obszarze.

## 6.12. Rekomendacje metodyczne

W uzupełnieniu do powyżej przedstawionych szczegółów, rekomendacje skupiają się na odniesieniu do elementów różnicujących testowane w ramach analiz pilotażowych rozwiązania.

W trakcie analiz do identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi i obszarów potencjalnej retencji na podstawie wyznaczonych obszarów bezodpływowych zastosowano metodę uproszczoną z wykorzystaniem modelu 2D. Zastosowanie modelowania 2D, pozwala na przeprowadzenie symulacji hydrodynamicznych w oparciu o dowolnie wybrane prawdopodobieństwo występowania opadu, czy czas jego trwania. Możliwe jest zatem określenie zasięgu zalania i maksymalnej głębokości zalania dla konkretnego opadu. Dodatkowo modelowanie 2D umożliwia symulacje rozptywu wód opadowych po terenie z uwzględnieniem szorstkości powierzchni. Wynikiem symulacji jest zatem również prędkość przepływających wód opadowych, na podstawie, której możliwe jest określenie obszarów intensywnego spływu powierzchniowego.

Obszary wyznaczone przy użyciu różnych siatek obliczeniowych siatkę GRID oraz siatkę MESH w znacznym stopniu pokrywają się. W obszarach tych nieznaczne różnice występują w powierzchni, średniej głębokości wody oraz maksymalnej głębokości wody. Różnice te są jednak niewielkie i biorąc pod uwagę założone uproszczenia dla tego wariantu można uznać je za pomijalnie małe. Istotny jest jednak fakt, że w oparciu o siatkę GRID wyznaczonych zostało znacznie więcej obszarów bezodpływowych. Nie oznacza to jednak, że siatka GRID jest dokładniejsza, a wręcz przeciwnie.

Co do zasady dla każdego elementu siatki przyjmowana jest uśredniona wartość ze wszystkich pikseli NMT znajdujących się w zakresie elementu siatki. Siatka o nieregularnym kształcie będzie zatem w stanie lepiej odzwierciedlić ukształtowanie terenu niż siatka GRID. W związku z powyższym do przeprowadzania obliczeń rekomenduje się wykorzystanie siatki nieregularnej trójkątnej MESH.

## 6.13. Podsumowanie

W Wariantcie 1 identyfikuje się obszary zagrożone wodami opadowymi na podstawie obszarów bezodpływowych wyznaczonych w wyniku modelowania bez uwzględnienia sieci kanalizacji deszczowej. Wariant ten będzie zatem dobrym rozwiązaniem w przypadku opracowań wstępnie wyznaczających stopień zagrożenia wodami opadowymi dla danego obszaru. Zastosowanie dwóch scenariuszy obliczeniowych t.j. deszczu o prawdopodobo-

bieństwie wystąpienia 1% i 10% oraz czasie trwania 120 min jest wystarczające do wstępnych analiz. Jeśli celem analizy jest jedynie identyfikacja obszarów zagrożonych wodami opadowymi w sposób ogólny i uproszczony bez szczegółowej analizy stopnia zagrożenia dla danego obszaru, ograniczyć się można jedynie do prawdopodobieństwa wystąpienia opadu 1%, czyli większego zagrożenia. Biorąc jednak pod uwagę korzyści płynące z dodatkowej identyfikacji obszarów potencjalnej retencji, kompleksowa analiza oparta o dwa prawdopodobieństwa jest zdecydowanie bardziej rekomendowana niż analiza oparta wyłącznie o jeden scenariusz dla prawdopodobieństwa 1%. Dodatkowo analiza dla dwóch prawdopodobieństw pozwoli na zoptymalizowanie kosztów ewentualnych inwestycji i określenie hierarchii ważności danego obszaru, gdyż nie dla wszystkich obszarów zagrożonych wodami opadowymi wyznaczonych dla prawdopodobieństwa 1% zostały wyznaczone w tych samych miejscach obszary zagrożone dla prawdopodobieństwa 10%.



## 7. Wariant 2 - Podejście uwzględniające model kanalizacji w sposób uproszczony

### 7.1. Scenariusze obliczeniowe

Mając na uwadze cel wariantu i mnogość hipotetycznych scenariuszy, w ramach prac analitycznych dla zlewni pilotażowych przeprowadzono obliczenia w oparciu o aż dziesięć różnych scenariuszy obliczeniowych, w tym 4 scenariusze uwzględniające zmiany klimatu.

- Podstawowe scenariusze obliczeniowe:
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (raz na 100 lat) i czasie trwania  $t = 15$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (raz na 10 lat) i czasie trwania  $t = 15$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 20\%$  (raz na 5 lat) i czasie trwania  $t = 15$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (raz na 100 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (raz na 10 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 20\%$  (raz na 5 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min.
- Scenariusze obliczeniowe uwzględniające zmiany klimatu:
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (1%CC) i czasie trwania  $t = 15$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (1%CC) i czasie trwania  $t = 15$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (1%CC) i czasie trwania  $t = 120$  min,
  - ▶ opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (10%CC) i czasie trwania  $t = 120$  min.

Analiza tak wielu scenariuszy pozwoliła wykazać odpowiednie rekomendacje do dalszego stosowania.

### 7.2. Wybór modeli

Do analiz w Wariacie 2 rekomenduje się zastosowanie modeli dwuwymiarowych (2D). Modele hydrauliczne dwuwymiarowe można przygotować dla dwóch różnych podwariantów. W poniższej tabeli (Tabela 8) przedstawiono kluczowe założenia dla obu podwariantów.

Tabela 8 Kluczowe założenia dla poszczególnych podwariantów

Podwariant	Siatka	Inne elementy
2.1	Nieregularna (tzw. flexible mesh)	Budowa siatki na podstawie NMT, Poziom zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach, <b>Uproszczony system kanalizacji deszczowej reprezentowany przez punkty źródłowe,</b> <b>Opad miarodajny,</b> Infiltracja zmienna w czasie.
2.2	Nieregularna (tzw. flexible mesh)	Budowa siatki na podstawie NMT, Poziom zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach, <b>Opad zmniejszony o ilość wody odprowadzanej przez system kanalizacji deszczowej w obszarze zasięgu kanalizacji,</b> <b>Opad miarodajny w obszarze nie znajdującym się w zasięgu systemu kanalizacji deszczowej,</b> Infiltracja zmienna w czasie.

źródło: opracowanie własne

Modele 2D oparte są o siatki obliczeniowe przygotowane na podstawie odpowiednio zmodyfikowanego NMT. Sposób modyfikacji NMT został opisany w dalszej części [rozdziału 7](#).

Z uwagi na cele analiz i niezbędną dokładność wyników rekomenduje się zastosowanie siatki obliczeniowej nieregularnej, składającej się z trójkątów i prostokątów. Dla obszarów zurbanizowanych o wysokim zagęszczeniu zabudowy, należy przyjąć możliwie najmniejsze pole powierzchni – na przykład maksymalne pole powierzchni wieloboków wynoszące 5 m<sup>2</sup>. Dla terenów, na których zwiększenie elementów siatki nie wpłynie istotnie na wyniki modelowania można zastosować większe wieloboki, np. o powierzchni do 20 m<sup>2</sup>. Szczegółowy opis przygotowania siatek obliczeniowych znajduje się w dalszej części opisu metodycznego. W przypadku tego wariantu zasadne jest przyjęcie stałych poziomów wody w rzekach i dopływach.

Do modelu należy wprowadzić takie przepływy lub takie rzędne zwierciadeł wody w przekrojach, które spowodują napełnienie w ciekach na wysokości brzegów. Zastosowanie wody brzegowej, zamiast wód powodziowych pozwoli na urealnienie scenariusza obliczeniowego.

Proponowane podwarianty różnią się między sobą sposobem odwzorowania wpływu istniejącego systemu kanalizacji deszczowej. Podwariant 2.1 możliwy jest do wykonania w przypadku posiadania wiarygodnych informacji o lokalizacji wpustów (studzienek). W przypadku braku rzetelnych danych o lokalizacji wpustów Podwariant 2.2 może okazać się jedyną możliwą do zastosowania opcją.

Jeśli jednak mamy informację o studzienkach (Podwariant 2.1) do modelu należy je zaimplementować fizycznie jako punkty źródłowe (ang. „point source”) o ujemnych wartościach przepływu, które dystrybuują zadany przepływ w sposób stały. Oznacza to, że jeśli do elementu siatki obliczeniowej, na którym znajduje się punkt źródłowy dopłynie woda opadowa, a jej ilość jest mniejsza lub równa założonemu ujemnemu przepływowi na punkcie źródłowym, to do kolejnego elementu siatki nie zostanie przetransportowana żadna ilość wody. Jeśli ilość wody dopływającej do elementu siatki obliczeniowej, na którym znajduje się punkt źródłowy jest większa niż założony ujemny przepływ to do kolejnego elementu siatki zostanie przetransportowana ilość wody pomniejszona o założony ujemny przepływ na punkcie źródłowym. W Podwariacie 2.2 wpływ istniejącego systemu kanalizacji deszczowej jest uwzględniony w postaci opadu zmniejszonego o szacowaną ilość wody, która jest odprowadzana przez system kanalizacji deszczowej w obszarze zasięgu tej kanalizacji.

Podwarianty różnią się również między sobą także sposobem uwzględniania opadu w przeprowadzonych obliczeniach. W Podwariacie 2.1 wykorzystuje się opad miarodajny, czyli odpowiedni dla danego obszaru opad, dla którego dane można pozyskać np. z projektu PMAOTP.

W Podwariacie 2.2 w obszarze, który nie znajduje się w zasięgu systemu kanalizacji deszczowej wykorzystuje się do obliczeń opad miarodajny, natomiast w obszarze, który znajduje się w zasięgu kanalizacji deszczowej wykorzystuje się opad zmniejszony o ilość wody odprowadzanej przez system kanalizacji deszczowej. Szczegółowy opis dotyczący sposobu pozyskania danych opadowych i sposobu ich przygotowania dla podwariantów opisany został w dalszej części rozdziału.

Oba podwarianty zakładają zastosowanie mapy szorstkości, aby prawidłowo odzwierciedlić spływ wód opadowych po powierzchni terenu. Dla różnego rodzaju zagospodarowania terenu przyjmuje się odpowiadające im współczynniki Manninga.

Oba podwarianty zakładają również uwzględnienie infiltracji zmiennej w czasie wprowadzonej bezpośrednio do modelu. Do obliczeń infiltracji rekomenduje się wykorzystanie wzoru Hortona, który opisuje infiltrację w profilu glebowym.

### 7.3. Siatki obliczeniowe

Dla Wariantu 2 rekomenduje się do obliczeń siatkę obliczeniową, składającą się z nieregularnych trójkątów (tzw. flexible mesh).

Ważne, aby wielkość „oczek” obliczeniowych siatki dobierać w odniesieniu do analizowanej powierzchni. W przypadku analiz w zlewniach pilotażowych, została opracowana w oparciu o następujące założenia:

- w przypadku siatki nieregularnej maksymalne dopuszczalne pole powierzchni wieloboków wynosi 5 m<sup>2</sup>,

- dla terenów, na których zwiększenie elementów siatki nie wpłynie istotnie na wyniki modelowania dopuszcza się zastosowanie wieloboków o powierzchni do 20 m<sup>2</sup>.

Zdarza się, że z uwagi na bardzo dużą szczegółowość siatki, ilość elementów składowych oraz obszar, jaki pokrywa, konieczne jest podzielenie siatki na części. Taka konieczność wystąpiła w trakcie analiz dla zlewni pilotażowych, siatki obliczeniowe zostały podzielone na dwie części w każdym z analizowanych miast. Granicę podziału siatki najlepiej wyznaczyć na podstawie analizy przebiegu cieków z wykorzystaniem poszerzenia obszarów (funkcja buffer). W związku z tym każda z części posiada obszar wspólny pozwalający na uzyskanie prawidłowych wyników modelowania 2D. Podział siatki obliczeniowej wymusza także przygotowanie osobnych modeli hydrodynamicznych dla każdej części siatki.

## 7.4. Narzędzia do budowy modeli

Możliwe jest wykorzystanie różnego oprogramowania do wykonania przedmiotowych analiz (jak wskazano w rozdz. 3.2). W ramach niniejszego poradnika przedstawiono wytyczne metodyczne na przykładzie wykorzystania oprogramowania MIKE i ArcGIS.

Oprogramowanie MIKE+ stanowi najnowsze dostępne oprogramowanie firmy DHI. Na potrzeby analizy wykorzystano także inne programy wspierające, takie jak Mesh Builder (aplikacja webowa firmy DHI) oraz program GIS (ArcGIS). MIKE+ jest rozbudowanym narzędziem do modelowania i projektowania środowiska wodnego w tym sieci kanalizacji sanitarnych czy deszczowych, sieci wodociągowych oraz sieci rzecznych. Szczegóły dotyczące narzędzia zostały przedstawione przy opisie Wariantu 1 ([podrozdział 6.4](#)).

## 7.5. Dane wejściowe

W poniższej tabeli ([Tabela 9](#)) przedstawiono zestawienie danych niezbędnych do wykorzystania podczas identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi z uwzględnieniem wpływu sieci kanalizacyjnej w sposób uproszczony.

Tabela 9 Zestawienie danych wejściowych wykorzystywanych w Wariacie 2

Lp.	Dane	Źródło	Inne (dokładność, dodatkowy komentarz)
1	Dane o opadach prawdopodobnych	Np. IMGW-PIB	Projekt PMA XTP
2	Numeryczny model terenu (NMT)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Rozdzielczość 1m, błąd średni wysokości <0,2m, układ wysokościowy Kronsztad, LIDAR, lotniczy skaningu laserowego
3	Ortofotomapy	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	RGB o rozdzielczości 0,25 m i 0,1m
4	Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDO-T10k)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Treść i szczegółowość bazy BDOT10k odpowiada w ogólności tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000
5	Mapa zasadnicza lub Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu (GESUT)	Starostwo Powiatowe	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście

źródło: opracowanie własne

W zakresie opadów, do przeprowadzenia obliczeń niezbędne są sumy opadu dla deszczy o określonym prawdopodobieństwie i czasie trwania. Można je pozyskać m.in. z wyników projektu PMA XTP, zrealizowanego przez IMGW-PIB (rok publikacji 2022).

Następnie należy dokonać rozkładu opadu miarodajnego. Rozkładu opadów dokonuje się w celu czasoprzestrzennego zróżnicowania ich natężenia. W Polsce najczęściej używane rozkłady opadu to rozkład Eulera typu II oraz rozkład DVWK. Opad modelowy Eulera typu II jest uznawany za odpowiadający rzeczywistym, zmierzonym seriom opadów nawalnych z wielolecia w Polsce.

Na potrzeby prac w zlewniach pilotażowych wykorzystano rozkład Eulera typu II. Opad modelowy Eulera typu II należy wykorzystać do przeprowadzenia obliczeń w Podwariancie 2.1. W Podwariancie 2.2, opad miarodajny wykorzystuje się do obliczeń w obszarze, który nie znajduje się w zasięgu systemu kanalizacji deszczowej, natomiast w obszarze znajdującym się w zasięgu kanalizacji deszczowej należy wykorzystać opad zmniejszony o szacowaną ilość wody odprowadzanej przez system kanalizacji deszczowej. Opad ten również należy poddać rozkładowi, wykorzystując w tym celu rozkład Eulera typu II.

Rekomenduje się dokonanie rozkładu opadów, wykorzystując rozkład Eulera typu II. W rozkładzie tym ustala się chwilę czasową o najwyższym natężeniu, po upływie 0,3 czasu trwania opadu obliczeniowego i zaokrągla do 5 minut. Do przedziału tego dołącza się z lewej strony na osi czasu następne przedziały o mniejszych natężeniach opadu, aż osiągnięta zostaje chwila czasowa  $t = 0$ . Kolejne przedziały deszczu występują na osi czasu z prawej strony w stosunku do przedziału szczytowego i wypełniają okres do końca opadu. Jak wspomniano wcześniej, opad modelowy Eulera typu II jest uznawany za odpowiadający rzeczywistym, zmierzonym seriom opadów nawalnych z wielolecia.

W przypadku scenariuszy uwzględniających zmiany klimatu, wyliczenie opadu jest oparte o zwiększenie opadu miarodajnego o określoną wartość procentową. W przypadku wykonanych analiz dla zlewni pilotażowych przyjęto wzrost o 20%. Obliczenia wykonuje się analogicznie do zwykłych scenariuszy - na podstawie deszczy miarodajnych, a następnie poddać rozkładowi (rozkład Eulera typu II). Należy określić, do których scenariuszy dodać zwiększone wartości opadu. Proponuje się scenariusze z opadem o prawdopodobieństwie  $p = 1\%$  (1%CC) i  $p = 10\%$  (10%CC) oraz o czasie trwania  $t = 15$  min i  $t = 120$  min. Są to prawdopodobieństwa zgodne ze scenariuszami stosowanymi do przygotowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego (w Polsce i wielu innych krajach Europy). Zastosowanie spójnych prawdopodobieństw pozwala na analizę zidentyfikowanych obszarów zagrożonych wodami opadowymi i porównanie do zagrożenia powodziowego od rzek. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadu 10% zostało wybrane także w oparciu o analizę normy PN-EN 752:2008:2017. Szerzej kwestie te zostały opisane w [rozdziale 9](#).

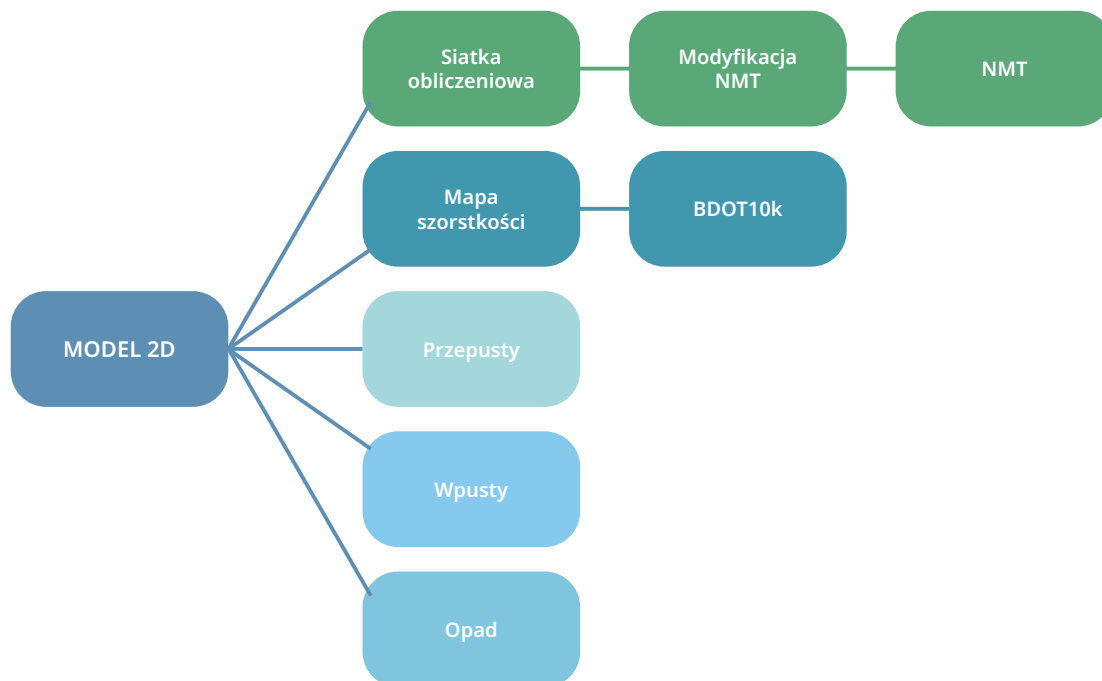
Wyliczenie opadu zmniejszonego jest oparte o zredukowanie opadu miarodajnego o ilość wody odprowadzanej przez system kanalizacji deszczowej. Na potrzeby oszacowania ilości tej wody określa się zasięg kanalizacji oraz liczbę wpustów kanalizacyjnych występujących na objętym opracowaniem obszarze. Obliczenia wykonane na podstawie deszczy miarodajnych, należy poddać rozkładowi (rozkład Eulera typu II). Dla każdego kroku czasowego wyznacza się intensywność opadu z uwzględnieniem kanalizacji. Jako wydatek jednego wpustu przyjmuje się wartość 15 l/s (wartość średnia na podstawie literatury). Przyjęty wydatek następnie należy przemnożyć przez ilość występujących wpustów. W obliczeniach uwzględnia się powierzchnię obszaru znajdującego się w zasięgu kanalizacji deszczowej. Jak wskazano wyżej, opad zmniejszony stosuje się w obszarze, który znajduje się w zasięgu kanalizacji deszczowej w obliczeniach (Podwariant 2.2).

## 7.6. Etapy budowy modeli i modelowania

Przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych wodami opadowymi w ramach Wariantu 2 pierwszym etapem budowy modeli jest odpowiednie przygotowanie danych wejściowych. W tym zakresie konieczne jest opracowanie mapy szorstkości, siatki obliczeniowej, mapy infiltracji oraz numerycznego modelu terenu uwzględniającego ukształtowanie terenu z jak najlepszym odwzorowaniem istotnych dla analizy obiektów, w tym mostów, cieków, rowów, sztucznych kanałów czy obniżen dróg. Dodatkowo przed budową modelu należy przygotować dane opadowe. Budowa modelu polega na wczytaniu przygotowanych danych, wprowadzeniu bezpośrednio do modelu informacji o przepustach, poziomie zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach, a także wpustach (studzienkach) ulicznych w przypadku Podwariantu 2.1 oraz ustawieniu parametrów symulacji. W Podwariancie 2.2 system kanalizacji deszczowej uwzględnia się poprzez zmniejszenie opadu w obszarze spływu wód do kanalizacji deszczowej, tym samym wpusty uliczne nie są wprowadzane bezpośrednio do modeli Podwariantu 2.2.

Na poniższym rysunku przedstawiono poszczególne kroki składające się na budowę modelu.

Rysunek 28 Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu



źródło: opracowanie własne

### 7.6.1. Mapa szorstkości

W celu odwzorowania hydrodynamiki spływu powierzchniowego należy opracować mapę szorstkości (w przypadku oprogramowania MIKE, mapa jest w postaci pliku dfs2). Informacje dotyczące przestrzennego rozmieszczenia pokrycia terenu oraz klas użytkowania terenu pozyskuje się z bazy danych obiektów topograficznych (BDOT10k). Natomiast wartości współczynników szorstkości Manninga „n” przypisuje do odpowiednich klas użytkowania, zgodnie z „Metodyką opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym”, (2020)<sup>14</sup>. W tym obszarze występuje pełna analogia przebiegu prac analitycznych do Wariantu 1. Szerzej opisano ten element budowy modelu w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 7.6.2. Dane o ukształtowaniu terenu

Podstawowym źródłem informacji na temat powierzchni terenu jest numeryczny model terenu. Na potrzeby budowy modeli 2D wykorzystuje się najnowszy dostępny NMT, aby uzyskać jak najlepszą aktualność tych danych. Dane zawarte w NMT należy zrewidować na potrzeby analiz i w określonych obszarach zmodyfikować. Modyfikacja numerycznego modelu terenu polega na obniżeniu rzędnych w miejscu występowania dróg z krawężnikami oraz uwzględnieniu mostów. Szczegółowy opis przeprowadzonych modyfikacji znajduje się w poniższych podrozdziałach. Zmodyfikowanie NMT stanowi podstawę do określenia wysokości dla elementów siatki obliczeniowej. Siatka obliczeniowa stanowi schematyzację numerycznego modelu terenu.

### 7.6.3. Obniżenie dróg

Obniżenie numerycznego modelu terenu w miejscu dróg z krawężnikami wykonuje się, aby lepiej odwzorować spływ powierzchniowy po tych drogach. Woda opadowa nie rozlewa się poza jezdnię, aż do momentu osiągnięcia głębokości wyższej niż głębokość zagłębienia. Analogiczna sytuacja występuje w rzeczywistości. Woda opadowa, która znajduje się na jezdni nie rozlewa się poza krawężniki, jeśli głębokość wody jest niższa niż wysokość krawężników. W przypadku niektórych dróg już w podstawowym NMT widać obniżenie jezdni względem chodników. Obniżenie to jest jednak kilkucentymetrowe. Dodatkowo błąd średni wysokości w wy-

14 Metodyka aMZPiMRP,

<https://powodz.gov.pl/www/powodz/Mapy/raport%202022/aMZPiMRP%20Zal1%20Metodyka%20RZEKI%2020200617%20v7.00%20pub.pdf>



korzystanym NMT to 0,2 m. Dlatego też rekomenduje się, aby wszystkie zidentyfikowane drogi z krawężnikami zostały obniżone.

Dlatego niezbędne jest przygotowanie warstwy wyznaczającej przebieg dróg posiadających krawężniki. Jezdnie dróg z krawężnikami znajdują się niżej niż otaczający je teren, więc warstwa ta określa zasięg, w którym numeryczny model terenu powinien zostać obniżony. Do wyznaczenia tego zasięgu wykorzystuje się wcześniej przygotowaną warstwę, opracowaną na etapie budowy mapy szorstkości.

Na podstawie informacji zawartych w tabeli atrybutów: (kolumna z informacją o szerokości nawierzchni) i „kolumna z informacją o materiale nawierzchni, przyjmuje się założenie, że drogi o szerokości powyżej 4 m oraz o materiale pokrycia: masa bitumiczna, kostka perforowana oraz beton posiadają krawężniki. Szerokość 4 m została dobrana na podstawie analizy dróg występujących na obszarze opracowania. W trakcie analizy zauważono, że drogi o szerokości poniżej 4 m zazwyczaj są drogami nie posiadającymi krawężników.

Ponadto należy usunąć poligony, które nie posiadają połączenia hydraulicznego z pozostałymi drogami. Obniżenie NMT dla tych poligonów skutkowałoby stworzeniem sztucznych obszarów bezodpływowych. Dodatkowo należy także usunąć drogi spełniające założone kryteria szerokości i nawierzchni, ale leżące w miejscach, gdzie występowanie krawężników jest mało prawdopodobne np. szerokie drogi z płyt betonowych w lasach.

Przy pomocy tak przygotowanych poligonów można obniżyć numeryczny model terenu o założoną wartość wynoszącą 15 cm. Jest to najczęściej stosowana w Polsce wysokość krawężnika.

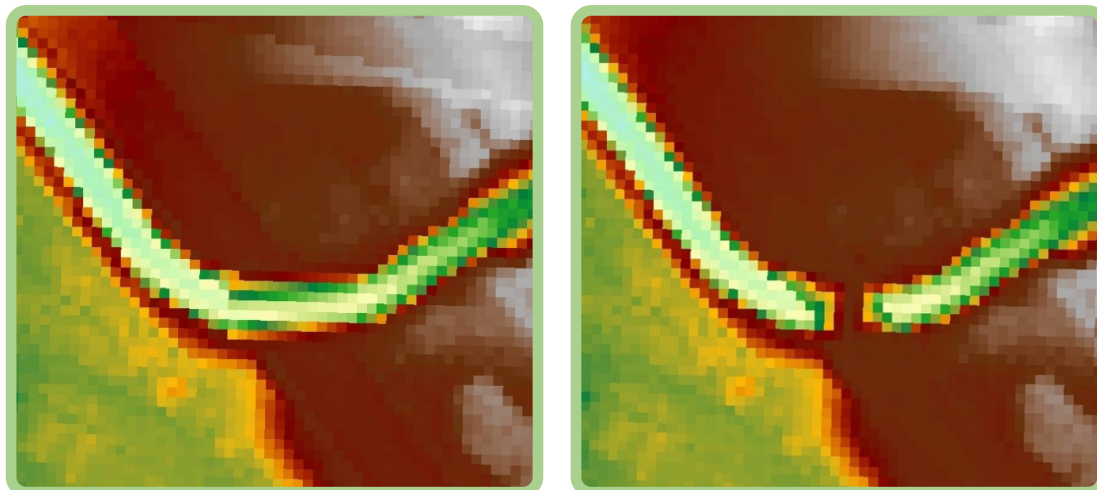
#### 7.6.4. Odwzorowanie mostów

Kolejny istotny krok, który pozwoli prawidłowo odwzorować zjawiska hydrodynamiczne w miejscu ich lokalizacji, to uwzględnienie struktur (obiektów). Istnieją dwa sposoby umożliwiające odwzorowanie istotnych obiektów takich jak przepusty i mosty.

[1] Jednym z nich jest wprowadzenie obiektu w oprogramowaniu, w tym przypadku MIKE+, za pomocą modułu „2D culverts”.

[2] Drugim sposobem jest zmodyfikowanie („wypalenie”) obiektów w numerycznym modelu terenu. W tym celu tworzy się przekrój bezpośrednio przed i za obiektem w miejscach, w których NMT odwzorowuje koryto. Następnie na przekrojach generuje się punkty w odległościach umożliwiającym prawidłowe odwzorowanie koryta i odczytuje się dla nich wysokości z numerycznego modelu terenu. W kolejnym kroku z przygotowanych punktów tworzy się TIN, który następnie konwertuje się na raster. Ostatnim krokiem jest połączenie NMT z wygenerowanym rastrem. Porównanie numerycznego modelu terenu przed i po modyfikacji w miejscu budowl przedstawia [Rysunek 29](#).

Rysunek 29 Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji mostu (po prawej) dla miasta Nowy Sącz



źródło: opracowanie własne

### 7.6.5. Odzworowanie cieków, rowów i sztucznych kanałów

Cieki, rowy i sztuczne kanały są już odzworowane w numerycznym modelu terenu. Poprawność ich odzworowania należy jednak zweryfikować. Pierwszym etapem weryfikacji cieków, rowów i sztucznych kanałów jest wizualny przegląd NMT na całej długości cieków. Następnie w programie GIS, bazując na NMT, można wygenerować profile cieków oraz rowów, które umożliwiają analizę poprawności ich odzworowania. Na podstawie weryfikacji wizualnej NMT i weryfikacji profili wybiera się wątpliwe miejsca. Następnie sprawdza się je, generując przekroje na podstawie NMT, czy nie ma obszarów wymagających modyfikacji.

### 7.6.6. Poziom zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach

Do modelu w Wariancie 2 należy wprowadzić rzędne zwierciadła wody w ciekach. Obiekty w przypadku analiz pilotażowych zostały wprowadzone do oprogramowania MIKE+ za pomocą modułu „2D boundary conditions” jako przekroje. Wartości wprowadzonych rzędnych zwierciadła wody są stałe w czasie i zostały wprowadzone w celu napełnienia cieków. Na potrzeby analiz pilotażowych założono napełnienie w ciekach bliskie napełnieniu do wysokości brzegów. Dzięki temu woda opadowa spływająca po terenie nie powinna się gromadzić się w pustym korycie, nie powodując zalania przyległych terenów. Również woda z cieku nie będzie wylewać się na przyległe tereny, co prowadziłoby do wyznaczenia zalewu od powodzi rzecznej a nie od wód opadowych spływających po terenie.

### 7.6.7. Budynki

W procesie tworzenia NMT budynki są usuwane w sposób automatyczny. Może to powodować powstawanie w NMT lokalnych zagłębień w obrębie usuwanego budynku, do których wlewa się woda opadowa w trakcie symulacji. Takie sytuacje należy zweryfikować na etapie opracowania wyników modelowania.

Obszary znajdujące pod budynkami zostały w niniejszej analizie uwzględnione w siatce obliczeniowej. Duża część analizowanego terenu to obszar zurbanizowany z wieloma budynkami. Opad zrzucający jest na siatkę obliczeniową, więc usunięcie budynków spowodowałoby znaczne zmniejszenie objętości wód opadowych. Jednakże należy zaznaczyć, że może to powodować objęcie obszarem zagrożenia budynków, których poziom parteru znajduje się poniżej rzędnej wód opadowych.

To dodatkowy punkt względem przygotowania danych wejściowych w Wariancie 1.

### 7.6.8. Przygotowanie danych opadowych

Przygotowanie danych opadowych do modelowania hydrodynamicznego przebiega w dwóch krokach:

- opracowanie lub pozyskanie danych o opadach maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia,
- przeprowadzenie rozkładu opadu miarodajnego.

Opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 7.6.9. Wybrane zagadnienie metodyczne. Siatki obliczeniowe

Siatka obliczeniowa stanowić powinna schematyzację numerycznego modelu terenu, który w sposób jak najbardziej reprezentatywny odzworowywać będzie ukształtowanie terenu. Warstwą bazową do wyznaczania zasięgu siatki jest obszar administracyjny obszaru opracowania. Następnie wykonuje się poszerzenie tego obszaru (funkcja buffer) o zadaną wartość. Wartość ta powinna stanowić kilkukrotność szerokości elementu siatki obliczeniowej w celu uzyskania odpowiedniej strefy buforowej. Różnicę pomiędzy zasięgiem granicy administracyjnej, a zasięgiem wykonanych siatek obliczeniowych dla analizowanych zlewni pilotażowych przedstawiają [Rysunek 30](#) i [Rysunek 31](#). Krawędź siatki obliczeniowej z zasady jest barierą, która zatrzymuje wodę.

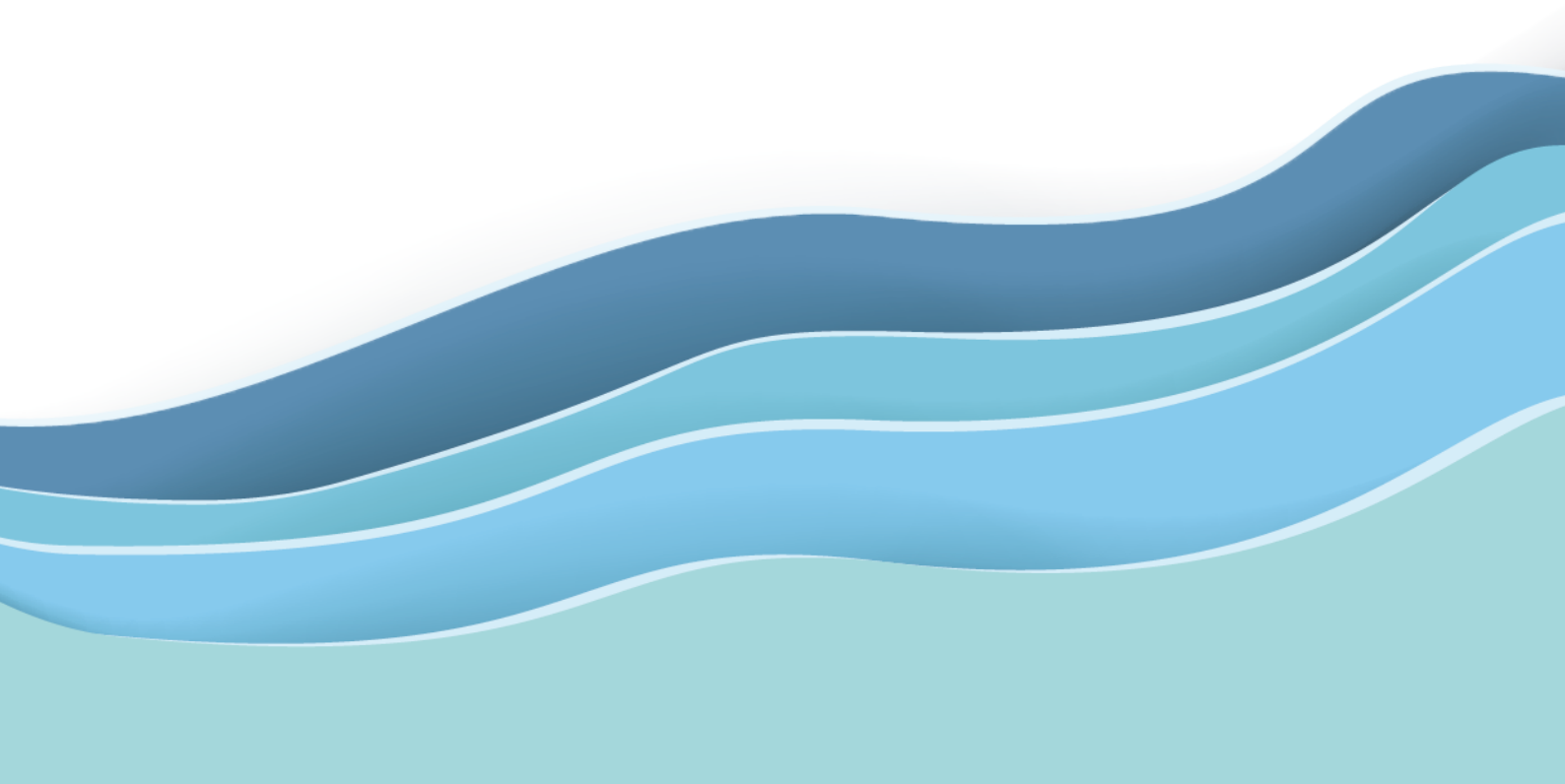
Program MIKE+ umożliwia „otwarcie” zewnętrznych węzłów obliczeniowych w celu odprowadzenia wód poza siatkę. Taki zabieg nie jest stosowany na całej długości (obrysie) krawędzi zewnętrznych, ale w wybranych fragmentach, w których znaczne ilości wód opadowych w rzeczywistości odpływają np.: ujście rzeki, rów od-

wadniający, itp. Dzięki temu zabiegowi nie następuje sztuczne zalanie obszarów, które w rzeczywistości nie są zalewane przez wody opadowe.

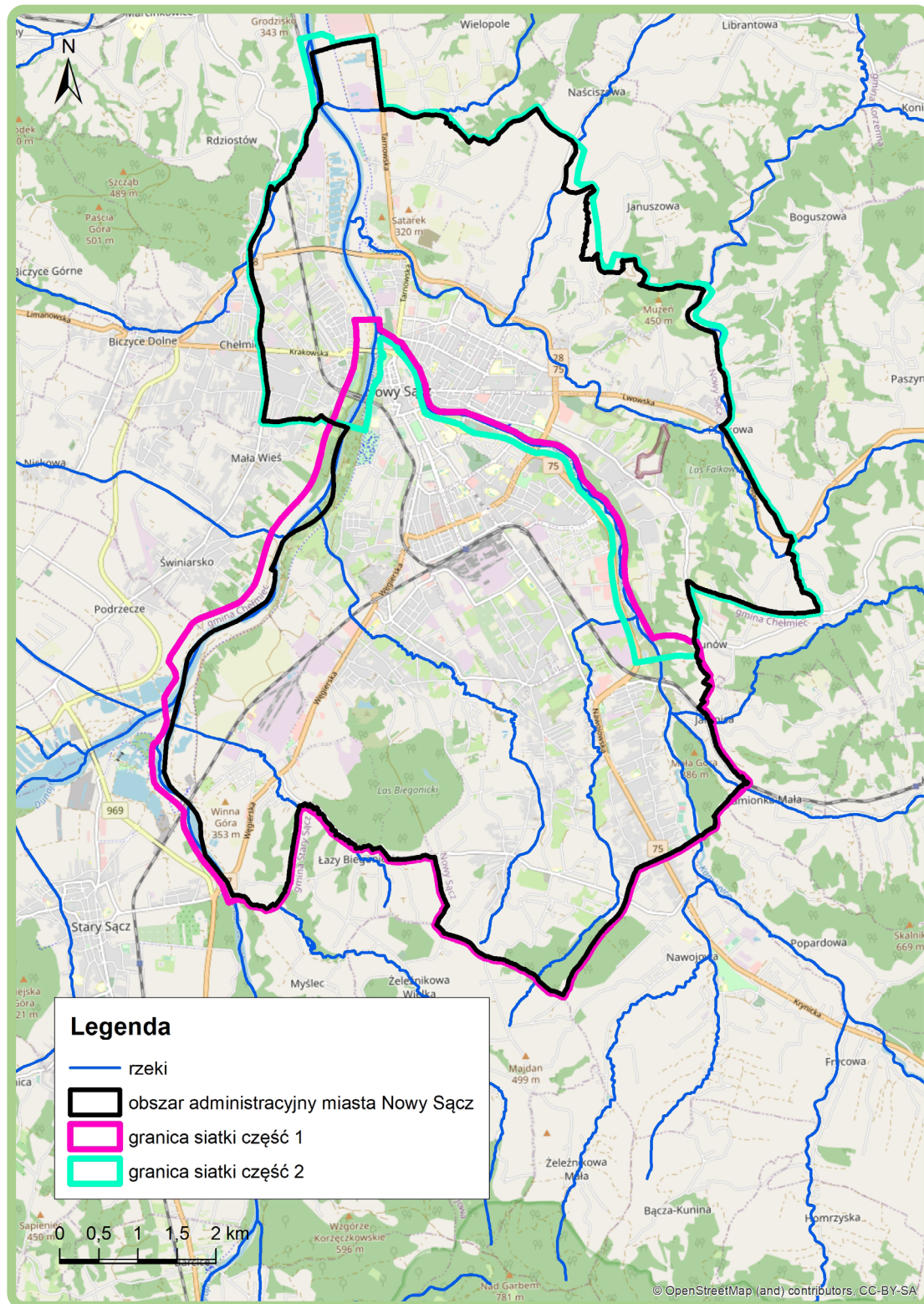
Ponadto poszerzony obszar zasięgu siatki obliczeniowej powinien zostać poddany weryfikacji i ewentualnej modyfikacji. Siatka powinna obejmować teren, który w sposób jak najbardziej poprawny odprowadzi wody opadowe do odbiornika.

Dla Wariantu 2 rekomenduje się stosowanie siatki obliczeniowej, składającej się z nieregularnych trójkątów (tzw. flexible mesh).

W zależności od wielkości analizowanego obszaru zdarza się, że konieczne jest podzielenie siatki na części, z uwagi na bardzo dużą szczegółowość siatki, ilość elementów składowych oraz obszar jaki pokrywa. Usprawnia to następnie proces symulacji modelowych. W przypadku miast pilotażowych siatka została podzielona na dwie części.

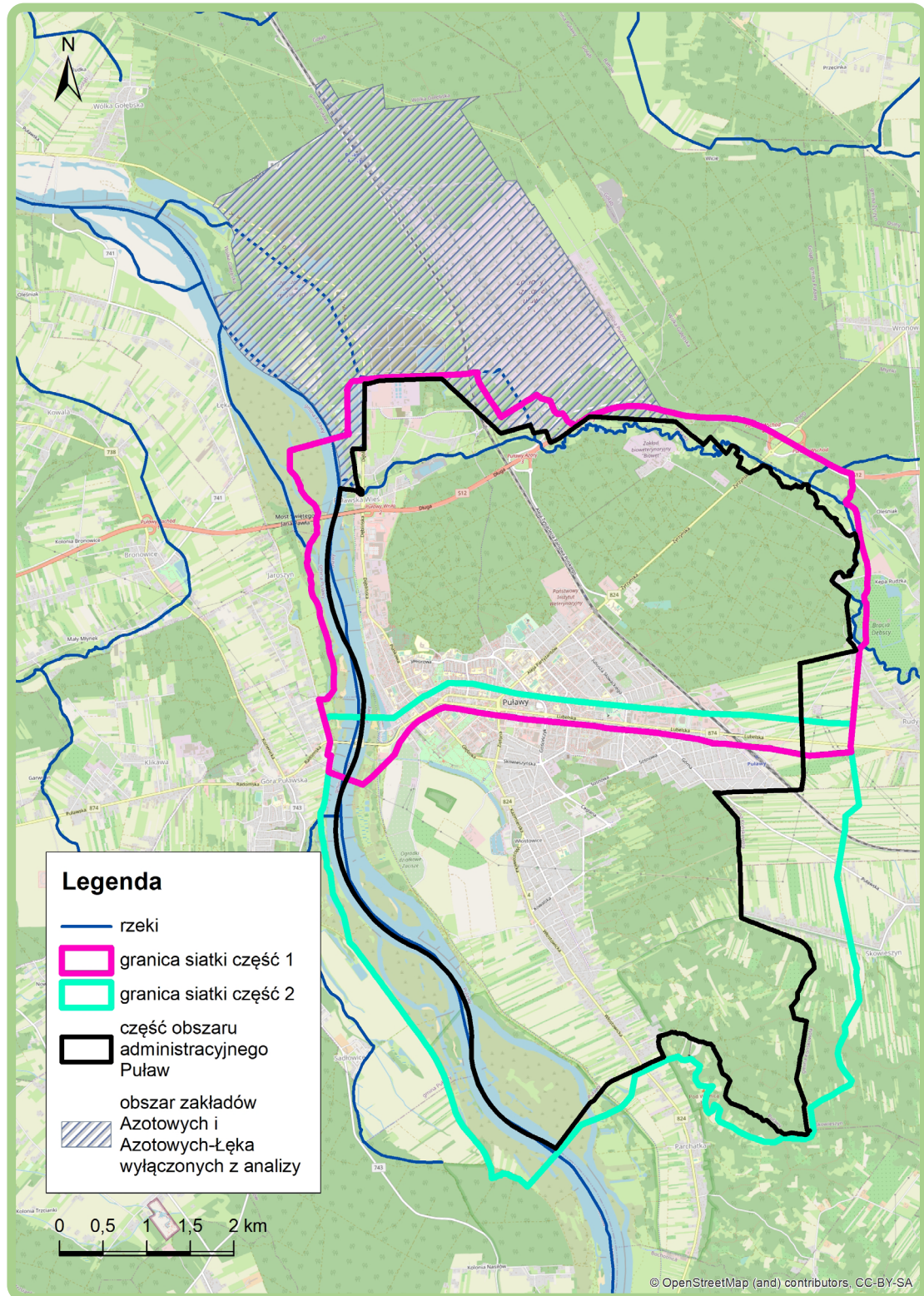


Rysunek 30 Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Nowy Sącz



źródło: opracowanie własne

Rysunek 31 Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Puławy



źródło: opracowanie własne

### 7.6.10. Infiltracja

Istotnym parametrem w modelowaniu w zlewniach zurbanizowanych jest informacja o infiltracji. W celu odwzorowania infiltracji terenu należy przygotować mapę infiltracji (w przypadku modeli w oprogramowaniu MIKE+ mapa jest w postaci pliku dfs2). Informacje dotyczące występowania terenów zurbanizowanych należy pozyskać z bazy danych obiektów topograficznych (BDOT10k). Szczegółowe kroki przygotowania tej warstwy przedstawiono w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 7.6.11. Przepusty

Do modelu należy wprowadzić przepusty w celu prawidłowego odwzorowania zjawisk hydrodynamicznych w miejscu ich lokalizacji. W przypadku oprogramowania MIKE+ obiekty zostały wprowadzone za pomocą modułu „2D culverts”. Nadaje się im parametry, takie jak: rzędna dna na początku przepustu, rzędna dna na końcu przepustu, długość, kształt przekroju, wysokość, szerokość, w przypadku przepustów o przekroju kołowym średnica oraz liczba przepustów (w przypadku przepustów ułożonych równolegle).

### 7.6.12. Wpusty

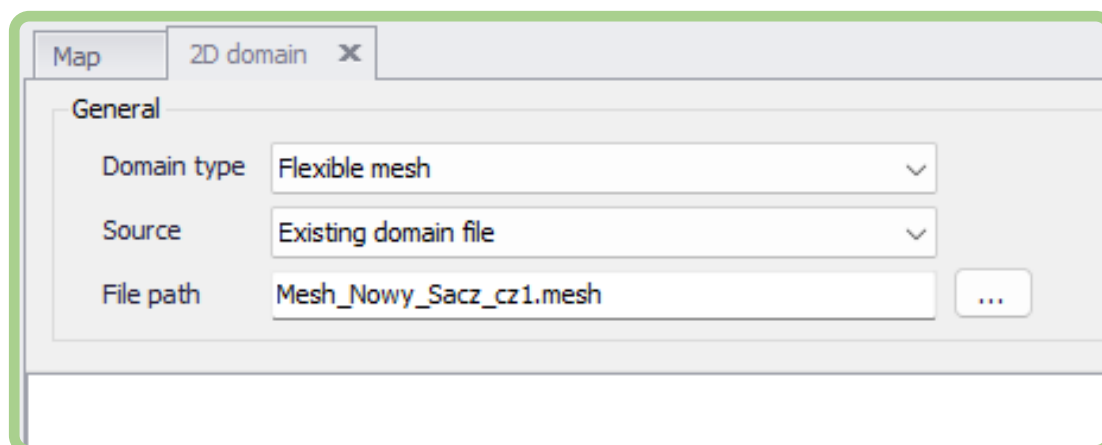
Dla Podwariantu 2.1 do modelu należy wprowadzić wpusty (studnie) uliczne, odwzorowujące w sposób uproszczony system kanalizacji deszczowej. W przypadku oprogramowania MIKE+ za pomocą modułu „2D boundary conditions” jako punkty źródłowe (ang. „point source”), które dystrybuują zadany ujemny przepływ w sposób stały w czasie. Dzięki przestrzennej lokalizacji studni są one przypisywane bezpośrednio do węzłów obliczeniowych siatki, co daje możliwość doprecyzowania spływu powierzchniowego. Przyjęty ujemny przepływ wynosi -15 l/s, jest to wartość średnia z zakresu przepustowości wpustów podawanego w literaturze (10 l/s – 20 l/s).

### 7.6.13. Wprowadzanie danych do modeli 2D

Poniżej, w kolejnych krokach przedstawiono założenia do wprowadzania danych do modeli 2D, z wykorzystaniem narzędzia MIKE. Proces ten może nieznacznie różnić się w innych narzędziach, należy wówczas zrewidować to z instrukcją dla tego narzędzia.

W pierwszym kroku należy wczytać do modelu wcześniej przygotowaną siatkę MESH. W tym celu w zakładce 2D domain należy wskazać odpowiedni typ, źródło oraz ścieżkę do pliku. Na poniższym rysunku ([Rysunek 32](#)) przedstawiono ustawienia dla siatki MESH.

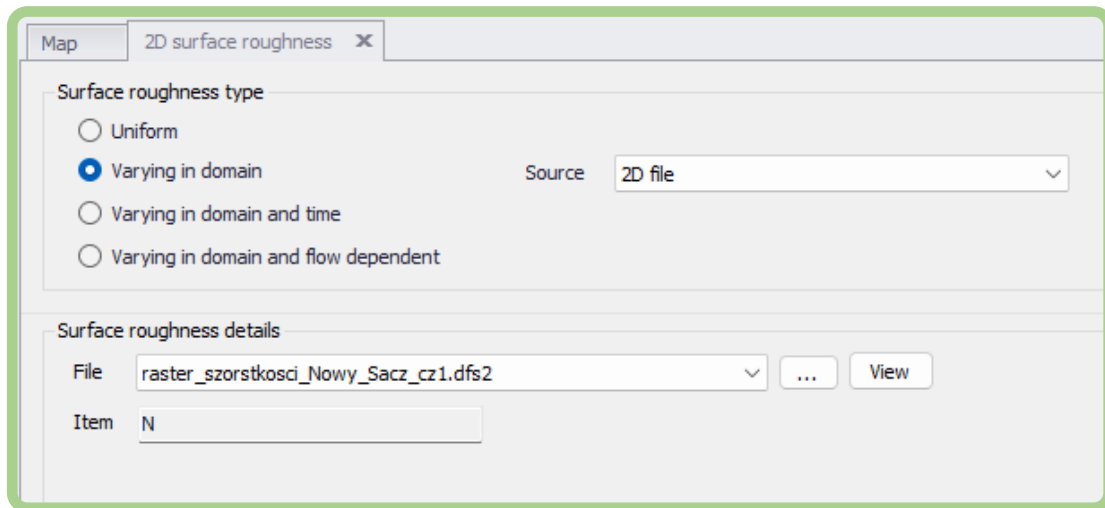
Rysunek 32 Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH



źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku w zakładce 2D surface roughness wczytuje się wcześniej przygotowany raster szorstkości. Na poniższym rysunku ([Rysunek 33](#)) przedstawiono ustawienie programu dla rastra szorstkości.

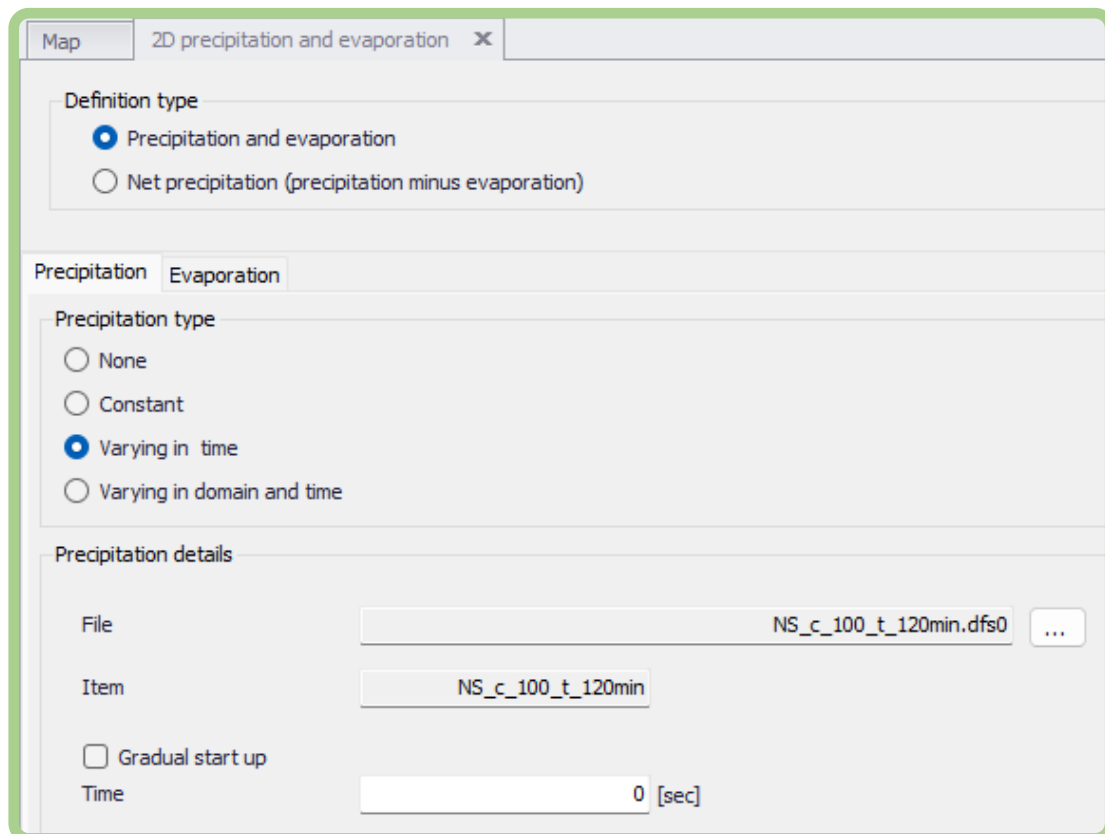
Rysunek 33 Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku w zakładce 2D precipitation and evaporation wczytuje się wcześniej przygotowany plik .dfs0 z opadem. Na poniższym rysunku (Rysunek 34) przedstawiono ustawienie programu dla pliku z opadem.

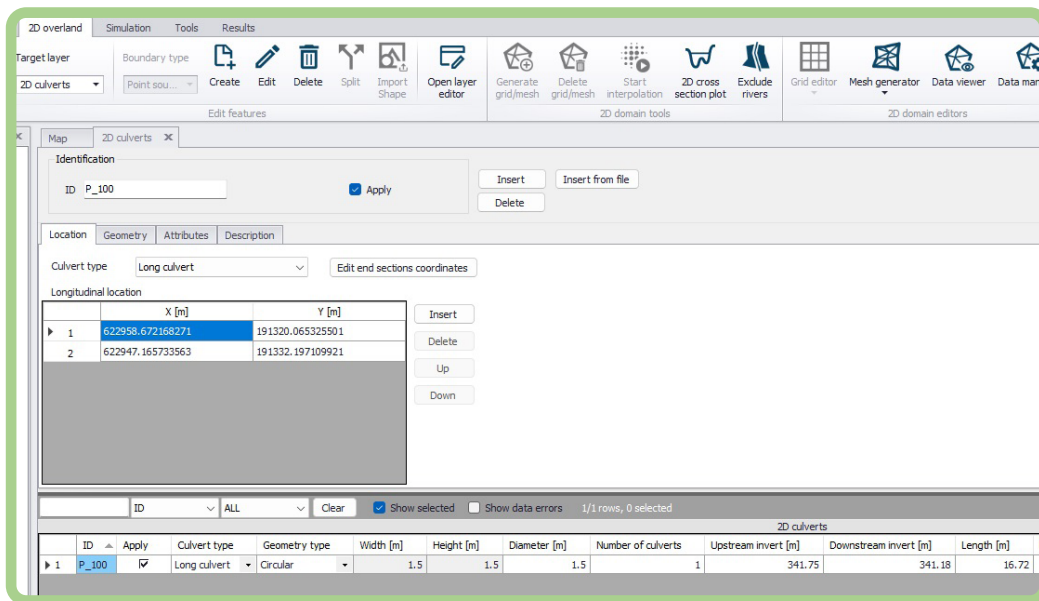
Rysunek 34 Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

W następnym kroku należy wprowadzić do modelu przepusty. Każdy przepust zostaje wprowadzony do oprogramowania MIKE+ indywidualnie za pomocą modułu „2D culverts”. W tym celu w zakładce 2D overland wybiera się moduł 2D culverts oraz opcja Create, a dzięki czemu zostaje on wrysowany w odpowiedniej lokalizacji. Wrysowanym przepustom należy nadać parametry, takie jak: rzędna dna na początku przepustu, rzędna dna na końcu przepustu, długość, kształt przekroju, wysokość, szerokość, w przypadku przepustów o przekroju kołowym średnica oraz liczba przepustów (w przypadku przepustów ułożonych równolegle). Na poniższym rysunku (Rysunek 35) przedstawiono ustawienie programu dla przepustu.

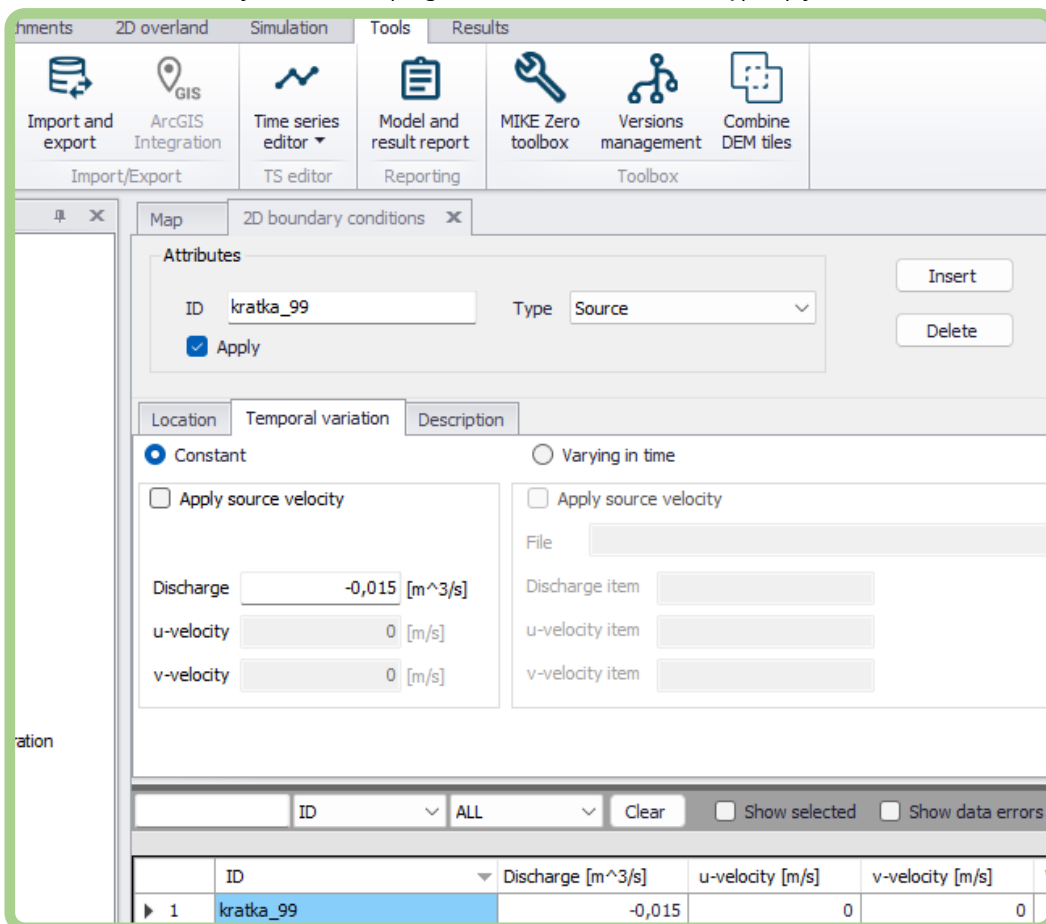
Rysunek 35 Okno zakładki 2D culverts w programie MIKE+ wraz z parametrami przepustu



źródło: opracowanie własne

Następnie należy wprowadzić wpusty uliczne (Podwariant 2.1). Obiekty wprowadza się do oprogramowania MIKE+ za pomocą modułu „2D boundary conditions” jako punkty źródłowe (ang. „point source”), które dystrybuują zadany ujemny przepływ w sposób stały w czasie. W tym celu należy wykorzystać wewnętrzne narzędzie oprogramowania Mike+, jakim jest Import and export. Narzędzie to pozwala na użycie przygotowanej wcześniej warstwy przestrzennej (.shp), która wskazuje lokalizację wpustów ulicznych. Dzięki przestrzennej lokalizacji są one przypisywane bezpośrednio do węzłów obliczeniowych siatki, co daje możliwość doprecyzowania spływu powierzchniowego. Przyjęty ujemny przepływ wynosi  $-15 \text{ l/s}$ , jest to wartość średnia z zakresu przepustowości wpustów podawanego w literaturze ( $10 \text{ l/s} - 20 \text{ l/s}$ ). Na poniższym rysunku (Rysunek 36) przedstawiono ustawienie programu dla wpustu ulicznego.

Rysunek 36 Okno zakładki 2D boundary conditions w programie MIKE+ wraz z wartością przepływu



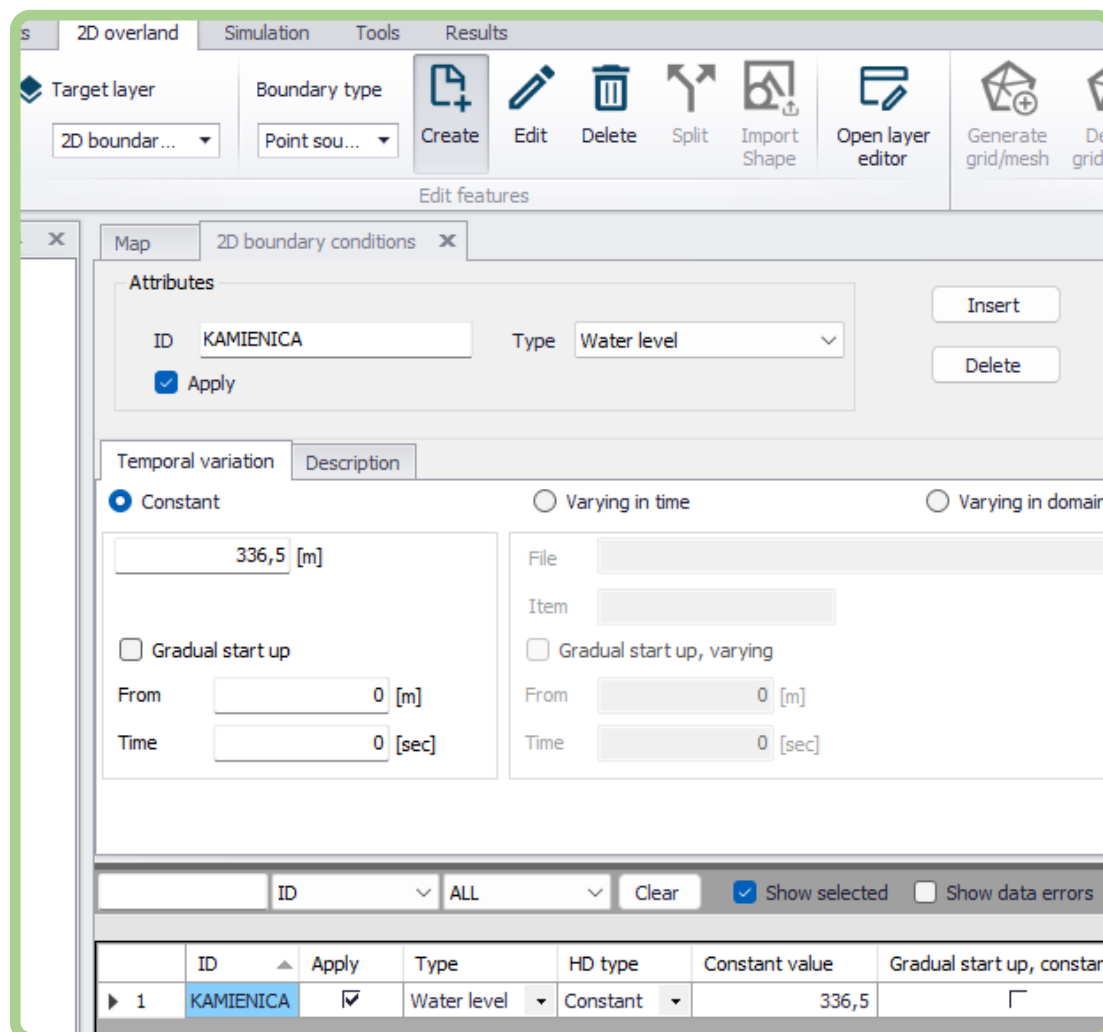
źródło: opracowanie własne



W następnym kroku należy wprowadzić informację o poziomie zwierciadła wody w odbiorniku i dopływach. Każdy poziom wprowadza się do oprogramowania MIKE+ indywidualnie za pomocą modułu „2D boundary conditions” jako przekrój. W tym celu w zakładce 2D overland wybiera się moduł 2D boundary conditions oraz opcję Create, a następnie rysuje w odpowiedniej lokalizacji na krawędzi siatki obliczeniowej. Wrysowanym przekrojom zostają nadane wartości rzędnych zwierciadła wody, które są stałe w czasie i zostały wprowadzone w celu napełnienia cieków.

Na potrzeby analizy w zlewniach pilotażowych założono napełnienie w ciekach bliskie napełnieniu do wysokości brzegów. Dzięki temu woda opadowa spływająca po terenie nie będzie gromadzić się w pustym korycie, nie powodując zalania przyległych terenów. Również woda z cieków nie będzie wylewać się na przyległe tereny, co prowadziłoby do wyznaczenia zalewu od powodzi rzecznej, a nie od wód opadowych spływających po terenie. Na poniższym rysunku ([Rysunek 37](#)) przedstawiono ustawienie programu dla poziomu zwierciadła wody.

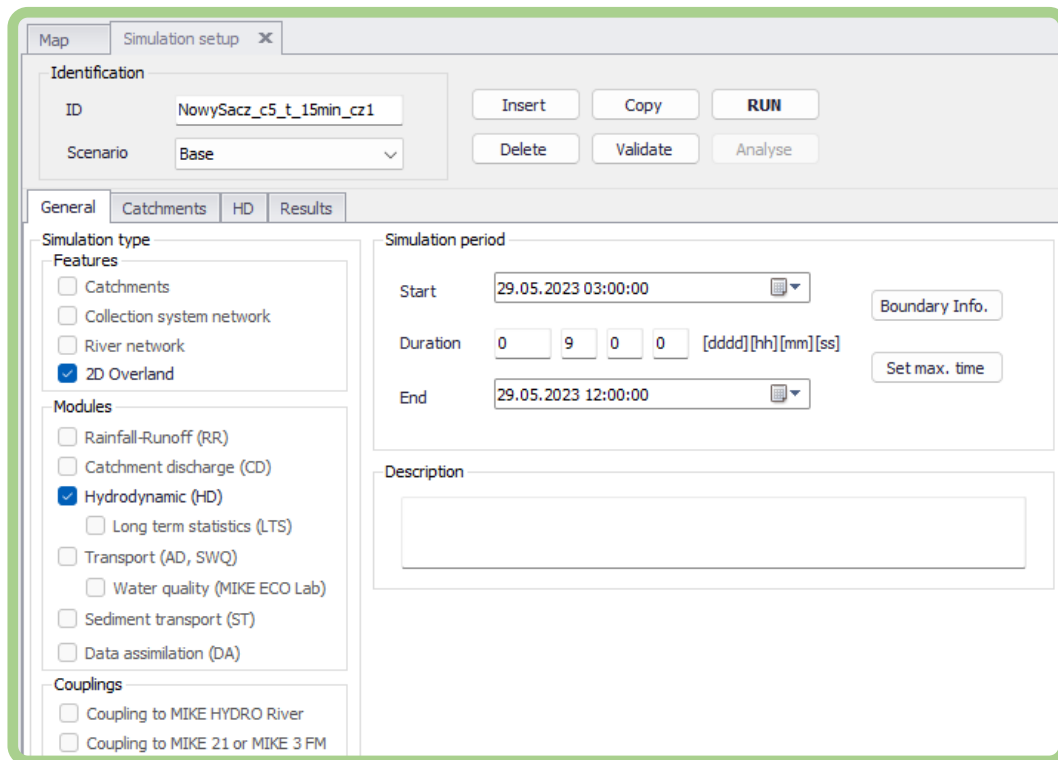
Rysunek 37 Okno zakładki 2D boundary conditions w programie MIKE+ wraz z wartością rzędnej zwierciadła



źródło: opracowanie własne

Ostatnim wymaganym krokiem jest ustawienie parametrów symulacji w zakładce Simulation setup. Sprowadza się to do ustawienia typu symulacji (2D Overland i Hydrodynamic (HD)) oraz czasu symulacji. Czas symulacji powinien być na tyle długi, aby wody opadowe całkowicie spłynęły po powierzchni, a te które na niej pozostały były jedynie wodami opadowymi zgromadzonymi w zagłębieniach terenu (obszarach bezodpływowych). Czas ten dobiera się iteracyjnie, na podstawie analizy wyników kolejnych symulacji. Dla opracowanych modeli dla zlewni pilotażowych w ramach Podwariantu 2 przyjęto czas symulacji wynoszący 9 godzin. Na poniższym rysunku ([Rysunek 38](#)) przedstawiono ustawienia symulacji.

Rysunek 38 Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

Dodatkowo w zakładce HD program umożliwia zmianę minimalnego i maksymalnego kroku czasowego symulacji. W przypadku siatek o dużej liczbie elementów często konieczne jest zmniejszenie maksymalnego kroku obliczeniowego, aby symulacje zakończyły się bez błędów. Wartości domyślne dla minimalnego kroku czasowego są to 0,01 s, a dla maksymalnego 10 s.

Każdy model składa się zatem z plików głównych modelu oraz plików wczytywanych do modelu.

Pliki główne modelu to:

- baza danych SQLite – plik o rozszerzeniu .sqlite,
- model w programie MIKE+ - plik o rozszerzeniu .mupp.

Pliki podczytywane do modelu to:

- siatka MESH – plik o rozszerzeniu .mesh,
- informacja o szorstkości powierzchni – plik o rozszerzeniu .dfs2,
- informacja o infiltracji – plik o rozszerzeniu .dfs2,
- dane o opadzie – plik o rozszerzeniu .dfs0.

#### 7.6.14. Wyniki modelowania

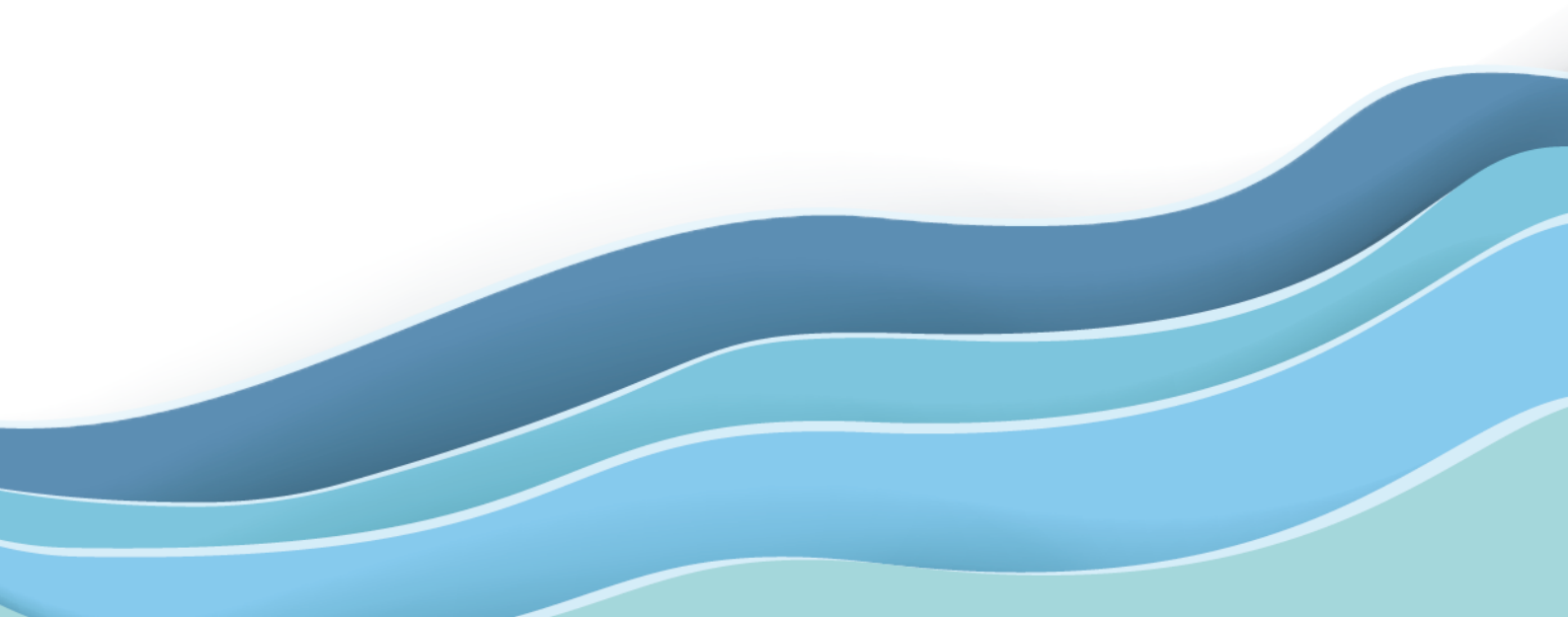
W wyniku przeprowadzonych symulacji dla każdego elementu siatki obliczeniowej i dla każdego kroku symulacji uzyskiwana jest informacja o głębokości zalania wodą oraz o prędkości przepływu.

Na podstawie wyników symulacji należy wygenerować rastry głębokości oraz rastry numerycznego modelu powierzchni wody dla analizowanych prawdopodobieństw wystąpienia opadu. W przypadku analiz w zlewniach pilotażowych opracowano wyniki dla 5 prawdopodobieństw:  $p = 1\%$ ,  $p = 10\%$ ,  $p = 20\%$ ,  $p = 1\%(CC)$  oraz  $p = 10\%(CC)$ , dwóch czasów trwania  $t = 15$  min oraz  $t = 120$  min i dwóch Podwariantów 2.1 i 2.2.

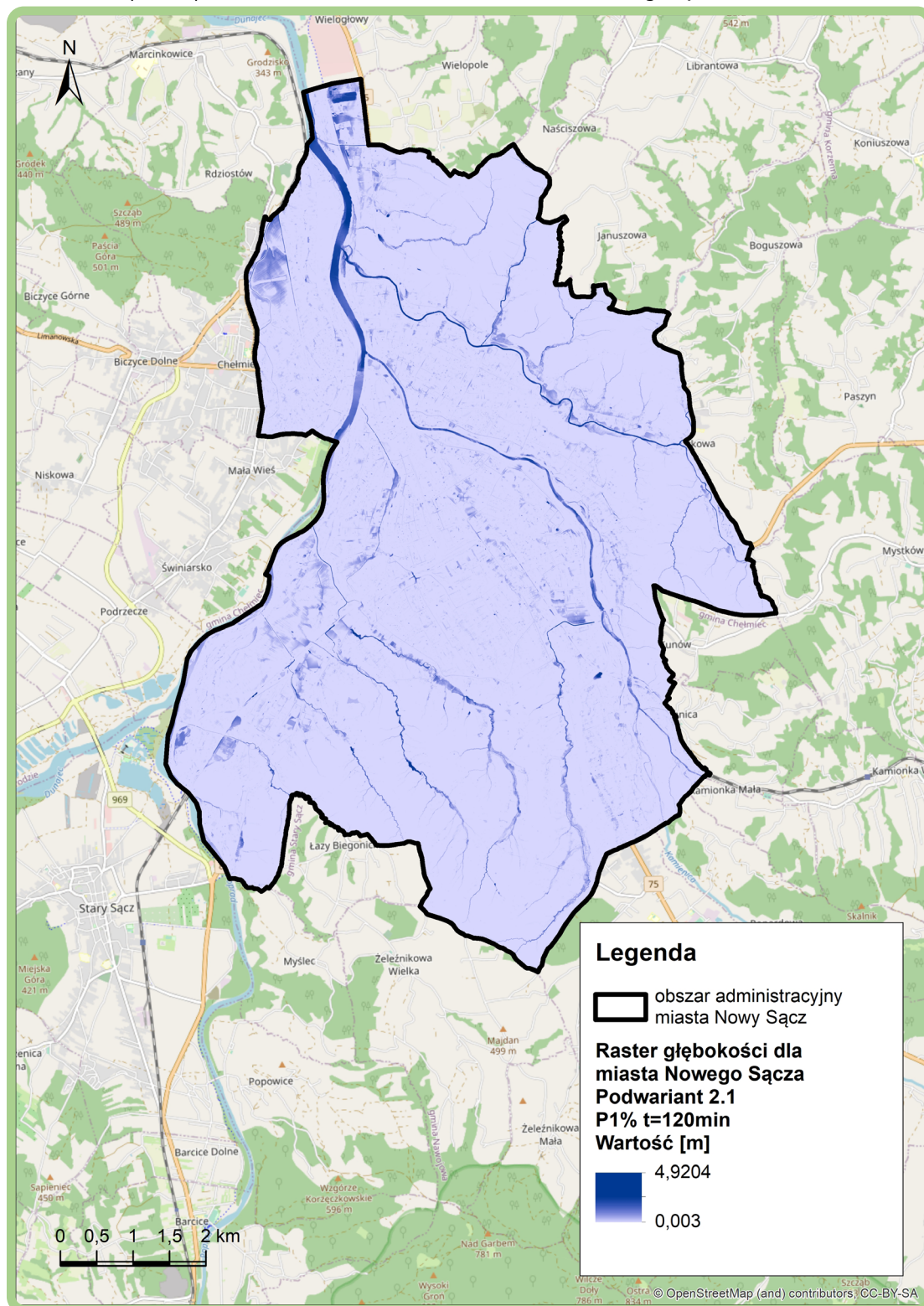
Uzyskane wyniki modelowania dla wybranych scenariuszy, opracowanych dla zlewni pilotażowych na wybranym przykładzie przedstawiono poniżej. Przedstawiono także wizualne porównanie wyników na wybranym obszarze między podwariantami.

Uzyskane rastry należy przekonwertować do warstw przestrzennych w formacie shp. W celu identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi otrzymane wyniki należy odpowiednio przefiltrować, aby w dalszych analizach skupiać się wyłącznie na tych obszarach problemowych. Podczas analiz dla zlewni pilotażowych, przefiltrowano wyniki pozostawiając jedynie te spełniające poniższe założenia:

- głębokość zalania powyżej 30 cm,
- obszar zalania powyżej 500 m<sup>2</sup>.

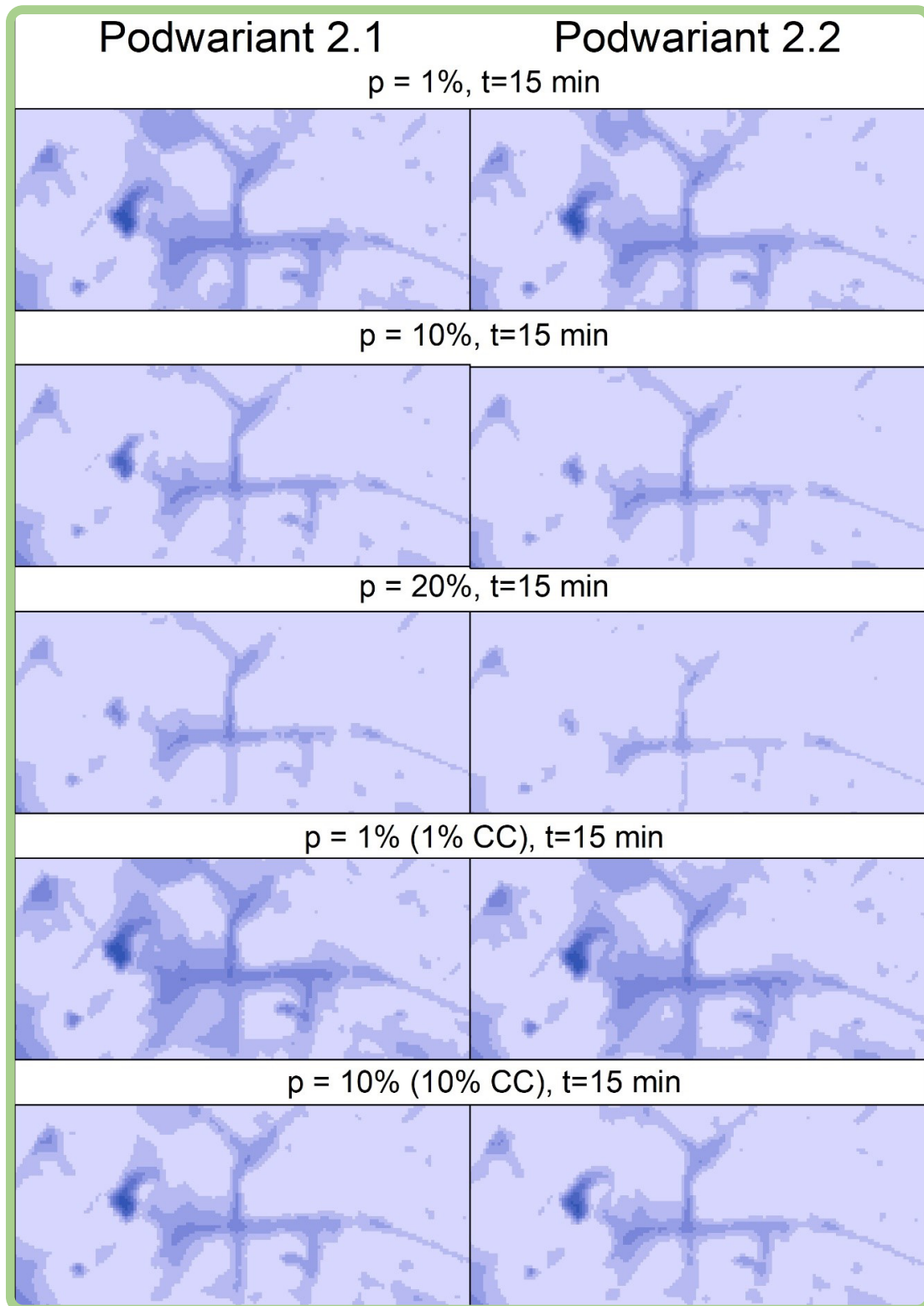


Rysunek 39 Wynik identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla Podwariantu 2.1 dla opadu o prawdopodobieństwie P1% i czasie trwania 120 min dla Nowego Sącza



źródło: opracowanie własne

Rysunek 40 Porównanie wyników identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla opadu o czasie trwania 15 min dla Nowego Sącza



źródło: opracowanie własne

## 7.7. Wyznaczanie obszarów zagrożonych wodami opadowymi

W Wariancie 2 obszary zagrożone wodami opadowymi dla każdego analizowanego miasta pilotażowego wyznaczono dla dwóch podwariantów (Podwariant 2.1 i 2.2) dla prawdopodobieństwa wystąpienia opadu 1%, 10%, 20%, 1%CC i 10%CC oraz dla czasu trwania opadu 15 min i 120 min. Poniżej opisano przebieg analizy wyników modelowania, który jest analogiczny bez względu na scenariusz obliczeniowy.

W pierwszej kolejności z wszystkich obszarów zalanych wodami opadowymi, które były wynikiem modelowania 2D należy wybrać jedynie te, które znajdują się na terenach zabudowanych, zidentyfikowanych na podstawie BDOT10k. W kolejnym kroku wybiera się tylko te obszary, które uzyskały określone wartości głębokości i powierzchni zalania. W przypadku zlewni pilotażowych przyjęto do filtrowania następujące wartości: głębokość zalania wynosiła powyżej 30 cm, a powierzchnia zalania była wyższa niż 500 m<sup>2</sup>. Analogicznie do innych kryteriów – wskazywane wartości są jedynie sugestią, wynikają z dobrej praktyki, natomiast mogą być dostosowywane według potrzeb. Kryterium głębokości zalania powinno zostać dobrane w oparciu o analizę skutków wystąpienia zalania. W przypadku zalania poniżej 30 cm zwykle straty finansowe nie są znaczne. Kryterium powierzchni zalania należy dobrać w oparciu o analizę wyników. W przypadku zlewni pilotażowych, zauważono, że dla obszarów o powierzchni mniejszej niż 500 m<sup>2</sup>, długość zalanych ciągów komunikacyjnych, czy ilość zagrożonych obiektów jest niewielka.

Reasumując, dla zlewni pilotażowych jako ostateczne kryteria do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi przyjęto następujące założenia:

- obszar bezodpływowy znajduje się na terenie zabudowanym,
- głębokość zalania powyżej 30 cm,
- obszar zalania powyżej 500 m<sup>2</sup>.

Wyniki analizy można przedstawić w postaci kart obszarów zagrożonych wodami opadowymi oraz w postaci plików .shp. Propozycja takich produktów i wytyczne techniczne zostały opisane w Załączniku nr 1 do Poradnika.

Jest to bardzo ważny element całego procesu, gdyż tak wyznaczone obszary zagrożone wodami opadowymi, będą przedmiotem dalszych dyskusji i działań. Są to obszary, dla których należy podjąć odpowiednie działania zabezpieczające. Należy zatem mieć na uwadze bilans przyszłych kosztów inwestycyjnych i unikniętych strat materialnych w wyniku działań zaradczych. W związku z powyższym krytyczna rewizja wyników i ograniczenie liczby obszarów zagrożonych wodami opadowymi do lokalizacji istotnych jest jak najbardziej zasadne.

## 7.8. Wyznaczanie obszarów potencjalnej retencji

Obszary potencjalnej retencji wskazuje się, analogicznie jak w Wariancie 1, na podstawie obszarów zagrożonych wodami opadowymi, wyznaczonych dla prawdopodobieństwa wystąpienia opadu 10% i czasu trwania opadu wynoszącego 120 min. Biorąc pod uwagę częstość występowania opadów pojemność retencyjna obszarów dla prawdopodobieństwa 10% będzie częściej wykorzystywana. Wybór czasu trwania opadu wynoszącego 120 min pozwala na wyznaczenie obszarów potencjalnej retencji o odpowiednio dużej pojemności.

Obszarami potencjalnej retencji będą obszary, które swoim zakresem obejmują tereny niezabudowane zidentyfikowane na podstawie BDOT10k. Obszary te, ze względu na położenie na obszarach niezabudowanych mogą przy stosunkowo niewielkich kosztach zostać przystosowane do gromadzenia nadmiaru wód opadowych ograniczając bądź eliminując dalszy spływ powierzchniowy wód opadowych.

Dla zlewni pilotażowych jako lokalizacje istotne, wskazane zostały obszary o powierzchni powyżej 500 m<sup>2</sup> i głębokości zalania powyżej 30 cm. W zależności od potrzeb i możliwości te parametry należy dostosować do uzyskanych na danych obszarze wyników.

Kryteria te dobrano mając na uwadze ewentualne koszty inwestycyjne na dostosowanie tych obszarów do pełnienia funkcji retencji oraz obszar jaki będą w stanie zabezpieczyć przed zagrożeniem od wód opadowych. Obszary potencjalnej retencji mniejsze niż 500 m<sup>2</sup> i o głębokości zalania poniżej 30 cm będą wymagały stosunkowo dużych nakładów finansowych, biorąc pod uwagę obszar jaki są w stanie zabezpieczyć przed zalaniem wodami opadowymi.

Obszary zakwalifikowane jako obszary potencjalnej retencji należy dodatkowo poddać analizie pod kątem objętości zgromadzonej wody i własności gruntu, a także ocenie eksperckiej.

Informacje o własności gruntu można pozyskać ze strony [www.geoportal.gov.pl](http://www.geoportal.gov.pl) (dostęp październik 2023 r.), a konkretnie z warstwy prezentującej informacje z Zintegrowanego systemu informacji o nieruchomościach (ZSIN). Na podstawie tych informacji możliwe jest określenie, czy dany obszar potencjalnej retencji znajduje się na gruntach Skarbu Państwa. Informacja ta zawarta została w plikach przestrzennych (Załącznik nr 4 do Poradnika) w kolumnie „SKARB\_PANS”.

W przypadku oceny eksperckiej dla wstępnie wyznaczonych obszarów potencjalnej retencji należy dokonać analizy pod względem m.in. lokalizacji w stosunku do innych obiektów. Sam fakt położenia danego obszaru na terenie niezabudowanym nie wskazuje ostatecznie na możliwość łatwego i niezbyt kosztownego przekształcenia terenu na obszar retencji. Przykładem może być wstępnie wyznaczony obszar retencji znajdujący się na terenie zielonym pomiędzy budynkami. Na podstawie analizy eksperckiej taki obszar powinien zostać odrzucony, ze względu na niebezpieczeństwo niekorzystnego wpływu na znajdujące się w bliskiej odległości budynki. Oczywiście możliwe jest specjalnie zabezpieczenie ewentualnego zbiornika otwartego ściankami szczelnymi, ale wiązałoby się to z dużymi nakładami inwestycyjnymi, których można uniknąć, wybierając inny obszar potencjalnej retencji znajdujący się w pobliżu. Również w trakcie budowy takiego zbiornika istnieje niebezpieczeństwo, że praca ciężkiego sprzętu może spowodować powstanie uszkodzeń w pobliskich domach. W trakcie analizy eksperckiej warto dokonać również wstępnego rozeznania sieci uzbrojenia terenu na danym obszarze potencjalnej retencji. Przystosowanie terenu do pełnienia funkcji retencyjnej może wymagać robót ziemnych. Dodatkowo dno i skarpy będą wymagały dostosowania do pełnionej funkcji. Może wiązać się to z koniecznością przebudowy infrastruktury podziemnej. Ocenia się zatem, czy takowa przebudowa byłaby technicznie możliwa i czy nie byłaby zbyt kosztowna.

## 7.9. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników

W wyniku doświadczenia w opracowywaniu modeli hydrodynamicznych zidentyfikowano kilka kluczowych kwestii, które mają istotny wpływ na jakość i dokładność obliczeń i analiz. Najistotniejszą kwestią jest rodzaj i rozdzielczość siatki obliczeniowej. Do obliczeń w Wariancie 2 rekomenduje się wykorzystanie siatki nieregularnej. Siatka nieregularna daje większe możliwości odwzorowania zmienności rzeźby terenu, dzięki zastosowaniu elementów trójkątnych i prostokątnych o różnych wielkościach. Nieregularność siatki pozwala na różnicowanie wielkości elementów w zależności od złożoności ukształtowania powierzchni. Elementy prostokątne stosuje się dla lepszego odwzorowania dróg, nasypów, rowów, koryt rzek, itp. Natomiast elementy trójkątne reprezentują pozostałe powierzchnie, w tym budynki, ronda, lokalne wzniesienia terenu, itp. Jest możliwość dostosowania powierzchni wieloboków, w zależności od zagospodarowania danego terenu. Na potrzeby analiz w zlewniach pilotażowych przyjęto maksymalne pole powierzchni wieloboków wynoszące 5m<sup>2</sup>, natomiast dla terenów, na których zwiększenie elementów siatki nie wpłynęłoby istotnie na wyniki modelowania zastosowano wieloboki o powierzchni do 20 m<sup>2</sup>.

Drugą ważną kwestią jest uwzględnienie w analizie wszystkich istotnych przepustów. Dzięki temu, wyeliminowane zostają miejsca fałszywie zalane wodami opadowymi. Jako istotne przepusty należy przyjąć te, które znajdują się na ciekach i rowach, którymi przepływają duże ilości wód opadowych. W przypadku niewielkich rowów, brak uwzględnienia przepustu spowoduje co prawda powstanie miejsca, w którym woda opadowa się zgromadzi, ale nie nastąpi zalew otaczającego terenu, gdyż woda opadowa pozostanie w korycie rowu. Dla tego miejsca, niewyznaczony zostanie zatem obszar zagrożony wodami opadowymi. Obszary potencjalnej retencji podlegają dodatkowej analizie, więc nawet jeśli takowy zostałby wstępnie wyznaczony w takim miejscu, to i tak docelowo zostanie usunięty po przeprowadzeniu analizy.

W trakcie analizy wyników istotne jest również odnalezienie miejsc zalanych wodami opadowymi, które powstały ze względu na fakt, że z NMT w sposób automatyczny usuwane są budynki. Takie obszary w rzeczywistości nie są obszarami zalewanymi wodami opadowymi, a w trakcie obliczeń woda opadowa gromadzi się w tych miejscach tylko dlatego, że NMT w obrębie usuwanego budynku mógł zostać nieznacznie obniżony w stosunku do otaczającego budynek terenu. Takie obszary zalane wodami opadowymi powinny zostać pominięte przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych takimi wodami oraz obszarów potencjalnej retencji.

Również kryteria wyboru istotnych obszarów zagrożonych wodami opadowymi mają znaczenie. Jako podstawowe kryteria należy wskazać minimalną powierzchnię zalania oraz minimalną głębokość zalania. Zastosowanie zbyt niskich wartości progowych może skutkować wyznaczeniem bardzo dużej ilości obszarów zagrożonych wodami opadowymi, z których dla większości zagrożenie nie będzie istotne. Część z tych obszarów mogła powstać ze względu na dokładność NMT. Kryteria te, a w szczególności minimalna powierzchnia zalania, powinny zostać dobrane indywidualnie do konkretnego analizowanego obszaru oraz jakości dostępnych danych wejściowych.

W przypadku obszarów potencjalnej retencji zastosowanie odpowiednich kryteriów również jest istotne. Jako obszary potencjalnej retencji powinny zostać wyznaczone tereny, dla których poniesienie kosztów inwestycyjnych będzie miało realny wpływ na obniżenie zagrożenia wodami opadowymi na możliwie jak największym obszarze. Wyznaczenie dużej ilości bardzo małych obszarów potencjalnej retencji wiązałoby się z dużymi nakładami finansowymi i ograniczeniem zagrożenia wodami opadowymi na stosunkowo niewielkim obszarze, zatem relatywnie niewielką efektywnością zrealizowanych działań. W związku z tym rekomenduje się, aby zastosować wartości progowe dla powierzchni i głębokości zalania.

## 7.10. Rekomendacje metodyczne

### Metoda wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi oraz obszarów potencjalnej retencji

W ramach prac analitycznych, na potrzeby identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi, przetestowano symulacje dla dwóch podwariantów:

- Podwariant 2.1 – uproszczony system kanalizacji deszczowej reprezentowany przez punkty źródłowe,
- Podwariant 2.2 – opad zmniejszony o ilość wody odprowadzanej przez system kanalizacji deszczowej w obszarze zasięgu kanalizacji.

W wyniku analiz przeprowadzonych w dwóch różnych podwariantów można stwierdzić, że obszary zagrożone wodami opadowymi dla obu podwariantów różnią się między sobą. Dla Podwariantu 2.1 wyznaczonych zostało więcej obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Przyczyną tego stanu rzeczy jest fakt, iż sieć kanalizacji deszczowej w Podwariantcie 2.1 odwzorowana jest za pomocą punktów źródłowych, które odprowadzają wodę z powierzchni terenu. Lokalizacja tych punktów jest zgodna z lokalizacją wpustów. Dla Podwariantu 2.2 są wyznaczane zasięgi kanalizacji, a następnie dla tego obszaru zmniejsza się deszcz o szacowaną ilość wody, jaką jest w stanie przyjąć kanalizacja. Takie założenie powoduje, że na siatkę obliczeniową w zasięgu spływu wód do kanalizacji trafia mniejsza ilość wody. Jeśli na drodze spływu wody do kanalizacji pojawi się jakieś lokalne obniżenie terenu, w którym gromadzi się woda to zostanie ono wypełnione mniejszą ilością wody niż w przypadku Podwariantu 2.1.

Wyniki Podwariantu 2.1 są zatem znacznie dokładniejsze niż wyniki z Podwariantu 2.2. Podwariant 2.1 wymaga jednak większej ilości danych, a w szczególności informacji o lokalizacji wpustów (studnie). W przypadku posiadania wiarygodnych danych o lokalizacji wpustów rekomenduje się zastosowanie Podwariantu 2.1. W przypadku braku rzetelnych danych o lokalizacji wpustów Podwariant 2.2 może okazać się jedyną możliwą do zastosowania opcją. Należy jednak zaznaczyć, że niezależnie od tego, który podwariant Wariantu 2 zostanie użyty do przeprowadzania obliczeń, wyniki będą zdecydowanie dokładniejsze niż w przypadku zastosowania do obliczeń założeń z Wariantu 1.

Wariant 1 pomija wpływ działania istniejącej kanalizacji deszczowej. W związku z tym, część obszarów zagrożonych wodami opadowymi w zasięgu kanalizacji deszczowej, która zostanie wyznaczona dla Wariantu 1 nie będzie wyznaczona dla Wariantu 2. Woda opadowa dla Wariantu 2 w tych miejscach jest odprowadzana przez kanalizację deszczową, co jest zgodne z rzeczywistością, a nie stagnuje na powierzchni terenu jak w przypadku Wariantu 1. Obszary zagrożone wodami opadowymi wyznaczone poza zasięgiem kanalizacji deszczowej w znacznym stopniu powinny pokryć się dla obu wariantów. Występujące różnice w zasięgu obszarów, głębokości zalania, objętości czy powierzchni zalania wynikają z różnic w dokładności przygotowanych siatek obliczeniowych. W Wariantcie 2 stosuje się zdecydowanie bardziej szczegółową siatkę obliczeniową, stąd wyniki dla Wariantu 2 będą dokładniejsze.



## 7.11. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz do wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi oraz obszarów potencjalnej retencji rekomendowany jest Podwariant 2.1, z uwagi na dokładniejsze wyniki. Podwariant 2.2 rekomenduje się tylko w przypadku braku rzetelnych danych o lokalizacji wpustów (studni).

Obszary zagrożone wodami opadowymi powinny być wyznaczane w oparciu o wszystkie analizowane w niniejszym opracowaniu scenariusze obliczeniowe. Taka kompleksowa analiza pozwoli na określenie stopnia zagrożenia dla obiektu, znajdującego się na obszarze zagrożenia wodami opadowymi. W przypadku ewentualnej konieczności ograniczenia ilości scenariuszy obliczeniowych rekomenduje się przeprowadzenie obliczeń dla wszystkich prawdopodobieństw, ale dla jednego czasu trwania opadu wynoszącego 120 min.

Istotny jest również sposób klasyfikacji obszarów zalanych wyznaczonych w oparciu o przeprowadzone obliczenia. Jako obszary zagrożone wodami opadowymi powinny zostać wybrane jedynie te obszary, które znajdują się na terenach zurbanizowanych. Konieczne jest również zastosowanie takich kryteriów jak minimalna głębokość i minimalna powierzchnia zalania, które są dobierane indywidualnie dla analizowanego terenu. Kryteria wyboru istotnych obszarów zagrożonych wodami opadowymi mają duży wpływ na wyniki analizy.

Na podstawie przeprowadzonych analiz do wyznaczania obszarów potencjalnej retencji zarekomendowane zostało wyznaczenie ich w oparciu o prawdopodobieństwo wystąpienia opadu 10%. Przy takim prawdopodobieństwie zoptymalizowane będą ewentualne koszty inwestycyjne na przystosowanie obszaru do pełnienia retencji, gdyż pojemność tych obszarów będzie częściej wykorzystywana w pełni niż w przypadku np. prawdopodobieństwa 1%. Nie rekomenduje się wyznaczania obszarów potencjalnej retencji dla prawdopodobieństwa 20%, gdyż adaptacja obszarów potencjalnej retencji wyznaczonych dla tego prawdopodobieństwa na tereny do gromadzenia wód opadowych mogłaby nieskutecznie chronić przyległe tereny od zagrożenia wodami opadowymi z uwagi niewystarczającą pojemność retencyjną. Istotne jest również, aby obszarami potencjalnej retencji były jedynie te obszary, które znajdują się na terenach niezabudowanych. Ważnym aspektem jest również analiza wyznaczonych obszarów potencjalnej retencji pod kątem objętości wody możliwej do retencjonowania, własności gruntu czy też dokonania oceny eksperckiej obejmującej np. analizę lokalizacji obszarów potencjalnej retencji względem innych obiektów, czy analizę możliwości technicznych i względów ekonomicznych przebudowy istniejących sieci kolidujących z ewentualną inwestycją.

## 8. Wariant 3 - Podejście szczegółowe uwzględniające model kanalizacji w sposób kompleksowy

### 8.1. Scenariusze obliczeniowe

Kluczowe dla wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi jest dobór odpowiednich scenariuszy obliczeniowych. Rekomenduje się, aby obliczenia prowadzić w oparciu o trzy scenariusze obliczeniowe:

- opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 1\%$  (raz na 100 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min,
- opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 10\%$  (raz na 10 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min,
- opad o prawdopodobieństwie wystąpienia  $p = 20\%$  (raz na 5 lat) i czasie trwania  $t = 120$  min.

Prawdopodobieństwo wystąpienia opadu 1% i 10% wybrano, aby możliwe było porównanie wyników z wszystkich wariantów. Prawdopodobieństwo 20% wybrano, gdyż jest to prawdopodobieństwo, zgodne z zaleceniami normy PN:EN:752:2017 dotyczącymi wymiarowania kanalizacji deszczowej.

Do obliczeń przyjęto czas trwania opadu wynoszący 120 min. Czas ten pozwolił na przeprowadzenie analiz dla najmniej korzystnych warunków t.j. osiągnięcia pełnego nasycenia gruntu wodą (wyczerpania się zdolności infiltracyjnych) i przepełnienia kanalizacji deszczowej.

Zastosowane scenariusze obliczeniowe, przetestowane dla zlewni pilotażowych, okazały się w pełni wystarczające na potrzeby identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla Wariantu 3. Zwiększenie ilości scenariuszy nie miało by wpływu na zwiększenie dokładności analizy.

Przy zwiększonej liczbie scenariuszy wykryte zostałyby podobne obszary zagrożone, a różnica polegałaby jedynie na nieco innych głębokościach wody. Rekomenduje się zatem zastosowanie wskazanych wyżej scenariuszy obliczeniowych.

### 8.2. Zastosowane modele

Rekomenduje się, aby identyfikacja obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla Wariantu 3, z uwzględnieniem wpływu działania istniejącej pełnej sieci kanalizacyjnej, została wykonana poprzez budowę modeli zintegrowanych, hybrydowych (1D/2D), obejmujących:

- jednowymiarowe modele (1D) przepływu wód opadowych w systemach kanalizacyjnych,
- dwuwymiarowe modele hydrodynamiczne (2D) rozptyłu wód opadowych na powierzchni terenu.

Modele zintegrowane 1D/2D wykorzystują obliczenia przepływu nieustalonego 1D do symulacji przepływu w rurach, kanałach, przepustach i innych zdefiniowanych strukturach geometrycznych oraz obliczenia przepływu po powierzchni terenu z wykorzystaniem modelu 2D, gdzie przepływ jest dwuwymiarowy, czyli występują dwa równie ważne kierunki przepływu. Na potrzeby tego typu analiz są optymalne.

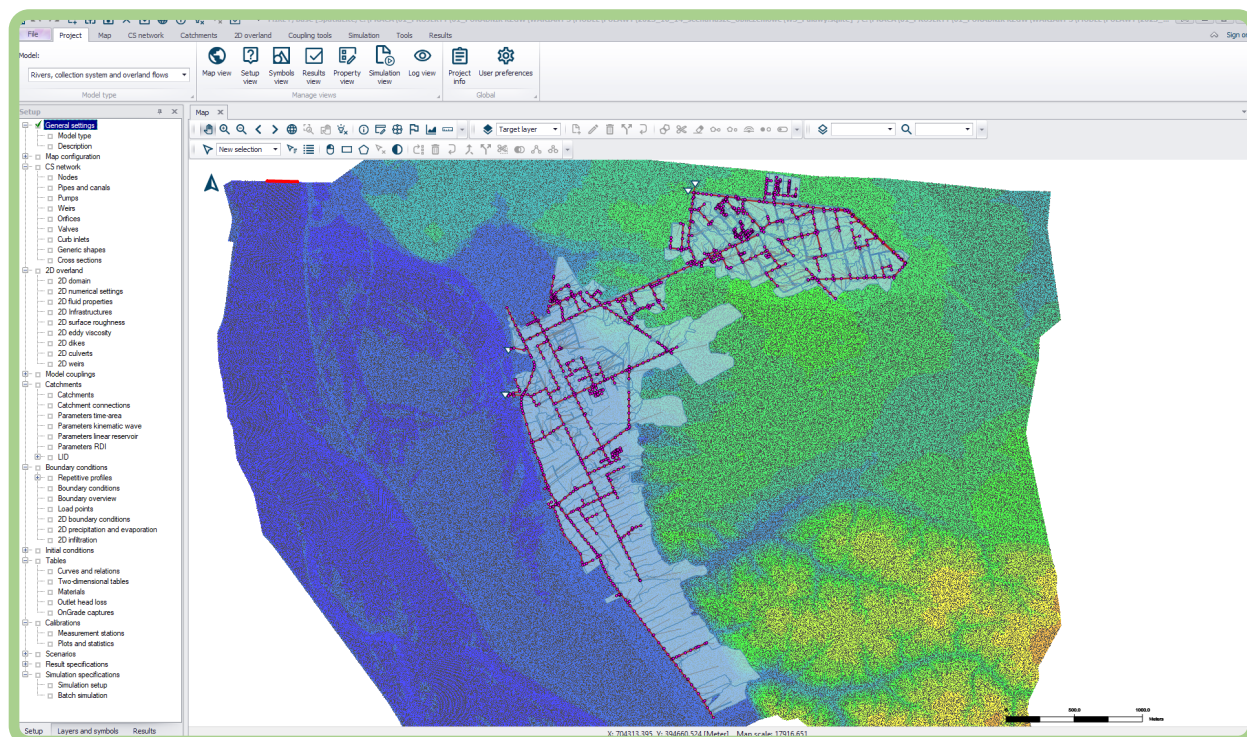
### 8.3. Wykorzystane narzędzia do budowy modeli

Możliwe jest wykorzystanie różnego oprogramowania do wykonania przedmiotowych analiz (jak wskazano w [podrozdziale 3.2](#)). W ramach niniejszego poradnika przedstawiono wytyczne metodyczne na przykładzie wykorzystania oprogramowania MIKE i ArcGIS.

Identyfikacja obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla zlewni pilotażowych została wykonana w oprogramowaniu MIKE+, czyli najnowszym dostępnym oprogramowaniu firmy DHI oraz programów wspierających, takich jak Mesh Builder (aplikacja webowa firmy DHI) oraz programu GIS (ArcGIS). MIKE+ jest rozbudowanym narzędziem do modelowania i projektowania środowiska wodnego w tym sieci kanalizacji sanitarnych czy deszczowych, sieci wodociągowych oraz sieci rzecznych. Szczegóły dotyczące narzędzia zostały przedstawione przy opisie Wariantu 1.

Sieć kanalizacji deszczowej została zinventaryzowana do plików .shp na podstawie GESUT lub mapy zasadniczej, a następnie uzupełniona o przeprowadzone pomiary geodezyjne w terenie. Dla kanalizacji deszczowej na podstawie NMT wyznaczono zlewnie hydrologiczne. Sieć oraz zlewnie hydrologiczne zostały zaimportowane do programu MIKE+, podobnie jak przygotowana siatka obliczeniowa ([Rysunek 41](#)).

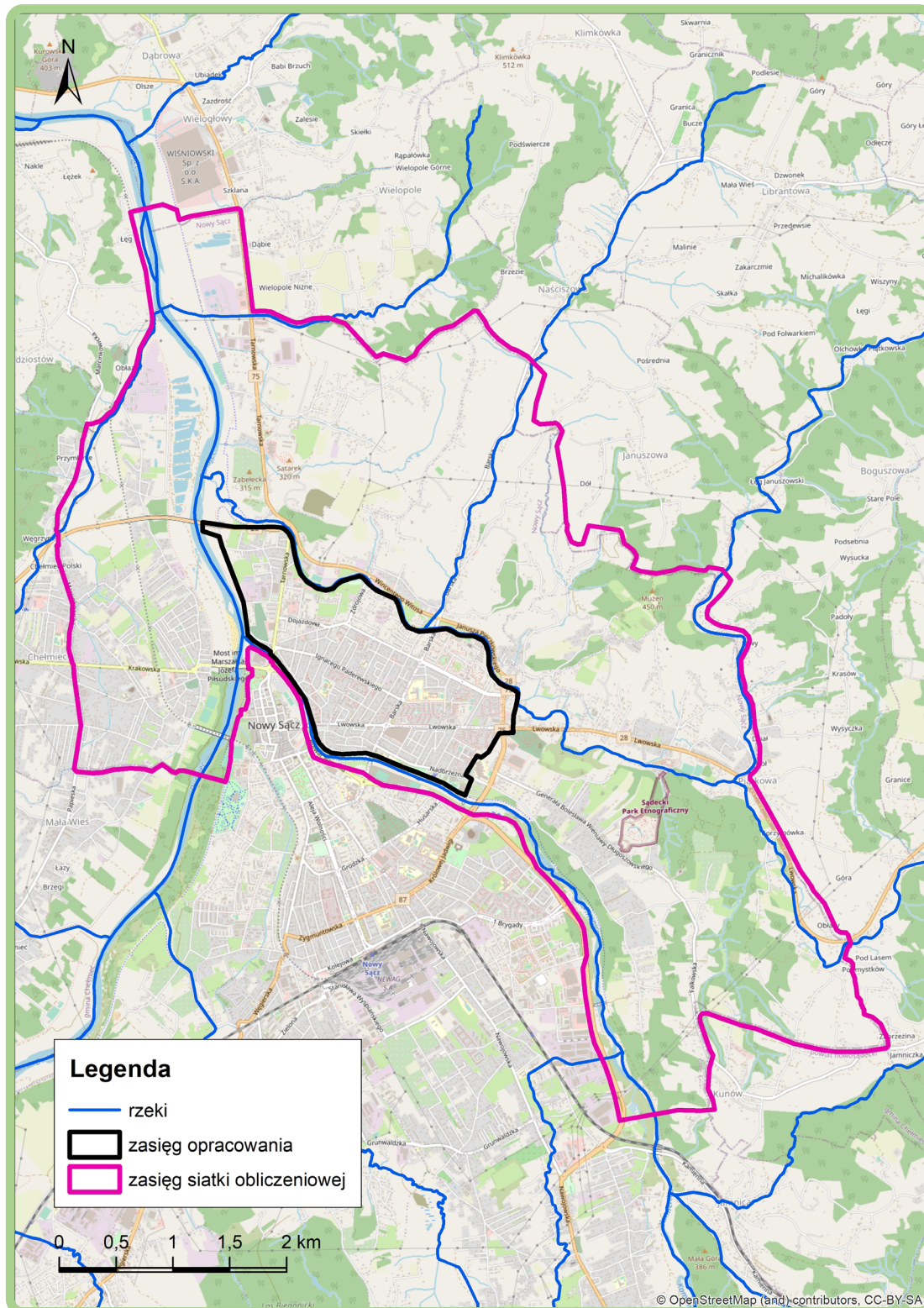
Rysunek 41 Widok okna głównego w narzędziu MIKE+ z wprowadzoną siatką obliczeniową, siecią kanalizacji deszczowej oraz zlewniami hydrologicznymi



źródło: opracowanie własne

Na rysunku poniżej ([Rysunek 42](#)) przedstawiono zasięg opracowanej siatki obliczeniowej nieregularnej oraz zasięg opracowania dla Nowego Sącza.

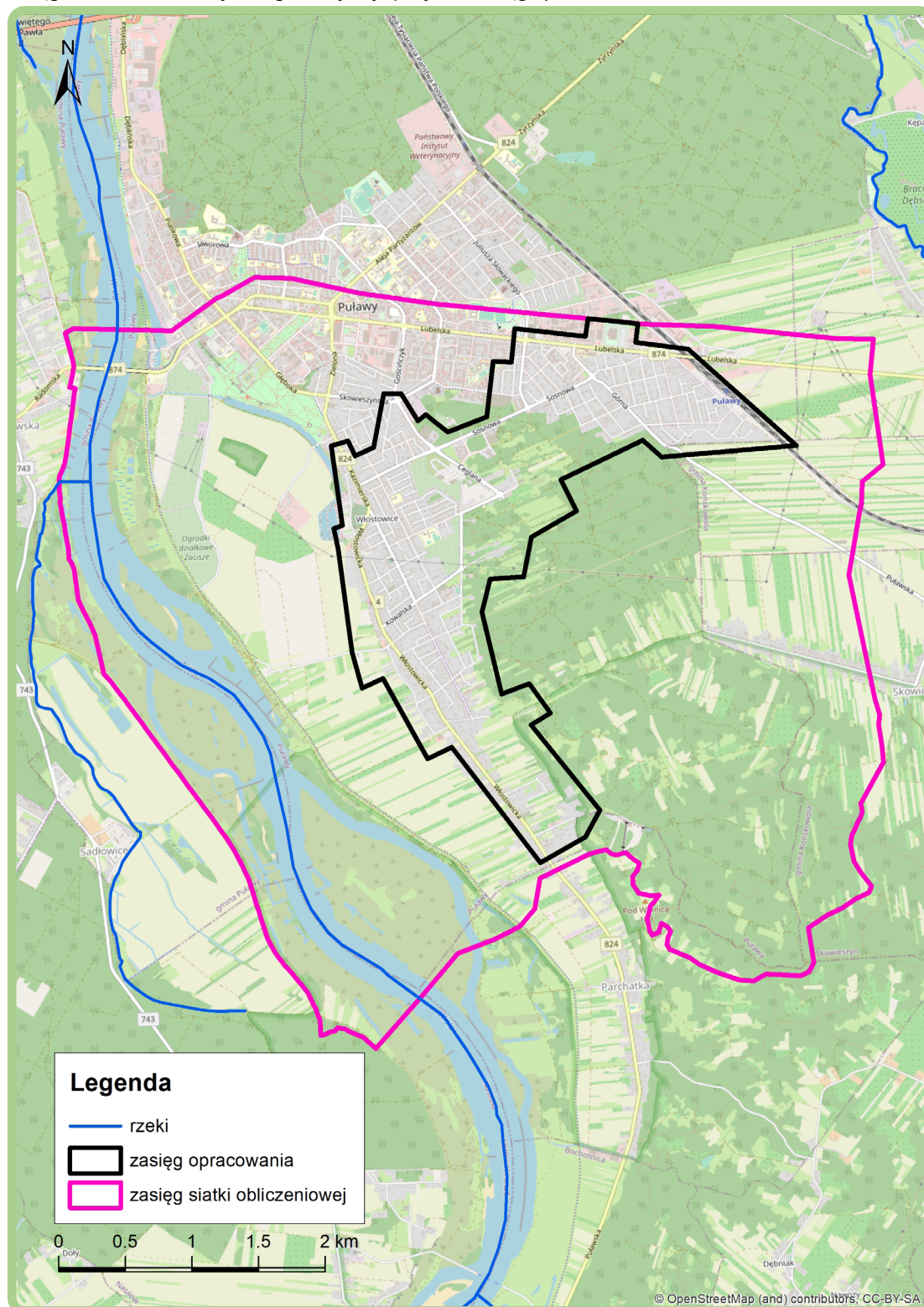
Rysunek 42 Zasięg siatki obliczeniowej nieregularnej trójkątnej oraz zasięg opracowania (dot. Nowego Sącza)



źródło: opracowanie własne

Na rysunku poniżej ([Rysunek 43](#)) przedstawiono zasięg opracowanej siatki obliczeniowej nieregularnej oraz zasięg opracowania dla Puław.

Rysunek 43 Zasięg siatki obliczeniowej nieregularnej trójkątnej oraz zasięg opracowania (dot. Puław)



źródło: opracowanie własne

## 8.4. Dane wejściowe

Kluczowym dla procesu budowy modelu i wyników modelowania jest dostęp do danych dobrej jakości. W poniższej tabeli (Tabela 10) przedstawiono zestawienie kluczowych danych potrzebnych do przygotowania modeli. Zasoby danych CZGiK czy IMGW-PIB to zasoby uniwersalne dla całego obszaru kraju, problematyczną kwestię stanowią zwykle dane o sieci kanalizacyjnej w poszczególnych miastach. Kompletnie dane przestrzenne często nie są dostępne, więc wspomagającym źródłem informacji może być mapa zasadnicza. Dodatkowe źródło danych stanowią dedykowane dla analiz pomiary, t.j. pomiary geodezyjne w celu zwiększenia dokładności informacji o sieci w kluczowych obszarach analiz oraz dane o opadach i przepływie zebrane w formie kampanii pomiarowej, istotne dla przeprowadzenia kalibracji modeli sieci kanalizacji.

Tabela 10 Zestawienie danych wejściowych do opracowania modeli w ramach Wariantu 3

Lp.	Dane	Możliwe źródła danych	Inne informacje (dokładność, komentarz)
1	Dane o opadach prawdopodobnych	Projekt PMAxTP, IMGW-PIB	Dane bezpłatne, projekt zrealizowany w 2022 r.
		Polski Atlas Natężeń Deszczów (PANDa)	Dane płatne, projekt zakończony w 2020 r.
		Opracowane modele opadów o zasięgu lokalnym	Dla niektórych obszarów/miast w Polsce są dostępne publikacje naukowe, w których wyznaczono modele opadów.
		Opracowanie własne w oparciu o dane opadowe	Wymagane rzetelne dane opadowe z wielolecia
2	Dane o sieci kanalizacji deszczowej i kanalizacji ogólnospławnej	Mapa zasadnicza, dostępna w starostwach powiatowych	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
		Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu (GESUT), dostępna w starostwach powiatowych	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
		Dane o sieci kanalizacyjnej dostępne w urzędach miast i gmin lub u lokalnych administratorów wodociągów i kanalizacji	Dane o różnej dokładności i aktualności w zależności od zasobów w danych mieście
3	Pomiary geodezyjne obiektów infrastruktury kanalizacyjnej	Dedykowane pomiary wykonane w terenie na potrzeby analiz	Dodatkowe pomiary wykonywane w celu uzyskania lepszej dokładności modelu lub weryfikacji zinwentaryzowanych danych
4	Pomiary napełnienia i przepływu w kanałach oraz pomiary wysokości opadu	Dedykowane pomiary wykonane w trakcie kampanii pomiarowej	Dodatkowe pomiary wykonywane na potrzeby kalibracji i weryfikacji modelu hydrodynamicznego, uzyskiwane dzięki instalacji przepływomierzy na sieci i deszczomierza na obszarze danej zlewni
5	Numeryczny model terenu (NMT)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Rozdzielczość 1m, błąd średni wysokości <0,2m, LIDAR, lotniczy skanowanie laserowe, aktualność różna w zależności od obszaru
6	Ortofotomapy	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	RGB o rozdzielczości 0,25 m i 0,1m, aktualność różna w zależności od obszaru
7	Baza Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10k)	Dane CZGiK opublikowane na Geoportalu Krajowym	Treść i szczegółowość bazy BDOT10k odpowiada w ogólności tradycyjnej mapie topograficznej w skali 1:10 000, aktualność: 2020 r.

źródło: opracowanie własne

### 8.4.1. Dane opadowe

Przygotowanie danych opadowych do modelowania hydrodynamicznego przebiega w dwóch krokach:

- opracowanie lub pozyskanie danych o opadach maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia,
- przeprowadzenie rozkładu opadu miarodajnego.

Opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### 8.4.2. Pomiary geodezyjne obiektów infrastruktury kanalizacyjnej

W celu uzupełnienia brakujących informacji dotyczących sieci kanalizacyjnej, przeprowadza się uzupełniające pomiary geodezyjne. Im bardziej prawidłowe odwzorowanie sieci w modelu, tym wyższa jakość wyników, dlatego też uzupełnianie lub często też weryfikacja starych danych jest ważne, gdyż minimalizuje ryzyko nieprawidłowych danych wpływających na parametry hydrauliczne modelowanej kanalizacji. Najczęściej brakujące lub nieprawidłowe dane o sieci dotyczą: danych wysokościowych kluczowych elementów np. studzienek, średnic studzienek, danych o przekroju i wymiarach kanałów czy danych o materiale kanałów. Szerzej kwestie danych inwentaryzacji opisano w [podrozdziale 5.7](#). Inwentaryzacja geodezyjna.

Celem przeprowadzenia kampanii pomiarowej jest zarejestrowanie i zgromadzenie danych o napełnieniu oraz przepływie wód opadowych zbieranych przez system kanalizacji deszczowej, a także wysokości opadu pomierzonego przez deszczomierze. Dane te zostają wykorzystane w procesie kalibracji i weryfikacji modeli. Służą one jako rzeczywiste dane wzorcowe do porównania z wynikami przeprowadzonych symulacji. Szerzej podejście do przeprowadzenia kampanii pomiarowej przedstawiono w [podrozdziale 5.6](#).

## 8.5. Wyznaczenie i parametryzacja zlewni hydrologicznych

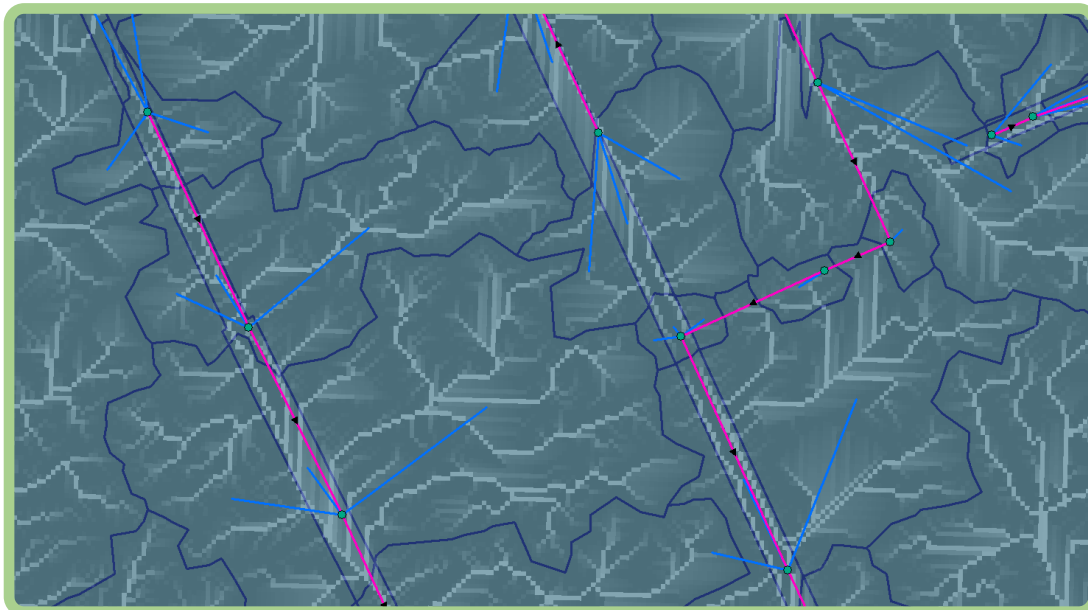
Istotnym elementem Wariantu 3 (różnicującym go od pozostałych wariantów) jest konieczność przygotowania zlewni hydrologicznych dla analizowanego obszaru. W tym podrozdziale opisano sposób przygotowania danych w zakresie weryfikacji granic i charakterystyki zlewni objętych zakresem danego opracowania.

### 8.5.1. Geometria zlewni hydrologicznych

W pierwszej kolejności należy wyznaczyć geometrię zlewni hydrologicznej. Najlepiej wykonać to przy użyciu środowiska GIS z wykorzystaniem danych z NMT.

1. Model NMT należy zmodyfikować wprowadzając korekty w miejscach przekroczeń dróg nad ciekami, tak aby zachować ciągłość zaniżenia terenu obrazującego doliny rzeczne.
2. Następnie na podstawie NMT wyznacza się linie akumulacji spływu. Są to linie obrazujące przepływ wody na podstawie różnicy wartości wysokości dla kolejnych pikseli NMT.
3. Punkty zlewania wyznacza się w oparciu o zinwentaryzowane już wcześniej na sieci studnie.
4. Na podstawie NMT, linii akumulacji spływu oraz wyznaczonych punktów zlewania, generuje się geometrię zlewni cząstkowych ciężących do odpowiednich węzłów ([Rysunek 44](#)).
5. Tak wyznaczone zlewnie należy zweryfikować i poddać ewentualnym korektom, które mają na celu jak najwierniejsze odwzorowanie w modelu rzeczywistości. Do tego celu wykorzystuje się między innymi opracowaną inwentaryzację sieci kanalizacji deszczowej, NMT i ortofotomapę. Pozwala to na odpowiednią modyfikację geometrii zlewni oraz punktu zrzutu.

Rysunek 44 Zlewnie wygenerowane na podstawie NMT, linii akumulacji spływu oraz wyznaczonych punktów zlewania



źródło: opracowanie własne

### 8.5.2. Parametry hydrologiczne zlewni

Dla odzwierciedlenia warunków hydrologicznych zlewni cząstkowych konieczne jest przeliczenie opadu na odpływ. Do obliczeń rekomenduje się przyjęcie modelu fali kinematycznej. Kluczowe dla określenia tychże warunków są następujące dane:

- długość zlewni w metrach – długość od najdalszego punktu zlewni cząstkowej do przypisanej studni kanalizacyjnej stanowiącej punkt zrzutu wód opadowych z danej zlewni,
- spadek zlewni w ‰ – iloraz różnicy pomiędzy maksymalną, a minimalną wysokością zlewni i długości zlewni,
- powierzchnia terenów nieprzepuszczalnych płaskich w % – do tej kategorii zaliczono uszczelnione powierzchnie dróg, placów, parkingów oraz pozostałe obszary zurbanizowane z wyłączeniem terenów zurbanizowanych pokrytych roślinnością,
- powierzchnia terenów nieprzepuszczalnych stromych w % – do tej kategorii zakwalifikowano wszystkie powierzchnie dachów znajdujących się w zlewni cząstkowej,
- powierzchnia terenów słabo przepuszczalnych w % – do tej kategorii zakwalifikowano wszystkie powierzchnie pokryte roślinnością z uwagi na występowanie na analizowanym terenie gleb o bardzo małej zdolności infiltracyjnej,
- powierzchnia terenów średnio przepuszczalnych w % – do tej kategorii nie zakwalifikowano żadnych terenów na analizowanym obszarze z uwagi na występowanie na całym obszarze opracowania gleb o bardzo małej zdolności infiltracyjnej,
- powierzchnia terenów dobrze przepuszczalnych w % – do tej kategorii nie zakwalifikowano żadnych terenów na analizowanym obszarze z uwagi na występowanie na całym obszarze opracowania gleb o bardzo małej zdolności infiltracyjnej.

W zależności od doboru narzędzia do modelowania można do analiz włączyć dodatkowe parametry. Na przykład wykorzystany w trakcie analiz w zlewniach pilotażowych program MIKE+ umożliwia przypisanie dodatkowych parametrów kinematycznych, w tym między innymi parametrów Hortona do obliczeń infiltracji. Do tych parametrów należy infiltracja maksymalna, infiltracja minimalna oraz wykładnik infiltracji. Model Hortona określa zmniejszanie się infiltracji w czasie w funkcji wykładniczej, od wartości maksymalnej do minimalnej.



### 8.5.3. Infiltracja

Parametry infiltracji zależne są od rodzaju gleb występujących na terenie analizy. Informację o rodzaju gleb można pozyskać z różnych źródeł. W kraju informacje te dostępne są na mapie glebowo-rolniczej opracowanej przez Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów w IUNG (dane płatne). Na poziomie europejskim dostępna jest także ogólnodostępna baza danych o glebach - European Soil Data Centre (ESDAC). Szczegółowa informacja w zakresie procesu przygotowania danych o infiltracji z uwzględnieniem rodzaju gleb, infiltracji początkowej i końcowej, znajduje się w Załączniku nr 1 do Poradnika.

## 8.6. Etapy budowy modeli i modelowania

Przy wyznaczaniu obszarów zagrożonych wodami opadowymi z uwzględnieniem pełnej sieci kanalizacji, pierwszym etapem budowy modelu jest przygotowanie danych poza samym narzędziem do modelowania.

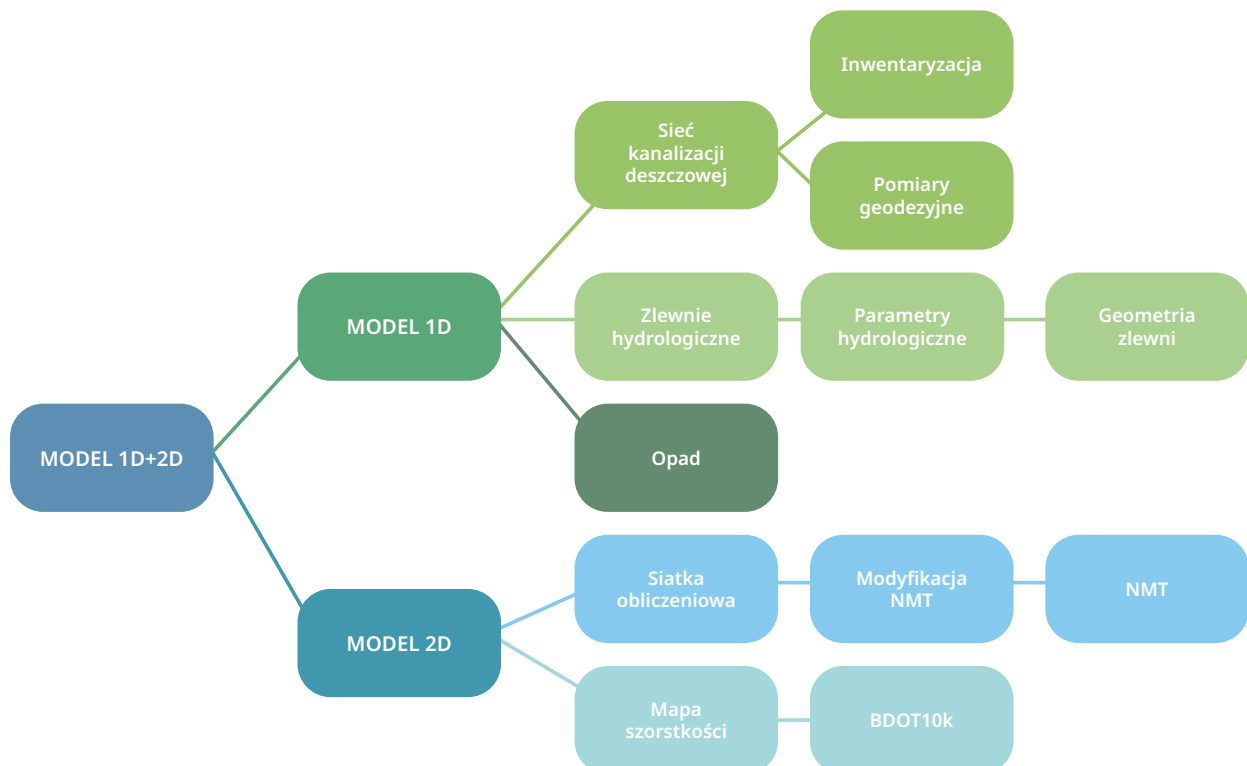
Dla modelu 1D konieczne jest przygotowanie plików .shp ze zinwentaryzowaną siecią kanalizacji deszczowej. Dodatkowo na potrzeby modelu 1D konieczne jest opracowanie i parametryzacja zlewni hydrologicznych.

Dla modelu 2D konieczne jest przygotowanie danych, do których należą: mapa szorstkości, siatka obliczeniowa oraz informacja o ukształtowaniu terenu z jak najlepszym odwzorowaniem istotnych dla analizy obiektów, w tym mostów, cieków, rowów czy obniżeń dróg.

Dodatkowo przed budową modelu konieczne jest przygotowanie danych opadowych. Budowa modelu polega na wczytaniu przygotowanych danych oraz ustawieniu parametrów symulacji. Szczegółowe opisy znajdują się w dalszej części rozdziału.

Na poniższym rysunku przedstawiono poszczególne kroki składające się na budowę modelu.

Rysunek 45 Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu



źródło: opracowanie własne

### 8.6.1. Dane opracowane na potrzeby budowy modeli 1D

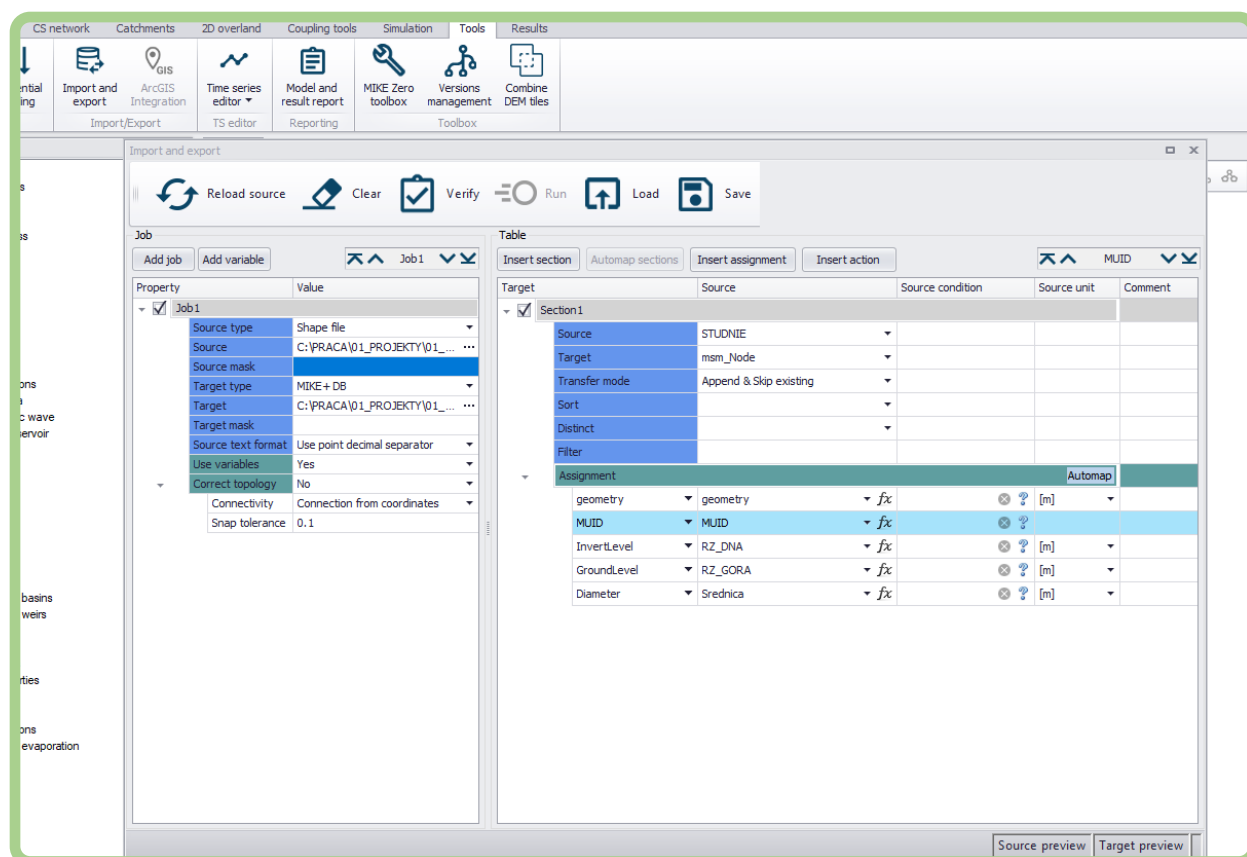
#### Sieć kanalizacji deszczowej

Model 1D opracowywany jest dla części dotyczącej sieci kanalizacji deszczowej. Przygotowane w trakcie inwentaryzacji warstwy .shp zawierają już elementy składowe modelu, takie jak studnie i odcinki sieci kanalizacji deszczowej, a także zlewnie hydrologiczne oraz ich połączenia ze studniami.

W celu importu sieci kanalizacji deszczowej do modelu (także w programie MIKE+) konieczne jest wcześniejsze przygotowanie warstw .shp z inwentaryzacją sieci kanalizacji deszczowej. Źródło tych danych stanowią zasoby jednostek miejskich (np. baza GESUT, mapa zasadnicza) oraz pomiary geodezyjne w terenie. Przygotowane warstwy .shp zasila się niezbędnymi atrybutami. Szczegóły dotyczące minimalnych wymagań i parametrów dotyczących sieci przedstawiono w [podrozdziale 5.4.](#)

Przygotowane dane należy zaimportować do modelu. W zależności od doboru narzędzia proces ten może przebiegać inaczej. W programie MIKE+, który wykorzystano do analiz w zlewniach pilotażowych, stosuje się wewnętrzne dostępne narzędzie oprogramowania Mike+, jakim jest Import and export. Narzędzie to pozwala na użycie przygotowanej wcześniej warstwy przestrzennej (.shp), która wskazuje lokalizację oraz przypisuje niezbędne atrybuty. Na poniższym rysunku ([Rysunek 46](#)) przedstawiono okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni.

Rysunek 46 Okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni



źródło: opracowanie własne

Poglądowo, do modelu sieci kanalizacji deszczowej dla zlewni pilotażowej w Nowym Sączu wprowadzono następujące ilości obiektów:

- wyloty - 15,
- studnie - 770,
- odcinki - 760.

Do modelu sieci kanalizacji deszczowej dla zlewni pilotażowej w Puławach wprowadzono następujące ilości obiektów:

- wyloty - 4,
- studnie - 1110,
- odcinki - 1115.

## 8.6.2. Dane opracowane na potrzeby budowy modeli 2D

### Mapa szorstkości

Informacja o powierzchni terenu stanowi podstawową informację dla odwzorowania hydrodynamiki spływu powierzchniowego, dlatego konieczne jest opracowanie mapy szorstkości. Informacje dotyczące przestrzennego rozmieszczenia pokrycia terenu oraz klas użytkowania terenu pozyskuje się z bazy danych obiektów topograficznych (BDOT10k). Rekomenduje się, aby wartości współczynników szorstkości Manninga „n” przypisać do odpowiednich klas użytkowania, zgodnie z „Metodyką opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym” (2020)<sup>15</sup>. Szczegóły techniczne procesu przygotowania mapy szorstkości opisano w Załączniku nr 1 do Poradnika.

### Dane o ukształtowaniu terenu

Podstawowym źródłem informacji na temat powierzchni terenu jest numeryczny model terenu (NMT). Zdarza się, iż dla obszaru opracowania dostępne są dane z różnych lat/okresów, warto je wówczas zweryfikować. Może się bowiem okazać, że nowsze dane w konkretnym obszarze nie będą lepsze, z uwagi np. na występowanie w trakcie pomiarów robót ziemnych (wykopy, nasypy), dla których teren docelowo zostanie przywrócony do stanu pierwotnego. W takim przypadku lepsze okazuje się nieco starsze NMT lub konieczna jest modyfikacja nowszego NMT. Dane NMT na potrzeby analiz każdorazowo powinny zatem zostać zrewidowane i w określonych obszarach zmodyfikowane. Modyfikacja numerycznego modelu terenu na potrzeby tego typu analiz może polegać np. na obniżeniu rzędnych w miejscu występowania dróg z krawężnikami oraz uwzględnieniu w numerycznym modelu terenu mostów. Szczegółowy opis możliwych modyfikacji znajduje się w poniższych podrozdziałach. Zmodyfikowane NMT stanowi podstawę do określenia wysokości dla elementów siatki obliczeniowej. Siatka obliczeniowa stanowi schematyzację numerycznego modelu terenu.

### Obniżenie dróg

Obniżenie numerycznego modelu terenu w miejscu dróg z krawężnikami wykonuje się, aby lepiej odwzorować spływ powierzchniowy po tych drogach. Woda opadowa nie rozlewa się poza jezdnię, aż do momentu osiągnięcia głębokości wyższej niż głębokość zagłębienia. Analogiczna sytuacja występuje w rzeczywistości. Woda opadowa, która znajduje się na jezdni nie rozlewa się poza krawężniki, jeśli głębokość wody jest niższa niż wysokość krawężników. W przypadku niektórych dróg już w podstawowym NMT widać obniżenie jezdni względem chodników. Obniżenie to jest jednak kilkucentymetrowe. Dodatkowo błąd średni wysokości w wykorzystanym NMT to 0,2 m. Dlatego też rekomenduje się, aby wszystkie zidentyfikowane drogi z krawężnikami zostały obniżone.

Dlatego niezbędne jest przygotowanie warstwy wyznaczającej przebieg dróg posiadających krawężniki. Jezdnie dróg z krawężnikami znajdują się niżej niż otaczający je teren, więc warstwa ta określa zasięg, w którym numeryczny model terenu powinien zostać obniżony. Do wyznaczenia tego zasięgu wykorzystuje się wcześniej przygotowaną warstwę, opracowaną na etapie budowy mapy szorstkości.

Na podstawie informacji zawartych w tabeli atrybutów: (kolumna z informacją o szerokości nawierzchni) i „kolumna z informacją o materiale nawierzchni, przyjmuje się założenie, że drogi o szerokości powyżej 4 m oraz o materiale pokrycia: masa bitumiczna, kostka perforowana oraz beton posiadają krawężniki. Szerokość 4 m została dobrana na podstawie analizy dróg występujących na obszarze opracowania. W trakcie analizy zauważono, że drogi o szerokości poniżej 4 m zazwyczaj są drogami nie posiadającymi krawężników.

Ponadto należy usunąć poligony, które nie posiadają połączenia hydraulicznego z pozostałymi drogami. Obniżenie NMT dla tych poligonów skutkowałoby stworzeniem sztucznych obszarów bezodpływowych. Dodatkowo należy także usunąć drogi spełniające założone kryteria szerokości i nawierzchni, ale leżące w miejscach, gdzie występowanie krawężników jest mało prawdopodobne np. szerokie drogi z płyt betonowych w lasach.

Przy pomocy tak przygotowanych poligonów można obniżyć numeryczny model terenu o założoną wartość wynoszącą 15 cm. Jest to najczęściej stosowana w Polsce wysokość krawężnika.

15 PGW WP KZGW, Metodyka aMZPiMRP, 2020, <https://powodz.gov.pl/www/powodz/Mapy/raport%202022/aMZPiMRP%20Zal1%20Metodyka%20RZEKI%2020200617%20v7.00%20pub.pdf>

## Odwzorowanie cieków, rowów i sztucznych kanałów

Cieki, rowy i sztuczne kanały odwzorowane są w numerycznym modelu terenu. Poprawność ich odwzorowania także powinna zostać zweryfikowana. Pierwszym etapem weryfikacji cieków, rowów i sztucznych kanałów jest wizualny przegląd NMT na całej długości cieków. Następnie w programie GIS bazując na NMT, należy wygenerować profile cieków oraz rowów, które umożliwią analizę poprawności ich odwzorowania. Na podstawie weryfikacji wizualnej NMT i weryfikacji profili cieków, można wytypować miejsca, które budzą wątpliwość. Następnie miejsca te należy sprawdzić, poprzez wygenerowanie przekrojów na podstawie NMT. W przypadku zidentyfikowania rozbieżności należy zlecić dodatkowe pomiary geodezyjne i odpowiednio zmodyfikować NMT.

## Budynki

W procesie tworzenia NMT budynki są usuwane w sposób automatyczny. Może to powodować powstawanie w NMT lokalnych zagłębień w obrębie usuwanego budynku, do których wlewa się woda opadowa w trakcie symulacji. Takie sytuacje należy zweryfikować na etapie opracowania wyników modelowania.

Rekomenduje się pozostawienie obszarów pod budynkami w siatce obliczeniowej. Przewidziane do analizy tereny to obszar zurbanizowany z wieloma budynkami. Opad zrzucany jest na siatkę obliczeniową, więc usunięcie budynków spowodowałoby znaczne zmniejszenie objętości wód opadowych. Jednakże należy zaznaczyć, że może to powodować objęcie obszarem zagrożenia budynków, których poziom parteru znajduje się poniżej rzędnej wód opadowych.

## Przygotowanie danych opadowych

Opis procedury przygotowania danych opadowych ujęto w Załączniku 1 do Poradnika.

## Siatki obliczeniowe

Siatka obliczeniowa stanowić powinna schematyzację numerycznego modelu terenu, który w sposób jak najbardziej reprezentatywny odwzorowywać będzie ukształtowanie terenu. Warstwą bazową do wyznaczania zasięgu siatki jest zasięg opracowania modelu. Zasięg siatki obliczeniowej zwykle powiększa się w stosunku do zasięgu opracowania, tak aby możliwy był swobodny rozptył po terenie wód wylewających się z przepełnionej kanalizacji. Przyjęcie zbyt małego zasięgu siatki obliczeniowej może skutkować dotarciem wód opadowych do granicy siatki i sztuczne ich gromadzenie się, gdyż granica siatki stanowi sztuczną barierę dla przepływu wód.

Istnieją różne siatki obliczeniowe. Najprostsza i najmniej dokładną siatką jest siatka prostokątna GRID. Siatka trójkątna MESH jest zdecydowanie dokładniejsza, gdyż trójkąty o różnych powierzchniach są w stanie lepiej odwzorować zmienność ukształtowania terenu. Najdokładniejszą siatką obliczeniową jest siatka nieregularna składająca się z trójkątów i prostokątów. Trójkąty stosowane są do odwzorowania ukształtowania terenu o dużej zmienności natomiast prostokąty lepiej odzwierciedlają koryta rzek, wały i drogi.

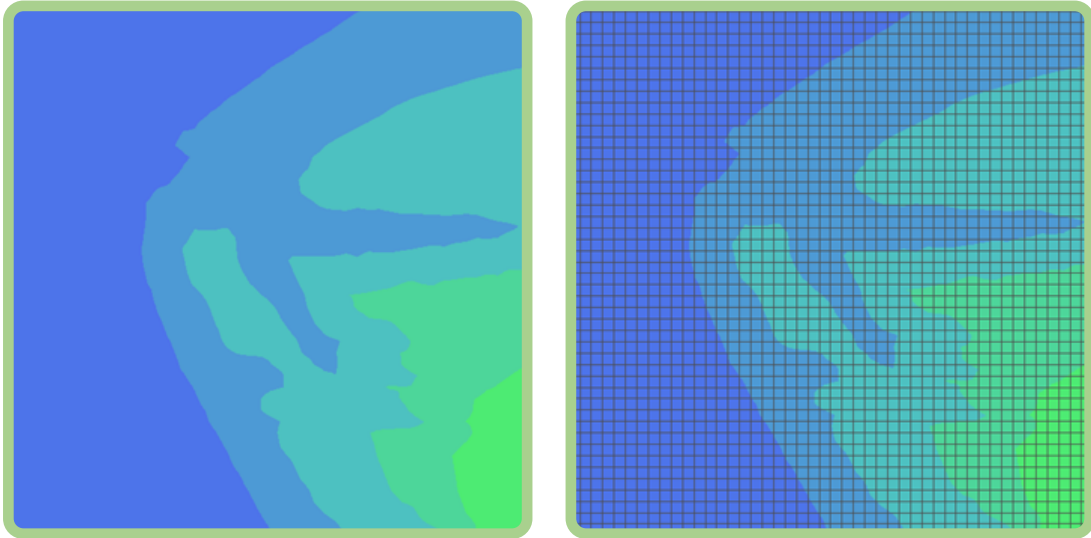
Rozdzielczość siatki obliczeniowej ma wpływ na ilość jej elementów, a co za tym idzie na czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Im mniejsza liczba elementów siatki (większa generalizacja) tym mniejszy czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Jednak im większa generalizacja, tym mniejsza dokładność otrzymanych wyników, dlatego wybór rozdzielczości siatki jest pewnym kompromisem, pomiędzy jakością wyników a czasem przeprowadzania obliczeń. Warto mieć też na uwadze ewentualne ograniczenia oprogramowania czy sprzętu komputerowego używanego do przeprowadzenia symulacji. Przy zbyt dużej ilości elementów siatki obliczeniowej okazać się może, że nie jest możliwe uruchomienie symulacji. Nie ma zatem możliwości przedstawienia uniwersalnych wielkości elementów siatki, które będą odpowiednie dla każdego analizowanego terenu.

Dla analiz w zlewniach pilotażowych wybrano siatkę obliczeniową o nieregularnym kształcie trójkątów (tzw. flexible mesh). Została ona opracowana w oparciu o następujące założenia:

- maksymalne dopuszczalne pole powierzchni wieloboków wynosi 5 m<sup>2</sup>,
- dla terenów, na których zwiększenie elementów siatki nie wpłynie istotnie na wyniki modelowania dopuszcza się zastosowanie wieloboków o powierzchni do 20 m<sup>2</sup>.

Na rysunku poniżej ([Rysunek 47](#)) przedstawiono przykładową siatkę obliczeniową regularną prostokątną.

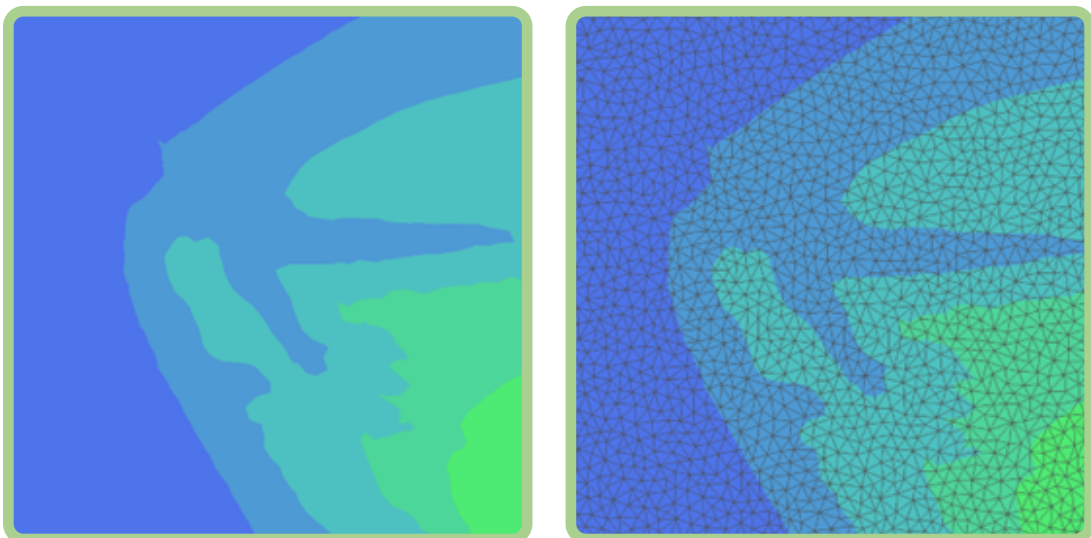
Rysunek 47 Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki regularnej (po prawej)



źródło: opracowanie własne

Na rysunku poniżej ([Rysunek 48](#)) przedstawiono przykładową siatkę obliczeniową nieregularną trójkątną.

Rysunek 48 Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki nieregularnej trójkątnej (po prawej)



źródło: opracowanie własne

W ramach analizach dla zlewni pilotażowych, dla Wariantu 3 siatka obliczeniowa jest nieregularna trójkątna (tzw. flexible mesh). Została opracowana w oparciu o następujące założenia:

- w przypadku siatki nieregularnej maksymalne dopuszczalne pole powierzchni wieloboków wynosi  $5 \text{ m}^2$ ,
- dla terenów, na których zwiększenie elementów siatki nie wpłynie istotnie na wyniki modelowania dopuszcza się zastosowanie wieloboków o powierzchni do  $20 \text{ m}^2$ .

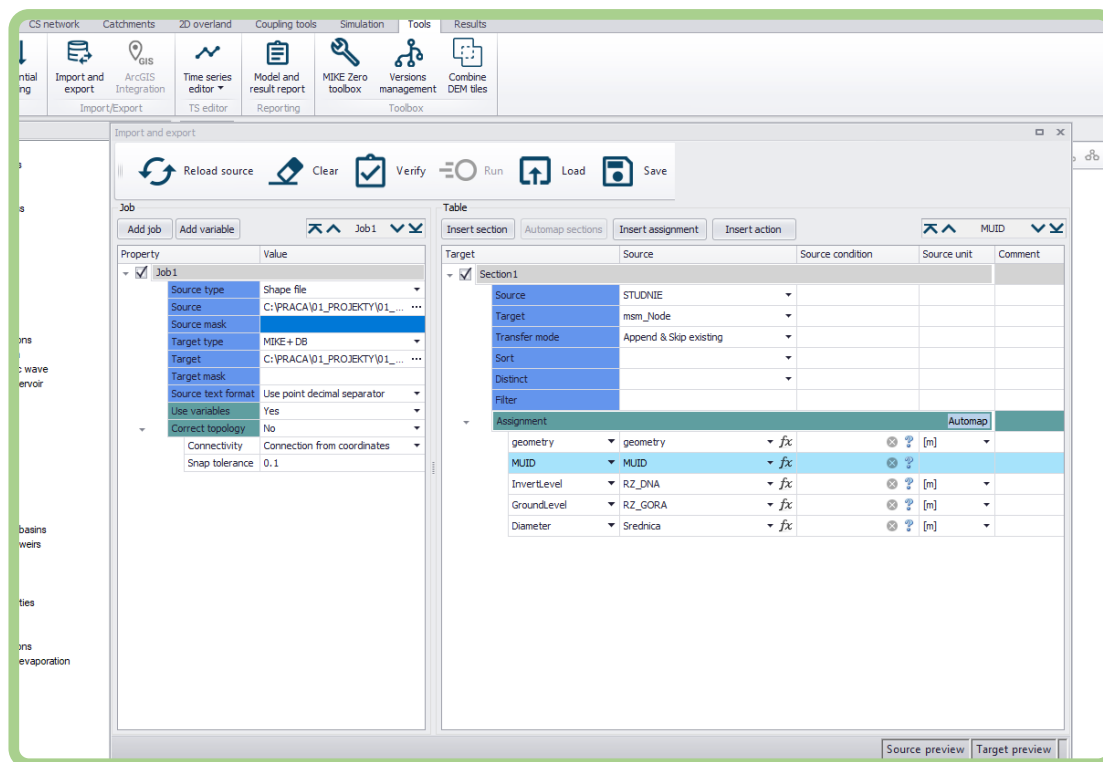
### 8.6.3. Wprowadzanie danych do modeli 1D+2D

#### Wprowadzenie danych dotyczących modelu 1D

Model 1D opracowywany jest dla części dotyczącej sieci kanalizacji deszczowej. Przygotowane w trakcie inwentaryzacji warstwy .shp zawierają już elementy składowe modelu, takie jak studnie i odcinki sieci kanalizacji deszczowej, a także zlewnie hydrologiczne oraz ich połączenia ze studniami. Dane te należy zaimportować do modelu.

W zależności od doboru narzędzia proces ten może przebiegać inaczej. W programie MIKE+, który wykorzystano do analiz w zlewniach pilotażowych, wykorzystuje się wewnętrzne dostępne narzędzie oprogramowania Mike+, jakim jest Import and export. Narzędzie to pozwala na użycie przygotowanej wcześniej warstwy przestrzennej (.shp), która wskazuje lokalizację oraz przypisuje niezbędne atrybuty. Na poniższym rysunku ([Rysunek 49](#)) przedstawiono okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni.

Rysunek 49 Okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni



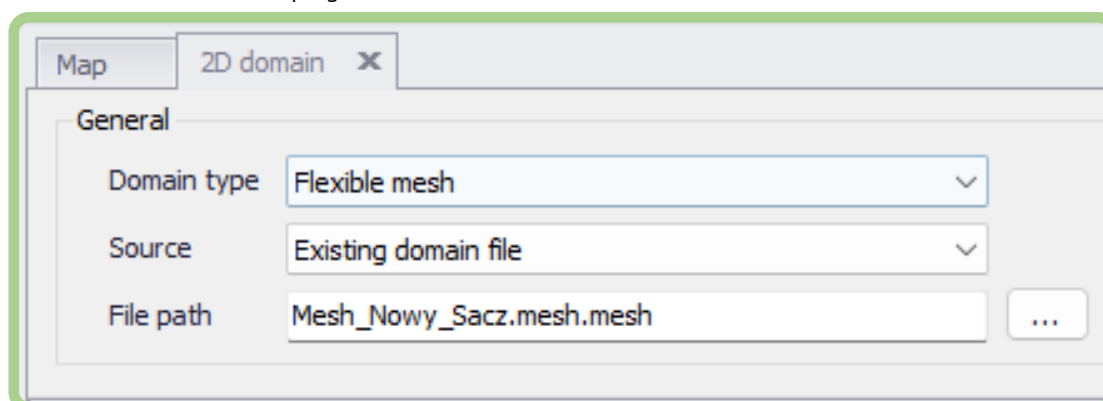
źródło: opracowanie własne

## Wprowadzenie danych dotyczących modelu 2D

Model 2D opracowywany jest dla części dotyczącej powierzchni terenu. W pierwszym kroku należy wczytać do modelu wcześniej przygotowaną siatkę obliczeniową. W kolejnym kroku należy wczytać wcześniej przygotowany raster szorstkości. Następnie zaimportować należy dane o opadach. Te trzy elementy stanowią podstawę prac analitycznych w obrębie modelu 2D.

W przypadku zlewni pilotażowych proces przebiegał zgodnie z poniższym opisem. Dla modeli opracowano siatkę MESH, czyli siatkę nieregularną składającą się z wieloboków. W celu importu danych do narzędzia MIKE+ w zakładce 2D domain należy wskazać odpowiedni typ, źródło oraz ścieżkę do pliku. Na poniższym ([Rysunek 50](#)) przedstawiono ustawienia dla siatki MESH.

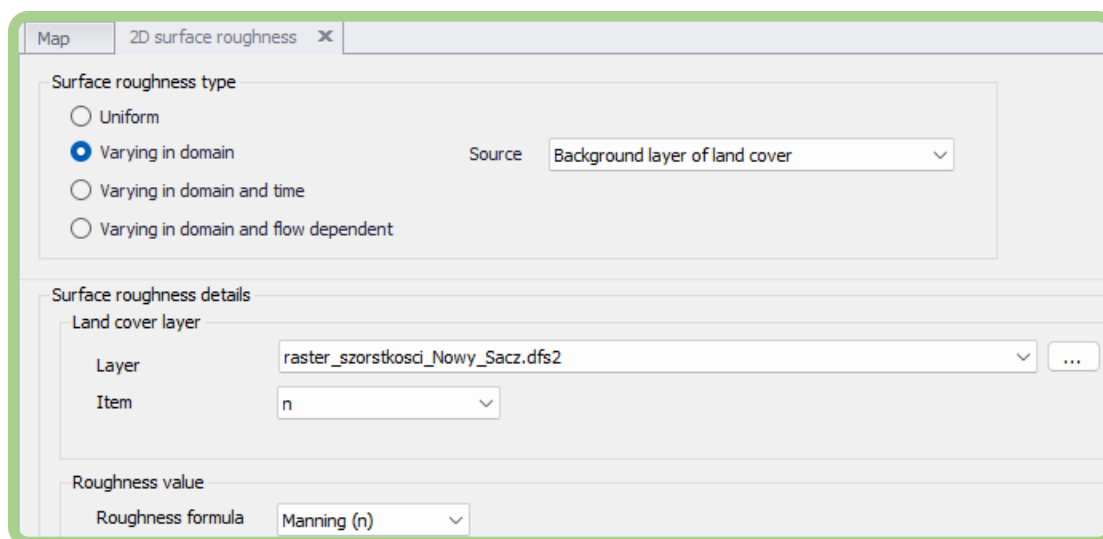
Rysunek 50 Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH



źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku w zakładce 2D surface roughness wczytuje się wcześniej przygotowany raster szorstkości. Na poniższym rysunku ([Rysunek 51](#)) przedstawiono ustawienie programu dla rastra szorstkości.

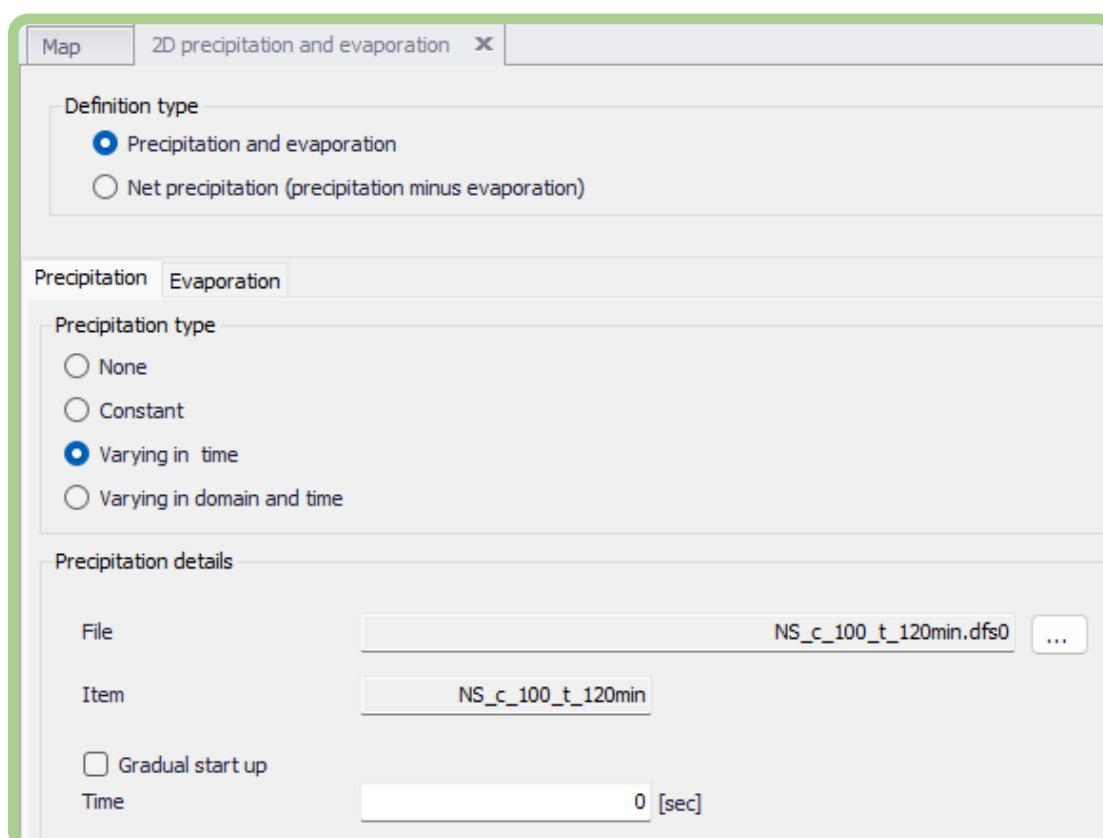
Rysunek 51 Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku w zakładce 2D precipitation and evaporation wczytuje się wcześniej przygotowany plik .dfs0 z opadem. Na poniższym rysunku ([Rysunek 52](#)) przedstawiono ustawienie programu dla pliku z opadem.

Rysunek 52 Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami

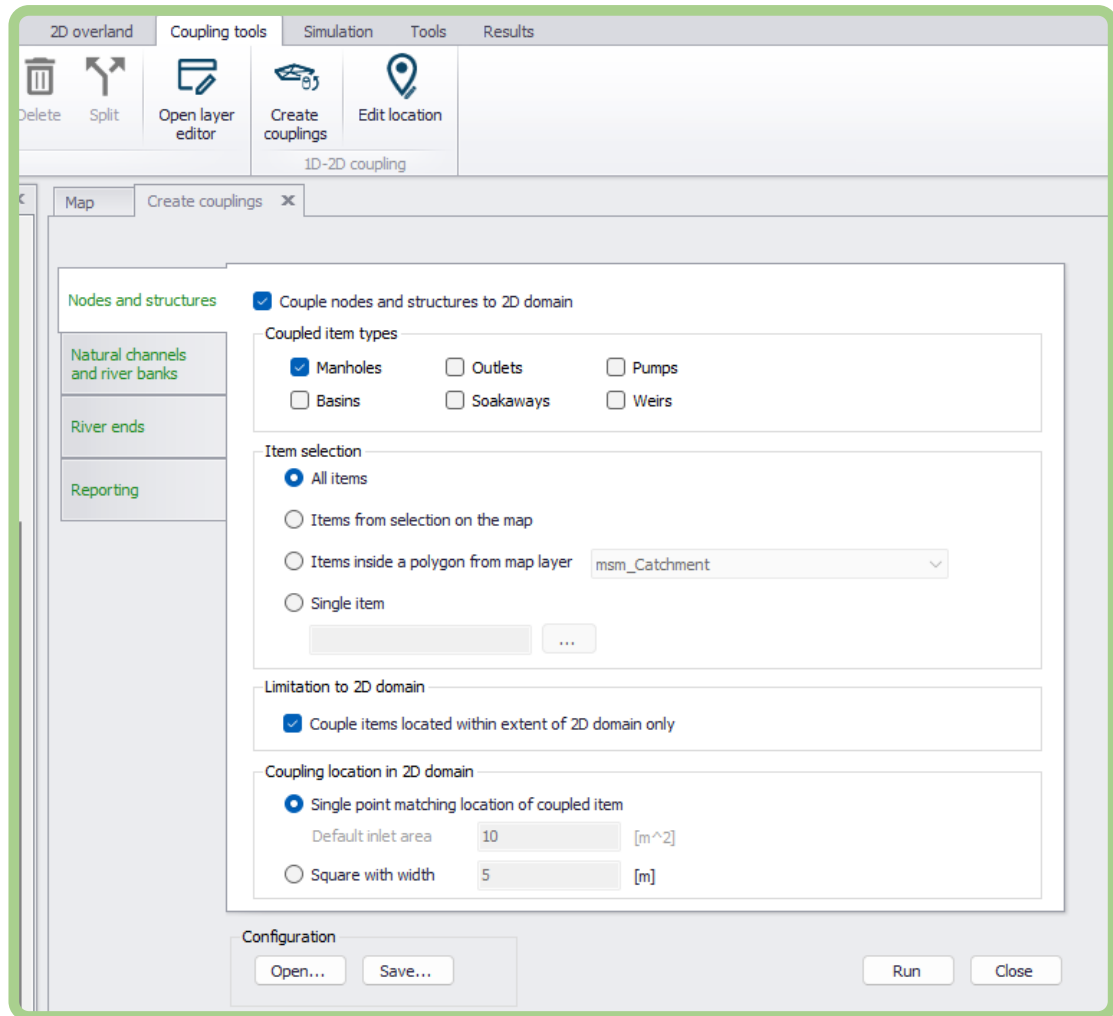


źródło: opracowanie własne

#### 8.6.4. Połączenie modelu 1D z modelem 2D

Przedostatnim krokiem jest połączenie modelu 1D sieci kanalizacyjnej z modelem 2D powierzchni terenu. W tym celu w zakładce Coupling tools został wybrany moduł Create couplings, który łączy wybrane elementy modelu z siatką Mesh. Do połączenia zostały wybrane wszystkie studnie znajdujące się w modelu. Na poniższym rysunku ([Rysunek 53](#)) przedstawiono okno Create couplings w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.

Rysunek 53 Okno Create couplings w programie MIKE+ wraz z ustawieniami

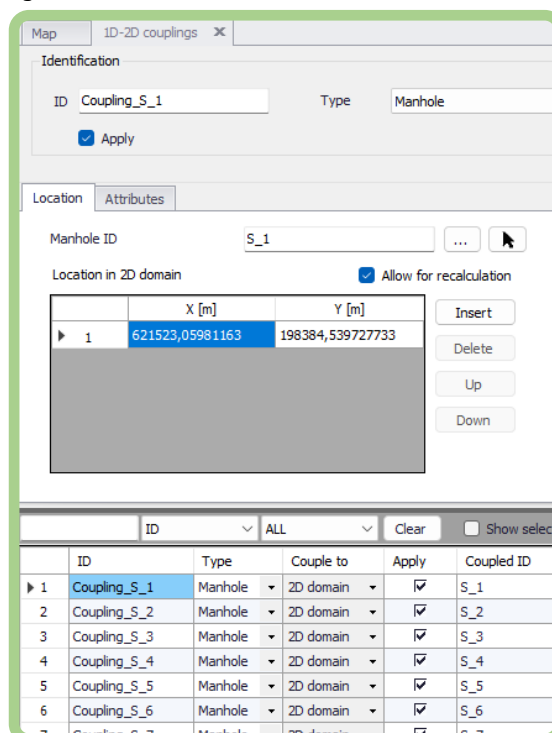


źródło: opracowanie własne

Lista wybranych i połączonych z siatką obiektów znajduje się w zakładce 1D-2D couplings.

Na poniższym rysunku ([Rysunek 54](#)) przedstawiono okno 1D-2D couplings w programie MIKE.

Rysunek 54 Okno 1D-2D couplings w programie MIKE.



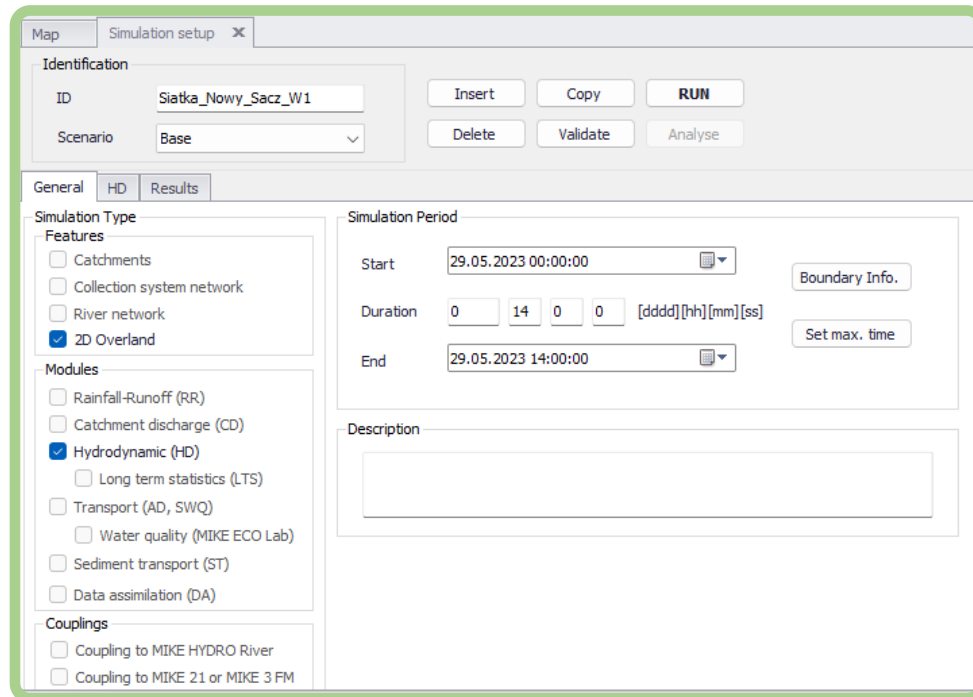
źródło: opracowanie własne



### 8.6.5. Ustawienie symulacji

Ostatnim wymaganym krokiem jest ustawienie parametrów symulacji w zakładce Simulation setup. Sprowadza się to do ustawienia typu symulacji (2D Overland i Hydrodynamic (HD)) oraz czasu symulacji. Czas symulacji powinien być na tyle długi, aby wody opadowe całkowicie spłynęły po powierzchni, a te które na niej pozostały były jedynie wodami opadowymi zgromadzonymi w zagłębieniach terenu (obszarach bezodpływowych). Czasy te dobiera się iteracyjnie na podstawie analizy wyników kolejnych symulacji. Dla opracowanych modeli w ramach Wariantu 1 przyjęto czas symulacji wynoszący 14 godzin. Na poniższym rysunku ([Rysunek 55](#)) przedstawiono ustawienia symulacji.

Rysunek 55 Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami



źródło: opracowanie własne

Dodatkowo w zakładce HD program umożliwia zmianę minimalnego i maksymalnego kroku czasowego symulacji. W przypadku siatek o dużej liczbie elementów często konieczne jest zmniejszenie maksymalnego kroku obliczeniowego, aby symulacje zakończyły się bez błędów. Wartości domyślne dla minimalnego kroku czasowego to 0,01 s a dla maksymalnego 10 s.

Każdy model składa się zatem z plików głównych modelu oraz plików podczytywanych do modelu.

Pliki główne modelu to:

- baza danych SQLite – plik o rozszerzeniu .sqlite,
- model w programie MIKE+ - plik o rozszerzeniu .mupp.

Pliki podczytywane do modelu to:

- siatka MESH – plik o rozszerzeniu .mesh,
- informacja o szorstkości powierzchni – plik o rozszerzeniu .dfs2,
- dane o opadzie – plik o rozszerzeniu .dfs0.

### 8.6.6. Kalibracja i weryfikacja modelu

Kalibracja modelu hydraulicznego jest jednym z najistotniejszych elementów budowy modelu hydraulicznego, mających kluczowe znaczenie dla poprawności modelowanych wyników. Procedura kalibracji polega na zestawieniu wyników modelu hydraulicznego z danymi pomiarowymi w dedykowanym narzędziu w oprogramowaniu do modelowania i ocenie (wizualnej i statystycznej) korelacji porównywanych serii.

Proces kalibracji modelu sieci kanalizacyjnej można podzielić na następujące etapy:

- definicja warunków brzegowych,
- makrokalibracja modelu,
- kalibracja okresu bezdeszczowego (wymagana w przypadku modelowania kanalizacji ogólnospławnej),
- kalibracja okresu deszczowego,
- walidacja modelu.

W efekcie końcowym tego procesu otrzymuje się zweryfikowany model hydrauliczny sieci kanalizacyjnej pracujący jako model hydrodynamiczny zasilany wynikami z modelu opad – odpływ i symulujący pracę sieci zarówno w okresie bezdeszczowym (w przypadku kanalizacji ogólnospławnej), jak i deszczowym.

Do celów kalibracji modelu okresu bezdeszczowego wykorzystuje się następujące dane:

- profil przepływu (wskaźnik nierównomierności) dla okresu bezdeszczowego z każdego profilu pomiarowego dla kanalizacji ogólnospławnej,
- przepływ i wysokość napełnienia w profilach pomiarowych,
- wielkość przepływu dla okresu bezdeszczowego, wielkość spływu powierzchniowego oraz kształt hydrogramu są uzależnione od wartości i parametrów modelu. Parametry te są określone indywidualnie dla każdego profilu pomiarowego.

W procesie kalibracji modelu sieci kanalizacyjnej dla okresu deszczowego należy modyfikować parametry modelu opad-odpływ tak, aby uzyskać zbieżności pomiędzy każdym pomierzonym i obliczonym profilem. Parametry hydrologiczne podlegające kalibracji to:

- powierzchnia zlewni,
- procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych,
- procentowy udział powierzchni przepuszczalnych,
- długość zlewni,
- straty początkowe i zwilżenie powierzchni nieprzepuszczalnych i przepuszczalnych,
- parametry Hortona dla powierzchni przepuszczalnych.

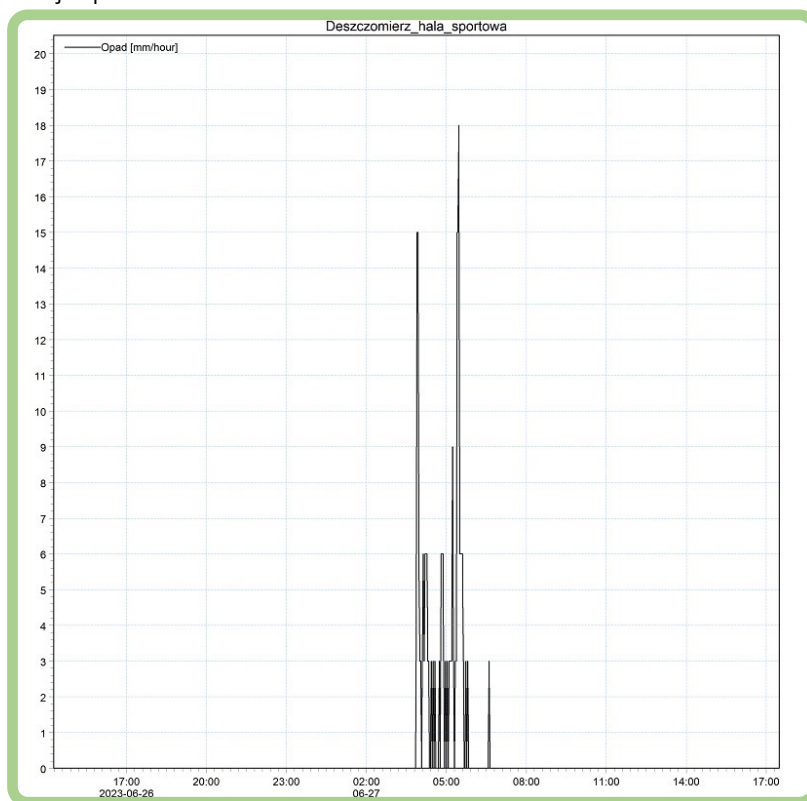
W procesie kalibracji powinny zostać wyselekcjonowane deszcze o charakterze nawalnym. Selekcja powinna opierać się na wielkości opadu, intensywności w okresie szczytowym oraz rozmieszczeniu przestrzennym. Dalszy proces walidacji modelu powinien opierać się o dłuższą serię czasową zebranych wyników, celem pokazania zmienności warunków hydraulicznych panujących w sieci kanalizacyjnej.

Za zakończenie budowy skalibrowanego modelu sieci kanalizacyjnej uważa się moment, w którym różnica między wielkościami wysokości wypełnienia ściekami kanału uzyskanymi jako wynik symulacji (obliczeń modelu), a wielkościami pomierzonymi w wybranych punktach na sieci nie będzie większa niż 20% dla 80% wyników pomiarów. Do 20% pomiarów może być pominięte w kalibracji i weryfikacji modelu, ze względu na zaburzenia przepływu lub zbyt małe przepływy podczas pogody bezdeszczowej i ich wpływ na poprawność pomiaru w całym okresie.

Poniżej przedstawiono wyniki przeprowadzonej kalibracji dla analizowanej zlewni na obszarze Nowego Sącza

Kalibracja i weryfikacja modelu została wykonana na podstawie wyników z kampanii pomiarowej obejmującej 2 punkty pomiaru przepływu i napełnienia na sieci (ul. Kraszewskiego i ul. Krańcowa) oraz 1 punkt pomiaru wysokości opadu (Hala sportowa). Model został poddany kalibracji na 1 zdarzenie opadowe oraz weryfikacji również na 1 zdarzenie opadowe. Jako opad do kalibracji przyjęto zdarzenie opadowe, które wystąpiło w nocy 26/27.06.2023 ([Rysunek 56](#)).

Rysunek 56 Graficzna prezentacja opadu z dnia 27.06.2023



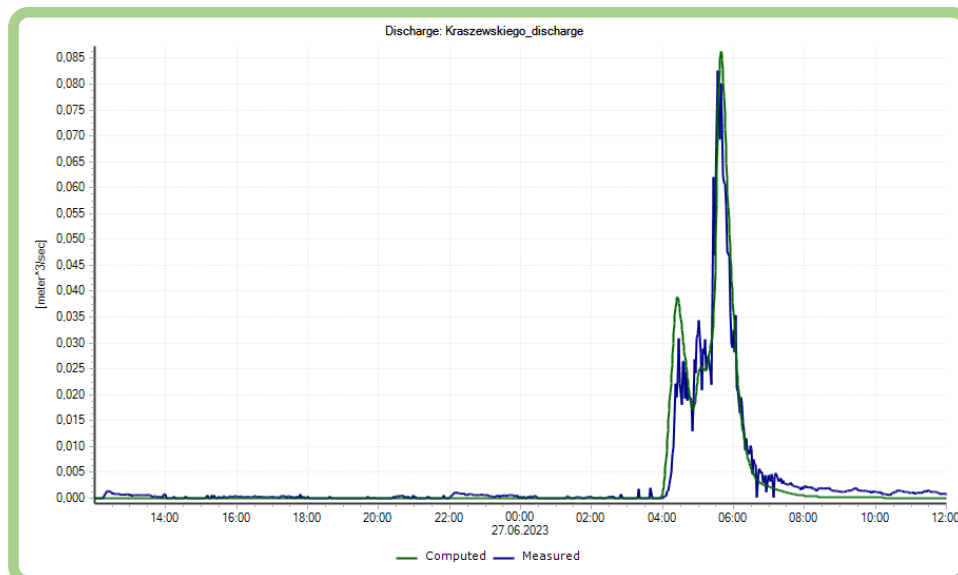
źródło: opracowanie własne

Kalibracja modelu polegała na zmianie parametrów zlewni hydrologicznych w celu dopasowania wyników symulacji do wyników z kampanii pomiarowej. Parametry zlewni, które ulegały zmianom w celu wykalibrowania modelu to:

- powierzchnia zlewni;
- procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych płaskich,
- procentowy udział powierzchni nieprzepuszczalnych stromych,
- procentowy udział powierzchni słabo przepuszczalnych,
- długość zlewni.

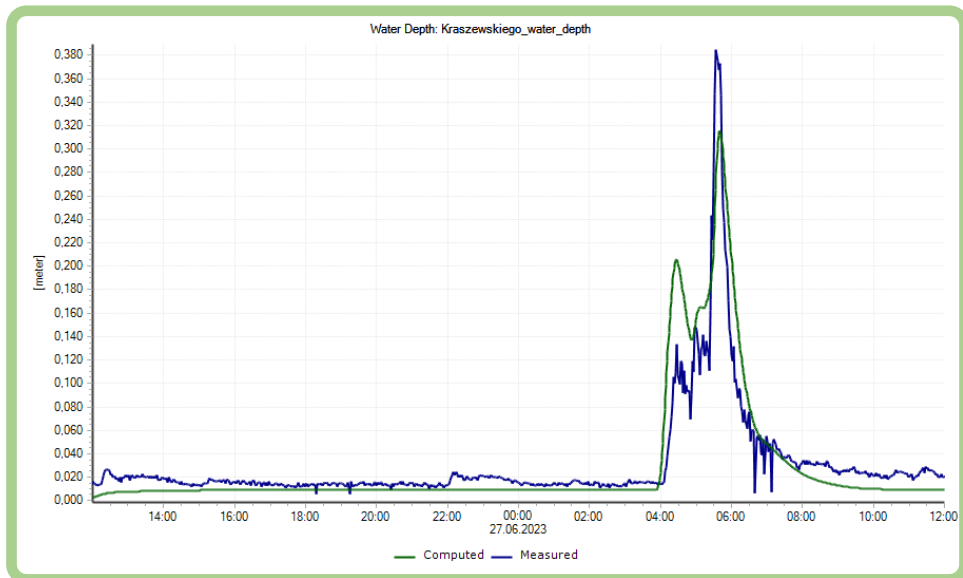
Wyniki kalibracji przedstawiono na poniższych rysunkach ([Rysunek 57](#), [Rysunek 58](#), [Rysunek 59](#) i [Rysunek 60](#)).

Rysunek 57 Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - przepływ



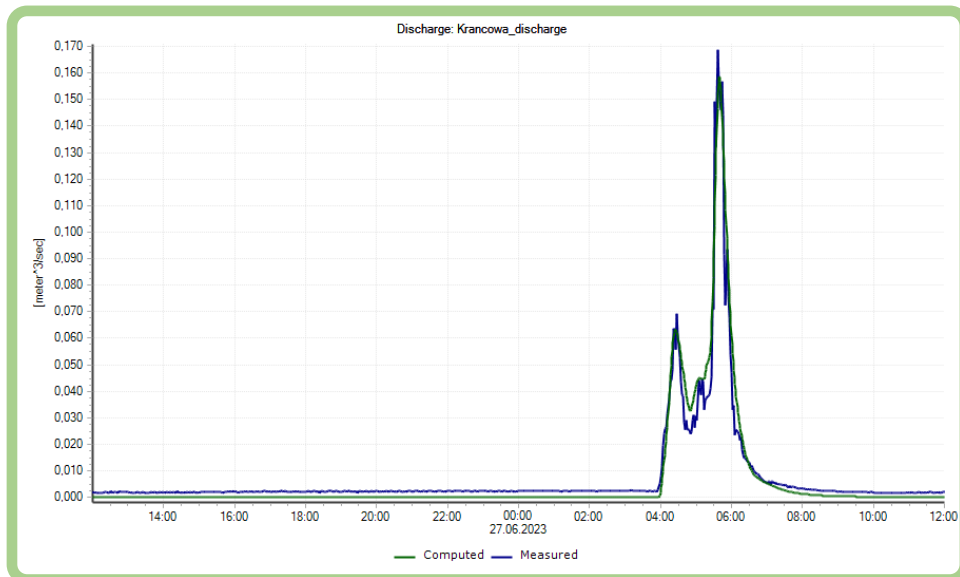
źródło: opracowanie własne

Rysunek 58 Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - napełnienie



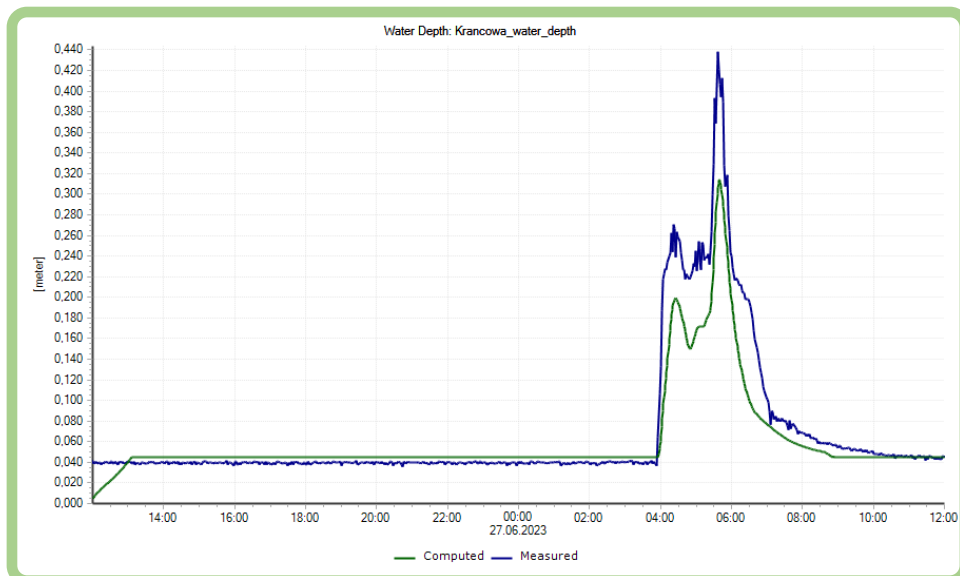
źródło: opracowanie własne

Rysunek 59 Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - przepływ



źródło: opracowanie własne

Rysunek 60 Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - napełnienie

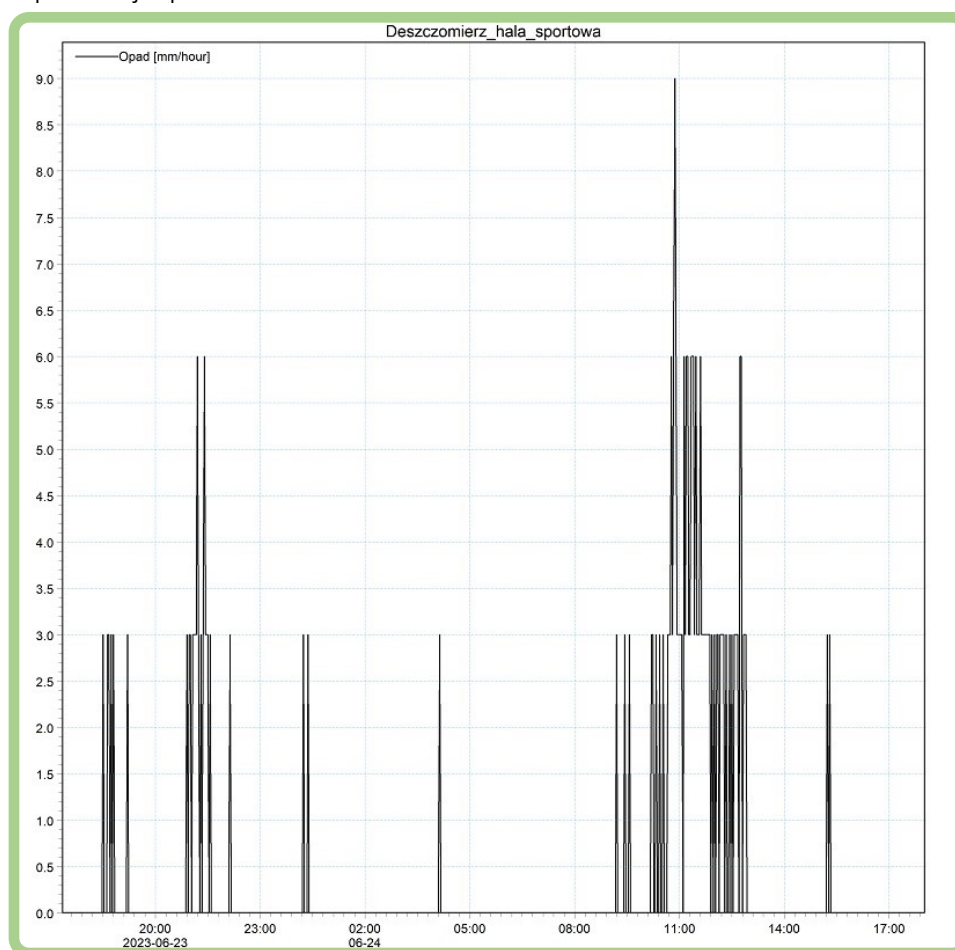


źródło: opracowanie własne

W przypadku punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego uzyskano bardzo wysoką zgodność wyników symulacji z wynikami z kampanii pomiarowej zarówno dla przepływu jak i napełnienia. W przypadku punktu pomiarowego w ul. Krańcowej uzyskano bardzo wysoką zgodność wyników symulacji z wynikami z kampanii pomiarowej jedynie dla przepływu. Dla napełnienia zgodność ta jest zdecydowanie gorsza. Nie jest to jednak wynik nieprawidłowej kalibracji. Punkt ten zlokalizowany jest niedaleko wylotu, który okresowo jest zalewany wodami opadowymi, czego konsekwencją może być pojawienie się cofki w kanale deszczowym lub zablokowanie odpływu wód deszczowych z kanalizacji. Zjawisko to w tym dniu można łatwo zidentyfikować analizując wartości na wykresie przepływu względem wykresu napełnienia. Początek wzrostu napełnienia na pomiarach pokrywa się z napełnieniem uzyskanym w wyniku symulacji, natomiast około godziny 06:00 występuje poszerzenie na wykresie napełnienia z pomiarów, a przepływ maleje co świadczy o wysokim stanie wód w odbiorniku i cofce do kanalizacji deszczowej.

Do weryfikacji modelu przyjęto zdarzenia opadowe z dni 23-24.06.2023 ([Rysunek 61](#)).

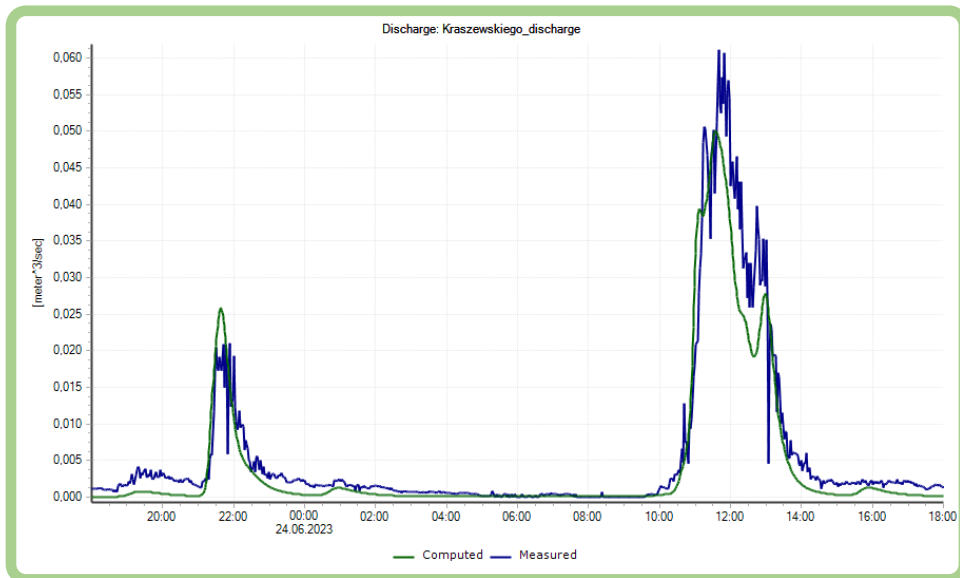
Rysunek 61 Graficzna prezentacja opadów z dni 23-24.06.2023



źródło: opracowanie własne

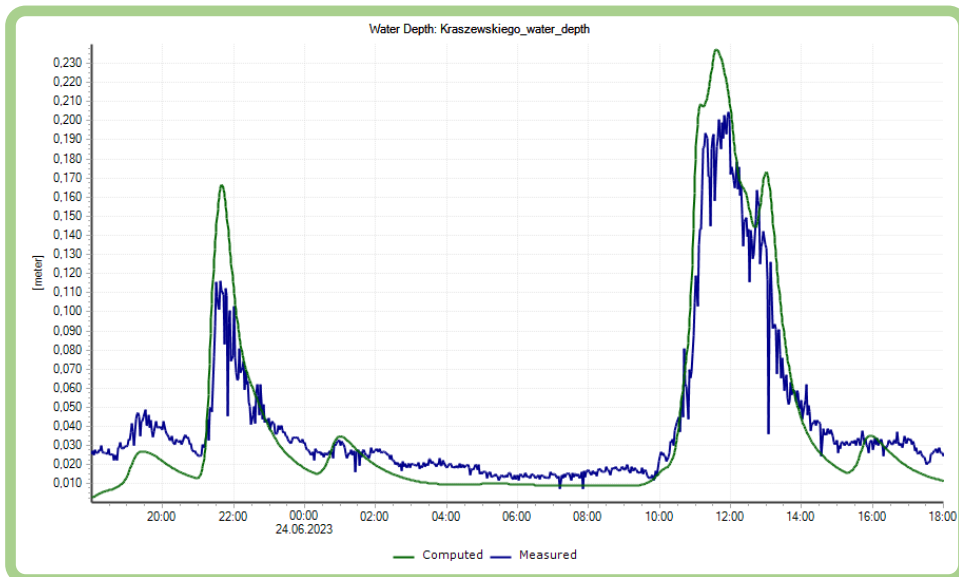
Na rysunkach poniżej ([Rysunek 62](#), [Rysunek 63](#), [Rysunek 64](#), [Rysunek 65](#)) przedstawiono wyniki weryfikacji dla punktu pomiarowego (przepływ i napełnienie) w ul. Kraszewskiego oraz w ul. Krańcowej.

Rysunek 62 Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - przepływ



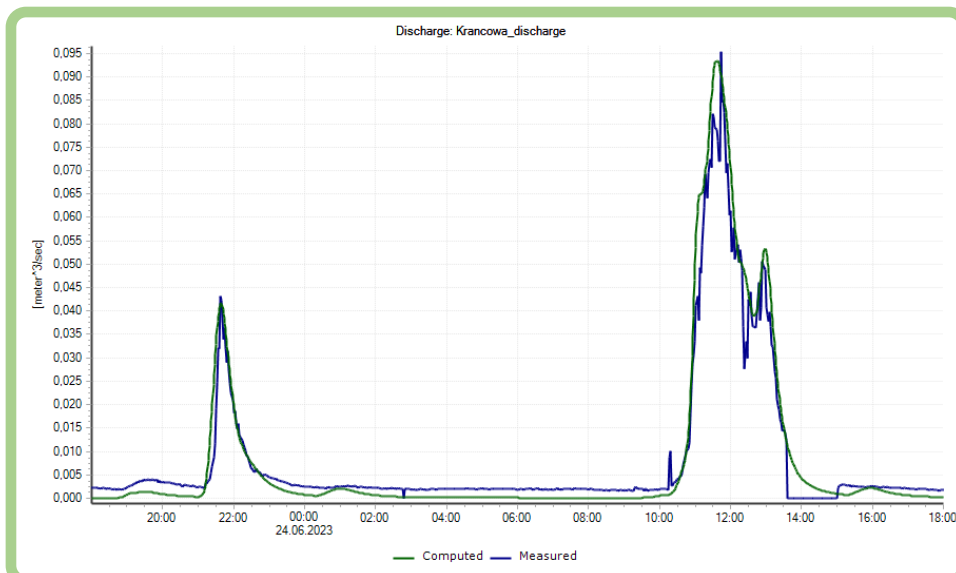
źródło: opracowanie własne

Rysunek 63 Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - napętnienie



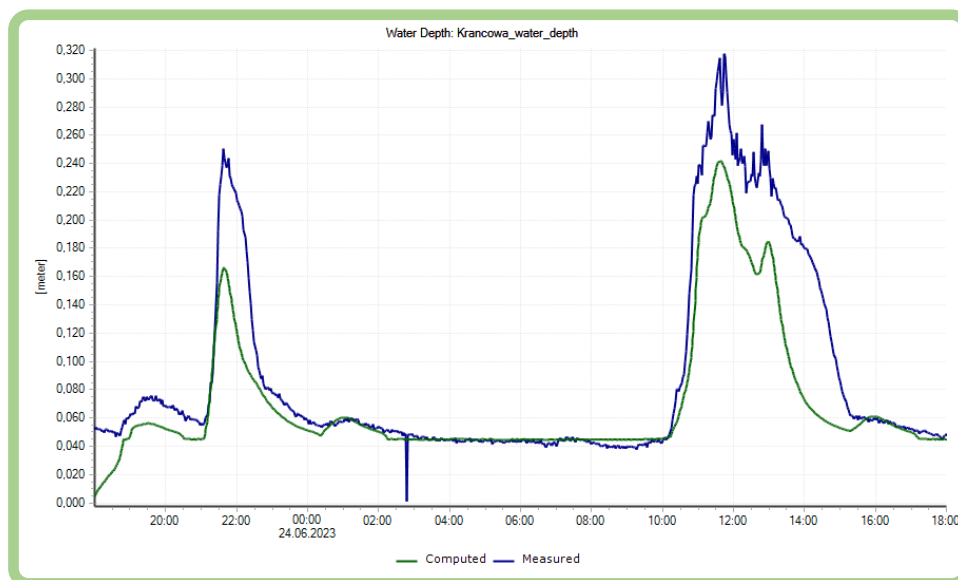
źródło: opracowanie własne

Rysunek 64 Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - przepływ



źródło: opracowanie własne

Rysunek 65 Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - napełnienie



źródło: opracowanie własne

Wyniki weryfikacji potwierdzają prawidłową kalibrację modelu. Różnice pomiędzy wynikami symulacji a wynikami z kampanii pomiarowej są niewielkie dla obydwu weryfikowanych zdarzeń opadowych.

Dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla przepływu uzyskano wysoką zgodność. Napełnienie z wyniku symulacji jest niższe niż napełnienie z pomiarów ze względu na występowanie cofki z odbiornika, podobnie jak w przypadku zdarzenia kalibracyjnego.

### 8.6.7. Wyniki modelowania

Symulacje przeprowadzone dla ustalonych scenariuszy obliczeniowych w zależności od wykorzystywanego narzędzia generowane są do różnych specyficznych dla danego programu plików wynikowych. Natomiast docelowo wyniki te pozwalają wygenerować raster, zawierający wszystkie zidentyfikowane obszary zagrożone wodami opadowymi wraz z informacją o zasięgu obszaru i jego głębokości.

## 8.7. Sposób wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi

Kluczowe po uzyskaniu wyników modelowania jest ich przeanalizowanie i wytypowanie obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla danego scenariusza obliczeniowego.

Pierwsza rewizja wyników powinna opierać się na przefiltrowaniu wyników pod kątem powierzchni i głębokości zalania obszaru. Do pierwszej rewizji i wytypowaniu obszarów istotnych rekomenduje się pozostawienie do dalszej analizy obszarów o powierzchni powyżej 100 m<sup>2</sup> i głębokości zalania powyżej 30 cm. Założenia te mogą zostać jednak zrewidowane w zależności od uzyskanych wyników dla analizowanego obszaru lub celu analizy.

Dla wyznaczonych obszarów wskazane jest określenie, w szczególności:

- strefy zalewu,
- głębokości wody [m] – w ustalonych przedziałach, dostosowanych do uzyskanych wyników,
- miejsc i wartości głębokości maksymalnej [m],
- powierzchni zalanej [m<sup>2</sup>],
- objętości wody [m<sup>3</sup>],
- kierunków spływu (strzałki obrazujące kierunek),
- liczby i rodzaju zagrożonych/zalanych budynków lub innych ważnych obiektów,
- długości zalanych ciągów komunikacyjnych [m] (z podziałem na typy) – na podstawie BDOT10k.

Wszystkie wyniki powinny zostać przygotowane w warstwach przestrzennych shp.

W szczegółowych analizach, należy w pierwszej kolejności ze wszystkich obszarów zalanych wodami opadowymi, które były wynikiem modelowania 2D wybrać jedynie te, które znajdują się na terenach zabudowanych, zidentyfikowanych na podstawie BDOT10k.

W zależności od decyzji i celu analizy, można wprowadzić dodatkowe kryteria wyboru obszarów zagrożonych wodami opadowymi jak np. minimalna głębokość zalania czy minimalna powierzchnia zalania. Modelowanie 1D+2D pozwala na zidentyfikowanie problemów związanych z wodami opadowymi zarówno na powierzchni terenu, jak i problemów z istniejącą kanalizacją deszczową (wylewy ze studzienek i rozływ po terenie, jak i przeciążenia sieci kanalizacji deszczowej). Już sam fakt wystąpienia wylania na powierzchnię terenu, bez względu na jego głębokość czy powierzchnię świadczy o niewydolności kanalizacji i potrzebie przebudowy odbiornika/kolektora, na którym zabudowane są studnie powodujące wylew na powierzchnię terenu.

## 8.8. Czynniki wpływające na jakość i dokładność wyników

Na etapie opracowywania pilotażowych modeli hydrodynamicznych 1D+2D zidentyfikowano kilka kluczowych kwestii, które mają istotny wpływ na jakość i dokładność obliczeń i analiz. W związku z tym, że Wariancie 3 obszary zagrożone wodami opadowymi zostały wyznaczone w oparciu o wody wydostające się na powierzchnię terenu z przepełnionej kanalizacji deszczowej, jedną z dwóch najistotniejszych kwestii jest poprawna inwentaryzacja tych kanałów. W szczególności istotne są rzędne dna studzienek, rzędne terenu studzienek, wymiary kanałów i materiał kanałów. W przypadku nieposiadania rzetelnej wiedzy o kanalizacji deszczowej rekomenduje się wykonanie dodatkowych pomiarów geodezyjnych.

Drugą kluczową kwestią jest kalibracja modelu, czyli modyfikacja parametrów modelu w celu dostosowania wyników symulacji do rzeczywistych danych pomiarowych. Jeżeli na sieci kanalizacji deszczowej eksplloatator posiada zamontowane czujniki, a gromadzone dane uzna się za rzetelne, możliwa jest kalibracja modelu w oparciu o te dane. Jeżeli brak jest danych lub dane są nierzetelne należy przeprowadzić kampanię pomiarową. W celu jak najlepszej kalibracji modelu rekomenduje się przeprowadzenie kampanii pomiarowej w zakresie pomiaru przepływu i napełnienia w kanałach oraz pomiaru wysokości opadu. Tylko skalibrowany model może stanowić podstawę do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi. Wykorzystanie nieskalibrowanego modelu do analiz skutkować będzie wyznaczeniem niepoprawnych obszarów zagrożonych wodami opadowymi.

## 8.9. Podsumowanie

Przy opracowaniu modeli hydrodynamicznych 1D+2D istnieje kilka kluczowych kwestii, które mają istotny wpływ na jakość i dokładność obliczeń oraz uzyskanych wyników. W związku z tym, że obszary zagrożone wodami opadowymi są wyznaczone w oparciu o wody wydostające się na powierzchnię terenu z przepełnionej kanalizacji deszczowej, jedną z dwóch najistotniejszych kwestii jest poprawna inwentaryzacja tych kanałów. W szczególności istotne są rzędne dna studzienek, rzędne terenu studzienek, wymiary kanałów i materiał kanałów. W przypadku nieposiadania rzetelnych danych o kanalizacji deszczowej rekomenduje się wykonanie dodatkowych pomiarów geodezyjnych.

Drugą kluczową kwestią jest kalibracja modelu, czyli modyfikacja parametrów modelu w celu dostosowania wyników symulacji do rzeczywistych danych pomiarowych. Szczegółowo odniesiono do tego w [podrozdziale 8.6.6.](#) powyżej.

Zastosowane modele pozwalają na przeprowadzenie symulacji hydrodynamicznych w oparciu o dowolnie wybrane prawdopodobieństwo występowania opadu, czy czas jego trwania. Możliwe jest zatem określenie zasięgu zalania i maksymalnej głębokości zalania dla konkretnego opadu.

Co istotne, w przypadku modeli zintegrowanych 1D+2D nie ma konieczności tworzenia osobnych modeli dla każdego analizowanego prawdopodobieństwa wystąpienia opadu. Do jednego modelu wczytać można dowolną liczbę plików z analizowanymi opadami. Następnie przed przeprowadzeniem symulacji możliwe jest wybranie odpowiedniego opadu, który będzie uwzględniony w prowadzonej symulacji. Zdecydowanie daje to przewagę nad modelami niezintegrowanymi.



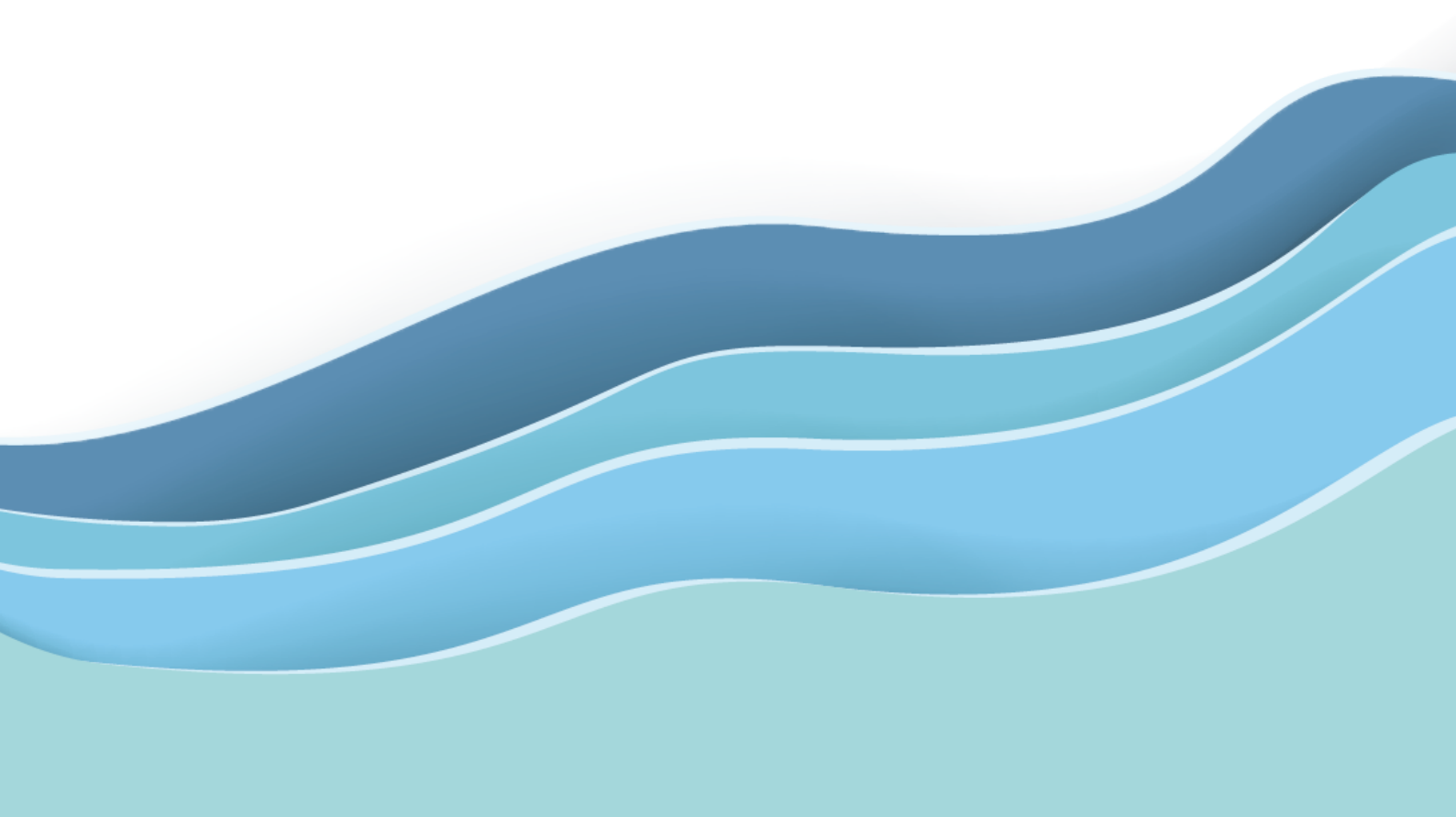
Zastosowanie tego typu modelu ma też pewne ograniczenie. Możliwe jest wykorzystanie go tylko w przypadku, gdy posiadane są dokładne dane w poniższym zakresie:

- informacje o sieci kanalizacji deszczowej pozwalające na budowę modelu 1D,
- dane z pomiarów przepływu i napełnienia w kanałach,
- dane z pomiarów wysokości opadów.

Istotną kwestią jest również fakt, iż wyznaczone obszary zagrożone wodami opadowymi dotyczą jedynie wód opadowych wydostających się z przepełnionej kanalizacji i rozpluwających się po terenie. W modelowaniu 1D+2D opad nie jest warunkiem brzegowym dla siatki obliczeniowej, tylko dla wyznaczonych zlewni hydrologicznych ciężących do kanalizacji deszczowej. Opad ten z wykorzystaniem modelu fali kinematycznej (przy uwzględnieniu powierzchni zlewni, jej uszczelnienia, spadku, infiltracji z wykorzystaniem wzoru Hortona) przeliczany jest na ilość wód opadowych trafiających do kanalizacji deszczowej, bez symulacji spływu wód opadowych po terenie (opad nie trafia na siatkę). Po terenie rozpluwają się jedynie wody opadowe, które wydostały się ze studni kanalizacyjnych na przeciążonych odcinkach sieci.

Istotna jest również kwestia doboru odpowiednich kryteriów wyboru obszarów zagrożonych wodami opadowymi (np. wielkości i głębokości obszarów). Zastosowane kryteria powinny być uzależnione od potrzeb i możliwości danego miasta, tak aby wyznaczone obszary obejmowały istotne dla miasta zagrożenie dla obiektów czy ciągów komunikacyjnych.

Wyniki analiz pozwalają na określenie zasięgu wód opadowych wydostających się z przepełnionej kanalizacji i rozpluwających się po terenie. Dostarczają więc bardzo ważną informację o nieprawidłowościach pracy kanalizacji deszczowej i mogą stanowić podstawę podjęcia działań dotyczących przebudowy sieci.



# DODATKOWE REKOMENDACJE METODYCZNE



## 9. Wytyczne metodyczne do opracowania scenariuszy dla prognozowanych zmian zagospodarowania terenu oraz prognozowanych zmian wielkości i częstotliwości opadów w wyniku zmian klimatycznych

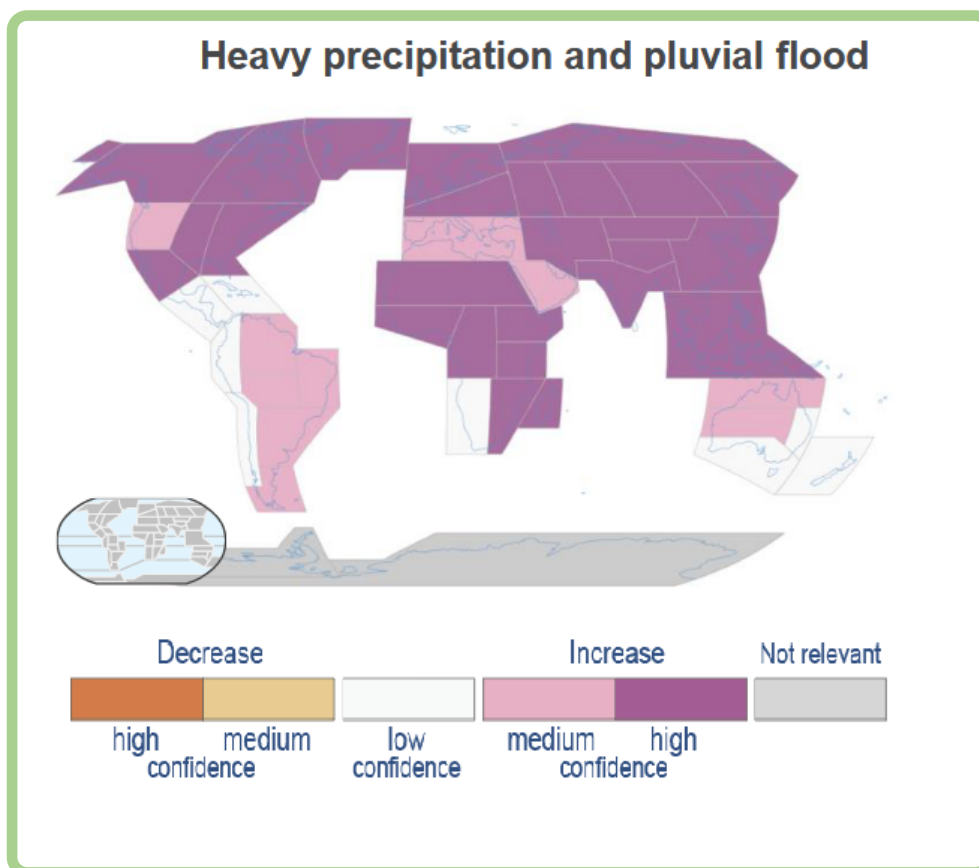
### 9.1. Aktualny stan wiedzy i dostępne wyniki

Analizy wpływu zmian klimatu m.in. na wysokość opadów w ostatnich latach stały się wymaganym elementem w projektach związanych z gospodarką wodną – zarówno w zlewniach naturalnych, jak i zurbanizowanych. Zatem także i na potrzeby opracowania tego poradnika przeanalizowano szereg dokumentów, przedstawiających prognozowane zmiany częstości i wysokości opadów związanych ze zmianami klimatycznymi oraz potencjalnie związane z tym skutki. Szczególnie istotne są publikacje naukowe i raporty wynikowe z prac naukowców, w tym najnowszy raport IPCC. Wszystkie analizowane dokumenty dostarczają istotnych informacji na temat prognozowanych zmian klimatu oraz sposobów, w jakie będą one wpływać na obszary zurbanizowane. Analizą objęto także raporty i publikacje z Polski, takie jak projekt Klimada 2.0, CHASE-PL oraz publikacje naukowe z Polskiej Akademii Nauk dotyczące wpływu zmian klimatu na częstotliwość i intensywność opadów.

Raporty Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (ang. 'Intergovernmental Panel on Climate Change' - IPCC) stanowią podsumowanie wyników badań naukowców z całego świata dotyczących obecnych oraz przewidywanych zmian klimatu. Najnowszym dokumentem jest szósty raport IPCC (ang. 'Sixth Assessment Report' – AR6).

IPCC WGI Interactive Atlas jest częścią raportu I grupy roboczej, pozwalającym na przegląd obserwowanych danych klimatycznych i ich przewidywanych zmian. W przypadku zmian częstotliwości i intensywności opadów atlas jednoznacznie wskazuje dla obszaru Zachodniej i Centralnej Europy znaczący wzrost intensywnych opadów deszczu i powodzi opadowych ([Rysunek 66](#)).

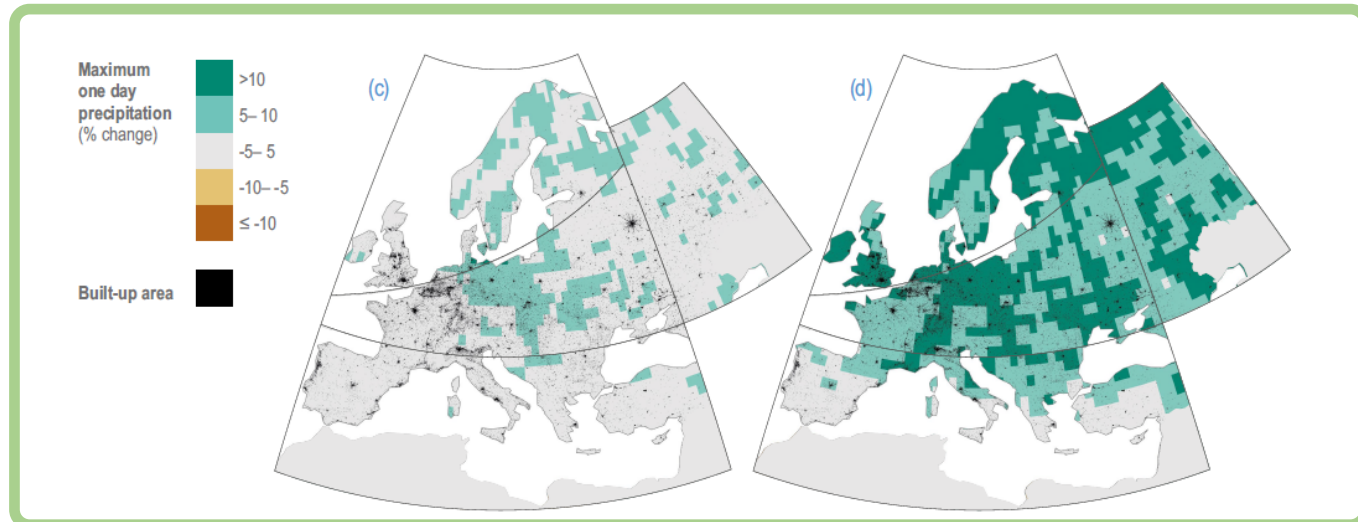
Rysunek 66 Przewidywane zmiany we wzroście i częstotliwości opadów nawaalnych i powodzi opadowych



źródło: IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Według najnowszej oceny IPCC, Polska narażona jest na wzrost maksymalnych opadów dobowych w zakresie od +5% do +10% przy poziomie globalnego ocieplenia równym +1,5 °C oraz >+10% przy poziomie globalnego ocieplenia równym +3,0 °C (Rysunek 67).

Rysunek 67 Zmiany maksymalnego opadu dobowego w Europie (%) dla globalnego ocieplenia na poziomie +1,5 °C (c) oraz +3,0 °C (d)



źródło: IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Intensywność i częstotliwość gwałtownych opadów atmosferycznych prognozowana jest jako rosnąca, co w połączeniu z intensyfikacją urbanizacji skutkuje wzrostem prognozowanego ryzyka wystąpienia powodzi opadowych na terenach Środkowej i Zachodniej Europy, w tym Polski.

W Polsce, największym projektem w ostatnich latach (2017-2021) jest realizowany przez IOŚ-PIB projekt pod nazwą „Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kanałów jej upowszechniania w kontekście zwiększania odporności gospodarki, środowiska i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń” (KLIMADA 2.0), który ma na celu dostarczenie niezbędnej wiedzy w zakresie zmian klimatu i oceny ich skutków na rzecz poprawy skuteczności oraz efektywności działań adaptacyjnych w sektorach wrażliwych na zmiany klimatu. Opracowanie odnosi się do scenariuszy zmian temperatury i opadu dla całego obszaru Polski. Analizy zmian temperatury i opadu przeprowadzono dla dwóch scenariuszy rozwoju opisanych akronimami RCP4.5 oraz RCP8.5. Umiarkowany scenariusz RCP4.5 zakłada dalszy wzrost stężeń CO<sub>2</sub> do 540 ppm w roku 2100 oraz osiągnięcie wymuszenia radiacyjnego na poziomie 4.5 W/m<sup>2</sup>. Scenariusz ekstrapolacyjny RCP8.5 odpowiada wzrostowi stężeń CO<sub>2</sub> do 940 ppm w roku 2100 i ciągły wzrost wymuszenia radiacyjnego do poziomu 8.5 W/m<sup>2</sup>. Przedstawiono w wynikach projektu prognozę liczby dni z opadem ekstremalnym powyżej 20 mm dla obu wariantów. Szacowane jest, że dla scenariusza RCP 4.5 do roku 2080 nieznacznie wzrośnie liczba dni z opadem ekstremalnym. Natomiast w scenariuszu RCP 8.5 liczba dni, w których przewidywany jest opad ekstremalny ma wyraźny wzrost. Ponadto dodatkowymi negatywnymi skutkami będą zwiększająca się liczba dni nocy tropikalnych oraz dni upalnych. W obu scenariuszach (RCP 4.5 oraz RCP 8.5) widoczny jest nieznaczny trend wzrostowy. Natomiast liczba dni z przymrozkami oraz dni mroźnych w obu trendach wykazuje tendencję malejącą.

Warto też wspomnieć projekt CHASE-PL – Ocena konsekwencji zmian klimatu dla wybranych sektorów w Polsce (realizowany w latach 2014-2016), w ramach którego dokonano szczegółowej analizy zmian klimatu w Polsce, z uwzględnieniem zmian maksymalnej, minimalnej oraz średniej dobowej temperatury powietrza dla wielolecia 1951-2013, jak również opadów oraz pokrywy śnieżnej.

Za podstawowe źródło informacji o przyszłych zmianach klimatu uznawane są wyniki ogólnych modeli cyrkulacji atmosfery (z uwzględnieniem oceanów). Przestrzenna rozdzielczość wyników symulacji modeli globalnych stanowi jednak istotny problem w przypadku większości badań dotyczących konsekwencji zmian klimatu, dla których wymagana rozdzielczość powinna być dużo większa. W celu wyeliminowania problemów związanych z niedopasowaniem rozdzielczości do końcowych użytkowników wykorzystuje się techniki skalowania w dół (tzw. downscaling). W ramach projektu CHASE-PL opracowane zostały projekcje klimatyczne temperatury i opadu dla Polski z wykorzystaniem dwóch różnych, uzupełniających się metod skalowania w dół projekcji pochodzących z globalnych i regionalnych modeli klimatu: metody empiryczno-statystycznej (ESD) oraz dy-

namicznego skalowania w dół (DD). Opracowane w projekcie CHASE-PL projekcje mogą być wykorzystywane w badaniach konsekwencji zmian klimatu, na przykład do oceny wpływu zmian klimatu na różne sektory w Polsce.

Modele systemu klimatycznego, atmosfery i oceanu, generujące globalne i regionalne scenariusze klimatyczne opracowane zostały także w projekcie ENSEMBLES, zrealizowanym w ramach 6. Programu Ramowego Unii Europejskiej w latach 2004-2009. Symulacje przeprowadzone w projekcie ENSEMBLES wykorzystane zostały do przygotowania scenariuszy zmian klimatu dla Polski w ramach projektu KLIMADA „Opracowanie i wdrożenie strategicznego planu adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu”, zrealizowanego w latach 2012-2013 przez Instytut Ochrony Środowiska-Państwowy Instytut Badawczy. Dla oceny zmian klimatu w Polsce wykorzystano wyniki 8 modeli regionalnych z warunkami brzegowymi z 4 różnych modeli globalnych.

Odmienne podejście do oceny wpływu zmian klimatu na wielkość opadów znaleźć można m.in. w pracy B. Kaźmierczaka „Prognozy zmian maksymalnych wysokości opadów deszczowych we Wrocławiu”, który na podstawie analizy opadów z wielolecia 1960-2018 dla Wrocławia podjął próbę opracowania wzoru predykcyjnego na maksymalną wysokość opadów o czasach trwania od  $t = 5$  min do  $t = 4320$  min, prawdopodobieństwie przekroczenia od  $p = 0,02\%$  do  $p = 1\%$  oraz lat od  $r = 1989$  do  $r = 2050$ .

Na świecie prowadzone są szczegółowe badania mające na celu określenie wpływu zmian klimatu na poszczególne sektory gospodarki, społeczeństwo czy środowisko. Niemniej jednak modele klimatyczne obejmują wiele założeń dotyczących rozwoju i interakcji wzajemnie skorelowanych parametrów, które trudno zastosować bezpośrednio w skali lokalnej. Z tej przyczyny niemal każdy kraj pracuje nad własnym regionalnym modelem prognozowania klimatu wywodzącym się z różnych globalnych modeli klimatycznych.

Należy zwrócić szczególną uwagę na następujące aspekty w zrozumieniu zmian klimatu w regionie:

1. analiza obecnie zachodzących trendów dotyczących zmian: temperatury, opadów, deszczy nawalnych, burz oraz dodatkowych parametrów adekwatnych dla danego obszaru,
2. wpływ zmian klimatu. Ocena wpływu odnosi się do skutków takich jak:
  - wzmocnienie: trendy pogłębiają daną sytuację (np. latem robi się cieplej), a zatem luki w zabezpieczeniach zidentyfikowane w analizie podatności będą się w przyszłości powiększać,
  - obojętny: nie oczekuje się żadnych zmian w trendach; dlatego też podatności zidentyfikowane w analizie podatności nie zwiększą się w przyszłości,
  - równoważenie: trendy równoważą odpowiednią sytuację (np. robi się cieplej w zimie), a zatem luki zidentyfikowane w analizie podatności będą się w przyszłości zmniejszać.

Na podstawie przeanalizowanych dokumentów i ich odniesienia do Polski nasuwają się następujące wnioski na temat prognozowanych zmian częstotliwości i wysokości opadów oraz związanych z nimi negatywnych zjawisk:

1. w wielu regionach świata, w tym w Polsce, prognozowane są zmiany w częstotliwości i intensywności opadów. W niektórych regionach spodziewa się zwiększenia liczby dni z opadami, a w innych zwiększenia intensywności opadów w krótszym czasie. Całkowita liczba dni z opadem wzrośnie nieznacznie. Do roku 2060 prognozowany jest wzrost rocznej sumy opadów średnio od 30 mm (RCP4.5) do 50 mm (RCP8.5). Wzrost rocznej sumy opadu wynika przede wszystkim ze zwiększenia się liczby dni z opadem ekstremalnym  $> 20$  mm/dobę. W scenariuszu RCP8.5 wzrost jest wyższy o około 1 dzień w porównaniu do RCP4.5,
2. wraz z prognozowanymi zmianami w opadach wiążą się negatywne zjawiska, takie jak susze, powodzie błyskawiczne czy osuwiska. W związku z tym ważne jest, aby wpływ zmian klimatu był uwzględniany już na etapie analizy ryzyka, a w dalszej kolejności przy wdrażaniu odpowiednich strategii zarządzania ryzykiem oraz konkretnych działań, takich jak inwestycje w infrastrukturę przeciwpowodziową, zwiększających retencję wód opadowych, rozwój kanalizacji deszczowej czy rozwój systemów ostrzegania przed nadzwyczajnymi zagrożeniami,
3. należy zauważyć, że prognozowanie opadów zawsze wiąże się z pewnym stopniem niepewności. Dlatego ważne jest, aby kontynuować badania nad tym, jak zmiany klimatu wpływają na opady w danym regionie, aby poprawić umiejętności prognozowania i przewidywania skutków tych zmian.

## 9.2. Wytyczne do opracowania scenariuszy

Najczęściej stosowanym podejściem do analiz wpływu zmian klimatu jest wykorzystanie modelowania numerycznego oraz dostępnych scenariuszy emisji gazów cieplarnianych. Istnieje wiele dostępnych źródeł informacji i scenariuszy klimatycznych, opracowanych przez różne ośrodki naukowe. Należy jednak pamiętać, że zarówno podejście bazujące na scenariuszach zmian klimatu, jak i lokalne wzory predykcyjne obarczone są dużą niepewnością. Projekcje klimatyczne nie są prognozami klimatu, stanowią jedynie pewne przybliżenie przyszłych warunków. Konieczne jest analizowanie wiązki potencjalnych projekcji uzyskanych z różnych modeli regionalnych, sterowanych różnymi warunkami brzegowymi generowanymi przez modele ogólnej cyrkulacji. Ze względu na dużą ilość dostępnych scenariuszy, istotnym problemem jest wybór scenariusza odpowiedniego dla danego regionu. Innym istotnym problemem w przypadku wykorzystania scenariuszy zmian klimatu opracowanych w skali globalnej lub regionalnej jest ich rozdzielczość (zazwyczaj 100-500 km). Na potrzeby szczegółowych analiz na poziomie zlewni czy miasta wymagana jest dużo wyższa rozdzielczość przestrzenna, co wiąże się z koniecznością stosowania różnego rodzaju technik przenoszenia informacji przestrzennej, obarczonych dużą niepewnością. Bardzo istotny jest również problem skali czasowej modeli klimatycznych, która na potrzeby analizy opadów ekstremalnych o krótkich czasach trwania w zlewniach miejskich nie jest wystarczająca. Z drugiej strony lokalne wzory predykcyjne, bazujące jedynie na analizie danych historycznych (metoda zaproponowana przez B. Kaźmierczaka), bardziej adekwatne dla zlewni miejskich pod względem skali czasowej i przestrzennej, nie uwzględniają scenariuszy emisji gazów cieplarnianych, powiązanych ze wzrostem liczby ludności, rozwojem technologicznym, ekonomicznym oraz wiodącymi politykami i zużyciem energii.

Niejako konkludując wiele dostępnych opracowań i publikacji naukowych, przewidywana jest nie tylko zmiana sum opadów, ale również zmiana ich struktury, w tym zwiększenie ilości krótkotrwałych, intensywnych opadów.

Ze względu na dużą niepewność powyższych metod, w praktyce inżynierskiej stosowane jest często podejście uproszczone, polegające na założeniu wartości wzrostu opadów, przykładowo w granicach między 10 a 20%.

Wyliczenie opadu, który został zastosowany do obliczeń dla scenariuszy ze zmianami klimatu dla miast pilotażowych zostało oparte właśnie o zwiększenie opadu miarodajnego o 20%. Obliczenia zostały wykonane na podstawie deszczy miarodajnych, a następnie zostały poddane rozkładowi (rozkład Eulera typu II). Wykorzystano opad o prawdopodobieństwie  $p = 1\%$  (1%CC) i  $p = 10\%$  (10%CC) oraz o czasie trwania  $t = 15$  min i  $t = 120$  min. Są to prawdopodobieństwa zgodne ze scenariuszami stosowanymi do przygotowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego (w Polsce i wielu innych krajach Europy). Zastosowanie spójnych prawdopodobieństw pozwala na analizę zidentyfikowanych obszarów zagrożonych wodami opadowymi i porównanie do zagrożenia powodziowego od rzek. Prawdopodobieństwo wystąpienia opadu 10% zostało wybrane także w oparciu o analizę normy PN-EN 752:2008:2017. Zgodnie z nią dla centrów miast obliczenia do wymiarowania kanałów deszczowych powinny być przeprowadzone dla częstości deszczu 1 raz na 5 lat ( $p=20\%$ ). Biorąc jednak pod uwagę przewidywany wzrost częstości występowania intensywnych opadów w przyszłości, do wymiarowania kanałów deszczowych zaleca się już obecnie przyjmowanie większych częstości deszczu obliczeniowego niż zalecane w obecnych standardach projektowych. Zaleca się zatem, aby dla centrów miast przeprowadzać obliczenia na częstość deszczu 1 raz na 10 lat ( $p = 10\%$ ). Średnie natężenie opadu oraz jego sumę dla scenariuszy ze zmianami klimatu przedstawiono w poniższej tabeli.

Tabela 11 Zestawienie wysokości opadów dla scenariuszy ze zmianami klimatu dla miast pilotażowych

Nazwa miasta	Prawdopodobieństwo 1% (1%CC)		Prawdopodobieństwo 10% (10%CC)	
	Średnie natężenie deszczu [dm <sup>3</sup> · (s · ha) <sup>-1</sup> ]	Suma opadu [mm]	Średnie natężenie deszczu [dm <sup>3</sup> · (s · ha) <sup>-1</sup> ]	Suma opadu [mm]
Nowy Sącz	391,07	35,20	270,53	24,35
	90,90	65,45	62,53	45,02
Puławy	373,07	33,58	250,40	22,54
	77,35	55,69	52,67	37,92

## 10. Sposób analizy i oceny zagrożenia od wód opadowych, oceny podatności oraz ryzyka

Wyznaczone obszary zagrożone wodami opadowymi stanowią podstawę dalszej kompleksowej oceny zagrożenia i ryzyka powodziowego, jak również stanowią element szerszej oceny podatności na zmiany klimatu. W zależności od doboru metodyki i podejścia, kolejność i elementy analiz są różne. Natomiast podstawową informacją, inicjującą cały proces jest zawsze obszar zagrożenia i dostępne dla takich obszarów podstawowe informacje o poziomie tego zagrożenia, jego zasięgu i głębokości, a w dalszej kolejności informacje o tym, jakie ryzyko generuje dany obszar.

### 10.1. Dokumenty planistyczne wynikające z wdrażania Dyrektywy Powodziowej

W podejściu znanym z dokumentów wynikających z wdrażania Dyrektywy Powodziowej kluczowym jest ocena ryzyka powodziowego i zarządzanie nim. Podstawą wszelkich analiz ryzyka są obszary zagrożenia powodziowego. Wyznaczone są dla określonych scenariuszy powodziowych i kilku typów powodzi, zawierające przede wszystkim informację o zasięgu obszarów, głębokości zalewu oraz prędkości i kierunku przepływu w obszarach dużych miast. Mapy ryzyka powodziowego, opracowane w dwóch zestawach tematycznych (odrębnie dla każdego ze scenariuszy powodziowych):

- potencjalne negatywne skutki dla życia i zdrowia ludzi oraz wartości potencjalnych strat powodziowych,
- potencjalne negatywne skutki dla środowiska, dziedzictwa kulturowego i działalności gospodarczej, stanowią komplet danych szczegółowych o tym, co znajduje się na obszarze zagrożenia powodziowego i podstawę do dalszych analiz.

Analizy ryzyka powodziowego przeprowadzono w ramach realizacji planów zarządzania ryzykiem powodziowym (PZRP). Na podstawie wyznaczonych obszarów zagrożenia powodziowego, elementów prezentowanych na mapach ryzyka powodziowego oraz innych danych (m.in. danych GUS, danych z projektu CHASE-PL), dokonana została szczegółowa analiza rozkładu ryzyka powodziowego. Jej celem była identyfikacja obszarów problemowych o największym ryzyku powodziowym, dla których wskazane zostały działania związane z osiągnięciem przypisanych celów zarządzania ryzykiem powodziowym. Przyjęta w ramach aktualizacji planów (aPZRP) metodyka analizy ryzyka powodziowego opierała się wprost na definicji ryzyka powodziowego określonej w Dyrektywie Powodziowej (art. 2 pkt 2) oraz ustawie — Prawo wodne (art. 16 pkt 48), według której „ryzyko powodziowe” oznacza kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i związanych z powodzią potencjalnych negatywnych konsekwencji dla życia i zdrowia ludzkiego, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej. Uwzględniono przy tym zarówno stan aktualny ryzyka powodziowego (w postaci oceny potencjalnych negatywnych skutków powodzi), jak i jego zmiany perspektywiczne (prognozy zmian warunków kształtujących poziom ryzyka powodziowego: zmiany klimatu i antropopresji), umożliwiające określenie tendencji zmian.

Ocena potencjalnych niekorzystnych skutków powodzi w ramach aPZRP opierała się na obliczeniu wskaźników oceny potencjalnych niekorzystnych skutków powodzi. Ocena przeprowadzona została dla specjalnie przygotowanych przestrzennych jednostek analitycznych.

Tabela 12 Wskaźniki oceny potencjalnych niekorzystnych skutków powodzi

Nr wskaźnika	Kategoria skutków powodzi	Wskaźnik oceny potencjalnych niekorzystnych skutków powodzi	Jednostka
1	zdrowie ludzi	Mieszkańcy	os./km <sup>2</sup>
2		Budynki – obiekty użyteczności społecznej: obiekty użyteczności społecznej (budynki), związane z przebywaniem: • dzieci i młodzieży (dom dziecka, dom studencki, internat, szkoła, przedszkole, żłobek), • osób o ograniczonych możliwościach poruszania się (szpital, hospicjum, dom opieki społecznej, ośrodek opieki społecznej, sanatorium), • osób o ograniczonych możliwościach decyzyjnych (zakład karny, areszt śledczy, dom wychowawczy, zakład poprawczy)	szt./km <sup>2</sup>
3	środowisko	Zakłady przemysłowe: obiekty stanowiące duże zagrożenie dla środowiska	dla sumy obiektów: szt./km <sup>2</sup>
4		Składowiska odpadów: obiekty stanowiące potencjalne zagrożenie dla środowiska	
5		Oczyszczalnie i przepompownie ścieków: obiekty stanowiące potencjalne zagrożenie dla środowiska	
6		Cmentarze: obiekty stanowiące potencjalne zagrożenie dla środowiska	
7		Ujęcia wody	szt./km <sup>2</sup>
8		Formy ochrony przyrody	%
9		dziedzictwo kulturowe	Obiekty i obszary cenne kulturowo
10	działalność gospodarcza	Wartość strat powodziowych (AAD)	zł/km <sup>2</sup>

źródło: Zaktualizowana metodyka aPZRP

W kolejnych krokach analizy, dla każdej jednostki analitycznej przypisano uzyskaną dzięki wskaźnikom punktację odzwierciedlającą poziom ryzyka powodziowego, określono ogólny poziom ryzyka powodziowego, a następnie przypisano sumaryczny poziom ryzyka w postaci poziomu zintegrowanego ryzyka powodziowego. Dodatkowo przeprowadzono ocenę zmian perspektywicznych ryzyka powodziowego, która opierała się na obliczeniu wybranych wskaźników oceny zmian ryzyka dla poszczególnych jednostek analitycznych (Tabela 13). Wskaźniki tzw. klimatyczne zostały obliczone na podstawie wyników projektu CHASE-PL.

Tabela 13 Wskaźniki oceny zmian perspektywicznych ryzyka powodziowego

Nr wskaźnika	Wskaźnik oceny zmian perspektywicznych ryzyka powodziowego	Jednostka
1	Zmiana liczby ludności	os.
2	Zmiana zagospodarowania przestrzennego w zakresie zmiany powierzchni terenów zabudowanych lub terenów uszczelnionych	%
3	Wpływ zmian klimatu na występowanie powodzi – zmiana procentowa przepływu wysokiego Q90 w latach 2021-2050 (tzw. bliska przyszłość) dla scenariusza RCP 4,5	%
4	Wpływ zmian klimatu na występowanie powodzi – zmiana procentowa przepływu wysokiego Q90 w latach 2021-2050 (tzw. Bliska przyszłość) dla scenariusza RCP 8,5	%

źródło: Zaktualizowana metodyka aPZRP

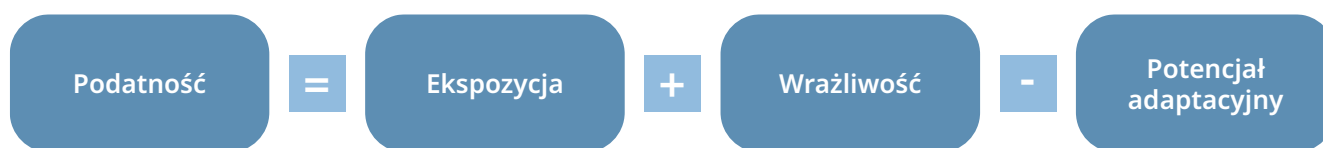


Szczegóły dotyczące raportu z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, dokumentacji projektu PZRP oraz metodyk przyjętych w tychże projektach dostępne są na stronie internetowej [www.powodz.gov.pl](http://www.powodz.gov.pl) oraz [www.stoppowodzi.pl](http://www.stoppowodzi.pl). Mapy i planowane w PZRP działania w wersji przestrzennej znajdują się na Hydroportalu PGW WP <https://wody.isok.gov.pl>.

## 10.2. Metodyka do opracowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu

W „Podręczniku adaptacji dla miast - wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu”, ocena ryzyka jest przeprowadzana po dokonaniu oceny podatności. Zgodnie z podręcznikiem podatność stanowi wypadkową ekspozycji/narażenia na czynnik klimatyczny, wrażliwości miasta na ten czynnik oraz zdolności adaptacyjnych miasta (Rysunek 68).

Rysunek 68 Zależność podatności od ekspozycji, wrażliwości i potencjału adaptacyjnego



źródło: opracowanie własne

Analiza ekspozycji opiera się na rozpoznaniu trendów poszczególnych czynników klimatycznych. Trend definiowany jest jako kierunek zmiany w określonym czasie, nie precyzuje on żadnych informacji ilościowych oraz nie określa prawdopodobieństwa zmiany. Ocena wrażliwości to opis sytuacji warunkowanej przez wiele czynników lub elementów dotyczących sektorów i obszarów funkcjonalnych miasta. Potencjał adaptacyjny jest oceną możliwości finansowych, technicznych i społecznych w zakresie adaptacji do określonych skutków zmian klimatu jaką charakteryzuje się dany region.

Analiza ryzyka opiera się na zestawieniu prawdopodobieństwa wystąpienia danego zjawiska z jego konsekwencjami (wielkością zjawiska), czyli znanych lub przewidywanych (np.: ekonomicznych, społecznych, kulturalnych, itp.) konsekwencji wystąpienia danego zjawiska. Schematyczną wizualizację zestawienia tych dwóch parametrów przedstawia [Tabela 14](#):

Tabela 14 Przykładowa macierz wyznaczenia priorytetowego obszaru najbardziej narażonego na wystąpienie danego zjawiska

Powodowane konsekwencje	Prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska				
	Mało prawdopodobne	Pojawiające się okazjonalnie	Pojawiające się częściej niż raz w ciągu 20 lat	Pojawiające się częściej niż raz w ciągu 10 lat	Pewne wystąpienie zjawiska
Katastrofalne	Średni priorytet	Średni priorytet	Wysoki priorytet	Wysoki priorytet	Bardzo wysoki priorytet
Wysokie	Niski priorytet	Średni priorytet	Średni priorytet	Wysoki priorytet	Bardzo wysoki priorytet
Średnie	Niski priorytet	Niski priorytet	Średni priorytet	Wysoki priorytet	Wysoki priorytet
Niskie	Niski priorytet	Niski priorytet	Średni priorytet	Średni priorytet	Wysoki priorytet
Nieistotne	Niski priorytet	Niski priorytet	Niski priorytet	Średni priorytet	Średni priorytet

źródło: Podręcznik adaptacji dla miast wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu

W oparciu o wyniki oceny ryzyka, miasta opracowują swoje plany adaptacji, których celem jest zminimalizowanie negatywnych skutków, wynikających z zagrożeń klimatycznych. Plan adaptacji powinien obejmować m.in. działania prewencyjne, jak budowa zbiorników retencyjnych czy modernizacja systemów wodno-kanalizacyjnych, a także strategie reagowania w sytuacji kryzysowych, jak na przykład szybka akcja ratunkowa w przypadku powodzi czy burzy. Ponadto uwzględnia się również warunki geomorfologiczne na danym obszarze oraz występowanie w przeszłości zjawisk ekstremalnych oraz katastrof wraz z nadaniem im wagi na podstawie częstości wystąpienia zjawiska, jego częstotliwość oraz zasięgu. Zebrane dane realnie wpływają na końcową ocenę nadania priorytetu danemu obszarowi.

Podsumowując, ocena składowych podatności może mieć zatem charakter jakościowy (określenie poziomu jako bardzo wysoki, wysoki, średni, niski i bardzo niski) lub ilościowy (przydzielenie punktacji w przyjętej skali stopniowej lub procentowej).

Szczegółowa, ilościowa ocena składowych podatności może być przeprowadzana z wykorzystaniem łatwo dostępnych danych, w tym danych GIS i danych statystycznych. Istotny jest przy tym wybór odpowiednich wskaźników, sposób ich normalizacji i klasyfikacji. Metoda wskaźnikowa jest powszechnie stosowana na całym świecie. Poszczególne państwa przyjmują różne wskaźniki, głównie w zależności od dostępności danych oraz uwarunkowań lokalnych, jednak wyraźnie widoczne jest dążenie do unifikacji podejścia do oceny ryzyka w skali krajowej.

Kwestie zagrożeń powodziowych i problemów związanych z infrastrukturą wod-kan są jednymi z ważniejszych w wielu opracowanych dotychczas planach adaptacji, dlatego rzetelna ocena tego zagrożenia i wyznaczenie obszarów zagrożonych wodami opadowymi jest tym bardziej cenna, gdyż dopiero taka analiza umożliwia efektywne zaplanowanie działań i ocenę ich skuteczności.

### 10.3. Proponowane podejście do oceny podatności

Zgodnie z definicją Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu IPCC, podatność jest to zakres, w jakim dany system reaguje na niekorzystne oddziaływanie zmian klimatu, w tym na zmienność i ekstremalne warunki klimatyczne. Diagnoza podatności i ryzyka stanowi podstawę opracowania i wyboru opcji adaptacji do zmian klimatu w miastach. Podatność może być kontrolowana w wyniku działalności człowieka, a dzięki jej zmniejszeniu możliwe jest minimalizowanie potencjalnych strat w następstwie zjawisk ekstremalnych i katastrof naturalnych, w tym opadów nawałnych w miastach.

Zgodnie z opracowanym przez Ministerstwo Środowiska „Podręcznikiem adaptacji dla miast - wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu”, podatność stanowi wypadkową ekspozycji/narażenia na czynnik klimatyczny, wrażliwości miasta na ten czynnik oraz zdolności adaptacyjnych miasta.

#### 10.3.1. Analiza ekspozycji

W odniesieniu do powodzi opadowych miejskich analiza ekspozycji powinna opierać się na rozpoznaniu trendów opadów historycznych. Analiza powinna być przeprowadzona na podstawie danych pomiarowo-obszernych Państwowej Sieci Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW PIB (sumy dobowe opadów), dla stacji opadowych zlokalizowanych na obszarze danego miasta i w jego bezpośrednim sąsiedztwie, dla wielolecia obejmującego co najmniej ostatnie 30 lat. Proponowane wskaźniki w postaci wartości średnich dla obszaru miasta to:

- roczna suma opadu,
- maksymalna dobową sumą opadu dla półrocza letniego,
- maksymalna dobową sumą opadu dla półrocza zimowego,
- liczba dni w roku z opadem  $\geq 10$  mm,
- liczba dni w roku z opadem  $\geq 50$  mm.

Proponuje się klasyfikację ekspozycji w 5 klasach, wraz z odpowiadającą im punktacją, obliczaną jako średnia arytmetyczna ocen wszystkich zaproponowanych wskaźników składowych:

- bardzo wysoka ekspozycja – punktacja  $>4$ ,
- wysoka ekspozycja – punktacja 3-4,
- średnia ekspozycja – punktacja 2-3,
- umiarkowana ekspozycja – punktacja 1-2,
- niska ekspozycja – punktacja  $\leq 1$ .

Dla poszczególnych wskaźników składowych proponuje się przedziały oceny przyjęte na podstawie ogólnodostępnych norm klimatycznych opracowanych przez IMGW PIB (źródło danych: <https://klimat.imgw.pl/pl/climate-normals>). Normy klimatyczne stanowią podstawowe źródło informacji o warunkach klimatycznych analizowanego obszaru. Mogą to być wartości średnie wybranych parametrów, średnia liczba dni wystąpienia określonych wartości zmiennych, jak również ich wartości ekstremalne. Określone są dla kolejnych okresów 30-letnich i aktualnie obejmują wielolecie 1991-2020. Normy klimatyczne dla Polski wyznaczone zostały dla blisko 60 stacji synoptycznych rozmieszczonych na obszarze całego kraju. Statystyki obliczone zostały z zastosowaniem wytycznych z dokumentu technicznego WMO dotyczącego obliczania norm (WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals, WMO-1203).

Proponuje się klasyfikację wskaźników składowych ekspozycji metodą percentyli dla przyjętych przedziałów <20, 20-40, 40-60, 60-80, >80, na podstawie wartości wybranych wskaźników klimatologicznych dla wielolecia 1991-2020:

1. Roczna suma opadu:
  - punktacja 5 – powyżej 713 mm,
  - punktacja 4 – od 612 do 713 mm,
  - punktacja 3 – od 585 do 612 mm,
  - punktacja 2 – od 551 do 585 mm,
  - punktacja 1 – poniżej 551 mm.
2. Maksymalna dobową sumą opadu dla półrocza letniego:
  - punktacja 5 – powyżej 103 mm,
  - punktacja 4 – od 88 do 103 mm,
  - punktacja 3 – od 79 do 88 mm,
  - punktacja 2 – od 70 do 79 mm,
  - punktacja 1 – poniżej 70 mm.
3. Maksymalna dobową sumą opadu dla półrocza zimowego:
  - punktacja 5 – powyżej 42 mm,
  - punktacja 4 – od 36 do 42 mm,
  - punktacja 3 – od 31 do 36 mm,
  - punktacja 2 – od 27 do 31 mm,
  - punktacja 1 – poniżej 27 mm.
4. Liczba dni w roku z opadem  $\geq 10$  mm:
  - punktacja 5 – powyżej 17,89,
  - punktacja 4 – od 15,23 do 17,89,
  - punktacja 3 – od 13,77 do 15,23,
  - punktacja 2 – od 12,59 do 13,77,
  - punktacja 1 – poniżej 12,59.
5. Liczba dni w roku z opadem  $\geq 50$  mm:
  - punktacja 5 – powyżej 0,34,
  - punktacja 4 – od 0,23 do 0,34,
  - punktacja 3 – od 0,17 do 0,23,
  - punktacja 2 – od 0,13 do 0,17,
  - punktacja 1 – poniżej 0,13.

W przypadku zmiany opracowanych przez IMGW PIB norm klimatycznych, podane granice klas powinny być aktualizowane.

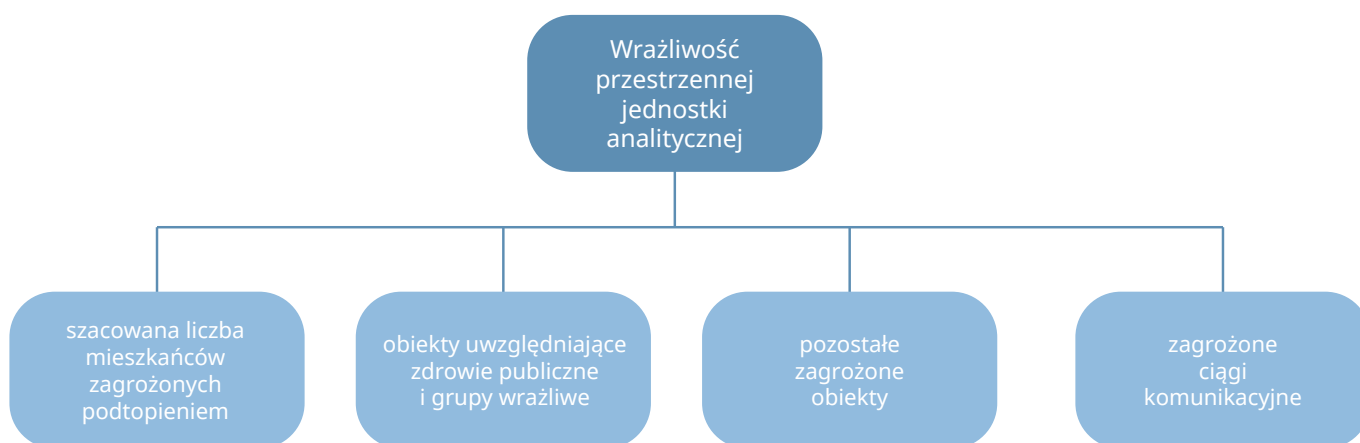
### 10.3.2. Analiza wrażliwości

Wrażliwość określa stopień, w jakim miasto podlega wpływowi zjawisk klimatycznych. Jest ona zróżnicowana w zależności od rodzaju sektorów (m.in. zdrowie publiczne/grupy wrażliwe, transport, energetyka, gospodarka wodna, infrastruktura, budownictwo, przemysł, turystyka), ich charakteru i stanu oraz obszarów funkcjonalnych miasta, które ze względu na cechy własne wykazują różny poziom reagowania na zjawiska klimatyczne i ich pochodne.

Ocena wrażliwości może mieć charakter jakościowy (określenie poziomu wrażliwości jako bardzo wysoki, wysoki, średni, niski i bardzo niski) lub ilościowy (przydzielenie punktacji w przyjętej skali stopniowej lub procentowej). Sposób oceny wrażliwości uzależniony jest od dostępności danych, możliwości finansowych, dostępności czasu oraz specjalistów.

Analiza planów adaptacji miast do zmian klimatu, przygotowanych w ramach projektu „Opracowanie planów adaptacji do zmian klimatu w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców” dla 44 polskich miast wskazuje, że podstawowymi sektorami wskazywanymi jako najbardziej wrażliwe na zagrożenia opadowe są sektory zdrowie publiczne oraz grupy wrażliwe. Z tego względu w ramach niniejszego Poradnika wrażliwość miast proponuje się oceniać przy pomocy czterech wskaźników składowych:

1. Szacunkowa liczba mieszkańców zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem – sektor zdrowie publiczne,
2. Ilość obiektów o szczególnym znaczeniu społecznym zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem – sektor grupy wrażliwe,
3. Ilość pozostałych obiektów zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem - sektory energetyka, gospodarka wodna, infrastruktura, turystyka, przemysł i inne,
4. Ilość ciągów komunikacyjnych zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem, z uwzględnieniem głębokości zalania oraz klasy obiektu – sektor transport.



źródło: opracowanie własne

Wrażliwość powinna być wyznaczana dla poszczególnych przestrzennych jednostek analitycznych (PJA), jako średnia arytmetyczna proponowanych wskaźników składowych. Poziomą wagę dla całego miasta powinien być określany na podstawie analizy wrażliwości dla poszczególnych PJA jako średnia ważona:

$$\text{Wrażliwość} = A \cdot \text{WPJA}_5 + B \cdot \text{WPJA}_4 + C \cdot \text{WPJA}_3 + D \cdot \text{WPJA}_2 + E \cdot \text{WPJA}_1$$

gdzie:

A, B, C, D, E – waga przyjęta jako stosunek ilości PJA w danej klasie wrażliwości do sumarycznej ilości PJA na obszarze miasta,

$\text{WPJA}_i$  – punktacja dla danej klasy wrażliwości.

Dla poszczególnych wskaźników składowych dla PJA proponuje się klasyfikację:

- Bardzo wysoka wrażliwość – punktacja 5,
- Wysoka wrażliwość – punktacja 4,
- Średnia wrażliwość – punktacja 3,
- Niska wrażliwość – punktacja 2,
- Bardzo niska wrażliwość – punktacja 1,

natomiast dla wynikowej oceny wrażliwości dla danego PJA oraz dla całego miasta:

- Bardzo wysoka wrażliwość – punktacja > 4,
- Wysoka wrażliwość – punktacja 3-4,
- Średnia wrażliwość – punktacja 2-3,
- Niska wrażliwość – punktacja 1-2,
- Bardzo niska wrażliwość – punktacja ≤1.

### Przestrzenne jednostki analityczne (PJA)

Analiza elementów ryzyka w odniesieniu do przestrzennych jednostek analitycznych pozwala na wskazanie obszarów problemowych, dla których priorytetowe jest podjęcie odpowiednich działań, mających na celu redukcję ryzyka. Jednostki analityczne stosowane na potrzeby oceny ryzyka dla powodzi rzecznych, stanowiące wynik przecięcia obszarów zagrożenia powodziowego dla prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi 1% i zlewni elementarnych (MPHP10k), nie są właściwe dla powodzi opadowych miejskich.

W ramach niniejszego Poradnika proponuje się przyjęcie PJA jako części miasta, określonych na podstawie BDOT10k, klasa obiektów ADMS (miejscowość), obiekt ADMS02 (część miasta).

W zależności od wielkości miasta objętego analizą, dopuszczalna jest również możliwość przyjęcia PJA jako warstwy z Państwowego Rejestru Granic (PRG) w podziale na obręby ewidencyjne, szczególnie dla miast o mniejszej liczbie mieszkańców (poniżej 50000 mieszkańców).

### Szacunkowa liczba mieszkańców

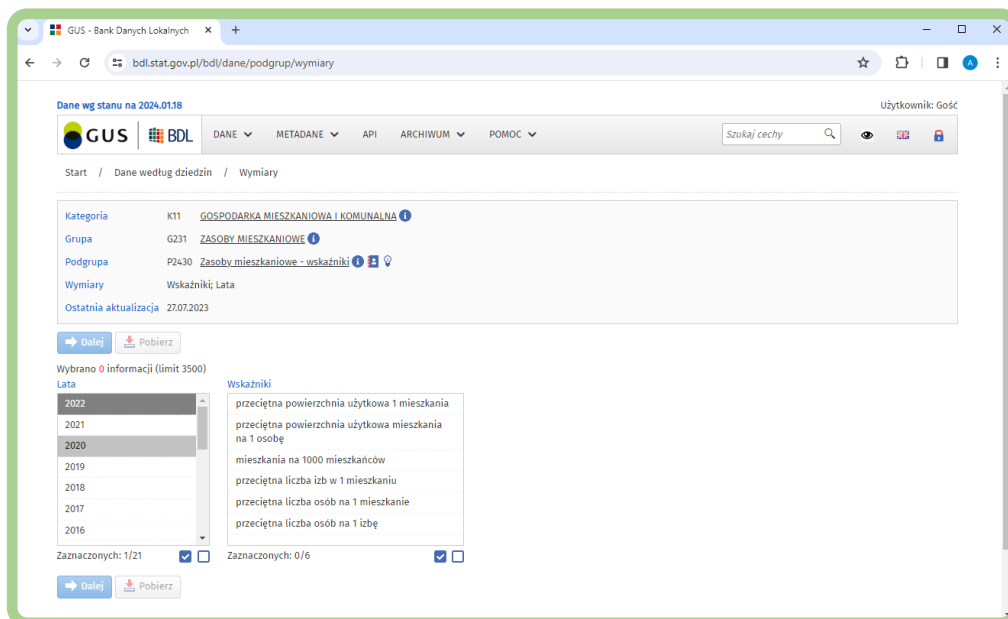
Szacunkową liczbę mieszkańców, którzy mogą być dotknięci powodzią, zgodnie z opracowaną dla powodzi rzecznych Metodą opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym, szacuje się na podstawie danych statystycznych GUS, t.j. przeciętnej liczby osób przypadających na mieszkanie w gminie oraz systemu identyfikacji adresowej ulic, nieruchomości, budynków i mieszkań NOBC. Dane tabelaryczne NOBC o liczbie mieszkań znajdujących się pod danym adresem łączy się z punktami adresowymi pozyskanymi z usługi słownikowej GUGiK, a następnie z obiektami budynków mieszkalnych BDOT10k. Szczegółowy opis powyższej metody określania szacunkowej liczby zagrożonych mieszkańców zawarty jest w dokumencie „Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym”, stanowiącym Załącznik nr 1 do Raportu z wykonania przeglądu i aktualizacji

map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego (udostępniony na stronie <https://www.powodz.gov.pl/pl/mapy>).

W przypadku budynków mieszkalnych, które na podstawie powyższej metody nie otrzymają liczby zamieszkałych osób, szacowania dokonuje się z wykorzystaniem metody alternatywnej, w której liczbę mieszkań w budynku oblicza się na podstawie jego powierzchni i liczby kondygnacji z wykorzystaniem danych GUS na poziomie gmin (Bank Danych Lokalnych, kategoria: Gospodarka mieszkaniowa i komunalna, grupa: Zasoby mieszkaniowe, podgrupa: Zasoby mieszkaniowe – wskaźniki):

- przeciętna powierzchnia użytkowa 1 mieszkania,
- przeciętna liczba osób na 1 mieszkanie.

Rysunek 69 Baza danych lokalnych



źródło: Główny Urząd Statystyczny

Podstawą wyznaczenia szacunkowej liczby zagrożonych mieszkańców jest wyselekcjonowanie odpowiedniej grupy budynków pełniących określoną funkcję szczegółową zawartą w tabeli atrybutów warstwy BUBD z BDOT10k. Budynki, dla których w ramach Poradnika proponuje się szacowanie liczby zagrożonych mieszkańców, z uwzględnieniem funkcji szczegółowej danego budynku, przedstawiono w tabeli poniżej.

Tabela 15 Obiekty klasy BUBD, dla których wyznacza się szacunkową liczbę mieszkańców

Lp.	Funkcja	Opis funkcji
1	1122.Dw	budynek wielorodzinny
2	1121.Db	budynek o dwóch mieszkaniach
3	1110.Dj	budynek jednorodzinny
4	1130.Dd	dom dziecka
5	1130.In	internat
6	1130.Bs	bursa szkolna
7	1130.Ds	dom studencki
8	1130.Hr	hotel robotniczy
9	1130.Db	dom dla bezdomnych
10	1130.Kl	klasztor
11	1130.Dp	dom parafialny

źródło: Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym

Szacunkową liczbę mieszkańców dla poszczególnych rodzajów budynków (w podziale na funkcje szczegółowe), proponuje się przypisywać na podstawie aktualnych danych GUS:

- dla budynków jednorodzinnych = 1 gospodarstwo domowe · przeciętna liczba osób na 1 mieszkanie w gminie,
- dla budynków o dwóch mieszkaniach = 2 gospodarstwa domowe · przeciętna liczba osób na 1 mieszkanie w gminie,
- dla budynków wielorodzinnych oraz wszystkich pozostałych budynków z [Tabeli 15](#) na podstawie wzoru:

$$\text{szacunkowa liczba mieszkanców} = \frac{(\text{Pow}_\text{bud} \cdot K)}{\text{Sr}_\text{pow}_\text{uzytk}} \cdot L_\text{os}$$

gdzie:

**Pow\_bud** – powierzchnia budynku [m<sup>2</sup>]

**K** – liczba kondygnacji

**Sr\_pow\_uzytk** – przeciętna powierzchnia użytkowa jednego mieszkania w m<sup>2</sup>

**L\_os** – przeciętna liczba osób na 1 mieszkanie w gminie

W przypadku, gdy budynek ma w tabeli atrybutów BDOT10k więcej niż jedną funkcję szczegółową proponuje się pomniejszenie liczby kondygnacji o 1 (z zachowaniem minimalnej liczby kondygnacji równej 1). W przypadku budynków mieszkalnych innych niż budynek wielorodzinny, proponuje się zmniejszenie całkowitej powierzchni budynku o 30%.

Uzyskany wynik, po zaokrągleniu do najbliższej liczby całkowitej, daje szacunkową liczbę mieszkańców w danym budynku.

Po wyznaczeniu dla każdego PJA łącznej szacunkowej liczby mieszkańców zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem w przeliczeniu na jednostkę powierzchni PJA w km<sup>2</sup>, proponuje się klasyfikację powyższego wskaźnika składowego wrażliwości dla zaproponowanych 5 klas metodą naturalnych przerw.

### Obiekty o szczególnym znaczeniu społecznym

Obiekty o szczególnym znaczeniu społecznym reprezentujące sektor grupy wrażliwe, proponuje się wyznaczać zgodnie z Metodą opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym, z uwzględnieniem funkcji szczegółowej klasy obiektów BUBD BDOT10k.

Tabela 16 Obiekty o szczególnym znaczeniu społecznym, z uwzględnieniem funkcji szczegółowej budynku na podstawie BDOT

Lp.	Funkcja	Opis funkcji
1	1130.Po	placówka opiekuńczo-wychowawcza
2	1264.Sz	szpital
3	1264.Hs	hospicjum
4	1130.Os	dom opieki społecznej
5	1264.St	sanatorium
6	1263.Sp	szkoła podstawowa
7	1263.Sd	szkoła ponadpodstawowa
8	1263.Sw	szkoła wyższa
9	1263.Ps	przedszkole
10	1264.Zb	żłobek
11	1274.As	areszt śledczy
12	1130.Zk	zakład karny

Lp.	Funkcja	Opis funkcji
13	1130.Zp	zakład poprawczy
14	1274.Zp	zakład karny lub poprawczy
15	1211.Ht	hotel
16	1211.Mt	motel
17	1211.Zj	zajazd
18	1211.Pj	pensjonat
19	1212.Dw	dom wypoczynkowy
20	1230.Ch	centrum handlowe
21	1230.Ht	hala targowa
22	1230.Hm	hipermarket lub supermarket
23	1220.Pc	policja
24	1220.Sp	straż pożarna
25	1220.Sg	straż graniczna

źródło: Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego w II cyklu planistycznym

Po wyznaczeniu dla każdego PJA sumarycznej liczby budynków o szczególnym znaczeniu społecznym zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem w przeliczeniu na jednostkę powierzchni PJA w km<sup>2</sup>, należy dokonać klasyfikacji powyższego wskaźnika składowego dla poszczególnych PJA metodą naturalnych przerw, w proponowanych 5 klasach wrażliwości. W przypadku mniejszych miast i małej ilości zagrożonych obiektów o szczególnym znaczeniu społecznym, proponuje się przyjmowanie klasyfikacji na podstawie oceny eksperckiej, przykładowo:

- bardzo wysoka wrażliwość (punktacja 5) – liczba zagrożonych obiektów >3 /km<sup>2</sup>,
- wysoka wrażliwość (punktacja 4) – liczba zagrożonych obiektów 3/km<sup>2</sup>,
- średnia wrażliwość (punktacja 3) – liczba zagrożonych obiektów 2/km<sup>2</sup>,
- niska wrażliwość (punktacja 2) – liczba zagrożonych obiektów 1 km<sup>2</sup>,
- bardzo niska wrażliwość (punktacja 1) – brak zagrożonych obiektów.

### Pozostałe zagrożone obiekty

Pozostałe budynki z klasy obiektów BUBD bazy danych obiektów topograficznych BDOT10k zaklasyfikowano jako reprezentujące sektory takie jak energetyka, gospodarka wodna, infrastruktura, turystyka, przemysł i inne. Po wyznaczeniu dla każdego PJA sumarycznej liczby pozostałych budynków zagrożonych podtopieniem bądź zalaniem w przeliczeniu na jednostkę powierzchni PJA w km<sup>2</sup>, należy dokonać klasyfikacji powyższego wskaźnika składowego dla poszczególnych PJA metodą naturalnych przerw lub na podstawie oceny eksperckiej, w proponowanych 5 klasach wrażliwości.

### Ciągi komunikacyjne

Ostatni wskaźnik składowy oceny wrażliwości odnosi się do ograniczenia przepustowości dróg (sektor transport). Podstawę wyznaczenia wskaźnika stanowi klasa obiektów SKJZ (jezdnie) bazy danych obiektów topograficznych. Proponuje się analizę w podziale na 6 grup, w zależności klasy drogi (atrybut oraz głębokości zalania):

- grupa 1 – autostrady, drogi ekspresowe, drogi główne ruchu przyspieszonego, głębokość zalania  $\geq 1$  m,
- grupa 2 – autostrady, drogi ekspresowe, drogi główne ruchu przyspieszonego, głębokość zalania  $< 1$  m,
- grupa 3 – drogi główne i zbiorcze, głębokość zalania  $\geq 1$  m,



- grupa 4 – drogi główne i zbiorcze, głębokość zalania < 1 m,
- grupa 5 – drogi lokalne, dojazdowe i inne, głębokość zalania ≥ 1 m,
- grupa 6 – drogi lokalne, dojazdowe i inne, głębokość zalania < 1 m.

Po wyznaczeniu dla poszczególnych PJA sumarycznej długości zagrożonych odcinków w danej grupie w stosunku do sumarycznej długości wszystkich dróg dla PJA, dla każdej grupy należy dokonać klasyfikacji metodą naturalnych przerw lub - w przypadku mniejszych miast i małej ilości zagrożonych ciągów komunikacyjnych - metodą ekspercką (w podziale na proponowane 5 klas wrażliwości). Następnie dla każdego PJA należy obliczyć wypadkowy wskaźnik zagrożonych ciągów komunikacyjnych jako średnią ważoną punktacji wyznaczonej dla poszczególnych grup dróg:

$$\text{Wskaźnik\_sr} = 0,3 \cdot \text{grupa1} + 0,2 \cdot \text{grupa2} + 0,2 \cdot \text{grupa3} + 0,1 \cdot \text{grupa4} + 0,1 \cdot \text{grupa5} + 0,1 \cdot \text{grupa6}$$

### 10.3.3. Analiza potencjału adaptacyjnego

Na potencjał adaptacyjny miasta składają się zasoby finansowe, infrastrukturalne, ludzkie i organizacyjne, które miasto może wykorzystać w dostosowaniu się do zmian klimatu. Analizy potencjału adaptacyjnego przeprowadza się z uwzględnieniem następujących charakterystyk:

- potencjał finansowy,
- kapitał społeczny,
- przygotowanie służb miejskich,
- mechanizmy informowania i ostrzegania o zagrożeniach,
- sieci infrastrukturalne społeczne i ochrony zdrowia,
- współpraca z sąsiednimi gminami w zakresie zarządzania kryzysowego oraz istniejącego zaplecza innowacyjnego.

W ramach Poradnika proponuje się wskaźniki ilościowej oceny potencjału adaptacyjnego miast oparte na danych ogólnodostępnych, m.in. danych Głównego Urzędu Statystycznego, informacjach przestrzennych z Bazy danych obiektów topograficznych BDOT10k, czy też danych dostępnych na stronach internetowych urzędów miast i gmin.

Proponowane składowe wskaźniki oceny potencjału adaptacyjnego obejmują:

1. **potencjał finansowy** – wskaźnik określony na podstawie danych GUS dotyczących finansów publicznych gmin (Baza Danych Lokalnych, Kategoria Finanse publiczne, Grupa: Dochody budżetów gmin i miast na prawach powiatu, Podgrupa: Dochody ogółem (na które składają się 1) dochody własne, 2) dotacje, 3) subwencja ogólna, 4) środki na dofinansowanie działań); Grupa Wydatki budżetów gmin i miast na prawach powiatu, Podgrupa: Wydatki z budżetu ogółem); wskaźnik wyznaczony jako stosunek wydatków z budżetu ogółem do dochodów ogółem średni z ostatnich 5 lat (przedziały klas dla poszczególnych wartości punktacji wyznaczono metodą percentyli na podstawie danych GUS z lat 2018-2022 r.):

- Punktacja 5 – ≤0,96,
- Punktacja 4 – 0,96-0,98,
- Punktacja 3 – 0,98-0,99,
- Punktacja 2 – 0,99-1,01,
- Punktacja 1 – >1,01.

2. **kapitał społeczny** – wskaźnik określony na podstawie wykazów organizacji pozarządowych:

- Punktacja 0 – w mieście brak pozarządowych organizacji pomocy społecznej,
- Punktacja 1 – w mieście działa co najmniej jedna pozarządowa organizacja pomocy społecznej,

3. **przygotowanie służb miejskich** – wskaźnik określony na podstawie danych BDOT10k dot. lokalizacji jednostek odpowiedzialnych za zarządzanie w sytuacjach nadzwyczajnych zagrożeń oraz jednostek rządowych realizujących swoje zadania na obszarze miasta (warstwa BUBD\_A, funkcja szczegółowa „policja” i „straż pożarna”), wyznaczony jako sumaryczna ilość budynków policji i straży pożarnej na 1000 mieszkańców:
- Punktacja 5 –  $\geq 1,33$ ,
  - Punktacja 4 – 0,9-1,33,
  - Punktacja 3 – 0,58-0,9,
  - Punktacja 2 – 0,31-0,58,
  - Punktacja 1 –  $< 0,31$ .
4. **mechanizmy informowania i ostrzegania o zagrożeniach** – wskaźnik określony na podstawie identyfikacji podmiotów odpowiedzialnych za informowanie i ostrzeganie przed nadzwyczajnymi zagrożeniami, planów zarządzania kryzysowego, procedur w zakresie koordynacji wszystkich działań związanych z wystąpieniem zagrożeń oraz ostrzegania i alarmowania ludności na terenie miasta:
- Punktacja 0 – nie zidentyfikowano powyższych elementów,
  - Punktacja 1 – zidentyfikowano powyższe elementy,
5. **sieci infrastrukturalne społeczne i ochrony zdrowia** – wskaźnik określony na podstawie danych BDOT10k dot. lokalizacji szpitali i zakładów opieki medycznej, placówek oświaty i wychowania, placówek pomocy społecznej (warstwa KUOZ – kompleks ochrony zdrowia i opieki społecznej – zakład opieki socjalnej lub dom dziecka, zespół szpitalny lub sanatoryjny) oraz danych GUS o liczbie ludności (2022 r.), wyznaczony jako sumaryczna ilość obiektów społecznych oraz obiektów ochrony zdrowia dla poszczególnych gmin i miast na prawach powiatu na 1000 mieszkańców:
- punktacja 5 –  $\geq 0,25$ ,
  - punktacja 4 – 0,16-0,25,
  - punktacja 3 – 0,11-0,16,
  - punktacja 2 – 0,07-0,11,
  - punktacja 1 –  $< 0,07$ .
6. **Współpraca z sąsiednimi gminami w zakresie zarządzania kryzysowego oraz istniejącego zaplecza innowacyjnego:**
- punktacja 0 – nie zidentyfikowano powyższych elementów,
  - punktacja 1 – zidentyfikowano powyższe elementy.

Podobnie, jak dla ekspozycji i wrażliwości, proponuje się przyjęcie 5 klas potencjału adaptacyjnego miasta, na podstawie punktacji wyznaczonej jako średnia arytmetyczna oceny poszczególnych analizowanych wskaźników:

- bardzo wysoki potencjał adaptacyjny – punktacja  $\geq 4$ ,
- wysoki potencjał adaptacyjny – punktacja 3-4,
- średni potencjał adaptacyjny – punktacja 2-3,
- niski potencjał adaptacyjny – punktacja 1-2,
- bardzo niski potencjał adaptacyjny – punktacja  $\leq 1$ .

### 10.3.4. Analiza podatności

Po określeniu ekspozycji, wrażliwości oraz potencjału adaptacyjnego, można ocenić podatność miasta na zmiany klimatyczne na podstawie wzoru:

$$\text{Podatność} = 0,4 \cdot \text{Ekspozycja} + 0,6 \cdot \text{Wrażliwość} - \text{Potencjał adaptacyjny}$$

Przykładowo wysoka ekspozycja i wrażliwość komponentu miasta na czynnik klimatyczny przy jednocześnie wysokim potencjale adaptacyjnym będą oznaczały średnią podatność, natomiast wysoka ekspozycja i wrażliwość przy średnim lub niskim potencjale adaptacyjnym - wysoką podatność.

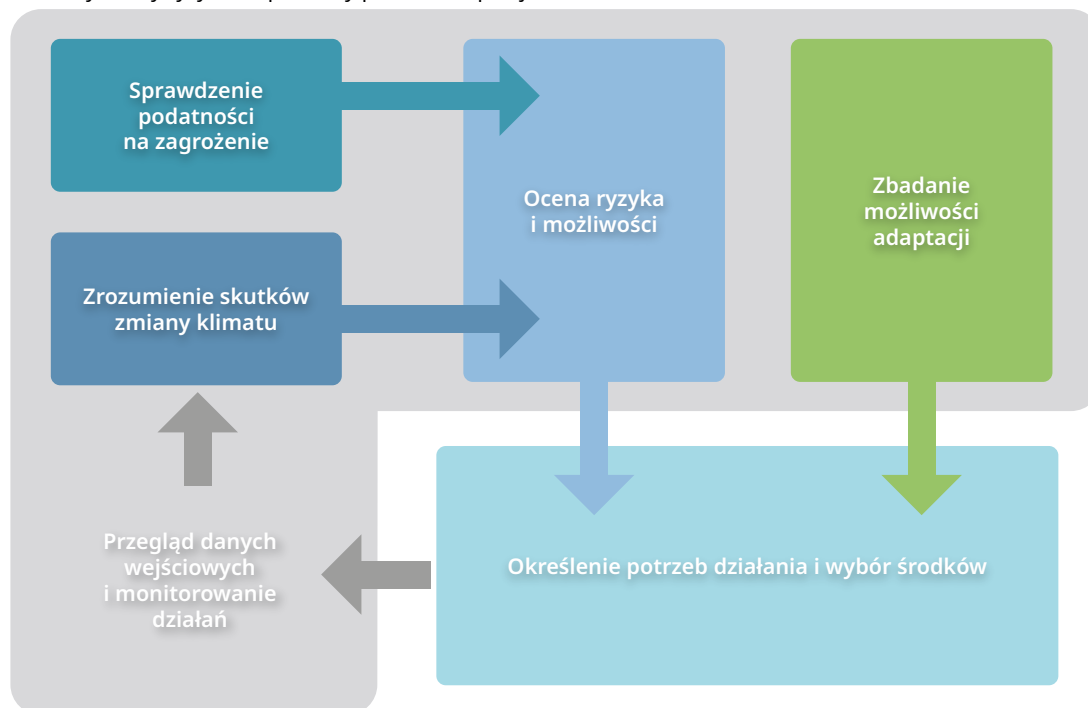
W ramach Poradnika proponuje się ocenę podatności w 5 klasach:

- bardzo wysoka podatność – punktacja >4,
- wysoka podatność – punktacja 3-4,
- średnia podatność – punktacja 2-3,
- niska podatność – punktacja 1-2,
- brak podatności – punktacja ≤1.

### 10.3.5. Ocena ryzyka

Zgodnie z „Podręcznikiem adaptacji dla miast - wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu”, ryzyka związane ze zmianami klimatu są iloczynem wielkości wpływu (konsekwencji) zjawiska i prawdopodobieństwa jego wystąpienia. Konsekwencje odnoszą się do znanych lub przewidywanych konsekwencji wystąpienia danego zjawiska (ekonomicznych, środowiskowych, społecznych, kulturalnych, prawnych). Określenie prawdopodobieństwa wystąpienia danego zjawiska ma na celu ocenę możliwości jego potencjalnego występowania w przyszłości. Konsekwencje zjawiska ujęte zostały w analizie podatności miasta, natomiast prawdopodobieństwo wystąpienia powinno być analizowane z uwzględnieniem projekcji zmian klimatu.

Rysunek 70 Elementy oceny ryzyka na potrzeby planów adaptacji do zmian klimatu

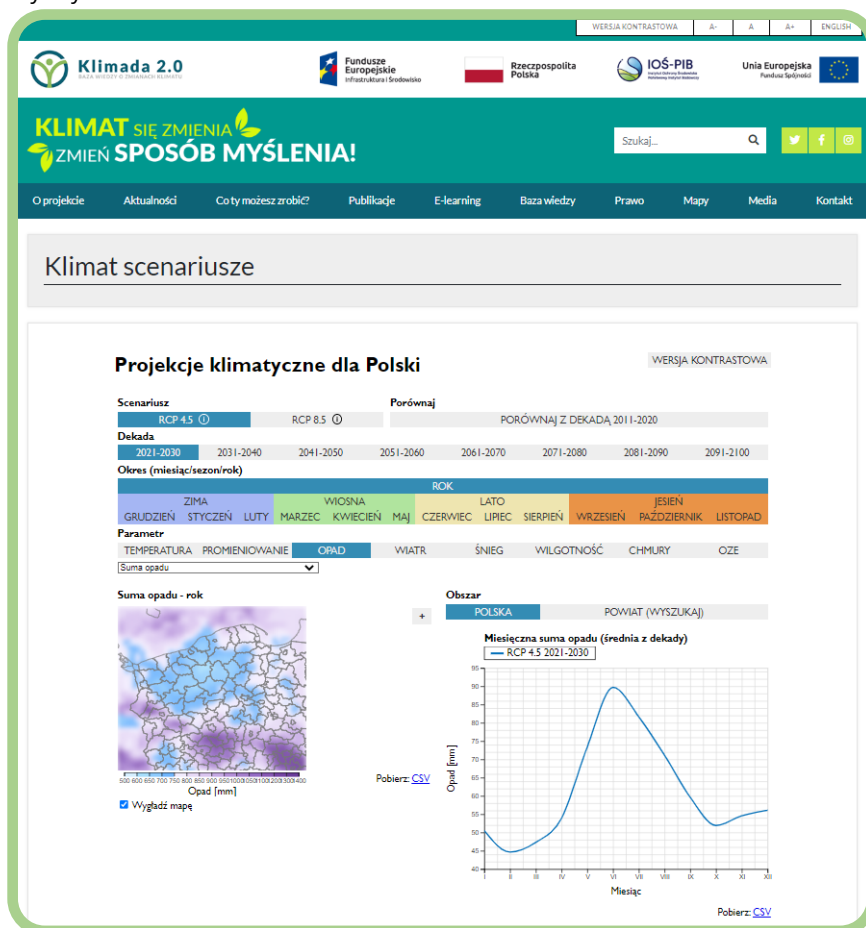


Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Adaptation compass - Guidance for developing climate-proof city regions, EU Interreg IVB-project "Future Cities urban networks to face climate change"

Ocenę wpływu zmian klimatu proponuje się przeprowadzić dla scenariuszy koncentracji gazów cieplarnianych RCP 4.5 oraz RCP 8.5 w horyzoncie 2050 r., na podstawie ogólnodostępnych danych z projektu „Baza wiedzy o zmianach klimatu i adaptacji do ich skutków oraz kanałów jej upowszechniania w kontekście zwiększania

odporności gospodarki, środowiska i społeczeństwa na zmiany klimatu oraz przeciwdziałania i minimalizowania skutków nadzwyczajnych zagrożeń” (KLIMADA 2.0), zrealizowanego przez Instytut Ochrony Środowiska PIB. Niezbędne dane do oceny wpływu zmian klimatu dostępne są na portalu interaktywnym <https://klimada2.ios.gov.pl/klimat-scenariusze-portal/>. Dane te obejmują pliki w formacie CSV z wartościami liczbowymi poszczególnych parametrów obliczonymi dla powiatów oraz pliki CSV z wartościami liczbowymi poszczególnych parametrów obliczonymi dla węzłów siatki obliczeniowej modelu numerycznego, umożliwiające obliczenie wartości uśrednionych dla dowolnego obszaru.

Rysunek 71 Portal interaktywny Scenariusze zmian klimatu w Polsce w XXI wieku



źródło: Strona internetowa Klimada 2.0

Proponowane wskaźniki oceny wpływu zmian klimatu w postaci średnich z dekad 2021-2030, 2031-2040 oraz 2041-2050 dla scenariuszy RCP4.5 i RCP 8.5 dla obszaru miasta powinny obejmować następujące wskaźniki klimatologiczne:

1. Roczna suma opadu:

- Punktacja 5 – powyżej 798 mm,
- Punktacja 4 – od 734 do 798 mm,
- Punktacja 3 – od 708 do 734 mm,
- Punktacja 2 – od 678 do 708 mm,
- Punktacja 1 – poniżej 678 mm.

2. Maksymalna miesięczna suma opadu dla półrocza letniego:

- Punktacja 5 – powyżej 90 mm,
- Punktacja 4 – od 86 do 90 mm,
- Punktacja 3 – od 83 do 86 mm,
- Punktacja 2 – od 79 do 83 mm,
- Punktacja 1 – poniżej 79 mm.

3. Maksymalna miesięczna suma opadu dla półrocza zimowego:
  - Punktacja 5 – powyżej 66 mm,
  - Punktacja 4 – od 58 do 66 mm,
  - Punktacja 3 – od 55 do 58 mm,
  - Punktacja 2 – od 52 do 55 mm,
  - Punktacja 1 – poniżej 52 mm.
4. Liczba dni w roku z opadem  $\geq 10$  mm:
  - Punktacja 5 – powyżej 18,8,
  - Punktacja 4 – od 16,2 do 18,8,
  - Punktacja 3 – od 15,2 do 16,2,
  - Punktacja 2 – od 13,8 do 15,2,
  - Punktacja 1 – poniżej 13,8.
5. Liczba dni w roku z opadem  $\geq 20$  mm:
  - Punktacja 5 – powyżej 4,0,
  - Punktacja 4 – od 3,5 do 4,0,
  - Punktacja 3 – od 3,2 do 3,5,
  - Punktacja 2 – od 2,9 do 3,2,
  - Punktacja 1 – poniżej 2,9.

W ramach oceny ryzyka proponuje się klasyfikację prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska w 5 klasach, zgodnie z zaproponowanymi przedziałami zmienności analizowanych parametrów klimatycznych, na podstawie średniej arytmetycznej wyznaczonej punktacji wskaźników cząstkowych:

- bardzo wysokie prawdopodobieństwo – punktacja  $>4$ ,
- wysokie prawdopodobieństwo – punktacja 3-4,
- średnie prawdopodobieństwo – punktacja 2-3,
- umiarkowane prawdopodobieństwo – punktacja 1-2,
- niskie prawdopodobieństwo – punktacja 1.

W kolejnym kroku ryzyko może być określone na podstawie macierzy wzorowanej na propozycji zawartej w „Podręczniku adaptacji dla miast - wytyczne do przygotowania Miejskiego Planu Adaptacji do zmian klimatu”.

Proponowaną klasyfikację ryzyka przedstawiono poniżej.

Tabela 17 Klasyfikacja ryzyka na podstawie wpływu (konsekwencji) i prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska

Podatność	Prawdopodobieństwo wystąpienia zjawiska				
	niskie	umiarkowane	średnie	wysokie	bardzo wysokie
<b>bardzo wysoka</b>	średnie	średnie	wysokie	wysokie	bardzo wysokie
<b>wysoka</b>	niskie	średnie	średnie	wysokie	bardzo wysokie
<b>średnia</b>	niskie	niskie	średnie	wysokie	wysokie
<b>niska</b>	bardzo niskie	niskie	średnie	średnie	wysokie
<b>brak</b>	bardzo niskie	niskie	niskie	średnie	średnie

źródło: opracowanie własne

Opracowanie metodyki zostało poprzedzone analizą podatności i ryzyka na przykładzie Nowego Sącza. Szczegóły przedstawiono w Załączniku 2 do Poradnika, przedstawiającym wyniki analiz dla Nowego Sącza.

# KLUCZOWE WNIOSKI






## 11. Podsumowanie

Powódzie opadowe to problem, z którym będziemy się mierzyć w kolejnych latach coraz częściej. Analizy w obszarze zmian klimatu jednoznacznie wskazują i potwierdzają ryzyko dni z intensywnymi opadami, generując tym samym straty związane z powodziami opadowymi. Wpływ na wielkość tych strat ma także postępująca urbanizacja, coraz wyższe uszczelnienie w miastach, jak również niedostosowana do tych warunków opadowych kanalizacja deszczowa, projektowana wiele lat temu. Dlatego tak ważne jest rozpoczęcie odpowiednich działań, przez jednostki odpowiedzialne za zarządzanie wodą w mieście, jak najszybciej, najpierw tych analityczno-planistycznych, a następnie wdrożeniowych. Powódzie i podtopienia przeplatać się będą z okresami suchymi, stąd równie ważna jest kwestia retencjonowania nadmiaru wody w mieście i jej ponowne wykorzystanie tam, gdzie to możliwe.

W Poradniku zaproponowano konkretne rozwiązania metodyczne wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla 3 wariantów, które mogą zostać wybrane w zależności od dostępnych danych i potrzeb jednostek samorządu terytorialnego. Podsumowanie kluczowych informacji dla każdego z wariantów przedstawiono poniżej ([Rysunek 72](#)):

Rysunek 72 Kluczowe informacje podsumowujące omawiane w Poradniku warianty i metody

		
<p><b>WARIANT 1</b></p> <p>Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D</p>	<p><b>WARIANT 2</b></p> <p>Metoda uproszczona z wykorzystaniem modelu 2D i z uwzględnieniem wpływu działania istniejącej sieci kanalizacji deszczowej w sposób uproszczony</p>	<p><b>WARIANT 3</b></p> <p>Metoda szczegółowa z wykorzystaniem modelu zintegrowanego 1D + 2D</p>
<p><b>ZALETY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• niezbędne dane w dużej mierze są ogólnodostępne,</li> <li>• symulacja dynamiczna,</li> <li>• dokładne odwzorowanie spływu wód opadowych po terenie.</li> </ul>	<p><b>ZALETY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• niezbędne dane w dużej mierze są ogólnodostępne,</li> <li>• symulacja dynamiczna,</li> <li>• dokładne odwzorowanie spływu wód opadowych po terenie,</li> <li>• uwzględnienie wód opadowych odprowadzanych do kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej.</li> </ul>	<p><b>ZALETY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dokładne odwzorowanie spływu/rozpływu wód opadowych po terenie, wpływu i ewentualnego wypływu wód opadowych z kanalizacji,</li> <li>• pełne modelowanie hydrauliczne kanalizacji,</li> <li>• największa dokładność wyników ze wszystkich dostępnych metod.</li> </ul>
<p><b>WADY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• nie uwzględnia wpływu kanalizacji deszczowej czy ogólnospławnej.</li> </ul>	<p><b>WADY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• wymaga posiadania komercyjnego oprogramowania,</li> <li>• kanalizacja uwzględniona jedynie w sposób uproszczony.</li> </ul>	<p><b>WADY</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• czasochłonna i wymagająca specjalistycznej wiedzy,</li> <li>• wymaga posiadania komercyjnego oprogramowania,</li> <li>• wymaga dużej ilości danych,</li> <li>• wymaga opracowania i przypisania parametrów zlewni hydrologicznych ciężących do wpustów kanalizacyjnych,</li> <li>• dłuższy czas symulacji.</li> </ul>
<p><b>OBSZAR ZASTOSOWANIA</b></p> <p>Metoda ta doskonale nadaje się do zastosowania w przypadku konieczności otrzymania możliwie dokładnych wyników w obszarach, na których nie występuje kanalizacja ogólnospławna czy deszczowa. Wyniki mogą być jednak zawyżone, ze względu na brak odzwierciedlenia kanalizacji w modelu.</p>	<p><b>OBSZAR ZASTOSOWANIA</b></p> <p>Metoda ta dobrze nadaje się do przeprowadzenia symulacji w obszarach, w których występuje kanalizacja ogólnospławna czy deszczowa, a pełne modelowanie sieci nie jest konieczne, ponieważ nie obserwuje się wylewów spowodowanych przeciążeniem kanalizacji deszczowej.</p>	<p><b>OBSZAR ZASTOSOWANIA</b></p> <p>Metoda ta dobrze nadaje się do przeprowadzenia symulacji w obszarach, w których występuje kanalizacja ogólnospławna czy deszczowa, a pełne modelowanie sieci nie jest konieczne, ponieważ nie obserwuje się wylewów spowodowanych przeciążeniem kanalizacji deszczowej.</p>



Wstępnie zidentyfikowano także metodę najbardziej uproszczoną, bazującą na obszarach bezodpływowych wyznaczonych na podstawie NMT, jednak z uwagi na fakt, iż jest to metoda najmniej dokładna, metoda ta nie była szerzej opisywana.

Szczególnie metody uproszczone pozwalają wólarzom miast wstępnie zdiagnozować skalę problemu i potencjalne zagrożenia, aby w dalszej kolejności skupić się na obszarach najbardziej zagrożonych oraz najbardziej problemowych ze względu na potencjalne straty i inne ryzyka. Metody najbardziej zaawansowane, powinny być stosowane w miejscach, które identyfikujemy jako wymagające interwencji i planujemy tam wdrożyć odpowiednie działania redukujące zagrożenie.

Należy podkreślić, iż rekomendowane metody są dość zaawansowane i często wymagają specjalistycznej wiedzy oraz narzędzi wspierających analizy. Jednak bez tej informacji i rozpoznania problemu w skali miasta, ciężko jest skutecznie planować działania, aby ocenić je nie tylko punktowo, a w sposób całościowy. Szczególnie istotne jest, aby unikać sytuacji, w której rozwiązany lokalnie problem, transferujemy na obszary położone poniżej. Dlatego kwestie retencyjne są teraz tak szeroko komunikowane. Retencjonowanie wody pozwala efektywnie nią zarządzać, zarówno w obliczu zagrożenia powodziowego, jak i w trakcie suszy.

W świetle obowiązujących przepisów, ochrona przed powodziami opadowymi, zabezpieczenia mieszkańców i mienia w miastach, leży w kompetencjach jednostek samorządu terytorialnego. Informacje zawarte w Poradniku mogą zostać z powodzeniem wykorzystane do opracowywanych własnych metodyk prac lub zakresów zamówień, zlecanych na zewnątrz.

W świetle zobowiązań prawnych obowiązków ochrony przed powodzią leży po stronie administracji rządowej i samorządowej oraz Wód Polskich. Wychodząc naprzeciw zgłaszanym ogólnie problemom z podtopieniami miejskimi, jak również istniejącemu niedostatkowi wiedzy w tym obszarze, dążąc do promowania jednolitych praktyk w obszarze zagrożenia powodzią w naszym kraju, Wody Polskie proponują potraktować niniejszy Poradnik jako materiał wspierający prace samorządów terytorialnych i współpracujących z nimi podmiotów.

## Wykaz skrótów

Skrót	Wyjaśnienie
aPZRP	Projekt: Aktualizacja planów zarządzania ryzykiem powodziowym
BDOT10k	Baza danych obiektów topograficznych w skali 1:10 000
CC	Zmiany klimatu (ang. Climate change)
CHASE-PL	Projekt: Ocena konsekwencji zmian klimatu dla wybranych sektorów w Polsce (realizowany w latach 2014-2016)
CZGiK	Centralny zasób geodezyjny i kartograficzny
DD	Metoda dynamicznego skalowania w dół
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (Niemieckie Stowarzyszenie Gospodarki Wodnej i Ściekowej)
ESD	Metoda empiryczno-statystyczna
GESUT	Geodezyjna Ewidencja Sieci Uzbrojenia Terenu
GIS	System informacji geograficznej (ang. geographic information system, GIS)
GUGiK	Główny Urząd Geodezji i Kartografii
IDF	Intensywność – Częstość – Czas
IMGW-PIB	Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
IPCC	Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu (ang. Intergovernmental Panel on Climate Change)
KLIMADA	Projekt: Opracowanie i wdrożenie strategicznego planu adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu
LIDAR	Lotniczy skaniny laserowy (ang. Light Detection and Ranging)
MIKE	Oprogramowanie firmy DHI do modelowania 1D i 2D
NMT	Numeryczny Model Terenu
PANDa	Polski Atlas Natężeń Deszczów
PMAXTP	Projekt: Modele probabilistyczne opadów maksymalnych o określonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia
PRG	Państwowy rejestr granic
PZRP	Plan zarządzania ryzykiem powodziowy
QGIS	dawniej: Quantum GIS – <a href="#">wieloplatformowe, wolne i otwarte oprogramowanie geoinformacyjne (GIS)</a>
RCP	Scenariusze zmian koncentracji dwutlenku węgla zaakceptowane przez IPCC w projekcie CMIP5 t.j. RCP2.6, RCP4.5, RCP6 oraz RCP8.5 (ang. representative concentration pathways)
RGB	Jeden z modeli przestrzeni barw ( R- red, G – green, B – blue)
RLM	Równoważna liczba mieszkańców
SHP	Shapefile – format zapisu danych przestrzennych
SQLite	Otwarto źródłowy system zarządzania relacją bazy danych
TERYT	Krajowy Rejestr Urzędowy Podziału Terytorialnego Kraju
TIN	Trójkątna sieć nieregularna (ang. Triangulated Irregular Network)
WMO	Światowa Organizacja Meteorologiczna (ang. World Meteorological Organization)
ZSIN	Zintegrowanego systemu informacji o nieruchomościach

## Spis Tabel

Tabela 1	Zestawienie metod do wyznaczania obszarów zagrożonych wodami opadowymi.....	19
Tabela 2	Zestawienie dostępnych narzędzi wspierających proces wyznaczenia obszarów zagrożonych wodami opadowymi.....	21
Tabela 3	Zestawienie kluczowych funkcjonalności i założeń wybranych narzędzi wspierających wyznaczenie obszarów zagrożonych wodami opadowymi.....	22
Tabela 4	Zestawienie wad i zalet oprogramowania komercyjnego oraz oprogramowania open-source.....	23
Tabela 5	Zestawienie niezbędnych do opracowania modeli danych wejściowych dla poszczególnych wariantów.....	27
Tabela 6	Kluczowe założenia dla poszczególnych podwariantów.....	41
Tabela 7	Zestawienie danych wejściowych wykorzystywanych w Wariancie 1.....	45
Tabela 8	Kluczowe założenia dla poszczególnych podwariantów.....	60
Tabela 9	Zestawienie danych wejściowych wykorzystywanych w Wariancie 2.....	62
Tabela 10	Zestawienie danych wejściowych do opracowania modeli w ramach Wariantu 3.....	86
Tabela 11	Zestawienie wysokości opadów dla scenariuszy ze zmianami klimatu dla miast pilotażowych.....	110
Tabela 12	Wskaźniki oceny potencjalnych niekorzystnych skutków powodzi.....	112
Tabela 13	Wskaźniki oceny zmian perspektywicznych ryzyka powodziowego.....	112
Tabela 14	Przykładowa macierz wyznaczenia priorytetowego obszaru najbardziej narażonego na wystąpienie danego zjawiska.....	113
Tabela 15	Obiekty klasy BUBD, dla których wyznacza się szacunkową liczbę mieszkańców.....	118
Tabela 16	Obiekty o szczególnym znaczeniu społecznym, z uwzględnieniem funkcji szczegółowej budynku na podstawie BDOT.....	119
Tabela 17	Klasyfikacja ryzyka na podstawie wpływu (konsekwencji) i prawdopodobieństwa wystąpienia zjawiska.....	125

## Spis Rysunków

Rysunek 1	Rysunek prezentujący ideę modeli hydrologicznych.....	12
Rysunek 2	Schemat etapu prac nad modelem hydraulicznym dla rzeki .....	13
Rysunek 3	Schemat obrazujący połączenie modelu 1D i modelu 2D .....	14
Rysunek 4	Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (NMT).....	29
Rysunek 5	Przykładowy wizualizacja pokrycia terenu z bazy BDOT10k dla Nowego Sącza.....	30
Rysunek 6	Przykładowy fragment ortofotomapy dla Nowego Sącza.....	31
Rysunek 7	Wizualizacja warstw przestrzennych z elementami sieci kanalizacyjne.....	33
Rysunek 8	Przykładowy wykres kalibracji w narzędziu MIKE+.....	35
Rysunek 10	Przykładowa dokumentacja fotograficzna dla jednej ze studni – zdjęcie 1.....	38
Rysunek 11	Przykładowa dokumentacja fotograficzna dla studni – zdjęcie 2 i 3.....	38
Rysunek 12	Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki regularnej (po prawej).....	42
Rysunek 13	Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki nieregularnej trójkątnej (po prawej).....	43
Rysunek 14	Widok okna aplikacji Mesh Builder.....	43
Rysunek 15	Widok okna aplikacji ArcGIS.....	44
Rysunek 16	Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu.....	46
Rysunek 17	Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po obniżeniu dróg (po prawej) dla miasta Nowy Sącz.....	47
Rysunek 18	Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po obniżeniu dróg (po prawej) dla miasta Puław.....	47
Rysunek 19	Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji przepustu (po prawej) dla miasta Nowy Sącz .....	48
Rysunek 20	Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji przepustu (po prawej) dla miasta Puław.....	48
Rysunek 21	Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Nowy Sącz.....	50
Rysunek 22	Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki GRID.....	51
Rysunek 23	Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH.....	51
Rysunek 24	Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	52
Rysunek 25	Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	52
Rysunek 26	Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	53
Rysunek 27	Wyniki identyfikacji obszarów bezodpływowych na siatce MESH dla opadu o prawdopodobieństwie 1% i czasie trwania 120 min dla Puław.....	55
Rysunek 28	Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu.....	64
Rysunek 29	Porównanie numerycznego modelu terenu przed modyfikacją (po lewej) i po modyfikacji w miejscu lokalizacji mostu (po prawej) dla miasta Nowy Sącz .....	65
Rysunek 30	Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Nowy Sącz.....	68
Rysunek 31	Porównanie zasięgu granicy administracyjnej oraz zasięgu granicy siatek obliczeniowych dla miasta Puław .....	69
Rysunek 32	Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH.....	70
Rysunek 33	Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	71
Rysunek 34	Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	71
Rysunek 35	Okno zakładki 2D culverts w programie MIKE+ wraz z parametrami przepustu.....	72
Rysunek 36	Okno zakładki 2D boundary conditions w programie MIKE+ wraz z wartością przepływu.....	72
Rysunek 37	Okno zakładki 2D boundary conditions w programie MIKE+ wraz z wartością rzędnej zwierciadła.....	73
Rysunek 38	Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	74
Rysunek 39	Wynik identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla Podwariantu 2.1 dla opadu o prawdopodobieństwie P1% i czasie trwania 120 min dla Nowego Sącza.....	76
Rysunek 40	Porównanie wyników identyfikacji obszarów zagrożonych wodami opadowymi dla opadu o czasie trwania 15 min dla Nowego Sącza.....	77
Rysunek 41	Widok okna głównego w narzędziu MIKE+ z wprowadzoną siatką obliczeniową, siecią kanalizacji deszczowej oraz zlewniami hydrologicznymi.....	83
Rysunek 42	Zasięg siatki obliczeniowej nieregularnej trójkątnej oraz zasięg opracowania (dot. Nowego Sącza).....	84

Rysunek 43	Zasięg siatki obliczeniowej nieregularnej trójkątnej oraz zasięg opracowania (dot. Puław).....	85
Rysunek 44	Zlewnie wygenerowane na podstawie NMT, linii akumulacji spływu oraz wyznaczonych punktów zlewania.....	88
Rysunek 45	Graficzne przedstawienie etapów budowy modelu.....	89
Rysunek 46	Okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni.....	90
Rysunek 47	Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki regularnej (po prawej).....	93
Rysunek 48	Przykładowy fragment numerycznego modelu terenu (po lewej) i siatki nieregularnej trójkątnej (po prawej).....	93
Rysunek 49	Okno narzędzia Import and export programu MIKE+ oraz ustawienia zastosowane do importu studni.....	94
Rysunek 50	Okno zakładki 2D domain w programie MIKE+ wraz z ustawieniami dla siatki MESH.....	94
Rysunek 51	Okno zakładki 2D surface roughness w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	95
Rysunek 52	Okno zakładki 2D precipitation and evaporation w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	95
Rysunek 53	Okno Create couplings w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	96
Rysunek 54	Okno 1D-2D couplings w programie MIKE.....	96
Rysunek 55	Okno zakładki simulation setup w programie MIKE+ wraz z ustawieniami.....	97
Rysunek 56	Graficzna prezentacja opadu z dnia 27.06.2023.....	99
Rysunek 57	Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - przepływ.....	99
Rysunek 58	Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - napętnienie.....	100
Rysunek 59	Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - przepływ.....	100
Rysunek 60	Wynik kalibracji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzenia opadowego z dnia 27.06.2023 - napętnienie.....	100
Rysunek 61	Graficzna prezentacja opadów z dni 23-24.06.2023.....	101
Rysunek 62	Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - przepływ.....	102
Rysunek 63	Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Kraszewskiego dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - napętnienie.....	102
Rysunek 64	Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - przepływ.....	102
Rysunek 65	Wynik weryfikacji dla punktu pomiarowego w ul. Krańcowej dla zdarzeń opadowych z dni 23-24.06.2023 - napętnienie.....	103
Rysunek 66	Przewidywane zmiany we wzroście i częstotliwości opadów nawalnych i powodzi opadowych.....	107
Rysunek 67	Zmiany maksymalnego opadu dobowego w Europie (%) dla globalnego ocieplenia na poziomie +1,5 °C (c) oraz +3,0 °C (d).....	108
Rysunek 68	Zależność podatności od ekspozycji, wrażliwości i potencjału adaptacyjnego.....	113
Rysunek 69	Baza danych lokalnych.....	118
Rysunek 70	Elementy oceny ryzyka na potrzeby planów adaptacji do zmian klimatu.....	123
Rysunek 71	Portal interaktywny Scenariusze zmian klimatu w Polsce w XXI wieku.....	124
Rysunek 72	Kluczowe informacje podsumowujące omawiane w Poradniku warianty i metody.....	128

## Wykaz załączników

Załącznik 1. Wybrane zagadnienia metodyczne

Załącznik 2. Charakterystyka obszaru i wyniki analiz – Miasto Nowy Sącz

Załącznik 3. Charakterystyka obszaru i wyniki analiz – Miasto Puławy

Załącznik 4. Szablony prezentacji kartograficznej i bazy danych



**Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie**

**Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej**

**ul. Żelazna 59a**

**00-848 Warszawa**



**[www.gov.pl/web/wody-polskie](http://www.gov.pl/web/wody-polskie)**