Dostępność transportowa i obciążenie sieci drogowej w Polsce w świetle zagrożeń powodziowych



WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU
ŁÓDZKIEGO

Szymon Wiśniewski

Dostępność transportowa i obciążenie sieci drogowej w Polsce w świetle zagrożeń powodziowych

WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU
ŁÓDZKIEGO

Łódź–Kraków 2021

Szymon Wiśniewski – Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych,
Instytut Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej,
90-142 Łódź, ul. Kopcińskiego 31

RECENZENT
Stanisław Koziarski

REDAKTOR INICJUJĄCY
Katarzyna Włodarczyk-Gil

REDAKCJA
AGENT PR
Marcin Mach

SKŁAD I ŁAMANIE
AGENT PR
Mariusz Brusiewicz

PROJEKT OKŁADKI
AGENT PR
Mariusz Brusiewicz

Zdjęcie wykorzystane na okładce: © Depositphotos.com/https://pl.depositphotos.com/stock-photos/zalana-droga.html?offset=200&qview=77490402

© Copyright by Szymon Wiśniewski, Łódź–Kraków 2021
© Copyright for this edition by Uniwersytet Łódzki, Łódź–Kraków 2021
© Copyright for this edition by AGENT PR, Łódź–Kraków 2021

Wydane przez Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
Ark. wyd. 27,0, ark. druk. 28,5

Wydanie I. W.10299.21.0.M

ISBN 978-83-8220-526-8
e-ISBN 978-83-8220-527-5
ISBN AGENT PR 978-83-64462-89-4

https://doi.org/10.18778/8220-526-8

Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego
90-131 Łódź, ul. Lindleya 8
www.wydawnictwo.uni.lodz.pl
e-mail: ksiegarnia@uni.lodz.pl
tel. 42 665 58 63

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie 9
1.1. Problem badawczy i cele pracy 9
1.2. Przedmiot badania, zakres czasowy i przestrzenny 13
1.3. Źródła danych 17
1.4. Słownik podstawowych pojęć 19
1.5. Struktura opracowania i plan procedury badawczej 25

2. Zdarzenia nietypowe w transporcie drogowym 29
2.1. Przegląd zdarzeń nietypowych 29
2.2. Powódź jako bariera transportowa 36
2.2.1. Wybrane cechy powodzi w Polsce 37
2.2.2. Historyczne przykłady oddziaływania 42
2.2.3. Formy oddziaływania na transport drogowy 44
2.3. Transport w procesie ewakuacji 49

3. Uwarunkowania funkcjonowania i rozwoju sieci drogowej na terenach zagrożonych powodzią 59
3.1. Tereny zagrożone powodzią i ich wybrane cechy przyrodnicze 59
3.2. Wybrane elementy zagospodarowania i rozmieszczenie ludności na terenach zagrożonych powodzią 73
3.2.1. Wybrane elementy zagospodarowania 74
3.2.2. Rozmieszczenie ludności 105
3.3. Uwarunkowania prawno-administracyjne zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią 111
3.4. Zasady budowy i eksploatacji infrastruktury drogowej na terenach zagrożonych powodzią 121

4. Sieć drogowa na terenach zagrożonych powodzią 133
4.1. Identyfikacja odcinków sieci drogowej w granicach terenów zagrożonych powodzią 133

4.2. Metodyka weryfikacji bezpieczeństwa drogowych obiektów inżynierskich i nowych inwestycji ... 142
4.3. Rozmieszczenie zagrożonych odcinków sieci drogowej ... 148

5. Mierniki wrażliwości osobowego transportu drogowego na wystąpienie powodzi ... 165
5.1. Modelowanie prędkości ruchu ... 165
5.1.1. Wprowadzenie i przegląd badań ... 165
5.1.2. Charakterystyka modelu ... 172
5.2. Dostępność transportowa ... 183
5.2.1. Dostępność izochronowa i kumulatywna ... 183
5.2.2. Dostępność potencjałowa ... 188
5.3. Obciążenie sieci drogowej ... 196
5.3.1. Zagadnienia wprowadzające ... 196
5.3.2. Generacja podróży ... 202
5.3.3. Rozkład przestrzenny podróży i podział zadań przewozowych ... 210
5.3.4. Rozkład ruchu na sieć ... 216
5.4. Zasady działania aplikacji RoadLoad ... 223

6. Zmiany dostępności transportowej w następstwie powodzi ... 227
6.1. Podróże krótkie ... 227
6.1.1. Obszar dorzecza Wisły ... 227
6.1.2. Obszar dorzecza Odry ... 238
6.1.3. Obszar dorzecza Pregoły ... 246
6.1.4. Główne rzeki ... 247
6.2. Podróże długie ... 254
6.2.1. Obszar dorzecza Wisły ... 255
6.2.2. Obszar dorzecza Odry ... 264
6.2.3. Obszar dorzecza Pregoły ... 271
6.2.4. Główne rzeki ... 271

7. Zmiany obciążenia sieci drogowej w następstwie powodzi ... 279
7. 1. Dojazdy do pracy ... 279
7.1.1. Obszar dorzecza Wisły ... 281
7.1.2. Obszar dorzecza Odry ... 289
7.1.3. Obszar dorzecza Pregoły ... 296
7.1.4. Główne rzeki ... 297

7.2. Podróże służbowe 302
7.2.1. Obszar dorzecza Wisły 303
7.2.2. Obszar dorzecza Odry 311
7.2.3. Obszar dorzecza Pregoły 317
7.2.4. Główne rzeki 318

8. Konsekwencje powodzi dla osobowego transportu drogowego – próba syntezy 325
8.1. Konsekwencje w zakresie dostępności transportowej 326
8.2. Konsekwencje w zakresie obciążenia sieci drogowej 343

9. Wnioski i rekomendacje 357
9.1. Wnioski i wytyczne do dalszych badań 357
9.2. Rekomendacje w zakresie obniżenia wrażliwości transportu drogowego na powódź 365

Aneks 369

Summary 395

Spis literatury i materiałów źródłowych 409

Spis rycin 439

Spis tabel 451

1

WPROWADZENIE

1.1. Problem badawczy i cele pracy

Analiza literatury poświęconej zagadnieniom wpływu zdarzeń nietypowych na funkcjonowanie transportu drogowego wskazuje, że w Polsce jest to obszar tematyczny, który jak dotąd nie zyskał kompleksowego zainteresowania wśród badaczy, również tych, którzy rozpatrywaliby te zjawiska z perspektywy subdyscypliny geografii transportu. O ile dostępne są niezbyt liczne badania stanowiące rozważania nad wpływem czynników antropogenicznych (w tym przede wszystkim tych związanych z samą siecią transportową) na stan równowagi systemu transportowego (rozpatrywanych głównie z punktu widzenia inżynierii ruchu), o tyle niemalże nie występują analizy poświęcone oddziaływaniu czynników przyrodniczych na funkcjonowanie transportu. Tutaj właśnie uwidacznia się luka badawcza i aby ją zapełnić należy skupić się w pierwszej kolejności na usystematyzowaniu relacji na styku transportu drogowego i zjawisk nietypowych determinujących jego efektywność (ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk naturalnych), opracowaniu metodyki badania siły i zakresu przestrzennego tego oddziaływania oraz syntetycznemu wnioskowaniu na temat ich roli w polskich realiach.

Przegląd krajowego dorobku naukowego z zakresu tematyki podejmowanej w monografii wyraźnie uwidacznia również brak badań realizowanych kompleksowo w rozumieniu przestrzennym. Chodzi o prowadzenie analiz zarówno w różnych skalach przestrzennych (lokalnych, regionalnych i ponadregionalnych), jak i w zakresie umożliwiającym uniknięcie lub daleko idące zmniejszenie efektu granicy. Gwarantuje to uchwycenie prawidłowości typowych dla systemów transportowych o różnych skalach oraz zaobserwowanie zjawisk, które ujawniają się dopiero przy badaniu na tyle obszernym przestrzennie, aby umożliwić współwystępowanie zjawisk (np. ich jednoczesne wystąpienie w różnych obszarach systemu transportowego). Przedstawiana monografia wydaje się wypełniać również tę lukę badawczą. Potrzebę realizacji badań nad zmianami dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej na skutek wystąpienia powodzi w Polsce uzasadnia też aktualność tej tematyki na arenie międzynarodowej, gdzie wciąż dynamicznie przyrasta liczba publikacji, specjalistycznych konferencji naukowych czy też podejmujących tę tematykę czasopism. Zasadne wydaje się więc, aby i w krajowym dorobku naukowym pojawiały się publikacje z tego zakresu, opierające się na materiałach źródłowych obrazujących polskie uwarunkowania tychże zjawisk. Podejmowana

w prezentowanej monografii tematyka wskazuje na jej interdyscyplinarny charakter i położenie na styku kilku zagadnień badawczych, z których każde z osobna (dostępność transportowa, mobilność przestrzenna, zarządzanie kryzysowe itd.) jest już w mniejszym lub większym stopniu ugruntowane w literaturze. Dowodzi tego jej szeroki przegląd, którego zasadnicze elementy zostały umieszczone w kolejnych częściach pracy. W krajowej skali monografię można więc umiejscawiać brzegowo wobec głównych nurtów badawczych geografii transportu. Natomiast w perspektywie międzynarodowej, cechującej się licznymi publikacjami o pokrewnej tematyce, wydaje się ona być bliżej jednego z istotnych kierunków poznawczych.

Istotności prowadzenia badań dotyczących wpływu klęsk naturalnych na transport drogowy należy upatrywać w systematycznie wzrastającym wpływie obu tych elementów na życie ludzi. Nawet nie zagłębiając się w rozważania naukowe, a pozostając jedynie przy doniesieniach medialnych czy własnych obserwacjach, dostrzec można intensyfikację ekstremalnych zjawisk pogodowych, które przy zaistnieniu odpowiednich okoliczności mogą wywołać sytuację kryzysową, zagrażającą stabilnemu funkcjonowaniu transportu drogowego.

Dotychczasowy stan wiedzy wskazuje, że powodzie są najczęstszymi katastrofami naturalnymi występującymi na świecie, wywołującymi do tego ogromne szkody (Jonkman 2005, Okazawa i in. 2011). Niestety badacze są zdania, że ekstremalne zjawiska powodziowe będą występować coraz częściej ze względu na zmiany klimatu i formy użytkowania terenu (Brown i Damery 2002, Posthumus i in. 2008 za Reynard i in. 2001). Z drugiej zaś strony XXI wiek przyniósł w Polsce niezwykle dynamiczny wzrost poziomu motoryzacji i rozrost oraz poprawę jakości infrastruktury drogowej. Niewspółmierność obu tych przyrostów nie pozostaje bez wpływu na obciążenie sieci drogowej. To zaś skutkuje tym, że zarządcy sieci, jak i jej projektanci odczuwają coraz większą presję, by sprostać przyrastającemu popytowi. Presja ta staje się szczególnie silna, gdy w wyniku wystąpienia zdarzeń nietypowych (np. powodzi) zarządzanie systemem transportowym jest wyjątkowo trudne. Wymagane jest wtedy wysoce racjonalne i efektywne dysponowanie infrastrukturą, tak aby wobec wyłączeń wybranych jej odcinków, spadków poziomu dostępności i zmian w obciążeniu sieci nie dopuścić do wykluczenia transportowego rzutującego na bezpieczeństwo ludności i stan gospodarki. Wystąpienie zjawisk nietypowych, jak np. zniszczenie odcinka drogi przez wody powodziowe, może również skutkować swoistym zestawem zachowań użytkowników sieci transportowej, które zdają się stanowić problematykę na tyle ciekawą i odmienną od przebadanych już zachowań transportowych, że także jej należy się gruntowna analiza (Pregnolato i in. 2017). Ujawnia to żywotną potrzebę prowadzenia tego rodzaju badań, tak aby w przyszłości mogły się one przyczynić do bardziej efektywnego reagowania w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych.

Tym samym istotności badań o problematyce zmian dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej w sytuacji wystąpienia powodzi upatrywać

należy w dwóch sferach. Poza znaczeniem praktycznym, związanym z zarządzaniem infrastrukturą krytyczną (do której należy infrastruktura transportowa) w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowej oraz ograniczaniem potencjalnych negatywnych skutków szczególnie w zakresie życia i zdrowia ludzi oraz działalności gospodarczej (nadrzędny cel zarządzania ryzykiem powodziowym), badania te mają również ważny wymiar poznawczy. Dzięki nim możliwa staje się ocena wrażliwości polskiej sieci drogowej oraz funkcjonującego w oparciu o nią transportu drogowego na niszczące działanie wód powodziowych mogących wystąpić w poszczególnych regionach kraju w scenariuszu o określonym prawdopodobieństwie. Badania pozwalają ponadto wskazać obszary szczególnie narażone na negatywne konsekwencje powodzi w sferze sprawności systemu transportowego. Tym samym, poza syntezą przestrzenno-środowiskową uznawaną za podstawową ideę badań geograficznych (Suliborski 2018), utylitarna natura prowadzonych w monografii rozważań czy też ich ukierunkowanie na relacje pomiędzy przejawami działalności człowieka a elementami naturalnymi środowiska wskazuje, że wkraczają one również w zakres przedmiotowy gospodarki przestrzennej (Domański 2002, Parysek 2006).

Z punktu widzenia tychże relacji bardzo istotna jest więc właściwa ocena potencjalnych szkód, które mogą wystąpić na skutek powodzi. Badacze najczęściej ograniczają się do oszacowania bezpośrednich strat materialnych. Straty pośrednie, ze względu na to, że są trudne do wyrażenia, zazwyczaj są przez nich pomijane. Prowadzenie badań na styku tematyki powodziowej, dostępności transportowej i mobilności ma szczególne znaczenie z uwagi na wykluczenie transportowe spowodowane zjawiskiem powodzi. Może ono doprowadzić nie tylko do paraliżu transportowego, ale również administracyjnego nawet w skali całego kraju, co z kolei stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa państwa.

W monografii podjęto próbę określenia wpływu wystąpienia zdarzenia nietypowego w postaci powodzi (w różnych scenariuszach prawdopodobieństwa) na obszarach poszczególnych regionów wodnych w Polsce na dostępność transportową i obciążenie sieci drogowej kraju. Badania prowadzono głównie w oparciu o wtórne dane dotyczące zasięgów obszarów zagrożonych powodzią w Polsce i ich zagospodarowania oraz sieci drogowej wraz z zagospodarowaniem jej sąsiedztwa.

Celem opracowania jest więc określenie wrażliwości osobowego transportu drogowego w Polsce poprzez identyfikację charakteru i skali zmian dostępności transportowej oraz zmian obciążenia sieci osobowym ruchem drogowym w sytuacji powodzi[1]. Z tak sformułowanego celu głównego monografii wynika grupa

[1] O wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia (10%), średnim prawdopodobieństwie wystąpienia (1%) od strony rzeki lub morza oraz na terenach zagrożonych powodzią w wyniku całkowitego zniszczenia obwałowania lub budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce.

szczegółowych celów o charakterze poznawczym (1), metodycznym (2) oraz aplikacyjnym (3).

(1) W zakresie zadań poznawczych należy wskazać określenie uwarunkowań (między innymi przyrodniczych i prawno-administracyjnych) funkcjonowania i rozwoju sieci drogowej na terenach zagrożonych powodzią. Realizacja tego celu pozwoliła między innymi na opracowanie metodyki wyznaczania odcinków sieci drogowej wyłączonej z użytkowania podczas powodzi (jeden z celów metodycznych) oraz umożliwiła sformułowanie rekomendacji odnośnie do polityki transportowej i przestrzennej dla obszarów narażonych na zalanie. Kluczowymi celami szczegółowymi o znaczeniu poznawczym były natomiast: określenie charakteru i skali zmian dostępności czasowej – izochronowej/kumulatywnej i potencjałowej (w ujęciu gminnym) – towarzyszących wystąpieniu powodzi oraz zidentyfikowanie cech zmian wielkości potoków ruchu (związanych z motywacjami obligatoryjnymi) wynikających z wyłączeń zalanych odcinków sieci i redukcji wielkości potencjałów ruchotwórczych.

(2) Pierwszym z celów o charakterze metodycznym było opracowanie postępowania służącego identyfikowaniu odcinków sieci drogowej zagrożonych zalaniem w wyniku wystąpienia powodzi o wysokim i średnim prawdopodobieństwie oraz w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowań lub budowli ochronnej pasa technicznego. Drugi natomiast dotyczył budowy modeli sieci drogowej i prędkości osobowego ruchu drogowego w Polsce o gęstości sieci umożliwiającej analizy wewnątrzgminne. Jest to narzędzie niezbędne do prowadzenia analiz dostępności transportowej, umożliwiające urealnianie uzyskiwanych wyników. Duża szczegółowość modelu jest niezbędna, aby mógł on w akceptowalny sposób odzwierciedlać nawet lokalne zmiany w systemie transportowym wywołane powodzią. Ostatnie zadanie z tej grupy celów koncentrowało się na przygotowaniu oprogramowania komputerowego (noszącego nazwę RoadLoad) umożliwiającego realizację procesu rozmieszczenia popytu na sieć systemu transportowego, którego wyniki działania pozwalają na skuteczne badanie i wizualizowanie wpływu zmian rozkładu ruchu na sieć towarzyszących wystąpieniu zjawisk nietypowych.

(3) Jest to jednocześnie cel aplikacyjny, ponieważ oprogramowanie wraz z licznymi jego funkcjonalnościami pozwalającymi na modelowanie rozkładu ruchu na sieć drogową może posłużyć do kolejnych analiz tego rodzaju, chociażby uwzględniających kolejne grupy zdarzeń nietypowych. Zbiór celów szczegółowych zamyka ostatnie zadanie o charakterze aplikacyjnym, jakim jest sformułowanie rekomendacji na potrzeby polityki przestrzennej w zakresie racjonalizacji systemu osobowego transportu drogowego w sytuacji zagrożeń powodziowych. Płynące z badania wnioski zostaną przełożone na zbiór rekomendacji skierowanych do decydentów odpowiedzialnych za prowadzenie polityki w zakresie zarządzania ryzykiem powodziowym czy rozwojem infrastruktury transportowej.

Realizacja przyjętych założeń badawczych może się przyczynić do pełnego uzasadnienia potrzeby obligatoryjnego sporządzania analiz zmian dostępności transportowej dla obszarów zagrożonych powodzią, i to w różnych skalach przestrzennych. Na bazie uzyskanych wyników badań mogą zostać sformułowane i wdrożone procedury zarządzania przepływami transportowymi na poszczególnych poziomach przestrzennych. Należy przez to rozumieć między innymi działania w zakresie organizacji ruchu, jak np. nakazy objazdów wyświetlane na znakach o zmiennej treści na autostradach i drogach ekspresowych (w przypadku podróży o zasięgu ponadregionalnym) czy zmiany w organizacji ruchu wdrażane za pomocą sterowania Inteligentnymi Systemami Transportu (dla relacji wewnątrzregionalnych). Zarządcom i organizatorom transportu wyniki badań przedstawione w monografii mogą posłużyć do opracowania strategii i planów operacyjnych. Wnioski wynikające z ustaleń badawczych mogą również stać się bazą, na podstawie której sformułowane zostaną wytyczne do programu edukacji mieszkańców terenów zagrożonych powodzią i obszarów w ich bezpośrednim sąsiedztwie w zakresie kształtowania prawidłowych zachowań transportowych w sytuacjach kryzysowych. O ile na poziomie regionalnym czy krajowym zachowania te można warunkować za pomocą wskazanych wcześniej rozwiązań technicznych i technologicznych, o tyle na poziomie lokalnym, gdzie powódź bezpośrednio i natychmiastowo dotyka lokalną społeczność, decydujące znaczenie mają wyuczone zachowania. Dobre praktyki w tej dziedzinie pozwoliłyby na ograniczenie negatywnych skutków powodzi w zakresie zdrowia i życia ludności oraz podniosłyby efektywność działań służb ratowniczych w kontekście ochrony przeciwpowodziowej.

Monografia zawiera wyniki projektu badawczego zatytułowanego *Zmiany teoretycznej dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej na skutek wystąpienia powodzi na terytorium Polski* realizowanego w latach 2019–2021. Projekt o numerze 2018/29/B/HS4/01020 został sfinansowany ze środków przyznanych przez Narodowe Centrum Nauki.

1.2. Przedmiot badania, zakres czasowy i przestrzenny

Prezentowane w monografii analizy odnoszą się do trzech obszarów tematycznych: zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami, dostępności transportowej oraz mobilności przestrzennej (ujmowanej tutaj w formie jednego z jej produktów, jakim jest ruch drogowy). Badanie zostało przeprowadzone przy założeniu, że potencjalne przemieszczenia odbywają się za pomocą indywidualnego transportu samochodowego. Z racji dużych zróżnicowań przedmiotu transportu oraz środków, które są wykorzystywane do przemieszczeń, spotyka się wiele prób jego systematycznego podziału. Dwiema głównymi

grupami klasyfikacji transportu są klasyfikacje pionowa i pozioma. Pierwsza z nich, nazywana także gałęziową, to taka próba systematyki, w której głównym kryterium wyróżniającym podsystemy transportowe jest zróżnicowanie w zakresie środków transportu. W tym kontekście prezentowane badania dotyczą transportu wehikułowego, lądowego i drogowego (Koziarski 2007). Poziome klasyfikacje transportu bazują na szeregu wyróżników, takich jak między innymi forma własności, regularność połączeń, przedmiot przewozu (tutaj: osoby) i zasięg (tutaj: kraj) (Szymonik 2013).

Wzajemne relacje pomiędzy wskazanymi powyżej obszarami tematycznymi przekładają się w pierwszej kolejności na badania wpływu powodzi na dostępność transportową w ujęciu czasowym. Chodzi tutaj o identyfikację tych odcinków sieci drogowej, które podczas powodzi znajdą się pod wodą. Na bazie sieci drogowej pozbawionej zalanych odcinków konstruowane są między innymi izochrony dojazdu do przyjętych punktów referencyjnych (np. centroidów miast wojewódzkich). Zestawienie przebiegu izolinii w okresie bez powodzi i podczas jej wystąpienia pozwala na wymierną ocenę poziomu zmian czasów przejazdu na skutek zalania. Wyznacznikiem zmian dostępności są również liczba ludności i elementy zagospodarowania przestrzeni Polski znajdujące się w zasięgu poszczególnych izochron w sytuacji „normalnej" i podczas powodzi. Drugi z poruszanych problemów dotyczy między innymi identyfikacji przepływów pojazdów w obrębie sieci drogowej w sytuacji bez powodzi i w czasie klęski żywiołowej, przy czym uwzględnionych jest kilka wariantów badawczych. Dla zobrazowania przejazdów konieczne jest przyjęcie danych o źródłach i celach podróży oraz wolumenie pojazdów, które się pomiędzy nimi przemieszczają. W opracowaniu przeanalizowano i zobrazowano przejazdy związane z motywacjami obligatoryjnymi – względnie stałymi nawet w obliczu wystąpienia zdarzeń nietypowych (dojazdy do pracy i podróże biznesowe). Dokonano analizy przepływów pojazdów: obciążenia sieci drogowej w sytuacji „normalnej" i podczas powodzi pod kątem między innymi zmian w obciążeniu poszczególnych odcinków sieci czy struktury zróżnicowania obciążenia sieci według kategorii drogi.

Skutki powodzi są przedmiotem interdyscyplinarnych rozważań. Jej konsekwencje można rozpatrywać biorąc pod uwagę takie aspekty jak przyrodniczy, gospodarczy czy społeczny (Kowalczak 2008, Piepiora i Brzywcz 2017). W przypadku tematyki podejmowanej w monografii szczególnie istotne są komponenty ekonomiczne, jak na przykład szkody w infrastrukturze transportowej. Zaliczyć do nich należy również nakłady poniesione na odtworzenie stanu sieci drogowej po ewentualnych zniszczeniach oraz jej zabezpieczenie przed kolejnymi powodziami (Kryk 2003). I choć prezentowane badanie nie odnosi się do nich bezpośrednio, to wspomnieć należy o stratach w sferze społecznej. Chociażby konieczność ewakuacji (zorganizowanej czy samodzielnej) z terenów zagrożonych może być odczuwana jako pogorszenie się jakości życia człowieka. Co do konsekwencji

przestrzennych, to przejawiają się one często w zmianie formy zagospodarowania obszaru zagrożonego zalaniem czy też ingerencji w politykę przestrzenną (Piepiora 2019), której komponent transportowy jest integralną częścią.

Zakres badań podejmowanych w monografii odpowiada tym samym dwóm głównym celom zarządzania ryzykiem powodziowym, którymi są obniżenie istniejącego ryzyka i poprawa systemu zarządzania nim, a w ich zakresie: ograniczenie wrażliwości obiektów (w tym przypadku infrastruktury transportowej) i społeczności (które można wprost postrzegać jako użytkowników infrastruktury transportowej) na zagrożenia powodziowe, doskonalenie skuteczności odbudowy (sieci drogowej) i powrotu (systemu transportowego) do stanu sprzed powodzi oraz budowa programów edukacyjnych zwiększających świadomość i wiedzę na temat źródeł zagrożenia i ryzyka powodziowego (np. podczas samoewakuacji ludności z terenów zagrożonych).

Jest to szczególnie ważne wobec zapisów planów zarządzania ryzykiem powodziowym dla każdego z obszarów dorzeczy, które wskazują na konieczność wyeliminowania lub unikania wzrostu zagospodarowania na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią (od strony rzeki lub morza) poprzez zakaz budowy obiektów infrastrukturalnych oraz likwidację lub zmianę sposobu ich użytkowania.

Zarządzanie systemem transportowym na obszarach zagrożonych powodzią można więc rozpatrywać w dwóch perspektywach czasowych. Okres po wystąpieniu tego zjawiska jest przecież jednocześnie czasem oczekiwania na jego kolejne wystąpienie. Tym samym okres warunków „normalnych" to dla zarządców sieci drogowej etap jej przygotowywania, zapobiegania i odtwarzania. W czasie powodzi przychodzi natomiast konieczność reagowania – np. wyłączania mostów z użytkowania czy wyznaczania objazdów. Należy w tym miejscu podkreślić, że działania dotyczące bezpośredniej ochrony infrastruktury drogowej (infrastruktury krytycznej) przed powodzią przestają przyjmować charakter zarządzania powodziowego, a stają się zarządzaniem kryzysowym (Fox 2003, Piepiora 2019).

Zakres czasowy badania został w znacznej mierze zdeterminowany przez dostępność kluczowych źródłowych baz danych wykorzystywanych w monografii. Chodzi tutaj przede wszystkim o produkty projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju), a w szczególności te, za których opracowanie odpowiedzialny był GUGiK (Główny Urząd Geodezji i Kartografii). Pozyskanie danych wysokościowych w technologii lotniczego skanowania laserowego i opracowanie na ich podstawie numerycznego modelu terenu (NMT) oraz numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) miało miejsce pomiędzy IV kwartałem 2010 r. a I kwartałem 2015 roku. Elementy BDOT (Bazy Danych Obiektów Topograficznych) przygotowano natomiast między IV kwartałem 2011 r. a IV kwartałem 2013 roku. Mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego (MZP i MRP), których wektorowe bazy danych były ważnym elementem procedury badawczej, zostały opracowane w latach

2008–2013, a plany zarządzania ryzykiem powodziowym przygotowywano o dwa lata dłużej. Tak duże rozpiętości czasowe ujawniające się podczas przygotowywania wymienionych powyżej danych wynikają z jednej strony ze złożoności metodyki pracy nad nimi, z drugiej zaś – z rozległości obszaru, z którego musiały zostać zebrane, a następnie opracowane. Rodzi to problem zróżnicowania przestrzennego aktualności tychże danych źródłowych, którego rozwiązanie stanowiło istotne wyzwanie metodyczne. Konieczne było wypracowanie sposobu postępowania (zostało ono szczegółowo opisane w rozdziale 4), które pozwoliło na usunięcie luki czasowej pomiędzy rokiem ich aktualności a okresem, dla którego został wykonany model sieci drogowej kraju wraz z modelem prędkości osobowego ruchu drogowego. Sięgnięto w tym zakresie między innymi do danych poświęconych inwestycjom drogowym na poziomie gminnym i powiatowym, wojewódzkim i krajowym, obejmujących przedsięwzięcia z lat 2011–2019. Modele sieci i prędkości przedstawiają stan na III kwartał 2019 r. i okres ten należy przyjąć jako generalny zakres czasowy opracowania. Uwzględniono go również, dokonując przeglądu i interpretacji prawodawstwa z zakresu podejmowanej tematyki. Część materiału statystycznego w zakresie danych w układzie produkcja-atrakcja dla motywacji dotyczącej dojazdów do szkoły oraz podróży biznesowych odnosi się do roku 2018. W przypadku danych macierzowych uzyskanych dla dojazdów do pracy ich dostępność również wymagała pewnego przesunięcia czasowego, ponieważ najnowsze zestawienie tego typu obejmuje 2016 rok.

Zakres przestrzenny badania jest ściśle związany z siecią drogową, której model objął cały obszar Polski oraz kilkudziesięciokilometrowy bufor wokół jej granic. Sieć obejmuje wszystkie autostrady, drogi ekspresowe, krajowe, wojewódzkie, powiatowe oraz znaczny udział dróg gminnych i lokalnych. Zastosowany bufor miał za zadanie urealnić wyniki symulacji i umożliwić pojazdom omijającym wyłączone z sieci odcinki dróg (na skutek zniszczenia przez powódź) wykorzystywanie infrastruktury położonej poza granicami Polski. Granice administracyjne nie stanowią bowiem bariery podczas wyboru ścieżki przejazdu. Bufor określono w taki sposób, aby w żadnym z wariantów badania „sztuczna" granica analizy nie zaważyła na wynikach badania. W przypadku granicy z Białorusią, Ukrainą i Rosją zastosowano metodykę odzwierciedlającą ograniczenia związane z odprawą.

Badania prowadzono z uwzględnieniem trzech scenariuszy wystąpienia powodzi: na terenach zagrożonych powodzią o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia (10%), na terenach zagrożonych powodzią o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia (1%) (w tym od strony morza 1% M) oraz na terenach zagrożonych powodzią w wyniku całkowitego zniszczenia obwałowania (WZ) lub budowli ochronnej pasa technicznego (PZ). Symulacje wystąpienia powodzi wykonywano dla każdego z 13 regionów wodnych w Polsce w obszarach dorzeczy Wisły, Odry i Pregoły oraz dla trzech największych polskich rzek: Wisły, Odry i Warty. Każda próba wyznaczenia jakichkolwiek granic tak złożonego zjawiska,

jakim jest powódź, zawsze będzie dyskusyjna. Ze względu jednak na konieczność odnotowania jego zmienności przestrzennej niezbędne było przyjęcie jakiejś delimitacji. Odwołano się do regionów wodnych (rezygnując np. z jednostek podziału administracyjnego), ponieważ jako jednostki wyodrębnione na podstawie kryterium hydrograficznego wydają się odpowiadać realizowanemu celowi opracowania, a ich liczba i rozkład przestrzenny umożliwiają przeprowadzenie symulacji pozwalających uchwycić, jak tego rodzaju sytuacje nietypowe wpływają na system transportu drogowego w polskich realiach. Zgodnie z tak opracowanym planem symulacji powodzi badania zmian dostępności transportowej prowadzono na poziomie regionalnym i gminnym, natomiast analizy zmian obciążenia sieci drogowej przyjęły międzygminną skalę precyzji.

1.3. Źródła danych

Na potrzeby realizacji założeń badawczych przyjętych w monografii sięgnięto do materiałów źródłowych z sześciu zasadniczych grup:

- danych obejmujących treść numerycznych map zagrożenia i ryzyka powodziowego (powstałych w wyniku realizacji projektu ISOK);
- danych sieciowych służących do budowy modelu sieci drogowej i modelu prędkości osobowego ruchu drogowego;
- danych prezentujących pozostałe (poza infrastrukturą drogową) formy zagospodarowania terenu;
- danych mówiących o rozmieszczeniu ludności;
- danych zawierających informacje o inwestycjach infrastrukturalnych w zakresie sieci drogowej;
- danych statystycznych niezbędnych do określenia potencjałów ruchotwórczych, macierzy przepływów ludności związanych z zatrudnieniem oraz dostępności potencjałowej.

Pierwsza z nich obejmuje przede wszystkim wybrane warstwy referencyjne. Z zakresu map zagrożenia powodziowego sięgnięto między innymi po obszary zagrożenia powodziowego dla rzek i morza oraz dla regionów wodnych, głębokość wody i maksymalne rzędne zwierciadła wody. Natomiast mapy ryzyka wykorzystano w zakresie użytkowania terenu z obliczonymi potencjalnymi stratami powodziowymi czy też warstwy obejmującej budynki (która zawiera informacje o liczbie mieszkańców zamieszkujących poszczególne obiekty). Dane te zostały pozyskane z zasobów Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wód Polskich. W tej grupie danych znajduje się również numeryczny model pokrycia terenu, wykorzystywany podczas identyfikacji odcinków sieci wyłączonych z użytkowania w okresie powodzi. Model został udostępniony przez GUGiK w formacie ASCII XYZ GRID.

Model sieci drogowej został zbudowany przy wykorzystaniu przede wszystkim BDOT (pozyskanej z GUGiK-u), danych wektorowych z zasobów OpenStreetMap oraz wybranych danych zarządów infrastruktury drogowej. W celu opracowania modelu prędkości osobowego ruchu drogowego konieczne było ponadto przygotowanie wtórnych danych wektorowych o rozmieszczeniu skrzyżowań w obrębie analizowanej sieci drogowej oraz uwzględnienie warstwy zawierającej dane o zabudowie (z BDOT) i rozmieszczeniu ludności pochodzące od komercyjnego dystrybutora, a opracowane na podstawie informacji pozyskanych z zasobów Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji (MSWiA), Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) oraz urzędów gmin. Dane o rozmieszczeniu ludności (agregowane do poziomu ulicy/drogi) uzupełnia jeszcze baza danych, w której znajdują się informacje dotyczące jednostek osadniczych w Polsce, w tym liczby mieszkańców każdej z nich.

Poza danymi obrazującymi przebieg i wybrane inne cechy infrastruktury drogowej w badaniach uwzględnione zostały inne liczne informacje o charakterze przestrzennym w postaci między innymi przebiegu granic administracyjnych (GUGiK), rozmieszczenia jednostek straży pożarnej, rozmieszczenia form ochrony przyrody (Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska – GDOŚ) itp.

Informacje o inwestycjach w zakresie infrastruktury drogowej pozyskano z Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) w postaci Programu Budowy Dróg Krajowych (PBDK) na lata 2014-2023 (z perspektywą do 2025 r.), zgodnie z którym realizowane są obecnie przez GDDKiA inwestycje na drogach krajowych, oraz zestawienia zadań inwestycyjnych na istniejącej sieci dróg, związanych z rozbudową i przebudową[2] odcinków dróg, poprawą warunków i bezpieczeństwa ruchu drogowego, jak również systemu zarządzania ruchem. Skorzystano także z informacji gromadzonych przez zarządy dróg wojewódzkich (ZDW) poszczególnych regionów dotyczących: inwestycji realizowanych między innymi w zakresie Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa, Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej, rezerwy subwencji ogólnej na dofinansowanie inwestycji na drogach samorządowych, rezerwy Ministra Infrastruktury i Rozwoju, rezerwy subwencji ogólnej Ministra Infrastruktury i Budownictwa czy środków własnych województw. Urzędy wojewódzkie udostępniły natomiast dane na temat inwestycji realizowanych w ramach Narodowego Programu Przebudowy Dróg Lokalnych (2008-2011, „Etap II – Bezpieczeństwo, Dostępność, Rozwój"), Rządowego Programu na

[2] Wykonywanie robót, w których wyniku następuje podwyższenie parametrów technicznych i eksploatacyjnych istniejącej drogi, niewymagających zmiany granic pasa drogowego (Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60 z późn. zm.).

rzecz Rozwoju oraz Konkurencyjności Regionów poprzez Wsparcie Lokalnej Infrastruktury Drogowej oraz Programu Rozwoju Gminnej i Powiatowej Infrastruktury Drogowej na lata 2016–2019, Funduszu Solidarności Unii Europejskiej (działania nadzwyczajne związane z usuwaniem skutków powodzi z maja i czerwca 2010 r. podjęte w celu niezwłocznego przywrócenia infrastruktury komunalnej do stanu sprzed powodzi), środków z budżetu państwa przeznaczonych na usuwanie skutków ruchów osuwiskowych ziemi czy skutków klęsk żywiołowych. W przypadku, kiedy występowała konieczność weryfikacji, czy dany odcinek drogi powiatowej lub gminnej został wybudowany, lub gdy zmieniły się jego istotne parametry po okresie pozyskiwania danych dla produkcji NMT i NMPT i jednocześnie nie był ujęty w wymienionych powyżej zestawieniach, kontaktowano się z właściwym zarządem dróg powiatowych (ZDP) lub urzędem gminy.

1.4. Słownik podstawowych pojęć

Ponieważ w monografii nakłada się na siebie nomenklatura z zakresu kilku dziedzin wykraczających poza przedmiot badań geografii transportu (między innymi modelowanie i symulacja ruchu, systemy informacji przestrzennej, zarządzanie ryzykiem powodziowym, zarządzanie kryzysowe i ochrona infrastruktury krytycznej) uznano, że dla ułatwienia odbioru jej treści uzasadnione będzie wprowadzenie zestawienia podstawowych terminów z ich zakresu, wykorzystywanych w opracowaniu. Poszerzają one obszar terminologiczny towarzyszący tej subdyscyplinie, przywołany już w literaturze przedmiotu (między innymi Rosik i in. 2018). Wprowadzono również zestaw terminologiczny z zakresu samej geografii transportu, dotyczący ściśle podejmowanego problemu badawczego, który nie pojawia się powszechnie w polskiej literaturze przedmiotu. Definicje zostały wypunktowane alfabetycznie w ramach poszczególnych obszarów tematycznych, a w ich treści uwzględniono specyfikę realizowanego badania.

W zakresie geografii transportu:

- **adaptowalność** (ang. *adaptability*) systemu transportowego – zdolność do przystosowania się do warunków zaistniałych po wystąpieniu zdarzenia aż do osiągnięcia stanu równowagi transportowej na nowym poziomie (Faturechi i Miller-Hooks 2014a). Jest ona zdefiniowana jako jedna z funkcji prężności systemu, odzwierciedlająca jego zdolność do reagowania na wystąpienie nowych czynników destabilizujących. Kluczowa jest tu dynamika reakcji odnoszona do stopnia złożoności badanego systemu (Fiksel 2003, Dalziell i McManus 2004, Bhamra i in. 2011, Wan i in. 2018);

• **ekspozycja** (ang. *exposure*) systemu transportowego na wystąpienie sytuacji nietypowej – konsekwencje wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia określone ściśle dla danego miejsca w systemie (Jenelius i Mattsson 2006);

• **elastyczność** (ang. *flexibility*) systemu transportowego – zdolność do reagowania na wystąpienie sytuacji nietypowej i dostosowania się do zaistniałych zmian poprzez działania awaryjne podejmowane po wystąpieniu zakłócenia. Nie można jej łączyć z odpornością (ang. *robustness*), która stanowi zdolność do pozostawania sieci bez zmian pomimo wystąpienia zdarzenia, a nie przystosowywanie się do nich (Goetz i Szyliowicz 1997, Cox i in. 2011, Berle i in. 2013, Faturechi i Miller-Hooks 2014a, Wan i in. 2018);

• **istotność** (ang. *importance*) elementu systemu transportowego – suma konsekwencji wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia w danym miejscu systemu dla całego systemu poddanego badaniu (Nicholson i Du 1994);

• **niezawodność** (ang. *reliability*) systemu transportowego – prawdopodobieństwo, że sieć będzie działać w czasie, gdy wystąpi zdarzenie nietypowe (Barker i in. 2013, Faturechi i Miller-Hooks 2014a). W odniesieniu do podróży jest to stopień pewności, z jaką podróżny jest w stanie oszacować, jak długo będzie trwać podróż. Zależy on od rozkładu prawdopodobieństwa i stabilności czasu podróży, dostępnych informacji o stanie systemu transportowego i dostępnych możliwości podróży (Immers i in. 2004, Jenelius i in. 2006, Jenelius i Mattsson 2012);

• **odporność** (ang. *robustness*) systemu transportowego – zdolność sieci do utrzymania swojej funkcjonalności w warunkach odbiegających od normalnych (Knoop i in. 2012); zdolność do wytrzymywania lub pochłaniania zakłóceń oraz utrzymywania funkcjonalności w obliczu wystąpienia zakłócenia (Blockley i in. 2012, Faturechi i Miller-Hooks 2014b, Wan i in. 2018);

• **opcjonalność/wariantowość** (ang. *redundancy*) systemu transportowego – zdolność wybranych elementów sieci do przejęcia funkcji pełnionych przez inne, dotknięte negatywnym oddziaływaniem zdarzeń nietypowych, bez spadku wydajności pracy całego systemu. Najczęściej jest ona utożsamiana z istnieniem opcjonalnych tras przejazdu, np. dla trasy zalanej przez wody powodziowe (Fiksel 2003, Haimes 2009, Omer i in. 2012, Tukamuhabwa i in. 2015, Wan i in. 2018);

• **operatywność** (ang. *resourcefulness*) systemu transportowego – gotowość sieci transportowej do powrotu do stanu minimalnej akceptowalnej efektywności funkcjonowania. Operatywność jest definiowana jako dostępność sił i środków do przywrócenia funkcjonalności sieci. Jest jednym z elementów prężności/żywotności sieci (Adams i in. 2012, Reggiani 2013, Francis i Bekera 2014, Wan i in. 2018);

• **podatność** (ang. *susceptibility*) systemu transportowego – łatwość elementów sieci (transportowej) do ulegania wpływom zdarzenia (np. wystąpienia

powodzi), które osłabia jedno lub więcej połączeń w jej zasięgu, rozpatrywana pod względem zdolności sieci do utrzymania wyjściowego poziomu wydajności (Jenelius i in. 2006, Jenelius i Mattsson 2012, Oliveira i in. 2014);

• **prężność/żywotność** (ang. *resilience*) systemu transportowego – zdolność systemu (transportowego) do utrzymania „normalnego" poziomu świadczonych usług (Holling 1973, Scheffer i in. 2001) lub zdolność do przywrócenia wyjściowego poziomu tychże usług w określonym czasie (Holling 1973, Bergen i in. 2001, Bruneau i in. 2003, Leveson i in. 2006, Murray-Tuite 2006, De-Los-Santos i in. 2012, Miller-Hooks i in. 2012, Do i Jung 2018, Wan i in. 2018). Obejmuje działania mające na celu prewencyjne łagodzenie skutków oddziaływania (ang. *pre-event mitigation*) oraz stałe utrzymywanie gotowości (ang. *preparedness*) na wystąpienie zdarzeń niebezpiecznych (Vugrin i in. 2010, Chen i Miller-Hooks 2012, Miller-Hooks i in. 2012, Zhang i in. 2015). Pojęcie prężności/żywotności jest wykorzystywane, kiedy zaistniałe zakłócenie jest badane w ujęciu dynamicznym (na osi czasu). Ze względu na rozległość znaczeniową tego pojęcia „mieści się" w nim znaczna część przywołanej w tym zakresie tematycznym terminologii;

• **stabilność** (ang. *survivability*) systemu transportowego – zdolność elementów sieci do wytrzymania nagłego wystąpienia pierwszych symptomów zdarzenia nietypowego (Adams i in. 2012, Reggiani 2013, Baroud i in. 2014, Faturechi i Miller-Hooks 2014b, Francis i Bekera 2014, Wan i in. 2018);

• **wrażliwość** (ang. *vulnerability*) sieci transportowej – podatność elementów zagospodarowania (np. obiektów infrastruktury transportowej) na zagrożenie/uszkodzenie i zdolność do przeciwdziałania oraz likwidacji skutków katastrofy, np. powodzi (Berdica 2002, Merz i Thieken 2004, Jenelius i Mattsson 2006, Chen i in. 2007). Wyróżnia się wrażliwość połączenia (ang. *connective vulnerability*) oraz wrażliwość dostępności (ang. *access vulnerability*) (Chen i in. 2007). Na wrażliwość składają się więc czynniki lub procesy fizyczne, społeczne, ekonomiczne i środowiskowe, które zwiększają podatność sieci transportowej na powódź. Jest to właściwość systemu transportowego, która może osłabiać lub ograniczać jego zdolność do radzenia sobie z zagrożeniem (destrukcyjne wydarzenia, które zaistniały wewnątrz i/lub na zewnątrz systemu) (Asbjørnslett i Rausand 1999, Blockley i in. 2012, Wan i in. 2018).

W zakresie modelowania i symulacji ruchu wymienić należy:

• **miary wielkości ruchu** – liczba pojazdów w potokach ruchu w jednostce czasu lub praca transportowa przypisane do określonego połączenia węzłów w sieci transportowej lub rejonów komunikacyjnych. Jako cecha struktury popytowej transportu stanowią odniesienie do cech struktury podażowej transportu, odpowiednio: maksymalne natężenie ruchu jako przepustowość odcinka sieci transportowej a maksymalna praca transportowa jako pojemność sieci transportowej lub jej wyróżnionego segmentu (Krych 2018, s. 49);

• **model potoków ruchu** – inaczej model popytu transportowego lub zapis struktury popytowej transportu ujmujący decyzje transportowe użytkowników w postaci funkcji matematycznych zależnych od podażowej struktury transportu oraz struktury zagospodarowania przestrzennego w przypisanym do tego modelu interwale czasowym w wyodrębnionej jednostce terytorialnej. Przeznaczeniem modelu potoków ruchu jest prognozowanie ruchu dla badania zmiany potoków ruchu w procesie planowania układów transportowych, optymalizacji sieci transportowych, rozwiązywania zadań transportowych i wspomagania decyzji w innych problemach transportowych związanych z sieciami transportowymi (np. wystąpieniem zdarzeń nietypowych), układami transportowymi lub systemami transportu (Krych 2018, s. 50);

• **prognozowanie ruchu** – badanie reakcji popytu transportowego na zmiany (wywołane między innymi przez wystąpienie zdarzeń nietypowych) w układzie transportowym (wyłączenie odcinka z użytkowania), w zachowaniach transportowych (samoewakuacja ludności) i w zagospodarowaniu przestrzennym z wykorzystaniem modelu potoków ruchu ze stosownie implementowanymi w nim modelami interakcji transportowych, modelami sieci transportowych i z uwzględnieniem zmian w czynnikach ruchotwórczych. Wynikiem badań jest prognoza ruchu dla jednostki terytorialnej i określonego horyzontu czasu (Krych 2018, s. 74);

• **przepustowość** – maksymalne możliwe natężenie ruchu pojazdów odcinka międzywęzłowego w sieci transportowej (Krych 2018, s. 77);

• **ruch przejęty** – część potoków ruchu przejęta przez alternatywną sieć transportową wskutek zmiany relacji kosztu transportu między właściwymi dla tych sieci środkami transportu (Krych 2018, s. 82);

• **ruch przełożony** – część potoku ruchu przejęta w obrębie sieci transportowej przez alternatywne trasy transportowe na skutek zmiany kosztu transportu w odcinkach sieci w wyniku zmian jej kształtu (związanych np. z wyłączeniem zalanego segmentu sieci drogowej), organizacji ruchu (wynikającej z wprowadzenia między innymi objazdów terenów zalanych) lub przepustowości jej elementów (między innymi w przypadku zamknięcia pasa ruchu uszkodzonego przez wody powodziowe) (Krych 2018, s. 81);

• **ruch wzbudzony lub wytłumiony** – część potoków ruchu wynikająca ze zmiany (wzrostu lub spadku) potencjałów produkcji i atrakcji na wskutek zmian kosztu transportu w strukturze podażowej transportu (Krych 2018, s. 82);

• **ruchotwórczość** – zdolność określonych komponentów zagospodarowania przestrzennego do produkcji ruchu wyrażona wskaźnikiem liczby inicjowanych podróży w określonej jednostce czasu w ilorazie do rozmiaru określonego komponentu zagospodarowania (Krych 2018, s. 82);

• **stan ruchu swobodnego** – sytuacja, w której natężenie ruchu samochodowego nie oddziałuje na koszty transportu pozostałych współuczestników w potoku ruchu (Krych 2018, s. 84);

• **warunki drogowe** – cechy geometryczne charakteryzujące usytuowanie przestrzenne (w poziomie i pionie) osi drogi oraz ukształtowanie, własności i stan w jej przekroju poprzecznym (Wiedemann 2019);

• **warunki ruchowe** – suma czynników oddziałujących (chwilowo i miejscowo) na drodze na kierowców, decydujących o płynności przebiegu ruchu, np. struktura rodzajowa pojazdów, pogoda, widoczność itp. (Wiedemann 2019);

• **więźba ruchu** – zapis przestrzennego rozkładu ruchu w określonym czasie w formie graficznej lub dla celów operacyjnych w formie kwadratowej macierzy matematycznej o wymiarach odpowiadających liczbie rejonów transportowych w obszarze wydzielonej jednostki terytorialnej i poza nią. Bywa określana jako macierz O-D (źródło–cel) i służy do działań operacyjnych w modelowaniu potoków ruchu (Krych 2018, s. 94);

• **zatłaczana sieć transportowa** – stan sieci transportowej, w którym średni czas obsługi zależy od natężenia potoków ruchu w elementach sieci na poziomie uciążliwości wymuszającym zmianę decyzji transportowych użytkowników. Zatłaczanie wiąże się z występowaniem w sieci punktów krytycznych, w których popyt zgłoszony do obsługi przewyższa ich przepustowość w określonym dla stanu zatłoczenia interwale czasowym. W miarę wzrostu popytu długość interwału czasowego rośnie, a obszar zatłoczenia rozszerza się na sąsiednie odcinki sieci (Krych 2018, s. 100).

W zakresie systemów informacji przestrzennej (Wężyk 2015):

• **dane LiDAR** – dane wysokościowe pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego; synonimy: dane ALS, dane pomiarowe ALS, chmura punktów LiDAR, chmura punktów ALS (ang. *LiDAR data*, *point cloud*);

• **LiDAR –** akronim utworzony od angielskiego wyrażenia *Light Detection and Ranging*, utożsamiany ze skanowaniem laserowym. Skaner laserowy – system składający się z emitera światła spójnego oraz odbiornika światła odbitego, który pozwala określić odległość od obiektu;

• **lotnicze skanowanie laserowe** – jedna z metod pozyskiwania informacji o terenie i pokryciu terenu. Ideę lotniczego skanowania laserowego sprowadza się do zasady laserowego pomiaru odległości z lecącego samolotu (lub śmigłowca czy statku powietrznego) do powierzchni terenu (ang. *Airborne Laser Scanning – ALS*);

• **numeryczny model pokrycia terenu (NMPT)** – cyfrowa reprezentacja rzeźby terenu oraz obiektów znajdujących się na niej (budynki, roślinność, inne zdefiniowane obiekty) (ang. *Digital Surface Model – DSM*);

• **numeryczny model terenu (NMT)** – zbiór punktów reprezentujących wysokości topograficzne powierzchni terenu wraz z algorytmem interpolacyjnym pozwalającym na odtworzenie tej powierzchni w dowolnym miejscu (ang. *Digital Terrain Model – DTM lub Digital Elevation Model – DEM*);

• **produkty LiDAR** – dane pomiarowe wykonane w technologii lotniczego skanowania laserowego, wytworzony na ich podstawie numeryczny model terenu (NMT) i numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) oraz zdjęcia lotnicze opracowane w ramach projektu ISOK.

W zakresie zarządzania ryzykiem powodziowym:

• **obszar dorzecza** – obszar lądu i morza, składający się z jednego lub wielu sąsiadujących ze sobą dorzeczy wraz ze związanymi z nimi wodami podziemnymi, morskimi wodami wewnętrznymi, wodami przejściowymi i przybrzeżnymi, będący główną jednostką przestrzenną gospodarowania wodami (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 31);

• **obszar narażony na niebezpieczeństwo powodzi (ONNP)** – obszar, na którym istnieje znaczące ryzyko powodzi lub jest prawdopodobne wystąpienie znaczącego ryzyka powodzi (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 33);

• **obszar potencjalnie zagrożony powodzią** – obszar określony na podstawie studiów ochrony przeciwpowodziowej, danych historycznych, analiz geomorfologicznych, analizy wpływu urządzeń wodnych na bezpieczeństwo powodziowe, prognozy długofalowego rozwoju wydarzeń (w tym wpływu zmian klimatu na występowanie powodzi), brany pod uwagę do analiz prowadzących do wyznaczenia ONNP (Zaktualizowana metodyka wstępnej oceny ryzyka powodziowego, s. 11);

• **obszar szczególnego zagrożenia powodzią** – obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest średnie i wynosi 1%; obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest wysokie i wynosi 10%; obszary między linią brzegu a wałem przeciwpowodziowym lub naturalnym wysokim brzegiem, w który wbudowano wał przeciwpowodziowy, a także wyspy i przymuliska, o których mowa w art. 224, stanowiące działki ewidencyjne i pas techniczny (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 34);

• **pas nadbrzeżny** – rozumiany jako „obszar wybrzeża" (DP); obszar lądowy przyległy do brzegu morskiego, w skład którego wchodzą: pas techniczny – stanowiący strefę wzajemnego bezpośredniego oddziaływania morza i lądu (jest on przeznaczony do utrzymania brzegu w stanie zgodnym z wymogami bezpieczeństwa i ochrony środowiska) – i pas ochronny – obejmujący obszar, w którym działalność człowieka wywiera bezpośredni wpływ na stan pasa technicznego (Ustawa z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej, Dz.U. 1991, Nr 32, poz. 131, art. 36);

• **powódź** – czasowe pokrycie przez wodę terenu, który w normalnych warunkach nie jest nią pokryty, 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 (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 43).

- **region wodny** – część obszaru dorzecza wyodrębniona na podstawie kryterium hydrograficznego na potrzeby zarządzania zasobami wodnymi lub znajdująca się na terytorium Rzeczypospolitej Polskiej część międzynarodowego dorzecza (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 46);
- **ryzyko powodziowe** – kombinacja prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi i potencjalnych negatywnych skutków powodzi dla życia i zdrowia ludzi, środowiska, dziedzictwa kulturowego oraz działalności gospodarczej (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1566, art. 16 p. 48).

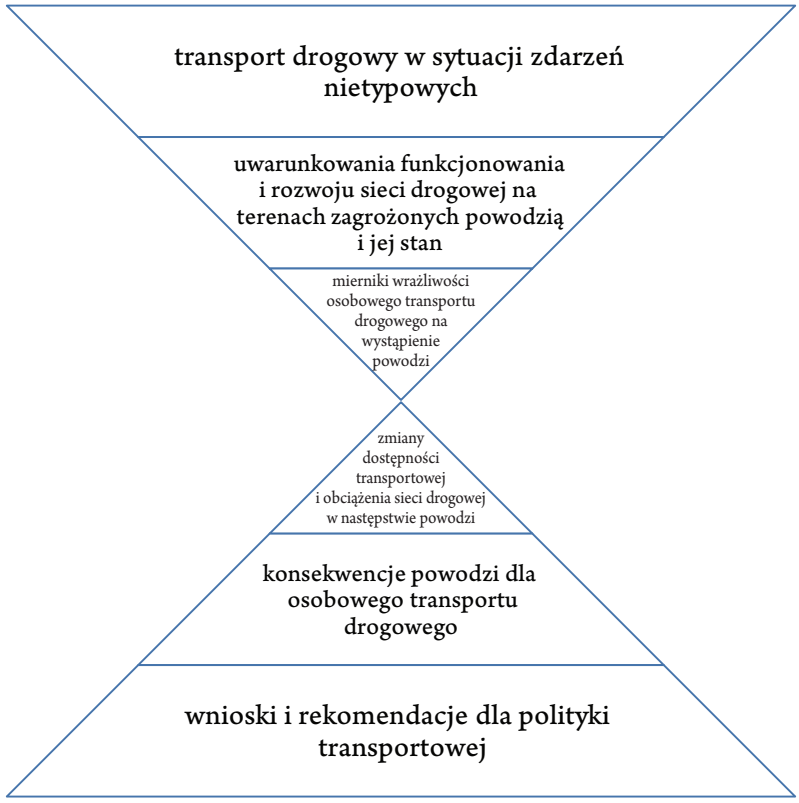
W zakresie zarządzania kryzysowego (Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym, Dz.U. 2007, Nr 89, poz. 590):

- **infrastruktura krytyczna** – systemy oraz wchodzące w ich skład powiązane ze sobą funkcjonalnie obiekty, w tym obiekty budowlane, urządzenia, instalacje, usługi kluczowe dla bezpieczeństwa państwa i jego obywateli oraz służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania organów administracji publicznej, a także instytucji i przedsiębiorców (art. 3 p. 2);
- **ochrona infrastruktury krytycznej** – wszelkie działania zmierzające do zapewnienia funkcjonalności, ciągłości działań i integralności infrastruktury krytycznej w celu zapobiegania zagrożeniom, ryzykom lub słabym punktom oraz ograniczenia i neutralizacji ich skutków, jak i szybkiego odtworzenia tej infrastruktury na wypadek awarii, ataków oraz innych zdarzeń zakłócających jej prawidłowe funkcjonowanie (art. 3 p. 3);
- **sytuacja kryzysowa** – sytuacja wpływająca negatywnie na poziom bezpieczeństwa ludzi, mienia w znacznych rozmiarach lub środowiska, wywołująca istotne ograniczenia w działaniu właściwych organów administracji publicznej ze względu na nieadekwatność posiadanych sił i środków (art. 3 p. 1).

1.5. Struktura opracowania i plan procedury badawczej

Przyjęta struktura monografii jest rezultatem realizacji głównego i szczegółowych celów opracowania. Praca składa się z dziewięciu rozdziałów, w tym części wstępnej i wnioskowej. Po wprowadzeniu w problem badawczy i cele pracy, jej problematykę oraz określeniu zakresów czasowego, przestrzennego, zasobu materiałów źródłowych i zarysu pojęciowego w opracowaniu zaczynają być realizowane kolejne założenia badawcze.

Nadając strukturę monografii, starano się zachować układ treści, której poziom uniwersalności nawiązywałby do poniższego schematu (ryc. 1.1):



Ryc. 1.1. Schemat układu treści monografii
Źródło: opracowanie własne

W związku z tym procedura badawcza rozpoczyna się od „szerokich" rozważań dotyczących wpływu różnego rodzaju zdarzeń nietypowych na transport drogowy. Następnie z szerokiej grupy zdarzeń uwaga przenosi się już ściśle na zjawisko powodzi. W dalszej kolejności omawiana jest metodyka badania relacji w zakresie dostępności i obciążenia sieci drogowej. Przy wykorzystaniu przedstawionych metod zrealizowana zostaje zasadnicza empiryczna część pracy. Na podstawie uzyskanych szczegółowych rezultatów przeprowadzona zostaje synteza wyników oraz możliwe ich uogólnienie z uwzględnieniem m.in. czynnika spójności przestrzennej i przy włączeniu do rozważań zmian w systemie transportowym związanych z realizacją inwestycji infrastrukturalnych. Zwieńczeniem postępowania badawczego są sformułowane wnioski i rekomendacje dla polityki transportowej zarówno szczegółowo odnoszące się do przeprowadzonych

symulacji, jak i o charakterze uniwersalnym. Zawarty w pracy przegląd literatury nie przyjmuje klasycznej, zwartej formy, lecz dokonywany jest etapowo, w kilku częściach monografii, w których podejmowane są rozważania na temat stanowiący przedmiot przeglądu.

Tak sformułowana procedura badawcza przełożyła się na układ i zawartość poszczególnych części opracowania. W rozdziale drugim podejmowany jest problem funkcjonowania transportu drogowego w okolicznościach wystąpienia zdarzeń nietypowych, przechodząc przez zagadnienia wprowadzające w problematykę ich oddziaływania na ofertę i funkcjonalność systemu transportowego. W tej części pracy omawiane są poszczególne rodzaje zdarzeń nietypowych oraz formy ich wpływu na funkcjonowanie transportu. Na tym tle szczegółowo omówiono zjawisko powodzi oraz jej oddziaływanie jako bariery transportowej. Przedstawiono rodzaje i cechy powodzi, dokonano syntetycznej charakterystyki powodzi historycznych ze szczególnym uwzględnieniem wątków transportowych, a przede wszystkim szczegółowo przeanalizowano badania dotyczące oddziaływania powodzi na transport drogowy, w tym w związku z procesem ewakuacji.

W rozdziale trzecim omówiono funkcjonowanie i rozwój sieci drogowej na terenach zagrożonych powodzią. Uwzględniono uwarunkowania przyrodnicze, wskazując dla każdego z regionów wodnych kluczowe cechy ich środowiska naturalnego oraz występujących na ich terenach powodzi. Kolejny z podrozdziałów koncentruje się na rozmieszczeniu ludności i zagospodarowaniu terenu (obszarów zagrożonych powodzią). Podawane są informacje na temat form zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią ze szczególnym uwzględnieniem tych związanych z infrastrukturą transportową oraz wysokości powiązanych z nimi strat. Analizie poddawane jest również rozmieszczenie ludności na terenach mogących ulec zalaniu wraz z uwzględnieniem ich znaczenia pod kątem organizacji ewakuacji i jej wpływu na warunki ruchowe. W zakresie rozważanych uwarunkowań omówione zostają również zagadnienia prawno-administracyjne, odnoszące się zarówno do kwestii ogólnego zagospodarowania na terenach zagrożonych, jak i do szczegółowych zagadnień wiążących się bezpośrednio z infrastrukturą drogową.

Rozdział czwarty obejmuje rozważania nad wpływem powodzi na infrastrukturę. W tej części monografii zaprezentowano zagrożone odcinki sieci drogowej, a także omówiono metodykę wyznaczania odcinków sieci drogowej zalanych przez wody powodziowe (w tym weryfikację konieczności wyłączania z użytkowania mostów). Poruszana jest w związku z tym między innymi tematyka modelowania hydrodynamicznego, wykorzystywania produktów LiDAR czy baz danych o inwestycjach infrastrukturalnych wykonywanych przez poszczególnych zarządców sieci.

W rozdziale piątym omówiono mierniki wrażliwości osobowego transportu drogowego na wystąpienie powodzi. W pierwszej kolejności zdefiniowano

pojęcie dostępności transportowej, jak i dokonano przeglądu metod jej badania z naciskiem na założenia, które przyjęto w tej konkretnej procedurze badawczej. Przedstawiono tutaj również założenia modelu prędkości osobowego ruchu drogowego. Druga część rozdziału stanowi natomiast wprowadzenie w problematykę mobilności, obciążenia sieci drogowej oraz metod pomiaru, symulacji i modelowania ruchu. Rozdział piąty kończy opis funkcjonowania narzędzia służącego modelowaniu rozkładu ruchu na sieć.

W empirycznych rozdziałach szóstym i siódmym znalazły się wyniki zastosowania przedstawionej wcześniej metodyki względem tak dostępności transportowej, jak i obciążenia sieci. W przedostatniej części monografii (rozdziale ósmym) dokonano syntezy uzyskanych rezultatów, wprowadzając dodatkowo do rozważań element prognostyczny, uwzględniający planowany rozwój infrastruktury drogowej. Monografię (w rozdziale dziewiątym) wieńczą wnioski o charakterze empirycznym i metodycznym, a także rekomendacje dla polityki transportowej służące obniżeniu wrażliwości systemu transportu drogowego na wystąpienie powodzi.

2

ZDARZENIA NIETYPOWE W TRANSPORCIE DROGOWYM

2.1. Przegląd zdarzeń nietypowych

Transport ujmowany bywa jako część procesu produkcji, w której dokonuje się przemieszczania osób (pasażerów) i ładunków z jednego miejsca na drugie (Berezowski 1975, Dziadek 1986). W szerszym kontekście transport definiować można jako działalność służącą do pokonywania przestrzeni lub jako proces technologiczny dotyczący wszelkiego przemieszczania na odległość (Tarski 1973, Lijewski 1986). W takiej perspektywie transport od innych procesów produkcji jest stosunkowo łatwo odróżniany w oparciu o techniczne, organizacyjne i ekonomiczne aspekty związane z celowym przemieszczaniem ładunków i pasażerów (Mindur 2005). Zagadnienia dotyczące transportu łączą się nierozerwanie z geografią, co wynika z cech opisywanej przez nią przestrzeni (w szczególności jej zróżnicowanego charakteru i stawiania przez nią oporu). Rucińska (1998) zauważa, że celowość przemieszczania wynika bezpośrednio z przestrzennej niezgodności pomiędzy elementami niezbędnymi do działalności człowieka. Wspomniana niezgodność wpływa na miejsca źródeł i celów przewozów, z kolei opór przestrzeni wespół z optymalizacją działalności człowieka (dążenia do jak najniższych kosztów) kształtuje macierze podróży oraz przestrzenne rozkłady ruchu. Na gruncie teorii organicystycznych transport porównywany jest do układu krwionośnego w organizmie, jakim jest krajobraz społeczno-gospodarczy (Gołembska i Szymczak 2004). Zgodnie z tą teorią ów krajobraz dąży do homeostazy (Parysek i Mierzejewska 2013), dlatego bardzo ważna jest identyfikacja nagłych zaburzeń funkcjonowania systemu transportowego, w tym jego komponentu drogowego. Daje to szanse na skuteczne zarządzanie ryzykiem związanym ze zdarzeniami krytycznymi.

Pomimo dużej wagi tego zagadnienia badacze zgłębiający tę problematykę napotykają pewne bariery w związku z ograniczoną ilością danych empirycznych oraz narzędzi do wspomagania procesów decyzyjnych. Duża część badań prowadzonych w kierunku ustalenia podatności sieci drogowej na zagrożenia przyjmuje charakter jakościowy, głównie w związku z brakiem precyzyjnie zdefiniowanych miar ilościowych dla tej problematyki (Chen i in. 2007). W literaturze przedmiotu prowadzona jest dość szeroka dyskusja dotycząca definiowania pojęcia wrażliwości transportu drogowego na zagrożenia (między innymi Einarsson i Rausand

1998, Berdica 2002, Jenelius i in. 2006). Dla przykładu: Berdica (2002) definiuje to zjawisko jako podatność na występowanie zdarzeń, które mogą skutkować poważnym zmniejszeniem się funkcjonalności sieci drogowej (Berdica 2002, s. 119, Holmgren 2004, s. 12). Ta koncepcja zyskała stosunkowo dużą akceptację w środowisku naukowym (Yang i in 2013). D'Este i Taylor (2003) twierdzą, iż element sieci jest podatny na zagrożenia, jeśli utrata (lub znaczące obniżenie wydajności) niewielkiej liczby połączeń poważnie zmniejsza dostępność takiego obiektu, mierzoną przy wykorzystaniu typowej metodyki badania dostępności transportowej. Istotność danego komponentu (odcinka, węzła, grupy odcinków i/oraz węzłów) w sieci obejmuje zarówno prawdopodobieństwo awarii tego komponentu, jak i konsekwencje takiej usterki dla systemu jako całości. Im bardziej istotny jest dany komponent, tym poważniejsza okazuje się awaria dla systemu, gdy tego komponentu zabraknie. Jeśli prawdopodobieństwo zdarzenia jest wysokie, to taki komponent (np. odcinek sieci) jest zagrożony. Z kolei jeżeli konsekwencje są znaczące, komponent jest istotny. Element można uznać za krytyczny wtedy, gdy jest jednocześnie zagrożony i istotny (Nicholson i Du 1994, Borowska-Stefańska i in. 2018).

Zmiany w wydajności powstałe w sieci na skutek zagrożeń zazwyczaj obejmują swoim oddziaływaniem obszar znacznie większy niż tylko ten, na którym zagrożenia wystąpiły, oraz mogą trwać znacznie dłużej, niż wynosi czas występowania samego zagrożenia (Jenelius i Mattsson 2012, Borowska-Stefańska i in. 2018, Do i Jung 2018, Borowska-Stefańska i in. 2019a). Zakłócenia w sieci transportowej obejmują zatem szeroki zakres kombinacji zarówno pod względem prawdopodobieństwa wystąpienia, jak i związanych z tym negatywnych konsekwencji: od drobnych wypadków, zdarzających się co jakiś czas, do mało prawdopodobnych awarii, np. mostów, które mogą skutkować poważnymi konsekwencjami (Berdica 2002).

Zakłócenia w transporcie drogowym można generalnie podzielić na te o charakterze typowym i nietypowym (Chen i in. 2016). Pierwsze z nich to takie, które wywołane są nierównomiernością popytu transportowego w czasie i przestrzeni i mają charakter cykliczny w określonym horyzoncie czasu. Bezpośrednim skutkiem zakłóceń, które wynikają ze zbyt dużego zapotrzebowania na transport pojawiającego się w szczytach poszczególnych cykli w stosunku do ograniczonej przepustowości, jest kongestia cykliczna (Grant-Muller i Laird 2007, Żochowska i Karoń 2012). Jest ona konsekwencją czynników, które oddziałują regularnie bądź też okresowo na system transportowy. Do innych przyczyn tego typu kongestii zaliczyć należy również niedorozwój infrastruktury transportowej lub jej niewłaściwe zaprojektowanie, błędy w projektach organizacji ruchu (np. źle skonfigurowana sygnalizacja świetlna) czy chociażby występowanie przejazdów kolejowych. Zjawisko tego typu kongestii jest szczególnie uciążliwe w okresach szczytu ruchu, który w niektórych obszarach (szczególnie miejskich) może

obejmować znaczną część doby (Karoń i Mikulski 2011, Żochowska i Karoń 2012, Borowska-Stefańska i in. 2018). Kongestia cykliczna może wykazywać duży stopień losowości, głównie z punktu widzenia czasu trwania i konsekwencji zakłóceń. Zakłócenia typowe są charakterystyczne przede wszystkim dla tych elementów sieci transportowej, których przepustowość jest niewystarczająca, by zaspokoić potrzeby transportowe. Miejsca te cechują się dużą podatnością na zakłócenia i stanowią tzw. wąskie gardła systemu (LOP – Lokalne Ograniczenia Przepustowości, ang. *bottlenecks*) (Dybicz 2014).

Jednak nie wszystkie zakłócenia spowodowane są niewystarczającą zdolnością przepustową elementów sieci. Jak wcześniej wspomniano, poza zakłóceniami typowymi wydzielić można również zakłócenia nietypowe, które traktowane jako efekt szczególnych chwilowych warunków lub okoliczności mogą być spowodowane wystąpieniem zdarzeń losowych, robotami inżynierskimi prowadzonymi w pasie drogi bądź w jej bezpośrednim sąsiedztwie oraz wydarzeniami (np. imprezami masowymi), które wymagają wprowadzenia odpowiedniej organizacji ruchu. Ponadto do przyczyn zakłóceń nietypowych zaliczyć należy również różnego rodzaju zdarzenia drogowe, niekorzystne warunki atmosferyczne, chwilowy zły stan nawierzchni czy też ataki terrorystyczne. Tego typu zakłócenia prowadzą do powstania kongestii przypadkowej (Skabardonis i in. 2003, Grant-Muller i Laird 2006, Jacyna 2009, Chung 2012, Żochowska i Karoń 2012). Prawdopodobieństwo jej powstania i rozmiar są zróżnicowane w zależności od typu sieci, jej redundancji i podatności na zakłócenia, związanej między innymi z efektywnością działań dotyczących zarządzania ryzykiem, właściwym planowaniem robót drogowych czy sprawnością w usuwaniu przeszkód w płynnym przemieszczaniu się pojazdów. O ile większość zakłóceń nietypowych wywołuje podobne, negatywne konsekwencje dla ruchu drogowego, to jednak nie wszystkie z nich charakteryzują się jednakowym stopniem losowości czy też trudnościami w ich przewidzeniu. Nawet z uciążliwymi warunkami atmosferycznymi można sobie lepiej radzić poprzez systemy aktywnego zarządzania prędkością i przygotowanie planów awaryjnych, które mogą znacznie zmniejszyć negatywny wpływ na ruch drogowy (Żochowska i Karoń 2012).

Wystąpienie zdarzeń nietypowych może doprowadzić do uszkodzenia sieci drogowej. Są to wszelkiego rodzaju awarie elementów drogi i jej wyposażenia, które skutkują ograniczeniami w ruchu czy też częściowym lub całkowitym wyłączeniem odcinka sieci z użytkowania. Jak stwierdza Marcinkowski (2006) defekty tego rodzaju mogą być skutkiem czynników niezależnych od eksploatacji, związanych z eksploatacją, jak i konsekwencją uszkodzeń celowych. Do pierwszej grupy zaliczyć należy między innymi: warunki atmosferyczne, geologiczne oraz działalność człowieka, która jednak nie wynika z użytkowania sieci drogowej.

Oceniając wrażliwość sieci drogowej na wystąpienie zdarzeń nietypowych, należy uwzględnić funkcję (istotność) poszczególnych jej odcinków, cechy ich

konstrukcji oraz przebieg w przestrzeni. Kryteria tej oceny są specyficzne w przypadku uszkodzeń celowych, związanych między innymi z prowadzeniem działań wojennych. Ponieważ mowa tu o grupie zdarzeń występujących w polskich warunkach geopolitycznych niezwykle rzadko, o cechach i genezie całkowicie odbiegających od wszystkich innych zdarzeń występujących w czasie pokoju, nie będą one szczegółowo charakteryzowane.

Warunki klimatyczno-pogodowe, jako czynnik niezależny od eksploatacji sieci, w znacznym zakresie warunkują wprowadzenie infrastruktury w przestrzeń geograficzną oraz późniejsze jej funkcjonowanie (Brijs i in. 2008, Antoniou i in. 2013, Mitsakis i in. 2014). Skupiając się na klimacie umiarkowanym przejściowym wskazać można rozmakanie czy podmywanie dróg jako przykłady tego typu oddziaływania, znacznie utrudniające dotarcie do przyjętego celu podróży. Za wysokie lub nazbyt niskie temperatury powietrza również mogą sprawiać problemy w transporcie. Odkształcenia nawierzchni asfaltowych rozmiękczonych zbyt wysokimi temperaturami skutecznie utrudniają funkcjonowanie transportu drogowego. Z kolei zbyt niskie temperatury przyczyniają się do powstawania wyrw w nawierzchniach poprzez naprzemienne zamarzanie i odtajanie wody znajdującej się w jej zagłębieniach (Mazur 1998). Ze wszystkich rodzajów opadów atmosferycznych najbardziej znaczące dla funkcjonowania transportu są deszcz i śnieg, ze względu na największą częstotliwość występowania. Ulewy niszczą odcinki dróg poprzez podmycia czy rozmycia (Mazur 1985). Dużym problemem są również zalegające na drogach pokrywy śnieżne. Bardzo groźne dla funkcjonowania transportu drogowego są ponadto gołoledź i szadź. Nieprawidłowe, pozbawione odpowiedniego odwodnienia utrzymanie dróg, ale również jesienne opady, niskie temperatury w okresie zimowym oraz intensywny wzrost temperatury na wiosnę – wszystko to może skutkować wytworzeniem się wysadzin i przełomów. Tego rodzaju uszkodzenia pozostawione bez zabiegów remontowych[1] przyczynić się mogą do całkowitego wyłączenia odcinka sieci z użytkowania.

Marcinkowski (2006) zwraca również uwagę na spływ i zsuw gruntów, wywoływane gwałtownymi opadami atmosferycznymi. Są to zjawiska szczególnie niebezpieczne w przypadku skarp i nieutwardzonych poboczy. Ruchy masowe dotyczą przede wszystkim odcinków sieci drogowej przebiegających przez tereny górskie i podgórskie. O ile „wyzwalaczem" tych niebezpiecznych dla transportu drogowego zjawisk są opady, to nie wywołałyby one tak daleko idących skutków bez sprzyjającego ułożenia warstw geologicznych. Do ograniczenia przepustowości na skutek zablokowania części lub całości odcinka sieci przez materiał skalny dojść może w przypadku, gdy ruch masowy następuje powyżej jego przebiegu.

[1] Wykonywanie robót przywracających pierwotny stan drogi, także przy użyciu wyrobów budowlanych innych niż użyte w stanie pierwotnym (Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985, nr 14, poz. 60 z późn. zm.).

Kiedy jednak odcinek sieci położony jest powyżej miejsca, gdzie dochodzi do usuwiska, istnieje prawdopodobieństwo uszkodzenia korpusu drogi w całym jej przekroju poprzecznym i na odcinku objętym ruchem masowym.

Jeśli drogi usytuowane na zboczach nie zostały odpowiednio zaprojektowane (z uwzględnieniem spływu wód i ich przeprowadzania pod nasypem), mogą powodować zakłócenia spływu wód powierzchniowych oraz przyczyniać się do erozji i zniszczenia nawierzchni (szczególnie jeśli posadowiona jest na silnie nawodnionych iłach, łupkach ilastych oraz innych słabo skonsolidowanych skałach). Sytuacja tego rodzaju może wystąpić, kiedy wody dostające się na drogę przekraczają założenia projektowe systemów odwadniających lub gdy dojdzie do ich zapchania. Do wspomnianych systemów odwadniających zaliczyć można rowy, przepusty, kanalizację deszczową wraz z infrastrukturą im towarzyszącą (separatory, obiekty retencyjne itp.). Każdorazowy niekontrolowany napływ wody może powodować wcinanie się żłobin oraz saturację zbocza nasypu. Nadmierne nasycenie może zaś prowadzić do jego obsuwania. Z powodu stałego nasycenia gleby wodą na obszarach, gdzie wody gruntowe uchodzą w dolnych partiach zbocza, trudno jest realizować inwestycje drogowe. Negatywne oddziaływanie w postaci podtapiania i erozji brzegów dotyczy natomiast odcinków dróg funkcjonujących w płaskim terenie, na przykład na dnie dolin, na tarasach i obszarach zalewowych (Forman i in. 2009). Nieprzygotowanie drogi do odprowadzania wody na etapie projektu czy później w ramach możliwych modernizacji może skutkować jej niestabilnością, szczególnie na obszarach, gdzie występuje silne oddziaływanie wód gruntowych (np. w miejscach, gdzie lokalne systemy wód gruntowych uchodzą w bezpośrednim sąsiedztwie skraju większych dolin rzecznych).

Woda i transportowany przez nią materiał stanowi zagrożenie dla elementów infrastruktury drogowej nie tylko na terenach o urozmaiconej rzeźbie, z wyraźnymi różnicami wysokości względnych, ale również na obszarach względnie płaskich. Brak konieczności prowadzenia rozległych zabiegów przygotowujących teren na wprowadzenie odcinka drogi to wyraźna przewaga ekonomiczna rozpatrywanego wariantu jego przebiegu. Z badań Formana i in. (2009) wynika, że najdotkliwszą formą wpływu wód na drogi na obszarach płaskich są zniszczenia powstałe poprzez zalewanie. Kiedy na płaskich terenach nizinnych podłoże drogi zostaje kilkukrotnie wysycone wodą, może to skutkować obsuwaniem się drogi, któremu towarzyszy zazwyczaj pękanie i destabilizacja jej powierzchni. Fala powodziowa o odpowiedniej prędkości i wysokości może spowodować ponadto zniszczenia wałów przeciwpowodziowych, poszczególnych elementów mostów czy innych budowli inżynierskich (oddziaływanie powodzi zostanie szczegółowo omówione w podrozdziale 2.2.3).

Brak skutecznego odwadniania dróg (szczególnie tych o utwardzonej jezdni), poza destrukcyjnym wpływem na infrastrukturę, może znacząco wpływać na warunki ruchowe. Jako przykłady podać można chociażby utratę

przyczepności pojazdu (akwaplaning) czy ograniczenie widoczności na skutek zalewania szyb pojazdu wodą pochodzącą spod kół pojazdu poprzedzającego (Forman i in. 2009).

Przegląd badań z zakresu czynników naturalnych mogących wpływać na funkcjonowanie transportu drogowego wskazuje, że to właśnie woda (w różnych stanach i formach) wydaje się głównym z nich. Dlatego też konieczne było wypracowanie szerokiego spektrum przepisów, norm i dobrych praktyk stosowanych na etapie projektowania, budowania i utrzymania dróg i drogowych obiektów inżynierskich (w tym szczególnie tych bezpośrednio narażonych na oddziaływanie cieków) służących zapobieganiu ewentualnym negatywnym konsekwencjom działalności wód, w tym powodziowych, i ich ograniczaniu. Z drugiej zaś strony Forman i in. (2009) podkreślają, że infrastruktura drogowa to „główny wróg" wody. W związku z tym uwzględnienie kwestii ekologicznych w realizacji inwestycji drogowych czyni to zadanie jeszcze bardziej wymagającym.

Uzupełnieniem listy czynników przyrodniczych mogących negatywnie oddziaływać na transport drogowy jest wiatr. W związku z globalnymi zmianami klimatu jego destrukcyjna działalność występuje coraz częściej. Można ją rozpatrywać w dwóch formach. Po pierwsze bezpośredniej, kiedy silny wiatr stawia opór poruszającym się pojazdom, czasami (szczególnie kiedy stan nawierzchni utrudnia zachowanie przyczepności) nawet je przewracając. Szczególnie narażone są na to pojazdy o dużej powierzchni bocznej, np. autokary czy naczepy ciągników siodłowych. Do sytuacji tego rodzaju dochodzi zarówno w otwartej przestrzeni, jak i np. podczas wyjeżdżania pojazdu z kompleksu leśnego. Silny wiatr oddziaływać może również pośrednio, poprzez nawiewanie na drogi różnego rodzaju materiału (często sprzyjającego wpadaniu w poślizg) czy też niszczenie roślinności lub np. linii napowietrznych, których elementy często spadają na drogi.

Kolejną grupę czynników środowiskowych (nie wyczerpującą zapewne całej ich listy) stanowią te związane z oddziaływaniem świata zwierząt. Chodzi przede wszystkim o ich przemieszczanie się, podczas którego często napotykają one barierę w postaci infrastruktury drogowej. Poza niezbyt licznymi przykładami bytowania zwierząt, które mogą być niebezpieczne dla transportu drogowego, na jego funkcjonowanie wpływają przede wszystkim wypadki ze zwierzętami (Komornicki i in. 2015). Tym samym jest to czynnik należący jednocześnie do grupy związanej bezpośrednio z eksploatacją infrastruktury.

Jeśli zaś chodzi o niebezpieczeństwa dla funkcjonowania sieci drogowej o pochodzeniu antropogenicznym, należy wymienić między innymi szkody górnicze. Przynoszą one zniszczenia o szczególnie dużej skali w przypadku odcinków sieci charakteryzujących się nawierzchnią sztywną, nieodporną na zniekształcenia tego rodzaju. Badania Marcinkowskiego (2006) wskazują, że kolejnym niezwykle

negatywnym dla użytkowania sieci drogowej zjawiskiem może być pożar w jej sąsiedztwie. Może on negatywnie oddziaływać po pierwsze na wykorzystanie infrastruktury w związku z pogorszeniem się w jego następstwie warunków ruchowych, chociażby poprzez zadymienie (np. pożary użytków rolnych). Po drugie zaś bardzo wysoka temperatura czy uszkodzenia mechaniczne, powstałe między innymi przez opadające fragmenty budynków czy drzew, oddziałują degradacyjnie na samą sieć drogową. Uszkodzeniu ulec może nawierzchnia drogi oraz poszczególne elementy jej wyposażenia.

Wśród prawdopodobnych awarii i katastrof na drogach lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie należy wymienić między innymi katastrofy lotnicze, samochodowe, kolejowe, chemiczne, energetyczne, rozlane paliwa, rozszczelnienia cystern przewożących ładunki niebezpieczne, rozsypania przewożonych środków chemicznych. Listę zdarzeń nietypowych o pochodzeniu antropogenicznym, zaburzających funkcjonowanie transportu drogowego, uzupełniają zablokowanie pasa jezdni w związku z blokadą dróg, strajkiem czy manifestacją, niekontrolowana migracja ludności czy akty terroru (Marcinkowski 2009).

Podkreślić należy, że wskazane czynniki mogą oddziaływać na funkcjonowanie transportu drogowego w sposób bezpośredni i pośredni. Stopień wpływu zależny jest bowiem nie tylko od cech samych elementów destrukcyjnych, ale również od otoczenia i czasu, w którym dochodzi do oddziaływania na transport drogowy. Stąd też, o ile bardzo trudne jest pełne wylistowanie czynników mogących utrudniać funkcjonowanie transportu drogowego, o tyle określenie kompletnej listy ich cech i konsekwencji wystąpienia jest zapewne niemożliwe.

Biorąc pod uwagę przedstawiony przegląd zdarzeń nietypowych w transporcie drogowym i form ich oddziaływania na jego efektywność, należy wskazać, że szczególnie podatne na tego rodzaju zaburzenia są segmenty sieci przebiegające w bezpośrednim sąsiedztwie rzek lub zalewów czy na obszarach osuwiskowych, nie będąc jednocześnie wyposażone w stosowne zabezpieczenia skarp wykopów i nasypów. Potencjalnie bardziej podatne są również odcinki sieci wybudowane na obszarach szkód górniczych, w bliskim sąsiedztwie działalności gospodarczej mogącej znacząco oddziaływać na otoczenie (np. skażenie) czy biegnące przez kompleksy leśne (Marcinkowski 2006).

W wyniku zaistnienia zdarzeń nietypowych sieć transportu drogowego (drogi i drogowe obiekty inżynierskie) poddana jest oddziaływaniu czynników ograniczających jej sprawność. Wystąpienie zdarzeń (pojedynczo lub w różnych kombinacjach) o odpowiedniej intensywności lub długości trwania może przyczynić się do przekroczenia odporności poszczególnych elementów sieci i wpłynąć na możliwości ich użytkowania. Niezależnie od pochodzenia czynników destrukcyjnych ich oddziaływanie sprowadza się między innymi do obciążenia wysoką temperaturą, ciśnieniem, ponadnormatywnego obciążenia

użytkowego czy obciążenia konstrukcji obiektu (Marcinkowski 2009). Pożar w obrębie sieci drogowej może skutkować wypaleniem nawierzchni oraz deformacją konstrukcji, co z kolei może doprowadzić do zmniejszenia nośności obiektu, stanowiąc podstawę do jego wyłączenia z eksportacji. Z niszczycielskim oddziaływaniem ciśnienia mamy do czynienia między innymi przy okazji przechodzenia fali powodziowej, spływu kry lodowej oraz innych obiektów niesionych przez wodę czy w związku z wybuchem np. niebezpiecznego ładunku cysterny. Przekroczenie dopuszczalnego obciążenia elementów sieci może wynikać z przemieszczania się po niej pojazdów o zbyt dużej masie czy nieprzewidzianie dużego potoku pojazdów w wyniku zmian organizacji ruchu. Zmniejszenie nośności obiektów drogowych czy utrata stateczności ich konstrukcji może być również skutkiem zmian warunków posadowienia konstrukcji czy efektów reologicznych i zmęczeniowych będących efektem cyklicznych i długotrwałych obciążeń (Marcinkowski 2009).

Użytkowanie sieci drogowej w warunkach wystąpienia któregoś z wymienionych zdarzeń nietypowych powinno być uregulowane i nadzorowane przez zarządców infrastruktury, tak aby utrzymała ona choć minimalny, akceptowalny przez użytkowników poziom sprawności. Powinni oni również zadbać o usuwanie zniszczeń bezpośrednich, pośrednich oraz w miarę możliwości realizować działania zmierzające do wyznaczenia objazdu dla wyłączonych z eksploatacji odcinków sieci.

2.2. Powódź jako bariera transportowa

Ustalenie dokładnej i wyczerpującej listy barier transportowych jest zadaniem niezwykle skomplikowanym. Wynika to z mnogości elementów, które mają wpływ na projektowanie sieci i systemów transportowych oraz późniejszą formę ich użytkowania. Dlatego też konieczne jest dokonywanie pewnych generalizacji oraz klasyfikacji w tej materii. Przykładem tego jest podział na bariery o charakterze antropogenicznym i przyrodniczym. W zakres pierwszej grupy wchodzą czynniki infrastrukturalne, ekonomiczne, prawno-administracyjne, psychologiczne czy popytowe. Drugą zaś wypełniają elementy fizyczno-geograficzne (geologiczne, ukształtowanie powierzchni, klimatyczno-pogodowe, hydrograficzne czy fauna i flora) i ekologiczne (Mazur 1998, Komornicki 1999, Komornicki i in. 2009, Rosik 2012, Wiśniewski 2015, Koziarski 2020). Całościowe ujęcie czynników determinujących efektywność funkcjonowania transportu odnosi się zatem do zagospodarowania przestrzennego (komponent przestrzenny), sieci transportowej (komponent transportowy), ale również do cech społeczno-ekonomicznych użytkowników (komponent indywidualny) ujawniających się w konkretnym momencie (komponent czasowy). Różnorodność zmiennych w każdej z grup

czynników daje duże pole manewru przy formułowaniu różnego rodzaju modeli i symulacji. Niezmiennie jednak występowanie każdego z typów czynników w charakterze bariery wiąże się ze zmniejszaniem atrakcyjności celu realizowanej podróży. Wystąpienie tak nietypowego zdarzenia, jakim jest powódź, może potęgować opór przestrzeni w drodze do przyjętej destynacji, a czasami może być też barierą na tyle silną, że dochodzi do rezygnacji z podroży.

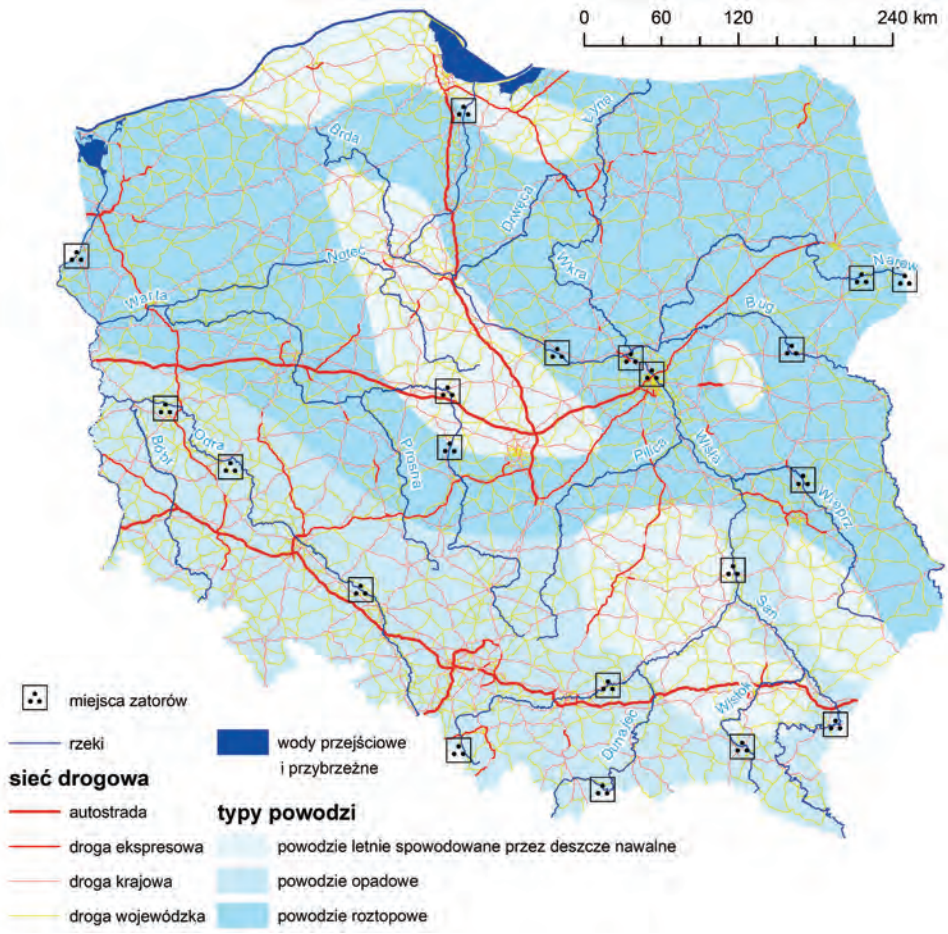
2.2.1. Wybrane cechy powodzi w Polsce

Zgodnie z art. 16 pkt 43 Ustawy Prawo wodne z dnia 20 lipca 2017 r. (Dz.U. 2018, poz. 2268) przez pojęcie powodzi rozumie się:

> [...] 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.

W literaturze istnieją różne klasyfikacje powodzi ze względu na takie kryteria jak zasięg, wielkość, geneza, a także charakter wezbrania (Lambor 1954, Mikulski 1997, Mioduszewski 1998, Byczkowski 2005). Cechy te mają istotne znaczenie dla wrażliwości i prężności systemu transportowego. Dlatego też powinny być uwzględniane zarówno na etapie planowania elementów sieci infrastruktury drogowej na terenach bezpośrednio zagrożonych oddziaływaniem wód powodziowych (ze szczególnym uwzględnieniem odporności i stabilności sieci), jak i tych, które mogą być dotknięte oddziaływaniem pośrednim, np. w postaci ruchu przełożonego (ze szczególnym naciskiem na opcjonalność/wariantowość systemu). Dobre rozpoznanie cech zagrożenia ma też niebagatelne znaczenie dla zarządców sieci drogowej i działań podejmowanych przez nich podczas wystąpienia zakłócenia (a wpływających między innymi na adaptowalność i elastyczność systemu) i przed/po nim (decydujących np. o jej operatywności). W monografii przedstawiono typy powodzi ze względu na ich genezę i przebieg. Lambor (1954) wyróżnił następujące typy powodzi:

- powodzie opadowe – są konsekwencją silnych opadów nawalnych albo rozlewnych (typ O);
- powodzie roztopowe – ich przyczyną jest gwałtowne topnienie śniegów (typ R);
- powodzie sztormowe – powstają na skutek silnych sztormów na zalewach i wybrzeżu (typ Sz);
- powodzie zimowe – ich przyczyną jest wyjątkowe nasilenie niektórych zjawisk lodowych (typ Z) (Borowska-Stefańska 2015b) (ryc. 2.1).



Ryc. 2.1. Zróżnicowanie przestrzenne występowania poszczególnych typów powodzi w Polsce ze względu na ich genezę i przebieg, na tle sieci drogowej w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Pajewska-Kwaśny 2012

Jak widać zarówno na rycinie 2.1, jak i w tabeli 2.1, powodzie mogą pojawiać się w ciągu całego roku, a w przypadku jednoczesnego odziaływania kilku niekorzystnych czynników (nagłe ocieplenie, sytuacja baryczna, intensywne opady) w jednym rejonie mogą wystąpić różne typy powodzi. Do najczęstszych typów powodzi w Polsce zaliczyć należy powodzie lądowe. Są to zarówno powodzie opadowe, roztopowe, jak i zatorowe (Kowalewski 2006, Pajewska-Kwaśny 2012). Ich główną przyczyną są jednak opady nawalne, frontalne lub rozlewne, które różnią się intensywnością i zasięgiem. Najgwałtowniejsze są przeważnie powodzie pochodzenia opadowego. W tym przypadku ważne jest także, czy są to powodzie wywołane przez deszcze nawalne, krótkotrwałe burze termiczne, czy

też deszcze pochodzenia frontalnego, spotęgowane orograficznym charakterem terenu. Dlatego też Lambor (1954) podzielił powodzie typu opadowego na nawalne i rozlewne, gdyż różnią się one przyczynami oraz zasięgiem terytorialnym, a ten jest ściśle związany z ekspozycją sieci drogowej i istotnością jej poszczególnych elementów. Deszcze nawalne, najczęściej pochodzenia termicznego, mają charakter lokalny – obojętnie, czy w obszarach nizinnych, czy górskich. Tym samym zakres ekspozycji jest zazwyczaj stosunkowo niewielki. Towarzyszą one burzom termicznym, stąd największe ich nasilenie przypada na miesiące letnie: lipiec i sierpień (typ On).

Powodzie opadowe wywołane deszczami frontalnymi przynoszą podobne skutki jak powodzie wywołane deszczami nawalnymi, jednak mają one zdecydowanie większy zasięg terytorialny – występują w całej Polsce (typ Of). W ich przypadku ekspozycja sieci transportowej jest potencjalnie zdecydowanie większa, a istotność jej poszczególnych elementów rozpatrywana jest w szerszej skali. Znacznie trudniejsze wydaje się w tym przypadku również zapewnienie opcjonalności ścieżek przejazdu. Prawidłowości te (odnoszące się do samej sieci w sposób modelowy) mogą zostać znacząco zmodyfikowane przez jej użytkowanie, wobec czego przełożą się na zróżnicowanie roli poszczególnych segmentów sieci w warunkach „normalnych". Opady o charakterze rozlewnym oraz pochodzenia frontalnego na obszarach o wielkim nasileniu opadów mogą być spotęgowane przez układ orograficzny sprzyjający wysokiej intensywności deszczów, np. w Sudetach. W tym układzie powodzie typu opadowego są szczególnie groźne, przyczyniają się do nadzwyczajnych katastrof powodziowych na górnej i środkowej Wiśle oraz na Odrze. Ten typ powodzi generuje najwięcej szkód (typ Or).

Powodzie roztopowe tworzą się w wyniku gwałtownego topnienia śniegu, wywołanego nagłym i wysokim wzrostem temperatury powietrza, które często jest potęgowane przez ulewne deszcze, przyspieszające topnienie. Ponadto tego typu powodziom towarzyszy z reguły utrzymująca się niska temperatura gruntu, co w wysokim stopniu zwiększa rozmiary spływu. Na małych ciekach omawiane typy powodzi skutkują powstawaniem katastrofalnie wielkich wód. Nie należy w tym miejscu pomijać roli pochodu lodu i jego potencjalnie destrukcyjnego oddziaływania, szczególnie na obiekty mostowe[2]. Powodzie roztopowe dominują w środkowej części kraju (środkowa Wisła, Narew, Bug, Noteć, Warta), a czas ich występowania przypada na luty i marzec (Starkel 1999, Kowalewski 2006).

---

[2] Budowla przeznaczona do przeprowadzenia drogi, samodzielnego ciągu pieszego lub pieszo-rowerowego, szlaku wędrówek zwierząt dziko żyjących lub innego rodzaju komunikacji nad przeszkodą terenową, w szczególności: most, wiadukt, estakada, kładka (Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. 2000, Nr 63, poz. 735).

Powodzie morskie typu sztormowego (typ Sz) występują w rejonach ujściowych odcinków rzek odpływających do morza oraz na terenach depresyjnych wybrzeża morskiego. Ich przyczyną są silne wiatry wiejące od morza w kierunku lądu, co utrudnia odpływ wód rzecznych i powoduje piętrzenie wody oraz zalewanie terenów przyległych. Tego typu powodzie występują w miesiącach zimowych, w szczególności w styczniu i grudniu, choć czasem również w lecie (Lambor 1954, Kowalewski 2006, Borowska-Stefańska 2015b).

Lambor (1954) podzielił powodzie zimowe na: zatorowe (Zz) i śryżowe (Zś). Różnią się one od siebie nie tylko pod względem przyczyn powstawania oraz przebiegu, ale także lokalizacji, zasięgu, okresu występowania i towarzyszących im warunków atmosferycznych. Przyczyną występowania powodzi śryżowych jest wielkie nasilenie tworzenia się lodu dennego oraz śryżu, który zatyka cały profil rzeki, piętrzy wodę nieraz do wysokości wałów, powodując groźne, lokalne wylewy. Najczęściej powodzie tego typu pojawiają się w grudniu i styczniu. Z kolei powodzie zatorowe spowodowane są zatorami w czasie spływu lodów. Mają one charakter lokalny, a czas ich występowania przypada od grudnia do marca (tab. 2.1). Dla systemu transportowego równie istotne jest oddziaływanie lodu nie tylko na poziom wód, ale i wspomniane, bezpośrednie działanie na obiekty mostowe. Jeśli dany obiekt nie będzie się charakteryzował odpowiednio wysokim poziomem stabilności i odporności, a jednocześnie będzie odgrywał istotną rolę w systemie, może wyczerpać jego możliwości adaptacyjne. Gdy znana jest podatność danego obiektu, już sama jego obserwacja (bez wystąpienia symptomów zniszczenia) może spowodować wyłączenie obiektu z użytkowania przez jego zarządcę.

Wieloletnie obserwacje rzek pokazują, że obok typów genetycznie jednorodnych, które wyróżnił Lambor (1954), występują również wezbrania typu mieszanego, np. na wybrzeżu, gdzie nakładają się na siebie powodzie sztormowe i wezbrania spowodowane opadami, roztopami bądź zatorami (Kowalewski 2006). Podana definicja oraz klasyfikacja wezbrań wg Lambora (1954) odpowiada naturalnym, niezmienionym przez człowieka warunkom hydrologicznym. Obecnie do przyczyn wezbrań zalicza się również katastrofy zapór wywołane wadami technicznymi oraz nadmiernym zasilaniem. Zjawiska takie jak trzęsienia ziemi, osuwiska, zatory lodowe, pływy morskie i wezbrania sztormowe zaostrzają zagrożenie powodziowe (Stachy i in. 1996) i jednocześnie czynią utrzymanie niezawodności systemu transportowego coraz większym wyzwaniem.

Powodzie generują najwyższe szkody w Polsce południowej, w obszarze dorzecza górnej i środkowej Odry oraz górnej Wisły. Najczęściej w naszym kraju mamy do czynienia z powodziami letnimi typu opadowo-nawalnego. Powodzie roztopowe dominują natomiast w środkowej części Polski. Rzadziej występują z kolei powodzie sztormowe, których zasięg obejmuje Wybrzeże, Żuławy oraz zalewy Wiślany i Szczeciński (Kowalewski 2006).

Tab. 2.1. Systematyka typów powodzi

Lp.	Typ powodzi		Symbol	Przyczyny	Zasięg i charakter	Okres występowania	
						ekstremalny	najczęstszy
1.	opadowe	nawalne	On	lokalne deszcze nawalne, burze termiczne	lokalne silne powodzie zarówno na potokach górskich, jak i małych ciekach	V–IX	VII–VIII
2.			Of	deszcze frontalne	szeroki zasięg terytorialny	IV–X	VI–IX
3.		rozlewne	Or	deszcze frontalne nasilane orograficznymi	długotrwałe, groźne powodzie z obszarów górskich	IV–X	VI–IX
4.	roztopowe		R	gwałtowne topnienie śniegów zasilone silnymi deszczami przy zamarzniętej powierzchni gruntu	szeroki zasięg przy sprzyjających warunkach	XII–III	III
5.	sztormowe		Sz	sprzyjająca sytuacja baryczna	wybrzeże morskie, Zalew Wiślany, Zalew Szczeciński	X–III VII–VIII	XII i I
6.	zimowe	śryżowe	Zś	gwałtowny spadek temperatury	lokalne powodzie w miejscach specjalnie predestynowanych	XII–III	XII i I
7.		zatorowe	Zz	spiętrzenie wody na zatorze w trakcie spływu lodów, najczęściej w profilach mostowych	lokalne, groźne na rzekach i potokach w miejscach o hamowanym spływie lodów	XII–III	III

Źródło: Lambor 1954.

Powódź jest uważana za jedną z najgroźniejszych w skutkach i najczęściej występujących form klęski żywiołowej (Hossain i Davies 2004, Drozdowska i Grabowski 2014). W wyniku globalnych zmian klimatu coraz częściej mamy do czynienia z występowaniem zdarzeń ekstremalnych, włącznie z powodziami, które mają bezpośredni wpływ na infrastrukturę techniczną, w tym transportową (Alcántara-Ayala 2002, Suarez i in. 2005, Garnaut 2008, Tsakiris, Bellos i Ziogas 2010).

2.2.2. Historyczne przykłady oddziaływania

Powodzie to zjawiska, które towarzyszą człowiekowi od zarania dziejów. Jak już wspomniano, należą do najgroźniejszych i najczęściej występujących katastrof naturalnych na świecie. Powodują ogromne szkody oraz stanowią zagrożenie dla życia ludzi. W latach 2002–2013 powodzie w Europie pochłonęły 1000 ofiar śmiertelnych i w wyniku ich wystąpienia konieczna była ewakuacja 1,7 miliona osób (Jonkman 2005, Czaban 2008, Jonkman i in. 2008, Radosavljevic i in. 2017, Adamson 2018, Borowska-Stefańska i Wiśniewski 2018, Borowska-Stefańska i in. 2019a).

O znaczącej roli powodzi w rozwoju społeczno-gospodarczym Polski, w tym funkcjonowaniu jej sieci transportowych (w szczególności drogowej), świadczą chociażby dane historyczne. Pierwsze informacje na temat powodzi na obszarze naszego kraju pochodzą ze starych kronik oraz archiwów, jak i ksiąg parafialnych (Mikulski 1962, 1963, 1997, 1998). Wiele na ich temat można dowiedzieć się między innymi z *Kronik* Jana Długosza. Pierwsza cytowana wzmianka dotyczy powodzi z 988 roku (Czaban 2008, Czaja 2010, Borowska-Stefańska 2015b).

Systematyczne obserwacje wahań stanów wody wykonywano od początku XIX w., dzięki czemu możliwe było zebranie dokładniejszych informacji o rozmiarach powodzi (Mikulski 1998, Grela i in. 1999, Czaban 2008). W tym okresie w Polsce wystąpiło 20 groźnych powodzi (Tyszka 1954). Do powodzi stulecia w XIX w. zaliczono te z lat: 1813, 1831, 1854, 1880 (Dubicki 1999). Największą z nich, zarówno pod względem wysokości wezbrania, jak i zasięgu terytorialnego, była powódź, która wystąpiła w sierpniu 1813 r. (objęła między innymi Polskę, tereny Niemiec, Czech i Węgier). W Polsce objęła ona górną i środkową Wisłę, Dunajec, a także górną i środkową Odrę i doprowadziła do ogromnych szkód, pochłonęła ofiary w ludziach, zniszczyła wiele wałów przeciwpowodziowych, mostów, zalała dzielnice mieszkalne oraz osiedla (Mikulski 1998, Barczyk i in. 1999, Czaja 2010, Franczak 2014, Borowska-Stefańska 2015b).

W XX w. w dorzeczu Wisły odnotowano 30 wielkich powodzi, największe z nich wystąpiły w latach: 1903, 1924, 1927, 1934, 1938, 1947, 1960, 1962, 1970, 1972, 1979, 1980, 1982, 1983, 1997. Z kolei w dorzeczu Odry najbardziej dotkliwe były powodzie z lat: 1903, 1924, 1930, 1938, 1940, 1941, 1947, 1953, 1965,

1977, 1985 oraz 1997. Z danych tych wynika, że w dorzeczu Wisły powodzie w XX w. pojawiały się średnio co 3 lata, natomiast w dorzeczu Odry – co ok. 5 lat (Maciejewski i in. 2011, Borowska-Stefańska 2015b).

Powódź opadowa, która wystąpiła w 1903 r., objęła swym zasięgiem znaczną część ziem polskich (dorzecze Odry, Soły, Wisły, Skawy, Rudawy, Raby i Dunajca). Podczas intensywnych opadów, trwających ponad tydzień, najbardziej ucierpiały Kraków i Wrocław. Pod wodą znalazło się 58 wsi i miast, a ponad 15 000 gospodarstw uległo zniszczeniu. W wyniku wystąpienia tego wezbrania rozpoczęto w Polsce budowę infrastruktury przeciwpowodziowej oraz zainicjowano regulację rzek (Diemientiew 2018). Do 1997 r. było to największe wezbranie w dorzeczu Odry (Dubicki 1999). Ponad 30 lat później (w 1934 r.) również odnotowano znaczącą powódź opadową, która wystąpiła w dorzeczu górnej Wisły. Następnie silne opady odnotowano w dorzeczach Raby, Skawy, Wisłoki, a w szczególności Dunajca. Powódź w dorzeczu Dunajca, Raby i Wisły doprowadziła do śmierci 55 osób. Ponadto zniszczeniu uległo 22 059 budynków. Powódź była również niezwykle destrukcyjna dla infrastruktury drogowej. Żywioł uszkodził 167 km dróg i zerwał 78 mostów. Po tej powodzi wybudowano zbiorniki retencyjne na Sole i Dunajcu. Z kolei w 1970 r. w Polsce wystąpiły dwa wielkie wezbrania: pierwsze – roztopowe na północy, drugie – opadowe w dorzeczu Wisły. W wyniku tych powodzi uszkodzonych zostało 980 mostów drogowych i kilkaset mostów miejskich oraz kilkanaście tysięcy budynków i bardzo liczne odcinki dróg. Śmierć poniosło wówczas 11 osób. Dziewięć lat po tej katastrofie wystąpiła powódź roztopowa, która swoim zasięgiem objęła przede wszystkim północną część kraju i wraz z licznymi podtopieniami trwała ponad dwa miesiące. Zniszczeniu uległo wówczas 17 749 budynków i 1 250 mostów, a także budowle hydrotechniczne i inne elementy infrastruktury (Diemientiew 2018). Kolejną katastrofalną w skutkach powodzią w analizowanym okresie była ta z 1997 roku. Na Odrze i niektórych jej dopływach przekroczyła ona swoimi rozmiarami wszystkie dotychczasowe. Ponadto objęła zasięgiem dorzecze Nysy Łużyckiej, jak również dorzecze i dopływy Wisły (Dubicki 1999, Diemientiew 2018). Była to powódź opadowa, która dotknęła niemal całą południową część kraju. Na skutek jej wystąpienia zginęło 55 osób. Ponadto powódź ta spowodowała olbrzymie straty gospodarcze i społeczne. Zniszczeniu uległo 72 267 budynków, 4048 mostów (z tego 304 na drogach krajowych i 3744 na drogach wojewódzkich), 14 433 km dróg (w tym 1247 km dróg krajowych, 13 186 km dróg wojewódzkich), 612,5 km obwałowań (Dubicki i in. 1999, Diemientiew 2018).

W XXI w. do największych powodzi, które wystąpiły w obszarach dorzeczy Wisły i Odry, zaliczyć należy te z lat 2001, 2005 oraz 2010 (Maciejewski i in. 2011, Borowska-Stefańska 2015b).

W 2001 r. na przełomie lipca i sierpnia wystąpiła katastrofalna powódź opadowa, która na wielu obszarach przyjęła charakter klęski żywiołowej, a miejscem

największego nasilenia groźnych zjawisk było dorzecze Wisły (w wyniku ulewnych deszczy w znacznym stopniu zalany został między innymi Gdańsk) (Diemientiew 2018).

W 2010 r. miała miejsce katastrofalna powódź opadowa, której skutkiem były ogromne straty materialne i ofiary w ludziach. Było to największe wezbranie opadowe od 1947 r., ale trzecie pod względem zarejestrowanych wysokości stanów wody w tym okresie (Tadeuszewski i Wilczak 2011). Powódź ta objęła swoim zasięgiem aż 15 województw w naszym kraju. W jej wyniku ewakuowano ponad 14 565 rodzin. Zniszczyła 18 598 budynków. Uszkodzeniu uległo wówczas 825 km dróg, 1625 mostów (Biedroń i in. 2011, Borowska-Stefańska 2015b, Diemientiew 2018).

W ramach wstępnej oceny ryzyka powodziowego stwierdzono, że w obszarze dorzecza Wisły powodzie najczęściej w ostatnich latach występowały w zlewni Wisły, Wieprza, Bystrzycy, Tyśmienicy, Pilicy, Narwi, Biebrzy, Bugu oraz Rawki (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły, 2016). Z kolei w obszarze dorzecza Odry do powodzi najczęściej (cztery lub więcej zdarzeń) dochodziło w zlewniach Odry, Nysy Kłodzkiej, Oławy, Baryczy, rzeki Orli, rzeki Bóbr, Kwisy, Nysy Łużyckiej (region wodny Środkowej Odry), Warty, Liswarty, Widawki, rzeki Grabii, rzeki Niecieczy, Neru, Prosny, Kanału Mosińskiego, Noteci (region wodny Warty), Parsęty, Wieprzy (region wodny Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego) (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry, 2016). Na obszarze dorzecza Pregoły powodzie mają charakter lokalny, najbardziej groźne na tym obszarze są powodzie roztopowe na rzekach Łyna i Guber (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Pregoły, 2016).

Długości uszkodzonych i zniszczonych dróg oraz liczby wyłączonych z użytkowania mostów wskazują, że polska sieć drogowa charakteryzowała się dotychczas znaczącą ekspozycją i podatnością na destrukcyjne działanie powodzi. Czyni to zagadnienie wrażliwości transportu drogowego na oddziaływanie tego rodzaju zjawisk nietypowych niezwykle istotnym.

2.2.3. Formy oddziaływania na transport drogowy

Należy podkreślić, że niezawodne (o wysokiej prężności) systemy transportowe są cenione właśnie za ich bezpieczeństwo (odporność i adaptowalność), niskie koszty przywracania do funkcjonalności (operatywność) oraz konkurencyjny czas podróży i regularność usług (Koetse i Rietveld 2009). Zachowanie płynności ruchu w sieci ma podstawowe znaczenie między innymi w logistyce,

w zakresie utrzymania łańcuchów dostaw i większości innych aktywności biznesowych, a poza tym jest kluczowym przedmiotem zainteresowania jej zarządców (Kordel 2002, 2013, Jenelius i in. 2006).

Transport drogowy jest niezbędnym składnikiem codziennego życia współczesnego społeczeństwa (Chen i in. 2007) i w sytuacji, gdy jego funkcjonowanie zostanie zakłócone przez zdarzenia zewnętrzne – w tym przypadku powódź – negatywne oddziaływanie skoncentruje się przede wszystkim na jego użytkownikach. Najczęściej na skutek wystąpienia zdarzenia wybrane lokalizacje (np. obiekty użyteczności publicznej) stają się dla nich mniej dostępne, co wpływa na obniżenie komfortu i poczucia bezpieczeństwa. Nie wszystkie odcinki sieci drogowej czy drogowe obiekty inżynierskie są równie istotne dla jej funkcjonowania w czasie, kiedy cała sieć wystawiona jest na działanie powodzi (Balijepalli i Oppong 2014). Dlatego też tak ważna jest ocena podatności sieci transportowych na zagrożenia, aby móc przygotować plany reagowania kryzysowego i zminimalizować utratę wydajności systemu po wystąpieniu powodzi (Chen i in. 2007, Kim i Yeo 2016).

Jak wspomniano wcześniej, warunki pogodowe to jedne z najważniejszych czynników mających wpływ na ruch na drogach i bezpieczeństwo jego uczestników (Brijs i in. 2008, Antoniou i in. 2013). Długotrwałe opady atmosferyczne doprowadzić mogą do powstania powodzi, która potrafi z łatwością zniszczyć budynki i budowle wzniesione przez człowieka. Największe zniszczenia tego rodzaju odnotowywano między innymi w infrastrukturze drogowej. W wyniku naporu wody zniszczeniu ulegały przepusty, mosty, rozmywane były nasypy. Tym samym należy spodziewać się, że w wyniku działania powodzi powstać mogą uszkodzenia skutkujące całkowitym wyłączeniem dróg z eksploatacji lub jej daleko idącym ograniczeniem. Zniszczeniu ulec może nawet cały przekrój poprzeczny drogi i to na dość długich jej odcinkach (Marcinkowski 2006).

Negatywne dla funkcjonowania transportu drogowego skutki oddziaływania wód powodziowych mogą być również związane z rozmyciem koryta cieku, w tym szczególnie groźnymi dla drogowych obiektów inżynierskich[3] podmyciami podpór, jak i rozmyciami stożków nasypów przy przyczółkach oraz samych nasypów. Bezpośrednią przyczyną podanych zjawisk jest zwiększenie prędkości przepływu wody. Tego typu niszczącej działalności wód powodziowych najskuteczniej jest przeciwdziałać jeszcze przed okresem przepływu wielkiej wody. Madaj i Wołowicki (2013) wskazują w tym zakresie na budowę wałów kierujących, odpowiednie kształtowanie koryta rzeki czy też wykonywanie wzmocnień dna przy podporach i wzmocnienie nasypów.

[3] Obiekt mostowy, tunel, przepust i konstrukcja oporowa.

Bardzo istotne dla przywrócenia systemu transportu drogowego do akceptowalnego stanu równowagi są także działania podejmowane, kiedy powódź już wystąpi. W czasie spływu wody nie wolno dopuścić do sytuacji, w której materiał transportowany przez wodę (fragmenty drzew, konstrukcji itd.) zatka otwory mostu bądź przepustu. Poskutkuje to bowiem spiętrzeniem cieku. Ochrona aktywna polega w tym przypadku na przepychaniu ewentualnych zanieczyszczeń gromadzonych się przed mostem lub przepustem. W skrajnie niebezpiecznych sytuacjach, gdy spiętrzenie wody jest już bardzo duże i grozi zniszczeniem obiektu, a wszelkie inne działania nie przyniosły zamierzonego skutku, można wykonać przerwanie nasypu na dojeździe do mostu, by przepuścić spiętrzoną wodę. Dlatego tak istotne jest pełnienie przez zarządców infrastruktury dyżurów w czasie zagrożenia powodzią (Madaj i Wołowicki 2013).

Rozmycie koryta rzeki nie musi prowadzić zawsze do powstania zagrożenia dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów sieci drogowej. Jeśli takie zjawisko zostało przewidziane w obliczeniach, a w przypadku mostów podpory zostały odpowiednio głęboko posadowione, prawdopodobieństwo wystąpienia katastrofalnych skutków wyraźnie spada. Jeżeli jednak w obliczeniach nie przewidziano możliwości rozmycia dna, a prędkość przepływu wody w korycie zabudowanym jest większa od prędkości krytycznej dla gruntu zalegającego na dnie, w celu zwiększenia odporności elementów sieci drogowej dno powinno zostać umocnione.

Przepływ wody powodziowej przez powierzchnię dróg może prowadzić do pogorszenia stanu ich nawierzchni, zwłaszcza gdy droga jest nieutwardzona. Powierzchniowy spływ wody z nachylonej powierzchni drogi może przyczynić się do erozji wąwozowej nasypu. Z tego rodzaju zjawiskami można spotkać się szczególnie często w przypadku infrastruktury zlokalizowanej poza terenami zabudowanymi. Woda powodziowa przedostaje się również do szczelin znajdujących się w jezdni, powodując pogorszenie się stanu nawierzchni drogi. Przedostanie się odpowiednio dużej ilości wody do łożyska drogi może skutkować erozją części jego materiału (Forman i in. 2009).

Na obszarach płaskich woda powodziowa często zalewa drogi na dłuższy czas, co umożliwia przesycanie ich podstawy, prowadzące do niestabilności. W zalanym korpusie drogi woda wypełnia przestrzenie między ziarnami i działa jak substancja smarująca. Zachwiana zostaje integralność strukturalna korpusu. Dotyczy to przede wszystkim tych obiektów, w których strukturze występują gliny. Woda stojąca przez długi okres (ze względu na niewielki kąt nachylenia) na powierzchni drogi doprowadza do uszkodzenia nawierzchni. Sprzyja temu szczególnie sytuacja, kiedy w momencie ustąpienia wody odcinek jest narażony na intensywny ruch pojazdów, szczególnie tych o dużej masie. Zdecydowanie najdotkliwiej odczuwają to drogi nieutwardzone.

Powodzie często zalewają drogi położone w dolinach rzek – mogą zmywać ich fragmenty, lecz najbardziej powszechnym skutkiem wystąpienia wód

powodziowych pozostaje *scouring*, czyli opisywane już rozmywanie przez spływającą wodę koryta rzeki i brzegów w pobliżu filarów mostów oraz ich przyczółków. Po ustąpieniu wód powodziowych wymagają one przeglądu, a w niektórych przypadkach wdrożenia procedur naprawczych. W zdecydowanej większości finalnie mogą być jednak dalej użytkowane.

Nieco bardziej skomplikowana sytuacja ma miejsce w przypadku odcinków sieci drogowej znajdujących się na płaskich terenach nadmorskich, eksponowanych na uderzenia gwałtownych fal sztormowych wywołanych przez huragany i inne silne burze. Te odcinki narażone są na znacznie bardziej rozległe zniszczenia, których usunięcie może być niemożliwe lub nieuzasadnione ekonomicznie. Powstaje w to miejsce zazwyczaj infrastruktura odporna na tego rodzaju oddziaływania.

W sąsiedztwie rzek drogi są zalewane przez wody powodziowe najczęściej tylko na kilka dni lub tygodni. Woda ma bowiem możliwość powrotu do rzeki po obniżeniu się jej poziomu w korycie cieku. Znacznie bardziej problematyczne jest podnoszenie się poziomu wody w basenie jeziornym czy mokradłowym pozbawionym kanału odpływowego (Forman i in. 2009). Po zalaniu pobliskich dróg może ona utrzymywać się na poziomie uniemożliwiającym ich użytkowanie przez znacznie dłuższy okres.

Powodzie mogą doprowadzić do całkowitego zamknięcia ruchu na drogach bądź ewakuacji z obszarów zagrożonych i pochłaniać ogromne środki finansowe. Zdarzenia te mogą spowodować ponadto wzrost zużycia paliwa, opóźnienia, wzrost liczby wypadków i generalnie znacząco wpłynąć na wydajność systemu transportowego (Rakha i in. 2007, Cools i in. 2010). Powodzie, w szczególności o charakterze błyskawicznym, które pojawiają się gwałtownie na skutek intensywnych opadów deszczu, stanowią główną przyczynę zakłóceń w transporcie (Brown i in. 2014, Pregnolato i in. 2017) i przypuszcza się, że problem ten będzie narastał w przyszłości (Dawson i in. 2016). Jest on szczególnie dotkliwy w sieci drogowej na obszarach miejskich, ze względu na wysoki udział powierzchni nieprzepuszczalnych, które uniemożliwiają infiltrację wody do gleby (Pregnolato i in. 2017).

Szkody powodziowe w zakresie elementów sieci transportowej i funkcjonowania systemu transportowego również można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Pierwsze to takie, które występują na skutek bezpośredniego oddziaływania powodzi na sieć i jej użytkowników. Natomiast szkody pośrednie mogą wystąpić na obszarze znacznie większym od dotkniętego bezpośrednio powodzią. Ponadto okres ich oddziaływania może być znacznie dłuższy od czasu trwania powodzi (Merz i in. 2004, Borowska-Stefańska 2015a; Borowska-Stefańska i Wiśniewski 2018). Przykładem tego typu szkód (pośrednich) mogą być zaburzenia ruchu (zmiany warunków ruchowych) czy też straty wynikające z ograniczeń jego produkcji (wystąpienie ruchu wzbudzonego lub tłumionego) wskutek

zniszczonej czy prewencyjnie wyłączonej z użytkowania infrastruktury (Merz i in. 2004, Thieken i in. 2005). Oba rodzaje szkód można również podzielić bardziej szczegółowo na materialne i niematerialne w zależności od tego, czy mogą one być wyrażone w jednostkach pieniężnych. Straty materialne to takie, które łatwo wyrazić w kategoriach pieniężnych, zaś niematerialne – nie są przedmiotem obrotu na rynku (Jonkman i in. 2008, Merz i in. 2010). Szkody bezpośrednie są zdecydowanie łatwiejsze do oszacowania niż szkody pośrednie (Merz i in. 2010). Największa część literatury przedmiotu odnosi się do szacowania bezpośrednich materialnych strat (Merz i in. 2004).

Istniejące w literaturze podejścia do oceny wpływu oddziaływania powodzi na funkcjonowanie transportu drogowego w zakresie powodowanych zakłóceń ruchu przyjmują między innymi następujące założenia:

- natężenie ruchu i prędkość ruchu (chwilowa, średnia, efektywna) w obrębie sieci lub poszczególnych analizowanych jej segmentów odpowiadają wartościom średnim w skali regionalnej (lub nawet krajowej) pomimo wystąpienia powodzi;
- droga objęta zasięgiem powodzi jest całkowicie zamknięta w przypadku, gdy jej nawierzchnia jest pokryta wodą, bez względu na jej głębokość;
- ruch na otwartych pomimo powodzi drogach jest płynny, jednak przy nieco zmniejszonej prędkości maksymalnej;
- na skutek wystąpienia powodzi następuje pogorszenie warunków drogowych i ruchowych, lecz intensywność ruchu nie przekracza przepustowości projektowej drogi;
- wprowadzane do modelowania i symulacji oddziaływania powodzi warunki ruchowe nie uwzględniają zmienności cyklicznych, np. w skali dziennej czy sezonowej;
- trasy wyznaczanych objazdów oraz zmiany (lub ich brak) w zachowaniu kierowców zaistniałe w następstwie powodzi są często ustalane bez jasnego uzasadnienia (Pregnolato i in. 2017).

Założenia te powinny być każdorazowo przystosowywane do specyfiki obszaru badań, w szczególności do obszarów zurbanizowanych, gdzie warunki ruchowe są najbardziej dynamiczne. Przykładowo w pracy Yin i in. (2016) przebadano wpływ powodzi na sieć drogowo-uliczną w Szanghaju. Zidentyfikowano odcinki sieci drogowej i potoki poruszających się po nich pojazdów, które są narażone na zalanie, w oparciu o wyniki modelowania hydrodynamicznego. Zastosowano w tym celu próg 30 cm głębokości wody na powierzchni jezdni, powyżej którego droga zostaje zamknięta dla ruchu (ujawnia się tu wskazany wcześniej związek pomiędzy głębokością zalania a skalą oddziaływania na ruch pojazdów).

Oszacowanie wpływu powodzi na ruch drogowy może pomóc w odpowiednim zarządzaniu systemami transportowymi, tak aby ten wpływ zminimalizować. Aby to jednak było możliwe, zarówno badacze, jak i praktycy muszą

mieć zapewniony dostęp do zestawu danych dotyczących powodzi (które w Polsce można pozyskać z map zagrożenia i ryzyka powodziowego) oraz modeli analitycznych, dzięki którym możliwe byłoby zestawianie cech ruchu pojazdów z konkretnymi warunkami występującymi podczas powodzi (Rakha i in. 2007). Dlatego też odnosząc się do powodzi, niezwykle ważne jest właściwe zarządzanie jej ryzykiem i to na każdym etapie. Dla przykładu: w trakcie wystąpienia powodzi można tak zarządzać ruchem, aby zminimalizować jego przepływ przez potencjalnie zagrożone odcinki sieci. Znając obszar, który może zostać zalany, reagując na ostrzeżenia hydrologiczne, można odpowiednio wcześniej reagować.

Badania wskazują, że istnieje co najmniej kilka możliwych reakcji na obniżenie wydajności systemu transportowego dotkniętego destrukcyjnym działaniem wód powodziowych czy też samym ryzykiem takiej degradacji w różnych lokalizacjach. W niektórych przypadkach reakcja ta może polegać na zmianie parametrów użytkowych lub technicznych kluczowych elementów infrastruktury transportowej, na przykład poprzez podniesienie jej rzędnej powyżej zakładanych maksymalnych poziomów zalewowych (obniżenie podatności). Często podczas tak daleko idącej ingerencji poprawiają się również warunki drogowe. Czasami powoduje to, że sieć jest bardziej uzależniona od tych właśnie kluczowych elementów (wzrasta ich istotność) i jest przez to bardziej wrażliwa na ich awarię. Alternatywnym podejściem jest dodawanie nowych odcinków do sieci (szczególnie alternatywnych dla zagrożonych segmentów), zwiększających jej wariantowość (Taylor i D'Este 2007). Zagadnienie to jest niezwykle istotne także z punktu widzenia bezpieczeństwa, bowiem systemy transportowe wchodzą w skład infrastruktury krytycznej, za sprawą której możliwe jest sprawne funkcjonowanie organów administracji publicznej, jak również instytucji i przedsiębiorstw (Ładysz i Ładysz 2010).

2.3. Transport w procesie ewakuacji

Wystąpienie powodzi czy też pojawienie się jej symptomów skutkować może realizacją procesu ewakuacji, który nie pozostaje bez wpływu na funkcjonowanie systemu transportowego. Sieć drogowa może zostać obciążona ruchem w związku z przemieszczaniem się ludności (czy transportem zwierząt lub mienia) z terenów zagrożonych do miejsc bezpiecznych. Z drugiej zaś strony część podróży o innych motywacjach (w tym tych realizowanych z wykorzystaniem indywidualnego transportu samochodowego) może się w związku z nią nie odbyć. Konsekwencje dla transportu drogowego można zatem rozpatrywać zarówno w odniesieniu do podróży związanych z ewakuacją, jak i do ich wpływu na równowagę całego systemu.

Aktualnie odchodzi się od założenia, że istnieje skuteczna metoda ochrony przed powodzią, na rzecz podejścia, zgodnie z którym całkowita ochrona jest niemożliwa (szkody oraz straty można jedynie ograniczać) (Schanze i in. 2007). By zmniejszyć negatywne skutki powodzi w zakresie bezpieczeństwa ludności, powinno się skupić m.in. na utrzymaniu gotowości obejmującej informowanie mieszkańców i ostrzeganie ich o zagrożeniu powodziowym oraz o zasadach postępowania w wypadku jego wystąpienia (zasady ewakuacji) (Eikenberg 1998, Gunes i Kovel 2000, Plate 2002, Drużyńska i Nachlik 2006, Nachlik 2007, 2008, Sieradzka-Stasiak 2010, Borowska-Stefańska 2015b). Należy w tym miejscu wskazać na wyraźną różnicę pomiędzy poszczególnymi etapami zarządzania ryzykiem powodziowym, tj. ochroną przed powodzią i postępowaniem awaryjnym. W przypadku ochrony przed powodzią nadrzędnym celem jest efektywne zabezpieczenie przed skutkami wezbrania w taki sposób, aby nie doszło do bezpośredniego kontaktu wody z ludźmi i majątkiem. W przypadku postępowania awaryjnego celem jest jak najsprawniejsze przeprowadzenie akcji przeciwpowodziowej. W odniesieniu do ludności koncentruje się ono na ochronie życia i zdrowia oraz ograniczeniu skutków materialnych powodzi w trakcie akcji ratowniczej, sprawności transportowej w zakresie ewakuacji ludzi oraz ich mienia, a także dostarczania materiałów i urządzeń do ograniczenia szkód oraz zabezpieczania obiektów użyteczności publicznej, w których przebywa duża liczba osób (Buczek i Nachlik 2011).

Ewakuacja to jedno z podstawowych działań mających na celu ochronę życia i zdrowia ludzi, ale także zwierząt, ratowanie mienia, w tym również zabytków oraz ważnej dokumentacji, w przypadku wystąpienia wszelkiego rodzaju zagrożeń. Może być przeprowadzana w różnych stadiach zdarzeń niebezpiecznych – może mieć np. charakter prewencyjny, co oznacza, że przeprowadza się ją z terenów i obiektów w przypadku zbliżającego się zagrożenia, np. związanego z rozprzestrzenianiem się zaistniałych zjawisk niebezpiecznych, w tym powodzi. Ewakuacji podlegają wszyscy, którzy znajdują się w granicach zagrożonych terenów. Pierwszeństwo ewakuacji obejmuje m.in. matki i dzieci, kobiety ciężarne, osoby niepełnosprawne, osoby przebywające w zakładach opiekuńczych, domach dziecka, podopiecznych placówek opieki społecznej itp. (Barć 2017). Ewakuację należy przeprowadzać nie tylko szybko, ale również skutecznie (Richter i in. 2013). Przeprowadzenie ewakuacji jest konieczne, aby przetransportować ludność przebywającą w granicach terenów zagrożonych katastrofą do miejsc bezpiecznych (Hsu i Peeta 2014). Decyzja o ścieżce ewakuacji jest podejmowana przez wiele osób jednocześnie, a w dodatku posiadają one jedynie ograniczoną wiedzę na temat zaistniałej sytuacji kryzysowej, co utrudnia planowanie jej przebiegu.

Wytyczne co do procesu ewakuacji (uwzględniające rozproszenie, rozśrodkowanie i wycofanie – Przeworski 2002) o zróżnicowanym poziomie

szczegółowości zapisów znajdować się mogą m.in. w: planach zarządzania kryzysowego, planach operacyjnych ochrony przed powodzią czy planach ewakuacji/przyjęcia ludności dla gmin, powiatów i województw. Ponadto do problematyki ewakuacji ludności, dostępności do niej i ewentualnych ścieżek ewakuacji odnosić się mogą: analizy gotowości operacyjnej komend powiatowych Państwowej Straży Pożarnej (KP PSP), plany ratownicze na wypadek wystąpienia katastrofy naturalnej oraz konieczności zapewnienia sił i środków przewidzianych do reagowania kryzysowego czy też plany działania Komendanta Wojewódzkiego Policji w warunkach katastrof naturalnych lub awarii technicznych. W niektórych przypadkach dokumenty te w sposób bardzo precyzyjny odnoszą się do organizacji transportu w ramach procesu ewakuacji. Dla przykładu: w poradniku dla ludności w Bornem Sulinowie wskazano, że ewakuacja (transportem samochodowym) powinna odbywać się w kolumnach liczących do 10 pojazdów, ze średnią prędkością 20 km/h. W każdym pojeździe samochodowym wyznacza się osobę odpowiedzialną za znajdujących się w nim pasażerów. Przewodnik kolumny powinien znać trasę, warunki przejazdu tą trasą i dysponować jej szkicem. Do zakwaterowania ewakuowanej ludności wykorzystuje się: ośrodki wczasowe, domy wypoczynkowe, hotele, internaty, świetlice i inne pomieszczenia nadające się do tego celu. W razie potrzeby ludność ewakuowaną dokwateruje się do ludności miejscowej (Zasady zachowania się ludności w czasie ogłoszenia informacji o konieczności ewakuacji – poradnik dla ludności, 2016, p. 2–4).

Mając świadomość rozległości działań, jakie podejmowane są dla zapewnienia bezpieczeństwa ludności, trzeba jednocześnie pamiętać o funkcjonujących w literaturze przedmiotu dwóch generalnych podejściach do procesu zarządzania w czasie wystąpienia zdarzeń nietypowych (w tym powodzi). Zgodnie z pierwszym z nich wszelkie planowanie i powstałe w jego wyniku dokumenty w tym zakresie nie przynoszą spodziewanych rezultatów. Drugie natomiast mówi, że efektywniejsze planowanie może poprawić poziom bezpieczeństwa (Cook i Zurita 2016). Część autorów przyjmuje, że niemożliwe jest opracowanie dokładnych prognoz czy skutecznych planów działań (Clarke 1999, McConnell i Drennan 2006), a mimo to badania mające na celu poprawę zarządzania w sytuacji kryzysowej pozostają ograniczone przede wszystkim do lepszych przewidywań i lepszych reakcji, zwykle planowanych jako optymalizacja komponentu transportowego (Cook i Zurita 2016). Zakładając nawet nieskuteczność tego rodzaju zabiegów (Boin i McConnell 2007), ich prowadzenie uzasadnia chociażby to, że wpływają uspokajająco na ludność zamieszkującą zagrożone tereny (Clarke 1999, Kendra i Wachtendorf 2003). Bazowanie na planach kryzysowych może prowadzić jednostki odpowiedzialne za zarządzanie kryzysowe do zmniejszenia czujności i rezygnacji z uczenia się. Również wdrażanie działań zapobiegawczych może ucierpieć, jeśli uzna się, że istnieje skuteczny plan radzenia sobie z sytuacjami kryzysowymi.

Zgodnie z funkcjonującą w polskich warunkach instrukcją w sprawie zasad ewakuacji ludności, zwierząt i mienia na wypadek masowego zagrożenia, wydaną przez Szefa Obrony Cywilnej Kraju (2008), rozróżnić należy trzy stopnie ewakuacji (w zależności od specyfiki i konsekwencji jej przeprowadzania). Ewakuację I stopnia przeprowadza się niezwłocznie po wystąpieniu nagłego, nieprzewidzianego i bezpośredniego zagrożenia dla ludności. Realizuje się ją po wystąpieniu określonego zagrożenia dla życia, zdrowia i mienia (wybuchu, awarii technicznej, chemicznej itp.). Uprzednio zaplanowane przemieszczenia ludności (oraz zwierząt i mienia) z terenów sąsiadujących z obszarami lub obiektami stanowiącymi źródło potencjalnego zagrożenia w przypadku ich uszkodzenia lub awarii to natomiast ewakuacja II stopnia. Decyzję o takim działaniu podejmuje się w przypadku pojawienia się symptomów wystąpienia zagrożenia. Ewakuacja III stopnia to proces odbywający się na podstawie uprzednio przygotowanych planów. Przeprowadza się ją podczas podwyższania stanu gotowości obronnej państwa w reakcji na wystąpienie zagrożenia dla bezpieczeństwa państwa, w tym wojny. W przypadku powodzi można więc mówić o stopniu II. Chociażby ze względu na moment rozpoczęcia procesu i możliwość jego etapowania groźba wystąpienia zagrożenia lub rzeczywiste jego wystąpienie w inny sposób warunkuje kwestie związane z organizacją transportu osób ewakuowanych oraz w inny sposób będzie wpływać na warunki ruchowe w lokalnej sieci transportowej (Esm i in. 2010).

Niezależnie jednak od rozkładu decyzji związanych z ewakuacją na osi czasu kluczową kwestią (również ze względu na organizację transportu) jest jej rozpatrywanie z uwzględnieniem zdolności ludności do samoewakuacji (Czerechowski 2015), rozumianej jako przemieszczanie się ludności z rejonów, w których może wystąpić lub wystąpiło bezpośrednie zagrożenie, poza strefę zagrożenia z wykorzystaniem przede wszystkim własnych możliwości, w tym środków transportu. W czasie oczekiwania na nadejście fali powodziowej lub podczas samej powodzi ewakuacja zagrożonej ludności będzie miała nieco inne cechy. W takich przypadkach może ona mieć formę samoewakuacji (planowanej i doraźnej) lub ewakuacji planowej (Rawłuszko 2016). Samoewakuacja planowana (zorganizowana) ma miejsce w czasie, kiedy tereny zamieszkałe nie zostały jeszcze zalane wodą, a prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest duże. W takiej sytuacji mieszkańcy po otrzymaniu informacji lub na podstawie własnej obserwacji cieków bądź zbliżającej się fali powodziowej sami mogą dokonać samoewakuacji. Najczęściej zostanie w tym zakresie użyty własny środek lokomocji. W przypadku gdy gospodarstwo domowe nie dysponuje samochodem lub innym własnym środkiem transportu, lokalne centrum kryzysowe w swoich planach samoewakuacji planowanej danej rodziny powinno uwzględnić dla nich środki transportu własne lub sąsiadów. Forma samoewakuacji doraźnej (spontanicznej) występuje w sytuacji bezpośredniego zagrożenia falą powodziową.

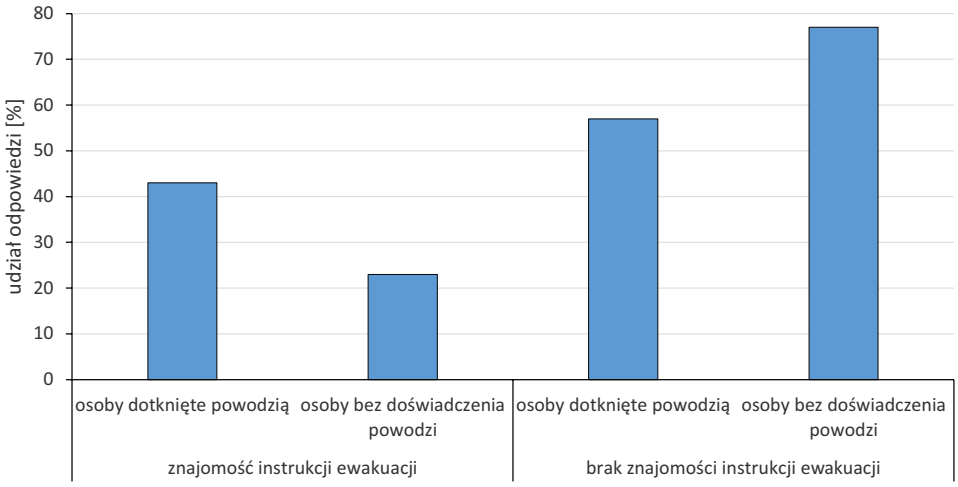
W takich okolicznościach ludność powinna przystąpić do natychmiastowej samoewakuacji przy użyciu własnego środka transportowego w bezpieczne miejsce. Natomiast ewakuacja planowa (zorganizowana) dotyczy przygotowanego przemieszczania się ludności z rejonów zalewowych, przyległych do obiektów hydrotechnicznych, stanowiących potencjalne zagrożenie dla ludności, mienia i środowiska. Po wskazaniu prawdopodobnych zagrożeń na badanym terenie konieczne jest przewidzenie niezbędnej liczby środków transportu do przewozu ewakuowanej ludności z rejonów ewakuacji w rejony rozmieszczenia. W planowaniu tym należy uwzględnić własne środki transportu ewakuowanej ludności oraz transport samochodowy (autobusowy) i ciężarowy z danej gminy, a także ewakuację pieszą (Rawłuszko 2016).

Rolę indywidualnego transportu samochodowego podkreślono również w instrukcji przygotowanej przez Obronę Cywilną Kraju. Wskazuje ona, że w większości przypadków ten rodzaj ewakuacji jest dominującym elementem w procesie jej planowania i przeprowadzania. Dlatego też tak istotne jest rozpoznanie możliwej skali samoewakuacji oraz identyfikacja jej potencjalnych kierunków i rejonów, dróg ewakuacji czy zapewnienie zaopatrzenia w paliwa oraz pomocy technicznej na trasach ewakuacji. W przypadku poruszania się ewakuowanej ludności własnymi środkami transportu kierowanie przebiegiem ewakuacji ogranicza się do wskazywania zaleconych kierunków, dróg (ewakuacji) i rejonów (docelowych miejsc) dla ewakuowanych. Ewakuacja ludności powinna odbywać się z reguły w obrębie danej jednostki administracyjnej (w zależności od skali zagrożenia może to być jedynie gmina, ale równie dobrze województwo). Zgodnie z instrukcją w przypadku ewakuacji II stopnia wyznacza się drogi ewakuacji. W planie ewakuacji (przyjęcia) ludności na szczeblu województwa należy wskazać drogi dla ludności przemieszczającej się w ramach samoewakuacji i drogi ewakuacji ludności, a na szczeblu powiatowym i gminnym drogi wyznaczone w celach związanych z ewakuacją ludności. Tworząc plany ewakuacji, nie należy przyjmować jednego uniwersalnego modelu dla różnego rodzaju zagrożeń (Ogrodniczak i Ryba 2015). W zakresie zagadnień transportowych, uwzględniając zasięg ewakuacji, należy wziąć pod uwagę możliwości wykorzystania indywidualnego transportu oraz odnieść się do zasad kierowania ruchem i jego organizacji (Czerechowski 2015). Dla przykładu: w przypadku wystąpienia powodzi z rejonów zalanych nie ewakuuje się ludności za pomocą autobusów, ponieważ jest to technicznie niemożliwe.

Potok pojazdów związany z samoewakuacją (niezależnie, czy planowaną, czy doraźną) nie pozostaje bez wpływu na równowagę systemu transportowego, szczególnie wobec równolegle planowanych lub realizowanych wyłączeń odcinków sieci drogowej z użytkowania (np. na skutek groźby zalania czy naruszenia stabilności konstrukcji). Samoewakuacja nie może być jednak jedyną formą przemieszczania ludności ze strefy zagrożenia do miejsc bardziej bezpiecznych

(Gromek i in. 2014). Konieczne jest również uwzględnienie transportu osób samotnych, starszych, chorych (zwłaszcza tych o ograniczonej mobilności) czy przebywających w zakładach penitencjarnych, które nie są w stanie lub nie mogą podjąć się ewakuacji samodzielnie (Gromek 2014). Dla realizacji transportu zorganizowanego przez odpowiedzialne za to służby samoewakuacja może stanowić istotną barierę, aktywując np. lokalne ograniczenia przepustowości (Lumbroso i in. 2008). Katalog przykładowych zagrożeń wtórnych, jakich mogą doświadczyć przedstawiciele społeczności lokalnych podczas ewakuacji ludności w obliczu klęski żywiołowej, jest niezwykle szeroki. W zakresie zagadnień transportowych wymienić należy chociażby kolizje i wypadki komunikacyjne czy niewydolność systemu transportu drogowego w czasie przejazdów ewakuacyjnych (Gromek 2015).

Zgodnie z wynikami badań pilotażowych przeprowadzonych w Instytucie Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej Uniwersytetu Łódzkiego na grupie 500 gospodarstw domowych zamieszkujących na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie 1%, doświadczenie powodzi wpływa na znajomość treści instrukcji ewakuacji (ryc. 2.2).



Ryc. 2.2. Doświadczenie powodzi a znajomość instrukcji ewakuacji wśród ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2020 r.

Źródło: opracowanie własne

Zdaje się to wpisywać w przedstawioną w Planie zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły (2016) myśl, że w praktyce najskuteczniejszym impulsem do wdrażania działań chroniących przed powodzią jest doświadczenie własne mieszkańców lub tzw. pamięć pokoleń. Zazwyczaj świadomość

zagrożenia przekazywana z pokolenia na pokolenie skutkuje świadomymi zachowaniami transportowymi w związku z ewakuacją. Doświadczenie powodzi uczy także umiejętności zabezpieczania się przed stratami i szkodami. Bardzo pozytywny obraz przynosi deklarowana przez zagrożoną ludność znajomość ścieżek ewakuacji. Aż 83% ankietowanych wskazało, że wie, dokąd i jaką ścieżką powinno się poruszać, kiedy konieczne będzie opuszczenie domu w związku z zagrożeniem. 60% tej grupy ludności będzie się kierować do wskazanych miejsc zbiorowego zakwaterowania ludności ewakuowanej (np. szkoły, świetlice).

Zakładając, że ewakuacja odbywać się będzie z wykorzystaniem indywidualnego transportu samochodowego, potok pojazdów kierujących się do jednego celu podróży może skutkować ujawnianiem się wąskich gardeł sieci drogowej. Członkowie co trzeciego gospodarstwa domowego będą mieli możliwość skierowania się do rodziny, znajomych czy sąsiadów zamieszkujących poza terenami zagrożonymi. Niemalże 70% przebadanych gospodarstw domowych jest gotowych (w tym 49% zdecydowanie) do podjęcia się samoewakuacji. Uwzględniając wyłącznie zdecydowane deklaracje, wyniki są niemalże identyczne z tymi otrzymanymi przez Gromka (2014) i Gromka i in. (2014). Jednak, jak słusznie podkreśla ich autor, są to wyniki deklaratywne, a realne postrzeganie zagrożenia może je znacząco zmienić. Oddziaływanie samoewakuacji na system transportowy wymaga uwzględnienia również ze względu na deklarowany do wykorzystania w tym celu środek transportu. Aż 84% przemieszczeń miałoby się odbyć przy wykorzystaniu samochodu osobowego, czemu wydaje się sprzyjać wysoki poziom zmotoryzowania (jedynie 5% gospodarstw domowych nie dysponuje ani jednym pojazdem) oraz bardzo niska liczba przypadków, w których konieczny jest udział stosownych służb (np. ze względu na stan zdrowia) – 12% gospodarstw domowych.

W literaturze przedmiotu obecne są liczne prace odnoszące się do procesu ewakuacji w kontekście organizacji transportu. Ich rzetelnego przeglądu dokonali m.in. Murray-Tuite i Wolshon (2013). Jedne podejścia rozpatrują jedynie ewakuację w kategoriach dostępności ewakuowanej ludności do miejsc ewakuacji (Borowska-Stefańska i in. 2017), inne zaś koncentrują się na samym procesie ewentualnej ewakuacji z uwzględnieniem jedynie wyjazdu ludności z terenów zagrożonych. Na przykład w ujęciu zgodnym z Critical Cluster Model (CCM) Church i Cova (2000) przedstawili metodykę wskazującą niewielkie obszary, w przypadku których w czasie ewakuacji może wystąpić problem konieczności ewakuacji dużej liczby ludności z wykorzystaniem sieci drogowej o niskich wartościach przepustowości. Dla określenia czasu niezbędnego dla ewakuacji danego osiedla wykorzystali informacje dotyczące: ewakuowanej populacji (oszacowanej na podstawie liczby domów oraz wskaźnika przeciętnej liczby mieszkańców na dom), liczby pojazdów będących do dyspozycji ewakuowanej ludności oraz pojemności dróg odprowadzających ruch z zagrożonego rejonu. Chen i in.

(2012), uwzględniając CCM, zbadali proces ewakuacji ludności i posłużyli się do tego algorytmem Dijkstry. Borowska-Stefańska i in. (2020a) wprowadzili w tym zakresie algorytm A*. Shahabi i Wilson (2014) proponują modelowanie ewakuacji w układach miejskich za pomocą algorytmu CASPER. Richter i in. (2013) zauważają, że decentralizacja zarządzania ewakuacją może przynieść dobre rezultaty. Yuan i in. (2017) zajęli się symulacją ruchu podczas ewakuacji opartą na wielopoziomowym modelu decyzyjnym.

Podejmowane były również próby stworzenia modelu symulacji ewakuacji z terenów zagrożonych, m.in. w pracach autorstwa Uno i Kashiyama (2008) czy Chen i in. (2012). Jednak do wyznaczania ścieżek ewakuacji zastosowano w tym przypadku również algorytm Dijkstry (w którym wagi na krawędziach grafu stanowi odległość). Borowska-Stefańska i in. (2019b) do określenia ścieżek ewakuacji zaproponowali natomiast zastosowanie algorytmów Dinitza, Edmondsa-Karpa i Forda-Fulkersona (Goldberg i Tarjan 1988, Ford i Fulkerson 2015). Algorytmy te służą, mówiąc najogólniej, do wyznaczania największego przepływu, jaki się da uzyskać w niecyklicznym grafie skierowanym. Bywają wykorzystywane także w badaniach nad kongestią (Abdullah i Hua 2017) i przepustowością dróg, w tym tych z uwzględnieniem optymalnej prędkości poruszania się pojazdów w kontekście maksymalizacji przepustowości (Moore i in. 2013). Liu i in. (2006) zastosowali w tym zakresie *Adaptive Evacuation Route Algorithm*. Kongsomsaksakul i in. (2005) zaproponowali natomiast metodykę wyznaczania optymalnych pod względem organizacji transportu miejsc schronienia dla planowania ewakuacji powodziowej.

Odnosząc się do wzorców optymalizacji procesu planowanej ewakuacji ludności, należy nawiązać również do pojęcia wrażliwości systemu transportowego (Adger 2006). Jest to szczególnie ważne właśnie w kontekście udziału czynnika ludzkiego (Simonovic i Ahmad 2005, Strang 2013). W tym ujęciu niewątpliwą trudnością jest określenie podatności poszczególnych „aktorów" ewakuacji na zagrożenia poprzez opracowanie solidnych i wiarygodnych źródeł danych oraz włączenie różnorodnych metod obejmujących postrzeganie ryzyka i podatności na zagrożenia (Pel i in. 2010). W zakresie podejść metodycznych do tego zagadnienia odnotować należy *agent-based modeling* (ABM) (Wang i in. 2016). Opiera się ono na tworzeniu agentów posiadających atrybuty określające ich aktualny stan, którzy podejmują decyzje przestrzenne, potrafiąc wymieniać między sobą informacje. Pozwala to na wprowadzenie do modelu elementu losowości, co jest istotne w badaniach przyrodniczych (Chen i in. 2006, Chen i Zhan 2008, Samuels i in. 2009, Priest i in. 2011, Dzieszko i in. 2013, Tagg i in. 2016). Kluczem do skutecznego modelowania procesu ewakuacji jest także zrozumienie okoliczności podejmowania decyzji o niej przez poszczególnych zagrożonych (Dash i Gladwin 2007, Du i in. 2017). Zgodnie z badaniami, które przeprowadzili Southworth (1991), Murray-Tuite i Wolshon (2013) czy Sun, Zhang i Su (2020),

ich zachowania transportowe w tym zakresie są uzależnione m.in. od zaufania do instrukcji ewakuacji i postrzegania ryzyka oraz etapu podejmowania decyzji (w ujęciu psychologicznym) o opuszczeniu zagrożonego obszaru. Laska (1990) wymienia tutaj cztery etapy: niepokój, rozpoznanie niebezpieczeństwa, akceptacja oraz podjęcie decyzji o ewakuacji.

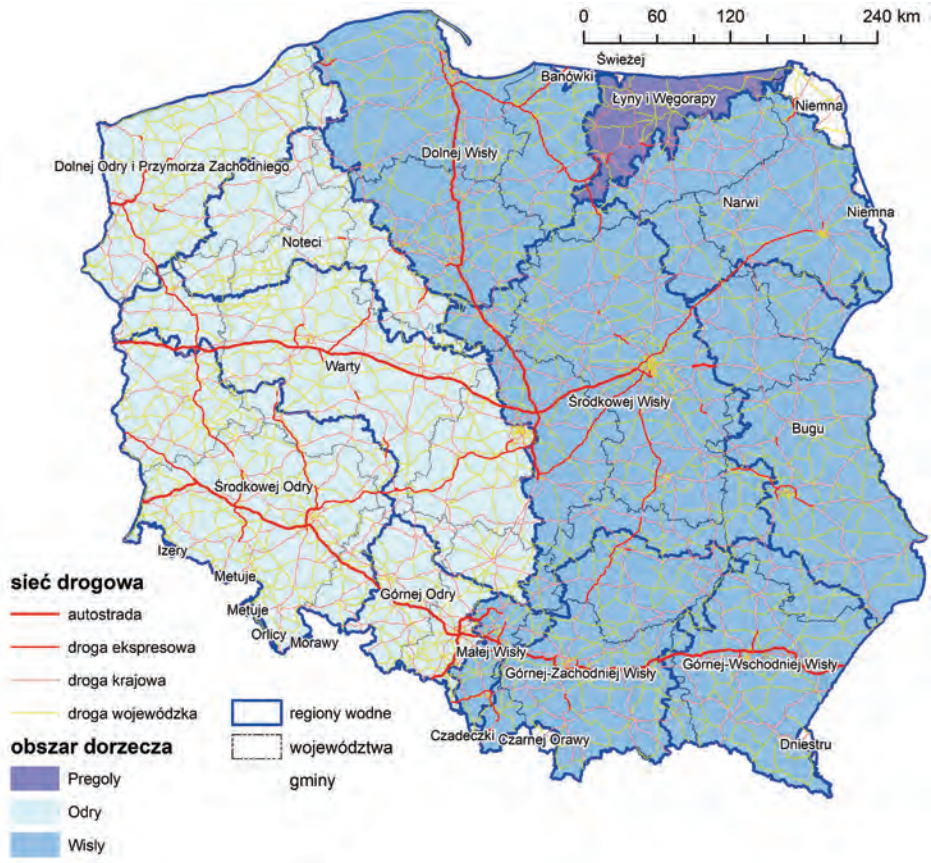
Różnorodność podejść metodycznych, zróżnicowanie sieci transportowej, rozmieszczenia zagrożonej ludności i miejsc bezpiecznych, a przede wszystkim znaczna nieprzewidywalność jej zachowań (np. wystąpienie ewakuacji anarchicznej; Masłowska-Szczerba 2015) – wszystko to sprawia, że prowadzenie badań dotyczących organizacji transportu związanego z ewakuacją wydaje się uzasadnione wyłącznie wtedy, gdy uwzględnia się lokalne uwarunkowania i taką również skalę przestrzenną. Przyjęcie uniwersalnych założeń w tym zakresie mogłoby zanadto zafałszować uzyskane wyniki.

3

UWARUNKOWANIA FUNKCJONOWANIA I ROZWOJU SIECI DROGOWEJ NA TERENACH ZAGROŻONYCH POWODZIĄ

3.1. Tereny zagrożone powodzią i ich wybrane cechy przyrodnicze

Na terenie Polski wydzielonych zostało dziewięć obszarów dorzeczy, jednak mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego oraz plany zarządzania ryzykiem powodziowym powstały do tej pory dla trzech z nich – Odry, Wisły i Pregoły (ryc. 3.1) (https://warszawa.wody.gov.pl/). Dlatego też symulacje skutków wystąpienia powodzi dla transportu drogowego zostały oparte na danych dla tych właśnie obszarów. Wszelkie zastosowane w tym zakresie delimitacje zostały również wprost zaczerpnięte z powyższych opracowań. Spośród scenariuszy uwzględnianych na mapach zagrożenia powodziowego do badania włączono tereny o wysokim (10%) i średnim (1%) prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi (zarówno od rzeki, jak i od morza) oraz zagrożone zalaniem w wyniku całkowitego zniszczenia obwałowania (WZ) lub budowli ochronnej pasa technicznego (PZ). Wystąpienie wody 100-letniej jest najczęściej uwzględnianym scenariuszem w literaturze przedmiotu. Jest też uwzględniane (jako jedyne) w polskim prawodawstwie warunkującym między innymi zagospodarowanie przestrzenne, w tym budowę infrastruktury drogowej. Tereny zagrożone powodzią 10-letnią stanowią część terenów zagrożonych powodzią 100-letnią i jako te o najwyższym prawdopodobieństwie również zostały uwzględnione w analizach. Wprawdzie całkowite zniszczenie obwałowania lub budowli ochronnej pasa technicznego to scenariusze zapewne mniej realne (choć nie określa się ich prawdopodobieństwa), to podczas modelowania zasięgu terenów narażonych na zalanie w związku z tymi zdarzeniami brano pod uwagę poziom wody 1%. Ich włączenie do badania wynikało z potrzeby przeanalizowania wrażliwości systemu transportu drogowego na zdarzenia nietypowe, których cechy i miejsce wystąpienia nie są uwzględniane na etapie jego planowania i budowy.



Ryc. 3.1. Podział Polski na obszary dorzeczy na tle sieci drogowej w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Największą powierzchnię terenów zagrożonych powodziami odnotowano w obszarze dorzecza Wisły, zarówno w odniesieniu do terenów szczególnego zagrożenia powodzią, jak i tych, które są narażone na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowań bądź budowli pasa technicznego (tab. 3.1). Obszar dorzecza Wisły obejmuje północną, północno-wschodnią, wschodnią i południowo-wschodnią część kraju oraz zajmuje największą powierzchnię – 183 tys. km^2 (59% powierzchni Polski). Pod względem administracyjnym położony jest on na obszarze 11 województw: śląskiego, małopolskiego, podkarpackiego, lubelskiego, świętokrzyskiego, łódzkiego, mazowieckiego, podlaskiego, warmińsko-mazurskiego, kujawsko-pomorskiego i pomorskiego. Obszar analizowanego dorzecza poza zlewnią rzeki Wisły obejmuje zlewnie rzek uchodzących do Morza Bałtyckiego (Słupi, Łupawy, Piaśnicy, Łeby) oraz rzek zasilających Zalew Wiślany (Pasłęki, Baudy, Elbląga). Cechą charakterystyczną dorzecza Wisły

(podobnie jak i dorzecza Odry) jest jego znaczna asymetria, z przewagą dopływów prawostronnych. Wpływ na te sytuacje ma nachylenie powierzchni terenu Niżu Środkowoeuropejskiego.

Do najważniejszych lewostronnych dopływów Wisły zaliczyć należy następujące rzeki: Przemsza, Prądnik, Nida, Kamienna, Iłżanka, Radomka, Pilica, Bzura (razem z Rawką), Brda, Wda i Wierzyca. Z kolei wśród dopływów prawostronnych Wisły należy wymienić przede wszystkim Sołę, Skawę, Rabę, Dunajec, Wisłokę, San, Wieprz, Świder, Narew z dopływami (Bug, Biebrza, Wkra), Skrwę, Drwęcę i Osę (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły, 2016).

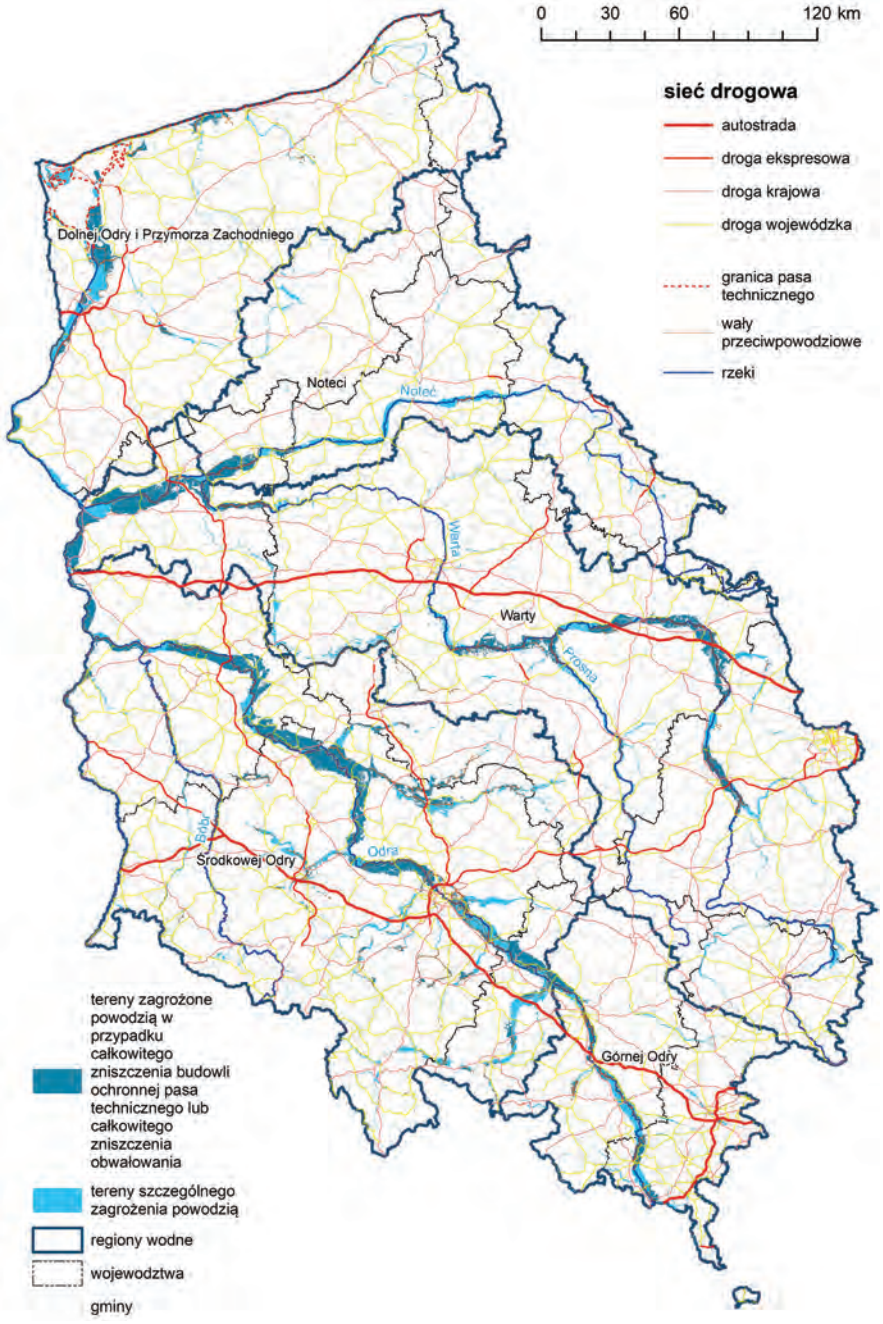
Obszar dorzecza Wisły charakteryzuje śnieżno-deszczowy reżim zasilania, który cechuje się występowaniem jednego maksimum i jednego minimum stanów wody w ciągu roku (Dynowska 1994). Zasilanie śnieżne, które daje jedno maksimum średnich miesięcznych stanów wody w okresie wczesnowiosennym oraz minimum w okresie letnio-jesiennym, cechuje duże rzeki nizinne. Do najczęstszych powodzi na tym obszarze ze względu na ich źródło zaliczyć należy powodzie opadowe i roztopowe, a także powodzie sztormowe, które występują wyłącznie w regionie wodnym Dolnej Wisły. Obszar dorzecza Wisły został podzielony na siedem regionów wodnych: Dolnej Wisły, Narwi, Środkowej Wisły, Bugu, Górnej-Zachodniej Wisły, Górnej-Wschodniej Wisły, Małej Wisły (ryc. 3.2) (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły, 2016).

Na drugim miejscu pod względem zajmowanej powierzchni w Polsce jest obszar dorzecza Odry (118 tys. km^2, 38% powierzchni kraju). Obejmuje on swoim zasięgiem zachodnią część Polski i został podzielony na pięć regionów wodnych: Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, Noteci, Warty, Środkowej Odry, Górnej Odry (ryc. 3.3). Pod względem administracyjnym położony jest on na obszarze dziewięciu województw: śląskiego, opolskiego, dolnośląskiego, łódzkiego, kujawsko-pomorskiego, wielkopolskiego, lubuskiego, zachodniopomorskiego i pomorskiego. Omawiany obszar dorzecza oprócz samej rzeki Odry obejmuje także dorzecza Regi, Parsęty, Wieprzy oraz pozostałych rzek uchodzących do Morza Bałtyckiego na zachód od ujścia Słupi oraz rzek uchodzących do Zalewu Szczecińskiego. W granicach obszaru dorzecza Odry powodzie występują głównie w półroczu letnim (w okresie od maja do października). Na tym obszarze powodzie najczęściej występowały w regionie wodnym Środkowej Odry, regionie wodnym Warty oraz w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego. Największe powodzie na tym obszarze wystąpiły w latach: 1903, 1979, 1997, 2010 (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry, 2016).



Ryc. 3.2. Podział obszaru dorzecza Wisły na regiony wodne na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r.

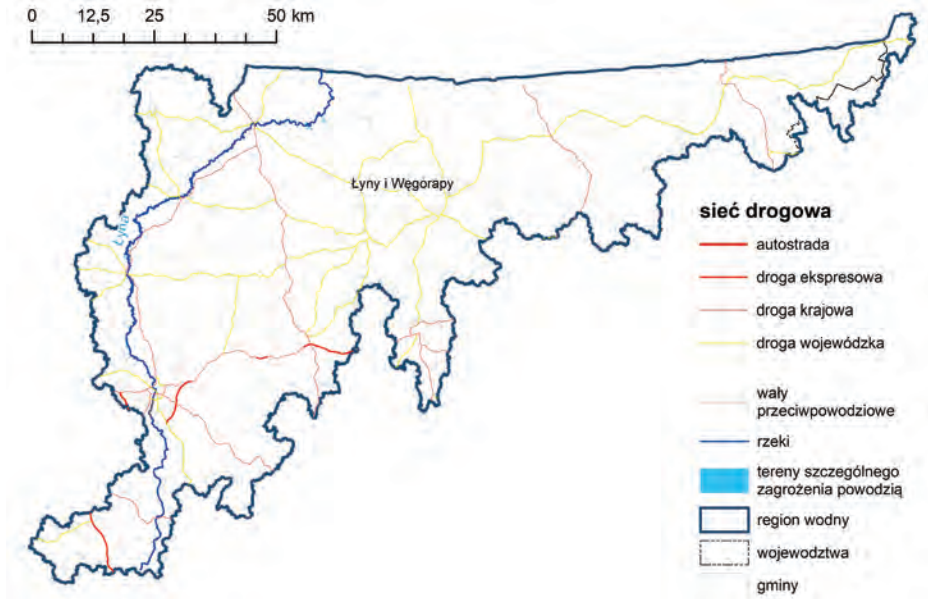
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019



Ryc. 3.3. Podział obszaru dorzecza Odry na regiony wodne na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Ostatnim analizowanym obszarem dorzecza, dla którego wyznaczono tereny zagrożone powodziami na mapach zagrożenia powodziowego, jest obszar dorzecza Pregoły[1]. Obejmuje on północno-wschodnią część Polski, a jego powierzchnia wynosi 7521,7 km^2 (2,5% powierzchni kraju). Pod względem administracyjnym omawiany obszar praktycznie w całości znajduje się w granicach województwa warmińsko-mazurskiego (ryc. 3.4). Jedynie niewielki fragment na północnym wschodzie położony jest w granicach województwa podlaskiego. W jego obrębie znajduje się tylko jeden region wodny. W granicach analizowanego terenu powodzie mają charakter lokalny, głównie są to powodzie opadowe i roztopowe. Obszar ten obejmuje Pregołę oraz jej dopływy, tj. Łynę, Guber, Gołdapę, Wadąg, Sajnę. Główną rzeką w polskiej części obszaru dorzecza Pregoły jest Łyna, której długość całkowita wynosi 289 km, a w granicach Polski – 208,75 km. W obszarze dorzecza wydzielono jeden region wodny: Łyny i Węgorapy (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Pregoły, 2016).



Ryc. 3.4. Obszar dorzecza Pregoły na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

[1] Według regionalizacji fizyczno-geograficznej dokonanej przez Solona i in. (2018) obszar dorzecza Pregoły obejmuje dwa makroregiony: Pojezierze Mazurskie i Nizinę Staropruską.

Tab. 3.1. Powierzchnia terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na obszary dorzeczy w 2019 r. [ha]

Scenariusz powodzi	Powierzchnia terenów zagrożonych powodziami [ha]		
	obszar dorzecza Odry	obszar dorzecza Pregoły	obszar dorzecza Wisły
10%	235 228,60	1 623,66	359 141,64
1%	364 824,70	1 977,77	509 899,33
1% M	30 368,40	–	30 445,70
PZ	14 555,21	–	97 434,32
WZ	280 796,14	–	516 681,44

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

W granicach obszaru dorzecza Wisły[2] największa powierzchnia terenów zagrożonych powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia 10 i 1% jest w regionie wodnym Środkowej Wisły, zaś terenów narażonych na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania – w regionie wodnym Dolnej Wisły. Obszar regionu wodnego Środkowej Wisły obejmuje środkowo-zachodnią część obszaru dorzecza Wisły. Powodzie, jakie na tym obszarze występują, wiążą się z topnieniem śniegu (roztopowe). Często podpiętrzane są zatorami lodowymi oraz opadami deszczu (opadowe – głównie latem – w lipcu, rzadziej w sierpniu i czerwcu). Obszar regionu wodnego Dolnej Wisły swoim zasięgiem obejmuje północną część obszaru dorzecza Wisły. Występują tu nie tylko powodzie sztormowe, ale również zatorowe, opadowe czy powodzie polderowe rzeczne (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października

[2] Według regionalizacji fizyczno-geograficznej zaproponowanej przez Solona i in. (2018) obszar dorzecza Wisły obejmuje następujące makroregiony: Beskidy Lesiste, Beskidy Środkowe, Łańcuch Tatrzański, Obniżenie Orawsko-Podhalańskie, Beskidy Zachodnie, Kotlina Oświęcimska, Pogórze Zachodniobeskidzkie, Pogórze Środkowobeskidzkie, Płaskowyż Sańsko-Dniestrzański, Kotlina Sandomierska, Brama Krakowska, Wyżyna Krakowsko-Częstochowska, Wyżyna Śląska, Niecka Nidziańska, Wyżyna Przedborska, Wyżyna Kielecka, Wyżyna Lubelska, Roztocze, Kotlina Pobuża, Wyżyna Wołyńska, Polesie Wołyńskie, Polesie Zachodnie, Nizina Południowopodlaska, Wzniesienia Południowomazowieckie, Nizina Środkowomazowieska, Pojezierze Wielkopolskie, Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka, Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie, Nizina Południowomazowiecka, Nizina Północnopodlaska, Pojezierze Mazurskie, Pojezierze Litewskie, Pojezierze Chełmińsko-Dobrzyńskie, Dolina Dolnej Wisły, Pojezierze Południowopomorskie, Pojezierze Zachodniopomorskie, Pojezierze Wschodniopomorskie, Pojezierze Iławskie, Pojezierze Mazurskie, Nizina Staropruska, Pobrzeże Gdańskie, Pobrzeże Koszalińskie oraz fragmentarycznie: Wyżyna Woźnicko-Wieluńska, Nizina Południowowielkopolska (Solon i in. 2018).

2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły, 2016). Z kolei tereny zagrożone powodziami o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia od strony morza oraz tereny narażone na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego występują tylko w granicach regionu wodnego Dolnej Wisły (dla obszaru dorzecza Wisły) (tab. 3.2).

W granicach obszaru dorzecza Odry[3] największa powierzchnia terenów zagrożonych powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia 10 i 1%, a także terenów narażonych na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania, jest w regionie wodnym Środkowej Odry. Główną przyczyną powodzi na tym obszarze są opady deszczu o charakterze rozlewnym. Ponadto występują tu powodzie roztopowe i zatorowe. Z kolei tereny zagrożone powodziami o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia od strony morza oraz tereny narażone na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego występują tylko w granicach regionu wodnego Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego (tab. 3.2). Na tym terenie dochodzi głównie do powodzi od strony morza, zatorowych oraz roztopowych (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry, 2016).

W przypadku wystąpienia powodzi w obszarze dorzecza Wisły można wyróżnić trzy newralgiczne obszary, w granicach których potencjalne straty byłyby najwyższe. Są to obszary Doliny Górnej Wisły, Doliny Środkowej Wisły od Zawichostu aż po Płock oraz Doliny Dolnej Wisły od Torunia aż do odcinka ujściowego Wisły (istotne zagrożenie występuje na depresyjnych terenach Żuław Wiślanych). Wpływ na to ma niezwykle duża rozległość tych odcinków dolin w skali naszego kraju. Dolina Górnej Wisły na odcinku od Oświęcimia przez Kraków do Sandomierza i Zawichostu ma szerokość dochodzącą do wielu kilometrów.

---

[3] Według regionalizacji fizyczno-geograficznej Solona i in. (2018) obszar dorzecza Odry obejmuje następujące makroregiony: Sudety Wschodnie, Nizinę Śląską, Wyżynę Śląską, Kotlinę Ostrawską, Pogórze Zachodniobeskidzkie oraz Beskidy Zachodnie, Wyżynę Woźnicko-Wieluńską, Przedgórze Sudeckie, Sudety Środkowe, Sudety Zachodnie, Pogórze Zachodniosudeckie, Nizinę Śląsko-Łużycką, Wał Trzebnicki, Obniżenie Milicko-Głogowskie, Wzniesienia Łużyckie, Obniżenie Łużyckie, Wzniesienia Zielonogórskie, Nizinę Południowowielkopolską, Pojezierze Wielkopolskie, Pojezierze Leszczyńskie, Pradolinę Warciańsko-Odrzańską, Pojezierze Lubuskie, Pobrzeże Szczecińskie, Pradolinę Toruńsko-Eberswaldzką oraz fragmentarycznie: Pobrzeże Koszalińskie, Pojezierze Zachodniopomorskie, Pojezierze Południowopomorskie, Wyżynę Krakowsko-Częstochowską, Wyżynę Przedborską, Wzniesienia Południowomazowieckie i Obniżenie Dolnołużyckie.

Tab. 3.2. Powierzchnia terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na regiony wodne w 2019 r. [ha]

Obszar dorzecza	Region wodny	Scenariusz powodzi				
		10%	1%	1% M	PZ	WZ
Odry	Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	26 059,70	30 250,10	30 368,40	14 555,21	15 873,30
	Noteci	26 471,80	39 389,40	–	–	12 914,00
	Warty	75 341,30	101 169,50	–	–	99 659,40
	Środkowej Odry	90 382,10	157 914,80	–	–	139 786,40
	Górnej Odry	16 973,60	36 101,20	–	–	12 563,04
Pregoły	Łyny i Węgorapy	1 623,66	1 977,77	–	–	–
Wisły	Dolnej Wisły	50 496,60	61 323,90	30 445,70	97 434,32	188 478,20
	Narwi	52 947,40	77 771,80	–	–	1 805,98
	Środkowej Wisły	104 407,40	142 189,50	–	–	107 817,40
	Bugu	59 181,00	79 672,70	–	–	18 646,00
	Górnej-Zachodniej Wisły	51 607,70	63 196,30	–	–	152 725,73
	Górnej-Wschodniej Wisły	34 778,46	75 684,20	–	–	37 653,97
	Małej Wisły	5 723,00	9 015,30	–	–	9 539,32

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

Tereny zalewowe są znacznie szersze w obszarach, gdzie Wisła łączy się ze swoimi prawostronnymi dopływami, tj. Sołą, Skawą, Rabą, Dunajcem, Wisłoką i Sanem. Do największych lewostronnych dopływów w górnym odcinku Wisły zaliczamy rzeki Nidę i Czarną Staszowską. Jednak to właśnie zlewnie prawostronnych dopływów karpackich odpowiadają w dużej mierze za powodziogenność w górnym odcinku Wisły. Cechują się one głęboko wciętymi dolinami oraz niską przepuszczalnością podłoża, w wyniku czego dochodzi tu do znacznych spływów powierzchniowych. Obszar zalewowy Wisły i jej dopływów osiąga szerokość w granicach 2,5–6 km w Kotlinie Oświęcimskiej przy ujściu Soły, 1–4 km w przewężeniu Bramy Krakowskiej i nawet 5,5–14 km w Kotlinie Sandomierskiej przy ujściu Dunajca.

Z kolei Dolina Środkowej Wisły rozpoczyna się poniżej Puław. Cechuje się ona niemal płaskimi wysoczyznami zbudowanymi z glin zwałowych bądź piasków i żwirów wodnolodowcowych. Szczególną cechą tego fragmentu Wisły, zwiększającą zagrożenie powodziowe, jest ukształtowana w jego centralnej części rozległa niecka Niziny Mazowieckiej, w której centrum zbiegają się największe dopływy Wisły oraz znajduje się intensywnie zagospodarowany obszar Warszawy. Szerokość doliny Wisły na odcinku od Puław do Warszawy dochodzi maksymalnie do 17 km, poniżej połączenia Wisły z prawostronnym dopływem – Wieprzem,

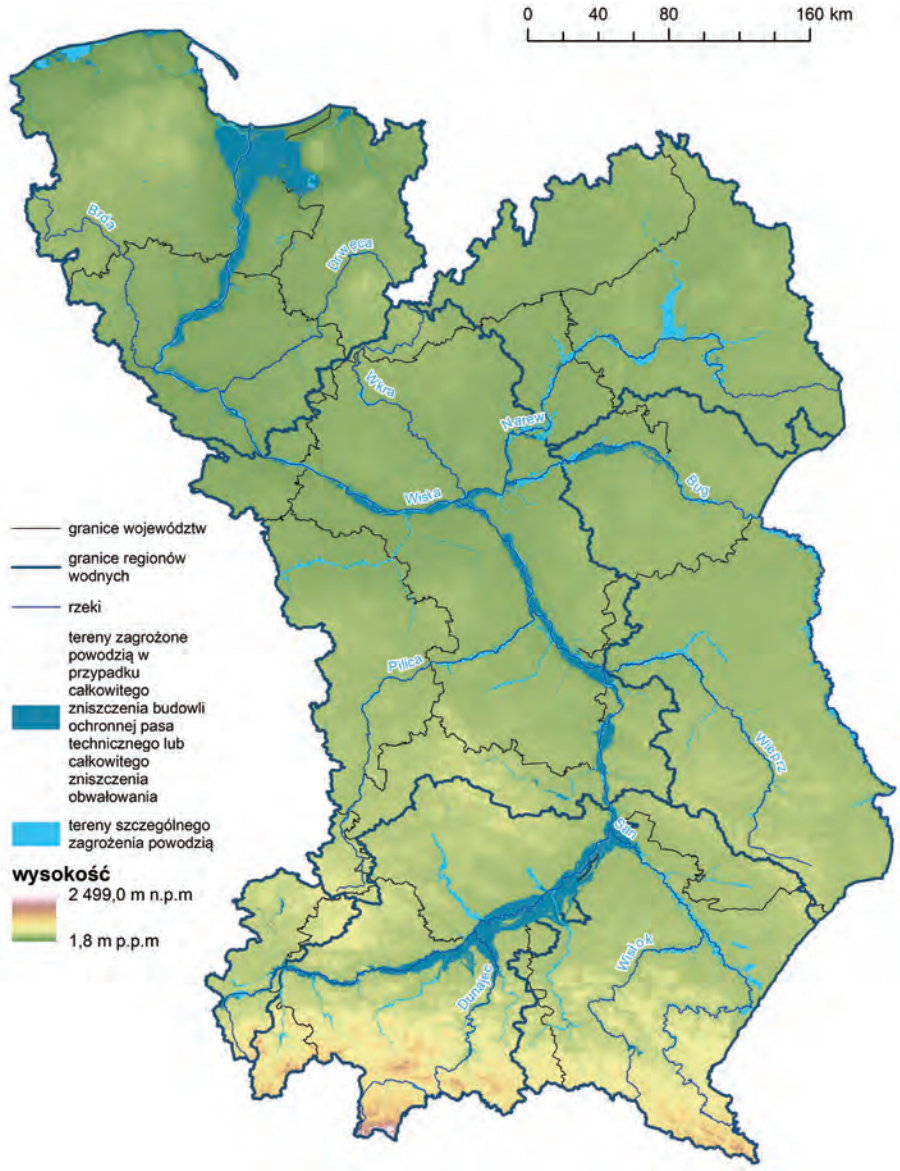
z czego ponad połowę obejmują tereny zalewowe. Powodzie, które występują na tym odcinku Wisły, wynikają z przemieszczania się fali powodziowej wezbranej w odcinku górnej Wisły. Fala powodziowa, wpływając do zwężenia Przełomu Małopolskiego, ulega spiętrzeniu i niesie za sobą zagrożenie dla licznych miejscowości leżących między Zawichostem a Puławami. Dolny odcinek Wisły obejmuje północny fragment obszaru dorzecza Wisły, od ujścia Narwi do ujścia do Zatoki Gdańskiej (Morza Bałtyckiego).

Dolny odcinek doliny Wisły poniżej Włocławka i Torunia to potężna forma geomorfologiczna, której obszar zalewowy jest bardzo szeroki. Na poziom zagrożenia powodziowego na analizowanym obszarze wpływ ma funkcjonowanie Zbiornika Włocławskiego. Został on zbudowany w 1970 roku i miał być elementem Kaskady Dolnej Wisły. Niestety do dziś jest jedynym ogniwem tego projektu. Na skutek tych działań poniżej zbiornika uruchomiona została silna erozja wgłębna i denna. Terasa zalewowa doliny Wisły do kilkudziesięciu kilometrów poniżej tamy została osuszona, a częstotliwość wezbrań powodziowych obniżyła się. Znaczne obszary położone w dnie doliny zostały przekształcone w grunty orne. Poniżej zalesionej Kotliny Toruńskiej, w pobliżu Bydgoszczy, Wisła opuszcza obniżenie Pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej i kieruje się ku północy, tworząc swój ujściowy odcinek. Wisła formuje początkowo przełomową Dolinę Fordońską o szerokości wynoszącej od około 3,5 km w pobliżu Fordonu do 10,5 km w Basenie Unisławskim. Następnie wpływa do Kotliny Grudziądzkiej, gdzie szerokość terasy zalewowej dochodzi do 7 km, a rzece towarzyszą wysokie obwałowania, chroniące liczne wsie zlokalizowane w dnie doliny.

Ujściowy odcinek doliny Wisły tworzy rozległa delta Żuław Wiślanych. Żuławy Wiślane odznaczają się unikatowym krajobrazem w skali kraju, a nawet Europy. Są to bezleśne równiny pocięte gęstą siecią kanałów, rowów i rzek. Znaczną część stanowią obszary depresyjne. Przez obszar Żuław Wiślanych przepływa wiele rzek, między innymi Elbląg, Szkarpawa, Tuga, Tyna, Fiszewka, Balewka, Nogat, oraz kanałów o znacznej wartości historycznej, np. Kanał Elbląski i Kanał Jagielloński.

Analizowany obszar jest wyjątkowy, głównie ze względu na proces polderyzacji delty Wisły, który trwa już od 600 lat. Zmiana warunków naturalnych i prowadzenie na tym obszarze działalności przez ludzi wymusza sprawne funkcjonowanie systemu melioracyjnego. Polderowe układy wodno-melioracyjne składają się z wałów przeciwpowodziowych, pompowni odwadniających, śluz wałowych nawadniających, budowli wewnątrzpolderowych, kanałów i sieci rowów z zastawkami. Zasięgiem działania systemów grawitacyjnych są objęte Żuławy Wysokie, położone na wysokości od 2,5 do 10 m n.p.m. System ten działa biernie, bez czynnego udziału człowieka, a woda z tego terenu odpływa samoistnie. Działaniem systemów odwadniająco-nawadniających są objęte z kolei tereny nizinno-depresyjne Żuław Niskich położonych od 1,8 m p.p.m. do 2,5 m n.p.m. System działa aktywnie, z czynnym udziałem człowieka, który kształtuje różne sytuacje hydrologiczne w zależności od

potrzeb (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły, 2016; Borowska-Stefańska i in. 2020b) (ryc. 3.5).



Ryc. 3.5. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Wisły w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz Numerycznego Modelu Terenu, GUGiK 2019

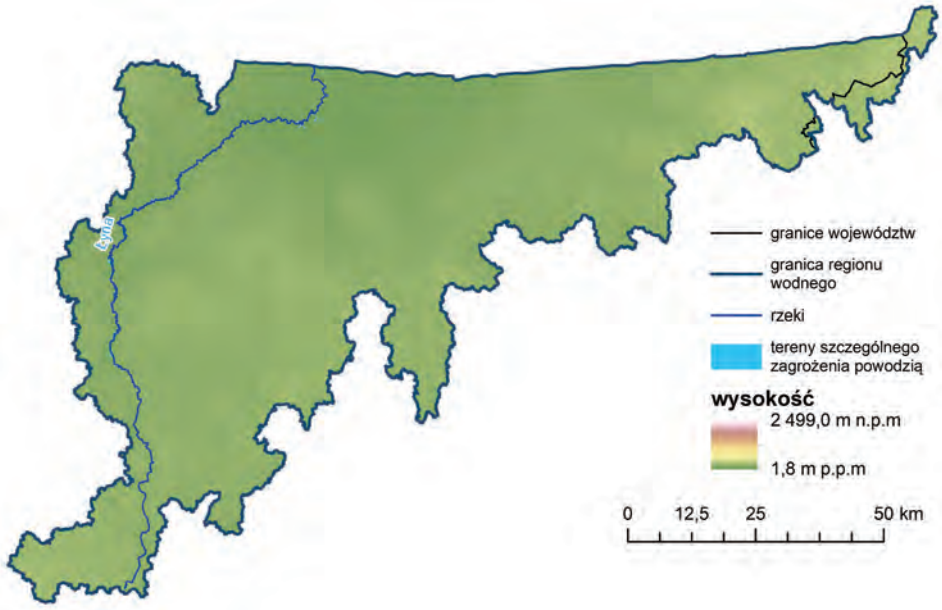
Z kolei w przypadku doliny Odry najbardziej newralgiczne z punktu widzenia wystąpienia powodzi i szkód, jakie ze sobą ona potencjalnie niesie, są dwa obszary: Górnej i Środkowej Odry. W górnym odcinku Odry do jej największych lewostronnych dopływów zaliczamy rzekę Psinę, zaś do prawostronnych: Olzę, Rudawkę, Bierawkę i Kłodnicę. Budowa geologiczna obszaru dorzecza Odry odznacza się dużą zmiennością ze względu na występowanie w jego obrębie kilku jednostek geologicznych o odmiennej genezie i wykształceniu litologiczno-strukturalnym. W górnym odcinku Odry najczęstszą przyczyną powodzi są opady deszczu o charakterze rozlewnym. Ponadto deszcz o charakterze nawalnym przyczyniał się do powstawania na omawianym obszarze powodzi błyskawicznych – dotyczy to przede wszystkim górskich dopływów większych rzek (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry, 2016). Tego typu powodzie należą do najkrótszych i najbardziej dynamicznych zdarzeń hydrologicznych. Czas koncentracji i trwania fali wezbraniowej podczas powodzi błyskawicznej jest bardzo krótki, ponadto często powodziom tym towarzyszą intensywne ruchy masowe (Pociask-Karteczka i Żychowski 2014). Powodzie tego typu występują w różnych regionach Karpat praktycznie każdego roku. Mają one jednak charakter lokalny (Bryndal 2014). Powyżej Wrocławia szerokość terenów zalewowych Odry wynosi od 2,5 do ponad 10 km. Szczególnym miejscem pod tym względem jest węzeł hydrograficzny w miejscu, gdzie do Odry uchodzi Stobrawa (prawostronny dopływ), a od południa, po stronie lewej, łączy się z Odrą Nysa Kłodzka. Na omawianym odcinku teren zalewowy rozciąga się na przestrzeni ponad 11 km. We Wrocławiu dolina Odry najrozleglejsza jest w miejscu, gdzie uchodzą do niej Widawa (prawostronny dopływ) i Oława (dopływ lewostronny), a teren zalewowy osiąga tu szerokość do 7 km. Ponad połowa dzielnic Wrocławia znajduje się w obrębie zalewowych terenów wymienionych rzek. Dolina Odry osiąga spektakularną wielkość w odcinku poniżej ujścia Baryczy w rejonie Głogowa (fragment Pradoliny Barucko-Głogowskiej), gdzie dno pradoliny osiąga szerokość 13,5 km (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry, 2016; Borowska-Stefańska i in. 2020b) (ryc. 3.6).



Ryc. 3.6. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Odry w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz Numerycznego Modelu Terenu, GUGiK 2019

Najważniejszą rolę w ukształtowaniu obecnej budowy geomorfologicznej obszaru dorzecza Pregoły odegrało ostatnie zlodowacenie. Lądolód skandynawski pozostawił po sobie na tym terenie młodoglacjalną rzeźbę, której dominującym elementem są wzgórza stref marginalnych, obszary moreny dennej i pola sandrowe. Ponadto charakterystyczną cechą omawianego krajobrazu tego obszaru są liczne obniżenia terenowe, w których wytworzyła się silnie rozwinięta sieć wodna. Obniżeniom tym towarzyszą najczęściej równiny holoceńskie, które mają w większości postać torfowisk niskich. W granicach Polski najdłuższą rzeką na tym obszarze jest Łyna. W górnym biegu rzeka ta przepływa przez wiele jezior oraz płynie w głęboko wciętej dolinie. Pomiędzy miejscowościami Ruś i Bartąg dolina rzeki Łyny znacznie się rozszerza i jest podmokła, z kolei w granicach Olsztyna została ona uregulowana. (Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Pregoły, 2016) (ryc. 3.7).

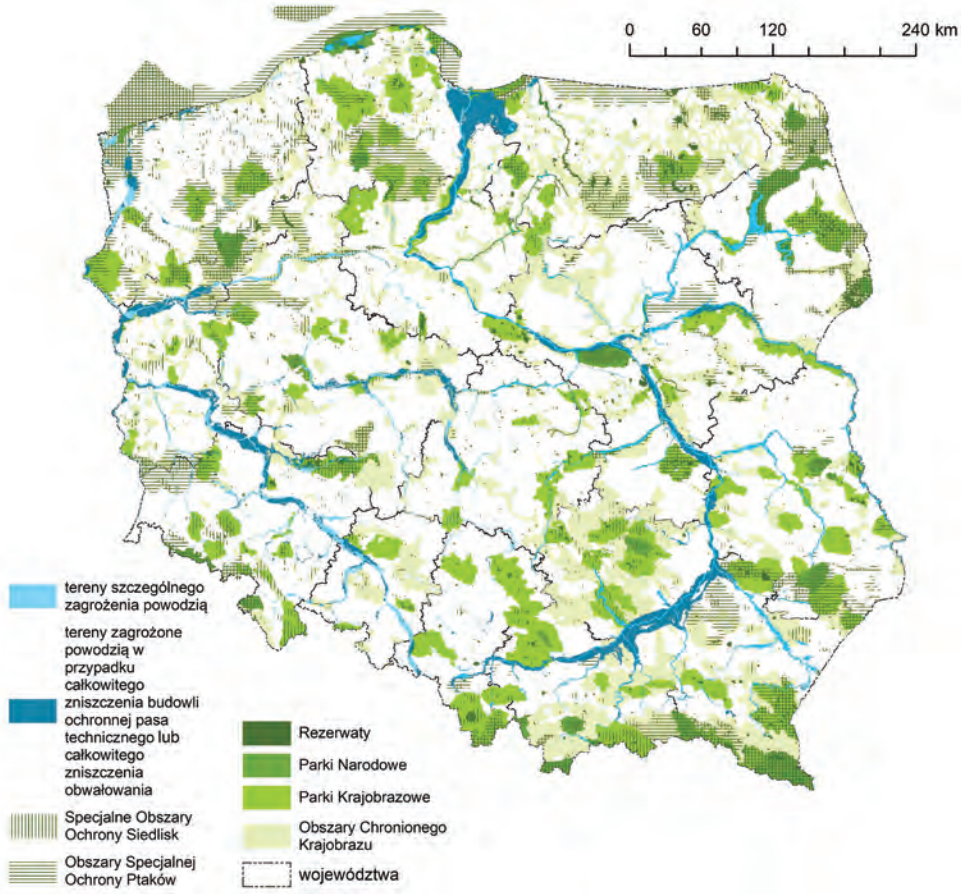


Ryc. 3.7. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Pregoły w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz Numerycznego Modelu Terenu, GUGiK 2019

Należy również podkreślić, że na obszarach zagrożonych powodziami w strefie dolin rzecznych znajdują się liczne obszary chronione sieci Natura 2000, a także inne formy ochrony przyrody, takie jak: parki krajobrazowe,

rezerwaty przyrody, obszary chronionego krajobrazu oraz użytki ekologiczne, zespoły przyrodniczo-krajobrazowe i pomniki przyrody, co zostało zaprezentowane na ryc. 3.8.



Ryc. 3.8. Formy ochrony przyrody na tle terenów zagrożonych powodzią w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz danych GDOŚ 2019

3.2. Wybrane elementy zagospodarowania i rozmieszczenie ludności na terenach zagrożonych powodzią

W podrozdziale analizie poddano dane dotyczące zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią w poszczególnych rozpatrywanych scenariuszach. Uwzględniając powierzchnię i wysokość strat, wskazano całkowitą

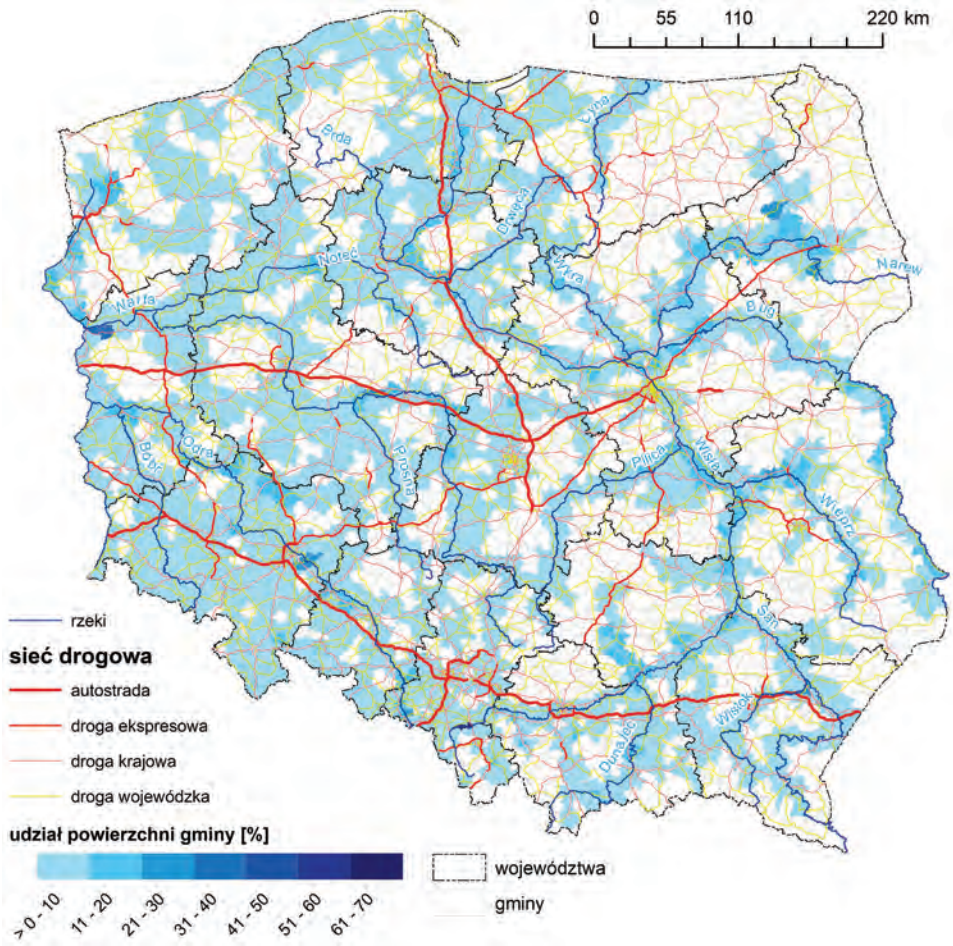
skalę zjawiska (biorąc pod uwagę wszystkie formy zagospodarowania), aby następnie na tym tle przedstawić stopień, w jakim ucierpią tereny o funkcji komunikacyjnej, a w ich grupie te pod drogami kołowymi. W drugiej części skoncentrowano się na danych odnoszących się do liczby i rozmieszczenia na terenach zagrożonych ludności, której zachowania transportowe (np. ograniczenie mobilności czy jej szczególne cechy związane z ewakuacją) w czasie sytuacji kryzysowej mogą wpływać na system drogowego transportu samochodowego.

3.2.1. Wybrane elementy zagospodarowania

Tereny zagrożone powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi wynoszącym 10% znajdują się w granicach 1289 gmin w Polsce. Najwięcej gmin (po 153), w granicach których zidentyfikowano omawiane obszary, znajduje się w województwach dolnośląskim i mazowieckim. W województwie dolnośląskim udział powierzchni omawianych terenów w gminie nie przekracza 25%, a najwyższy odnotowano w gminie Siechnice (24,3%). Z kolei w województwie mazowieckim udział terenów zagrożonych powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% w powierzchni gminy nie przekracza 20%, a najwyższy przypada na Nowy Dwór Mazowiecki (19,4%). Gmina z największym udziałem terenów o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi w Polsce to Goczałkowice-Zdrój (gmina wiejska położona w dolinie Górnej Wisły), gdzie omawiane tereny stanowią 65,7% jej powierzchni. Z kolei gdyby przeanalizować udział omawianych obszarów w grupie dużych miast (o liczbie ludności powyżej 100 tys.), to w tym przypadku wyraźnie dominują Włocławek i Toruń, gdzie udziały terenów o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi wynoszą odpowiednio 19,6 i 14,9%. Na dziewiątym miejscu pod tym względem znajduje się stolica kraju, gdzie udział obszarów zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% wynosi 4,6% powierzchni miasta (ryc. 3.9).

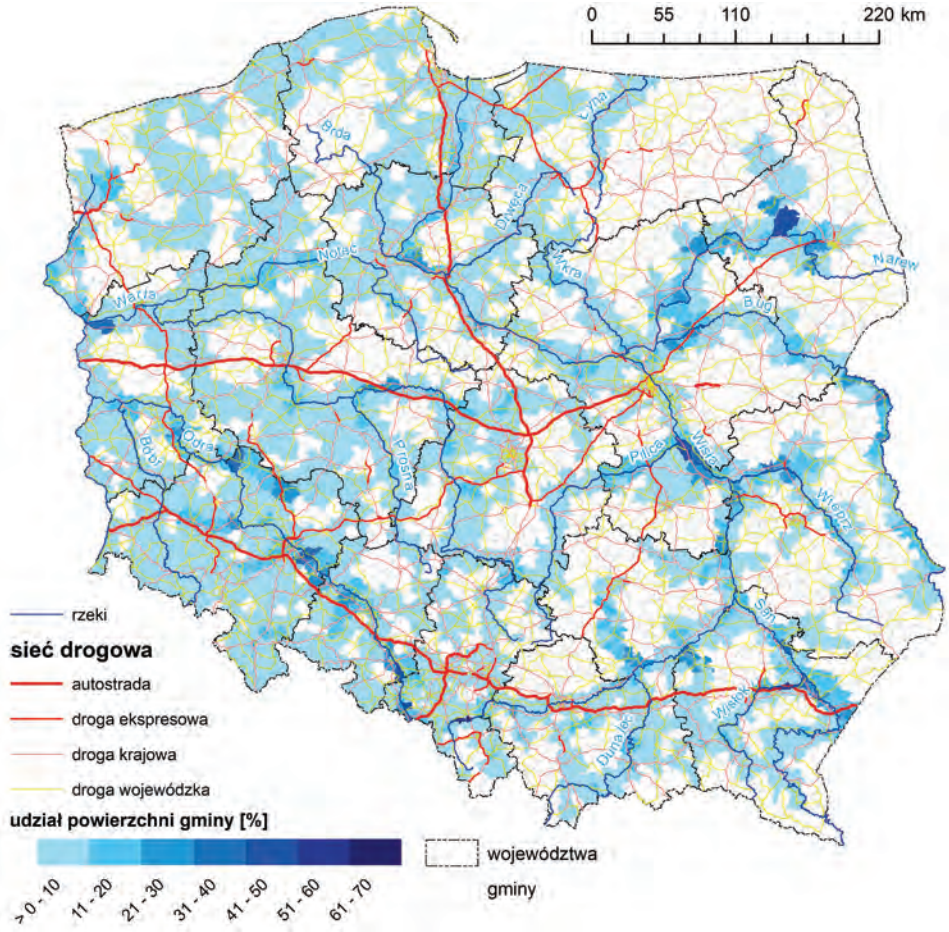
Tereny zagrożone powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 1% obejmują 1302 gminy w Polsce. Najwięcej jednostek, w granicach których zidentyfikowano te obszary, znajduje się w województwie mazowieckim: 155 (na drugim miejscu pod tym względem jest województwo dolnośląskie, gdzie omawiane tereny leżą w granicach 154 gmin). Udział terenów zagrożonych powodziami o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% nie przekracza w tym województwie 42%. Najwyższa omawiana wartość została odnotowana w gminie Magnuszew (41,6%). W przypadku dużych miast udział omawianych terenów jest najwyższy we Włocławku – 21,1%, na drugim miejscu jest Toruń – 16,2%. Z kolei w stolicy Polski (dziesiąte miejsce pod względem udziału terenów zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie

wystąpienia 1%) udział tych terenów w powierzchni miasta wynosi 4,9%. W tym przypadku są to obszary przebiegające przez centrum miasta, czyli tereny istotne pod względem inwestycyjnym. Gminą z największym udziałem terenów o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi są Goczałkowice-Zdrój (67,5%) (ryc. 3.10).



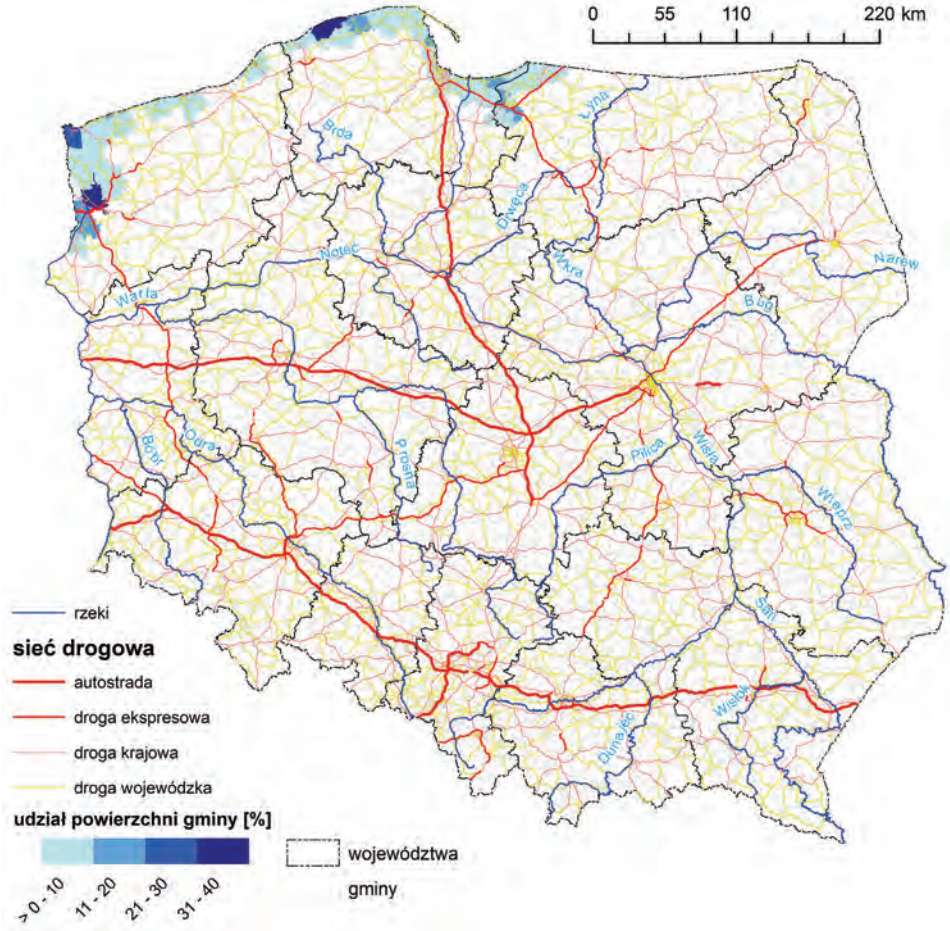
Ryc. 3.9. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019



Ryc. 3.10. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią od rzeki o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r.
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

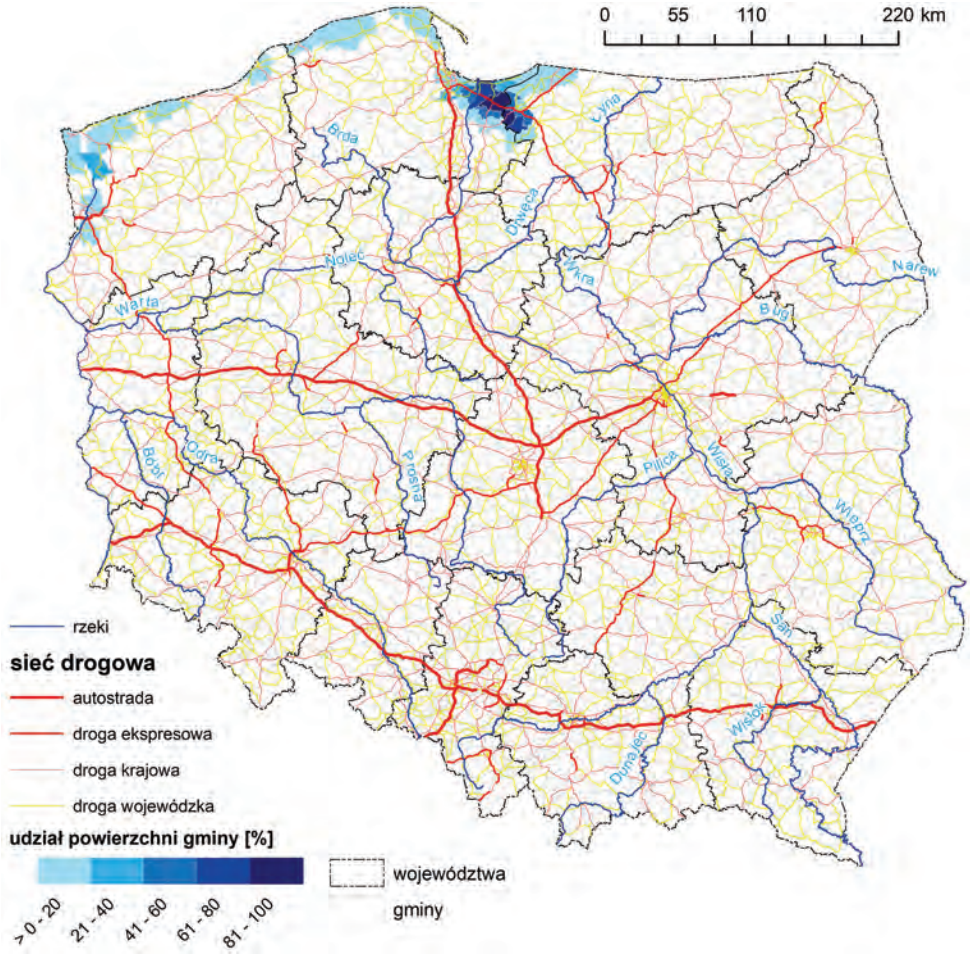
Tereny o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi od strony morza zidentyfikowano w 58 gminach, w tym w 12 z województwa pomorskiego, 22 z województwa warmińsko-mazurskiego i 24 z województwa zachodniopomorskiego. Ich udział w powierzchni gminy nie przekracza 40% (przy czym najwyższy jest w Jastarni). Jeśli zaś chodzi o duże miasta, w granicach których pojawiają się obszary o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi od strony morza, to na terenie całej Polski są cztery takie jednostki. W tym zbiorze zdecydowanie dominuje Szczecin (33% powierzchni miasta), na drugim miejscu jest Gdańsk – 9%, następnie Elbląg – 3,6% i na ostatnim Gdynia – 0,4% (ryc. 3.11).



Ryc. 3.11. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią od morza o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Tereny narażone na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego zidentyfikowano w 45 gminach w Polsce, w tym w 16 z województwa pomorskiego, 15 z województwa warmińsko-mazurskiego i 14 z województwa zachodniopomorskiego. W gminie Gronowo Elbląskie udział omawianych terenów w powierzchni wynosi aż 90,2%, na drugim miejscu pod tym względem jest gmina Nowy Dwór Gdański – 89,9% (ryc. 3.12).

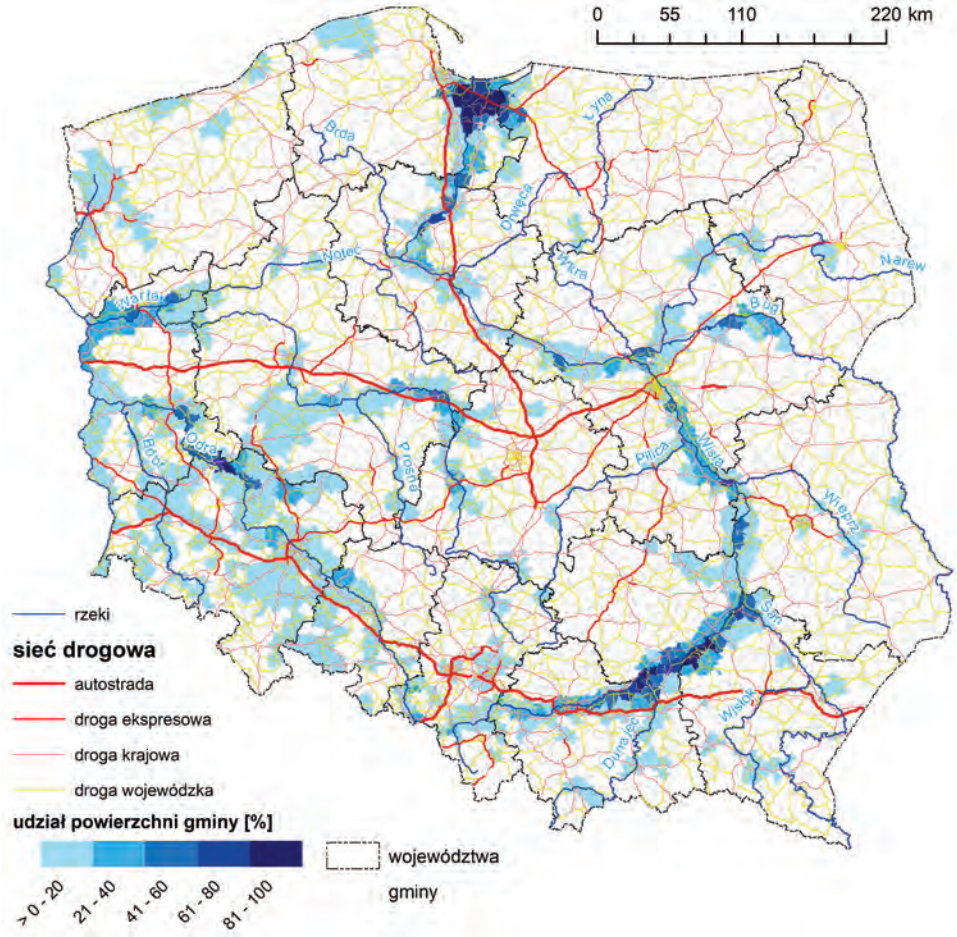


Ryc. 3.12. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

W Polsce w 540 gminach znajdują się tereny narażone na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia obwałowania. Przy czym największa ich powierzchnia jest na obszarze dorzecza Wisły. Najwięcej gmin, w których zidentyfikowano tego typu obszary, znajduje się w województwie dolnośląskim – 87 jednostek. Z tego w czterech gminach udział tych terenów wynosi ponad 90%, a najwyższy jest w gminie Nowy Dwór Gdański – 96,30% (ryc. 3.13). Tereny narażone na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania występują w 24 dużych

ośrodkach miejskich. Największy udział tych terenów przypada na Kraków (21,8%), Gdańsk (16%), Gorzów Wielkopolski (15,6%) oraz Warszawę (12,7%) i Wrocław (12,6%).



Ryc. 3.13. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Poza terenami komunikacyjnymi (a w ich zakresie szczególnie tymi pod drogami kołowymi) celowe wydaje się uwzględnienie w dalszych analizach również innych terenów, których zagospodarowanie może mieć wpływ na funkcjonowanie drogowego transportu samochodowego w czasie i po ustąpieniu powodzi, aż do przywrócenia sieci transportowej i innych podsystemów do poziomu efektywności

sprzed zagrożenia lub innego akceptowanego poziomu równowagi całego systemu. Chodzi np. o tereny, gdzie prowadzona jest działalność gospodarcza. Dane o tym, jaka ich część w wyniku wystąpienia powodzi zostanie nią objęta lub też będzie „odcięta" wskutek zalania czy uszkodzenia dróg, pozwoliłyby na oszacowanie zmian w potencjałach produkcji i atrakcji rejonów komunikacyjnych na etapie modelowania i symulowania ruchu. To jednak wymagałoby znacznie bardziej pogłębionych badań, przynoszących informacje na temat wielkości zatrudnienia w tychże podmiotach czy szacowanej liczby potencjalnych klientów/interesantów. Takie informacje pozwoliłyby określić, jaki potok pojazdów (przy uwzględnieniu m.in. podziału modalnego) nie pojawi się w obrębie sieci drogowej lub będzie skierowany do innego celu / innych celów. Tego typu analizy podjęli się m.in. Siqueira-Gay i in. (2016) w skali miejskiej. Dokładność ich badań wskazuje, że tego rodzaju podejście możliwe jest dla stosunkowo niewielkich obszarów (zarówno ze względu na obszerność danych, jak i konieczność ich regularnej aktualizacji). Niemniej jednak informacja o strukturze zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią w poszczególnych scenariuszach przynosi chociażby ogólne rozeznanie, na jak szeroką skalę należałoby przeprowadzić takie pogłębione badania.

W analizie zagospodarowania na obszarach zagrożonych powodziami w granicach wszystkich obszarów dorzeczy zauważalne są pewne prawidłowości: wyraźnie dominują formy, których wyłączenie z użytkowania w wyniku zalania, generalnie rzecz ujmując, nie powinno wpływać na system transportowy we wskazanym wcześniej zakresie. W skali lokalnej (np. gminnej) struktura ta może przyjmować zgoła inny kształt i w takich przypadkach pogłębiona analiza potencjałów produkcji i atrakacji ruchu jest możliwa i uzasadniona. Na terenach szczególnego zagrożenia powodzią dominującą formą użytkowania terenu są użytki zielone, ich największy udział występuje na terenach o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi (10%) i wynosi ok. 60% (najwyższy jest na obszarze dorzecza Pregoły, najniższy zaś na obszarze dorzecza Odry). Nieznacznie mniejszy ich udział odnotowano na terenach o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi (1%) – 52%, zaś na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% od strony morza – 59% (najwyższy jest w obszarze dorzecza Pregoły, najniższy zaś w obszarze dorzecza Odry). W przypadku terenów zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 10 i 1% na drugim miejscu pod względem powierzchni zajmowanej przez poszczególne formy użytkowania są grunty orne, na trzecim – lasy, z kolei odwrotna sytuacja występuje na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% od strony morza. W obszarze dorzecza Pregoły odnotowano najwyższy udział lasów w przypadku terenów zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie pojawienia się 10 i 1% (w stosunku do pozostałych obszarów dorzeczy). Z kolei w obszarze dorzecza Odry udział lasów na terenach o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi od strony morza jest o 10 punktów procentowych wyższy niż w obszarze dorzecza Wisły.

W przypadku terenów narażonych na zalanie w razie całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego dominującą formą zagospodarowania są grunty orne, wynoszące odpowiednio 65,3% całkowitej ich powierzchni (przy czym ich udział jest zdecydowanie wyższy w obszarze dorzecza Odry), na drugim miejscu są użytki zielone – 27,4% (wyższy udział przypada na obszar dorzecza Wisły), na trzecim lasy – 3,9% (ich udział jest zdecydowanie wyższy w obszarze dorzecza Odry).

Z kolei w przypadku terenów narażonych na zalanie w razie całkowitego zniszczenia obwałowania dominującą formą zagospodarowania są grunty orne, wynoszące 56% (przy czym ich udział jest zdecydowanie wyższy w obszarze dorzecza Wisły), na drugim miejscu pod względem udziału są użytki zielone – 28,5% (w tym przypadku ich udział jest zdecydowanie wyższy w obszarze dorzecza Odry), na trzecim lasy – 9% (ich udział jest zdecydowanie wyższy w obszarze dorzecza Odry) (tab. 3.3).

Tab. 3.3. Struktura zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami w podziale na obszary dorzeczy w Polsce w 2019 r. [%]

Obszar dorzecza	**Forma zagospodarowania**	**Scenariusz powodzi**				
		10%	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
1	2	3	4	5	6	7
Odry	1	0,28	1,00	0,91	0,66	1,73
	2	0,13	0,31	0,54	0,04	0,35
	3	0,14	0,35	0,35	0,17	0,55
	4	17,94	17,89	25,37	14,50	14,03
	5	0,31	0,53	1,57	1,86	0,66
	6	19,31	27,70	3,97	13,15	46,91
	7	58,67	49,51	61,97	68,85	35,06
	8	3,22	2,71	5,33	0,77	0,72
Pregoły	1	0,13	0,29	–	–	–
	2	0,06	0,08	–	–	–
	3	0,02	0,04	–	–	–
	4	24,69	25,40	–	–	–
	5	0,77	0,93	–	–	–
	6	7,86	9,90	–	–	–
	7	64,44	61,16	–	–	–
	8	2,02	2,18	–	–	–

Tab. 3.3 (cd.)

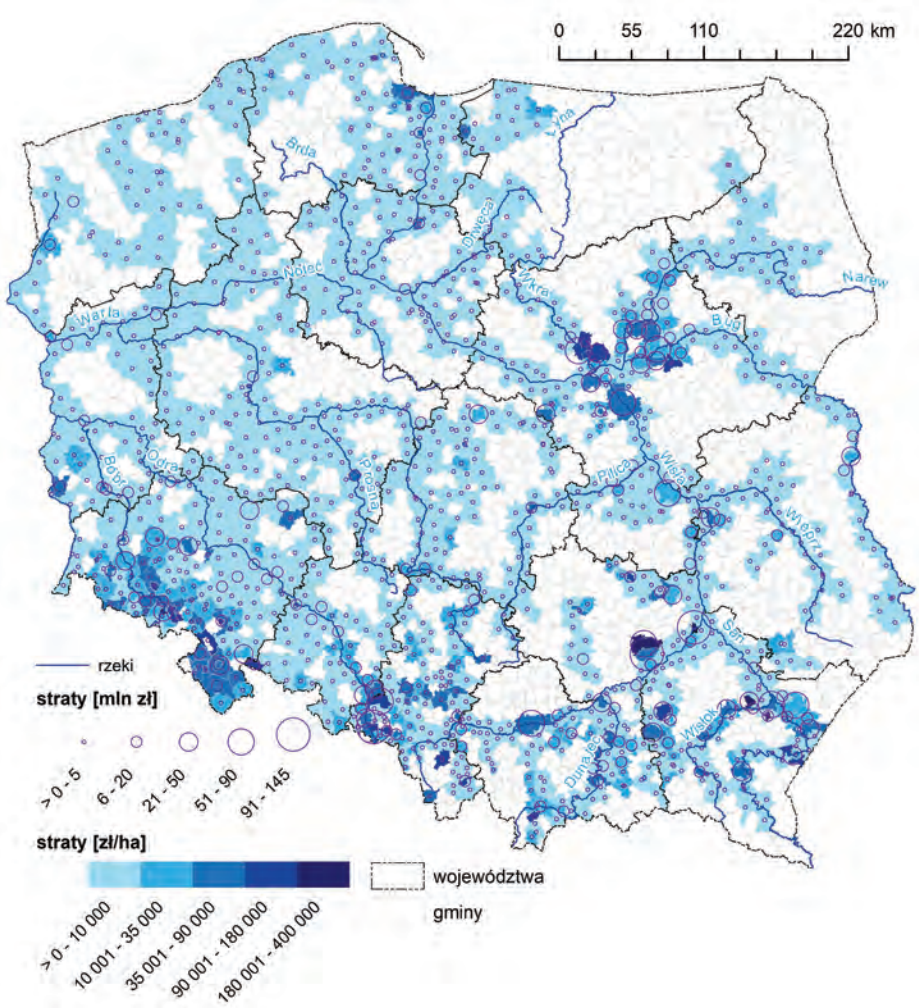
1	2	3	4	5	6	7
Wisły	1	0,47	1,41	1,87	2,11	4,71
	2	0,16	0,27	1,65	0,30	0,67
	3	0,09	0,19	1,06	0,44	0,71
	4	13,73	14,07	15,58	2,34	6,53
	5	0,34	0,47	1,42	0,26	0,58
	6	16,70	24,26	15,39	73,08	60,95
	7	61,16	54,01	56,62	21,22	24,94
	8	7,35	5,33	6,40	0,24	0,91

1 – tereny zabudowy mieszkaniowej, 2 – tereny przemysłowe, 3 – tereny komunikacyjne, 4 – lasy, 5 – tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, 6 – grunty orne, 7 – użytki zielone, 8 – tereny pozostałe (nie wylicza się potencjalnych strat).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

W wyniku wystąpienia powodzi w Polsce o prawdopodobieństwie wynoszącym 10% aż 1282 gminy poniosłyby straty materialne[4]. Ich najwyższa wartość przypada na Sandomierz. Dolina Górnej Wisły na odcinku od Oświęcimia do Sandomierza i Zawichostu osiąga szerokość wielu kilometrów. Tereny zalewowe Wisły osiągają największe rozmiary w miejscach, gdzie rzeka łączy się ze swoimi prawostronnymi, większymi dopływami karpackimi: Sołą, Skawą, Rabą, Dunajcem, Wisłoką i Sanem. Niestety ma to wpływ na zagospodarowanie tych obszarów, bowiem w szczególności zabudowa lokalizowana jest w miejscach, gdzie równina zalewowa jest najszersza (Borowska-Stefańska 2015b). Generalnie zauważyć można, że wysokie potencjalne straty materialne związane są przede wszystkim z województwami znajdującymi się w południowej części kraju – podkarpackim, małopolskim, śląskim i dolnośląskim (ryc. 3.14). Ponadto wysokie straty na omawianych obszarach dotyczą dużych miast – w szczególności Warszawy, co ma związek z istniejącymi w granicach rejonów zalewowych terenami mieszkaniowymi czy przemysłowymi (co predestynuje je do wspomnianej wcześniej pogłębionej analizy).

[4] Metodyka ich obliczania znajduje się w Rozporządzeniu Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego, Dz.U. 2013, poz. 104.

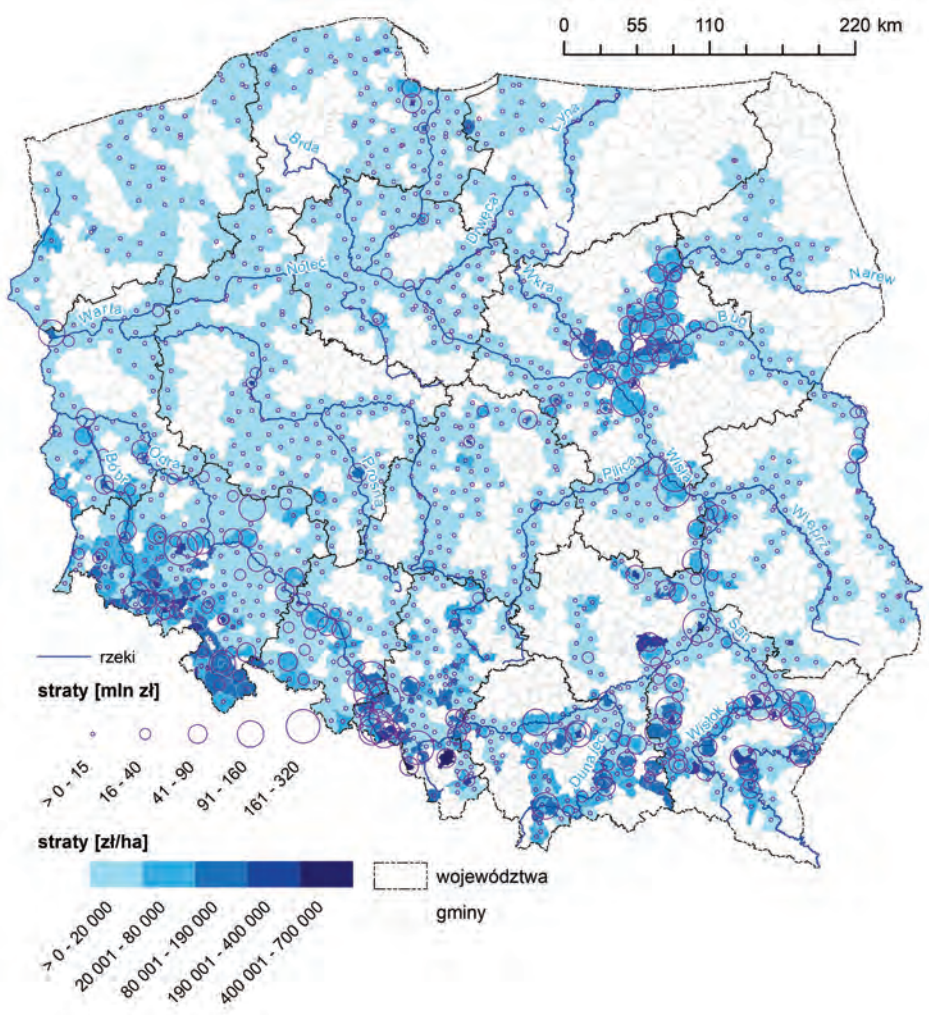


Ryc. 3.14. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

W wyniku wystąpienia powodzi w Polsce o prawdopodobieństwie wynoszącym 1% aż 1286 gmin poniosłoby straty materialne. W tym przypadku bezwzględne potencjalne straty materialne, jak i w przeliczeniu na hektar są zdecydowanie wyższe niż w przypadku powodzi o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia. Najwyższe potencjalne straty materialne na analizowanych obszarach dotyczą gminy Lubomia (województwo śląskie). Najwyższe potencjalne

straty materialne również w przypadku terenów o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia dotyczą gmin położonych w południowej części Polski, a także Warszawy i gmin z nią sąsiadujących (rys. 3.15).

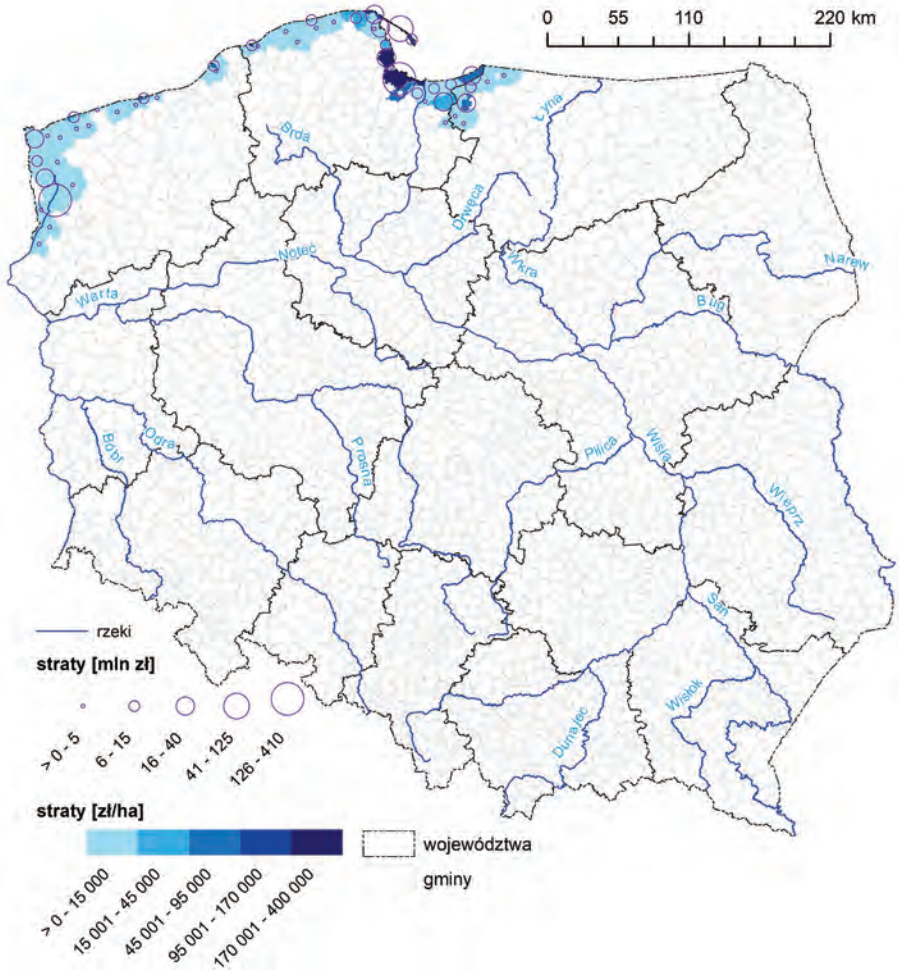


Ryc. 3.15. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Jak więc widać, intensywne zagospodarowanie terenów szczególnego zagrożenia powodzią (10 i 1%) jest zauważalne przede wszystkim w miastach oraz tam, gdzie

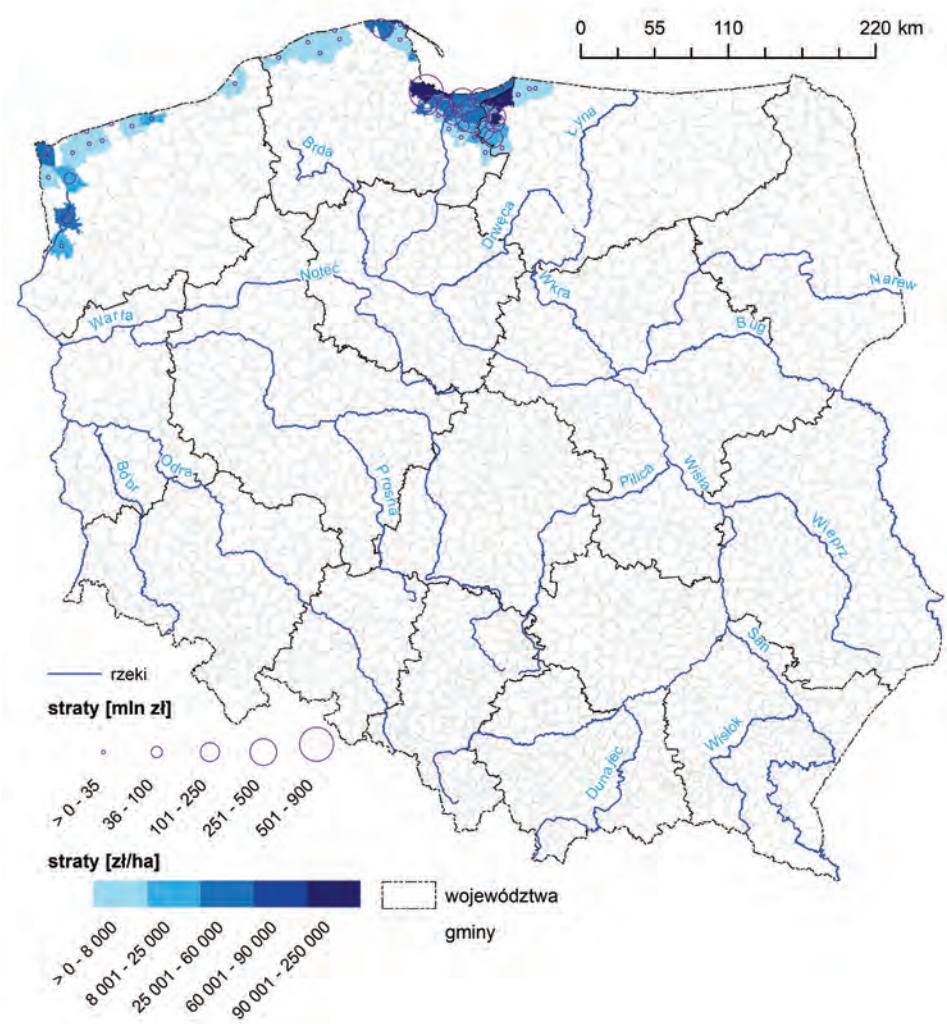
tereny zalewowe są bardzo szerokie i nie istnieją wały przeciwpowodziowe (Borowska-Stefańska 2015b). Analizując potencjalne straty materialne na terenach o średnim prawdopodobieństwie pojawienia się powodzi od strony morza należy stwierdzić, że w tym przypadku dotyczą one 52 gmin. Przy czym zdecydowanie najgorzej na tym tle wypada Gdańsk, w którym potencjalne straty materialne byłyby ponad trzy razy większe niż w Szczecinie (który pod względem ogółu potencjalnych strat materialnych na omawianych terenach plasuje się na drugim miejscu) (ryc. 3.16). Tereny zalewowe w przypadku Gdańska są niezwykle szerokie, jest to bowiem ujściowy, nadbałtycki odcinek doliny, który stanowi rozległa delta Żuław Wiślanych.



Ryc. 3.16. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

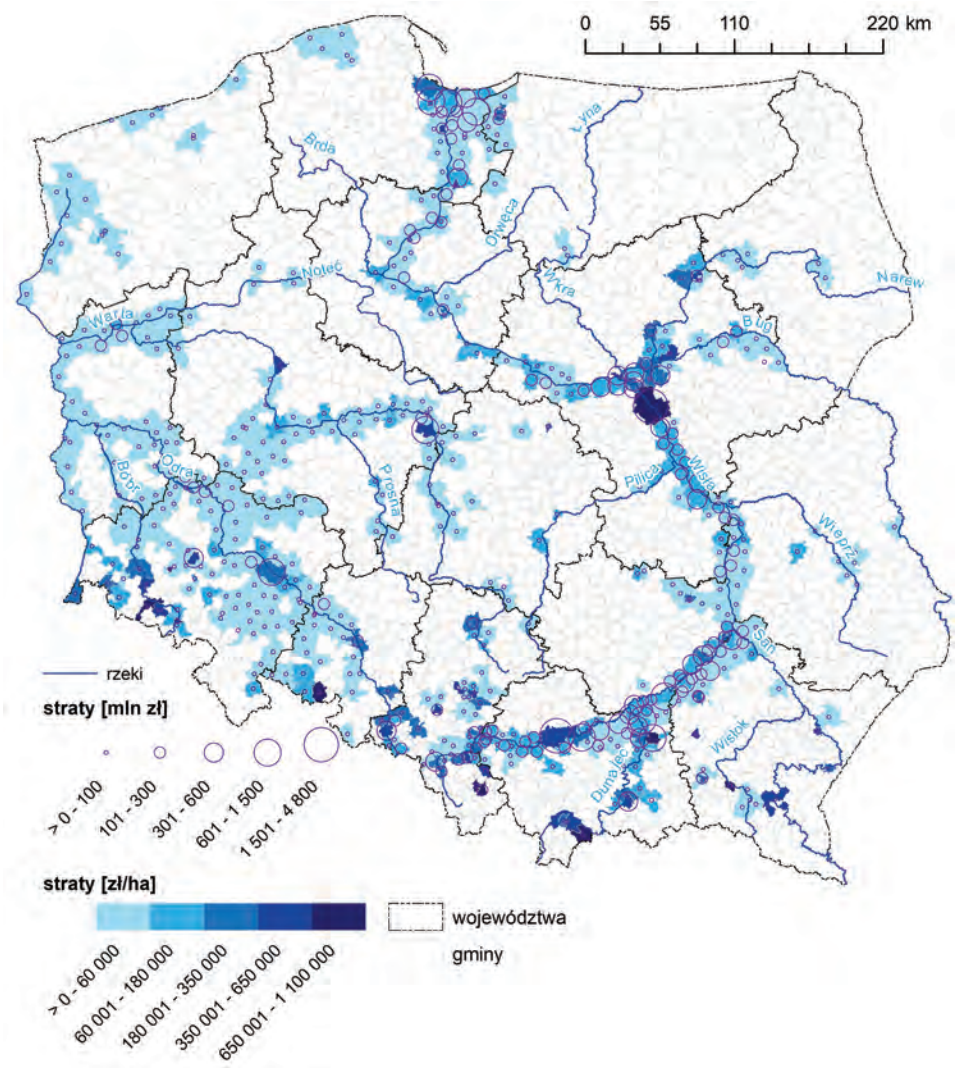
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

W wyniku wystąpienia powodzi w Polsce na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego potencjalne straty materialne objęłyby obszary położone w granicach 44 gmin. Przy czym najwyższe związane są z gminami zlokalizowanymi w ujściowym odcinku Wisły (ryc. 3.17).



Ryc. 3.17. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019



Ryc. 3.18. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wysokości potencjalnych strat materialnych związanych z wystąpieniem powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Analizując potencjalne straty materialne na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia obwałowania można stwierdzić, że objęłyby one aż 540 gmin. Przy czym zdecydowanie najwyższe straty dotyczą dwóch dużych miast – Warszawy i Krakowa. W przypadku Krakowa wpływ na to mają predyspozycje tektoniczne i geomorfologiczne doliny Wisły, która odznacza się dużą szerokością,

dochodzącą maksymalnie do 5 km. Obszary te zostały obwałowane, a tereny położone poza wałami są intensywnie zabudowywane. Znaczne zainwestowanie obszarów zalewowych w połączeniu z uwarunkowaniami przyrodniczymi sprawia, że potencjalne straty materialne są w Krakowie wysokie. Z kolei w przypadku Warszawy wpływ na to ma fakt, że są to tereny bardzo rozległe, przebiegające przez centrum miasta. Jak więc pokazują przeprowadzone badania, potencjalne straty materialne na omawianych obszarach związane są głównie z doliną Wisły (ryc. 3.18).

Zagospodarowanie terenów położonych poza wałami wynika z przeświadczenia o niezawodności urządzeń ochronnych. Wpływ na to ma również fakt, że często są to tereny bardzo rozległe, położone np. w granicach miast, obejmujące ich znaczny obszar. Dlatego też wyłączenie z zabudowy terenów położonych poza wałami nie jest możliwe.

W przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% szczególnie niebezpieczne dla terenów komunikacyjnych jest wystąpienie zagrożenia na obszarze regionu wodnego Środkowej Odry – niemalże jedna trzecia wszystkich zagrożonych terenów o tej funkcji w Polsce zlokalizowana jest w tym regionie. Sytuacja ta jest jeszcze bardziej niekorzystna w przypadku powodzi o średnim prawdopodobieństwie (sięgając niemal 40%). Jeśli zaś chodzi o scenariusze związane z oddziaływaniem morza, to zdecydowanie bardziej destrukcyjna jest ich działalność względem terenów komunikacyjnych w regionie wodnym Dolnej Wisły. Ponad jedna czwarta powierzchni wszystkich terenów komunikacyjnych zagrożonych zalaniem w wyniku zniszczenia wałów przeciwpowodziowych występuje natomiast w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły (tab. 3.4).

W wyniku wystąpienia w Polsce powodzi o prawdopodobieństwie wynoszącym 10% 810 gmin poniosłoby straty materialne na skutek zniszczenia terenów komunikacyjnych. Przy czym najwyższe potencjalne straty materialne w tym przypadku dotyczą Warszawy (straty ogółem). Ponadto wysokie możliwe straty materialne związane ze zniszczeniem terenów komunikacyjnych (ogółem) na omawianych obszarach dotyczą gmin położonych w województwie dolnośląskim – również ich udział w ogóle potencjalnych strat materialnych jest w tym przypadku znaczący (ryc. 3.19). Średni udział potencjalnych strat związanych ze zniszczeniem terenów komunikacyjnych w odniesieniu do ogółu gmin dotkniętych zjawiskiem powodzi w tym wariancie wynosi 11,9% i jest znacznie zróżnicowany, bowiem jego odchylenie standardowe przekracza 19 punktów procentowych. Najwyższy średni procentowy udział dotyczy województwa kujawsko-pomorskiego (19,3%) przy 42 gminach, gdzie tego rodzaju straty wystąpiły. To również region, gdzie zmienność tej cechy jest wyraźnie najwyższa (odchylenie standardowe wynosi aż 24,8 punktu procentowego). Przy uwzględnieniu jedynie liczebności gmin, na terenie których mogą wystąpić straty w zakresie terenów komunikacyjnych, zdecydowanie najbardziej niekorzystna sytuacja ma miejsce na Dolnym Śląsku (119 gmin).

Tab. 3.4. Struktura zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na regiony wodne w 2019 r. [%]

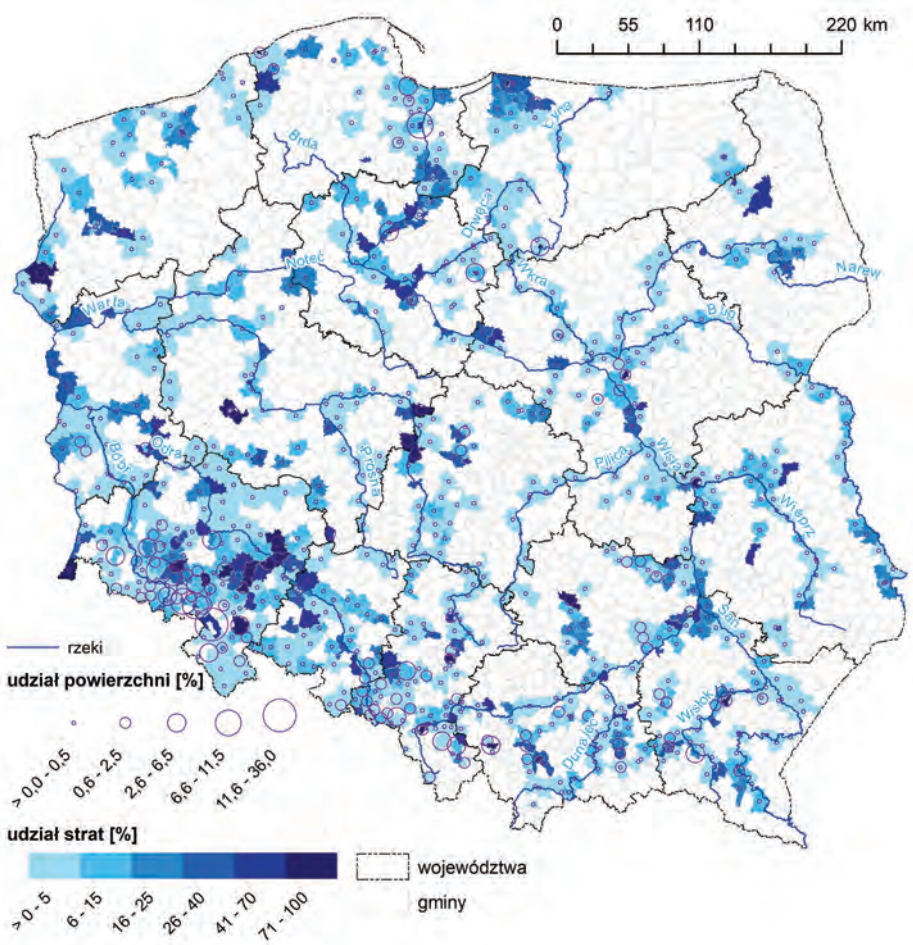
Scenariusz powodzi	Forma zagospodarowania	Struktura zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami [ha]												
		Obszar dorzecza Wisły							Obszar dorzecza Odry					Obszar dorzecza Pregoły
		region wodny Bugu	region wodny Dolnej Wisły	region wodny Górnej-Wschodniej Wisły	region wodny Górnej-Zachodniej Wisły	region wodny Małej Wisły	region wodny Narwi	region wodny Środkowej Wisły	region wodny Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	region wodny Górnej Odry	region wodny Noteci	region wodny Środkowej Odry	region wodny Warty	region wodny Łyny i Węgorapy
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10%	1	9,15	2,65	8,15	18,55	0,74	4,79	25,89	1,47	7,69	0,74	15,63	4,48	0,07
	2	1,14	2,79	22,65	21,41	0,44	0,44	14,54	0,83	17,04	0,20	16,01	2,41	0,09
	3	3,03	10,55	7,06	13,74	0,97	1,56	10,59	2,40	11,53	0,81	31,33	6,37	0,04
	4	9,29	5,89	4,65	6,02	0,36	8,55	16,59	5,79	1,90	2,19	28,49	9,91	0,35
	5	7,31	12,44	14,24	7,63	0,53	1,94	15,70	3,25	4,58	2,30	24,24	5,31	0,52
	6	7,25	9,50	14,62	6,16	0,56	2,07	14,39	1,54	9,38	0,79	21,78	11,87	0,10
	7	13,51	5,56	4,01	7,90	0,49	14,13	13,42	5,84	1,24	6,36	13,00	14,30	0,24
	8	5,06	5,09	6,38	19,99	1,03	4,84	33,60	1,96	1,80	3,58	4,68	11,91	0,08
1%	1	5,67	2,74	19,02	11,81	1,85	5,73	18,35	0,95	9,89	0,41	20,05	3,49	0,04
	2	1,00	2,97	21,78	14,89	1,86	0,88	10,05	0,97	14,23	0,89	25,98	4,44	0,05
	3	2,73	5,41	10,32	10,57	2,19	1,64	8,24	1,61	14,03	0,55	38,29	4,38	0,03
	4	8,92	5,18	4,55	4,86	0,54	11,10	15,68	4,31	2,81	2,04	30,96	8,77	0,30
	5	5,88	7,94	13,75	6,66	1,55	2,62	15,37	2,74	7,95	1,38	29,78	4,03	0,35
	6	5,93	6,03	19,54	4,81	0,79	2,86	13,65	1,04	9,82	1,06	25,57	8,81	0,07
	7	12,58	5,34	5,81	6,94	0,65	13,84	13,76	4,90	1,93	7,20	13,69	13,14	0,22
	8	4,98	4,66	6,40	18,51	1,63	5,71	30,28	1,98	2,73	5,79	6,30	10,93	0,10

Tab. 3.4 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1%M	1	–	65,11	–	–	–	–	–	34,89	–	–	–	–	–
	2	–	73,71	–	–	–	–	–	26,29	–	–	–	–	–
	3	–	73,61	–	–	–	–	–	26,39	–	–	–	–	–
	4	–	35,91	–	–	–	–	–	64,09	–	–	–	–	–
	5	–	45,24	–	–	–	–	–	54,76	–	–	–	–	–
	6	–	77,96	–	–	–	–	–	22,04	–	–	–	–	–
	7	–	45,46	–	–	–	–	–	54,54	–	–	–	–	–
	8	–	52,30	–	–	–	–	–	47,70	–	–	–	–	–
PZ	1	–	95,57	–	–	–	–	–	4,43	–	–	–	–	–
	2	–	97,98	–	–	–	–	–	2,02	–	–	–	–	–
	3	–	94,62	–	–	–	–	–	5,38	–	–	–	–	–
	4	–	52,00	–	–	–	–	–	48,00	–	–	–	–	–
	5	–	48,71	–	–	–	–	–	51,29	–	–	–	–	–
	6	–	97,39	–	–	–	–	–	2,61	–	–	–	–	–
	7	–	67,39	–	–	–	–	–	32,61	–	–	–	–	–
	8	–	68,02	–	–	–	–	–	31,98	–	–	–	–	–
WZ	1	1,25	15,49	8,18	34,49	2,11	0,36	21,38	0,17	2,25	0,26	8,28	5,78	–
	2	0,56	14,47	5,11	38,93	3,50	0,10	15,29	0,07	4,17	0,06	7,71	10,03	–
	3	0,32	18,46	4,61	25,81	2,14	0,35	18,89	0,45	3,51	0,10	19,56	5,81	–
	4	3,92	7,16	4,62	15,16	0,88	0,21	14,11	4,14	0,77	0,75	39,35	8,94	–
	5	2,30	12,96	3,32	13,78	3,43	0,44	25,40	1,30	3,63	0,00	22,77	10,66	–
	6	1,00	31,43	5,25	19,69	0,59	0,06	12,58	0,84	1,76	0,53	16,17	10,11	–
	7	4,60	14,72	4,75	17,81	1,25	0,55	13,06	3,87	1,07	4,36	14,63	19,35	–
	8	4,74	6,78	3,72	19,18	9,66	0,16	25,44	0,76	2,85	0,87	9,83	16,00	–

1 – tereny zabudowy mieszkaniowej, 2 – tereny przemysłowe, 3 – tereny komunikacyjne, 4 – lasy, 5 – tereny rekreacyjno-wypoczynkowe, 6 – grunty orne, 7 – użytki zielone, 8 – tereny pozostałe (nie wylicza się strat).

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

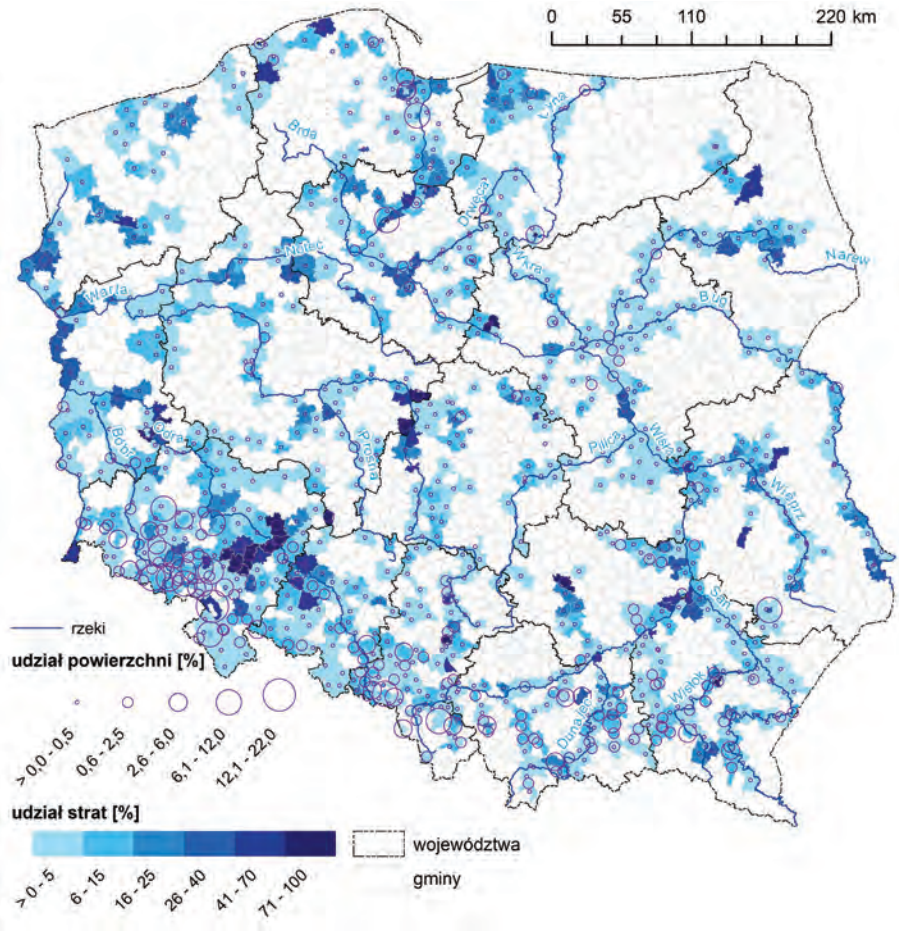


Ryc. 3.19. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

W wyniku wystąpienia powodzi w Polsce o prawdopodobieństwie wynoszącym 1% aż 906 gmin poniosłoby straty materialne na skutek zniszczenia terenów komunikacyjnych. W tym przypadku potencjalne straty materialne dla omawianej formy zagospodarowania są najwyższe w gminie miejsko-wiejskiej Siechnice (województwo dolnośląskie). Generalnie w razie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie wynoszącym 1% największe straty w zakresie terenów komunikacyjnych dotyczą głównie gmin położonych w województwach dolnośląskim i opolskim. Z kolei Warszawa w zestawieniu ogółu strat komunikacyjnych znajduje się na

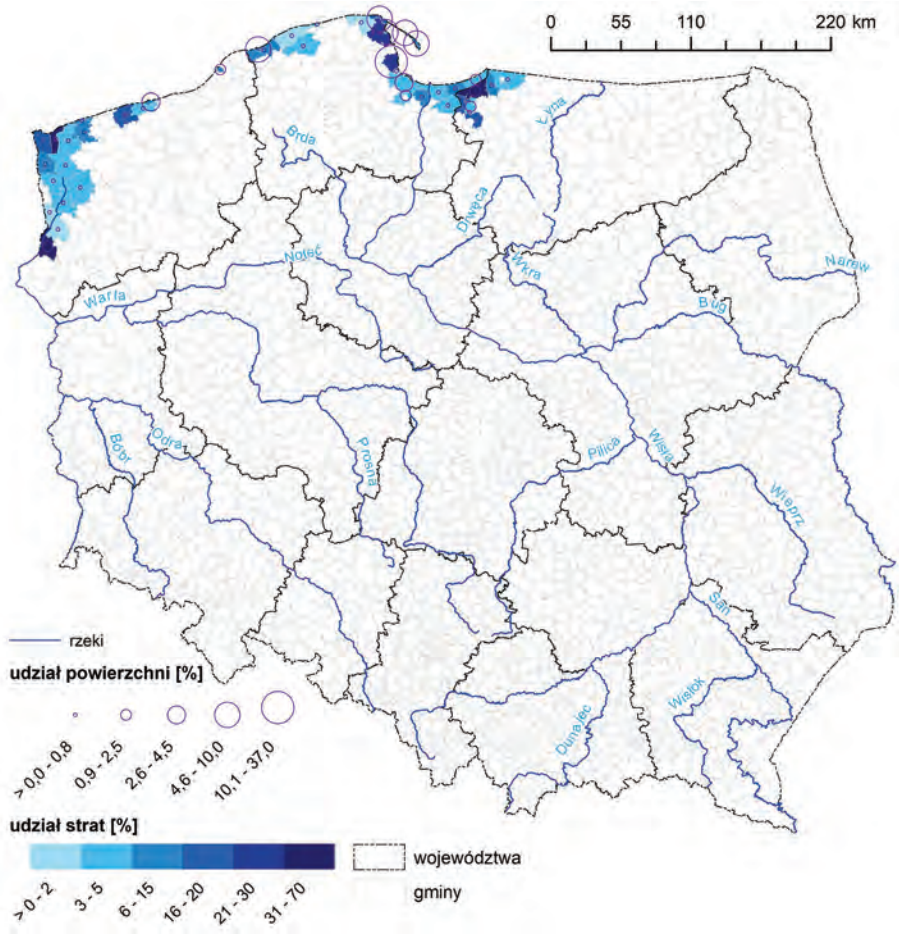
10. miejscu (rys. 3.20). W stosunku do scenariusza powodzi o wysokim prawdopodobieństwie w tym przypadku występuje spadek średniego udziału potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów komunikacyjnych do 9,2%. Również zróżnicowanie wyników zmniejszyło się o mniej więcej pięć punktów procentowych. Uwzględniając udział w powierzchni, najwyższa średnia dotyczy województwa świętokrzyskiego (14,1%), choć została ona określona na podstawie danych tylko z 33 gmin. Pod tym względem najliczniej reprezentowane przez gminy jest natomiast województwo dolnośląskie (125 gmin). Ujmując potencjalne starty powstałe na skutek zalania terenów komunikacyjnych w sposób bezwzględny, wyraźnie w najbardziej niekorzystnej sytuacji jest województwo mazowieckie.



Ryc. 3.20. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

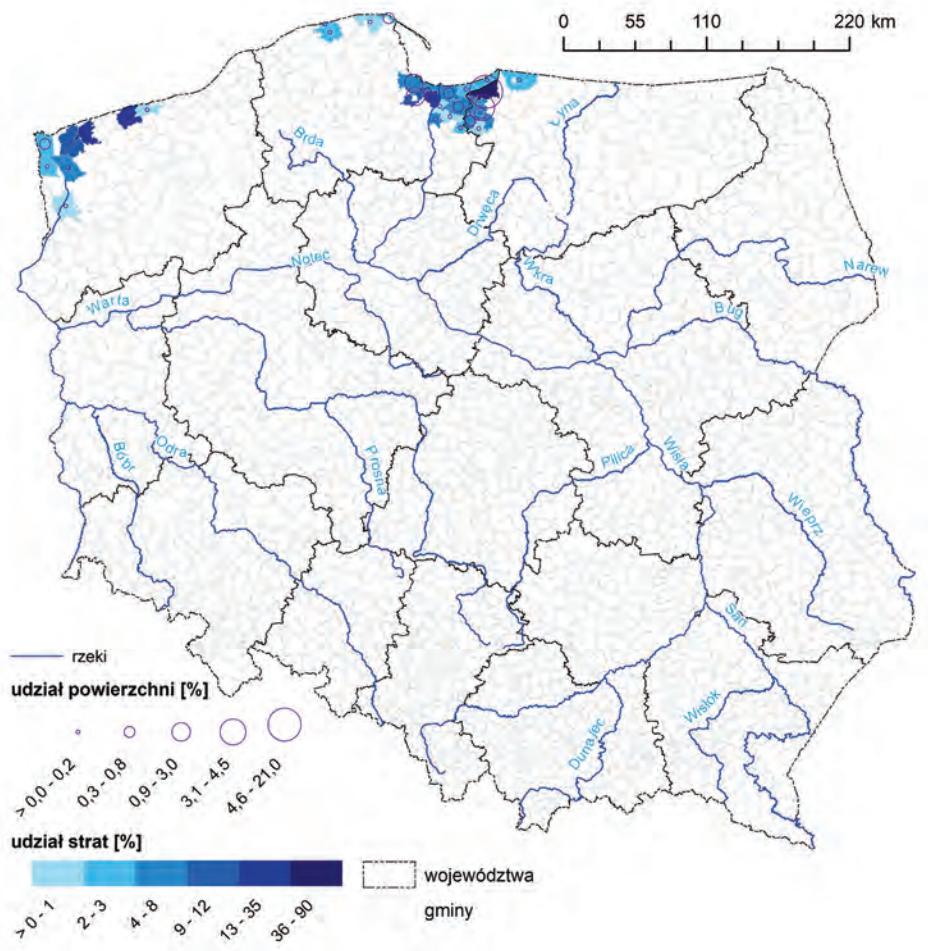
Analizując potencjalne straty materialne w zakresie terenów komunikacyjnych na obszarach o średnim prawdopodobieństwie pojawienia się powodzi od strony morza należy stwierdzić, że w tym przypadku dotyczą one 42 gmin. Przy czym zdecydowanie najgorzej na tym tle wypada Gdańsk, w którym potencjalne straty materialne dla terenów komunikacyjnych byłyby blisko dwa razy większe niż w gminie miejsko-wiejskiej Jastarnia (która pod względem ogółu potencjalnych strat materialnych w zakresie terenów komunikacyjnych na omawianych obszarach plasuje się na drugim miejscu) (ryc. 3.21).



Ryc. 3.21. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

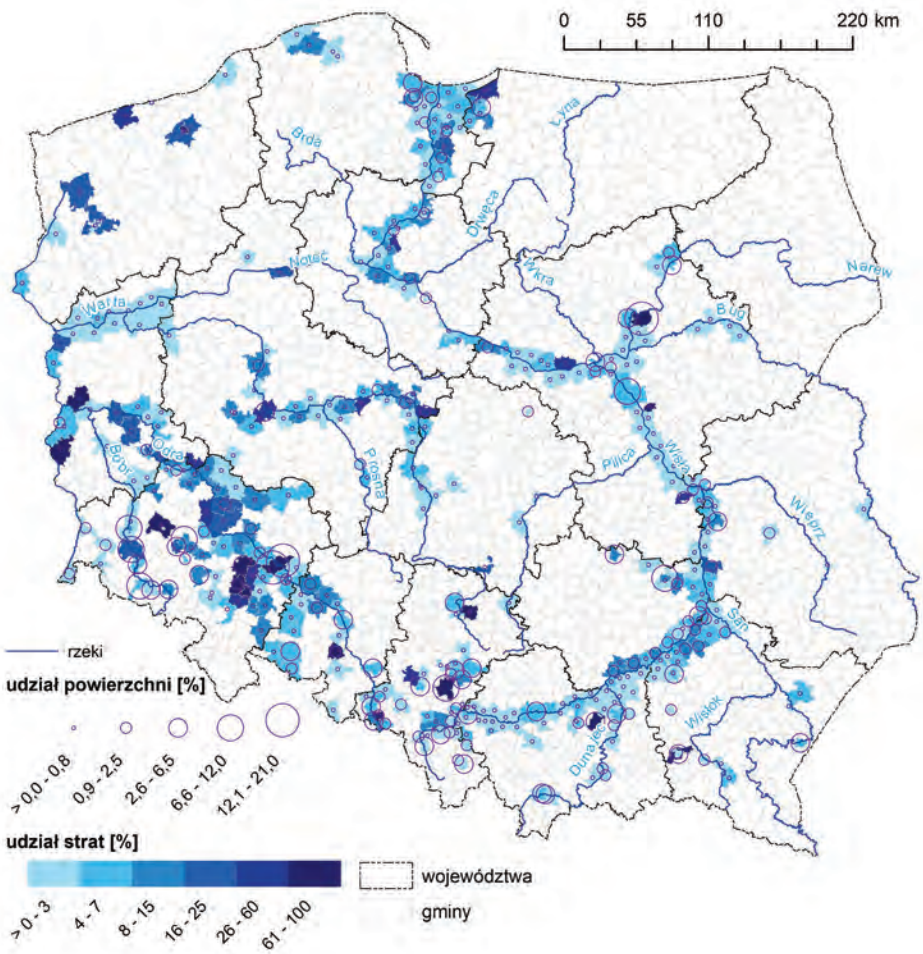
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

W wyniku wystąpienia powodzi w Polsce na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego potencjalne straty materialne dla terenów komunikacyjnych objęłyby obszary położone w granicach 29 gmin. Przy czym najwyższe straty dotyczące terenów komunikacyjnych związane są przede wszystkim z gminami zlokalizowanymi w ujściowym odcinku Wisły (pierwsze osiem gmin według wysokości strat materialnych ogółem dla terenów komunikacyjnych) (ryc. 3.22).



Ryc. 3.22. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019



Ryc. 3.23. Udział powierzchni oraz potencjalnych start wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Analizując potencjalne straty materialne dla terenów komunikacyjnych na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia obwałowania można stwierdzić, że objęłyby one 404 gminy. Przy czym zdecydowanie najwyższe straty, które wystąpiłyby na skutek zniszczenia terenów komunikacyjnych (w wariancie, wedle którego obwałowanie ulega całkowitemu zniszczeniu), dotyczą dwóch dużych miast – Warszawy i Krakowa, tak samo jak w przypadku strat ogółem (ryc. 3.23). Średni udział potencjalnych strat dla całej zbiorowości w tym

scenariuszu wynosi 8,52% i podobnie jak we wcześniej analizowanych wariantach cechuje się wyraźnym zróżnicowaniem (odchylenie standardowe wynosi 16,82 punktu procentowego). Skala regionalna badania ujawnia, że średnia ta znacznie wzrasta (wynosi 17,04%) i pośród wszystkich województw Polski wyraźnie najwyższa jest w przypadku województwa dolnośląskiego. Jest to też województwo, gdzie występuje najliczniejsza, licząca 59 jednostek, grupa gmin, na terenie których zalaniu ulec mogą tereny komunikacyjne. Liczebności tej towarzyszy jednak najwyższy poziom zróżnicowania udziału w ogóle potencjalnych strat. W ujęciu bezwzględnym najwyższe potencjalne straty związane z zalaniem terenów komunikacyjnych dotyczą województwa mazowieckiego.

Największy odsetek strat dla terenów komunikacyjnych (w ogóle strat dla tych terenów) w granicach obszarów szczególnego zagrożenia powodzią dotyczy regionu Wodnego Środkowej Odry (zarówno dla terenów o wysokim, jak i średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi). W przypadku terenów zagrożonych powodzią od strony morza o prawdopodobieństwie 1% oraz narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego największy udział strat dla terenów komunikacyjnych przypada na region wodny Dolnej Wisły. Z kolei analizując udział potencjalnych strat materialnych dla terenów komunikacyjnych (w ogóle strat dla tej formy zagospodarowania) w granicach terenów narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia obwałowań widać, że jest on najwyższy w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły (tab. 3.5).

Dla uszczegółowienia analiz dotyczących form zagospodarowania terenów narażonych na zalanie wprowadzono dane z zasobu BDOT dotyczące terenów pod drogami kołowymi[5]. Ich uwzględnienie wykazało, że w wyniku wystąpienia w Polsce powodzi o prawdopodobieństwie wynoszącym 10% 717 gmin poniosłoby straty materialne na skutek zalania terenów pod drogami kołowymi[6]. Ponadto,

---

[5] Teren zajęty pod jezdnie, pobocza i urządzenia przeznaczone do wykonywania i obsługi ruchu drogowego bez względu na ograniczenia w ruchu, również drogi, gdzie odbywa się wyłącznie ruch pieszy). Tereny, w ramach których nie można wydzielić innych elementów pokrycia terenu (Opis baz danych obiektów topograficznych i ogólnogeograficznych oraz standardy techniczne tworzenia map. Załącznik do rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 17 listopada 2011 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych, t. 1).

[6] Należy pamiętać, że stawka, którą zastosowano w celu określenia strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi, została ustalona z uwzględnieniem wartości wszystkich typów terenów komunikacyjnych (w tym np. utwardzonych dróg lotniskowych czy torowisk) na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego, Dz.U. 2013, poz. 104.

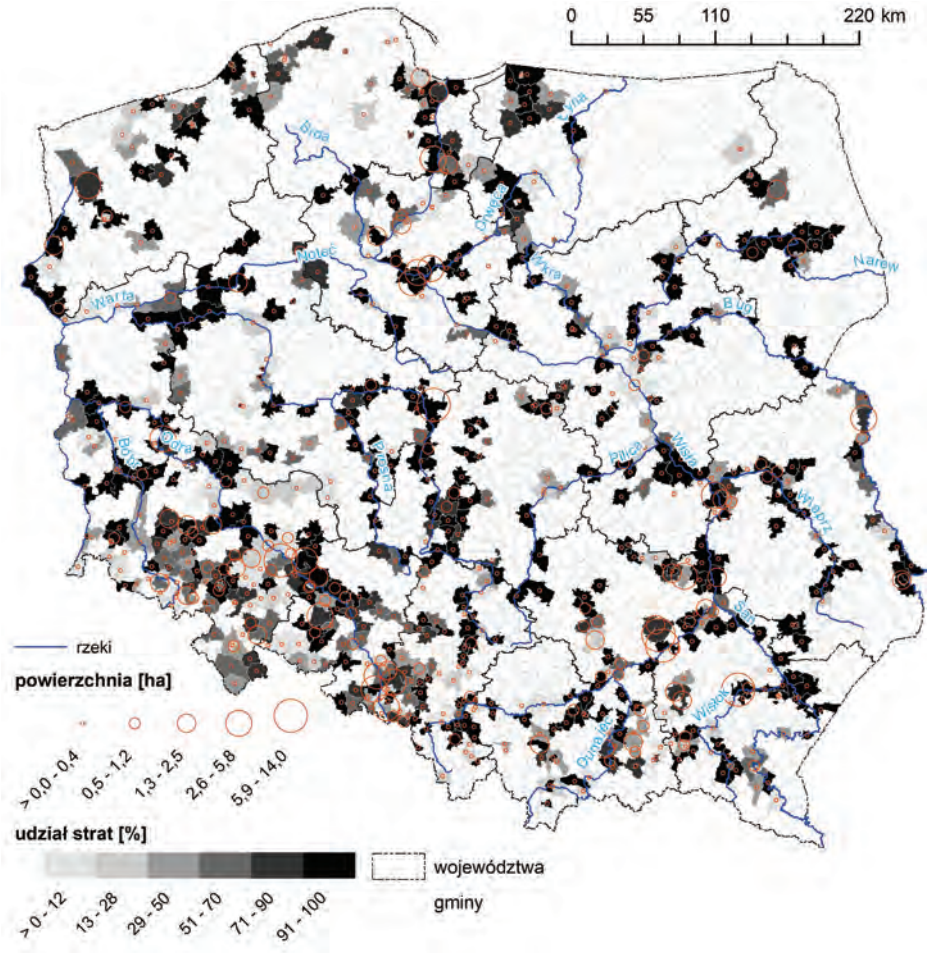
Tab. 3.5. Struktura wielkości potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów komunikacyjnych wg regionów wodnych i scenariuszy powodziowych w Polsce w 2019 r. [%]*

Scenariusz powodzi	Struktura wielkości potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów komunikacyjnych [%]												
	Obszar dorzecza Wisły							Obszar dorzecza Odry					Obszar dorzecza Pregoły
	region wodny Bugu	region wodny Dolnej Wisły	region wodny Górnej--Wschodniej Wisły	region wodny Górnej--Zachodniej Wisły	region wodny Małej Wisły	region wodny Narwi	region wodny Środkowej Wisły	region wodny Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	region wodny Górnej Odry	region wodny Noteci	region wodny Środkowej Odry	region wodny Warty	region wodny Łyny i Węgorapy
10%	2,90	11,56	7,47	14,18	0,99	1,63	11,24	2,22	11,40	0,66	29,44	6,29	0,04
1%	2,66	5,32	10,48	10,95	2,06	1,51	8,36	1,49	14,89	0,49	37,55	4,22	0,03
1%M	–	74,77	–	–	–	–	–	25,23	–	–	–	–	–
PZ	–	95,48	–	–	–	–	–	4,52	–	–	–	–	–
WZ	0,30	20,16	4,09	26,30	1,97	0,33	18,41	0,41	3,68	0,08	18,75	5,51	–

* Różnice w strukturze względem tabeli 3.4 wynikają z uwzględnienia zróżnicowanych stawek, które w przypadku terenów komunikacyjnych są uzależnione od głębokości wody powodziowej.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

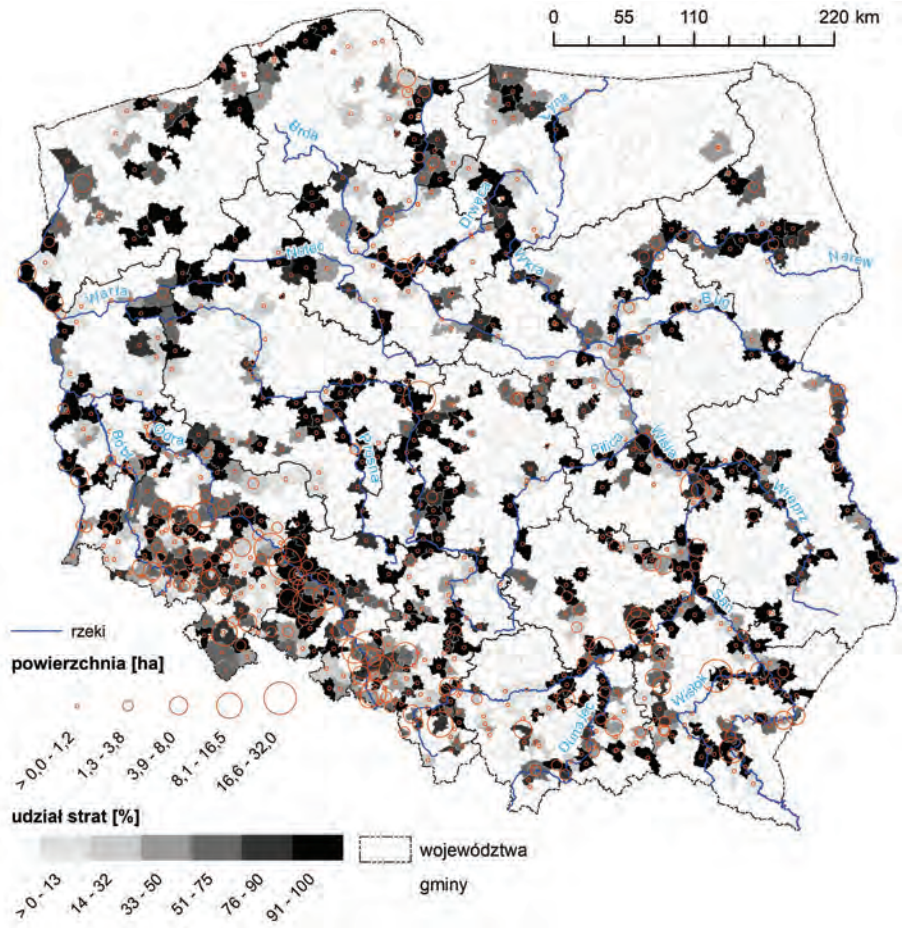
jak widać na ryc. 3.24, udział strat dla dróg kołowych w ogóle strat dla terenów komunikacyjnych jest wysoki i dotyczy większości gmin w Polsce, w granicach których znajdują się tereny o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi. Średni odsetek potencjalnych strat w stosunku do ogółu zagrożonych terenów komunikacyjnych dla wszystkich gmin, na terenie których zidentyfikowano tereny pod drogami kołowymi zagrożone powodzią w analizowanym scenariuszu, wynosi 68,14% i – co potwierdza ryc. 3.24 – jest wyraźnie zróżnicowany (odchylenie standardowe sięga 36,37 punktu procentowego).



Ryc. 3.24. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

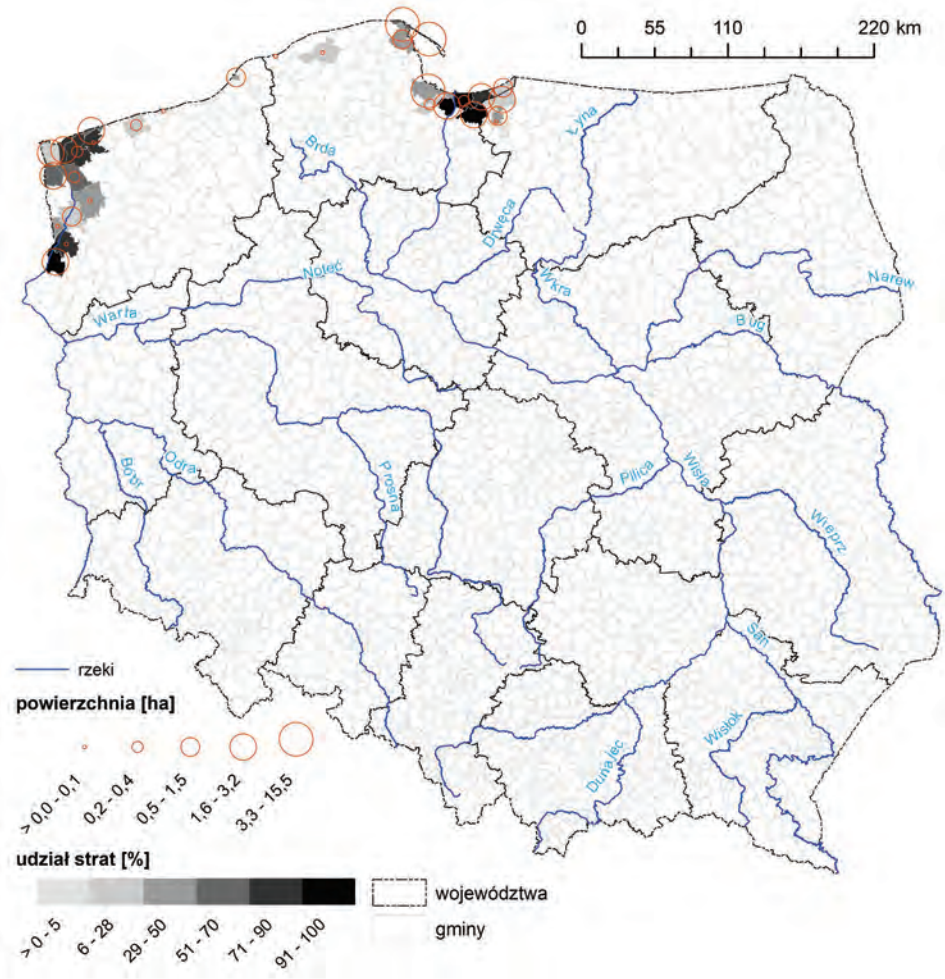
W wyniku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie wynoszącym 1% liczba gmin, które poniosłyby straty materialne na skutek zalania terenów pod drogami kołowymi, wzrosłaby do 820. Zarówno w tym przypadku, jak i w związku z powodzią o wysokim prawdopodobieństwie potencjalne straty materialne dotyczące omawianej formy zagospodarowania (ogółem) są najwyższe dla gmin w południowo-zachodniej Polsce (szczególnie w województwie dolnośląskim, np. Legnica) (ryc. 3.25). Średni poziom i zmienność udziału potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami w stosunku do ogółu możliwych strat komunikacyjnych w gminach pozostały niemalże niezmienne w stosunku do scenariusza powodzi o wysokim prawdopodobieństwie.



Ryc. 3.25. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

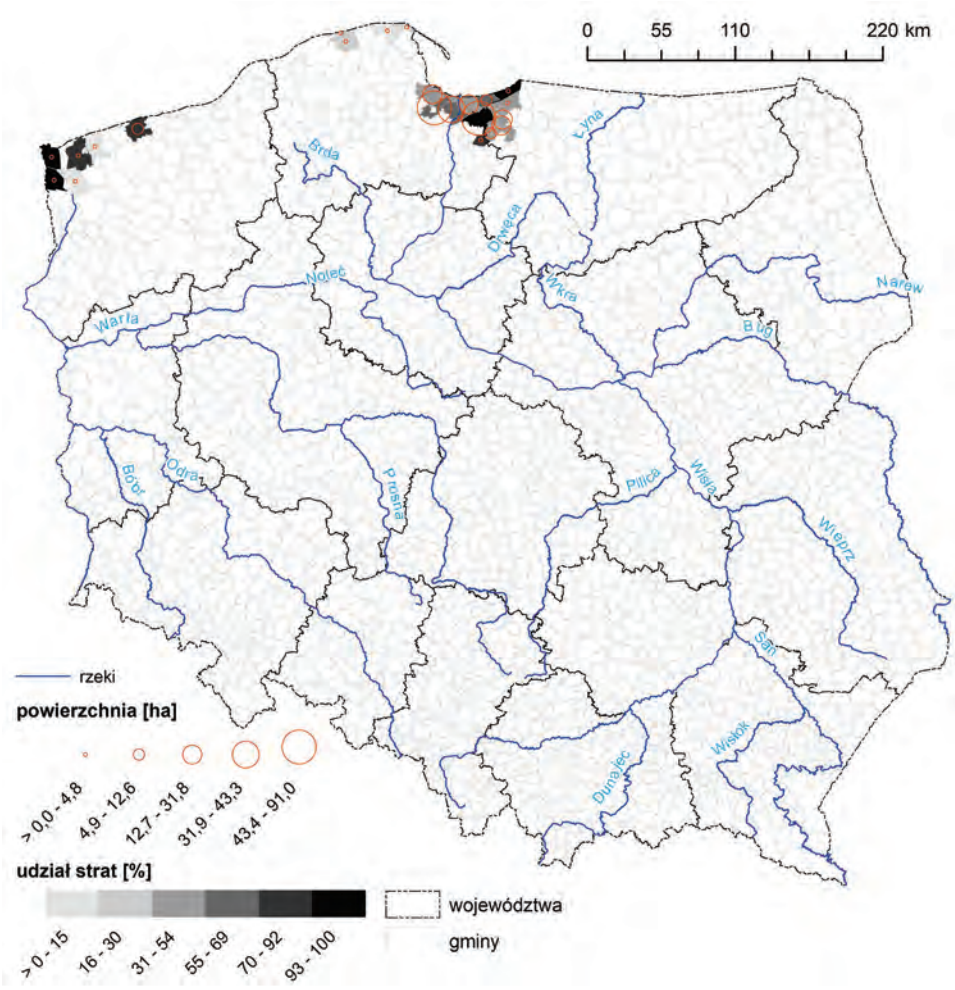
Analizując potencjalne straty materialne w zakresie terenów pod drogami kołowymi na terenach o średnim prawdopodobieństwie pojawienia się powodzi od strony morza, należy stwierdzić, że w tym przypadku dotyczą one 30 gmin. Najwyższa całkowita wysokość omawianych strat dotyczy Gdańska, choć w ujęciu względnym dominacja ta się nie ujawnia (ryc. 3.26).



Ryc. 3.26. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

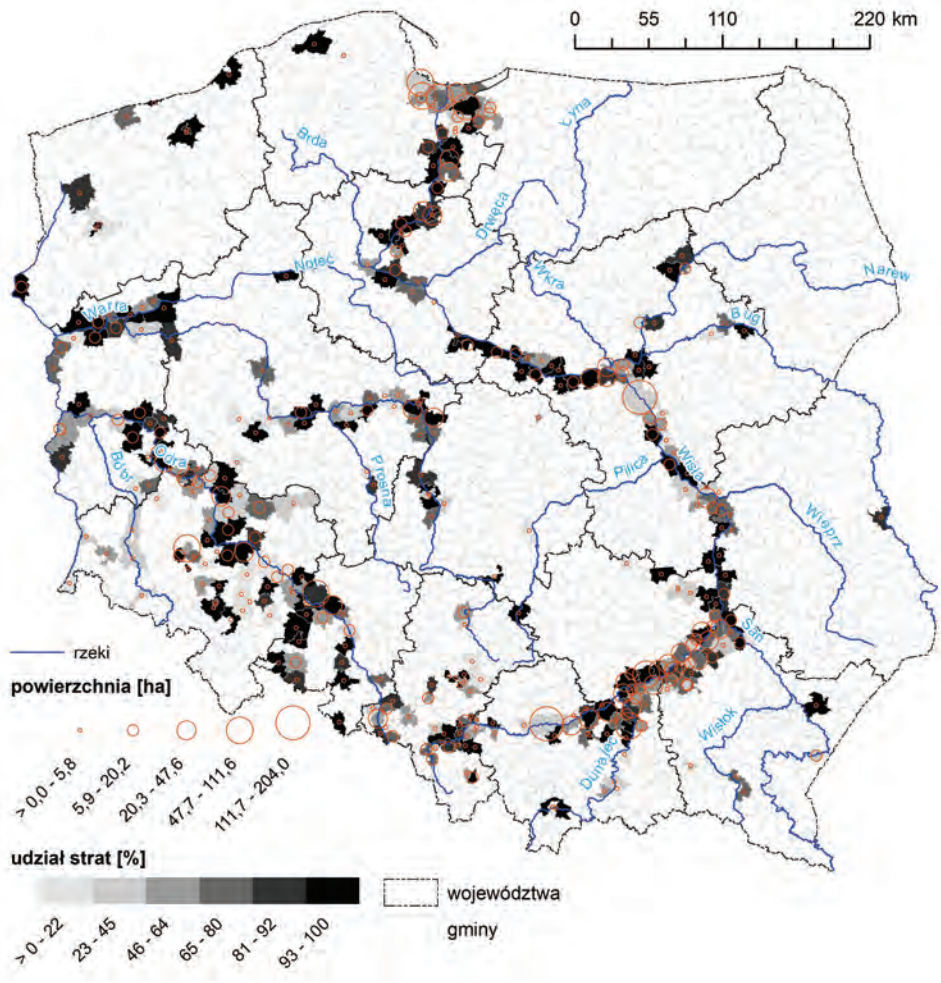
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Przy założeniu wystąpienia powodzi na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego potencjalne straty materialne dotyczące terenów pod drogami kołowymi wystąpią na obszarze 23 gmin. Podobnie jak w przypadku wcześniej omawianego scenariusza, najwyższe straty w tym zakresie w ujęciu bezwzględnym koncentrują się w jednostkach zlokalizowanych w ujściowym odcinku Wisły (ryc. 3.27).



Ryc. 3.27. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT



Ryc. 3.28. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych może się przyczynić do powstania strat materialnych dotyczących terenów pod drogami kołowymi w przypadku 347 gmin w Polsce. Byłyby one szczególnie dotkliwe m.in. w przypadku Warszawy, Krakowa czy Gdańska (ryc. 3.28). Średni udział oraz zmienność potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych dla całej zbiorowości gmin,

gdzie tereny te występują, są niemalże identyczne jak w przypadku powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) oraz 10%. W ujęciu bezwzględnej wysokości strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w najgorszej sytuacji są gminy województwa pomorskiego. Z kolei najliczniejsza grupa gmin, które w razie powodzi poniosą potencjalnie straty dotyczące tychże terenów, należy do województwa dolnośląskiego. W ujęciu względnym natomiast najwyższy średni udział potencjalnych strat dotyczących terenów pod drogami kołowymi w ogóle strat komunikacyjnych występuje wśród gmin województwa opolskiego i wynosi 85,32%.

Największy udział potencjalnych strat dla terenów pod drogami kołowymi (w ogóle strat dla tej formy zagospodarowania) w granicach obszarów szczególnego zagrożenia powodzią dotyczy regionu wodnego Górnej-Wschodniej Wisły (zarówno dla terenów o wysokim, jak i średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi). Wystąpienie zagrożenia na tym obszarze w obu wskazanych scenariuszach może przynieść zalanie ponad jednej czwartej analizowanych terenów. W przypadku terenów zagrożonych powodzią od strony morza o prawdopodobieństwie 1% oraz narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego zdecydowanie bardziej zagrożone są drogi przebiegające przez gminy zlokalizowane w regionie wodnym Dolnej Wisły. Z kolei zniszczenie wałów przeciwpowodziowych w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły skutkować może najbardziej dotkliwymi konsekwencjami, jeśli chodzi o potencjalne straty materialne w zakresie terenów pod drogami kołowymi (tab. 3.6).

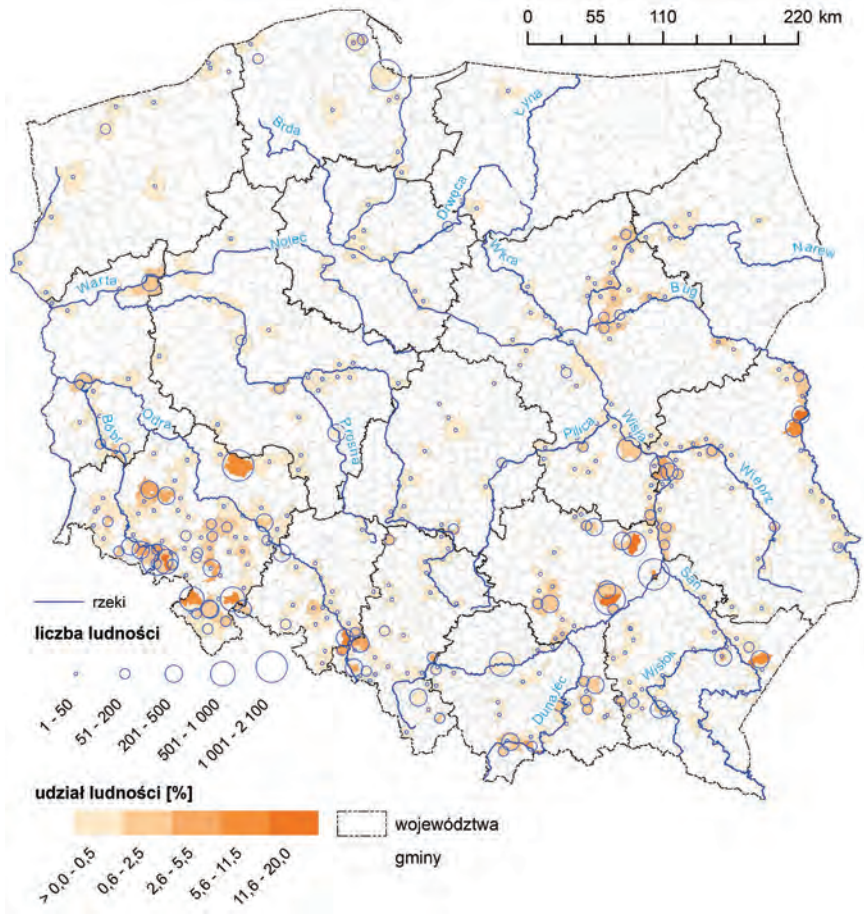
Tab. 3.6. Struktura wielkości strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi wg regionów wodnych oraz udział ich powierzchni w ogóle tych terenów w Polsce w 2019 r. [%]

Scenariusz powodzi	Struktura wielkości strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi [%]													Udział powierzchni zalanych terenów pod drogami kołowymi w ogóle tych terenów w Polsce [%]
	Obszar dorzecza Wisły							Obszar dorzecza Odry					Obszar dorzecza Pregoły	
	region wodny Bugu	region wodny Dolnej Wisły	region wodny Górnej-Wschodniej Wisły	region wodny Górnej-Zachodniej Wisły	region wodny Małej Wisły	region wodny Narwi	region wodny Środkowej Wisły	region wodny Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	region wodny Górnej Odry	region wodny Noteci	region wodny Środkowej Odry	region wodny Warty	region wodny Łyny i Węgorapy	
10%	5,08	8,62	26,15	13,47	0,85	1,94	6,55	1,88	6,48	0,62	15,71	12,63	0,01	0,19
1%	3,61	3,83	27,16	9,03	2,17	1,61	7,22	1,41	11,63	0,48	25,40	6,44	0,00	0,67
1%M	–	79,91	–	–	–	–	–	20,09	–	–	–	–	–	0,03
PZ	–	97,17	–	–	–	–	–	2,83	–	–	–	–	–	0,15
WZ	0,16	21,98	4,13	27,69	2,01	0,42	17,17	0,59	3,83	0,13	15,96	5,94	0,00	1,55

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT.

3.2.2. Rozmieszczenie ludności

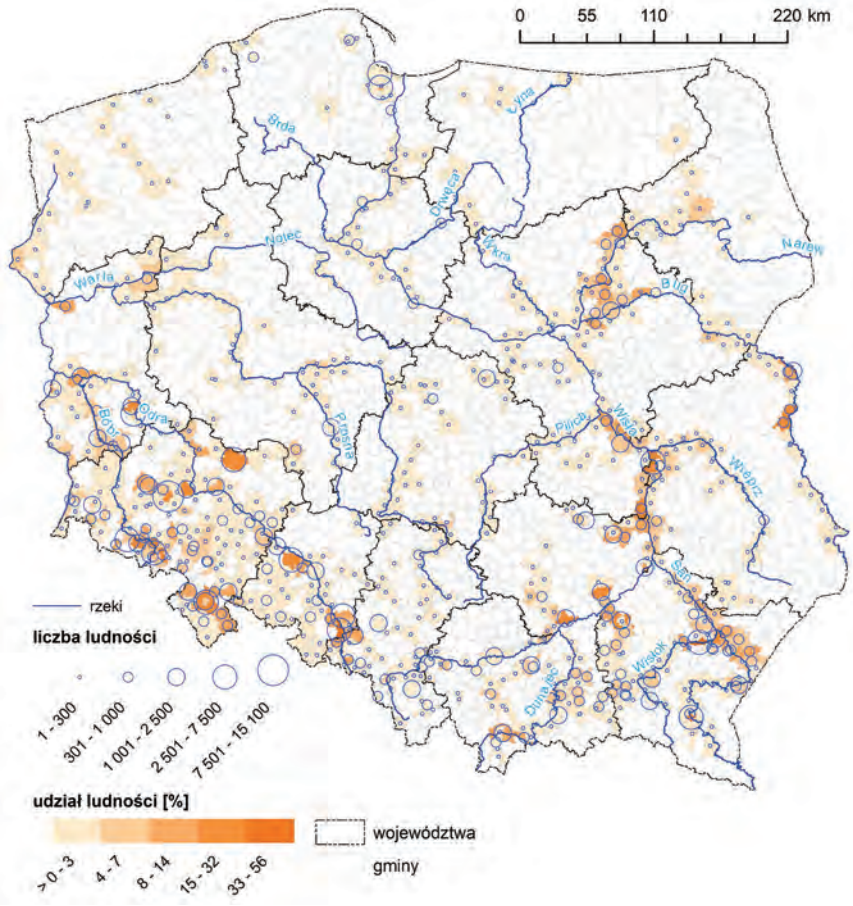
Poza uwzględnieniem w analizach terenów, których zagospodarowanie (np. zakłady przemysłowe) może pośrednio wpływać na funkcjonowanie transportu drogowego poprzez zmiany wielkości popytu na jego usługi, oraz obszarów, na których znajduje się infrastruktura komunikacyjna (w tym drogowa), bardzo istotne jest uwzględnienie danych na temat liczby i rozmieszczenia ludności na terenach zagrożonych powodzią w poszczególnych scenariuszach. Są to informacje, których szczegółowość (liczba ludności podawana dla poszczególnych budynków na terenach zagrożonych) umożliwia bardzo skonkretyzowaną ingerencję w metodykę badania zmian funkcjonowania transportu drogowego związanych z wystąpieniem powodzi w zakresie dostępności transportowej czy obciążenia sieci drogowej.



Ryc. 3.29. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie 10% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 i BDL GUS

Ogółem na terenach o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi mieszka 30 548 osób (łącznie problem ten dotyka 394 gminy). Należy dodać, że ponad połowa ludności – 56,5% – mieszka w granicach omawianych terenów w obszarze dorzecza Wisły, pozostali zaś zamieszkują obszar dorzecza Odry. W obszarze dorzecza Pregoły ludność nie zamieszkuje terenów o tym stopniu zagrożenia. Biorąc pod uwagę poziom gminny analizowanych terenów widać, że najwięcej ludności mieszka w Sandomierzu, na drugim miejscu pod tym względem jest Gdańsk (ryc. 3.29). Ponadto duży odsetek ludności na terenach zagrożonych o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi (w odniesieniu do ogółu ludności gminy) mieszka w gminach położonych w województwie dolnośląskim (ryc. 3.29).

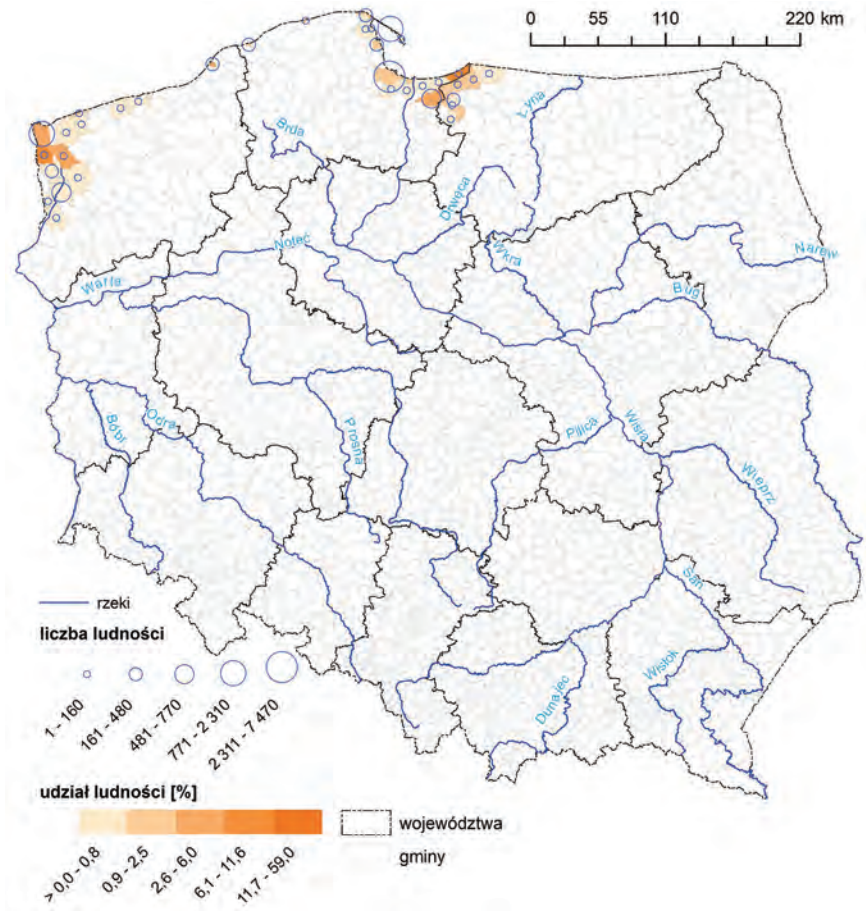


Ryc. 3.30. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią od rzeki o prawdopodobieństwie 1% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 i BDL GUS

Ogółem na terenach o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi mieszka 223 600 osób. W przypadku tego scenariusza zagrożenie dla ludności dotyczy aż 709 gmin. W szczególnie trudnej sytuacji mogą znaleźć się Legnica oraz Sanok. W ujęciu regionalnym należy zwrócić uwagę na dużą liczbę gmin i znaczny udział w nich ludności zagrożonej, przede wszystkim w województwach dolnośląskim, podkarpackim i mazowieckim (ryc. 3.30).

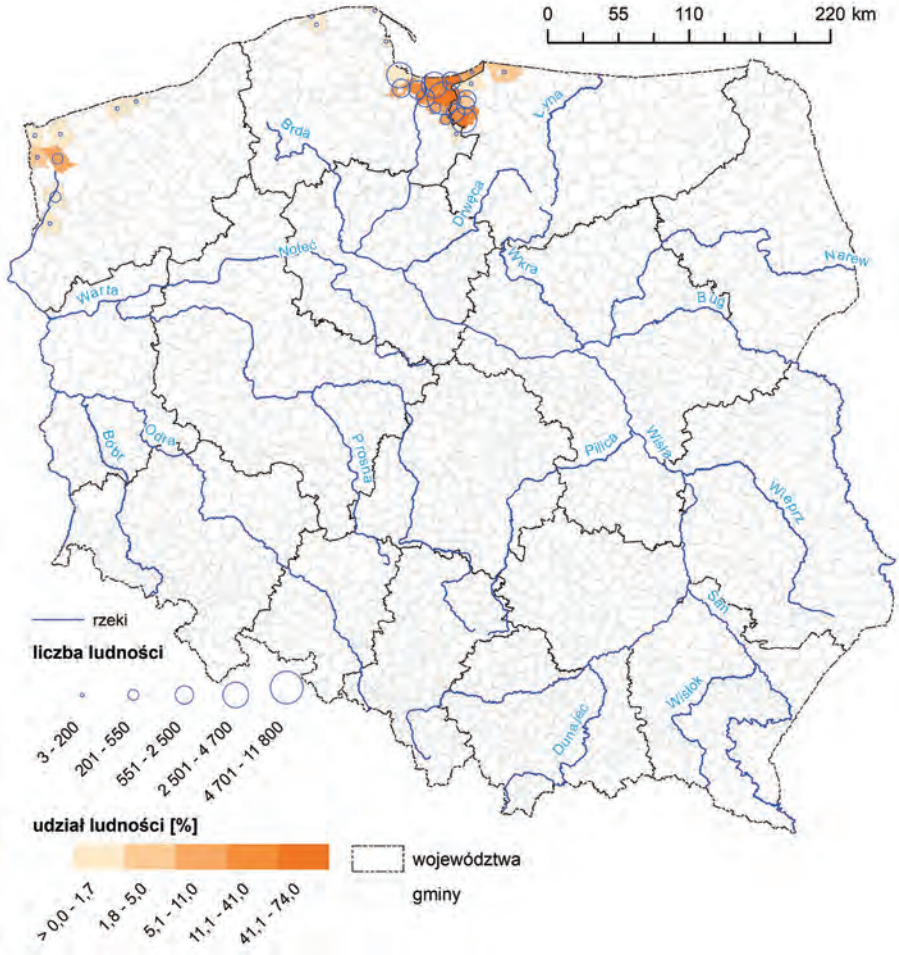
Łącznie na terenach o średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi od strony morza mieszka 16 358 osób w 35 gminach. W ujęciu bezwzględnym problem ten w szczególności dotyczy Gdańska, gdzie liczba ludności zamieszkałej na terenach o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi wynoszącym 1% od strony morza jest ponad trzy razy większa niż np. w Świnoujściu (które znajduje się pod tym względem na drugim miejscu) (ryc. 3.31).



Ryc. 3.31. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią od morza o prawdopodobieństwie 1% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 i BDL GUS

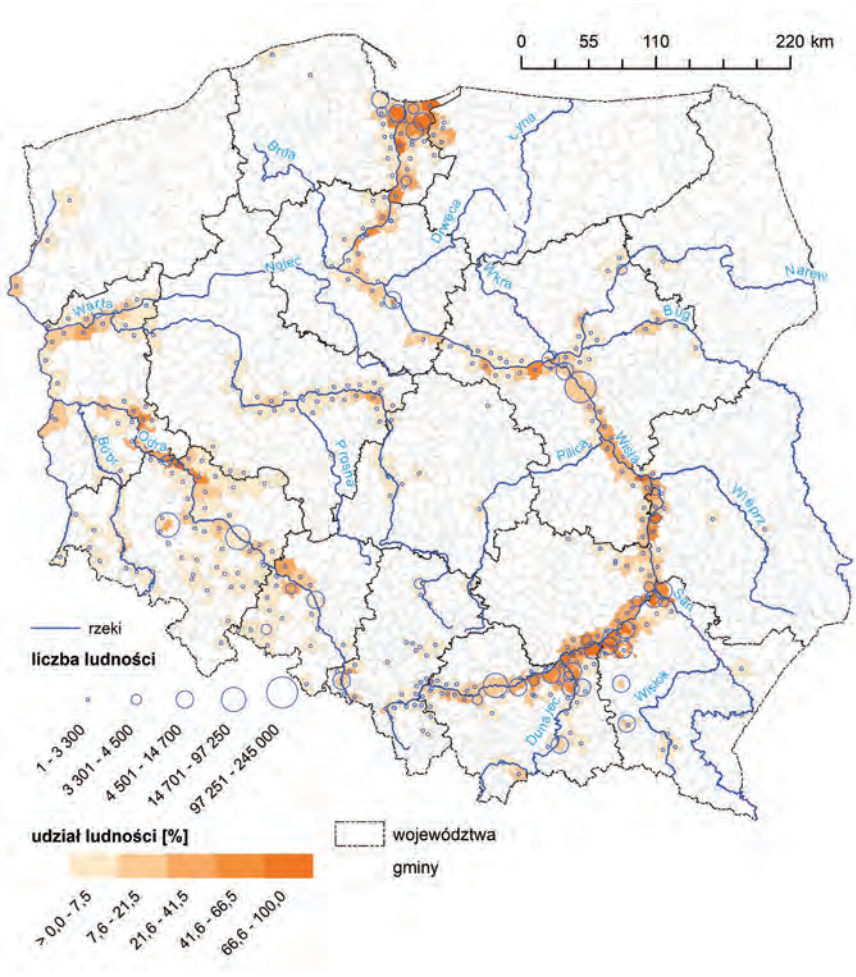
Na obszarach 29 gmin zamieszkuje ludność zagrożona powodzią wskutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego. W sumie są to 37 884 osoby. W tym scenariuszu w szczególnie niekorzystnej sytuacji może znaleźć się gmina Nowy Dwór Gdański. W jej granicach na niebezpieczeństwo powodzi narażonych jest ponad dwa i pół razy więcej ludzi niż w samym Gdańsku (który pod tym względem plasuje się na drugiej pozycji) (ryc. 3.32).



Ryc. 3.32. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 i BDL GUS

Zdecydowanie najbardziej niebezpieczne dla zdrowia i życia ludności jest wystąpienie powodzi na terenach narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia obwałowania. Zamieszkuje je bowiem aż 932 290 osób. Jednak w porównaniu z drugim niosącym najgorsze konsekwencje pod tym względem scenariuszem (powódź o prawdopodobieństwie 1% od strony rzeki) zagrożenie jest bardziej „skoncentrowane" i dotyczy 397 gmin. W obszarze dorzecza Wisły mieszka aż 81% z ogółu ludności zamieszkującej omawiane tereny. Problem ten w szczególności dotyczy Warszawy, gdzie liczba ludności zamieszkującej na terenach narażonych na zalanie wskutek całkowitego zniszczenia obwałowania jest ponad dwa i pół razy większa niż np. w Krakowie (który zajmuje pod tym względem drugie miejsce) (ryc. 3.33).



Ryc. 3.33. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią w efekcie całkowitego zniszczenia obwałowania oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 i BDL GUS

Analizując odsetek ludności mieszkającej na terenach o wysokim i średnim prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi w podziale na regiony wodne, wyraźnie widać, że pod tym względem wyróżnia się region wodny Środkowej Odry. W przypadku terenów zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% od strony morza oraz narażonych na zalanie na skutek całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego szczególnie niekorzystna sytuacja występuje w regionie wodnym Dolnej Wisły. Na koniec analizie poddano udział ludności zamieszkującej tereny narażone na zalanie w następstwie całkowitego zniszczenia obwałowania i stwierdzono, że pod tym względem wyróżnia się region wodny Środkowej Wisły, na który przypada ponad jedna trzecia ludności zagrożonej w tym scenariuszu. Dotkliwe konsekwencje w tym zakresie niesie za sobą przerwanie wałów przeciwpowodziowych również na obszarze regionu wodnego Górnej-Zachodniej Wisły – ten obszar zamieszkuje ponad jedna czwarta ogółu ludności zagrożonej w tym wariancie (tab. 3.7).

Tab. 3.7. Struktura przestrzenna ludności na terenach zagrożonych powodziami wg obszarów dorzeczy i regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

Obszar dorzecza	Region wodny	Scenariusz powodzi				
		10%	1%	1%M	PZ	WZ
Wisły	Bugu	4,19	3,11	–	–	0,81
	Dolnej Wisły	7,03	4,94	74,31	97,27	10,63
	Górnej-Wschodniej Wisły	6,58	18,73	–	–	5,94
	Górnej-Zachodniej Wisły	21,34	10,27	–	–	27,13
	Małej Wisły	1,43	1,95	–	–	1,34
	Narwi	0,91	2,02	–	–	0,45
	Środkowej Wisły	15,01	9,53	–	–	34,72
Obszar dorzecza Odry	Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0,66	0,81	25,69	2,73	0,08
	Górnej Odry	6,86	8,99	–	–	2,41
	Noteci	0,93	0,33	–	–	0,09
	Środkowej Odry	31,86	36,88	–	–	12,63
	Warty	3,18	2,39	–	–	3,78
Pręgoły	Łyny i Węgorapy	–	0,05	–	–	–

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019.

Dane na temat liczby i rozmieszczenia ludności na terenach zagrożonych powodzią w poszczególnych scenariuszach są istotnymi informacjami dla badań poświęconych dostępności transportowej i obciążeniu sieci drogowej w trakcie sytuacji

kryzysowej. Ich uwzględnienie może wpływać na potencjał poszczególnych rejonów komunikacyjnych oraz wielkość potoków ruchu. W monografii oparto się na nich, aby zredukować liczbę ludności gmin na etapie wykorzystania potencjałowej metody badania dostępności transportowej. Natomiast na etapie analiz zmian obciążenia sieci drogowej towarzyszących wystąpieniu powodzi uwzględniono je poprzez ograniczenie potencjałów ruchotwórczych. Są również kluczową informacją w przypadku szeregu działań związanych z organizacją procesu ewakuacji, a towarzyszący mu ruch pojazdów może oddziaływać na warunki ruchowe.

3.3. Uwarunkowania prawno-administracyjne zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią

Istotności prawnych uwarunkowań zagospodarowania przestrzennego terenów zagrożonych powodzią z punktu widzenia funkcjonowania i rozwoju w ich zasięgu sieci drogowej można upatrywać w dwóch wymiarach. Poziom swobody w gospodarowaniu na tych terenach oddziałuje pośrednio na popyt na transport. Ten natomiast stanowi istotną stymulantę dla polityki inwestycyjnej w zakresie infrastruktury transportowej. Z drugiej zaś strony, przyjmując, że na zagrożonym terenie sieć drogowa już istnieje, ograniczenie możliwości gospodarowania przełożyć się może na spadek atrakcyjności tego obszaru jako potencjalnego celu podróży, co może się przyczynić do zmniejszenia istotności tych odcinków sieci, szczególnie w ujęciu lokalnym (zmniejszając liczbę ich użytkowników). Efekt ten w bardzo ograniczonym zakresie dotyczy tych odcinków dróg, które prowadzą ruch tranzytowy względem terenów zagrożonych, a które są niezbędne dla efektywnego funkcjonowania sieci zaspokajającej potrzeby transportowe w skali ponadlokalnej. Niezwykle istotne, poza określeniem aktualnych prawnych wytycznych w tym zakresie, jest również poznanie ewolucji prawodawstwa warunkującego gospodarowanie na terenach zagrożonych. Przecież znaczna część aktualnie funkcjonującej sieci drogowej została zaprojektowana i wprowadzona w przestrzeń na podstawie wcześniejszych zapisów prawa.

W Polsce powodzie należą do klęsk żywiołowych, które doprowadzają do najwyższych strat materialnych (Kułakowska-Bicz 2011, Ostrowski i in. 2012, Franczak i in. 2016). Straty te w znacznej mierze związane są z niewłaściwym zagospodarowaniem terenów zagrożonych powodziami, a to z kolei wynika z nieodpowiednio prowadzonego na ich obszarze planowania przestrzennego bądź jego braku (Franczak i in. 2016). Do głównych przyczyn wystąpienia wysokich strat na obszarach zalewowych zaliczamy:

- istnienie gęstej zabudowy (głównie miejskiej) i lokalizowanie obiektów infrastruktury technicznej (w tym transportowej) na obszarach zagrożonych;
- znaczne zmniejszenie bądź całkowite wyeliminowanie infiltracji w wyniku tendencji do uszczelniania powierzchni terenu (Skrzypczak i in. 2015).

W dotychczasowej praktyce ochrony przeciwpowodziowej jako główne cele traktowano ochronę ludzi, a także minimalizację strat powodziowych. Dla realizacji tych celów podejmowano głównie działania techniczne (Bobiński i Żelaziński 1996, Bajorek 2001). Twierdzono, że zbyt słabe zagospodarowanie hydrotechniczne dolin rzecznych nie pozwala skutecznie redukować większych czy wręcz katastrofalnych wezbrań i chronić ludności przed utratą majątku (Grochulski 1975). Niestety wieloletnie obserwacje ujawniły, że urządzenia te często zawodzą, zaś wiara w ich niezawodność powoduje eskalację zagrożenia życia (Bobiński i Żelaziński 1996). W działaniach pomijano również aspekt środowiskowy (Borowska-Stefańska 2015b). Aby łagodzić negatywne konsekwencje powodzi, niezwykle istotne są zatem działania organizacyjne i administracyjne. Do najważniejszych metod i środków stosowanych w ramach tych działań zaliczono:

- ograniczenie zabudowy na obszarach zalewowych oraz wykup istniejących nieruchomości;
- modernizację i zabezpieczenie obiektów znajdujących się na terenach zagrożonych powodzią;
- przygotowanie systemów ostrzeżeń powodziowych;
- przygotowanie systemów reagowania na powódź, w szczególności systemów ratowniczych i planów ewakuacji ludności;
- opracowanie i przyjęcie aktów prawnych regulujących działania w zakresie ochrony przeciwpowodziowej (implementacja Dyrektywy powodziowej);
- odpowiednie planowanie przestrzenne (opracowywanie miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego przy uwzględnieniu map zagrożenia i map ryzyka powodziowego);
- prowadzenie edukacji w zakresie ochrony przeciwpowodziowej;
- wprowadzenie systemu ubezpieczeń od skutków powodzi, uzależnionych od stopnia zagrożenia;
- działalność Krajowego Zarządu Gospodarki Wodnej (KZGW), regionalnych zarządów gospodarki wodnej (RZGW) oraz centrów zarządzania kryzysowego na poziomie krajowym i wojewódzkim, koordynujących działania straży pożarnej, policji i wojska.

Podstawą skuteczności tych działań jest wiedza na temat zalanego obszaru w przypadku wystąpienia przepływu określonego jako miarodajny. Do tego celu mają służyć opracowane w ramach ISOK mapy zagrożenia powodziowego (Jarzębińska 2006, Flooding in Wales… 2009).

Właściwie prowadzona polityka przestrzenna jest zatem szczególnie ważnym instrumentem pozwalającym minimalizować skutki powodzi (Słysz i Pawłowska 2010, Halama 2013a). Planowanie przestrzenne powinno uwzględniać uwarunkowania środowiskowe, w tym ograniczenia w intensywnym zagospodarowywaniu terenów zalewowych. Niestety uprawiana w ten sposób polityka przestrzenna prowadzi do konfliktu interesów z ich właścicielami, którzy pomimo wiedzy na

temat istniejącego zagrożenia chcieliby zagospodarować te obszary. Wprowadzenie ograniczeń w zagospodarowaniu terenów zagrożonych powodziami wpływa na obniżenie wartości gruntów w ich granicach. Dlatego też często w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego obszary te były przeznaczone pod zabudowę (Halama 2013a, 2013b; Borowska-Stefańska 2014; Franczak i in. 2016). Jak pisze Wołoszyn (2006, s. 157):

> Najskuteczniejszą metodą ochrony przed powodzią jest zaniechanie użytkowania przez człowieka terenów zalewowych w sposób podatny na szkody wywoływane zalaniem. Słuszna zasada „odsunąć człowieka od wody" może być stosowana jedynie w ograniczonym zakresie. Zarówno w Polsce, jak i w innych krajach historyczne miasta i centra cywilizacji rozwijały się w dolinach rzek, często na terenach zalewowych. Nierealne jest przeniesienie zagrożonych miast i osiedli na teren bezpieczny. Natomiast możliwe i niezbędne jest ograniczanie zabudowy terenów zalewowych w przyszłości. Jest to trudny problem legislacyjny, nie zawsze dostrzegany przez decydentów i urbanistów.

Badania przeprowadzone przez Borowską-Stefańską i in. (2020b) potwierdzają, że do początku XXI w. tereny zagrożone powodziami nie były jasno sprecyzowane w ustawach i rozporządzeniach, co skutkowało ich niewłaściwą ochroną oraz intensywnym zabudowywaniem (na te kwestie nałożyła się również transformacja ustrojowa w Polsce). Dopiero wejście Polski do Unii Europejskiej i konieczność implementacji regulacji unijnych doprowadziły do wdrożenia założeń tzw. Dyrektywy powodziowej (Borowska-Stefańska i in. 2020b) i wprowadzenia skuteczniejszych ograniczeń w zakresie zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami.

W latach 1990–2001 zagospodarowanie terenów zalewowych regulowane było przede wszystkim Ustawą z dnia 24 października 1974 r. – Prawo wodne (Dz.U. Nr 38, poz. 230 ze zm.). Zgodnie z zapisami tej ustawy ustawodawca w sposób bezpośredni chronił przede wszystkim obszar położony pomiędzy korytem rzeki a wałem przeciwpowodziowym (tzw. międzywale). Na tym terenie obowiązywały między innymi zakazy wznoszenia obiektów budowlanych, zmieniania ukształtowania powierzchni gruntu oraz wykonywania urządzeń lub robót, które mogłyby utrudniać ochronę tych obszarów przed powodzią. Ustawodawca przewidział jednak możliwość zwolnienia od tych zakazów w drodze decyzji administracyjnej organu administracji terenowej. Rzeczona ustawa umożliwiała również rozszerzenie wspomnianych zakazów na nieobwałowane tereny narażone na niebezpieczeństwo powodzi w drodze zarządzenia terenowego organu administracji (zarządzenie to miało walor aktu prawa miejscowego). W omawianym okresie brakowało niestety prawnie określonych przesłanek uznawania danych terenów za obszary narażone na niebezpieczeństwo powodzi. Wspomniane kompetencje prawotwórcze były więc stosowane relatywnie

rzadko. Niewykorzystana pozostała, wobec niewydania nieodzownych w tym zakresie aktów wykonawczych, możliwość wprowadzania obowiązku określonego zagospodarowania gruntów lub innych ograniczeń w ich użytkowaniu, niezbędnych do ochrony wód i korzystania z nich oraz do ochrony ludności i mienia przed wodami. Zgodnie z art. 58 omawianej ustawy na ustalonych obszarach można było wprowadzić obowiązek określonego zagospodarowania gruntów lub inne ograniczenia w ich użytkowaniu, niezbędne do ochrony wód i korzystania z nich oraz do ochrony ludności i mienia przed wodami (ust. 1). Ustanowiony tym przepisem przez ustawodawcę instrument ochrony przed powodzią w praktyce nie został wykorzystany, co skutkowało ich niewłaściwym zagospodarowywaniem (ustawa ta obowiązywała do końca 2001 r.).

Również ustawa z 12 lipca 1984 r. o planowaniu przestrzennym (Ustawa z dnia 12 lipca 1984 r. o planowaniu przestrzennym, tekst jedn. Dz.U. 1989, Nr 17, poz. 99 ze zm.) nie zawierała regulacji, które w sposób bezpośredni odnosiłyby się do terenów zagrożonych powodziami. Ich uwzględnianie w przewidzianych tą ustawą aktach planistycznych (planie krajowym, planach regionalnych oraz planach miejscowych) mogło jednak następować na skutek przewidzianego ustawą dokonywania określonych ustaleń dotyczących „obszarów szczególnego zagrożenia". Gwarancją respektowania sformułowanych w ten sposób ustaleń był z jednej strony wymóg zgodności wydawanych na podstawie tej ustawy decyzji lokalizacyjnych z miejscowym planem zagospodarowania przestrzennego, z drugiej zaś wynikający z postanowień Ustawy z dnia 24 października 1974 r. – Prawo budowlane warunek wydania pozwolenia na budowę w postaci między innymi wcześniej uzyskanego pozwolenia innych organów, do których niewątpliwie należały przewidziane prawem wodnym pozwolenia wodnoprawne oraz wspomniane już zwolnienia z ustawowych zakazów podejmowania określonej działalności inwestycyjnej na obszarach zagrożonych powodziami.

Zasadniczych zmian w zakresie reglamentacji zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami w aktach planistycznych o charakterze ogólnym nie wniosły także regulacje Ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. o zagospodarowaniu przestrzennym (Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. o zagospodarowaniu przestrzennym, tekst jedn. Dz.U. 1999, Nr 15, poz. 139 ze zm.). W przepisach owej ustawy określających zakres ustaleń tych aktów nie wymieniano wprost tego rodzaju terenów. Dopiero ustawa Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r. (Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017, poz. 1121 ze zm.) wprowadziła kilka istotnych zmian w modelu prawnej reglamentacji zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami. Po raz pierwszy na szczeblu regulacji ustawowej zdefiniowano obszary narażone na niebezpieczeństwo powodzi. W ramach tego typu obszarów wydzielono: obszary bezpośredniego zagrożenia powodzią (obejmujące w szczególności strefę przepływów wezbrań powodziowych, określoną w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego na podstawie studium

ochrony przeciwpowodziowej sporządzanego przez dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej) oraz obszary potencjalnego zagrożenia powodzią (obejmujące tereny narażone na zalanie w przypadku przelania się wód przez koronę wału przeciwpowodziowego, zniszczenia lub uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych, zniszczenia lub uszkodzenia budowli piętrzących albo budowli ochronnych pasa technicznego).

Należy jednak podkreślić, że zaliczenie terenów zagrożonych powodziami do obszarów bezpośredniego zagrożenia powodzią w rozumieniu ustawy i z konsekwencjami z tym związanymi uwarunkowane było ich uwzględnieniem (samo określenie tych obszarów następowało we wspomnianych studiach) w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego. W przypadku gdy warunek ten nie był spełniony, obszary określone w studiach nie zyskiwały waloru obszarów bezpośredniego zagrożenia powodzią. Mimo to były one uwzględniane w wydawanych na podstawie tej ustawy decyzjach o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, co miało zagwarantować ich adresatom wiedzę na temat ryzyka inwestorskiego na tych obszarach. Z kolei w wyniku niewydania rozporządzenia wykonawczego umożliwiającego wskazanie obszarów potencjalnego zagrożenia powodzią tego rodzaju tereny formalnie nie zostały ustanowione (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

Najistotniejszym przepisem prawa, który bezpośrednio wpływał w omawianym okresie na gospodarkę przestrzenną w zakresie terenów zagrożonych powodzią, był art. 881 ustawy Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r., zgodnie z którym na obszarach zalewowych zabraniano wykonywania robót oraz czynności utrudniających ochronę przed powodzią lub zwiększających zagrożenie powodziowe, w tym wykonywania urządzeń wodnych oraz budowy innych obiektów budowlanych (Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2001, Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.; Dz.U. 2012, poz. 145 z późn zm.).

Przepis ten, w świetle Ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane, oznaczał generalnie zakaz zabudowy tych obszarów. Ustawodawca przewidział jednak możliwość zwolnienia od tych zakazów w drodze decyzji administracyjnej (dyrektorzy regionalnych zarządów gospodarki wodnej w uzasadnionych przypadkach mogli udzielić zwolnienia od tego zakazu). W efekcie zarówno w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, jak i przy wydawaniu decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu możliwe było dopuszczenie zabudowy na tych terenach (Program bezpieczeństwa powodziowego w dorzeczu Wisły Środkowej – założenia, 2011; Borowska-Stefańska 2015b). Należy również podkreślić, że obszary wyznaczone w studiach musiały być uwzględnianie w aktach planistycznych i decyzjach o lokalizacji inwestycji celu publicznego oraz decyzjach o warunkach zabudowy. Ponadto istniał wówczas obowiązek uzgadniania z właściwym dyrektorem zarządu gospodarki wodnej aktów planistycznych odnoszących się do obszarów wyznaczonych we wspomnianych studiach. Obowiązek ten miał swoje odzwierciedlenie także w postanowieniach

Ustawy z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

W ramach gospodarki przestrzennej istotnym przepisem, który odnosił się do ochrony przeciwpowodziowej w omawianym okresie, był art. 6 pkt. 4 Ustawy z dnia 21 sierpnia 1997 r. o gospodarce nieruchomościami, zgodnie z którym budowa i utrzymanie obiektów oraz urządzeń służących do ochrony przed powodzią zostały uznane za cel publiczny. Dlatego też przy ich lokalizacji oraz utrzymaniu stosowano szczególne procedury, wynikające z ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym z dnia 27 marca 2003 r. oraz wspomnianej ustawy o gospodarce nieruchomościami (Program bezpieczeństwa powodziowego w dorzeczu Wisły Środkowej – założenia, 2011; Borowska-Stefańska 2015b).

Pewnych, choć nie fundamentalnych zmian dokonał ustawodawca, nowelizując ustawę Prawo wodne w 2005 roku. Poza zmianami nomenklaturowymi (wspomniane wyżej studia sporządzane przez dyrektorów regionalnych zarządów gospodarki wodnej zyskały miano studiów ochrony przeciwpowodziowej) utrzymano kategorie obszarów bezpośredniego i potencjalnego zagrożenia powodzią. Wprowadzono jednak kilka zmian, które umożliwiły silniejszą reglamentację zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami. Po pierwsze, wskazanie obszarów potencjalnego zagrożenia powodzią (obejmujące między innymi tereny narażone na zalanie w przypadku zniszczenia lub uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych lub budowli piętrzących) nie wymagało już wydania rozporządzenia przez ministra; wystarczyło, że zostały one określone w studiach ochrony przeciwpowodziowej. Po drugie, dano możliwość rozszerzenia wspomnianych wcześniej zakazów, obowiązujących na obszarach bezpośredniego zagrożenia, na obszary potencjalnego zagrożenia (wcześniej takiej możliwości nie było), o ile było to uzasadnione względami bezpieczeństwa ludzi i mienia (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

Istotna zmiana dotycząca regulacji prawnych w zakresie zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami nastąpiła w związku z wejściem Polski do UE i implementacją do polskiego porządku prawnego trzech dyrektyw wspólnotowych: dyrektywy 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, Dz. Urz. UE L 327 z dnia 22 grudnia 2000 r., s. 1, ze zm.), dyrektywy 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (tzw. Dyrektywa powodziowa, Dz. Urz. UE L 288 z dnia 6 listopada 2007 r., s. 27) oraz dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/105/WE

z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej, zmieniającej i w następstwie uchylającej dyrektywy Rady 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG i 86/280/EWG oraz zmieniającej dyrektywę 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady. W efekcie do porządku prawnego został wprowadzony nowy system działań mających na celu ochronę przed powodzią. Na skutek tych zmian postanowienia ustawy Prawo wodne regulującej zasady ochrony przed powodzią musiały zostać dostosowane do treści dyrektyw Wspólnoty Europejskiej dotyczących korzystania z wód. Zmiany te weszły w życie 18 marca 2011 r. (Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne (Dz.U. 2011, Nr 32, poz. 159) (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

Podstawowym dokumentem, w którym określone zostały cele oraz zasady gospodarki wodnej w krajach należących do UE, jest Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. (Głosińska 2014; Borowska-Stefańska 2015b). Implementacja ww. dyrektywy we wszystkich państwach członkowskich Unii Europejskiej, w tym również w Polsce, była procesem składającym się z kilku etapów (Tsakiris i in. 2009; Barszcz i in. 2013).

Państwa członkowskie zostały zobligowane do spełniania wszystkich wymogów do końca 2015 roku. Pierwszy etap wdrożenia w Polsce Dyrektywy powodziowej polegał na dostosowaniu prawa krajowego do jej wymogów. Etap ten zrealizowano jednak z ponad rocznym opóźnieniem, na początku 2011 r. (Głosińska 2013). Na etapie drugim opracowano wstępną ocenę ryzyka powodziowego (WORP), która powstała na koniec grudnia 2011 roku. Jej celem było oszacowanie skali zagrożenia powodziowego dla obszarów dorzeczy oraz zidentyfikowanie miejsc, gdzie ryzyko powodziowe jest znaczące (Tokarczyk i in. 2012). Informacje te zostały wykorzystane do wskazania odcinków rzek, dla których opracowano mapy zagrożenia oraz ryzyka powodziowego (2013 r.) (Borowska-Stefańska 2015b). Wykonano je na podstawie wytycznych, które zostały zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego (Rozporządzenie Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka). Mapy zagrożenia oraz mapy ryzyka powodziowego to dokumenty, które powstały w celu poznania intensywności zjawiska powodzi, a następnie poziomu ryzyka powodziowego, jakie za sobą ona niesie na konkretnym obszarze (Kurczyński 2012).

Na mapach zagrożenia powodziowego przedstawiono:

1. Obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi raz na 500 lat, lub takie, na których występuje prawdopodobieństwo pojawienia się zdarzenia ekstremalnego.
2. Obszary szczególnego zagrożenia powodzią (wcześniej definiowane jako obszary bezpośredniego zagrożenia powodzią).
3. Obszary obejmujące tereny narażone na zalanie w przypadku:
   – przelania się wód przez koronę wału przeciwpowodziowego,
   – zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwpowodziowego,
   – zniszczenia lub uszkodzenia budowli piętrzących,
   – zniszczenia lub uszkodzenia budowli ochronnych pasa technicznego.

Dla omawianych obszarów na mapach zagrożenia powodziowego zaprezentowano:

- zasięg powodzi,
- głębokość wody lub poziom zwierciadła wody,
- prędkość przepływu wody lub natężenie przepływu wody – w uzasadnionych przypadkach.

Omawiane mapy przygotowano w dwóch zestawach tematycznych:

- mapę zagrożenia powodziowego wraz z głębokością wody;
- mapę zagrożenia powodziowego wraz z prędkościami oraz kierunkami przepływu wody.

Mapy ryzyka powodziowego sporządzono dla obszarów zagrożonych powodziami. Przedstawiają one potencjalne negatywne skutki związane z powodzią. Zostały przygotowane (na koniec grudnia 2013 r.) w podziale na dwa zestawy tematyczne:

- mapy ryzyka powodziowego przedstawiające zagrożenie dla ludności oraz potencjalne straty powodziowe,
- mapy ryzyka powodziowego przedstawiające użytkowanie terenu oraz obszary i obiekty o szczególnym znaczeniu kulturowym, przyrodniczym, gospodarczym.

Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne (Dz.U. 2017, poz. 1121 ze zm.; Borowska-Stefańska 2016, s. 122–123).

Ostatnim etapem implementacji Dyrektywy powodziowej były stworzenie na koniec 2015 r. plany zarządzania ryzykiem powodziowym (Borowska-Stefańska 2014, Borowska-Stefańska 2016). Opracowano je dla dwóch poziomów odniesienia – obszarów dorzeczy i regionów wodnych (Borowska-Stefańska 2016).

W wyniku wprowadzonych zmian powstała nowa nomenklatura w odniesieniu do terenów zagrożonych powodziami. W ustawie Prawo wodne (Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2001, Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.; Dz.U. 2012, poz. 145 z późn zm.) za tereny narażone na niebezpieczeństwo

powodzi uznawano „określone we wstępnej ocenie ryzyka powodziowego obszary, na których istnieje znaczące ryzyko powodzi lub jest prawdopodobne wystąpienie znaczącego ryzyka powodzi". Do tych terenów zaliczono:

1. Obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi raz na 500 lat lub na których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia ekstremalnego.
2. Obszary szczególnego zagrożenia powodzią – rozumie się przez to:
   – obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest średnie i wynosi raz na 100 lat;
   – obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest wysokie i wynosi raz na 10 lat (stanowi to część terenu wody 100-letniej);
   – obszary między linią brzegu a wałem przeciwpowodziowym lub naturalnym wysokim brzegiem, w który wbudowano trasę wału przeciwpowodziowego, a także wyspy i przymuliska, o których mowa w art. 18 ustawy Prawo wodne, stanowiące działki ewidencyjne;
   – pas techniczny w rozumieniu art. 36 ustawy z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej.
3. Obszary obejmujące tereny narażone na zalanie w przypadku (tereny potencjalnego zagrożenia):
   – zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwpowodziowego;
   – zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwsztormowego.

Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne (Dz.U. 2001, Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.).

Zarówno mapy zagrożenia, jak i ryzyka powodziowego stanowią ważny element ochrony przeciwpowodziowej. Ustalenia zawarte w tych mapach musiały być uwzględniane w aktach planistycznych, tak generalnych, jak i indywidualnych, w tym w koncepcji przestrzennego zagospodarowania kraju, planach zagospodarowania przestrzennego województw, miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, a także w decyzjach o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego lub decyzjach o warunkach zabudowy. Wszelkie zmiany w tych dokumentach musiały zostać wprowadzone w terminie 18 miesięcy od dnia przekazania map zagrożenia oraz ryzyka powodziowego. Od momentu przekazania omawianych map jednostkom samorządu terytorialnego we wszystkich decyzjach o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego lub decyzjach o warunkach zabudowy na terenach zagrożonych trzeba było uwzględniać poziom zagrożenia powodziowego wynikający z ich wyznaczenia. Mapy zagrożenia oraz ryzyka powodziowego podlegają aktualizacji co 6 lat (Borowska-Stefańska 2015b). Regresem w zakresie ochrony przed powodzią określić można wprowadzoną od 31 grudnia 2015 r. możliwość (w miejsce dotychczasowego obowiązku) uwzględniania w aktach planistycznych granic obszarów i poziomów zagrożeń powodziowych wynikających ze wspomnianych map (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

Niestety rozbudowanie systemu opracowań, które mają stanowić pomoc w podejmowaniu działań mających na celu ochronę przed skutkami powodzi, nie doprowadziło do istotnych zmian w modelu i treści ograniczeń w zakresie zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią. Określone w ustawie obostrzenia odnosiły się jedynie do obszarów szczególnego zagrożenia powodzią i polegały na wprowadzeniu zakazu wykonywania robót oraz czynności utrudniających ochronę przed powodzią lub zwiększających zagrożenie powodziowe, w tym między innymi wykonywania urządzeń wodnych oraz budowy innych obiektów budowlanych, z wyjątkiem dróg rowerowych. Ponadto ustawodawca utrzymał możliwość zwolnienia od tych zakazów: właściwy organ mógł, w drodze decyzji, rozstrzygnąć taką sprawę, określając warunki niezbędne dla ochrony przed powodzią, jeżeli nie utrudni to zarządzania ryzykiem powodziowym.

Istotną kwestią jest również znaczenie wprowadzającej wskazane zakazy regulacji ustawowej w kontekście wspomnianego obowiązku uwzględniania obszarów szczególnego zagrożenia powodzią w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego, w szczególności problemu ustalenia dopuszczalnego planem sposobu ich zagospodarowania, chociażby umożliwienia ich zabudowy na określonych warunkach. W orzecznictwie sądów administracyjnych, rozpatrujących skargi na postanowienia planów przewidujące taki sposób zagospodarowania tych obszarów, ugruntował się pogląd, że przewidziany w prawie wodnym zakaz budowy obiektów budowlanych na wskazanych obszarach musi być uwzględniony już na etapie uchwalania miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego w postaci wprowadzenia zakazu ich zabudowy (Borowska-Stefańska i in. 2020b).

W 2018 r. nastąpiły kolejne ważne z uwagi na politykę przestrzenną realizowaną w odniesieniu do terenów zagrożonych powodziami zmiany w prawie. 1 stycznia 2018 r. weszła w życie nowa ustawa – Prawo wodne (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2018, poz. 2268). Zachowano ukształtowany na bazie rozwiązań zawartych w poprzedniej ustawie model ochrony przed powodzią (chociażby w zakresie systemu aktów i dokumentów planowania szczegółowego), który wynikał z implementacji prawa unijnego. Nowa ustawa nie zmieniła dotychczasowych zasad i sposobów określania obszarów zagrożonych powodzią. Wprowadzono jednak drobne korekty w zakresie nomenklatury. W nowej ustawie Prawo wodne za obszary narażone na niebezpieczeństwo powodzi uznaje się „określone we wstępnej ocenie ryzyka powodziowego obszary, na których istnieje znaczące ryzyko powodzi lub jest prawdopodobne wystąpienie znaczącego ryzyka powodzi" (art. 16 pkt 33 Ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2018, poz. 2268; Dz.U. 2019, poz. 125, 534). Dla tych obszarów wykonano mapy zagrożenia powodziowego, na których zaznaczono:

1. Obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi 0,2% lub na których istnieje prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia ekstremalnego.

2. Obszary szczególnego zagrożenia powodzią, tzn. (art. 16 pkt 34):
   a. tereny, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest średnie i wynosi 1%;
   b. tereny, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest wysokie i wynosi 10% (stanowi to część terenu, na którym analogiczne prawdopodobieństwo wynosi 1%);
   c. tereny między linią brzegu a wałem przeciwpowodziowym lub naturalnym wysokim brzegiem, w który wbudowano trasę wału przeciwpowodziowego, [a także wyspy i przymuliska, o których mowa w art. 224 ustawy Prawo wodne, stanowiące działki ewidencyjne];
   d. pas techniczny.
3. Obszary obejmujące tereny narażone na zalanie w przypadku zniszczenia bądź uszkodzenia:
   a. wału przeciwpowodziowego;
   b. wału przeciwsztormowego;
   c. budowli piętrzącej.

Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, art. 169 ust. 2.

Podkreślić jednak należy, że od 1 stycznia 2018 roku Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie (PGW WP, państwowa osoba prawna) posiada możliwość weryfikacji miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego (MPZP) oraz opiniowania decyzji o warunkach zabudowy na obszarach szczególnego zagrożenia powodziowego (prawdopodobieństwo 1%) (Ilba 2018, Borowska-Stefańska i in. 2020b). Projekty aktów prawa miejscowego wymagają uzgodnienia z Wodami Polskimi w zakresie dotyczącym zabudowy i zagospodarowania terenu położonego na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią. Uzgodnienie następuje w formie decyzji administracyjnej, w której określa się wymagania lub warunki dla planowanej zabudowy oraz planowanego zagospodarowania terenów położonych na obszarze szczególnego zagrożenia powodzią.

3.4. Zasady budowy i eksploatacji infrastruktury drogowej na terenach zagrożonych powodzią

Kiedy jednak pomimo ograniczonego gospodarowania na terenach zagrożonych powodzią konieczne jest tam funkcjonowanie sieci drogowej lub prowadzą przez nie odcinki istotne dla funkcjonowania sieci o większym zasięgu przestrzennym, ze względu na liczne niebezpieczeństwa (wymienione w podrozdziale 2.2.3) niezbędne jest odpowiednie ich projektowanie, budowanie i utrzymywanie.

Inwestycje w drogową infrastrukturę transportową mogą wynikać z budowy nowej trasy komunikacyjnej lub konieczności wymiany istniejących konstrukcji na nowe. Może mieć to źródło między innymi w niespełnianiu przez obiekty

zarówno parametrów odnoszących się do bieżących i planowanych wymagań względem przepustowości, jak i bezpieczeństwa (np. nośności). Działania inwestycyjne na terenach zagrożonych powodzią mogą zatem stanowić albo jeden z elementów składających się na szersze projektowanie trasy, albo obejmować całość założenia projektowego. Czasami realizowane prace ograniczają się jedynie do remontu czy przebudowy obiektu, co nie zmienia faktu, że wtedy również parametry techniczne projektowanego elementu muszą odpowiadać parametrom trasy, w której ciągu się znajdują (ukształtowanie w planie i w profilu, nośność, przekrój poprzeczny) (Madaj i Wołowicki 2003). Ewentualne odstępstwa są akceptowane jedynie wówczas, gdy prace ograniczają się tylko do remontu (modernizacji) obiektu.

W sytuacji, kiedy wykonywany jest projekt drogi lub drogowego obiektu inżynierskiego (np. mostu) narażonych na oddziaływanie cieku, konieczne jest przeprowadzenie analiz, które pozwolą określić skalę tego oddziaływania (np. obliczane jest niezbędne światło mostu[7]). W tym celu nieodzowne jest zgromadzenie danych dotyczących m.in. geometrii przekroju poprzecznego cieku i terenów zalewowych, charakterystyki cieku, wielkości zlewni, budowy geologicznej dna cieku i terenów zalewowych czy roślinności na nich występujących (Madaj i Wołowicki 2003). Możliwości analityczne uzależnione są w znacznej mierze od dostępnej dokumentacji geodezyjnej (np. planów sytuacyjno-wysokościowych, przekrojów poprzecznych cieku, profilu podłużnego i spadku). Obszerność analiz wynika również z warunków przestrzennych i morfologicznych, jakie towarzyszą inwestycji, i jej istotności dla właściwego funkcjonowania sieci drogowej w szerszym kontekście.

Umocnieniem wytycznych i dobrych praktyk dotyczących projektowania i budowy infrastruktury drogowej narażonej na oddziaływanie wód powodziowych są zapisy zawarte w przepisach prawa oraz różnego rodzaju instrukcjach wewnętrznych zarządców infrastruktury. Uwzględniane są m.in. zapisy Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. z 2000, Nr 63, poz. 735 z późn. zm.), które określa wymogi odnoszące się m.in. do zabezpieczania mostów przed skutkami powodzi. Przy projektowaniu, budowie oraz przebudowie obiektów

[7] Odległość między ścianami przyczółków, mierzona na poziomie rzędnej miarodajnej wody, pomniejszona o sumę grubości filarów na tym poziomie. W mostach bez przyczółków lub z przyczółkami zatopionymi jest to odległość pomiędzy umocnieniami skarp stożków nasypowych mierzona na poziomie miarodajnej wielkiej wody, zmniejszona o sumę grubości filarów na tym poziomie. Światło mostu określa się w płaszczyźnie prostopadłej do cieku (Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60 z późn. zm.).

inżynierskich stosuje się zapisy zawarte w § 1 ust. 3 rozporządzenia. Zawarte jest tam stwierdzenie, że warunki techniczne, przy zachowaniu przepisów Prawa budowlanego i przepisów o drogach publicznych oraz innych ustaw, a także wymagań Polskich Norm, zapewniają w szczególności, w pkt. 2, bezpieczeństwo obiektów inżynierskich, zwłaszcza z uwagi na możliwość pożaru, powodzi, pochodu lodów, uderzenia statków i pojazdów, wpływu ruchu zakładu górniczego. Obiekt inżynierski powinien być zaprojektowany i wykonany w sposób odpowiadający wymaganiom wynikającym z jego usytuowania i przeznaczenia, tak aby była zapewniona jego trwałość oraz spełnione warunki prawidłowej eksploatacji i utrzymania. Realizując projekt techniczny obiektu, projektant bierze pod uwagę usytuowanie obiektu oraz warunki wodne, jak również wykonuje obliczenia hydrauliczne.

Rozdział drugi rozporządzenia wskazuje, że dostosowanie obiektów inżynierskich do warunków terenowych określa się poprzez wymogi w odniesieniu do niezbędnego światła mostu zależnie od jego lokalizacji i warunków terenowych. Zgodnie z § 18 ust. 1 długość mostu powinna wynikać z warunku minimalnego światła mostu, zapewniającego swobodę przepływu miarodajnego, bez spowodowania nadmiernego spiętrzenia wody w cieku. Jako przykład (zgodnie z ust. 3) można podać, że przepływ miarodajny to maksymalny przepływ roczny, którego prawdopodobieństwo przekroczenia równe jest 0,3% dla obiektów zlokalizowanych na drogach A (autostradach), S (drogach ekspresowych) i GP (drogach głównych ruchu przyspieszonego). Dla dróg głównych (G) i zbiorczych (Z) jest to wartość 0,5%, zaś 1% dla dróg lokalnych (L) i dojazdowych (D). W przypadku małych mostów powinny być zastosowane zasady obliczeń hydraulicznych i wymagania podobne do tych dla przepustów (§ 38). W ich przypadku rozporządzenie wskazuje wartości prawdopodobieństwa uwzględnianego przy obliczaniu przepływu miarodajnego na następujących poziomach: dla dróg A, S, GP, G i Z – 1%, zaś dla L i D – 3%. Jak widać, wartość prawdopodobieństwa przyjmuje się w zależności od kategorii drogi w ciągu, której znajduje się most lub przepust zgodnie z zasadą, że im droga jest wyższej kategorii, tym obiekt projektowany jest z uwzględnieniem zdarzeń o coraz niższym prawdopodobieństwie.

Rozporządzenie w § 23 ust. 1 uzupełnia, że w przypadku, gdy spływ lodów odbywa się na poziomie przepływu miarodajnego, światło mostu mniejsze niż 30 m powinno być określone na podstawie tego przepływu zwiększonego o 15% jego wartości. W myśl ust. 2 na potokach górskich i rzekach podgórskich oraz na odcinkach cieków łączących je światło mostu powinno być zwiększone o 15% wartości określonej w obliczeniach, a mosty o świetle nie większym niż 25 m powinny być przewidziane jako jednoprzęsłowe (pkt 2). Przepływ miarodajny w przypadku mostów usytuowanych na rzekach obwałowanych powinien uwzględniać warunki ochrony przeciwpowodziowej dla danego odcinka rzeki (§ 19).

Zgodnie z Madajem i Wołowickim (2003, s. 66) celem dokonywania obliczeń światła mostu jest „określenie poziomego wymiaru niezabudowanego cieku gwarantującego bezpieczny, tj. niestwarzający zagrożenia dla obiektu oraz przyległego terenu, przepływ miarodajnej wielkiej wody". W przypadku przepustu uwzględniony powinien być również wymiar przekroju i jego kształt. Metodyka określania światła jest zależna od wielkości obiektów, ale generalnie są to próby dotyczące określenia światła minimalnego, założenia położenia przyczółków, podpór i ich wymiarów, obliczania przewidywanych rozmyć i spiętrzenia, a następnie porównaniu ich z wymaganiami, które musi spełnić most, dotyczącymi dopuszczalnej prędkości przepływu wody, rozmycia dna, spiętrzenia wody czy minimalnego wzniesienia konstrukcji ponad poziom wielkiej wody. Przekroje mostowe są więc projektowane w taki sposób, aby były przygotowane na przepływ o określonym prawdopodobieństwie przekroczenia, stanowiącym miarę bezpieczeństwa konstrukcji. Dla przykładu: minimalne wyniesienie konstrukcji mostu ponad poziom maksymalnie spiętrzonej wody nad śródlądowymi wodami nieżeglownymi wynosi minimum 50 cm[8] (występują dodatkowe zapisy dla poszczególnych konstrukcji, np. wykonanych ze stali trudno rdzewiejącej).

Przebieg obiektu nad ciekiem wymusza takie zagospodarowanie przestrzeni pod nim, które zagwarantuje bezproblemowy spływ wody, przede wszystkim podczas powodzi, oraz kry lodowej. Światło mostu, które gwarantuje takie bezpieczeństwo, zostaje określone poprzez modelowanie hydrauliczne. Przepływ wody i kry może być także blokowany przez przęsła mostów. Dlatego chcąc zapewnić bezpieczeństwo mostu, powinno się uwzględnić tak ważną kwestię, jak podział tej konstrukcji budowlanej na przęsła.

Zgodnie z praktyką projektową niezbędne wzniesienie konstrukcji nad zwierciadło wody dotyczy rzędnej spiętrzonej wody przed mostem, zwiększonej ewentualnie o wysokość fali i tzw. spiętrzenie wiatrowe (eoliczne). Spiętrzenie spowodowane wiatrem[9] uwzględniane jest na ujściowych odcinkach rzek wpływających do morza oraz na odcinkach rzek wpływających lub wypływających z naturalnych lub sztucznych zbiorników (Madaj i Wołowicki 2003).

Most jako część trasy komunikacyjnej tak w zakresie lokalizacji, jak i kształtu jest zawsze uzależniony od przebiegu trasy, w której ciągu się znajduje. Projekty małych obiektów inżynierskich (np. małych mostów[10]) są całkowicie uzależnio-

---

[8] Jeden metr na wodach uznanych za spławne oraz na ciekach niespławnych; pół metra na pozostałych wodach nieżeglownych; półtora metra na wodach uznanych za żeglowne, pod przęsłami nieżeglownymi.

[9] Jako miarodajną w obliczeniach przyjmuje się prędkość wiatru 20 m/s oraz wysokość fali dla prawdopodobieństwa wystąpienia 1%.

[10] Obiekty inżynierskie, których światło nie przekracza 10 m, zaś dno pod mostem i poniżej mostu jest zabezpieczone przed rozmyciem.

ne (pod względem umiejscowienia i cech geometrycznych) od wyznaczonego, optymalnego pod kątem funkcjonalnym i ekonomicznym przebiegu trasy (Madaj i Wołowicki 2003). Duże i bardzo istotne obiekty nie są tak ściśle zdeterminowane wyznaczoną trasą. Wymagają one bowiem zazwyczaj szczególnych warunków lokalizacyjnych, a zapewnienie im dzięki temu wysokiego poziomu stabilności i odporności uzasadnia modyfikację przebiegu trasy.

Dodatkowo ze względów bezpieczeństwa dobre praktyki związane z projektowaniem elementów sieci drogowej każą wykonywać obliczenia dla przepływów większych od miarodajnych (np. o 20 czy 40%). Pożądane jest również uwzględnianie w obliczeniach przepływów o prawdopodobieństwach mniejszych niż te wskazane w prawodawstwie. Bardzo istotna jest również weryfikacja obliczeń poprzez ich zestawienie z wynikami obserwacji przeprowadzonych w terenie – szczególnie podczas wystąpienia powodzi (Madaj i Wołowicki 2003).

Zgodnie z Ustawą z dnia 10 kwietnia 2003 r. o szczególnych zasadach przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie dróg publicznych (Dz.U. 2003, Nr 80, poz. 721 z późn. zm.) wniosek o wydanie decyzji o zezwoleniu na realizację inwestycji drogowej zawiera opinię dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej Państwowego Gospodarstwa Wodnego Wody Polskie, odnoszącą się do obiektów na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią. Opinia jest wydawana na wniosek zarządcy drogi. Niewydanie opinii w wyznaczonym terminie traktuje się jako brak zastrzeżeń do wniosku. Jeżeli realizacja inwestycji drogowej wymaga zgody wodnoprawnej, odpowiednio PGW WP albo minister właściwy do spraw gospodarki wodnej rozpatrują jej wydanie. Zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne (Dz.U. 2017, poz. 1566 z późn. zm.) nie odmawia się uzgodnienia lokalizacji obiektów mostowych w całości lub w części realizowanych albo planowanych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią, jeżeli ich realizacja jest konieczna dla zachowania ciągłości istniejących bądź projektowanych ciągów komunikacyjnych. Nawet jeśli inwestycje te naruszają ustalenia planów gospodarowania wodami na obszarze dorzecza i zarządzania ryzykiem powodziowym, stanowią zagrożenie dla ochrony zdrowia ludzi, środowiska i dóbr kultury wpisanych do rejestru zabytków, naruszają funkcjonowanie infrastruktury krytycznej czy utrudniają zarządzanie ryzykiem powodziowym.

Na terenach zalewowych rzek przegradzanych nasypami drogowymi (§ 36 ust. 1 Rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie) wskazuje się konieczność realizacji wałów kierujących w sytuacji, kiedy na terenach zalewowych przepływ jest większy niż 15% całkowitego przepływu miarodajnego, średnia prędkość wody jest większa niż 0,6 m/s i nasyp drogowy przegradza teren zalewowy na odcinku większym niż 1/3 jego szerokości. Warunkiem niezbędnym jest również określona częstotliwość występowania wody z brzegów – ustalona na większą niż raz na trzy lata (ust. 2).

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej oraz Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 24 stycznia 2019 r. w sprawie zakresu wymagań, jakie dla obiektów budowlanych lokalizowanych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią może określać pozwolenie wodnoprawne (Dz.U. 2019, poz. 227), doprecyzowuje, że względem obiektów budowlanych lokalizowanych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią pozwolenie wodnoprawne może określić np. dobór rozwiązań architektoniczno-budowlanych i materiałowych dotyczących m.in. konstrukcji obiektu budowlanego w zakresie jej dostosowania do naporu wody i kry, wysokości usytuowania posadzki najniższej kondygnacji nad poziom wody o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi wynoszącym 1% czy sposobu posadowienia obiektu budowlanego w zakresie jego powiązania z gruntem, w zależności od parametrów zasięgu i głębokości wody o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi wynoszącym 1%. Natomiast w rozporządzeniu w sprawie zakresu wymagań oraz warunków dla planowanej zabudowy oraz planowanego zagospodarowania terenów położonych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią oraz sposobu ich ustalania (Dz.U. 2019, poz. 244) pojawiają się zapisy dotyczące działań ograniczających negatywne skutki zalania wodami powodziowymi. W tym zakresie uwzględniono w uzgodnieniach element kształtowania układu drogowego na terenach mieszkalnych i usługowych oraz rolniczych, w tym na potrzeby ewakuacji.

Z przedstawionych zapisów wynika, że dokumentacja projektowa inwestycji drogowych weryfikowana jest na ewentualność przebiegu drogi przez obszar szczególnego zagrożenia powodzią. Jak wynika z kwerendy przeprowadzonej wśród dokumentacji udostępnianej przez zarządców infrastruktury drogowej, znaczna część przypadków położenia części inwestycji w obszarze szczególnego zagrożenia powodzią dotyczy rejonów, gdzie droga przeprowadzona jest nad rzeką mostem. Konieczne jest wówczas stosowanie zapisów rozporządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, które nakazują projektowanie obiektów mostowych o parametrach uwzględniających przepływ miarodajny.

Uwzględniając, że co do zasady obszary szczególnego zagrożenia powodzią obejmują tereny o prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi 1% (raz na sto lat), normatywne projektowanie obiektów inżynierskich zabezpiecza mosty oraz dojazdy przed zalaniem na terenach szczególnego zagrożenia powodzią. Praktyka projektowa wskazuje, że w przypadku odcinków dróg uwzględnienie obszarów szczególnego zagrożenia powodzią w dokumentacji projektowej dotyczy głównie elementów układu odwodnienia i objawia się projektowaniem osadników i separatorów układu kanalizacji powyżej rzędnej terenów szczególnego zagrożenia powodzią oraz stosowaniem klap przeciwcofkowych na wylotach kanalizacji, których zadaniem jest zapobieganie cofaniu się wód z cieku do kolektorów kanalizacyjnych.

Na etapie projektowania inwestycji drogowych bierze się pod uwagę położenie wyłącznie na obszarze szczególnego zagrożenia powodzią. Nie uwzględnia się tym samym ewentualnego położenia inwestycji na obszarach innych scenariuszy powodziowych, np. raz na 500 lat, czy zniszczenia obwałowań przeciwpowodziowych. Co do zasady można więc przyjąć, że nowe inwestycje drogowe realizowane na obszarze szczególnego zagrożenia powodzią są odporne na powódź o prawdopodobieństwie wynoszącym 1%. Pod względem budowy dróg i drogowych obiektów inżynierskich regionalne zarządy gospodarki wodnej wydają pozwolenia wodnoprawne w szczególności na lokalizowanie na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią nowych obiektów budowlanych oraz obiektów krzyżujących się z ciekami i z śródlądowymi drogami wodnymi. Decyzja o wydaniu pozwolenia wodnoprawnego podejmowana jest na podstawie operatu wodnoprawnego, w którym poddaje się analizie m.in. rozwiązania projektowe i ocenia skutki ich zastosowania pod kątem bezpieczeństwa powodziowego – jest to jednak wciąż ocena zastosowanych rozwiązań, a nie określenie warunków. Kwestie związane z zabezpieczeniem drogi oraz jej użytkowaniem musi rozstrzygnąć projektant odcinka, bowiem w przypadku budownictwa drogowego zabezpieczenie możliwości użytkowania drogi na obszarach zagrożenia powodziowego to on projektuje, a jednocześnie ponosi z tego tytułu odpowiedzialność, zgodnie z przepisami o odpowiedzialności zawodowej w budownictwie. RZGW biorą pod uwagę ryzyko powodziowe, a więc droga nie powinna zwiększać zagrożenia powodziowego. Jeżeli jednak spiętrza wodę, co z kolei powoduje zagrożenie terenów szczególnie zamieszkałych przez ludzi, należy dążyć do takich zmian, które nie będą skutkować tak negatywnym oddziaływaniem (np. wprowadzenie estakad, przepustów itp.). Drogi poza obszarem szczególnego zagrożenia powodzią nie leżą w zakresie kompetencji RZGW.

Wody Polskie występują więc z pozycji podmiotu oceniającego koncepcję realizacyjną, a nie z pozycji ustalającego warunki, jakie należy spełnić dla ochrony przed powodzią, przy czym ocena ograniczona jest wyłącznie do obszarów szczególnego zagrożenia powodzią. W trakcie analizy wniosku oceniany jest wpływ inwestycji na tereny przyległe, konieczność wykonania mostów, przepustów i innych urządzeń udrażniających przepływ doliną rzeczną, wpływ ograniczenia retencji dolinowej przez nasypy drogowe na koncentrację przepływu i skutki, jakie to wywołuje w dolnym biegu rzeki (podtopienia itp.).

Na prośbę zainteresowanych instytucji do wykorzystania na etapie projektowania podawane są rzędne wody o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia, natomiast warunki, które należy spełnić przy projektowaniu, określają normy i wytyczne do projektowania uzależnione od klasy drogi, uwarunkowania terenowe, powiązania z innymi urządzeniami komunikacyjnymi oraz parametry ustalone przez zamawiającego. Informacje o głębokości wody zaczerpnięte z map zagrożenia powodziowego (MZP) są danymi dodatkowymi, podobnie jak

prędkość wody. Jest to jedynie pewien wyznacznik poziomu zagrożenia. Mała głębokość i prędkość to niewielkie zagrożenie dla ludzi, ale już woda o głębokości ok. 2 m i prędkości 2 m/s potrafi przemieszczać pojazdy i jest to wskazanie pewnego poziomu zagrożenia.

W przypadku odcinków dróg najczęściej występują rozwiązania krzyżujące się z ciekami, tj. mosty i nasypy drogowe (skrzyżowania z ciekami/drogami wodnymi). W przepisach odrębnych znajdują się najczęściej zapisy o konieczności uzgodnienia obiektu z administratorem cieku, tj. Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o żegludze śródlądowej (Dz.U. 2001, Nr 5, poz. 43).

Według dotychczasowych doświadczeń zmiany przepisów oraz metod określania obszarów szczególnego zagrożenia powodzią nie wpłynęły w sposób istotny na przeprowadzanie analiz i wydawanie opinii w zakresie projektowania i budowy infrastruktury drogowej.

Mimo że nie jest to przedmiotem rozważań w prezentowanej pracy, to należy choć krótko wspomnieć, że omawiane inwestycje w dziedzinie infrastruktury transportowej nie pozostają bez wpływu na środowisko przyrodnicze. Chociażby zwężenie doliny mostem o zbyt małej rozpiętości może przyczynić się do erozji dna cieku poniżej obiektu. To zaś może skutkować potrzebą lokalnej regulacji cieku, która pogłębia efekt kanalizacji potoku. Jeleński (2004) wskazuje, że szansy na zahamowanie takich zjawisk należy upatrywać w budowaniu mostów ponad dolinami, czyli przynajmniej ponad większością terenów zalewowych. Wówczas dolina wraz z rzeką zachowałaby swój charakter naturalnego szlaku komunikacyjnego dla zwierząt wodnych i lądowych oraz szlaku wodnego i lądowego dla rekreacji. Szczególnie problematyczne są inwestycje w przebiegu dróg lokalnych. Ich zarządcy bowiem nie mogą zazwyczaj pozwolić sobie na realizację projektów uwzględniających potrzeby środowiskowe wobec ograniczeń ekonomicznych. Tym samym drogowe obiekty inżynierskie są najczęściej występującymi i trwałymi przeszkodami (hydraulicznymi i ekologicznymi) w korytarzach cieków (Jeleński 2004).

Poza projektowaniem i budową infrastruktury drogowej zagrożonej powodzią o jej bezpieczeństwie i bezpieczeństwie osób podróżujących przy jej wykorzystaniu decydują również wytyczne odnoszące się do jej utrzymania i użytkowania zarówno w czasie powodzi, jak i pomiędzy nimi.

Artykuł 20 pkt 14 ustawy o drogach publicznych (Dz.U. 2018, poz. 2068 z późn. zm.) określa, że do zadań zarządcy drogi należy „wprowadzanie ograniczeń lub zamykanie dróg i drogowych obiektów inżynierskich dla ruchu oraz wyznaczanie objazdów drogami różnej kategorii, gdy występuje bezpośrednie zagrożenie bezpieczeństwa osób lub mienia".

Zastosowanie ma tu także zarządzenie nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 lipca 2005 r. w sprawie wprowadzenia instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich, które są

stosowane w czasie wykonywania okresowych kontroli obiektów inżynierskich zarządzanych przez Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, polegających na sprawdzaniu stanu technicznego, przydatności do użytkowania oraz estetyki obiektów i ich otoczenia. Jednym z podstawowych elementów kontroli mostów są „przeglądy bieżące" – kontrole wizualne (lustracje) dokonywane w czasie patrolowych objazdów sieci drogowej, pozwalające na ocenienie przez osobę wykonującą objazd stanu zagrożenia mostu (ocena poziomu wody, ilość zanieczyszczeń naniesionych przez wodę przed obiektem) i podjęcie stosownych do sytuacji decyzji i działań.

W zarządzeniu nr 56 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 17 listopada 2015 r. w sprawie wytycznych dokonywania objazdów dróg krajowych określono zasady sprawdzania stanu utrzymania i ochrony[11] dróg, w tym drogowych obiektów inżynierskich.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa sieci i jej użytkowników niezwykle istotny jest sprawny przepływ informacji, szczególnie w obliczu tak dynamicznego zjawiska jak powódź. Jednym z rozwiązań zapewniających stały dostęp do aktualnych danych o stanie sieci drogowej (przede wszystkim krajowej) zarówno użytkownikom, jak i zarządcom jest punkt informacji drogowej. To całodobowy punkt kontaktowy w centrali Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) i 16 oddziałach, do którego zadań należy gromadzenie i przekazywanie informacji o warunkach ruchu, stanie nawierzchni i zdarzeniach mających wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego oraz płynność ruchu w obrębie sieci (Zarządzenie nr 4 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 11 lutego 2019 r. w sprawie organizacji Punktu Informacji Drogowej oraz zasad gromadzenia i przekazywania informacji o warunkach ruchu na drogach krajowych). W razie wystąpienia zdarzenia nietypowego możliwe jest więc przekazywanie informacji, które odcinki sieci są nieprzejezdne oraz w jaki sposób można je objechać.

W zarządzeniu nr 10 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie przygotowania Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad do realizacji zadań zarządzania kryzysowego wskazano kategorie utrudnień, zdarzeń ekstremalnych i zagrożeń mogących spowodować sytuacje kryzysowe w obrębie zarządzanej sieci dróg krajowych lub innej infrastruktury GDDKiA. Jak wskazano, w celu zwiększenia sprawności zarządzania w czasie zagrożenia należy również wprowadzić podział zadań i odpowiedzialności w zakresie realizacji celów zarządzania kryzysowego, struktury kierowania

[11] Działania mające na celu niedopuszczenie do przedwczesnego zniszczenia drogi, obniżenia klasy drogi, ograniczenia jej funkcji, niewłaściwego jej użytkowania oraz pogorszenia warunków bezpieczeństwa ruchu (Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60).

nim oraz komórki organizacyjne uczestniczące w tym procesie wraz z towarzyszącym obiegiem informacji. Instrukcje obejmujące podobny zakres merytoryczny tworzone są także przez zarządców infrastruktury drogowej na poziomie regionalnym i lokalnym. Standardy postępowania opracowywane przez zarządy dróg wojewódzkich (ZDW) reprezentują zbliżony poziom merytoryczny. Aktualność i rzetelność instrukcji przygotowywanych przez zarządców dróg lokalnych jest natomiast bardzo zróżnicowana.

W instrukcji przeciwpowodziowej i przeciwlodowej przygotowanej przez GDDKiA podkreślono szeroki zakres możliwych form oddziaływania powodzi na sieć drogową oraz jej losowy charakter. Na tym tle wskazano konieczność prowadzenia wieloletnich obserwacji obiektów inżynierskich i zagrożonych odcinków dróg. W jednostkach zajmujących się zarządzaniem drogami i zlokalizowanymi na nich mostami i przepustami powinien znajdować się ciągle aktualizowany wykaz odcinków dróg i obiektów mostowych, które wymagają ochrony przeciwpowodziowej i przeciwlodowej. Przy opracowywaniu wykazu powinny być wzięte pod uwagę: rejonizacja powodzi, powodziowość rzek oraz odnotowywane okresy występowania powodzi i pochodu lodów w obrębie obiektu. Do podstawowych zadań związanych z ochroną należy przygotowanie i ochrona mostów w związku z pochodem lodów i spływem wód oraz ocena strat i usuwanie szkód powodziowych. Istotą jest więc dokonana przez inspektora mostowego prawidłowa ocena stanu konstrukcji podpór wraz z posadowieniem nasypów, skarp i stożków oraz koryta rzeki. Przy mostach o świetle poziomym powyżej 100 m powinny być wykonane pomiary profili poprzecznego dna rzeki przy podporach od strony odpływu wody w celu ujawnienia niebezpiecznych rozmyć wokół posadowienia podpór przez porównanie z profilem poprzednim. Jak wynika z praktyki zarządców dróg (m.in. GDDKiA, ZDW), zagrożenie rozmycia nasypu drogowego doprowadzającego drogę do obiektu w sytuacji zagrożenia powodziowego może być powodem zamknięcia mostu dla ruchu.

Koordynację działań na rzecz rozwiązywania problemów klęsk żywiołowych w zakresie dróg publicznych zapisy Ustawy z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60 z późn. zm.) powierzają ministrowi właściwemu do spraw transportu.

Krajowy Plan Zarządzania Kryzysowego (KPZK) wśród zadań ministra właściwego do spraw transportu wymienia również koordynowanie działań instytucji podległych lub nadzorowanych, w tym GDDKiA. W przypadku powodzi szczególnie ważny jest moduł zadaniowy związany z realizacją nadzoru nad zarządzaniem drogami i zarządzaniem ruchem na drogach krajowych na potrzeby zabezpieczenia funkcjonowania transportu drogowego oraz wsparcie działań zmierzających do odtworzenia i zapewnienia ciągłości działania infrastruktury krytycznej, znajdującej się w zakresie odpowiedzialności ministra.

KPZK jako najczęstsze skutki wystąpienia powodzi w odniesieniu do transportu drogowego wymienia (względem ludności) okresowe utrudnienia w przemieszczaniu się, konieczność ewakuacji ludności oraz (względem gospodarki) zniszczenia elementów infrastruktury (m.in. dróg, mostów, wiaduktów, tuneli, przepustów), długoterminowe zablokowanie szlaków/węzłów komunikacyjnych powodujące unieruchomienie lub utrudnienia w transporcie i utrudnienia komunikacyjne: niemożność dotarcia mieszkańców do zakładów pracy; utrudniony dostęp do rejonów zniszczeń i związane z tym utrudnienia w akcjach ratowniczych. W celu eliminacji tychże skutków i zapobieganiu im, poza wspomnianą rolą ministra właściwego do spraw transportu, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa zobligowane zostało do opracowania i aktualizacji szczegółowych kryteriów pozwalających wyodrębnić obiekty infrastruktury krytycznej, a także do sporządzania i aktualizowania jednolitego wykazu rzeczonych obiektów oraz sporządzania analiz i prognoz dotyczących możliwości wystąpienia zagrożeń istotnych dla krajowej infrastruktury krytycznej. Z kolei ocena możliwych strat ludzkich, mienia i infrastruktury należy do wojewody.

Zgodnie z Ustawą z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym (Dz.U. 2007, Nr 89, poz. 590. z późn. zm.) system transportowy należy do infrastruktury krytycznej. Rzutuje to na działalność organów administracji publicznej, która powinna polegać na zapobieganiu sytuacjom kryzysowym w jej zakresie. Powinno się to opierać na reagowaniu w przypadku wystąpienia sytuacji kryzysowych, usuwaniu ich skutków oraz odtwarzaniu stanu infrastruktury. Sieć transportowa (w tym drogowa) winna więc utrzymywać stałą funkcjonalność i integralność w czasie, gdy sytuacje kryzysowe wystąpią, oraz w czasie oczekiwania na nie (zadania z zakresu planowania cywilnego). Zadania z zakresu ochrony infrastruktury krytycznej obejmują w szczególności gromadzenie i przetwarzanie informacji dotyczących zagrożeń infrastruktury transportowej, opracowywanie i wdrażanie procedur na wypadek wystąpienia tych zagrożeń oraz jej odtwarzanie.

Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej za swój cel przyjmuje stworzenie warunków do poprawy bezpieczeństwa poszczególnych systemów. W kontekście sieci drogowej szczególnie ważne jest wprowadzenie metodyki oceny ryzyka uwzględniającej wystąpienie powodzi, w tym metodyki postępowania w obliczu zagrożenia nawet o bardzo małym prawdopodobieństwie i katastrofalnych skutkach. Dla realizacji tego celu szczegółowego konieczna jest identyfikacja tych elementów sieci, których zniszczenie lub zakłócenie funkcjonowania mogłoby spowodować sytuację kryzysową. W związku z tym organy zaangażowane w zarządzanie infrastrukturą krytyczną (operatorzy) zobowiązane są do: przygotowywania i wdrażania, stosownie do przewidywanych zagrożeń, planów ochrony infrastruktury krytycznej oraz utrzymywania własnych systemów rezerwowych, zapewniających bezpieczeństwo i podtrzymujących funkcjonowanie tej

infrastruktury do czasu jej pełnego odtworzenia. Zaznaczono tutaj rolę instytucji naukowych i środowiska naukowego, które mają być źródłem wiedzy i stanowić wsparcie eksperckie. Ta działalność ma owocować opracowaniem nowych technologii i metod analitycznych stosowanych w celu oceny ryzyka zniszczenia lub zaprzestania funkcjonowania sieci transportowej czy oceny jej podatności na zagrożenia, co wyraźnie uzasadnia realizację celów monografii.

Działania podejmowane w celu ochrony infrastruktury powinny być proporcjonalne do poziomu ryzyka rozumianego jako funkcja zagrożenia, podatności oraz skutków. Dlatego wobec braku możliwości wpływu na poziom prawdopodobieństwa powodzi działania podejmowane na rzecz zapewnienia bezpieczeństwa mają na celu minimalizację ryzyka zakłócenia funkcjonowania sieci transportowej poprzez zmniejszenie jej podatności oraz skutków wystąpienia. W tym zakresie szczególnie istotne wydaje się opracowanie planów ciągłości działania i odtwarzania, rozumiane jako zespół działań organizacyjnych i technicznych prowadzących do utrzymania i odtworzenia funkcji realizowanych przez sieć transportową.

W załączniku do Programu, obejmującym standardy służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania infrastruktury krytycznej w formie dobrych praktyk i rekomendacji, zdefiniowano cechy systemu odpornego na zakłócenia. Wskazano na ciągłą dostępność świadczonych przezeń usług, niezawodność, zdolność serwisową i bezpieczeństwo. Tak więc działania prowadzone w ramach ochrony infrastruktury krytycznej powinny gwarantować utrzymanie wysokiej dostępności infrastruktury transportu drogowego w dowolnym okresie. W tym czasie sieć powinna być również możliwie niezawodna, a to można uzyskać dzięki: wzajemnej zastępowalności poszczególnych jej elementów, krótkiemu okresowi napraw (zarówno tych przywracających minimalny poziom funkcjonalności, jak i tych, które przywracają sieć do stanu wyjściowego), ciągłemu nadzorowi (szczególnie od momentu, kiedy wystąpią pierwsze symptomy zagrożenia) oraz wysokiej jakości (którą można w tym przypadku utożsamiać z odpornością) poszczególnych elementów sieci.

Infrastruktura drogowa, jak każda inna, ulega zużyciu. Aby nie obniżało ono odporności sieci na destrukcyjne działanie wód powodziowych, konieczne jest utrzymywanie jej wysokiej zdolności serwisowej. W przypadku powodzi szczególnie istotne wydaje się ustalenie harmonogramu prowadzonych prac remontowych. Znając rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi w ciągu roku i przestrzeni kraju, należy realizować je w takim miejscu i czasie, które gwarantują najmniejsze możliwe współwystąpienie prac remontowych i oddziaływanie wód powodziowych. Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej zapewnić ma natomiast spełnienie zapisów norm i przepisów prawa, ale również ustaleń zawartych w standardach i wytycznych międzynarodowych. Ze względu na przedmiot monografii szczególnie istotne wydaje się modelowanie konsekwencji potencjalnych awarii.

4

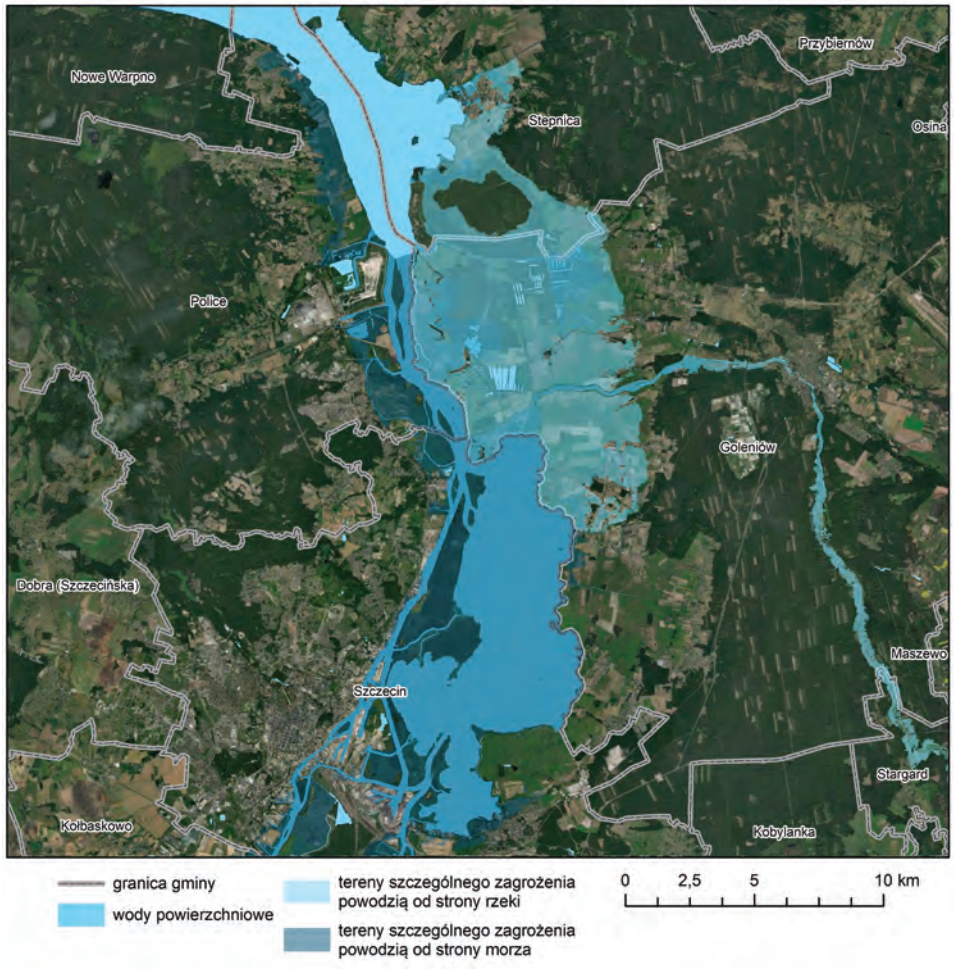
SIEĆ DROGOWA NA TERENACH ZAGROŻONYCH POWODZIĄ

4.1. Identyfikacja odcinków sieci drogowej w granicach terenów zagrożonych powodzią

Dla zwiększenia bezpieczeństwa obywateli oraz ograniczenia strat spowodowanych powodzią konieczne było wyselekcjonowanie obszarów zagrożonych jej oddziaływaniem w poszczególnych scenariuszach. Dlatego też w ramach projektu ISOK opracowane zostały mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego dla dwóch typów powodzi (ze względu na źródło), tj. dla powodzi rzecznych oraz dla powodzi od strony morza (ryc. 4.1). Powodzie opadowe, od wód gruntowych i od urządzeń wodno-kanalizacyjnych i hydrotechnicznych, zostały przeanalizowane we wstępnej ocenie ryzyka powodziowego. Na obszarze Polski ich znaczenie jest powiązane z wystąpieniem zagrożenia powodziowego od rzeki lub morza. Z tego też względu nie wskazano ich jako oddzielnego typu znaczących powodzi, dla których konieczne było wykonanie osobnych map zagrożenia powodziowego.

Wyznaczenie tychże obszarów było możliwe dzięki inwentaryzacji dostępnych zasobów danych w zakresie zarządzania kryzysowego, zaprojektowaniu rozwiązania systemowego, budowie baz danych referencyjnych (m.in. drogi, koleje, miejscowości), stworzeniu opracowań planistycznych dotyczących powodzi, wreszcie – zwiększeniu świadomości społecznej w zakresie tego rodzaju sytuacji kryzysowej (Maślanka i Wężyk 2014, s. 14). Realizacja projektu poprzez analityczne wyznaczenie obszarów zagrożonych powodzią na podstawie modelowania w wieloletniej perspektywie przyczynić się może do zmniejszenia strat w zakresie gospodarki i wzmocnienia ochrony życia ludzi w Polsce (Kurczyński 2014, s. 20), a w zakresie realizacji prezentowanego badania pozwoliła wskazać, które odcinki sieci drogowej zostają zalane w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach.

Mapy zagrożenia i ryzyka powodziowego zostały opracowane na bazie wyników modelowania hydraulicznego jednowymiarowego (1D) oraz dwuwymiarowego (2D). Opierają się one na metodzie hydraulicznej określanej mianem „metody fali dynamicznej". Jest ona opisana pełnymi, jednowymiarowymi równaniami Saint-Venanta, wyrażanymi w postaci równania zachowania masy oraz równania zachowania pędu (Szwagrzyk i in. 2014, s. 162). W zakresie modelowania jednowymiarowego (1D) ciek upraszczany jest do geometrii przekrojów poprzecznych i profilu podłużnego. Natomiast w modelowaniu 2D obliczenia wykonywane są na siatce elementów w dwuwymiarowej przestrzeni XY. Ponadto:



Ryc. 4.1. Przykłady wyznaczonych obszarów narażonych na wystąpienie powodzi od strony rzeki i od strony morza w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

> Hydrauliczny model jednowymiarowy obejmuje przekroje poprzeczne koryta modelowanego cieku, współczynniki szorstkości punktów przekrojów poprzecznych, schemat sieci rzecznej, odwzorowane obiekty mostowe oraz warunki brzegowe (wielkości przepływów wygenerowane na podstawie obliczeń hydrologicznych).
>
> Szwagrzyk i in. 2014, s. 163.

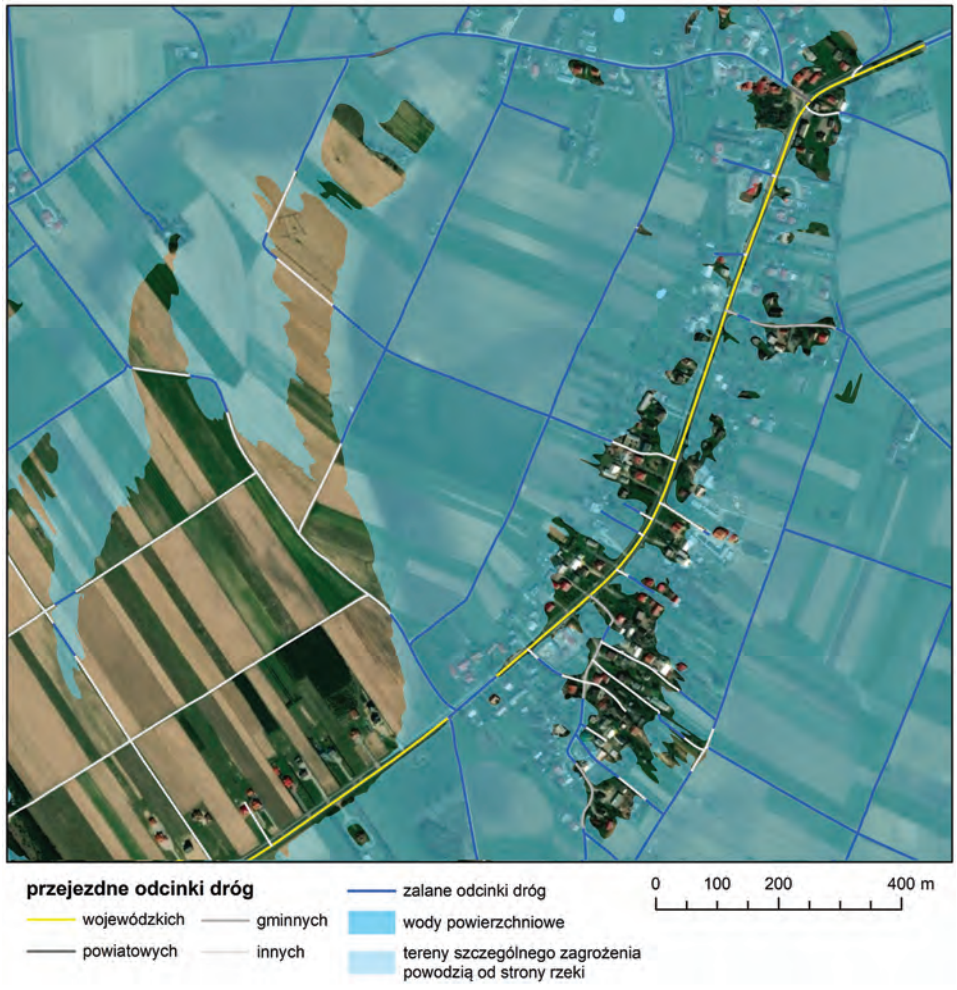
Modelowanie jednowymiarowe przynosi informacje o rzędnych zwierciadła wody, wielkościach przepływu oraz prędkościach płynięcia wody. Zgodnie jednak z przedstawioną wcześniej charakterystyką wszystkie te dane ograniczone

są do przekrojów obliczeniowych. Aby wyznaczyć zasięg strefy zalewowej z wykorzystaniem rezultatów modelowania 1D, konieczna jest interpolacja rzędnej zwierciadła wody na odcinkach pomiędzy modelowanymi przekrojami oraz analizy przestrzenne (Szwagrzyk i in. 2014). Przydatny w tym celu jest numeryczny model terenu (NMT)[1]. Dane wysokościowe są wykorzystywane przede wszystkim do pozyskiwania informacji przydatnych do charakterystyki teras zalewowych i informacji o terenie. Przynoszą informacje o wałach przeciwpowodziowych, groblach i szczególnie istotnych z punktu widzenia realizowanego badania nasypach drogowych czy kolejowych (ryc. 4.2).

Wykorzystanie danych wysokościowych przez zarządców infrastruktury drogowej (np. GDDKiA) koncentruje się w głównej mierze na planowaniu inwestycji na jej wczesnych etapach (trasowanie przebiegów) oraz opracowywaniu dokumentacji oddziaływania inwestycji na środowisko. Modelowaniu podlegają m.in. hałas i warunki hydrologiczne. Wprowadzenie danych wysokościowych do procesu planowania, a następnie realizacji projektów budowlanych przyczynia się do optymalizowania kosztów związanych chociażby z robotami ziemnymi w związku ze spełnianiem warunków wynikających z klasy drogi. Dzięki danym będącym wynikiem lotniczego skanowania laserowego możliwe staje się m.in. określenie maksymalnych spadków czy też uzyskanie informacji dotyczących poziomu wód podziemnych. Ponadto dane wysokościowe wspomagają

---

[1] „(…) stanowi uporządkowany zbiór punktów reprezentujących wysokości topograficzne powierzchni terenu wraz z algorytmami interpolacyjnymi pozwalającymi na odtworzenie (interpolację) tej powierzchni w dowolnym miejscu. (…) Najprostszy model organizacji danych oparty jest na siatce kwadratów, przy czym każdemu węzłowi tej siatki przypisana jest wysokość (H). W modelu tym dane mogą być przechowywane w postaci tablicy (macierzy) i dlatego, z racji prostoty i łatwości realizacji, model ten stosowany jest najczęściej. W programach komputerowych, a w szczególności w systemach GIS, model ten występuje pod nazwą GRID. Wadą tego modelu jest jednak brak możliwości wiernego odzwierciedlenia przebiegu linii strukturalnych powierzchni terenu, np. linii krawędziowych na skarpach. Ponadto model GRID wymaga zawsze interpolacji wyjściowej chmury punktów ze skanowania laserowego do regularnej struktury. (…) Pewnym wariantem modelu GRID jest model rastrowy: na podstawie wysokości w punktach siatki generowany jest obraz (zdjęcie), w którym poszczególnym pikselom (a więc obszarowi) przyporządkowano wysokości punktów siatki. Drugi stosowany model organizacji danych NMT oparty jest na nieregularnej siatce trójkątów, która tworzona jest na podstawie oryginalnych danych ALS, bez jakiejkolwiek ich interpolacji. (…) Modelem łączącym zalety omawianych powyżej dwóch podstawowych NMT jest model hybrydowy organizacji danych. Model ten ma strukturę warstwową, gdzie warstwę podstawową stanowi siatka kwadratów z wysokościami (GRID). Na kolejnych warstwach mogą być zapamiętane, w postaci wektorowej, linie strukturalne powierzchni czy też elementy nieregularnej sieci TIN" (Borkowski 2014, s. 110–111).



Ryc. 4.2. Przykład odcinka drogi w nasypie, pozostającej poza zasięgiem wód powodziowych w gminie Tryńcza (powiat przeworski) w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

przeprowadzanie weryfikacji wpływu sytuacji hydrologicznej na planowane inwestycje. Dysponowanie danymi wysokościowymi o odpowiednio dużej precyzji pozwala na przeprowadzanie licznych analiz, w tym w 3D. Modelowanie tego rodzaju może zoptymalizować proces podejmowania decyzji lokalizacyjnych dotyczących inwestycji drogowych. Wspomaga również definiowanie parametrów, jakim powinny odpowiadać inwestycje poboczne, np. węzły drogowe i drogowe obiekty inżynierskie. GDDKiA w opracowanej przez siebie karcie zawierającej przykłady wykorzystania danych LiDAR wskazuje również, że dane

wysokościowe stanowią podstawę do podejmowania decyzji odnośnie do wytyczania szlaków komunikacyjnych w obszarach o charakterze ochronnym. Występuje tu również zapis o ich istotności w przypadku inwestycji realizowanych na obszarach szczególnie zagrożonych podtopieniami czy też podatnych na erozję lub przemieszczanie się mas ziemnych (Dane wysokościowe jako wsparcie procesu projektowania i realizacji inwestycji drogowych, GDDKiA).

W ramach prac geodezyjnych projektu ISOK wykonana została szczegółowa inwentaryzacja obiektów inżynierskich znajdujących się na ciekach objętych opracowaniem, w tym obiektów mostowych (m.in. mostów i kładek). Polegała ona na zidentyfikowaniu w terenie rzeczywistych lokalizacji tychże obiektów. Uwzględniono tylko te z nich, które posiadały filary o szerokości (lub średnicy) co najmniej 0,5 m lub rzędne spodu ich konstrukcji były niższe od poziomu wyznaczonego przez dodanie 2 m do rzędnych górnych krawędzi skarp brzegowych (przy czym grubość ich głównej poziomej konstrukcji przekracza 0,5 m) lub posiadają przyczółki, które znajdują się w całości bądź częściowo w przekroju korytowym (obiekt musiał spełnić chociaż jeden z warunków) (Raport z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, s. 42). Nie są one uwzględniane ze względu na chęć określenia skutków wystąpienia powodzi dla sieci transportowej, lecz dlatego, że mogą mieć wpływ na przemieszczanie się mas wody. Niemniej jednak stanowią jedyne tego rodzaju źródło danych, odnoszące się do wpływu powodzi na infrastrukturę drogową, o tak dużej szczegółowości i zasięgu przestrzennym.

Innymi ważnymi elementami, pozyskiwanymi również na podstawie danych opracowanych w technologii lotniczego skanowania laserowego, są obrysy budynków oraz rodzaj pokrycia terenu, co umożliwia wyznaczenie współczynników szorstkości podłoża. Podstawowa gęstość chmury punktów pochodzącej ze skaningu laserowego (dla standardu I) wynosi 4 punkty/m^2. Daje to średnią odległość punktów równą 0,5 m. Jest to gęstość gwarantująca tworzenie precyzyjnego NMT, umożliwiającego odwzorowanie nawet małych, naturalnych form terenowych oraz ważnych form antropogenicznych, takich jak wały przeciwpowodziowe, skarpy czy właśnie nasypy drogowe (czego wynikiem jest niezwykle urozmaicona geometria granicy terenów zagrożonych zalaniem). Wymaganie w zakresie minimalnej gęstości w standardzie II jest jeszcze wyższe i wynosi 12 punktów/m^2.

Modelowanie dwuwymiarowe (2D) realizowane jest wprost na siatce obliczeniowej wygenerowanej na podstawie NMT. Powoduje to, że informacje o zasięgu i głębokości strefy zalewowej są uzyskiwane bezpośrednio. Nie występuje w tym przypadku konieczność przeprowadzania dodatkowych analiz przestrzennych. Ten sposób modelowania umożliwia pozyskiwanie danych o prędkości i kierunku przemieszczania się wody w każdym z punktów modelowanego obszaru. W przeciwieństwie do symulacji prowadzonych w jednym wymiarze

modelowanie 2D pozwala na badanie również wtedy, kiedy możliwy jest ruch wody w kierunku prostopadłym do koryta cieku. Z tego powodu stosowane jest w przypadkach symulowania zdarzeń przerwania obwałowań przeciwpowodziowych. Znacznie większy zakres danych i złożoność modelu w stosunku do ujęcia jednowymiarowego przekłada się jednak na wyraźne wydłużenie jego przygotowania, jak i na realizację samej symulacji. W związku z tym w ramach projektu ISOK objęto nim miasta powyżej 100 000 mieszkańców, dla których przygotowuje się MZP i MRP (Szwagrzyk i in. 2014, s. 163).

Dla uzyskania danych o zasięgu strefy zalewowej i głębokości wody w systemach informacji przestrzennej przetworzeniu ulegają informacje o rzędnych zwierciadła wody w przekroju obliczeniowym. Jak piszą Szwagrzyk i in. (2014, s. 166):

> Na podstawie rzędnych zwierciadła wody, które przypisane są do geometrii przebiegu przekrojów poprzecznych, generuje się numeryczny model powierzchni wody (NMPW). Za pomocą algebry map dokonuje się następnie odejmowania wartości wysokości z NMT od wartości wysokości z NMPW, uzyskując warstwę głębokości wody zalewowej. Na podstawie modelu różnicowego tak otrzymanych powierzchni generuje się zasięg strefy zalewowej i weryfikuje się go, opierając się na pomocniczych danych i analizach przestrzennych, uwzględniając np. różnicę rzędnej zwierciadła wody w korycie głównym cieku w stosunku do zwierciadła wody na terasach zalewowych.

Pozyskanie danych o zasięgu strefy zalewowej oraz o głębokościach wody w jej granicach pozwoliło na dalszych etapach na określenie wielkości ryzyka powodziowego. Włączenie warstw reprezentujących głębokość strefy zalewowej oraz formy użytkowania terenu, który strefa ta obejmuje, poszerzone o atrybut wartości majątkowej każdej z nich w zakresie analiz wykonywanych w oprogramowaniu GIS, skutkowało oszacowaniem wielkości strat powodziowych.

Na mapach zagrożenia powodziowego od strony morza, w tym morskich wód wewnętrznych, z wyłączeniem ujściowych odcinków rzek, mogą być przedstawione wyłącznie obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi raz na 500 lat, jeżeli jest zapewniona odpowiednia ochrona przed powodzią. W projekcie ISOK na mapach zagrożenia powodziowego od strony morza przedstawiono również obszary, na których prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest średnie i wynosi raz na 100 lat i ten scenariusz uwzględniono także na etapie badań zmian dostępności i obciążenia sieci drogowej. Scenariusz wysokiego prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi (raz na 10 lat) nie został wykonany w przypadku powodzi od strony morza ze względu na zapewnioną odpowiednią ochronę na obszarze wybrzeża. Do jej utrzymania przyczynia się bowiem wielość programów, planów i ustaw dotyczących ochrony brzegów morskich. W rezultacie wzdłuż polskich brzegów podczas spiętrzeń sztormowych o prawdopodobieństwie

wystąpienia 10% zalaniu ulegają tylko plaże i niekiedy podnóża wydm, a wzdłuż brzegów morskich wód wewnętrznych wyłącznie te fragmenty brzegu, które powinny być zalewane ze względów ekologicznych. Na całej długości stan brzegów morskich (w tym również w morskich portach i przystaniach) w pełni zabezpiecza przed powodzią od strony morza o prawdopodobieństwie wystąpienia 5% (Raport z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, s. 11).

W pracy uwzględniono również obszary narażone na zalanie w przypadku całkowitego zniszczenia wału przeciwpowodziowego, który określa zagrożenie powodziowe wynikające z możliwości awarii dowolnego odcinka obwałowania. Scenariusz ten został wykonany dla wszystkich obwałowanych rzek wskazanych we wstępnej ocenie ryzyka powodziowego, z wyjątkiem przypadków, gdy wał jest opływany. Wówczas obszar zagrożenia powodziowego na zawalu przedstawiony został w scenariuszu wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1%. Obszar zagrożenia powodziowego został wyznaczony poprzez niezależne modelowanie dla lewego i prawego zawala rzeki polegające na jednostronnym usunięciu obwałowań (osobno dla każdego brzegu). Następnie wyniki symulacji zostały połączone w sumaryczny obszar potencjalnego zagrożenia powodziowego w wyniku całkowitego zniszczenia wału (Raport z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, s. 72). Analiza dotyczy przepływów, dla których prawdopodobieństwo przewyższenia wynosi 1%. Symulacje przerwań wałów znajdujących się w rejonach oddziaływania cofki odmorskiej zostały wykonane dla prawdopodobieństwa 1%, tak jak dla wszystkich pozostałych wałów. Analiza w przypadku obszarów zagrożonych powodzią od strony morza i morskich wód wewnętrznych dotyczy stanów wody, dla których prawdopodobieństwo przewyższenia wynosi 1% (Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego dla obszarów narażonych na zalanie w przypadku zniszczenia lub uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych – wariant całkowitego zniszczenia obwałowania, s. 1).

W wyniku przeprowadzenia przedstawionych powyżej procesów wygenerowano finalnie warstwy obrazujące powierzchnie objęte wodami powodziowymi dla każdego ze scenariuszy przewidzianych w projekcie ISOK. W prezentowanym badaniu uwzględniono te odnoszące się do powodzi o prawdopodobieństwie 10%, 1% (od rzeki i od morza) oraz w związku ze zniszczeniem pasa technicznego i wałów przeciwpowodziowych[2]. Nałożenie tychże warstw na sieć drogową pozwala wskazać, które jej fragmenty podczas powodzi znajdą się pod wodą.

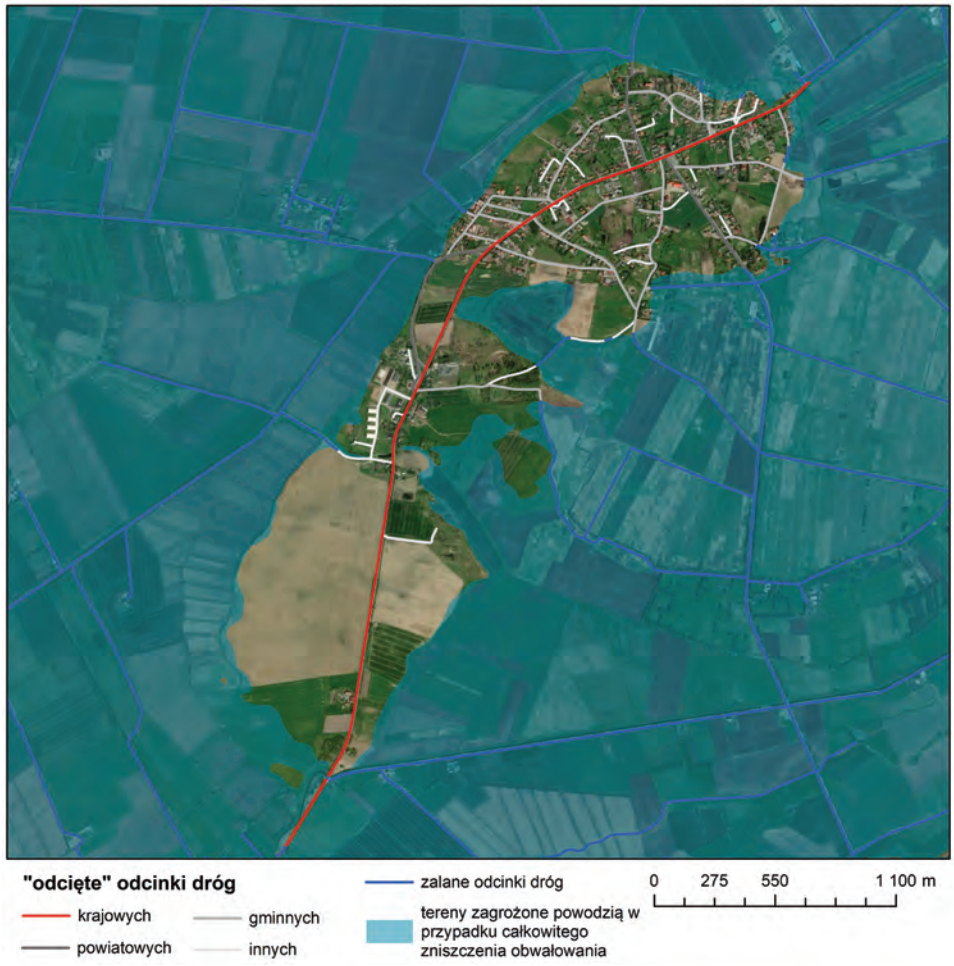
---

[2] W tym wariancie uwzględnia się również tereny zagrożone powodzią o prawdopodobieństwie 1%. Zniszczenie wałów przeciwpowodziowych będące wynikiem powodzi nie może bowiem wystąpić bez wystąpienia wód w międzywalu.

W ramach projektu ISOK wygenerowano również warstwy (pokrywające się z granicami terenów zagrożonych) obrazujące zróżnicowanie przestrzenne głębokości wody na terenach zagrożonych powodziami. Możliwe jest więc określenie głębokości wody nad odcinkiem drogi. Niestety zostały one ujęte w postaci przedziałów klasowych, a pierwszy z nich obejmuje wartości do 50 cm. Tym samym niemożliwe jest ustalenie dokładnej głębokości wody. Dlatego też przyjęto, że jeśli tylko woda powodziowa obejmuje odcinek drogi, to pozostaje on wyłączony z ruchu pojazdów. Prowadzono badania nad głębokością wody powodziowej zalegającej na drodze na możliwość poruszania się po niej pojazdów. Dla przykładu Liu i in. (2016) we wspomnianych już badaniach przyjęli, że ruch jest możliwy przy głębokości do 30 cm. Jednocześnie wskazali, że przemieszczanie się w takich warunkach wiąże się z drastycznym spadkiem prędkości oraz znaczącym wzrostem prawdopodobieństwa awarii pojazdu, kolizji i wypadków. Duże niebezpieczeństwo podczas podróży odcinkiem sieci drogowej, na którym pojawia się woda nawet o najmniejszej głębokości, podkreślają w swoim badaniu Gissing i in. (2019). Dowodzą, że w takiej sytuacji należy bezwzględnie wyłączać dany odcinek z eksploatacji.

Tak więc całkowite wyłączenie odcinka z użytkowania (w związku z brakiem dokładnej informacji o głębokości wody) wydaje się zasadne również ze względów bezpieczeństwa podróżnych, przyjmując, że nie zostanie on wcześniej zamknięty prewencyjnie przez zarządców infrastruktury. Należy w tym miejscu podkreślić konieczność zachowania bardzo wysokiej precyzji odwzorowania w modelu sieci przebiegu odcinków biegnących w sąsiedztwie cieków (np. tak aby warstwa liniowa reprezentująca odcinek drogi przebiegała w nasypie, a nie obok niego), które objęte były modelowaniem i wyznaczeniem obszarów zagrożonych powodziami. Jej brak mógłby doprowadzić do sytuacji, w której odcinek wszedłby w obręb terenów uznanych za zagrożone, kiedy w rzeczywistości np. nasyp gwarantuje mu położenie ponad poziomem wody powodziowej. Dlatego też podczas budowy modelu sieci drogowej uwzględniono dane zawarte w warstwie referencyjnej map zagrożenia i ryzyka powodziowego, dotyczącej przebiegu dróg. Może dojść do zamknięcia odcinka wobec groźby utraty stabilności konstrukcji nasypu wtedy, kiedy woda nie pojawiła się jeszcze na powierzchni drogi. Decyzje tego rodzaju zawsze mają jednak charakter indywidualny i podejmowane są na podstawie bieżących, choć często również wieloletnich obserwacji.

Opierając się na warstwach reprezentujących sieć drogową i obszary zagrożone powodzią w poszczególnych rozpatrywanych scenariuszach, wyselekcjonowano odcinki zalane na terenie poszczególnych regionów wodnych. Postępowanie to przyniosło również grupę odcinków sieci, które zostają wyłączone z użytkowania, mimo że nie są zalane (ryc. 4.3). To fragmenty sieci „odcięte" w wyniku zalania innych, sąsiadujących odcinków.



Ryc. 4.3. Przykład fragmentu sieci drogowej „odciętej" w wyniku zalania sąsiednich odcinków dróg w gminie Gronowo Elbląskie (powiat elbląski) w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019

Poszerzają one, choć w sposób pośredni, grupę odcinków wrażliwych na tego rodzaju zdarzenie nietypowe, mogąc ograniczać dostępność i wpływać na zmianę obciążenia ruchem drogowym innych odcinków sieci.

4.2. Metodyka weryfikacji bezpieczeństwa drogowych obiektów inżynierskich i nowych inwestycji

Przedstawione w podrozdziale 4.1 modelowanie uwzględniało dane wysokościowe zawarte w NMT, opracowane na podstawie materiału zebranego pomiędzy IV kwartałem 2010 r. a końcem roku 2015 dla poszczególnych fragmentów kraju. Dla realizacji założeń badawczych przyjętych w monografii implikuje to dwa zagadnienia konieczne do rozstrzygnięcia. Po pierwsze, rodzi potrzebę identyfikacji elementów sieci drogowej (np. poprowadzonych w nasypach), które zostały do niej wprowadzone (lub je przebudowano) po wykonaniu laserowego skaningu lotniczego danego obszaru kraju i tym samym nie zostały ujęte w modelowaniu. Po drugie zaś, należało zweryfikować bezpieczeństwo drogowych obiektów inżynierskich, ponieważ o ile część z nich uwzględniono w modelowaniu w związku z ich ewentualnym wpływem na przepustowość wód, to nie dotyczyło to w żaden sposób bezpieczeństwa ich samych. Ustalenie stopnia wrażliwości dowolnego obiektu – a w przypadku rozpatrywanego zagadnienia drogowego obiektu inżynierskiego – jest procedurą bardzo skomplikowaną. Wymaga przeanalizowania wielu czynników mogących mieć wpływ na powstanie uszkodzenia obiektu czy też na jego awarię, czyli niezdolność do wypełnienia określonych zadań (Marcinkowski 2006, Pregnolato, Sarhosis i Kilsby 2018, Pregnolato 2019, Yuan i in. 2019).

Można założyć, że nowo budowane i przebudowywane[3] odcinki dróg charakteryzują się parametrami technicznymi, które są przypisane do konkretnych klas technicznych i kategorii ruchu. Niemniej jednak część sieci drogowej została zaprojektowana i wybudowana bez uwzględnienia tych wytycznych i ona właśnie wymaga dodatkowej procedury weryfikacyjnej. Bardzo cenne dane na temat cech poszczególnych odcinków dróg można pozyskać od ich zarządców. Zobligowani są oni do prowadzenia dokumentacji ewidencyjnej[4] przydatnej między innymi dla potrzeb zarządzania oraz gromadzenia i przekazywania danych o sieci dróg publicznych (Marcinkowski 2006).

Jako formę identyfikacji, czy budowany w okresie wykonywania skaningu odcinek drogi został ujęty w modelowaniu, przyjęto jego obecność w warstwie referencyjnej obejmującej sieć drogową. Jeśli dany odcinek został w tej bazie ujęty, można przyjąć, że modelowanie hydrodynamiczne wskazało, czy zostanie on

---

[3] Wykonywanie robót, w których wyniku następuje podwyższenie parametrów technicznych i eksploatacyjnych istniejącej drogi, niewymagających zmiany granic pasa drogowego (Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60 z późn. zm.).

[4] Książka drogi, dziennik objazdu dróg, wykaz dróg i mapa techniczno-eksploatacyjna.

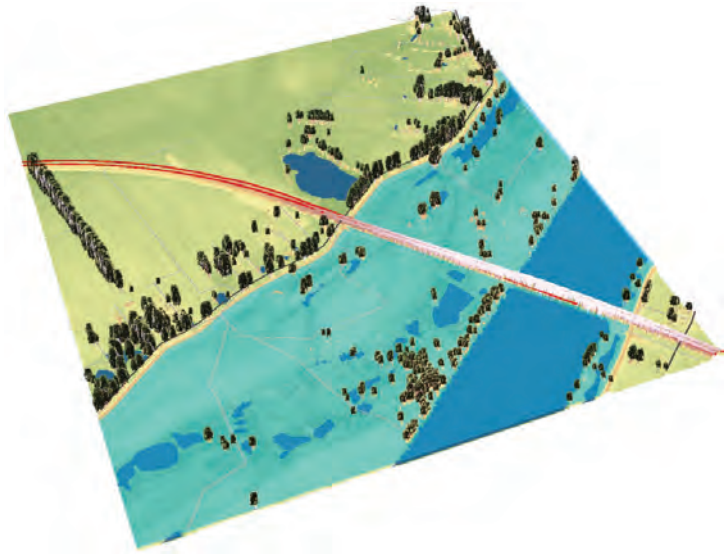
zalany podczas danego scenariusza powodzi. Jeśli odcinek został wybudowany później, to z natury rzeczy nie został ujęty w modelowaniu i konieczne było określenie, czy zostanie zalany w poszczególnych scenariuszach. Biorąc pod uwagę zasady i praktyki dotyczące budowy i eksploatacji infrastruktury drogowej przedstawione w podrozdziale 3.4, przyjęto założenie, że inwestycje na obszarze zagrożonym powodzią o prawdopodobieństwie 1% nie zostaną zalane w którymkolwiek scenariuszu.

W przypadku inwestycji powstałych poza terenami szczególnego zagrożenia powodzią przyjęto rozwiązanie, w którym „odporne" na wody powodziowe są jedynie nowo wybudowane autostrady i drogi ekspresowe jako kluczowe inwestycje drogowe. Drogi pozostałych kategorii wybudowane na obszarach zagrożonych powodzią w wyniku całkowitego zniszczenia pasa technicznego lub wałów przeciwpowodziowych zostają zalane. Rozwiązania wymagała również kwestia przebudów odcinków dróg (np. budowy nasypu), które mogły wpłynąć na rzędne ich nawierzchni i tym samym rzutować na ich podatność na zalanie. Ponieważ przebudowa nie wpływa na granice pasa drogowego, to nie uwidacznia się ona w przebiegu warstwy obrazującej dany odcinek. W tym celu konieczne było sprawdzenie, czy skaning odbył się po zakończeniu inwestycji i czy tym samym jej ewentualna ingerencja w rzędną drogi została uchwycona. W tym celu pozyskano dane od zarządców infrastruktury drogowej. Sięgnięto do baz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) w postaci Programu Budowy Dróg Krajowych (PBDK) na lata 2014–2023 (z perspektywą do 2025 r.), zgodnie z którym realizowane są obecnie przez GDDKiA inwestycje na drogach krajowych oraz zestawienia zadań inwestycyjnych w obrębie istniejącej sieci dróg, zawierające zadania związane z rozbudową i przebudową odcinków dróg, poprawą warunków i bezpieczeństwa ruchu drogowego oraz systemu zarządzania ruchem. Skorzystano również z informacji gromadzonych przez zarządy dróg wojewódzkich (ZDW) poszczególnych regionów, obejmujących inwestycje realizowane między innymi w zakresie Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa, Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej, rezerwy subwencji ogólnej na dofinansowanie inwestycji na drogach samorządowych, rezerwy Ministra Infrastruktury i Rozwoju, rezerwy subwencji ogólnej Ministra Infrastruktury i Budownictwa czy środków własnych województw. Urzędy wojewódzkie udostępniły natomiast dane na temat inwestycji realizowanych w ramach Narodowego Programu Przebudowy Dróg Lokalnych (2008-2011, Etap II – Bezpieczeństwo, Dostępność, Rozwój), Rządowego Programu na rzecz Rozwoju oraz Konkurencyjności Regionów poprzez Wsparcie Lokalnej Infrastruktury Drogowej oraz Programu rozwoju gminnej i powiatowej infrastruktury drogowej na lata 2016–2019, Funduszu Solidarności Unii Europejskiej – działania nadzwyczajne związane z usuwaniem skutków powodzi z maja i czerwca 2010 r. podjęte

w celu niezwłocznego przywrócenia infrastruktury komunalnej do stanu sprzed powodzi, środków z budżetu państwa na usuwanie skutków ruchów osuwiskowych ziemi czy skutków klęsk żywiołowych. W przypadku, kiedy występowała konieczność weryfikacji, czy dany odcinek drogi powiatowej bądź gminnej został wybudowany albo czy zmieniły się jego istotne parametry po okresie pozyskiwania danych dla produkcji NMT i jednocześnie nie był ujęty w wymienionych powyżej zestawieniach, kontaktowano się z właściwym zarządem dróg powiatowych (ZDP) lub urzędem gminy.

Pozyskane w ten sposób dane „nakładano" na skorowidz NMT, w którym każdemu arkuszowi przypisano jego aktualność. W sytuacji, gdy moment zakończenia inwestycji nie był późniejszy niż aktualność NMT, przyjmowano, że jej rezultat został ujęty w modelowaniu hydraulicznym. Jeśli zaś inwestycje zakończono później, w pierwszej kolejności analizowano opisy inwestycji w zebranych zestawieniach. Ze względu na rozległość materiału nie było możliwe pozyskanie szczegółowej dokumentacji poszczególnych pozycji. Jeśli opis wskazywał, że inwestycja nie dotyczyła istotnych parametrów technicznych i eksploatacyjnych (np. były to zmiany oznakowania drogi dla celów podniesienia bezpieczeństwa ruchu drogowego), przyjmowano, że taka inwestycja nie wpływa na podatność odcinka na zalanie. Należy mieć świadomość, że opisy te nie są sporządzane według jednego klucza i ich szczegółowość jest bardzo zróżnicowana. W innych przypadkach, kiedy inwestycja znajdowała się na terenie szczególnego zagrożenia powodzią, przyjmowano, że przyczyniła się ona do zmniejszenia podatności odcinka na zalanie. W przypadku inwestycji poza terenami szczególnego zagrożenia przyjęto taką samą zasadę jak w sytuacji budowanych odcinków dróg. Uwzględnienie dokumentacji pochodzącej od zarządców infrastruktury obarczone jest pewnym ryzykiem związanym chociażby z subiektywnym do pewnego stopnia formułowaniem opisów inwestycji, stanowi jednak akceptowalny kompromis pomiędzy rozpatrywaniem możliwie szczegółowego spektrum danych a aprobowanym czasem ich analizy.

Inżynierskie obiekty drogowe, a szczególnie obiekty mostowe, są istotnym elementem infrastruktury drogowej, wpływającym na parametry danej drogi i ustalającym dopuszczalne masy pojazdów mogące poruszać się na danym odcinku. Warunkują również liczbę pojazdów możliwą do przepuszczenia przez obiekt, jak i maksymalne gabaryty środków transportowych mogących się po nich poruszać (Marcinkowski 2006). Dlatego też tak istotne było rozwiązanie kwestii oceny podatności tychże obiektów na zalanie przez wody powodziowe. W tym celu zastosowano następujące postępowanie. W pierwszej kolejności określono, czy dany obiekt funkcjonował w czasie wykonywania skaningu – czy znajduje się w warstwie referencyjnej z siecią drogową. Jeśli jest w niej ujęty, możliwe było sprawdzenie rzędnej jego nawierzchni z wykorzystaniem Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT) (ryc. 4.4).



Ryc. 4.4. Wizualizacja danych NMPT obejmująca most na Wiśle w ciągu autostrady A1 w pobliżu Grudziądza w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu, GUGiK 2019

Jest to nic innego jak obraz powierzchni terenu (gruntu). Dodatkowo jest jednak poszerzony o dane odwzorowujące obiekty zagospodarowania przestrzeni związane trwale z powierzchnią terenu, jak chociażby pokrywa roślinna, zabudowa czy infrastruktura techniczna. Tutaj ujawnia się zasadnicza różnica pomiędzy NMPT a charakteryzowanym wcześniej NMT, w przypadku którego odfiltrowywane są błędy pomiarowe, tak aby finalnie powstała wygładzona powierzchnia. Na bazie NMPT jest natomiast możliwe odwzorowanie obiektów o jednoznacznych krawędziach, np. budowli – obiektów inżynierskich. Model ten przyjmuje najczęściej formę siatki GRID, choć występuje również jako TIN. Jak stwierdza Borkowski (2014, s. 126):

> W przypadku NMPT, generowanego na podstawie danych ALS, trzeba się spodziewać większej niehomogeniczności w rozkładzie błędów dla poszczególnych klas pokrycia terenu niż w przypadku NMT. W obszarze objętym NMPT można wydzielić dwa podobszary. Jeden podobszar będzie stanowić powierzchnia terenu wolna od jakichkolwiek obiektów i roślinności. Na tych obszarach NMPT pokrywa się z NMT i również dokładność NMPT powinna być taka sama jak NMT; ewentualne różnice mogą wynikać tylko z różnych metod interpolacji. Na pozostałych obszarach, gdzie występują obiekty pokrycia terenu, można spodziewać się spadku dokładności NMPT w stosunku do NMT. Największe różnice pomiędzy rzeczywistą wysokością obiektu a wysokością w NMPT wystąpią na obiektach typu korony

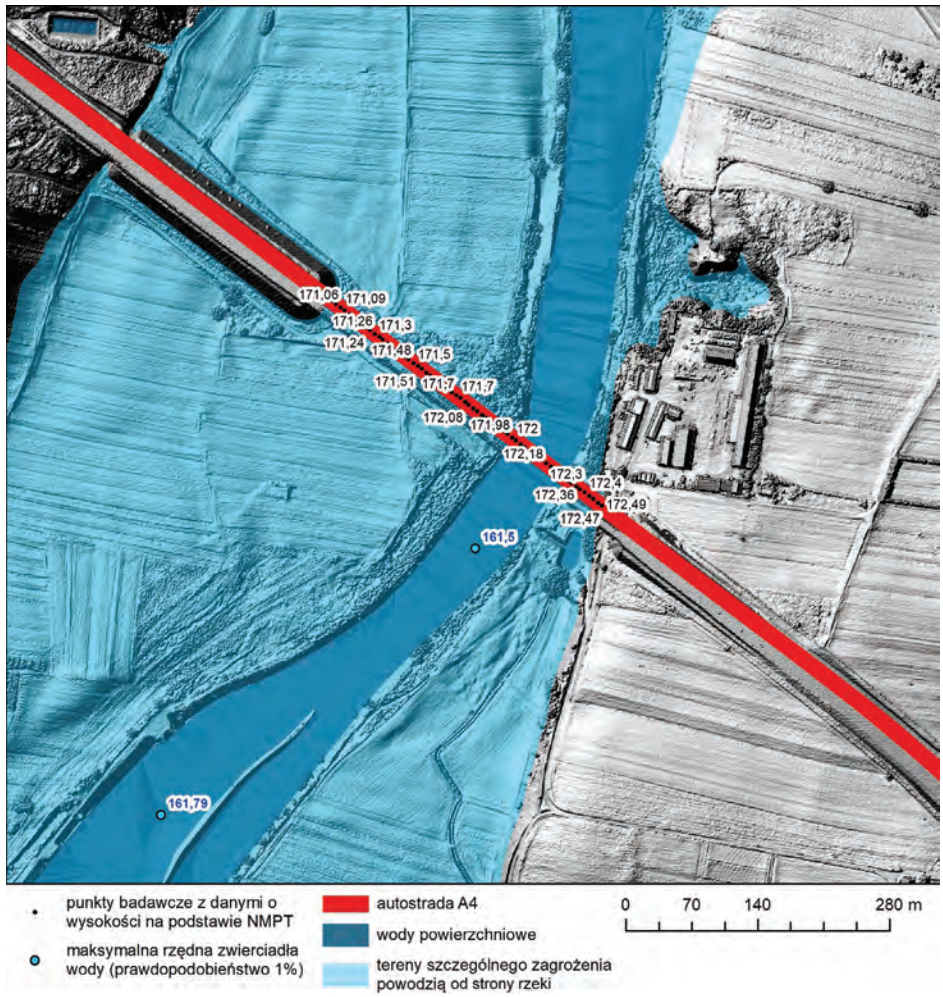
drzew czy krawędzie budynków. W NMPT krawędzie (ściany) budynków będą zerodowane i w tych miejscach błędy NMPT mogą dochodzić do kilku metrów, dlatego pozyskując z NMPT wysokości (zarówno terenu, jak i obiektów), należy punkty pomiarowe lokalizować z dala od krawędzi obiektu.

Postulat ten uwzględniono w przedstawionej poniżej procedurze. W pierwszej kolejności wzdłuż linii obrazującej obiekt inżynierski, biegnącej wzdłuż jego osi podłużnej, wygenerowano punkty badawcze usytuowane w odległości od siebie nie większej niż 1 m. Każdemu punktowi przypisano współrzędne geograficzne. Następnie rozpoczęto przeszukiwanie NMPT w formie tekstowej bazy danych obejmującej współrzędne punktów w regularnej siatce o długości krawędzi wynoszącej 0,5 metra dla obszarów miejskich (standard II) lub 1 metra dla pozostałych obszarów (standard I) oraz przypisaną im wysokość bezwzględną. Błąd średni wysokości nie przekracza 0,2 m. Przeszukiwanie opierało się na wskazaniu punktów z zasobu NMPT leżących najbliżej punktów badawczych na osi obiektu. W wyniku tego otrzymano dla każdego obiektu zestaw punktów oddalonych nie więcej niż 1 m od jego osi, wskazujących rzędną jego nawierzchni. Konieczne było również określenie maksymalnej rzędnej zwierciadła wody w poszczególnych scenariuszach powodziowych. Sięgnięto w tym zakresie do warstwy map zagrożenia powodziowego. Zawiera ona punkty, którym na bazie modelowania hydraulicznego przypisano wartości rzędnej zwierciadła wody dla każdego ze scenariuszy powodziowych. W wyniku zestawienia punktów obrazujących rzędne nawierzchni obiektu i rzędne wody możliwe było wskazanie, czy którykolwiek odcinek obiektu jest zagrożony zalaniem oraz jaka jest odległość lustra wody od nawierzchni (ryc. 4.5).

Jeśli którykolwiek z odcinków uległby zalaniu w którymś ze scenariuszy powodziowych, był on wyłączany z sieci w symulacjach dla tego właśnie scenariusza. W przypadku obiektów, które nie zostały odwzorowane w NMPT, tj. powstały później lub zostały przebudowane (zgodnie z dokumentacją pozyskaną od ich zarządców), przyjęto, że zostały zastosowane wytyczne przedstawione w podrozdziale 3.4 i są one odporne na powódź o prawdopodobieństwie 1%.

Oczywiste jest, że w ocenie wrażliwości obiektów inżynierskich na uszkodzenia istotnym zagadnieniem jest statyka ich konstrukcji. Generalnie rzecz ujmując, najbardziej wrażliwe na uszkodzenia są te przekroje obiektu oraz takie elementy konstrukcyjne, w których występują największe siły wewnętrzne – momenty zginające. Im obiekt jest większy, o bardziej rozbudowanej strukturze, skomplikowanych przekrojach i specyficznej technologii montażu, tym jego uszkodzenie czy zniszczenie może okazać się bardziej prawdopodobne (Marcinkowski 2006). Drogowe obiekty inżynierskie z uwagi na ich specyficzną konstrukcję dostosowywano każdorazowo do warunków miejscowych, stosując często niepowtarzalne rozwiązanie techniczne. Stanowi to dodatkowe utrudnienie dla przyjęcia jednej uniwersalnej metody ich badania. Ponadto zniszczenia drogowych obiektów

inżynierskich mogą mieć charakter całkowity, częściowy lub jedynie ograniczający sposób eksploatacji drogi. Zakres możliwych zniszczeń jest więc bardzo różnorodny (Marcinkowski 2009). Przyjęta metodyka weryfikacji odporności obiektów inżynierskich na zalanie nie uwzględnia cech ich konstrukcji w tak dokładnym zakresie, co zapewne stanowi jej ograniczenie (i wyzwanie do dalszych badań). Jest to jednak rozwiązanie, które w sposób względnie obiektywny umożliwia weryfikację bardzo rozległej bazy danych w aprobowanym czasie i przy dostępnym potencjale obliczeniowym.



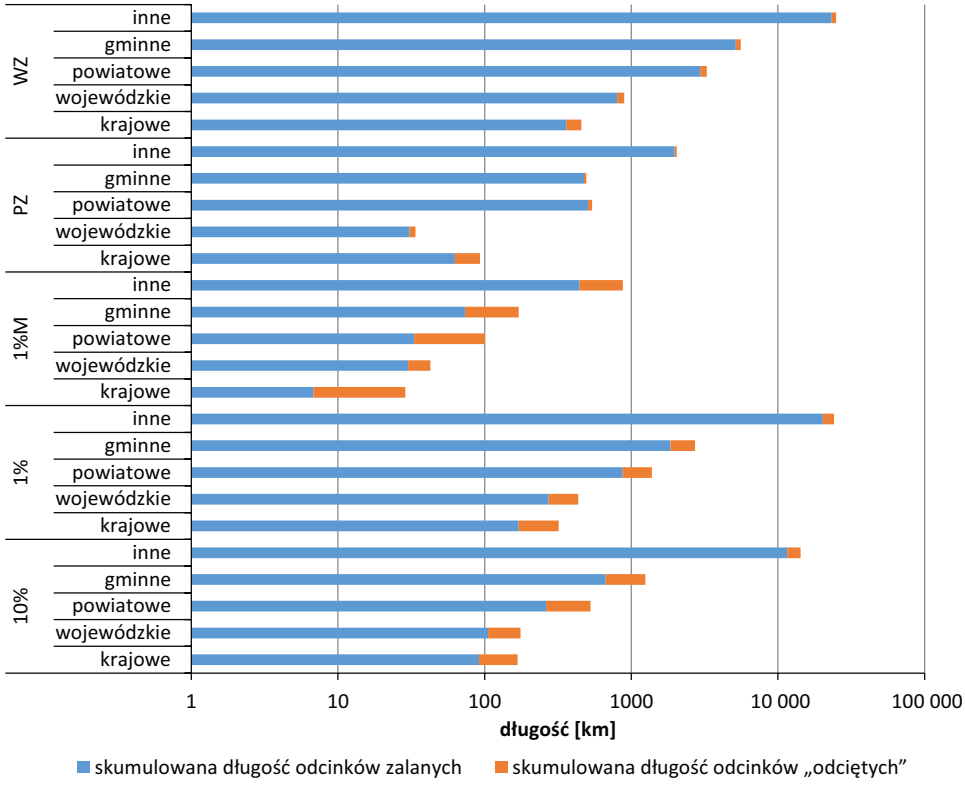
Ryc. 4.5. Przykład zestawienia danych NMPT i maksymalnej rzędnej zwierciadła wody (most na Odrze w ciągu autostrady A4) w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu, GUGiK 2019

4.3. Rozmieszczenie zagrożonych odcinków sieci drogowej

Zastosowanie metodyk przedstawionych w podrozdziałach 4.1 i 4.2 pozwoliło na identyfikację odcinków sieci drogowej w Polsce, które w wyniku wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu zostaną zalane lub „odcięte" od sieci w związku z zalaniem odcinków sąsiednich. W zakresie rozpatrywanych scenariuszy wystąpienia powodzi wyraźnie uwidacznia się prawidłowość dotycząca wzrostu skumulowanych długości zalanych odcinków towarzyszącego obniżaniu się ich kategorii. Jest to naturalnie odzwierciedlenie generalnej struktury sieci drogowej wg kategorii w kraju. Zachwianie uwidacznia się jedynie w przypadku powodzi związanej ze zniszczeniem budowli pasa technicznego, gdzie występuje przewaga długości zalanych odcinków dróg krajowych nad wojewódzkimi oraz powiatowych nad gminnymi. Najbliższa generalnej strukturze jest struktura długości zalanych odcinków w scenariuszu, zgodnie z którym dochodzi do zniszczenia wałów przeciwpowodziowych (odchylenia nie przekraczają dwóch punktów procentowych). Również w ujęciu bezwzględnym zdecydowanie najbardziej groźny dla sieci drogowej jest ten scenariusz.

W przypadku „odciętych" odcinków dróg odstępstwa od struktury, w której wzrasta udział dróg o niższych kategoriach, występują dodatkowo w razie powodzi o wysokim prawdopodobieństwie w związku ze zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych oraz średnim prawdopodobieństwie od strony morza (długość odcinków dróg krajowych przeważa nad wojewódzkimi). W przypadku zniszczenia budowli pasa technicznego dysproporcje znacznie się pogłębiły. Jest to też scenariusz, który wprowadza najdalej idące dysproporcje w stosunku do generalnej struktury długości dróg w kraju wg kategorii. O blisko 30 punktów procentowych spada w tym wariancie udział dróg należących do kategorii „inne" kosztem prawie 19-punktowego wzrostu udziału dróg krajowych i ponad 11-punktowego w przypadku dróg powiatowych. W ujęciu bezwzględnym wystąpienie powodzi o prawdopodobieństwie 1% od strony rzeki przyczynia się do „odcięcia" najdłuższej (w ujęciu skumulowanym) sieci drogowej. Jeśli zaś chodzi o relacje pomiędzy długością odcinków zalanych i „odciętych", to jedynie w przypadku powodzi o średnim prawdopodobieństwie od strony morza występuje przewaga tych drugich (107,44%). W pozostałych scenariuszach udział ten waha się od około 5% do około 30%. Przenosząc analizę na poziom poszczególnych kategorii dróg, przewaga długości odcinków „odciętych" występuje szczególnie wyraźnie w przypadku dróg krajowych (ponad trzykrotna przewaga) i powiatowych (ponad dwukrotna przewaga) w scenariuszu 1% M (ryc. 4.6).



Ryc. 4.6. Skumulowane długości zalanych i „odciętych” odcinków sieci drogowej wg kategorii i scenariusza powodziowego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Wprowadzenie do analizy zróżnicowania przestrzennego (tab. 4.1) pozwala na wskazanie, w którym z regionów wodnych wystąpienie powodzi o określonym prawdopodobieństwie będzie szczególnie dotkliwe w stosunku do sieci drogowej. Przy uwzględnieniu powodzi o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia należy zwrócić uwagę na region wodny Dolnej Wisły. Na tym obszarze wyłączonych z użytkowania (zalanych i „odciętych”) jest ponad 25% długości dróg krajowych, które ucierpią w Polsce w związku z tym wariantem powodzi. W przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% obszarami dużych utrudnień w transporcie drogowym mogą stać się także regiony wodne Środkowej Wisły i Odry oraz Warty. W ich przypadku struktura wyłączeń odcinków sieci wg kategorii w stosunku do całej zagrożonej sieci w Polsce jest bardziej zrównoważona. W podobny sposób sytuacja kształtuje się w scenariuszu wystąpienia powodzi od rzeki o średnim prawdopodobieństwie. Tutaj jednak region wodny

Środkowej Odry jest obszarem szczególnej intensywności zagrożeń dla sieci drogowej – i to dla odcinków reprezentujących każdą z kategorii dróg. W przypadku scenariuszy powodziowych związanych z oddziaływaniem morza zdecydowanie większe zagrożenie dla transportu drogowego występuje na obszarze dorzecza Wisły. Wyjątek stanowi jedynie kategoria dróg krajowych, które w związku z zalaniem sąsiednich odcinków sieci zostaną „odcięte" od sieci na obszarze regionu wodnego Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego. Zniszczenie wałów przeciwpowodziowych niesie za sobą największe zagrożenie dla sieci drogowej w regionach wodnych Dolnej Wisły i Górnej-Zachodniej Wisły. W przypadku dróg krajowych w pierwszym z nich zagrożona jest ponad 1/3 wszystkich odcinków mogących ulec zalaniu bądź „odcięciu" w tym scenariuszu.

Przeniesienie analizy na poziom gminny pozwoliło ustalić, jak dotkliwy wpływ na funkcjonowanie transportu drogowego na poziomie lokalnym może mieć wystąpienie powodzi w poszczególnych scenariuszach, oraz wskazać rozmieszczenie obszarów, gdzie cała sieć drogowa kraju jest szczególnie wrażliwa na tego typu zagrożenia. W przypadku wystąpienia powodzi o wysokim prawdopodobieństwie zalana może zostać nawet blisko 1/4 długości dróg w gminach nią objętych. Najbardziej zagrożone w tym wariancie są jednostki w województwie dolnośląskim (średnio 1,74% całkowitej długości sieci drogowej gmin, których sieć objęły wody powodziowe, jest zalane), podkarpackim (2,76%), małopolskim (2,88%) i mazowieckim (2,30%) (ryc. 4.7). Znaczące długości odcinków sieci drogowej narażone są na zalanie w dużych ośrodkach miejskich (m.in. Warszawa, Kraków, Poznań), jednak ze względu na dużą gęstość infrastruktury drogowej na tych obszarach zagrożone odcinki rzadko stanowią więcej niż 2% ogółu sieci. Przy średniej na poziomie 1,95% dla całej zbiorowości gmin, gdzie wystąpiło jakiekolwiek zalanie dróg, średnio odchyla się ona o 2,86 punktu procentowego.

Uwzględnienie scenariusza powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% (od strony rzeki) wskazuje generalnie na maksymalnie nawet ponad dwukrotny przyrost długości sieci zagrożonej zalaniem w przypadku poszczególnych gmin w stosunku do powodzi o wysokim prawdopodobieństwie. Kierunek ten jest dostrzegalny zarówno w ujęciu bezwzględnym, jak i wobec całej sieci na terenie jednostki. Szczególne przyrosty w tym zakresie dotyczą gmin w województwach dolnośląskim i opolskim (ryc. 4.8). Średni udział długości dróg zalanych w stosunku do całkowitej długości sieci drogowej w gminach, gdzie wystąpiło zalanie dróg, jest w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% o średnio 1,6 punktu procentowego wyższy niż w przypadku powodzi o prawdopodobieństwie 10%. Jego zmienność jest natomiast niemal dwukrotnie wyższa.

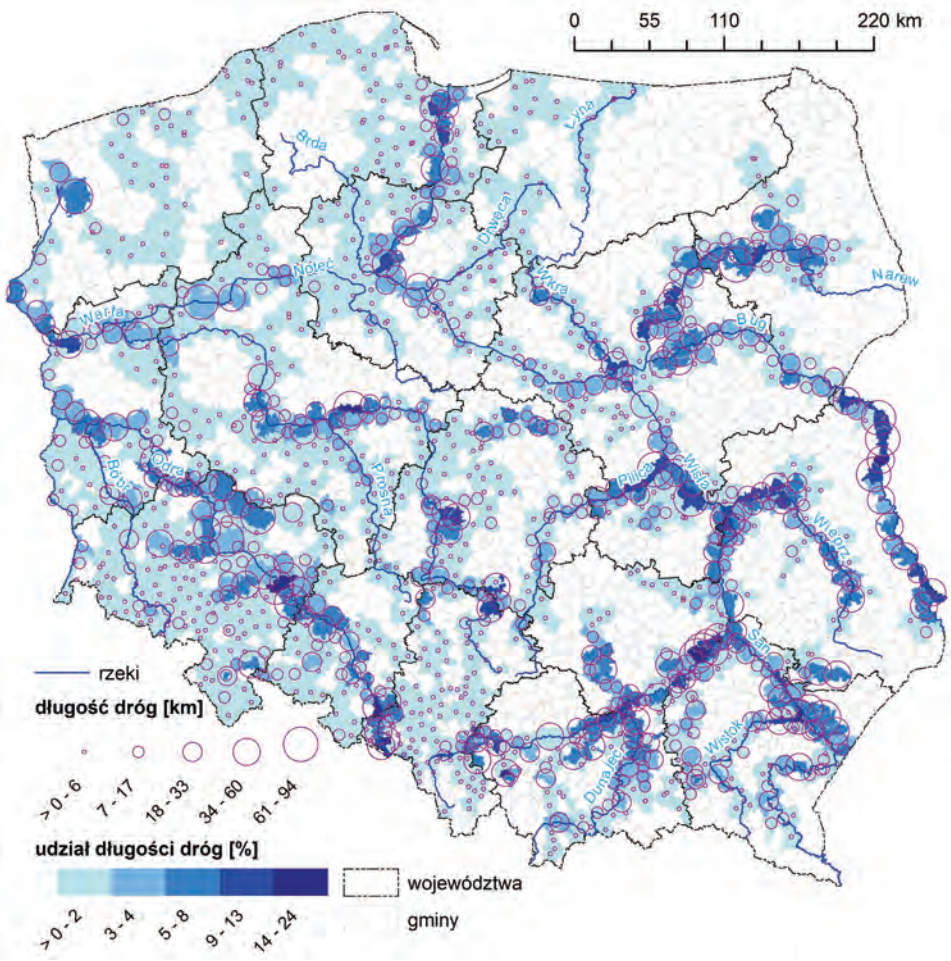
Tab. 4.1. Struktura udziałów zalanych i „odciętych" odcinków sieci drogowej wg kategorii, scenariusza powodziowego i położenia w Polsce w 2019 r. [%]

Region wodny	Odcinki	Scenariusz powodzi																								
		10%					1%					1%M					PZ					WZ				
		Kategoria drogi																								
		krajowa	wojewódzka	powiatowa	gminna	inna	krajowa	wojewódzka	powiatowa	gminna	inna	krajowa	wojewódzka	powiatowa	gminna	inna	krajowa	wojewódzka	powiatowa	gminna	inna	krajowa	wojewódzka	powiatowa	gminna	inna
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Bugu	zalane	2,30	2,15	5,19	8,58	9,91	1,55	2,51	4,26	6,33	8,66	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,10	0,13	1,08	0,92	2,28
	„odcięte"	1,42	3,35	6,21	3,07	2,03	1,29	1,66	2,66	2,00	0,91	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,24	0,03	0,38	0,38	0,71
Dolnej Wisły	zalane	9,67	6,94	1,67	3,41	4,55	6,12	3,83	1,59	3,88	3,45	9,08	54,31	21,40	28,43	28,56	67,16	84,33	90,36	93,07	84,67	30,32	15,59	23,52	20,14	15,78
	„odcięte"	16,54	1,84	1,44	6,00	0,95	10,09	1,20	0,79	3,31	0,79	12,88	19,81	53,78	38,67	33,94	32,17	6,94	5,63	3,59	2,71	6,86	0,22	1,96	1,16	0,52
Górnej-Wschodniej Wisły	zalane	4,44	2,84	7,46	4,72	8,48	8,89	5,34	12,48	8,86	11,77	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,95	4,93	3,84	4,74	5,85
	„odcięte"	0,21	1,23	1,85	0,81	0,96	3,53	5,60	5,35	3,01	2,17	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,37	1,29	0,65	0,49	0,31
Górnej-Zachodniej Wisły	zalane	8,47	10,60	8,97	9,49	10,45	8,42	8,29	7,61	8,86	8,47	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,34	22,64	26,92	28,48	22,24
	„odcięte"	0,32	0,83	1,79	1,25	0,39	0,50	0,85	0,50	0,51	0,20	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,81	3,07	2,16	1,49	1,32
Małej Wisły	zalane	0,63	0,33	0,53	0,28	0,62	1,49	0,55	0,99	1,40	0,84	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,04	0,27	1,03	1,89	1,51
	„odcięte"	0,39	0,47	0,00	0,03	0,01	3,39	0,45	0,23	0,34	0,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,00	0,69	0,30	0,28	0,09
Narwi	zalane	1,24	0,52	0,64	1,45	4,99	0,92	0,49	1,97	3,17	5,28	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,28	0,00	0,17	0,28	0,27
	„odcięte"	0,50	0,00	0,60	0,77	1,04	0,79	0,24	2,56	0,91	0,89	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,04	0,00	0,01	0,02	0,00
Środkowej Wisły	zalane	11,09	12,72	6,25	7,61	12,03	7,81	10,67	8,11	9,99	11,94	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,23	22,09	14,18	16,85	16,78
	„odcięte"	3,60	5,71	3,23	2,63	2,45	7,03	5,54	3,90	3,27	2,18	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,34	1,75	0,86	0,86	0,68
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	zalane	0,87	3,75	0,63	0,41	1,89	0,58	3,05	0,73	0,40	1,44	14,50	16,16	11,53	14,75	22,07	0,29	6,79	3,91	3,28	12,08	0,00	1,42	0,27	0,03	0,92
	„odcięte"	1,50	5,43	1,53	0,70	0,55	0,79	2,27	0,74	0,36	0,31	63,53	9,72	13,30	18,15	15,43	0,38	1,93	0,10	0,05	0,55	0,00	0,59	0,00	0,00	0,13
Górnej Odry	zalane	1,92	4,08	2,73	2,92	2,94	3,99	7,36	4,20	4,97	4,28	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,52	3,18	1,16	1,81	1,70
	„odcięte"	1,01	5,40	3,13	3,95	0,99	1,70	2,11	1,53	1,94	0,61	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,53	0,08	0,15	0,07	0,04

Tab. 4.1 (cd.)

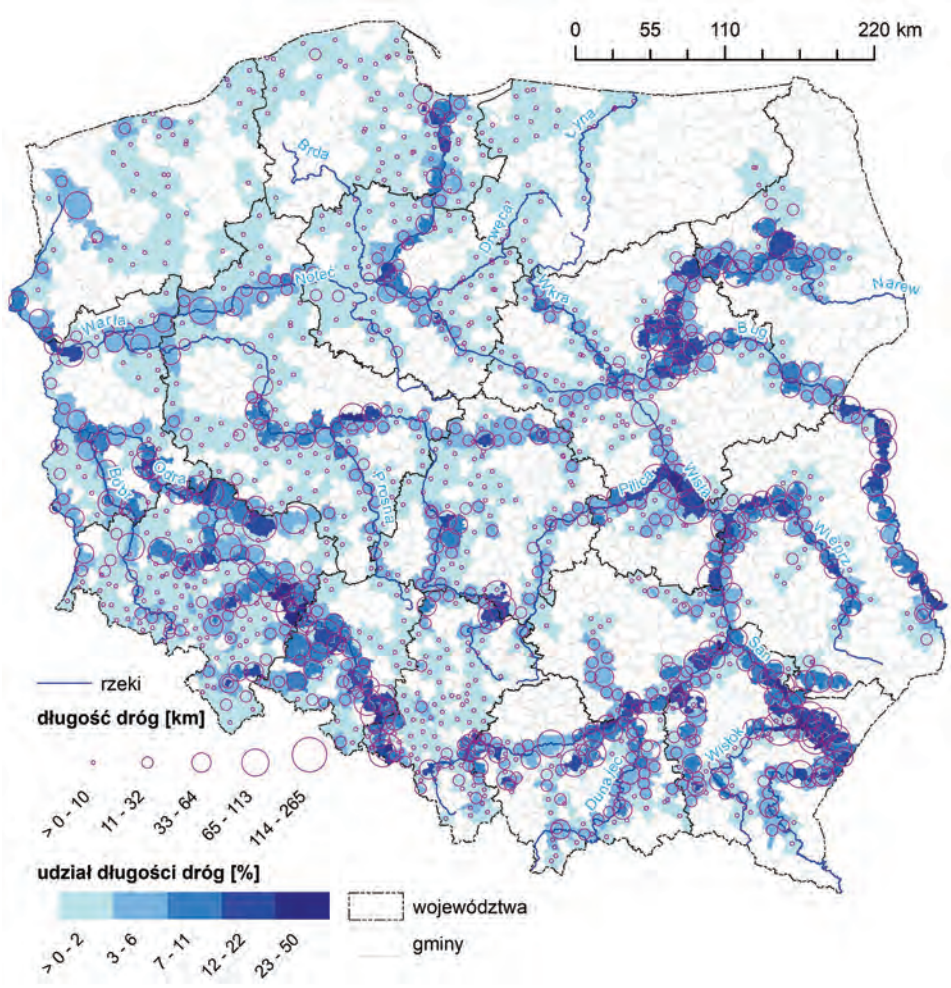
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Noteci	zalane	0,30	1,39	0,32	0,19	1,67	0,18	0,89	0,21	0,28	1,87	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,00	0,01	0,30	0,12	0,91
	„odcięte”	1,03	3,65	6,00	3,82	2,78	0,54	2,38	2,43	2,04	1,72	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,00	0,01	0,33	0,03	0,16
Środkowej Odry	zalane	6,94	11,66	11,71	8,52	14,05	9,50	18,10	18,04	13,49	17,45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6,81	17,64	10,06	9,79	16,09
	„odcięte”	11,34	7,81	13,41	10,00	3,73	11,25	6,37	9,01	6,23	3,05	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2,16	3,06	1,58	1,14	2,01
Warty	zalane	6,49	3,18	3,61	6,17	9,48	3,73	1,78	2,92	6,28	8,48	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,86	1,05	7,53	7,44	8,89
	„odcięte”	7,38	3,97	11,01	13,04	3,04	5,68	8,41	7,13	8,03	3,13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,21	0,26	1,56	1,59	0,78
Łyny i Węgorapy	zalane	0,10	0,04	0,10	0,05	0,01	0,06	0,02	0,07	0,05	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	„odcięte”	0,32	0,11	0,02	0,16	0,01	0,17	0,04	0,00	0,07	0,01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT.



Ryc. 4.7. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r.

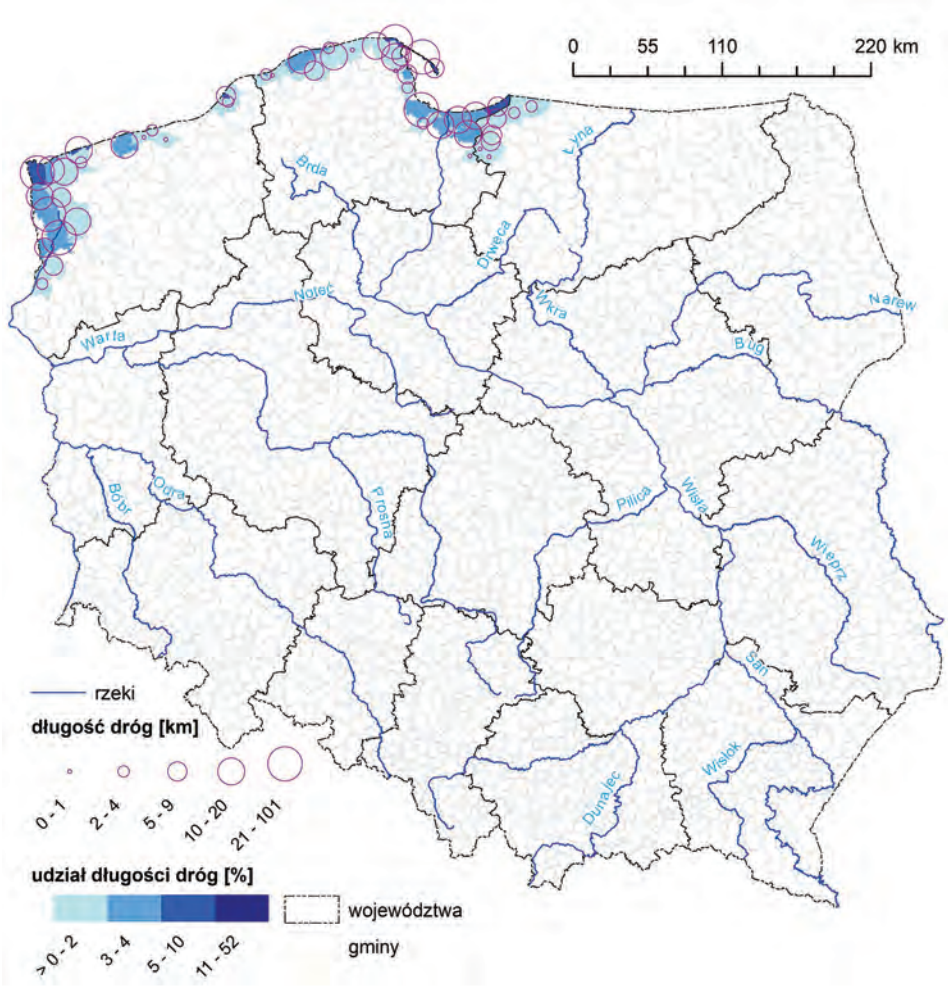
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT



Ryc. 4.8. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

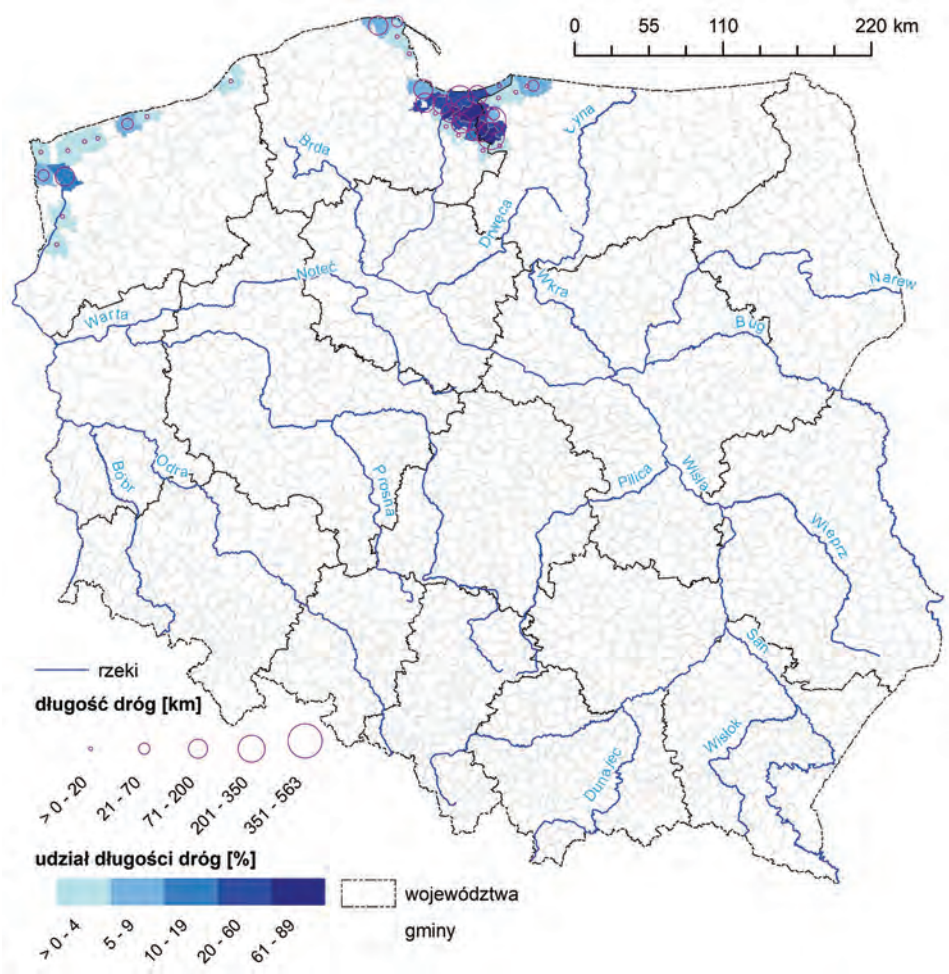
Wystąpienie powodzi o średnim prawdopodobieństwie, ale od strony morza, skutkować może zalaniem znacznie mniejszej długości sieci drogowej, która w większości dotkniętych tym zjawiskiem gmin nie przekracza 10% całości ich zasobu. Wyjątek stanowią pod tym względem gminy położone na Półwyspie Helskim, których nawet połowa sieci drogowej może ucierpieć w tym wariancie powodzi (ryc. 4.9).



Ryc. 4.9. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Wyraźnie gorzej kształtuje się sytuacja, kiedy całkowitemu zniszczeniu ulegnie budowla ochronna pasa technicznego. Wówczas sieci drogowe w obrębie gmin położonych na obszarze Żuław Wiślanych mogą zostać zalane nawet w blisko 90%. Jest to jednak scenariusz, w którym tak daleko idące wyłączenia sieci koncentrują się na najmniej licznej grupie gmin (ryc. 4.10).

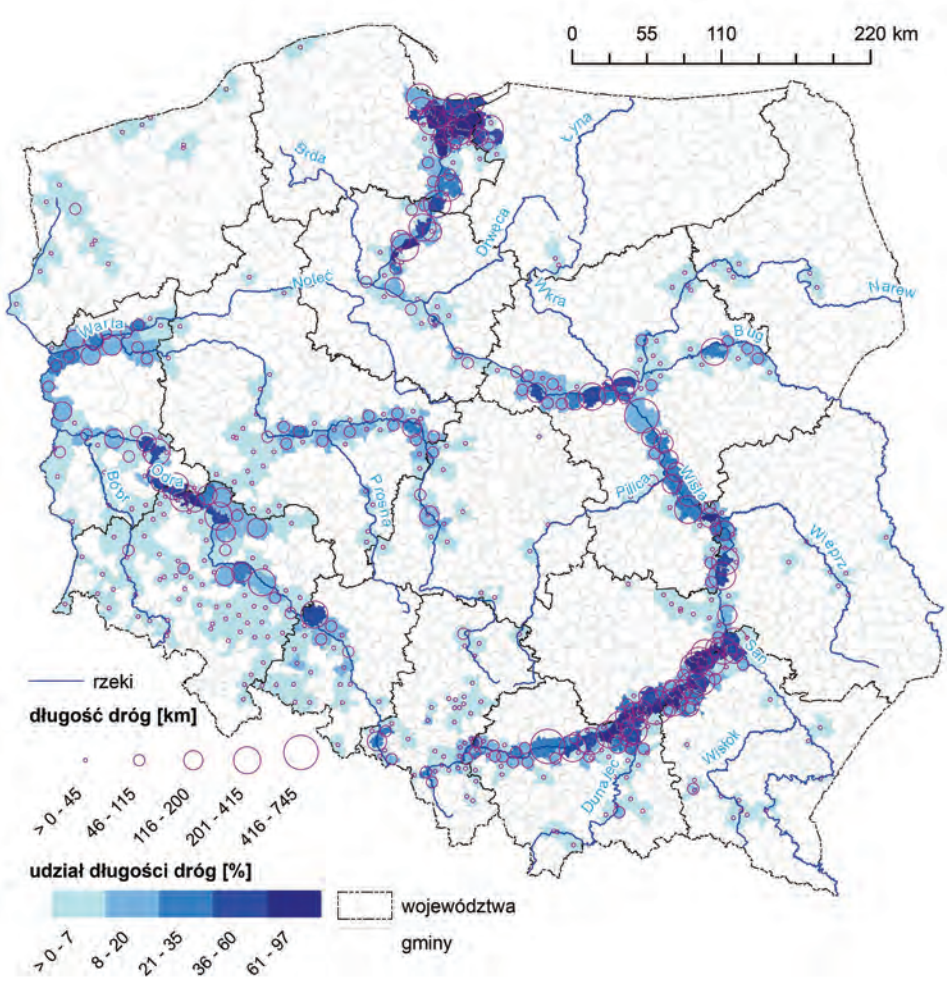


Ryc. 4.10. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

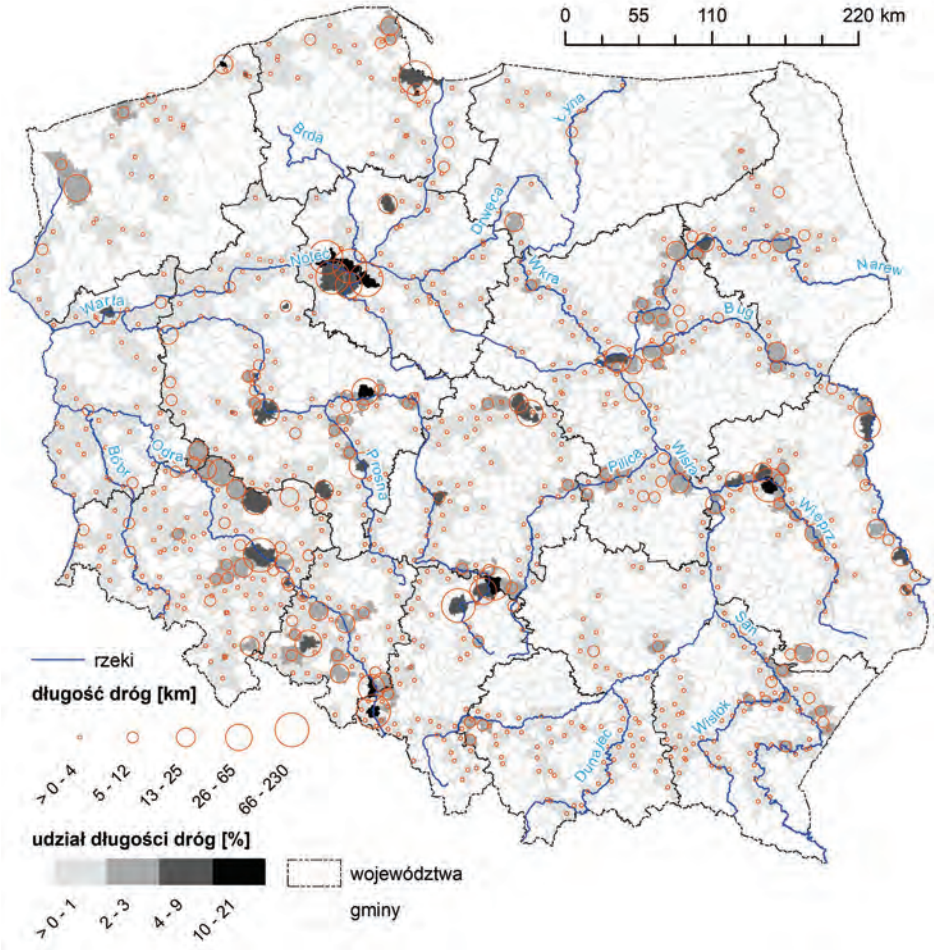
Największe jednak zagrożenie niesie za sobą całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych. W tym scenariuszu występują gminy, których sieć drogowa niemal w całości zostanie zalana (ponownie jest to obszar równiny deltowej Wisły). Nie aż tak niebezpieczna, ale nadal alarmująca sytuacja ma miejsce przede wszystkim w województwie warmińsko-mazurskim, świętokrzyskim, podkarpackim i małopolskim (średnia wśród gmin tych regionów nie spada poniżej 20%) – generalnie wyraźnie gorzej sytuacja kształtuje się w gminach na obszarze

dorzecza Wisły (ryc. 4.11). Średnio na tym obszarze zalaniu ulega 17,79% sieci drogowej gminy (wśród gmin, w których wystąpiło jakiekolwiek zalanie sieci). W przypadku obszaru dorzecza Odry średnia ta jest aż o 10,97 punktu procentowego niższa i znacznie też mniejsze jest w tym przypadku odchylenie standardowe – 10,95% (przy 23,43% na obszarze dorzecza Wisły).



Ryc. 4.11. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

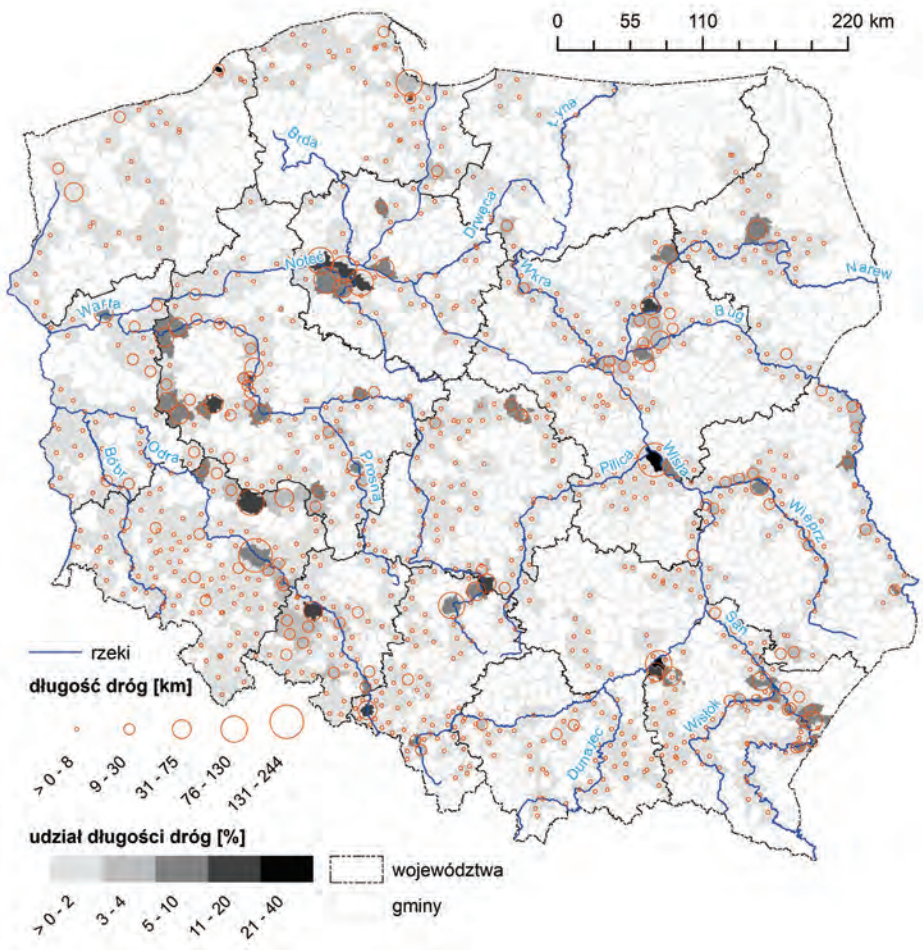


Ryc. 4.12. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

W przypadku 855 gmin występuje sytuacja, w której zalanie sieci drogowej przez powódź o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia powoduje „odcięcie" części niezalanych odcinków na ich obszarze. Średnio odsetek skumulowanej długości odcinków „odciętych" w stosunku do ogólnej długości sieci w gminie wynosi 0,74%. Jest on jednak przy tak nieznacznym udziale dość zróżnicowany (odchylenie standardowe wynosi 1,88 punktu procentowego). Wyraźnie najbardziej zagrożone tego rodzaju zjawiskiem są gminy Darłowo, Nakło nad Notecią oraz Gidle. W ich przypadku opisywany udział przekracza 15%. W ujęciu regionalnym szczególnie zagrożone jest w tym scenariuszu województwo lubelskie,

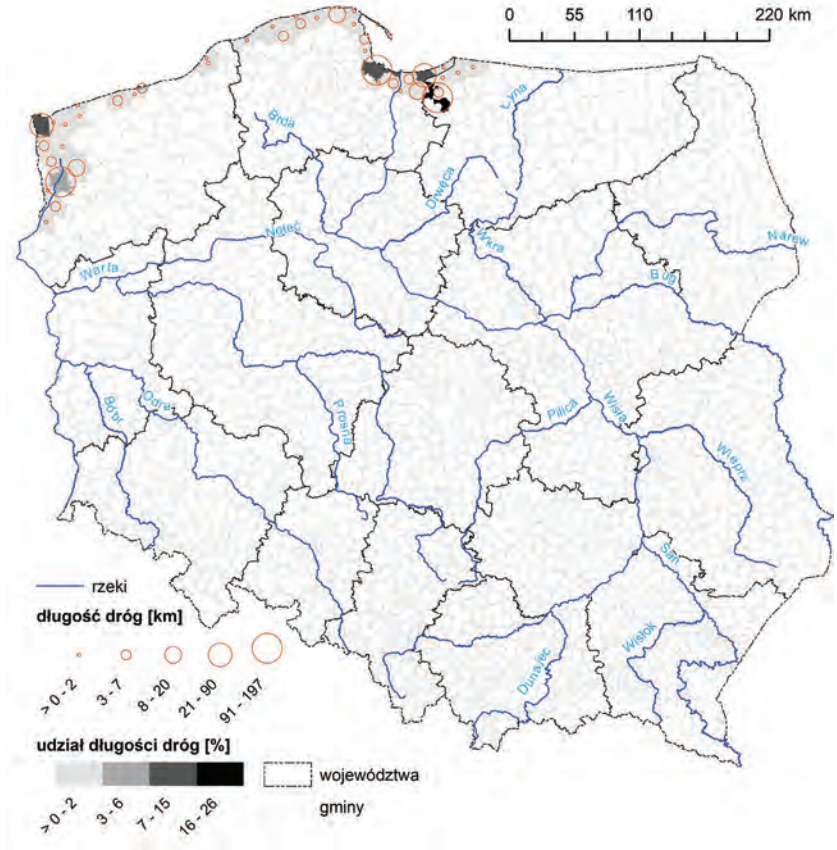
gdzie średnia udziału w gminie objętej tego typu wyłączeniami odcinków sieci drogowej wynosi 4,50% (dotyczy 63 gmin). Najliczniejsza grupa jednostek, w których wystąpiło „odcięcie" infrastruktury drogowej, występuje w województwie mazowieckim (101 gmin), jednak zjawisko to jest w tym regionie mniej dotkliwe i średnio dotyczy 2,90% całej sieci w gminie. Dla całej zbiorowości dostrzegalna jest ponadto słaba zależność pomiędzy występującą na terenie gminy skumulowaną długością dróg zalanych a skumulowaną długością dróg odciętych (współczynnik korelacji Pearsona wynosi 0,22) (ryc. 4.12).



Ryc. 4.13. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

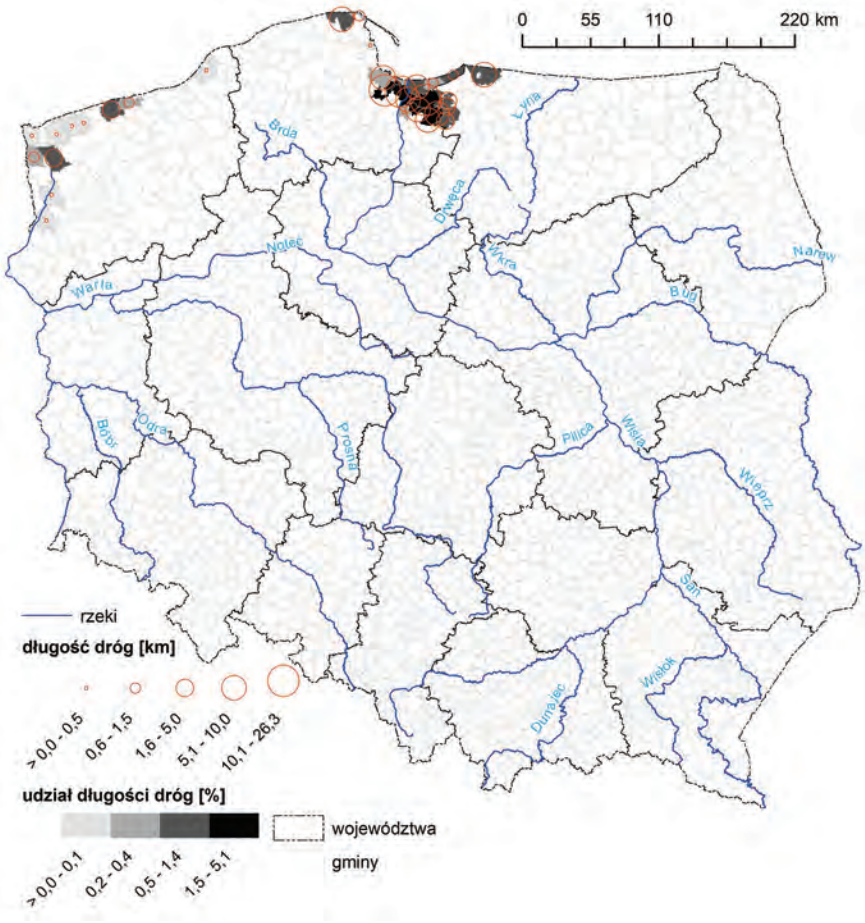
Wystąpienie powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od rzeki) zwiększa o 65 w stosunku do powodzi o dużym prawdopodobieństwie liczbę gmin, na terenie których może dojść do „odcięcia" odcinków sieci drogowej. Wzrasta też średni udział ich długości – do 1,05% – przy odchyleniu standardowym na poziomie 2,78 punktu procentowego. W tym wariancie powodzi występują jednostki (gminy Magnuszew, Borowa, Darłowo), gdzie tenże udział przekracza 20% ogółu sieci drogowej w gminie. Sytuacja gmin województwa podkarpackiego (76 jednostek) czyni ten region najbardziej zagrożonym. Niemniej jednak średnia (2,09%) jest tu wyraźnie niższa niż w przypadku najbardziej zagrożonego regionu pod względem powodzi o prawdopodobieństwie 10%. Najliczniej natomiast reprezentowane jest w tym ujęciu województwo dolnośląskie – 107 gmin, przy średniej wynoszącej 0,82%. Zależność od intensywności zalanej sieci jest w tym scenariuszu powodzi wyraźniejsza (0,39), choć nadal słaba.



Ryc. 4.14. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

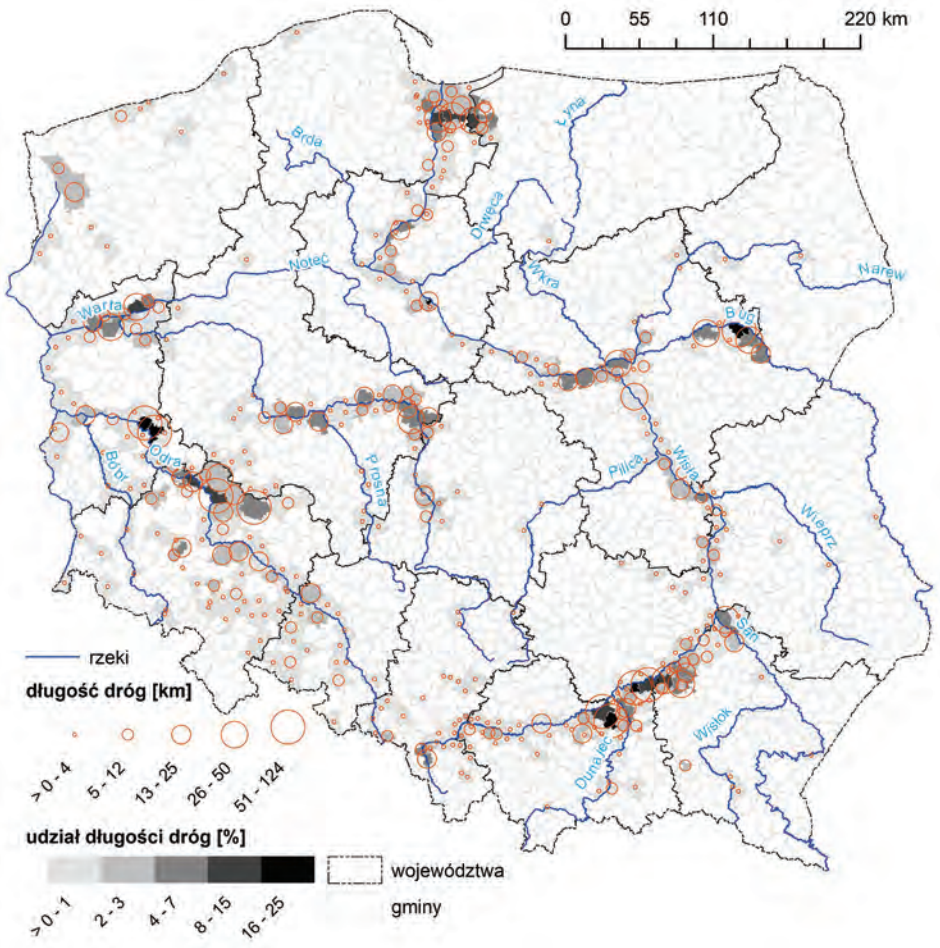
Przy powodzi od strony morza o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% sytuacja „odcięcia" części sieci drogowej dotyczy 44 gmin (ryc. 4.14). W przypadku Elbląga jest to ponad 1/4 całkowitej długości infrastruktury drogowej. Sztutowo i Świnoujście mogą natomiast zmagać się z sytuacją, kiedy pomimo braku zalania ponad 12% długości ich sieci zostanie pozbawione możliwości użytkowania. Niemniej większość sieci drogowych w gminach (35) w tym scenariuszu wystąpienia powodzi zostanie dotknięta analizowanym zjawiskiem w nie mniej niż 1%. Niezauważalna jest też jakakolwiek relacja względem skumulowanych długości potencjalnie zalanych odcinków sieci drogowej.



Ryc. 4.15. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Niosący najmniejsze negatywne skutki w zakresie wyłączeń odcinków sieci drogowej na skutek ich zalania jest scenariusz powodzi związany ze zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego. W tym wariancie występuje jedynie 30 gmin, w grupie których najwyższe, ale jedynie nieco ponad 5-procentowe wyłączenie w skali całej gminy, dotyczy Cedrów Wielkich. Średnia dla całej zbiorowości to tylko 1,07% (ryc. 4.15).



Ryc. 4.16. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z map zagrożenia i ryzyka powodziowego, PGWWP 2019 oraz BDOT

Ostatni z rozpatrywanych scenariuszy – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych – zdaje się najbardziej nawiązywać do sytuacji związanej z analizą odcinków zalanych w zakresie ich skumulowanej długości w poszczególnych gminach (współczynnik korelacji Pearsona wynosi 0,46). W analizowanym tutaj wariancie „odcięcie" części sieci drogowej gminy dotknie 402 jednostki i średnio stanowić będzie 1,35% ogółu tego rodzaju infrastruktury technicznej. Średnia ta wzrasta do ponad 2% w przypadku gmin województwa warmińsko-mazurskiego, ale oparta jest tylko na sześciu jednostkach. Za to w województwie dolnośląskim uwzględnić należy w tym zakresie aż 56 gmin, przy czym tutaj średni udział osiąga jedynie 1,13% (ryc. 4.16).

W ujęciu bezwzględnym w wyniku „odcięcia" części sieci drogowej przez wody powodziowe najbardziej ucierpią województwa mazowieckie, małopolskie oraz dolnośląskie.

5

MIERNIKI WRAŻLIWOŚCI OSOBOWEGO TRANSPORTU DROGOWEGO NA WYSTĄPIENIE POWODZI

Po zidentyfikowaniu odcinków sieci drogowej, które są zagrożone zalaniem oraz „odcięciem" od sieci na skutek wyłączenia z użytkowania sąsiednich jej fragmentów w poszczególnych uwzględnianych w badaniu scenariuszach wystąpienia powodzi, konieczne było przeanalizowanie, jak dalece brak możliwości ich wykorzystywania może wpływać na funkcjonowanie systemu transportu drogowego. Analizę tę przeprowadzono, badając skalę i zróżnicowanie przestrzenne zmian dostępności transportowej oraz zmian obciążenia sieci drogowej powstałych na skutek wystąpienia powodzi w poszczególnych scenariuszach, uwzględniających prawdopodobieństwo wystąpienia lub typ zniszczenia, wskutek którego powstała, oraz jej zakres przestrzenny. Całość poprzedzono przeglądem badań z zakresu budowy modeli prędkości ruchu oraz zaprezentowano założenia modelu stanowiącego podstawę dla badań nad dostępnością i obciążeniem sieci.

Należy mieć świadomość, że oddziaływanie sytuacji kryzysowej takiego rodzaju jak powódź w zakresie transportu nie ogranicza się jedynie do ingerencji w sieć i towarzyszących temu modyfikacji ścieżek przejazdu. Zmianom ulegają chociażby również zachowania kierujących (Drobot i in. 2007, Ruin i in. 2017, Aerts i in. 2018, Hamilton i in. 2018). W zależności od cech osobniczych i charakteru zagrożenia (np. dynamiki) mogą oni świadomie lub nieświadomie zmieniać technikę jazdy, ale również przesunąć w czasie swoją podróż, zmodyfikować jej cel, wybrać inny środek transportu czy wreszcie całkowicie zrezygnować z podróży. Zagadnienia te są niezwykle istotne i rozległe. Ich uwzględnienie stanowiłoby zapewne problem badawczy dla osobnego projektu badawczego.

5.1. Modelowanie prędkości ruchu

5.1.1. Wprowadzenie i przegląd badań

Od czasów Galtona, który – jak się przyjmuje – jako pierwszy zastosował mapy izochronowe przedstawiające izochrony dobowe (Galton 1881), poprzez późniejsze prace m.in. Schjerninga z 1903 r., Hassingera z 1910 r., Eckerta z 1925 r., Rewieńskiej z 1929 r., Wąsowicza z 1934 r. opierające się na tworzeniu

analogowych, ręcznie wykreślanych izochron na mapach (Bielecka i Bober 2013, Śleszyński 2014), po tworzone od schyłku XX w. opracowania wykorzystujące narzędzia komputerowe – bardzo ważnym aspektem jest pomiar odległości czasowej, będący pochodną prędkości używanego środka transportu. O ile przy założeniu, że do przemieszczeń wykorzystywane są regularne połączenia (np. lotnicze, kolejowe, autobusowe), badacz może posiłkować się ustalonymi rozkładami obrazującymi zarówno czas przewozu, jak i częstotliwość kursów (Warakomska 1993), o tyle przy badaniu dostępności indywidualnej (m.in. samochodowej), a więc z użyciem środków transportu, których wykorzystanie ma bardziej spontaniczny charakter, przy jednoczesnym zróżnicowaniu użytkowanych pojazdów (m.in. ich prędkości, przyspieszenia, możliwości sprawnego pokonywania wzniesień), zachowań kierowców (ich indywidualnych cech psychofizycznych) oraz przestrzeni, w jakiej zachodzi proces transportu (zmienności zarówno organizacyjnej, np. ograniczeń prędkości, jak i infrastrukturalnej, np. jakość, przepustowość sieci, oraz związanej ze sposobem zagospodarowania terenu w rejonie przebiegu dróg) – pozostaje mu przyjmować prędkości kodeksowe lub korzystać z możliwie jak najwierniejszych modeli prędkości ruchu.

Konieczne staje się dokonywanie różnego rodzaju uproszczeń umożliwiających tworzenie mniej lub bardziej arbitralnych modeli prędkości ze względu na wskazaną różnorodność elementów rzutujących na prędkość poruszania się. Można zaobserwować zależność stopnia skomplikowania modeli od rozległości przestrzennej obszaru, który obejmują. Bardziej obszerne przestrzennie podejście skutkuje zazwyczaj większą prostotą rozwiązań i tym samym spadkiem ich dokładności. Przyjęcie określonych wartości poruszania się dla różnych kategorii dróg to jedno z najprostszych podejść. W czasach, kiedy problemy z zatłoczeniem na drogach należały do rzadkości, takie podejście było powszechne (Śleszyński 2014). Część modeli prędkości opiera się w istocie na dopuszczalnych prędkościach kodeksowych (Kowalski i Wiśniewski 2017) i założeniu, wedle którego stopień swobody ruchu jest nieograniczony. Z uwagi na rozwój motoryzacji i coraz częściej występujące kongestie modele te uznaje się obecnie za mało dokładne. Skutkuje to ujmowaniem w nich czynników wpływających na poziom redukcji kodeksowej prędkości, m.in. kategorię funkcjonalną drogi i natężenie ruchu (Gaca i in. 2008). Wprowadzenie informacji dotyczących użytkowania terenu przez innych autorów (Hunt i in. 2005) pozwala uzyskiwać lepsze szacunki odnośnie do stopnia swobody ruchu (natężenia i występowania ewentualnych zjazdów) (Borowska-Stefańska i in. 2020a).

W badaniach nad prędkością ruchu samochodowego stosuje się wiele różnych narzędzi. Należą do nich badania bezpośrednie, polegające bądź to na stacjonarnym pomiarze prędkości pojazdów na wybranych kordonach (Dąbrowska-Loranc i in. 2015), bądź to wykonaniu przez badacza przejazdu określonej drogi i dokonaniu w jego trakcie pomiaru wedle ustalonych zasad w celu zmierzenia

czasu przejazdu (Bartosiewicz i Pielesiak 2012). Pierwsze z nich stosuje się na ogół w celach pomiaru poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego, stąd wybór punktów pomiarowych oraz ich niewystarczająca reprezentatywność dla badań sieciowych nie znajduje zastosowania w analizach dostępności. Druga z zaprezentowanych metod pozwala na poznanie dostępności czasowej miejsc jedynie przy założeniu podążania drogą, wzdłuż której prowadzono badania z racji na brak informacji dotyczących tych elementów sieci, wzdłuż których badanie nie zostało przeprowadzone.

Inną grupą badań związanych z pomiarem prędkości poruszających się pojazdów są analizy oparte na bardzo obszernych pulach danych rejestrujących położenie pojazdów w sieci transportowej. Należą do nich zasoby pozyskiwane przez organizatorów ruchu drogowego (na ogół wykorzystywane w inteligentnych systemach transportowych i gromadzone w ramach obszarowych systemów organizacji ruchu oraz w celach informacyjnych, dla wyświetlania informacji kierowcom w formie m.in. tablic i znaków zmiennej treści), które w oparciu o pomiary na kordonach (na ogół z wykorzystaniem technologii Automatycznego Systemu Rozpoznawania Numerów Rejestracyjnych) zidentyfikowanych pojazdów umożliwiają, przy odpowiedniej agregacji danych, określenie czasu przejazdu pojazdu (Kim i in. 2005, Borowska-Stefańska i in. 2019c). Wspomniane dane i analizy na nich bazujące także obarczone są brakiem informacji o czasach przejazdu na tych odcinkach sieci, które nie zostały objęte monitoringiem.

Innym sposobem pozyskiwania empirycznych wyników dotyczących prędkości poruszania się pojazdów w sieci transportowej są analizy oparte na informacjach z opomiarowanych pojazdów, na ogół taksówek (Liu i in. 2009, Deng i in. 2015). W tym przypadku istnieje możliwość analizy prędkości przemieszczania się na rozleglejszej sieci, lecz jej wyniki są obarczone między innymi dość mocno zawężonym profilem kierowcy zawodowego. Kolejne sposoby kolekcjonowania danych dotyczących prędkości pojazdów związane są z opomiarowaniem nie tyle pojazdów i sieci transportowej, co ich pojedynczych użytkowników. Wykorzystuje się w tym celu informacje *big data* gromadzone przez operatorów sieci telefonii komórkowej (Caceres i in. 2008, Gadziński 2018). Jak wskazuje Rose (2006), chociaż telefony komórkowe wydają się oferować atrakcyjne perspektywy jako sondy do pomiarów ruchu, nadal istnieje wiele problemów, które trzeba rozwiązać. Należą do nich aspekty wpływające na dokładność i wiarygodność danych (w tym m.in. problemy z zawodzącą techniką, które określają jakość surowych danych) oraz wielkość i reprezentatywność próby, a także bezpieczeństwo i prywatność. Innym źródłem o charakterze *big data* są dane globalnych koncernów dostarczających narzędzia nawigacyjne oraz rozwiązania służące do śledzenia lokalizacji. Dane te pozwalają szacować czasy przejazdu na niespotykaną skalę. Pochodzą one z lokalizatorów GPS użytkowanych przez kierowców podczas korzystania z nawigacji, a także posiadaczy urządzeń typu smartfon. Bywają

wykorzystywane w badaniach dostępności (Wiśniewski 2016, Cui i Levinson 2018, Borowska-Stefańska i in. 2019c), jednak posiadają pewne ograniczenia, szczególnie związane z brakiem pełnej informacji o algorytmie wyznaczającym czasy przejazdu.

Wyżej zaprezentowane podejścia, mające charakter empirycznych pomiarów, są niezwykle cenne w analizach. Jednakże każde z nich, ze względu na możliwość braku reprezentatywności profilu psychofizycznego kierowcy, rodzajów dróg oraz dezaktualizację danych w obliczu zmian w zakresie infrastruktury transportowej, obarczone jest znacznym poziomem niepewności. Stąd też w celu zobrazowania jak największej liczby możliwych relacji z wykorzystaniem bardzo szczegółowej sieci konieczne jest posiłkowanie się teoretycznymi modelami prędkości ruchu. Warto jednak zwrócić uwagę, iż wspomniane teoretyczne modele bywają kalibrowane w oparciu o empiryczne, w tym wyżej zaprezentowane, sposoby badań.

Najprostszym z modeli prędkości ruchu pojazdów jest ten, który w zasadzie nie jest oparty na teorii, ale na zasadach regulowanych w kodeksie drogowym. Polega on na przypisywaniu poszczególnym odcinkom sieci drogowej prędkości wynikających z kodeksu lub innych ustalonych arbitralnie dla poszczególnych typów odcinków. Takie modele ruchu były najczęściej wykorzystywane w przeszłości (z uwagi na niewielki problem związany z zatłoczeniem na drogach) (Rowicki 1934), a przez wzgląd na prostotę ich konstrukcji wykorzystuje się je po dziś dzień (Rosik i in. 2020, Wiśniewski 2015). Poza pracami o naturze stricte geograficznej (opartymi na rzeczywistych topologiach sieci) Chalfen i Kamińska (2013) zbudowali na potrzeby rozważań nad wykorzystaniem algorytmu najkrótszej ścieżki z pojedynczego źródła w grafie hipotetyczną sieć transportową w mieście, arbitralnie wskazując, iż w ścisłym centrum miasta prędkość rzeczywista wynosi 10 km/h, w strefie pośredniej pomiędzy ścisłym centrum a peryferiami – 30 km/h, zaś na peryferiach 50 km/h. Współcześnie podstawowym problemem takich arbitralnych modeli jest głównie brak uwzględnienia kluczowego dla osiąganych prędkości eksploatacyjnych (szczególnie na zatłoczonych odcinkach dróg) elementu, jakim jest poziom swobody ruchu (PSR). Właśnie ten element wespół z postępem technicznym, związanym z rozwojem zarówno środków transportu, jak i budownictwa drogowego, sprawił, iż prędkości przyjmowane w badaniach nad dostępnością samochodową podlegają zmianom w czasie. Zmiany te zależą od klas dróg. W szwajcarskich modelach prędkości obserwuje się zmiany (w latach 1950–2000) w przeciętnych prędkościach, które dotyczą zwiększenia prędkości ruchu na większości dróg poza obszarem zabudowanym (Fröhlich i Axhausen 2002). Dlatego też próby uwzględnienia czynnika związanego z natężeniem ruchu w polskich badaniach z zakresu geografii transportu podejmowano między innymi w ośrodkach warszawskim, krakowskim i łódzkim. W badaniach krakowskich przyjęto stopniową redukcję prędkości (o 5 km/h) w zależności

od obserwowanego natężenia ruchu, krętości i jakości nawierzchni drogi, a także zastosowano dodanie do tak obliczonego czasu przejazdu pauz wynikających z przejazdów przez węzły drogowe (różniące się w zależności od rodzaju węzła), centra miast (różne w zależności od wielkości miasta). Jako prędkość wejściową (przy najwyższym stopniu swobody ruchu) przyjęto arbitralnie prędkości ustalone na poszczególnych typach odcinków (Guzik 2011).

W ośrodku łódzkim badano dostępność, bazując na różnych modelach prędkości. Model Bartosiewicza i Pielesiak (2012) dotyczył wybranych siedmiu dróg. Zbudowali oni model teoretycznego czasu przejazdu tymi drogami w oparciu o maksymalną dopuszczalną prędkość, dodając do w ten sposób obliczonego czasu przejazdu 30 sekund dla każdej sygnalizacji świetlnej. Model ten nie był kalibrowany, a jego celem była ocena sprawności wybranych dróg dzięki wykorzystaniu empirycznych pomiarów prowadzonych przez autorów (analiza opóźnień względem teoretycznego wzorca). Innymi modelami zastosowanymi w badaniu prowadzonym w łódzkim ośrodku są modele prędkości bazujące na modelowaniu makrosymulacyjnym ruchu (Borowska-Stefańska i in. 2019a, Wiśniewski i in. 2020a). Autorzy przedstawili metody badania dostępności transportowej w warunkach wystąpienia katastrofy naturalnej na podstawie wyników makrosymulacji ruchu i w oparciu o model regionalny i krajowy. W tego typu modelu prędkości ruchu czas przejazdu pomiędzy źródłami i celami podróży jest wypadkową spodziewanego (zamodelowanego) rozkładu ruchu na sieć z jej przepustowością i zakładaną prędkością osiągalną przy założeniu pełnej swobody ruchu.

W ośrodku warszawskim rozwijany jest model prędkości, który zakłada wpływ wielu czynników na czas przejazdu. W modelu tym podstawową zmienną jest prędkość kodeksowa, która jest ograniczana przez rozpoznane czynniki. Te zaś w teorii powinny wpływać na zmniejszenie obserwowanych prędkości. Należą do nich: liczba ludności w buforze 5 km w otoczeniu odcinka, udział obszaru zabudowanego w buforze 100 m i ukształtowanie terenu. Wspomniane zmienne w różnym stopniu wpływają na zmniejszenie prędkości w modelu, gdyż przyjęto różne funkcje dla poszczególnych rodzajów dróg. W przypadku granic państwowych w zależności od przyjętego wariantu zastosowano dodawanie przeciętnych czasów odprawy na granicznych odcinkach (Komornicki i in. 2011, Rosik 2012).

Duże zróżnicowanie podejść metodologicznych do modelowania prędkości ruchu obserwowane jest nie tylko w Polsce. Bateman z zespołem (1996, 1999) w swoim modelu prędkości posiłkowali się danymi z oficjalnych źródeł danych z departamentu transportu, które weryfikowali i porównywali z prędkościami z innych badań i źródeł (w tym pozyskanych z aplikacji służących do planowania tras). Dalszą kalibrację modelu opierali na swoich osobistych doświadczeniach. Generalnie w badaniach stopień skomplikowania modelu i źródła wykorzystywane do jego budowy lub kalibracji zależą w dużej mierze od zasięgu badań (tab. 5.1).

Tab. 5.1. Czynniki wpływające na prędkości samochodów osobowych w wybranych modelach prędkości

Zastosowanie	Obszar zastosowania	Uwzględnione czynniki
Rosik i in. 2020	kontynent – Europa	administracyjne (prędkości kodeksowe z arbitralnym ograniczeniem dla najwyższej kategorii dróg)
Gutiérrez i Urbano 1996		arbitralnie nadane prędkości dla każdej z klas dróg
Kyte i in. 2000	kraj – Stany Zjednoczone	HCM i prędkość wiatru, intensywność opadów oraz warunki na drodze
Fröhlich i Axhausen 2004	kraj – Szwajcaria	średnie prędkości przyjmowane w innych badaniach dla poszczególnych typów dróg
Bateman i in. 1996	kraj – Wielka Brytania	dane z oficjalnych źródeł departamentu transportu poddane weryfikacji w oparciu o m.in. aplikacje służące do planowania tras i kalibrowane na podstawie subiektywnych, osobistych doświadczeń.
Komornicki i in. 2009	kraj – Polska	administracyjne (prędkości kodeksowe); techniczne (kategoria drogi); popytowe (rozmieszczenie ludności) przyrodnicze (rzeźba terenu).
Stępniak i Rosik 2013		
Rosik 2012		
Kowalski i Wiśniewski 2019		prędkości kodeksowe
Borowska-Stefańska i in. 2019a		model prędkości oparty na symulacji obciążenia sieci wg czterostadiowego modelu ruchu
Wiśniewski i in. 2020a	region – Wielkopolska (Polska)	
Borowska-Stefańska i Wiśniewski 2018	region – Mazowsze (Polska)	prędkości kodeksowe
Lovett i in. 2002	region – Cambridgeshire, Norfolk i Suffolk (Wielka Brytania)	dane z oficjalnych źródeł departamentu transportu kalibrowane dla lokalnych uwarunkowań
Li i in. 2011	miasto – Wuhan (Chiny)	ang. *floating car data/measurements*
Salonen i Toivonen 2013	miasto – Helsinki (Finlandia)	
Borowska-Stefańska i in. 2019c	miasto – Łódź (Polska)	wyniki pomiarów ITS (kordony ANPR)

Źródło: opracowanie własne.

Jak więc widać, modelowanie prędkości ruchu nie jest zadaniem prostym. Wynika to z dużego poziomu entropii zarówno systemów transportowych, jak i ich otoczenia (Przybyszewski i Wędrowska 2005). Choć zarządcy dróg określają dopuszczalne prędkości poruszania się po nich, to w zatłoczonych układach mają one charakter określający górną granicę nieprzekraczalnej prędkości, nie zaś możliwości eksploatacyjne poszczególnych odcinków. Ciągłe zmiany

w otoczeniu społeczno-gospodarczym, postęp techniczny w zakresie udoskonalania i tworzenia nowych środków transportu, a także postęp w inżynierii i budownictwie mających wpływ na sieci transportowe – wszystko to wprowadza kolejne zestawy zmiennych opisujących prędkości eksploatacyjne sieci (Dziadek 1991, Borowska-Stefańska i in. 2020a).

Wskazane zmiany mają długotrwałe konsekwencje związane z szeroko rozumianym postępem cywilizacyjnym czy też z globalnymi zmianami klimatycznymi, a wynikają z homeostazy w zakresie dostosowywania kształtu układów transportowych i jednostek osadniczych w myśl teorii organicystycznych. Są również skutkiem naturalnych fluktuacji koniunktury gospodarczej. Modelowanie ruchu często wymaga odpowiednich kalibracji, dostosowujących model do określonych przestrzennie warunków, indywidualnej, dostosowanej do regionalnej, a często nawet lokalnej specyfiki. Stanowią one pochodną relacji międzypodsystemowych w obrębie systemu transportowego i międzysystemowych: w relacji system transportowy – jego otoczenie. Dlatego też utrwalone w literaturze sprzężenia zwrotne w postaci możliwości pojawienia się wzajemnych relacji pomiędzy podsystemami w obrębie systemu transportowego dodatkowo nakazują spoglądać na próby szacowania osiągalnych prędkości w sieci transportowej (Helbing i in. 2002, Jeihani i Ardeshiri 2017).

W warunkach „normalnej" eksploatacji wszystkie wymienione wyżej grupy czynników mają wpływ na prędkości. Ujęcie ich stanowi duże wyzwanie. Jeszcze większych trudności nastręcza określanie prędkości w warunkach nietypowych. Okresowo zaburzone są bowiem warunki równowagi w systemie transportowym. Po pierwsze, konieczne jest określenie wrażliwości sieci i prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń mogących zachwiać równowagą transportową. Często trudno w tym zakresie jednoznacznie i precyzyjnie wskazywać dokładne miejsca wystąpienia zaburzeń, które powodują zmiany w przestrzennym rozkładzie ruchu. Z dużymi trudnościami muszą mierzyć się badacze modelujący ruch w sytuacji katastrofy naturalnej. Drastycznie zwiększa się w tej sytuacji entropia. Ponadto praktycznie nie ma możliwości kalibracji takich modeli. Część z katastrof ma miejsce na tyle rzadko, że doświadczenia z poprzednich wydarzeń tego typu nie zawsze mogą być wykorzystywane z uwagi na zmiany w sieci transportowej, zagospodarowania przestrzennego czy zachowań transportowych mieszkańców (Bland i in. 1997, Sadri i in. 2014). Badacze często przyjmują więc macierze podróży i bazowy rozkład ruchu w obrębie sieci w oparciu o skalibrowane w warunkach „normalnych" modele ruchu (Borowska-Stefańska i in. 2019a).

Poziom swobody ruchu jest podstawowym parametrem określającym możliwe do uzyskania prędkości eksploatacyjne obok prędkości kodeksowych. Jest on pochodną przepustowości infrastruktury oraz obserwowanych na niej natężeń ruchu. Promienie skrętów, szerokość i liczba pasów ruchu, separacja jezdni lub jej brak, metoda poboru opłat, sposób organizacji ruchu na skrzyżowaniach oraz

liczba skrzyżowań i zjazdów – to przykładowe parametry, które określać mogą przepustowość. Natomiast poziom mobilności mieszkańców, podział modalny, kształt sieci transportowej i jej położenie względem zagospodarowania przestrzennego decydują o natężeniu ruchu (Transportation Research Board of the National Academies 2010, Leyn i Vortisch 2015).

W literaturze poświęconej modelowaniu elementów przyrodniczych wpływających na osiągane prędkości w ruchu drogowym uwidacznia się podział na elementy o charakterze okresowym oraz permanentnym, warunkującym kształt sieci. W pierwszej grupie najczęściej pojawiają się opady (deszcz powoduje zmniejszenie prędkości ruchu, które wzrasta wraz z intensywnością opadów; śnieg w większym niż deszcz stopniu wpływa na zmniejszenie prędkości) (Tsapakis i in. 2013), mgła (im intensywniejsza, tym niższe prędkości) (Hranac i in. 2006, Maze i in. 2006) oraz silny wiatr (w mniejszym stopniu niż wcześniej wymienione czynniki redukuje obserwowane prędkości) (Sabir i in. 2011). W zakresie drugiej grupy wskazać należy ukształtowanie terenu (wpływające zarówno na profil podłużny drogi, jak i w przypadku znacznych deniwelacji na liczbę zakrętów) (Rosik i Śleszyński 2009) i sieć hydrograficzną (wymaga budowy przepraw niejednokrotnie stanowiących wąskie gardła) (Borowska-Stefańska i in. 2020a). Między innymi Cools i in. (2010) czy też Keay i Simmonds (2005) wskazują ponadto na czynniki przyrodnicze wpływające na obciążenie sieci transportowej i tym samym potencjalnie pośrednio na prędkości ruchu poprzez oddziaływanie na poziom mobilności mieszkańców oraz wybór środka transportu.

5.1.2. Charakterystyka modelu

Podstawą budowy modelu prędkości ruchu jest przygotowanie wektorowego modelu sieci drogowej obszaru badania. Aby zapewnić możliwie najwyższy poziom realności uzyskiwanych wyników zmian dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej na skutek wystąpienia powodzi, konieczne było przygotowanie sieci najwierniej odzwierciedlającej przebiegi rzeczywistych dróg. Jej finalny kształt to swego rodzaju kompromis pomiędzy najwyższą dokładnością uzyskiwanych wyników a możliwościami obliczeniowymi i percepcyjnymi. Opracowanie sieci zawierającej również odcinki reprezentujące najniższe klasy dróg publicznych pozwala uwzględnić możliwie najszerszą grupę odcinków potencjalnie zalanych przez wody powodziowe, a jednocześnie odwzorować poziom elastyczności sieci z uwzględnieniem wszelkich alternatywnych ścieżek przejazdu. W przypadku badań, które nie uwzględniają wszelkiego rodzaju wyłączeń odcinków sieci, rola dróg o najniższych kategoriach jest dość ograniczona (o ile nie stanowią jedynego połączenia z badaną jednostką osadniczą czy rejonem komunikacyjnym), bowiem

z natury rzeczy rzadko są elementem ścieżki gwarantującej najkrótszy czas przejazdu, a przecież zastosowanie ma tutaj I zasada Wardropa (Wardrop 1952). W prezentowanym badaniu w niektórych scenariuszach powodziowych mogą jednak odgrywać bardzo istotną rolę, np. jako jedyna możliwość objazdu zalanego odcinka.

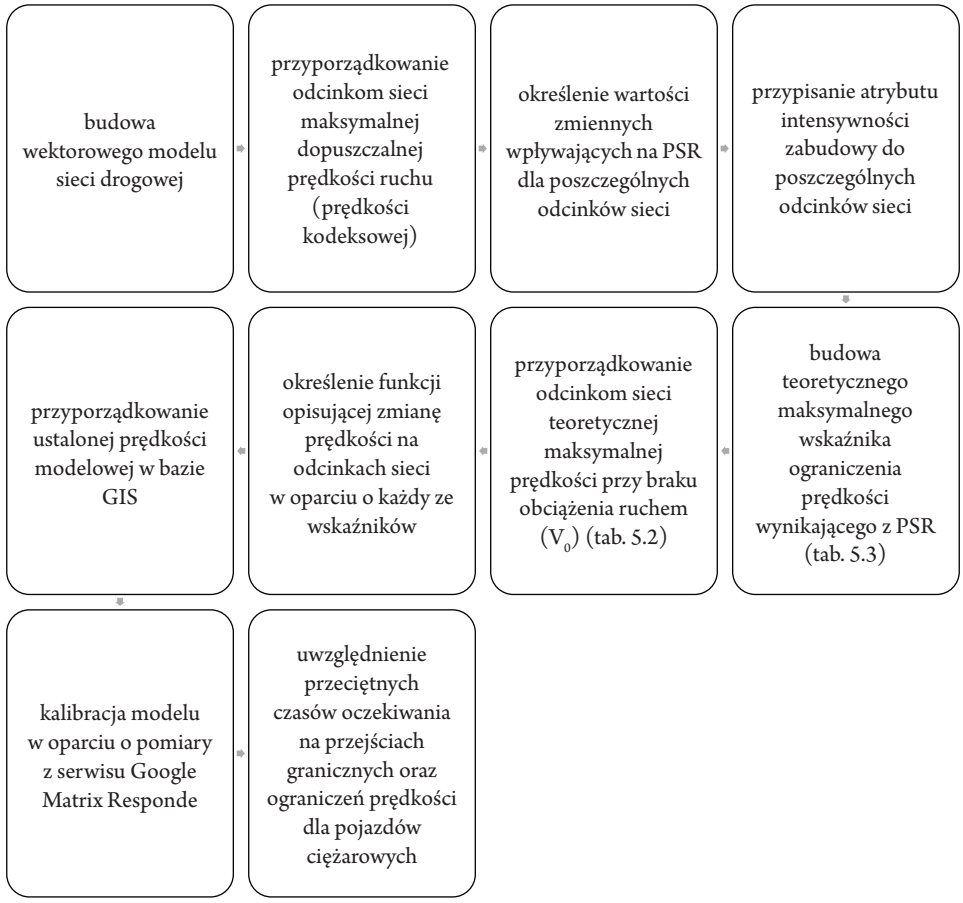
Podczas budowy sieci korzystano z danych GUGiK w postaci Bazy Danych Obiektów Topograficznych, warstw obrazujących sieć drogową pochodzących z zasobów OpenStreetMap oraz baz danych udostępnionych przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad i zarządy dróg wojewódzkich. Wykorzystanie całego zestawu wskazanych źródeł w połączeniu z kontrolą ich poprawności, kompletności i aktualności pozwoliło na zbudowanie sieci obejmującej Polskę oraz kilkudziesięciokilometrową strefę wokół jej granic (jako kolejny czynnik urzeczywistniający uzyskiwane wyniki analiz). Każdy odcinek, już na etapie budowy sieci, został opatrzony atrybutem przypisującym go do kategorii (droga krajowa, droga wojewódzka, droga powiatowa, droga gminna, droga inna) i klasy (autostrada, droga ekspresowa, droga główna ruchu przyspieszonego, droga główna, droga zbiorcza, droga lokalna i droga dojazdowa).

Hierarchizowanie i wyodrębnianie poszczególnych klas dróg zależy od specyfiki organizacyjnej transportu. Konwencja wiedeńska o znakach i sygnałach drogowych, która jest podstawą dla lokalnych prawodawców w zakresie zasad poruszania się po drogach, pośrednio ma znaczenie dla parametrów technicznych zawartych w definicji rodzajów dróg. Jakkolwiek istnieją kraje, w których parametry techniczne danej klasy drogi zależne są od jej lokalizacji w sieci osadniczej (drogi pozamiejskie i drogi miejskie), to w Polsce nazewnictwo klas dróg jest jednakowe dla miast i obszarów niezabudowanych (choć różne są ich parametry). Klasy dróg są wyodrębniane i hierarchizowane w oparciu o ich parametry techniczne. Najwyżej w hierarchii dróg publicznych w Polsce stoją autostrady i drogi ekspresowe. Są to specjalnie zaprojektowane i zbudowane dla potrzeb szybkiego ruchu samochodowego drogi o ograniczonej dostępności. Ograniczenie prędkości na drogach tych kategorii (z wyłączeniem innych, lokalnych uwarunkowań) wynosi dla samochodów osobowych 140 km/h na autostradach, 120 km/h na dwujezdniowych i 100 km/h na jednojezdniowych drogach ekspresowych. Prędkości te są dodatkowo ograniczone dla pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej przewyższającej 3,5 tony do 80 km/h. Dalszymi w hierarchii są drogi główne ruchu przyspieszonego i drogi główne, które podobnie jak autostrady i drogi ekspresowe wchodzą w skład układu podstawowego, zapewniając sprawne powiązanie istotnych rejonów komunikacyjnych. Drogi te, z uwagi na słabsze parametry techniczne ograniczające w pewnym stopniu płynne przemieszczanie się, zapewniają niższą efektywność połączeń. Pozostałe drogi służą przede wszystkim do kanalizowania ruchu w mniejszych,

ponadlokalnych i lokalnych skalach. Należą do nich kolejno drogi zbiorcze (klasa Z), lokalne (klasa L) i dojazdowe (klasa D). Czasem wyżej zaprezentowaną hierarchię dróg uzupełnia się o drogi wewnętrzne (choć nie jest to odrębna klasa dróg). Pod względem funkcji, jaką pełnią drogi, wyróżnia się ich kategorie. Z infrastrukturalnego punktu widzenia ich rola w kształtowaniu mobilności jest wtórna do klasy (drogi o poszczególnych kategoriach powinny spełniać wymagania odpowiadających im klas dróg).

Każdy z odcinków sieci opatrzono również atrybutem określającym liczbę pasów ruchu, co było niezbędne do tego, by zbudować model prędkości, a następnie określić rozkład ruchu na sieć w uwzględnionych motywacjach podróży. Dodatkowo każdy z odcinków przyporządkowano do jednego z trzech typów mówiących o gęstości zabudowy w jego bezpośrednim sąsiedztwie (teren niezabudowany, zabudowany i częściowo zabudowany), zgodnie z podejściem zaproponowanym przez Szczuraszka i Chmielewskiego (2017). Zmienną tę uwzględniono, korzystając z danych wykorzystywanych podczas budowy modelu prędkości ruchu w postaci powierzchni budynków (na podstawie BDOT) w strefie 100 m od odcinka drogi. Uzyskane wartości dla poszczególnych kategorii i klas odcinków sieci drogowej poddano klasyfikacji zgodnie z metodą naturalnych przedziałów Jenksa, przyjmując trzy przedziały klasowe świadczące o intensywności zabudowy w ich sąsiedztwie. W wyniku tego zabiegu możliwe było wskazanie odcinków przebiegających przez tereny o względnie wysokiej gęstości zabudowy (w pierwotnej klasyfikacji tereny zabudowane), o względnie niskiej gęstości zabudowy (w pierwotnej klasyfikacji tereny niezabudowane) oraz tereny o charakterystyce „mieszanej" (w pierwotnej klasyfikacji częściowo zabudowane). W tym kontekście terenami zabudowanymi są odcinki dróg przebiegające przez obszar zabudowany niezależnie od stopnia ich separacji (nieco inaczej niż ma to miejsce w polskim prawodawstwie, gdzie np. autostrady nie wiodą przez obszar zabudowany).

Finalnie więc do modelu prędkości ruchu włączono dziewięć typów odcinków: autostrady (A), drogi ekspresowe (S), drogi krajowe (GP), drogi wojewódzkie (GP, G), powiatowe (GP, G, Z), gminne I (GP, G, Z), gminne II (L), gminne III (D), inne (D), a każdy z nich poddano wewnętrznej strukturyzacji ze względu na gęstość sąsiadującej zabudowy. Przyjęto, że podstawowymi czynnikami ograniczającymi prędkości na drogach są kodeks drogowy (w postaci prędkości kodeksowych) i parametry techniczne drogi / warunki drogowe (w postaci prędkości w ruchu swobodnym wykorzystywanych w modelowaniu symulacyjnym ruchu). Wspominane ograniczenia były podstawą do dalszych obliczeń, które zakładały, iż wraz ze zmniejszaniem się poziomu swobody ruchu (PSR) prędkości na sieci powinny spadać. Procedura obliczeniowa składała się z kilku etapów zawierających w sobie kolekcjonowanie danych źródłowych, ich przetwarzanie oraz kalibrację modelu (ryc. 5.1).



Ryc. 5.1. Postępowanie badawcze związane z budową modelu prędkości ruchu
Źródło: opracowanie własne

Każdemu odcinkowi sieci drogowej przyporządkowano określoną maksymalną prędkość w oparciu o przepisy kodeksu drogowego oraz decyzje lokalnych zarządców dróg. Przyporządkowania prędkości V_0 dla każdego z odcinków dokonano przy zastosowaniu wytycznych Szczuraszka i Chmielewskiego (2017) (tab. 5.2).

Tab. 5.2. Przepustowość i prędkość w ruchu swobodnym dla typów odcinków sieci drogowej

Typ	Nazwa	Liczba pasów ruchu	Przepustowość [P/h]	Prędkość w ruchu swobodnym [km/h]
1	autostrada 2x2	2	1955	125
2	ekspresowa 2x2	2	1860	111
3	ekspresowa 2x1	1	1491	90
4	krajowe 2x2 n	2	1775	97
5	krajowe 2x2 m	2	1535	84
6	krajowe 2x2 w	2	1292	60
7	krajowe 1x2 n	1	1431	86
8	krajowe 1x2 m	1	1258	76
9	krajowe 1x2 w	1	1086	65
10	wojewódzkie 2x2 n*	2	1370	83
11	wojewódzkie 2x2 m*	2	1230	74
12	wojewódzkie 2x2 w	2	1292	60
13	wojewódzkie 1x2 n	1	1230	74
14	wojewódzkie 1x2 m	1	1142	69
15	wojewódzkie 1x2 w	1	1047	63
16	powiatowe 1x2 n	1	1182	71
17	powiatowe 1x2 m	1	1119	67
18	powiatowe 1x2 w	1	1057	64
19	gminne 1x2 n	1	1057	64
20	gminne 1x2 m	1	999	60
21	gminne 1x2 w	1	986	59
22	inne	1	509	26

N – odcinek sieci przebiegający przez obszar o niskiej gęstości zabudowy, W – odcinek sieci przebiegający przez obszar o wysokiej gęstości zabudowy, M – odcinek sieci przebiegający przez obszar o charakterystyce „mieszanej"

* Ze względu na brak oznaczonych typów odcinków w zestawieniu Szczuraszka i Chmielewskiego 2017 wprowadzono odpowiednio wartości przepustowości i prędkości w ruchu swobodnym przypisane dla drogi wojewódzkiej o szerokości 7 m w obszarze niezabudowanym oraz drogi wojewódzkiej o szerokości 7 m w obszarze częściowo zabudowanym.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Szczuraszek i Chmielewski 2017.

Ze względu na wzrost obciążenia dróg oraz występujące ograniczenia w zakresie ich przepustowości dokonano korekty prędkości poruszania się pojazdów w sieci, której podstawą była budowa teoretycznego modelu poziomu swobody ruchu (PSR). Przyjęto w nim, iż kluczowymi parametrami określającymi PSR są: liczba mieszkańców w promieniu 5 km od drogi, gęstość zabudowy w promieniu 100 m od drogi oraz stopień swobody ruchu opisywany jako przeciętna długość odcinka drogi pomiędzy skrzyżowaniami (tab. 5.3). Dla każdego z 27 typów odcinków poszczególne parametry zostały dobrane indywidualnie z uwagi na to, że odcinki

niższych kategorii częściej są drogami podporządkowanymi oraz istnieje większa prawna i techniczna swoboda w zakresie lokalizacji zjazdów w ich przebiegu. Wraz z zagęszczaniem się zabudowy wspomniane wyżej różnice zmniejszają się. Mniejsza redukcja prędkości na niektórych typach odcinków na terenach zabudowanych niż ma to miejsce poza nimi jest efektem znaczącej zmiany prędkości wejściowej, która poza terenem zabudowanym (wg kodeksu dopuszczalna prędkość to 90 km/h) jest często zawyżona względem eksploatacyjnej.

Tab. 5.3. Maksymalny wpływ na ograniczenie prędkości [gdzie 1 = 100%, czyli całkowite zatrzymanie ruchu] trzech cech opisujących w modelu stopień swobody ruchu na zmniejszenie prędkości na poszczególnych typach odcinków

Typ odcinka		Gęstość skrzyżowań	Gęstość zabudowy	Liczba mieszkańców	Razem
autostrada	N	0	0,05	0,09	0,14
	M	0	0,06	0,1	0,16
	W	0	0,1	0,14	0,24
droga ekspresowa	N	0	0,05	0,091	0,141
	M	0	0,06	0,105	0,165
	W	0	0,1	0,15	0,25
droga krajowa	N	0,01	0,15	0,175	0,335
	M	0,15	0,1	0,1	0,35
	W	0,32	0,01	0,05	0,38
droga wojewódzka	N	0,0825	0,154114	0,204167	0,440781
	M	0,2375	0,102743	0,12	0,456909
	W	0,3775	0,010274	0,06	0,448191
droga powiatowa	N	0,155	0,162014	0,221181	0,538194
	M	0,325	0,108009	0,13	0,559398
	W	0,435	0,010801	0,0813	0,527051
droga gminna I	N	0,2275	0,176597	0,230396	0,634493
	M	0,4125	0,117731	0,13	0,661886
	W	0,4925	0,011773	0,1229	0,62719
droga gminna II	N	0,251667	0,201597	0,235196	0,68846
	M	0,441667	0,134398	0,13	0,710462
	W	0,511667	0,01344	0,2063	0,731356
droga gminna III	N	0,275833	0,226597	0,239996	0,742426
	M	0,470833	0,151065	0,14	0,759039
	W	0,530833	0,015106	0,2167	0,762606
droga inna	N	0,3	0,251597	0,244796	0,796393
	M	0,5	0,167731	0,14	0,807615
	W	0,55	0,016773	0,2271	0,793856

N – odcinek sieci przebiegający przez obszar o niskiej gęstości zabudowy, W – odcinek sieci przebiegający przez obszar o wysokiej gęstości zabudowy, M – odcinek sieci przebiegający przez obszar o charakterystyce „mieszanej"

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wiśniewski i in. 2020b.

Na kolejnym etapie dokonano analiz związanych z liczbą mieszkańców, gęstością zabudowy oraz liczbą skrzyżowań na poszczególnych odcinkach. Określono liczbę ludności zamieszkującą w ekwidystancie 5 km od odcinka drogi i odniesiono tę wartość do jej długości (uzyskano tym samym długość odcinka drogi przypadającą na jednego mieszkańca). Wykorzystano w tym zakresie dane prezentujące liczbę ludności zagregowaną wg ulicy jej zamieszkania (z reprezentacją w formie punktu centralnego) lub, jeśli taki poziom agregacji nie występował, wg jednostki osadniczej zamieszkania (również w formie punktu centralnego). W przypadku obliczeń gęstości zabudowy określono powierzchnię zabudowy w ekwidystancie 100 m w oparciu o dane BDOT (obliczając, ile metrów drogi przypada na 1 m^2 zabudowy). W zakresie liczby skrzyżowań uwzględniono wszystkie istniejące skrzyżowania (także z drogami, które nie zostały włączone do finalnej wersji modelu sieci drogowej) i odniesiono ich liczbę do długości odcinka.

W dalszej procedurze określono funkcję redukcji prędkości związanej z liczbą skrzyżowań na danym odcinku (SR_C). W pierwszej kolejności obliczono przeciętną odległość między węzłami dla każdego z badanych odcinków (iloraz długości odcinka do liczby skrzyżowań). Na tym etapie wyłączono z dalszych obliczeń skrajne obserwacje, przyjmując, iż 1% najniższych wartości to skrajnie mała swoboda ruchu (maksymalna wartość zwolnienia ruchu na danym typie odcinka wynikająca z tego czynnika), a 1% najwyższych wartości to bardzo duża swoboda ruchu (zmniejszenie prędkości na danym odcinku wynikające z tego czynnika nie występuje). Dla pozostałych 98% obserwacji znaleziono wartość maksymalną 1, względem której standaryzowano dane. Na dalszym etapie zestandaryzowane dane poddano obliczeniom wg wzoru:

$$SR_C = \frac{\left(\frac{1}{1 + e^{-1(\beta x)}}\right)}{0{,}5} - 1$$

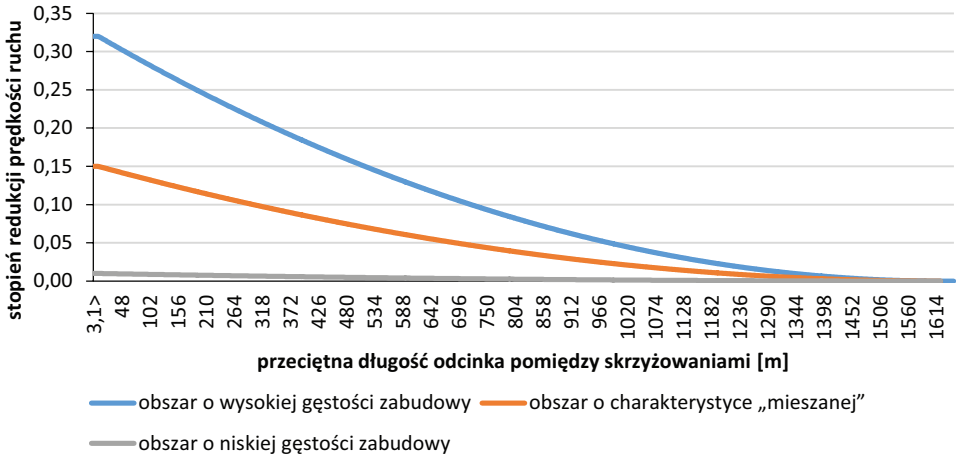
gdzie:

$$\beta = \frac{1}{N}$$

Uzyskane wyniki zestandaryzowano w oparciu o najwyższą wartość. Z uwagi na niską wartość parametru β wykres funkcji dla tego wskaźnika, choć jest w istocie sigmoidalny, to w skali wydruku wydaje się przypominać bardziej krzywą wykładniczą (ryc. 5.2). Kolejnym krokiem było powtórzenie powyższej procedury, z tym że daną wejściową był iloraz długości odcinka i powierzchni zabudowy (SR_B). Redukcja wartości skrajnych polegała na odrzuceniu 40% skrajnie niskich (przyjmując, że w sposób maksymalny przyczyniają się do spowolnienia ruchu) oraz 40% skrajnie wysokich obserwacji (przy założeniu, że ich incydentalne występowanie nie wpływa na spowolnienie ruchu). Dla pozostałych 20% odcinków

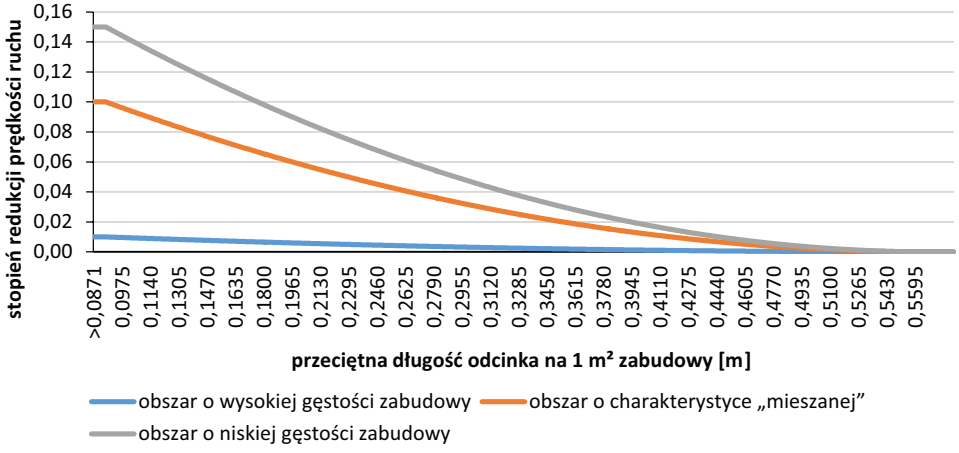
dróg przeprowadzono procedurę identyczną z tą dla funkcji redukcji prędkości spowodowanej zagęszczeniem skrzyżowań (ryc. 5.3).

Redukcja prędkości spowodowana liczbą mieszkańców zamieszkujących w pobliżu drogi (SR_p) polegała na podobnej jak wyżej wskazanej procedurze, z tym że do obliczeń wybrano obserwacje do 38 percentylu, przyjmując, iż wartości wyższe są na tyle małe (1 mieszkaniec na 980 metrów bieżących drogi), że nie mają większego wpływu na prędkość ruchu. W efekcie 38% odcinków sieci ma określony stopień redukcji prędkości w oparciu o wcześniej zaprezentowaną funkcję (ryc. 5.4).



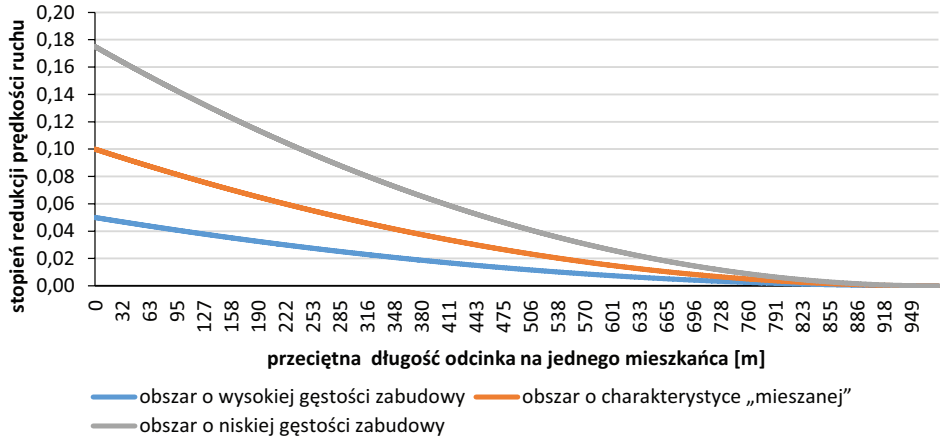
Ryc. 5.2. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem skrzyżowań dla dróg krajowych

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 5.3. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem zabudowy dla dróg krajowych

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 5.4. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem ludności dla dróg krajowych

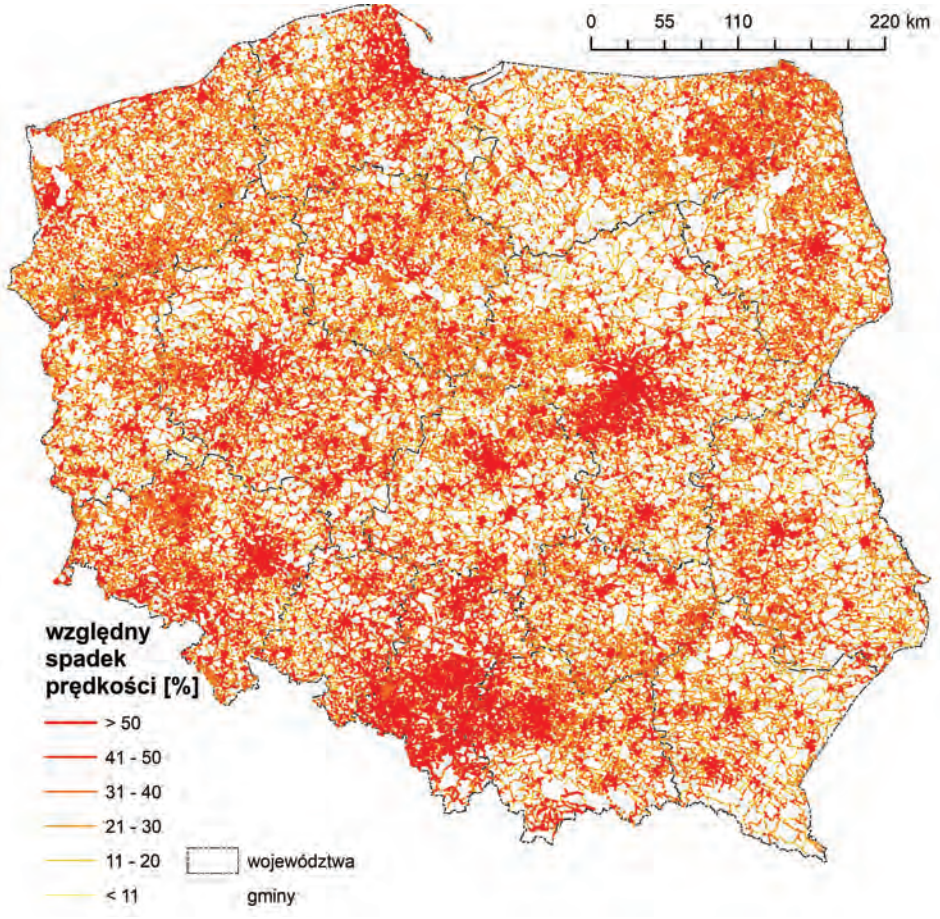
Źródło: opracowanie własne

Na dalszym etapie prac przemnożono wartości SR_C, SR_B oraz SR_P przez odpowiadające im z racji przynależności do typu odcinka drogi wartości określające maksymalny wpływ na ograniczenie prędkości (tab. 5.3). Wyniki zsumowano i wykorzystano jako odjemniki w dwóch obliczeniach – w pierwszym odjemną była prędkość kodeksowa (ryc. 5.5), a w drugim prędkość w ruchu swobodnym (V_0). Średnia z tych dwóch różnic stanowi prędkość zastosowaną w modelu prędkości dla samochodów osobowych w Polsce, która w formie bazy danych została przeniesiona do środowisku GIS w celu umożliwienia prowadzenia dalszych analiz.

Dla obszarów położonych poza granicami Polski z uwagi na brak danych dotyczących liczby i rozmieszczenia ludności przyjęto, iż jest to pochodna zagospodarowania, i funkcję oparto na danych dotyczących powierzchni zabudowy przyporządkowanej do odcinka drogi, z tym że wynik pomnożono o wartości wskaźnika wpływu rozmieszczenia ludności w pobliżu drogi na ograniczenie prędkości ruchu.

Kolejny etap zakładał kalibrację uzyskanego modelu. Wyżej zaprezentowane wartości i obliczenia powstały w wyniku szeregu symulacji wchodzących w jej skład. Kalibracji dokonywano w oparciu o wyniki z popularnej bazy Google Matrix Respondes (Wiśniewski 2016, Borowska-Stefańska i in. 2019c, Rothfeld i in. 2019) w postaci matrycy podróży pomiędzy wybranymi miejscowościami na długich (powyżej 200 km), średnich (od 100 do 200 km), krótkich (od 20 do 100 km) i ultrakrótkich dystansach (poniżej

20 km). W ramach kalibracji w zastosowanym modelu względem jego pierwotnej wersji zmianie ulegały wartości parametru β (jego zmniejszenie w celu redukcji „progowości" zastosowanej funkcji) oraz zakresy skrajnych obserwacji nieopisywanych przez zbudowaną funkcję. Pozwoliło to na określenie finalnych wartości prędkości ruchu dla poszczególnych odcinków sieci (ryc. 5.6, tab. 5.4).



Ryc. 5.5. Względne spadki prędkości przejazdu odcinka sieci wynikające z zastosowania modelu prędkości ruchu względem prędkości kodeksowych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 5.6. Prędkości przejazdu odcinków sieci wyznaczone zgodnie z modelem prędkości ruchu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 5.4. Statystyki prędkości przejazdu wg typów odcinków wyznaczone zgodnie z modelem prędkości ruchu w Polsce w 2019 r.

Typ odcinka	Prędkość [km/h]			
	minimalna	średnia	maksymalna	odchylenie standardowe
1	2	3	4	5
autostrada	95,0	119,5	125,0	6,2
droga ekspresowa	77,3	104,0	111,0	7,2
droga krajowa	36,0	69,5	96,8	14,0
droga wojewódzka	32,6	59,4	82,7	14,1

1	2	3	4	5
droga powiatowa	26,4	48,9	71,0	13,9
droga gminna I	21,8	43,4	63,9	14,2
droga gminna II	16,6	37,2	59,0	10,4
droga gminna III	15,8	36,3	57,4	9,6
droga inna	14,2	20,9	26,0	9,3

Źródło: opracowanie własne.

Ostatnimi czynnościami, jakie zrealizowano w ramach budowy modelu ruchu, było jego dostosowanie do relacji transgranicznych oraz do przewozów realizowanych przez pojazdy ciężarowe (dla ewentualnych dalszych analiz uwzględniających ten rodzaj pojazdów). W tym celu przeanalizowano ruch na granicach zewnętrznych strefy Schengen i dodano raportowane przez straż graniczną czasy oczekiwania na granicach do czasu przejazdu odcinka przebiegającego przez ten obszar. W ramach zmian w modelu służących ukazaniu prędkości przemieszczania się samochodów ciężarowych do istniejącego modelu dla pojazdów osobowych dodano ograniczenia odnoszące się do tej grupy pojazdów – 80 km/h dla autostrad, dróg ekspresowych i innych dróg dwupasmowych o dopuszczalnej prędkości kodeksowej wyższej niż 70 km/h.

5.2. Dostępność transportowa

5.2.1. Dostępność izochronowa i kumulatywna

Ustalenie zakresu ekspozycji poszczególnych elementów sieci drogowej na oddziaływanie powodzi stanowi podstawę badania ich istotności dla funkcjonowania całego systemu transportu drogowego (Nicholson i Du 1994) przy jednoczesnym określaniu stopnia jego elastyczności na tego typu zdarzenia nietypowe (zakładając, że poziom zagrożenia przewyższy poziom odporność sieci) (Blockley i in. 2012, Wan i in. 2017). O niezawodności systemu transportu drogowego w czasie trwania sytuacji kryzysowej świadczy również zdolność poszczególnych elementów jego sieci do przejmowania zadań, które w warunkach „normalnych" nie były im przypisane (Jenelius i Mattsson 2012, Tukamuhabwa i in. 2015).

Narzędziami umożliwiającymi uchwycenie, w jaki sposób cechy systemu transportu drogowego wpływają na poziom jego wrażliwości (szczególnie w ujęciu wrażliwości dostępności) (Chen i in. 2007) na wystąpienie powodzi, są metody analizy dostępności transportowej. Rozważania nad istotą samej dostępności transportowej oraz metodykami jej badania prowadzone są już od wielu lat i poświęcono im bardzo wiele publikacji, zarówno zagranicznych (m.in.: Vickerman i in. 1999, Gutierrez 2001, Spiekermann i Neubauer 2002, Geurs i Van Wee 2004, Geurs

2006, Neutens i in. 2010, Rietveld i Bruinsma 2012, Banister 2014, Lucas i in. 2016, Guzman i in. 2017), jak i krajowych (m.in.: liczne publikacje IGiPZ PAN – chociażby: Taylor 1998, 1999, Śleszyński 2009, Komornicki i in. 2010, Rosik 2012, 2014, Rosik i in. 2015, 2017 oraz innych ośrodków badawczych, m.in.: Koźlak 2010, Sierpiński 2010, Wiskulski 2013, Guzik 2014, Gadziński 2016, Zmuda-Trzebiatowski 2016, Kowalski i Wiśniewski 2017). Mnogość zastosowań metod związanych z określaniem poziomu różnie postrzeganej dostępności transportowej nie pozwala przytoczyć chociażby po jednej z publikacji reprezentujących dane nurty badawcze, jednak każda z nich wydaje się uznawać podstawowe założenie, w myśl którego dostępność to zdolność do powstania relacji pomiędzy więcej niż jednym elementem zbioru (Komornicki i in. 2009) w określonej przestrzeni społeczno-gospodarczej. Konieczne jest więc występowanie przynajmniej dwóch elementów będących odpowiednio miejscem źródłowym i docelowym dostępności, które są względem siebie osiągalne (jednostronnie lub bilateralnie), oraz środka transportu, odgrywającego rolę nośnika powiązań łączących wspomniane wcześniej punkty przestrzeni, przełamując jej opór w postaci różnego rodzaju czynników ograniczających atrakcyjność celu/celów podróży. Rozpatrując dostępność w takich kategoriach można stwierdzić, iż jest ona produktem systemu transportowego. Patrząc zaś przez pryzmat kategorii ekonomicznych, dostępność transportowa stanowi podaż. Popytem w tym kontekście są potrzeby związane z przemieszczaniem się – mobilność. Jeśli natomiast rozpatrywać to zagadnienie w kategorii gry rynkowej związanej z prawem rynku Saya (Ładyka 2012), im większa dostępność, tym niższe koszty użytkowników systemu wiążące się z realizacją potrzeb przewozowych (przy czym kosztami tutaj są nie tyle ceny usług przewozowych, co koszty wyrażone w czasie przejazdu). Niskie koszty mogą się z kolei przełożyć na zwiększenie popytu i poprzez to, po wyczerpaniu się możliwości obsługi ruchu przez infrastrukturę, przyczynić się do zmniejszenia dostępności i rosnących kosztów funkcjonowania transportu. Zależność ta jest przesłanką dla wielu praw i paradoksów, m.in. paradoksu Jevonsa i prawa Lewisa-Mogridge'a (Burnewicz 2017).

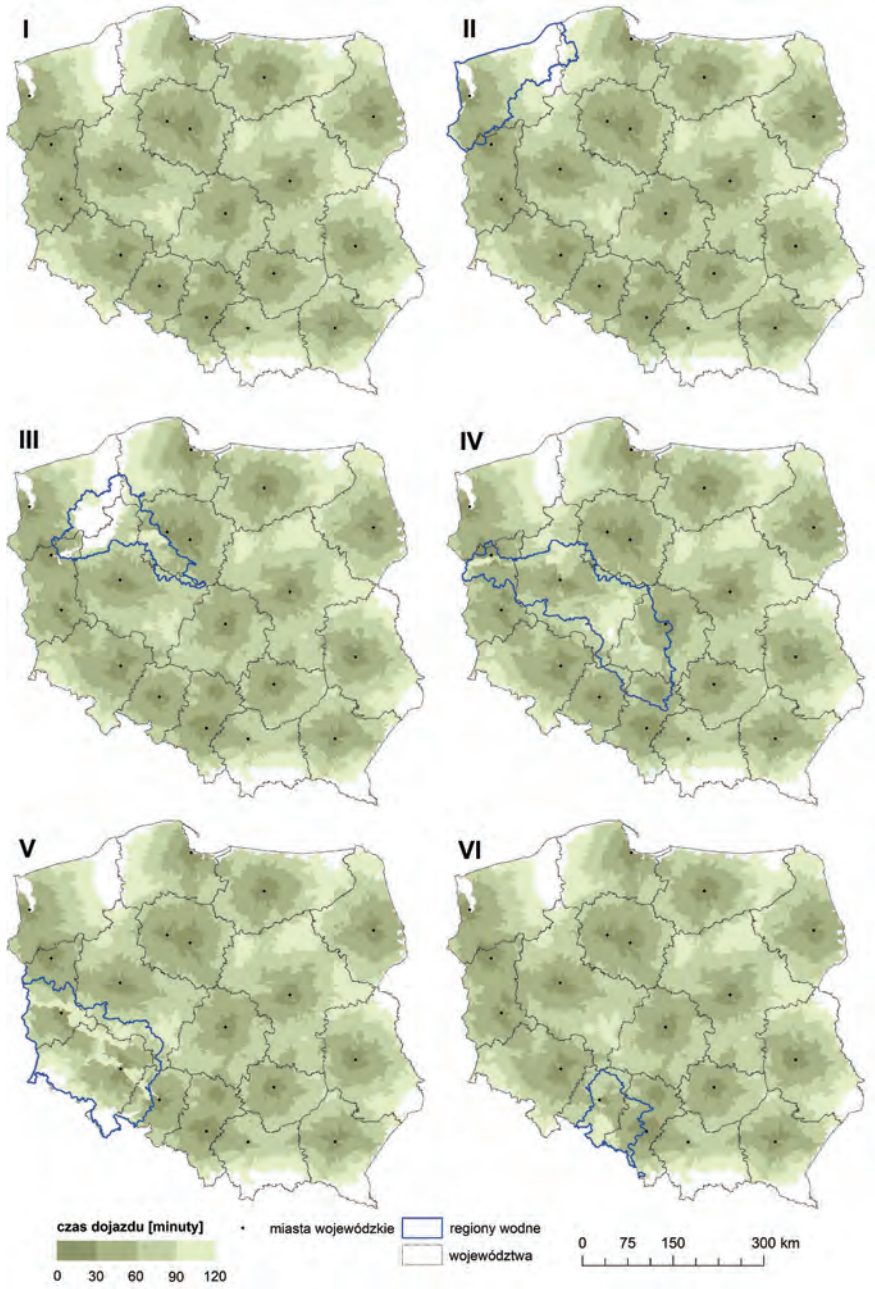
W ujęciu wyżej wspomnianej gry rynkowej to infrastruktura (poprzez zapewnienie sprawnych połączeń) jest jednym głównych bodźców wpływającym na mobilność. Zalicza się do niej poza drogami (i jej podstawowymi parametrami technicznymi) m.in. liczbę i szerokość jezdni oraz pasów, a także parkingi, stacje benzynowe (w tym stacje ładowania pojazdów elektrycznych, które w dobie rozwijającej się elektromobilności mogą mieć kluczowe znaczenie) i inteligentne systemy transportowe (ITS). Warto zaznaczyć, iż poprawiająca się dostępność transportowa ma wpływ nie tylko na mobilność codzienną, ale także na migracje, czego eksplikacją jest stała Marchettiego (Marchetti 1994).

Zaprezentowane czynniki infrastrukturalne to nie jedyna grupa elementów wpływających na popyt transportowy. Poza nią istotna jest struktura funkcjonalno-przestrzenna i idące za nią rozmieszczenie źródeł i celów podróży. Im większe

oddalenie źródeł od celów podróży, tym mniejsza skłonność uczestników systemu transportowego do realizacji podróży. W przypadku jej podjęcia wspomniana odległość ma istotny wpływ na podział modalny wykorzystywanych w tym celu środków transportu (Sierpiński 2012).

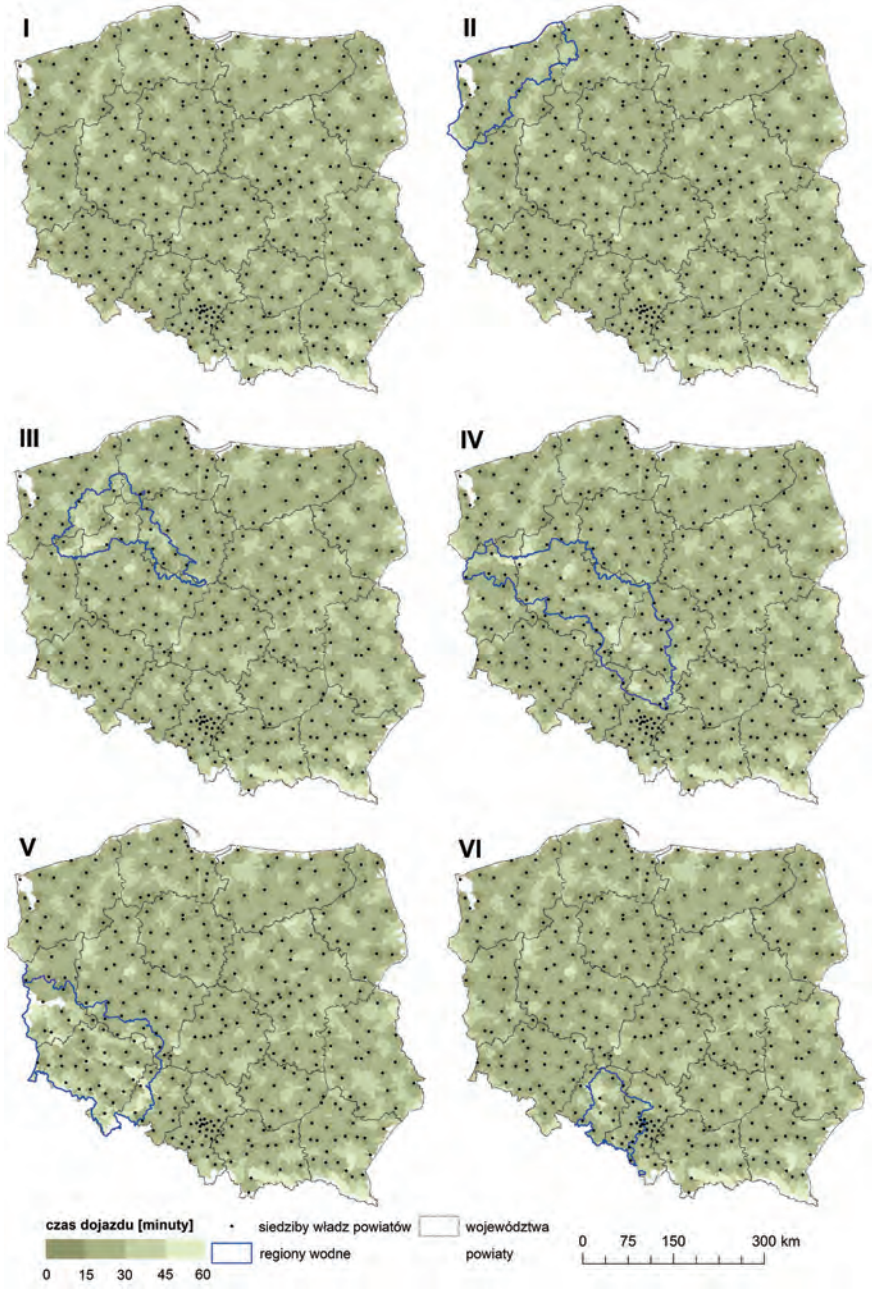
Ponieważ celem prezentowanego badania jest określenie, w jaki sposób opór przestrzeni, modyfikowany przez tak szczególny czynnik jak wystąpienie powodzi, wpływa na przemieszczenia pomiędzy wybranymi punktami w przestrzeni Polski (np. miastami wojewódzkimi, punktami centralnymi gmin), realizowanymi za pomocą samochodu osobowego – zastosowanie metod badania dostępności transportowej jest w tym przypadku naturalne. Z szerokiego spektrum podejść do tego typu analizy (ich wyczerpującego przeglądu dokonał m.in. Rosik 2012) wybrano dostępność izochronową, kumulatywną (Bielecka i Filipczak 2010, Gadziński i Beim 2010, Olszewski i in. 2013, Śleszyński 2014, Śleszyński i in. 2015, Bul 2016) oraz dostępność potencjałową (dla podróży krótkich i długich) (Rosik 2012, Rosik i in. 2013, 2015, Rosik i Stępniak 2015, Stępniak i Rosik 2018), które z jednej strony pozwalają włączyć do badania bardzo szeroki zestaw danych źródłowych, z drugiej zaś powstałe w wyniku ich zastosowania wyniki można zaprezentować w sposób umożliwiający sprawną percepcję.

W przypadku dostępności izochronowej i kumulatywnej badanie rozpoczęto od określenia zbioru celów (punktów), względem których wyznaczane będą linie jednakowego czasu podróży, zgodnie z modelem prędkości. Pierwszy zbiór to centroidy miast wojewódzkich, drugi natomiast to centroidy siedzib władz powiatów. Takie zdefiniowanie obiektów ma za zadanie umożliwić określenie zmian dostępności czasowej na poziomie regionalnym (dostępność do ośrodków regionalnych), jak i lokalnym (dostępność do ośrodków istotnych w skali lokalnej). W przypadku ujęcia regionalnego konstruowano izochrony o interwale wynoszącym od 30 minut do dwóch godzin, natomiast w przypadku ujęcia lokalnego zastosowano interwał o długości trwania od 15 minut do jednej godziny. Po wrysowaniu policentrycznych izochron o wskazanych wartościach czasu możliwe było zliczenie obiektów znajdujących się w strefach organicznych poszczególnymi izoliniami. Kumulowaniu podlegały jednostki osadnicze (reprezentowane przez ich punkty centralne) oraz zamieszkała w nich ludność wg wielkości populacji (do 5000 mieszkańców; od 5001 do 20 000 mieszkańców; od 20 001 do 50 000 mieszkańców; od 50 001 do 100 000 mieszkańców oraz powyżej 100 000 mieszkańców). Badanie rozpoczęto od określenia przebiegu izochron w wariancie „normalnym", kiedy to nie występują żadne zakłócenia związane z wystąpieniem powodzi. Następnie izolinie wyznaczano, kiedy z sieci drogowej wyłączone były odcinki zalane przez wody powodziowe oraz odcinki „odcięte" na skutek zalania sąsiednich fragmentów sieci drogowej w poszczególnych scenariuszach powodzi oraz zakresach przestrzennych jej występowania. Na rycinach 5.7 i 5.8 zaprezentowano przykładowe przebiegi izochron w warunkach normalnych oraz



I – wariant „normalny", II – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, III – Noteci, IV – Warty, V – Środkowej Odry, VI – Górnej Odry

Ryc. 5.7. Czas dojazdu do miast wojewódzkich w warunkach „normalnych" oraz podczas wystąpienia powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.
Źródło: opracowanie własne



I – wariant „normalny", II – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, III – Noteci, IV – Warty, V – Środkowej Odry, VI – Górnej Odry

Ryc. 5.8. Czas dojazdu do siedzib władz powiatowych w warunkach „normalnych" oraz podczas wystąpienia powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

podczas powodzi występującej na skutek całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w poszczególnych regionach wodnych na obszarze dorzecza Odry. Wyznaczenie przebiegu izochron w wariancie bazowym (warunki „normalne"), a następnie w każdym kolejnym będącym skutkiem powodzi w określonym scenariuszu pozwoliło na określenie względnych i bezwzględnych zmian liczby ludności i jednostek osadniczych w zasięgu poszczególnych izolinii. Ze względu na dużą liczbę uwzględnianych w badaniu scenariuszy powodzi oraz wariantów obszarów jej występowania w części wynikowej nie będą prezentowane opracowania kartograficzne obrazujące zmiany przebiegów izochron, a jedynie zestawienia tabelaryczne odnoszące się do wyników równoległej analizy dostępności kumulatywnej.

5.2.2. Dostępność potencjałowa

Drugim z podejść do badania wpływu powodzi na funkcjonowanie systemu transportu drogowego w Polsce było określanie zmian dostępności potencjałowej towarzyszących wystąpieniu sytuacji kryzysowej w poszczególnych jej scenariuszach. Metoda dostępności potencjałowej opiera się na pomiarze możliwości zajścia interakcji między źródłem podróży a zbiorem jej celów przy założeniu, że wraz z wydłużaniem się czasu lub kosztu podróży atrakcyjność jej celu maleje (Rosik 2012, s. 24). Swoją dużą popularność w badaniu dostępności transportowej podejście potencjałowe zawdzięcza niewątpliwie temu, że jednocześnie uwzględnia komponent użytkowania przestrzeni i komponent transportowy (Geurs i Ritsema van Eck 2001).

W prezentowanym badaniu użytkowanie przestrzeni reprezentowane jest przez rejony komunikacyjne w postaci gmin w Polsce, których masę stanowi liczba mieszkańców (wg GUS). Funkcja atrakcyjności masy przyjmuje formę liniową, atrakcyjność celu podróży (gminy) jest wprost proporcjonalna do liczby jego mieszkańców. Masa rejonów komunikacyjnych jest elementem, który ulega zmianie w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach. W podrozdziale 3.2.2 określono liczbę ludności każdej z gmin zagrożonych powodzią w poszczególnych scenariuszach. Zgodnie z zawartą tam wzmianką podczas obliczania dostępności potencjałowej, przy symulacji wystąpienia powodzi o danym prawdopodobieństwie w określonym regionie wodnym, masy gmin objętych powodzią w tym przypadku były redukowane o liczbę ludności, która zamieszkuje zalane tereny. Redukcja ta ma za zadanie w syntetyczny sposób odzwierciedlać spadek atrakcyjności rejonu komunikacyjnego, którego część ludności i zagospodarowania w wyniku potencjalnego zalania lub „odcięcia" w związku z wyłączeniem z użytkowania dróg dojazdowych pozostaje w pewnym sensie poza systemem transportowym. Odnosi się to również do potencjału własnego gminy.

Komponent transportowy jest natomiast reprezentowany przez sieć drogową przyjmującą wariant bazowy oraz warianty odpowiadające każdemu z rozpatrywanych scenariuszy symulacji powodzi. Tak jak w przypadku metody dostępności izochronowej/kumulatywnej, z każdego z nich zostały usunięte te odcinki sieci drogowej, które zostają zalane lub „odcięte" na skutek znalezienia się pod powierzchnią wody odcinków sąsiednich. Prędkość poruszania się także warunkuje autorski model. Należy w tym miejscu nadmienić, że o ile model prędkości znacznie urealnia badane czasy podróży (Rosik i Śleszyński 2009, Śleszyński 2014), poprzez m.in. odzwierciedlenie wpływu kongestii, o tyle zmiany natężenia ruchu na poszczególnych odcinkach sieci towarzyszące powodzi i jej konsekwencjom dla sieci drogowej znacznie odbiegają od tych charakterystycznych dla typowej cyklicznej kongestii. W związku z tym model prędkości może z jednej strony niedoszacowywać redukcji prędkości na odcinkach, które część ruchu przejęły, i jednocześnie przeszacowywać ją tam, gdzie potok pojazdów zmalał. Aby uchwycić tego rodzaju zmiany, konieczna jest praca na swego rodzaju „żywym organizmie" w postaci modelu ruchu o odpowiednich cechach (Borowska-Stefańska i in. 2019a, Wiśniewski i in. 2020a). Choć i to wymaga przyjmowania pewnych założeń upraszczających.

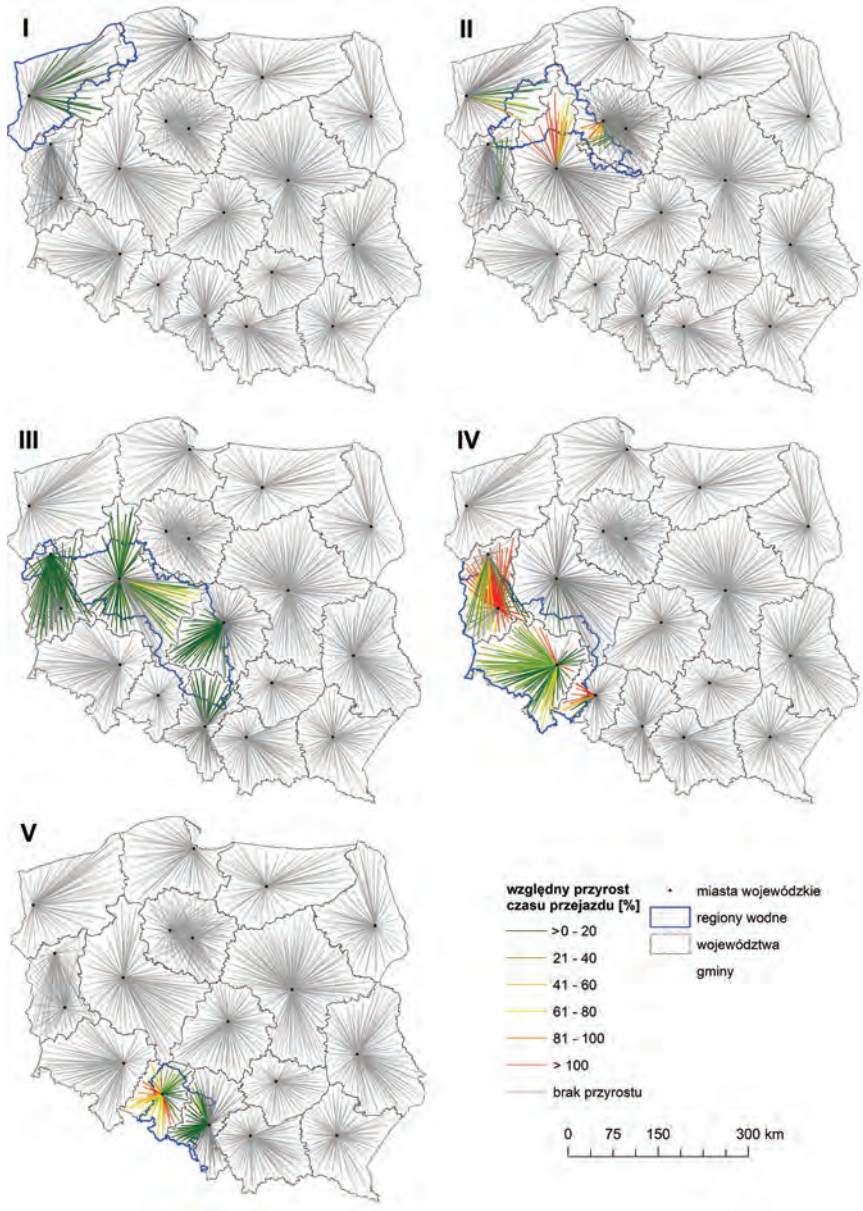
Zarówno dla kompletnej sieci drogowej, jak i każdej reprezentującej sytuację charakterystyczną dla określonego scenariusza powodzi, wygenerowano macierz czasu podróży źródło-cel, uwzględniającą wszystkie gminy w Polsce. Zestawienie długości podróży w wariancie bazowym z wartościami uzyskanymi dla kolejnych scenariuszy pozwoliło na określenie bezwzględnych i względnych przyrostów czasu towarzyszących ewentualnemu objeżdżaniu zalanych terenów. Na rycinie 5.9 przedstawiono przykładowe względne przyrosty czasu przejazdu pomiędzy gminami w poszczególnych województwach a ich stolicami w związku z wystąpieniem powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych.

Ingerencja w komponent transportowy odnosiła się również do potencjału własnego rejonów komunikacyjnych (Rosik 2009, Gutierrez i in. 2010, Salas-Olmendo i in. 2015), którego zadaniem jest odzwierciedlanie roli własnej masy w całkowitej dostępności potencjałowej rejonu (szczególnie istotny w przypadku podróży krótkich). Zgodnie ze wzorem określającym czas podróży wewnątrz rejonu komunikacyjnego (Rosik 2012):

$$t_{ii} = \frac{0{,}5\sqrt{\frac{Pow}{\pi}}}{\overline{V_{ii}}} \cdot 60$$

gdzie:

t_{ii} – czas podróży wewnątrz rejonu komunikacyjnego i (minuty),
Pow – powierzchnia rejonu komunikacyjnego i (km^2),
$\overline{V_{ii}}$ – średnia prędkość podróży wewnątrz rejonu komunikacyjnego i (km/h),



I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 5.9. Względne przyrosty czasu przejazdu pomiędzy gminami w poszczególnych województwach a ich stolicami w związku z wystąpieniem powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

konieczne jest określenie średniej prędkości podróży wewnątrz każdej z gmin w Polsce. Nie ustalono jej arbitralnie, lecz na bazie modelu prędkości ruchu. Dla każdej z gmin wyselekcjonowano fragment sieci drogowej (jej duża gęstość na to pozwoliła) w jej granicach i na podstawie długości odcinków i wyznaczonej prędkości poruszania się po nich ustalono średnią dla rejonu komunikacyjnego. Z selekcji wyłączono autostrady i drogi ekspresowe. Są to bowiem klasy dróg, które tylko w nielicznych przypadkach wykorzystywane są do podróży wewnątrzgminnych, np. odgrywają rolę obwodnic dużych ośrodków miejskich. Ingerencja w komponent transportowy na poziomie potencjału własnego występuje w postaci wyłączania z grupy odcinków, na bazie których obliczana jest średnia prędkość podróży, tych które ulegają zalaniu lub „odcięciu" w przypadku wystąpienia powodzi w którymś z rozpatrywanych scenariuszy. Tak więc każdej przeprowadzanej symulacji towarzyszy jednoczesna zmiana zarówno komponentu użytkowania przestrzeni, jak i transportowego.

Kolejnym nieodłącznym elementem metody dostępności potencjałowej mającym zasadnicze znaczenie dla uzyskiwanych wyników jest opór przestrzeni oraz jego funkcja. Przyrastającemu czasowi podróży pomiędzy punktem źródłowym a celem towarzyszy spadek jego atrakcyjności. Kluczowe więc staje się określenie cech (wielkości i dynamiki) tej redukcji. Ustalenia wartości parametrów determinujących tę własność powinny uwzględniać szeroką grupę zmiennych cechujących rozpatrywaną podróż (Geurs, Ritsema van Eck 2001, Condeço-Melhorado i in. 2013, Martinez i Viegas 2013, Östh i in. 2016). Wyboru wymaga również funkcja matematyczna, która wykorzystywana będzie dla funkcji oporu przestrzeni (Spiekermann i Schürmann 2007, Rosik 2012, Spiekermann i in. 2013, Stępniak i Rosik 2018, Rosik i in. 2020). Kształt charakterystyczny dla każdej z nich, a co za tym idzie szybkość spadku atrakcyjności celu, dobierany jest do długości rozpatrywanych podróży. Ponieważ w prezentowanym badaniu założono analizę zmian dostępności potencjałowej przy uwzględnieniu podróży krótkich i długich, użyto funkcji eksponencjalnej, której kształt optymalnie odpowiada obu długościom (Stępniak i Rosik 2013, Rosik i in. 2015, Rosik i Stępniak 2015). Korzystając z licznych badań poświęconych tematyce oporu przestrzeni prowadzonych w IGiPZ PAN, przyjęto następujące parametry β: dla podróży krótkich 0,034657, dla podróży długich 0,011552 (Rosik i in. 2018, Stępniak i Rosik 2018). Zastosowanie pierwszego z nich powoduje spadek atrakcyjności celu podróży do 50% przy podróży trwającej 20 minut (podróże krótkie, np.: dojazdy do pracy/szkoły), wprowadzenie drugiego natomiast taką samą redukcję powoduje przy podróży trwającej godzinę (podróże długie, np. turystyczne). Wzór eksponencjalnej funkcji oporu przestrzeni w badaniach dostępności potencjałowej przyjmuje postać:

$$f_{dd} = \exp(-\beta t_{ij})$$

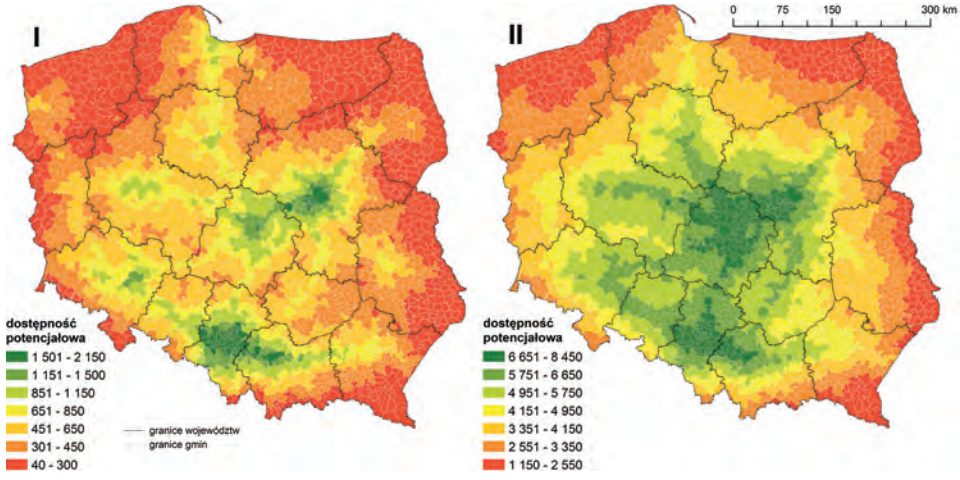
gdzie:
f_{dd} – funkcja oporu przestrzeni,
t_{ij} – czas podróży pomiędzy gminami i i j (minuty),
β – parametr beta (dla podróży krótkich 0,034657; dla podróży długich 0,011552).

Uwzględnienie potencjału własnego rejonów komunikacyjnych i funkcji oporu przestrzeni przekłada się na wzór na dostępność potencjałową w postaci:

$$A_i = M_i f_{dd}(t_{ii}) + \Sigma M_j f_{dd}(t_{ij})$$

gdzie:
A_i – dostępność potencjałowa rejonu komunikacyjnego i,
M_i – masa własna rejonu komunikacyjnego i (liczba ludności),
M_j – masa rejonu komunikacyjnego j (liczba ludności).

W celu określenia zmian (bezwzględnych i względnych) w poziomie dostępności potencjałowej towarzyszących wystąpieniu powodzi w poszczególnych scenariuszach należało obliczyć jej wartość w sytuacji „normalnej" dla rozpatrywanych podróży krótkich i długich (ryc. 5.10).



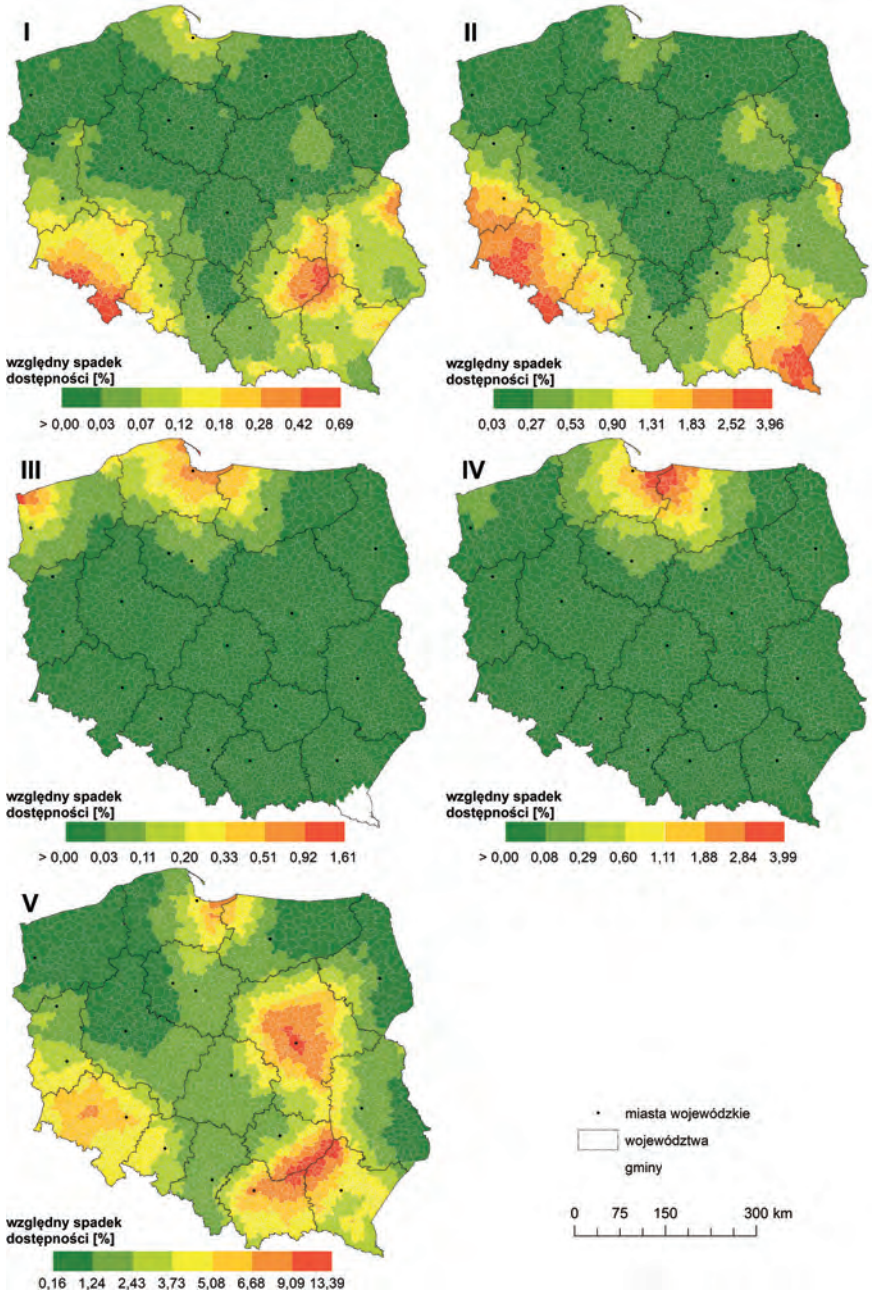
Ryc. 5.10. Dostępność potencjałowa gmin w przypadku podróży krótkich (I) i długich (II) w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W pewnym stopniu ujawnia się tutaj jedna ze słabości podejścia potencjałowego, polegająca na względnie niższej dostępności obszarów na krańcu zasięgu przestrzennego analizy (Geertmann i Ritsema Van Eck 1995). Po obliczeniu dostępności potencjałowych, uwzględniających zmodyfikowane przez powódź macierze czasu podróży pomiędzy rejonami komunikacyjnymi, zmodyfikowane czasy podróży wewnątrz rejonów komunikacyjnych oraz zmodyfikowane masy, możliwe było porównanie otrzymanych rezultatów z wariantem bazowym, odpowiednio dla podróży krótkich i długich. Zdecydowano, że wyniki zestawień będą prezentowane w ujęciu względnym (Rosik i in. 2012). Na rycinach 5.11 i 5.12 ukazano względne zmiany dostępności potencjałowej powstałe na skutek redukcji mas rejonów komunikacyjnych w poszczególnych scenariuszach powodziowych, odpowiednio dla podróży krótkich i długich (nie wprowadzono zróżnicowania przestrzennego wystąpienia powodzi). Dla porównywalności wyników zastosowano ujednolicone liczby i rozpiętości przedziałów klasowych wartości procentowych zmian potencjału dla obu długości podróży. Istotności badań dotyczących roli komponentu ludnościowego w zmianach dostępności dowodzi między innymi praca Stępniaka i Rosika (2018). Prowadzili oni analizy, biorąc pod uwagę również komponent transportowy uwzględniający liczne inwestycje infrastrukturalne i wpływ zróżnicowanych parametrów oporu przestrzeni.

Względne spadki dostępności potencjałowej są naturalnie znacznie bardziej dotkliwe w przypadku podróży krótkich, gdzie dużą rolę odgrywa potencjał własny rejonu komunikacyjnego, więc również bardziej znacząca jest jego redukcja. Największe uszczuplenia mas, towarzyszące zniszczeniu wałów przeciwpowodziowych, sięgające ponad 90% stanu wyjściowego, przyczyniły się do obniżenia dostępności potencjałowej nieprzekraczającego nawet 13,5%, choć scenariusz ten wyraźnie najmocniej odcisnął piętno na poziomie dostępności, zarówno w zakresie liczby gmin objętych spadkiem, jak i jego wielkości. Redukcja mas, charakterystyczna dla pozostałych scenariuszy powodziowych, w przypadku podróży krótkich jest znacznie mniej dotkliwa dla dostępności potencjałowej – względne spadki nie przekraczają tutaj 4%, a występują również rejony komunikacyjne, które spadku w ogóle nie odnotowały.

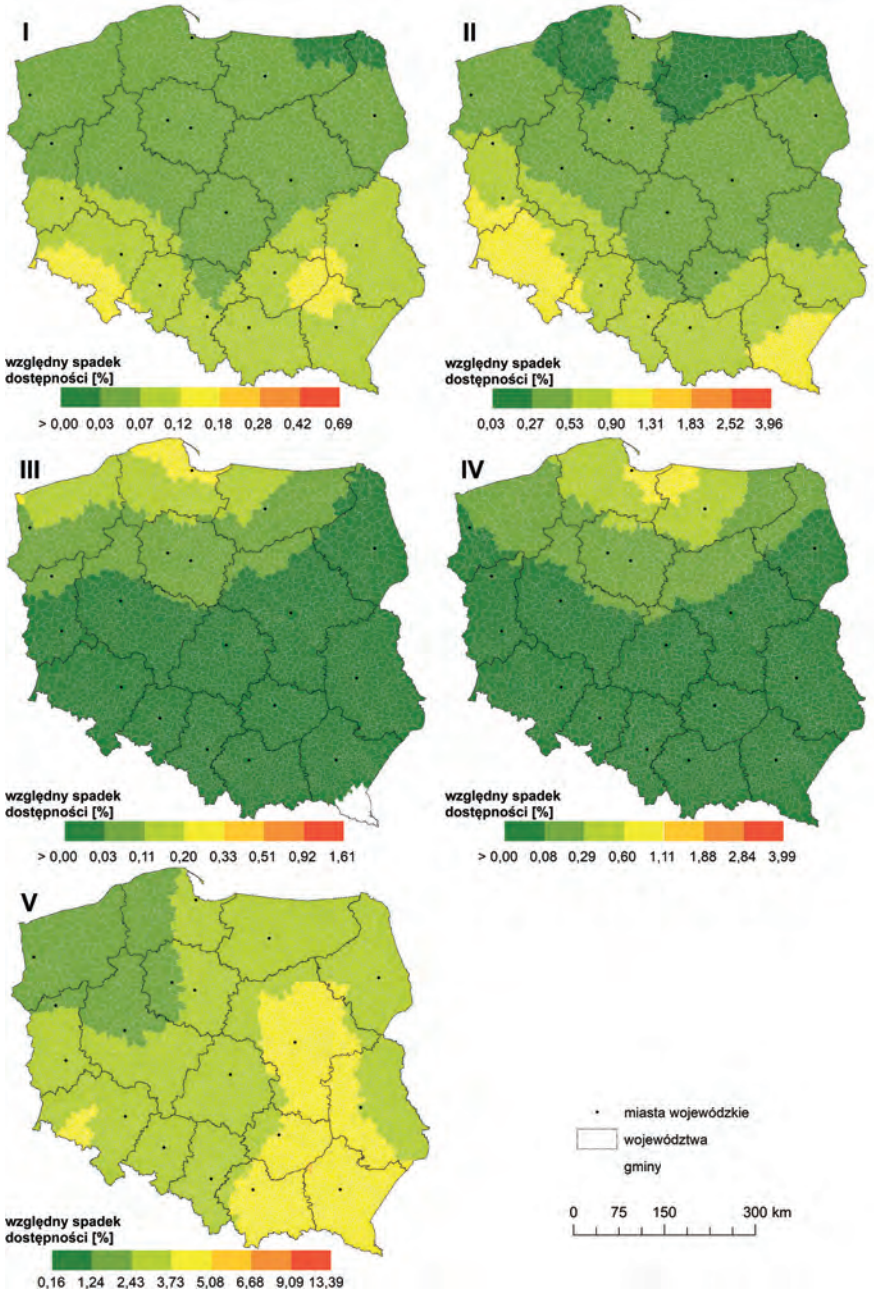
Przyjęcie parametru funkcji oporu przestrzeni dla podróży długich wyraźnie redukuje negatywne skutki zmniejszenia mas rejonów komunikacyjnych, pozostawiając ich rozkład przestrzenny bez zmian. Uwidacznia się tutaj bardzo istotna rola funkcji oporu przestrzeni, którego nawet wydawać by się mogło niewielka zmiana może pociągnąć za sobą istotne różnice w ostatecznych wynikach analizy. Wrażliwość ta rozpatrywana bywa jako jedna ze słabości podejścia potencjałowego. Podobnie zresztą jak prezentowanie jej wyników bez jednostek, co utrudniać może interpretacje. Stąd, tak jak w przedstawianym badaniu, często pojawiające się podejścia relatywne.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 5.11. Względne spadki dostępności potencjałowej gmin (podróże krótkie) w związku z wystąpieniem powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 5.12. Względne spadki dostępności potencjałowej gmin (podróże długie) w związku z wystąpieniem powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

5.3. Obciążenie sieci drogowej

5.3.1. Zagadnienia wprowadzające

Drugim z podejść do określenia wpływu powodzi na funkcjonowanie transportu drogowego była analiza zmian obciążenia sieci drogowej. Ma ona za zadanie poszerzyć wyniki badania opartego na metodzie analizy dostępności transportowej o informacje, w jaki sposób wyłączenia poszczególnych odcinków sieci drogowej czy redukcja potencjału produkcji ruchu mogą przełożyć się na zmiany wielkości potoków ruchu oraz ścieżki ich przepływu. Możliwość śledzenia wolumenu i rozkładu przestrzennego wzrostów i spadków liczby pojazdów, które pojawiają się w związku z symulacją danego scenariusza powodzi na określonym obszarze, uszczegóławia dane na temat zdolności systemu transportu drogowego do reagowania na wystąpienie sytuacji nietypowej i dostosowania się do zaistniałych ograniczeń (Cox i in. 2011, Berle i in. 2013). Poza diagnozą dotyczącą elastyczności sieci podejście to weryfikuje także istotność tych elementów sieci, które ulegają zalaniu lub „odcięciu", dla całego systemu drogowego w kraju w formie sumy konsekwencji ujętej tutaj w postaci wielkości ruchu przełożonego, wzbudzonego oraz wytłumionego. Ujawnia się tym samym poziom wariantowości całego systemu, bowiem wprost uwidaczniają się te odcinki sieci, które przejmują funkcje pełnionych przez inne, dotknięte negatywnym oddziaływaniem zdarzenia nietypowego w postaci zalania przez wody powodziowe. Zdefiniowane za pomocą metod badania dostępności transportowej zróżnicowanie potencjalnej wrażliwości sieci transportu drogowego na poszczególne scenariusze powodziowe można więc, posługując się analizą zmian obciążenia sieci, znacząco urzeczywistnić.

Modelowanie symulacyjne ruchu[1] to zagadnienie łączące w sobie wiele podejść metodologicznych i praktycznych. Związane jest ono z modelowaniem matematycznym (stanowiącym zbiór cząstkowych modeli ekonometrycznych) (Karoń i Łazarz 2010). Dla dużych obszarów wymaga ono znacznej ilości zróżnicowanych danych, które zawierają charakterystykę: mieszkańców (społeczną, ekonomiczną, demograficzną oraz ich podróże i preferencje w zakresie wyboru środków transportu), obszaru badań (m.in. rozmieszczenie ludności, atraktorów

[1] Podstawowy podział modeli symulacyjnych oparty jest na kryterium skali. Wyróżnia się trzy podstawowe podejścia: mikro-, mezo– i makrosymulacje. Mikrosymulacyjne modele opisują zachowania jednostek wchodzących w skład potoku ruchu i relacje, jakie pomiędzy nimi występują. Modelowanie mezosymulacyjne ma pośredni poziom szczegółowości i opisuje zachowania jednostek w potokach ruchu bez ukazywania relacji pomiędzy nimi. Modelowanie makrosymulacyjne (wykorzystywane w przedłożonych badaniach) opisuje ruch na wysokim poziomie agregacji danych (potoki ruchu), nie skupiając się na jego elementach składowych (pojedynczych pojazdach).

i generatorów ruchu, strukturę funkcjonalno-przestrzenną) oraz sieci transportowej i podsystemów transportowych (Komar i Wołek 1994).

Modelowanie oraz prognozowanie ruchu to stosunkowo młoda, ale bardzo dynamicznie rozwijająca się dziedzina nauki, która jest ściśle powiązana z zagadnieniem planowania systemów transportowych (Hensher i Button 2000). W połowie XX wieku powstały dwie bardzo ważne teorie dotyczące modelowania podróży: metoda Fratara oraz model grawitacyjny. Pierwsza z nich ma zastosowanie w prognozowaniu ruchu opartym na mnożeniu macierzy ruchu przez macierz wskaźników wzrostu na poszczególnych relacjach (Imamura 1989, Dybicz 2009, Junming i in. 2013, Bartuška i in. 2015). Z kolei druga ze wspomnianych metod to tzw. model grawitacyjny. Opiera się na założeniu, że liczba podróży pomiędzy rejonami komunikacyjnymi jest proporcjonalna do ich wielkości (np. liczby mieszkańców i miejsc pracy), zaś odwrotnie proporcjonalna do odległości między nimi. Podobnie jak w przypadku metody dostępności potencjałowej, zarówno znaczenie mas, jak i opory przestrzeni warunkowane są stosownymi funkcjami matematycznymi. Wykorzystanie tej metody umożliwia prognozowanie liczby podróży w oparciu o przewidywane zmiany czynników uwzględnianych w modelowaniu, np. demograficznych czy związanych z zatrudnieniem (Dybicz 2009, Noulas i in. 2012, Voorhees 2013). W dalszej kolejności powstawały teorie dotyczące podziału podróży na poszczególne środki transportowe oraz sposoby wprowadzania podróży do sieci, czyli rozkładania ruchu. Dzięki nim stworzono kompleksowe pojęcie modelu ruchu. Został on nazwany czterostadiowym modelem ruchu (ang. *four-step model*). Bywa także wykorzystywany do badań nad wrażliwością sieci transportowych (Kim i Yeo 2016). Jest rodzajem matematycznego modelu podróży (zawiera opis związków zachodzących między komponentami struktury podażowej i popytowej transportu oraz jego otoczenia, a także zbiór algorytmów pozwalających rozwiązywać konkretne problemy decyzyjne związane z funkcjonowaniem systemów transportowych). W związku z tym kluczową rolę w modelu podróży odgrywają model podaży oraz model popytu (Ortuzar i Wilumsen 2001). Model ten składa się z czterech następujących stadiów, opisanych odrębnymi modelami matematycznymi: (1) fazy generacji podróży, (2) fazy rozkładu przestrzennego podróży, (3) fazy podziału zadań przewozowych oraz (4) fazy rozkładu ruchu na sieć transportową (Hensher i Button 2000). Pierwsze trzy stadia stanowią model popytu, a więc określane są w nich potrzeby transportowe realizowane w wyodrębnionej jednostce terytorialnej podzielonej na zawarte w jej granicach rejony komunikacyjne i wydzielone w jej granicach układy transportowe (Krych i Kaczkowski 2010). Modelowanie rozkładu ruchu na sieć jest niemal niewykonalne bez specjalistycznego oprogramowania (Bieńczak i in. 2014). Rozkład ruchu w modelu czterostadiowym na ogół zakłada (choć przyjmowane są też inne determinanty), że na sposób wyboru trasy wpływ ma minimalizacja czasu dotarcia do celu (zgodnie z I zasadą Wardropa).

Innym podejściem do symulacji ruchu jest modelowanie oparte na agentach. Architektura systemów agentowych jest dostosowana do sieci, w której ma działać, przez co bywa bardzo zróżnicowana. Podstawową jednostką systemów agentowych jest agent.

> Agentami mogą być zarówno pojedyncze jednostki, jak i grupy pieszych, kierowców, pojazdów. Agent dąży do osiągnięcia ustalonego celu, zbierając informacje ze środowiska, w którym się porusza. Na podstawie odpowiednio zaimplementowanych algorytmów, wiedzy oraz zbieranych na bieżąco danych ze środowiska agenci są w stanie podejmować autonomiczne decyzje prowadzące do osiągnięcia ustalonego celu.
>
> Renkiel, 2014 s. 20.

Systemy wieloagentowe (ang. *multi-agent systems*) są jednym z obszarów badania rozproszonej sztucznej inteligencji (ang. *distributed artificial inteligence* – DAI) (Jąkała i Michno 2004). Znajdują zastosowanie przy modelowaniu i symulacjach ruchu, a dzięki odpowiednim informacjom gromadzonym na bieżąco ze środowiska przez agentów symulacja staje się dokładniejsza. Właściwie zaprojektowana architektura systemu i odpowiednie przydzielenie zadań agentom umożliwia przeprowadzenie analiz opartych na różnych scenariuszach.

Literatura przedmiotu dotycząca tematyki modelowania i prognozowania ruchu jest bardzo bogata zarówno za granicą (chociażby Zhang i in. 1997, Teodorovic 2003, Barcelo i in. 2005, Geroliminis i Daganzo 2007, Stathopoulos i in. 2008, Fellendorf i Vortish 2010, Moretti i in. 2015, Jia i in. 2017, Fu i in. 2019, Barmpounakis i Geroliminis 2020), jak i w Polsce (np. Dybicz 2001, Karoń i in. 2010, Krych i in. 2012, Bieńczak i in. 2014, Romanowska i Jamroz 2015, Dybicz i in. 2018, Żochowska i Karoń 2018, Drabicki i in. 2019, Szarata i Nosal Hoy 2019). W skali ogólnopolskiej powstały jak dotąd dwa modele ruchu – Krajowy Model Ruchu opracowany przez Politechnikę Warszawską w 2007 r. oraz model opracowany w ramach projektu KoMaR[2] w roku 2018 przez zespół badawczy reprezentujący IGiPZ PAN, Politechnikę Krakowską im. Tadeusza Kościuszki i Uniwersytet Marii Curie-Skło-

[2] Umożliwia on badanie ruchu pojazdów samochodowych w oparciu o sieć składającą się z 15 typów odcinków dróg i 2321 wewnętrznych rejonów transportowych (poziom gminy). Sieć składała się z 14 069 odcinków obejmujących wszystkie drogi kategorii dróg wojewódzkich i krajowych oraz wybrane odcinki dróg powiatowych i gminnych. Model prędkości zastosowany w analizach był wypadkową dotychczas rozwijanego w tym ośrodku modelu prędkości ruchu oraz prędkości modelowych wynikających z przeprowadzonej symulacji bazowej. Model był kalibrowany w oparciu o pomiary GPR z 2010 roku. Uwzględnia on sześć motywacji podróży, z czego trzy o charakterze obligatoryjnym (dojazdy do pracy, do szkoły wyższej, podróże biznesowe) oraz trzy fakultatywne (na zakupy, odwiedziny krewnych i znajomych oraz podróże turystyczne).

dowskiej w Lublinie (Rosik i in. 2018). Aktualnie (w czasie pracy nad monografią) powstaje nowa wersja Krajowego Modelu Ruchu (uwzględniająca inne środki transportu) opracowywana przez konsorcjum Politechniki Warszawskiej oraz Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki.

Mobilność jest obrazem relacji pomiędzy systemem transportowym a jego otoczeniem. W badaniach z zakresu geografii transportu na ogół za mobilność przyjmuje się rzeczywiste przemieszczenia ludzi, przedmiotów, kapitału i informacji w różnych przestrzennych skalach (Taylor 2004, Hannam i in. 2006, Cresswell 2011, Gadziński i Goras 2019), choć socjologowie zauważają, iż mobilność poza tą fizyczną może być także wirtualna lub wyobrażeniowa (Szerszynski i Urry 2006). Badania mobilności przestrzennej mają na celu analizę procesów ruchliwości terytorialnej w specyficznych warunkach geograficznych (Nutley i Thomas 1995; Kraft 2014).

Z uwagi na duże zróżnicowanie w zakresie zarówno odległości obserwowanych ruchliwości, jak i ich charakteru czasowego (codziennej powtarzalności lub jednorazowego ruchu związanego ze zmianą np. miejsca zamieszkania) Kaufmann (2002) usystematyzował cechy mobilności, odnosząc jej motywy do jej dwóch podstawowych charakterystyk (czasu i przestrzeni). W efekcie wyodrębnił mobilność krótkoterminową (ang. *short duration*) i długoterminową (ang. *long duration*), a przestrzeń podzielił na dwa rodzaje obszarów: wewnątrz obszaru zamieszkania (ang. *internal to the living area*) i poza miejscem zamieszkania (ang. *near the outside of the living area*). Opierając się na kombinacji tych cech, zaprezentował cztery formy przestrzennej mobilności. Należą do nich: mobilność codzienna (ang. *daily mobility*), wycieczki (ang. *travel*), zmiany domów (ang. *residential mobility*) i migracje (ang. *migration*). Mobilność codzienna charakteryzuje się ograniczonym do miejsca zamieszkania obszarem i krótkoterminowością (może być opisywana m.in. przez codzienne podróże do pracy, szkoły czy na zakupy). Wycieczki to przemieszczenia krótkoterminowe poza obszar zamieszkania. Przez zmiany domów wedle tego podziału należy rozumieć takie formy mobilności, które są długoterminowe, ale ich przestrzenny zasięg jest niewielki. Migracje z kolei to mobilność długoterminowa na zewnątrz regionu zamieszkania. W kontekście przedstawianych analiz skupiono się na obydwu wymiarach mobilności krótkoterminowej. Jest ona częścią aktywności człowieka, polegającą na dokonywaniu wyborów związanych z przemieszczeniem się. Wybory te w pierwszej kolejności mają charakter binarny (realizować potrzebę transportową lub pozostać w miejscu). W przypadku realizacji potrzeby przemieszczenia się w kontekście parametrów podróży decyzje te są związane z określeniem celu, trasy, terminu, środka lokomocji (Kruszyna 2014). Podstawowym przejawem krótkoterminowej mobilności przestrzennej jest ruch w sieci transportowej (stanowiącej nośnik relacji pomiędzy źródłem a celem podróży).

Rosik i in. (2018, s. 15) wskazują, że mobilność z wykorzystaniem transportu indywidualnego, której swego rodzaju produktem jest obciążenie sieci drogowej,

jest warunkowana wieloma czynnikami, które można przypisać generalnie do struktury przestrzennej, cech społeczno-gospodarczych i demograficznych gospodarstw domowych, jakości sieci drogowej i oferty transportu zbiorowego oraz sytuacji związanej z podróżą (m.in. jej motywacja). W kontekście okoliczności podróży ze względu na cel realizowanego badania na nieco więcej uwagi zasługują czynniki przyrodnicze. Do tej grupy elementów kształtujących w większym bądź mniejszym stopniu poziom mobilności (z wyłączeniem ich wpływu na infrastrukturę) zalicza się na ogół warunki meteorologiczne i ukształtowanie terenu. W badaniach systemów transportowych o zasięgu miejskim dostrzegalne są różnice w zakresie użytkowania poszczególnych środków transportu w zależności od pogody (na ogół takich jej elementów jak temperatura i wilgotność powietrza, prędkości wiatru, insolacja i opady) (Klemm 2013). Wpływ ukształtowania terenu na podział modalny i poziom mobilności jest zwykle uzależniony od charakterystyki podróżnych (wiek, stan zdrowia podróżujących) oraz rodzaju potrzeb transportowych (czas trwania podróży niezmotoryzowanej i intensywność aktywności związanej z przemieszczeniami). Znaczenie większości zaprezentowanych elementów przyrodniczych w kształtowaniu mobilności jest uzależnione od tzw. klimatu społeczno-politycznego (Radzimski 2012). Społeczeństwa proekologiczne, funkcjonujące w sprzyjającym nieemisyjnemu transportowi otoczeniu politycznym, ulegają w mniejszym stopniu presji pochodzącej ze środowiska naturalnego. Rozpatrywane w prezentowanej pracy zdarzenia nietypowe można więc zakwalifikować do trzech z powyższych grup. Wpływać mogą bowiem na relacje pomiędzy potencjałem produkcji ruchu a potencjałem atrakcji ruchu, mogą oddziaływać na stan sieci drogowej oraz bez wątpienia zmieniają okoliczności samej podróży.

By określić, jak kombinacja tychże czynników modyfikujących w postaci wystąpienia powodzi w poszczególnych scenariuszach i obszarach sieci drogowej przekłada się na zmiany obciążenia sieci drogowej, przeprowadzono serie symulacji zmian rozkładu ruchu towarzyszącego realizacji podróży w dwóch motywacjach obligatoryjnych: dojazdach do pracy oraz podróżach służbowych. Wybór taki podyktowany był właśnie ich obligatoryjnym charakterem oraz tym, że reprezentują podróże o różnych długościach (dojazdy do pracy – podróże krótkie, zaś podróże biznesowe – podróże długie), analogicznie do badań dostępności potencjałowej. Przyjęto bowiem, że w przeciwieństwie do podróży fakultatywnych (np. odwiedziny znajomych i krewnych czy podróże turystyczne) w przypadku dojazdów do pracy i podróży służbowych rezygnacja z nich będzie stanowiła niewielki udział decyzji podejmowanych przez podróżujących wobec zaistnienia dodatkowego czynnika zwiększającego opór przestrzeni, jakim jest wystąpienie powodzi. W perspektywie krótkookresowej (a z taką mamy do czynienia w przypadku powodzi) nie wystąpi też zmiana celów podróży w przypadku tych motywacji, która wiązałaby się ze zmianą miejsca pracy lub siedziby przedsiębiorstwa. Zakładając niezmienność podziału modalnego, podróżujący może więc jeszcze

tylko zmienić porę rozpoczęcia swojej podróży albo (co podlega niniejszemu badaniu) ścieżkę przejazdu. Za włączeniem do analizy dojazdów do pracy przemawia również fakt, że stanowią najistotniejszą motywację podróży (Badanie pilotażowe… 2015).

Procedurę badawczą rozpoczęto od przystosowania bazy danych obejmującej sieć drogową do potrzeb procedury rozkładu ruchu. Biorąc pod uwagę założenia funkcjonowania aplikacji wykorzystywanej w tym zadaniu (pełny opis jej działania zawarto w podrozdziale 5.3.5), konieczne było przypisanie każdemu odcinkowi sieci drogowej (poza atrybutami związanymi z modelowaniem prędkości ruchu) numeru identyfikacyjnego jego węzła początkowego oraz końcowego, które stanowiły informację o ich połączeniu z kolejnymi segmentami sieci. Następnie należało określić prędkość ruchu pojazdów w ruchu swobodnym (V_0), czyli prędkość, której nie można przekraczać na danym odcinku międzywęzłowym (Szczuraszek 2009, Szczuraszek i Chmielewski 2017), oraz modelową przepustowość danego odcinka, która definiuje modelową liczbę pojazdów transportu indywidualnego mogącą przekroczyć dany przekrój drogi w jednym kierunku w jednostce czasu (Q_{max}). W zakresie przepustowości przyjęto wartości zgodnie z zestawieniem Szczuraszka i Chmielewskiego (2017), ujęte w tabeli 5.2. Nie zdecydowano się na zastosowanie prędkości V_0 wskazanych wprost przez tychże autorów, lecz wprowadzono wartości uzyskane w ramach modelu, mając jednak na uwadze, że w dużej mierze są one wynikiem uwzględnienia prędkości w ruchu swobodnym przy jednoczesnym rozpatrywaniu czynników tę swobodę ograniczających.

Tak określone prędkości ulegają modyfikacji poprzez natężenie ruchu pojazdów. Wraz ze wzrostem ich natężenia na danym odcinku sieci spada prędkość, z jaką go pokonują (Kieć i in. 2012). Dla określenia wielkości i tempa, z jakim natężenie będzie redukować prędkość, konieczne jest wprowadzenie funkcji oporu odcinka. Zastosowano w tym celu jedną z najbardziej znanych funkcji oporu, jaką jest funkcja BPR (*Bureau of Public Roads function*), która uwzględnia czas przejazdu odcinka przy swobodnych warunkach ruchu, natężenie ruchu na odcinku oraz jego przepustowość (Dybicz 2009):

$$t_{cur} = t_0 \cdot (1 + a \cdot sat^b)$$

gdzie:

$$sat = \frac{Q}{c \cdot Q_{max}}$$

t_{cur} – czas przejazdu odcinka obciążonego natężeniem ruchu Q,
t_0 – czas przejazdu odcinka przy swobodnych warunkach ruchu,
Q – natężenie ruchu [poj/h],
Q_{max} – przepustowość [poj/h],
a, b, c – parametry.

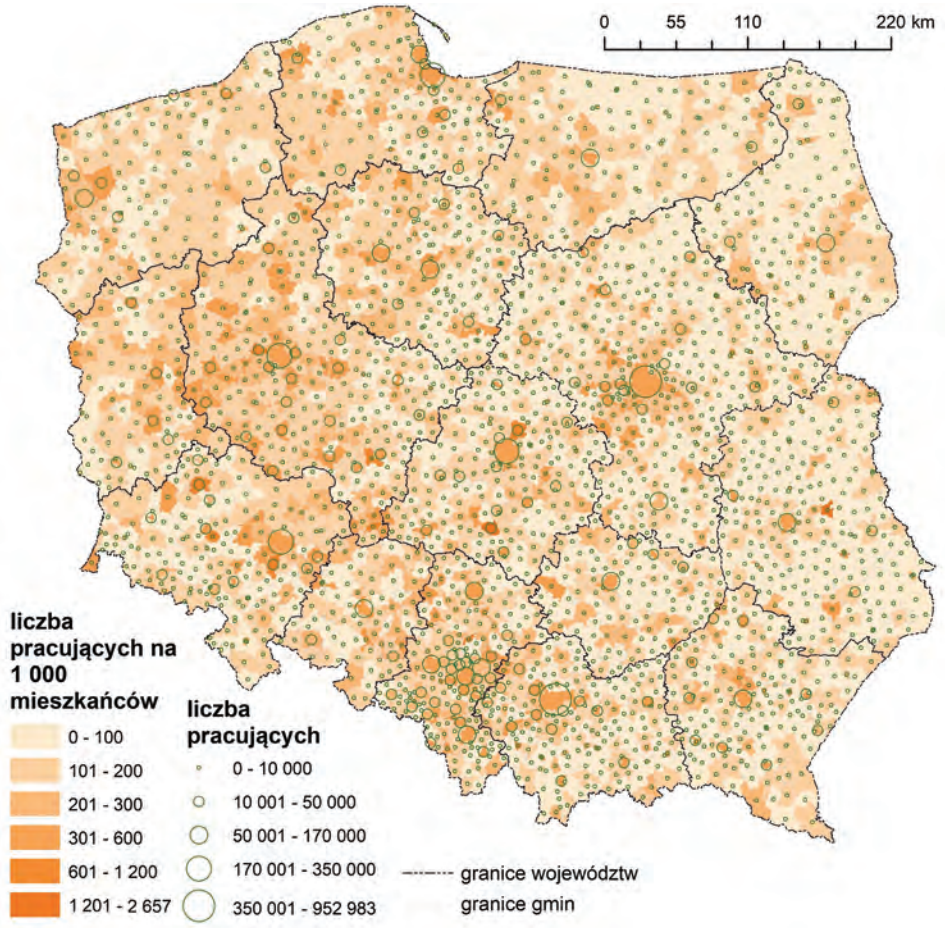
Aby określić czas przejazdu odcinka obciążanego określonym natężeniem ruchu (a tym samym prędkość V_{cur}), konieczne jest również uwzględnienie trzech parametrów funkcji (a, b, c). Ponieważ metoda doboru wartości przepustowości do odcinka sieci uwzględniała w pewnym zakresie natężenie ruchu związane z intensywnością zabudowy w sąsiedztwie odcinka, zdecydowano się na wprowadzenie parametrów zastosowanych w projekcie KoMaR[3] (Rosik i in. 2018, s. 72), a nie wartości domyślnie stosowanych np. w oprogramowaniu Visum. Autorzy projektu KoMaR zastosowali parametry skutkujące stosunkowo niewielkim przyrostem czasu przejazdu, bowiem w przypadku zastosowanej przez nich procedury ustalania prędkości w ruchu swobodnym uwzględniany był pośrednio czynnik liczby ludności w sąsiedztwie odcinka drogi (Rosik i in. 2018, s. 64-74). Wprowadzenie funkcji BPR do oprogramowania przekładało się na obniżenie prędkości przejazdu odcinka sieci przy kolejnych iteracjach.

5.3.2. Generacja podróży

Po przygotowaniu sieci drogowej oraz jej parametrów niezbędnych do tego, by dokonać późniejszego rozkładu ruchu, możliwe było realizowanie kolejnych etapów w myśl podejścia czterostadiowego. Pierwszy z nich to generacja podróży, a więc etap, podczas którego należy odpowiedzieć na pytanie, jaki cel skłania podróżujących do odbycia podróży – jaka jest jej motywacja. Tak jak już wspomniano, do badania włączono dwie motywacje: dojazdy do pracy i podróże służbowe. Konieczne było więc wyznaczenie potencjałów ruchotwórczych (produkcji i atrakcji) dla każdej z nich. Najczęściej spotykanym modelem generacji podróży jest model regresji liniowej (modele regresji wielorakiej/wielokrotnej) (Bieńczak i in. 2014). W przypadku produkcji jest to najczęściej charakterystyka demograficzna, socjoekonomiczna populacji rejonu komunikacyjnego, natomiast w przypadku atrakcji są to cechy jego zagospodarowania. W przypadku motywacji związanej z dojazdami do pracy mogłaby to być przykładowo liczba osób pracujących (ryc. 5.13) oraz liczba miejsc pracy czy też liczba podmiotów gospodarczych (Żochowska i in. 2016).

---

[3] Dla autostrad przyjęto parametry ustalone w projekcie KoMaR klasy drogi A, dla dróg ekspresowych dwujezdniowych – E2, dla dróg ekspresowych jednojezdniowych – E1, dla dróg krajowych dwujezdniowych – K2, dla dróg krajowych jednojezdniowych – K1, dla dróg wojewódzkich dwujezdniowych – W2, dla dróg wojewódzkich jednojezdniowych, powiatowych, gminnych i innych – W1.



Ryc. 5.13. Liczba pracujących oraz liczba pracujących przypadająca na 1000 mieszkańców gminy w Polsce w 2018 r.

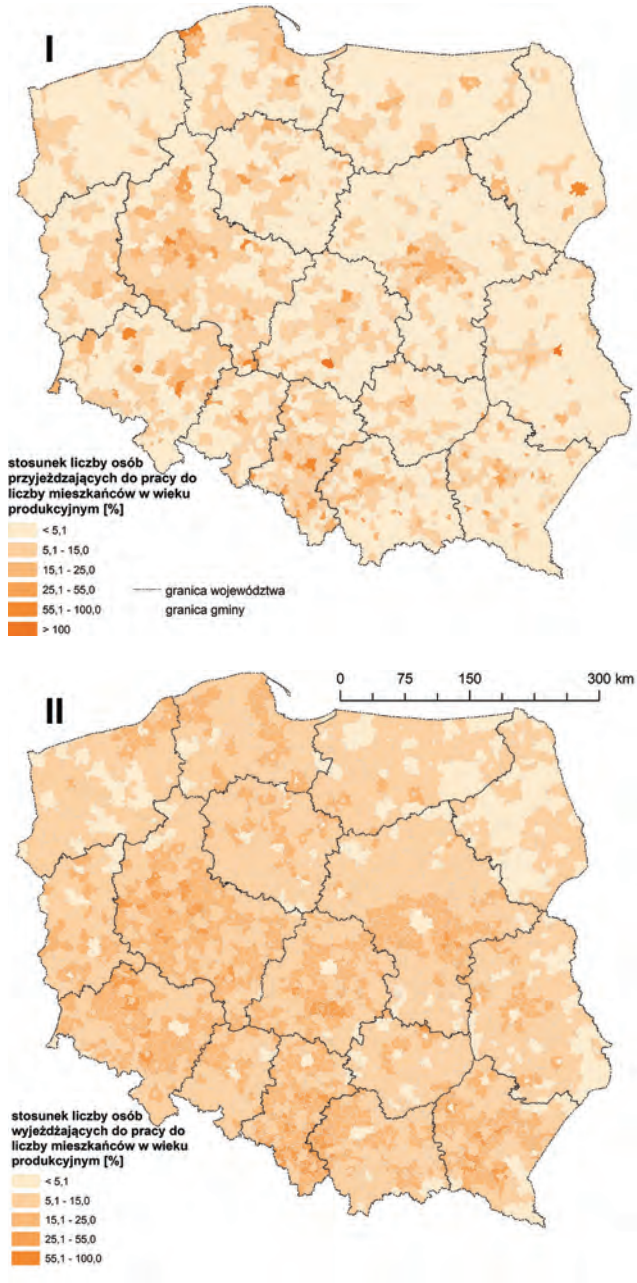
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Banku Danych Lokalnych GUS, 2018 r.

W prezentowanym badaniu w zakresie motywacji związanej z dojazdami do pracy posłużono się jednak rozwiązaniem bazującym na rzeczywistych danych dotyczących przemieszczeń związanych z zatrudnieniem, a nie do ujęcia modelowego. Wykorzystano dane GUS. obrazujące wskazane przemieszczenia w 2016 roku. Wyniki badania dojazdów do pracy pochodzą z administracyjnych źródeł danych Ministerstwa Finansów i Zakładu Ubezpieczeń Społecznych i obejmują zarówno przepływy między gminami danego województwa, jak i do gmin innych województw (Przepływy ludności… 2019). Udostępniane przez GUS zestawienia zawierają dane na temat liczby ludności, jaka przemieszcza się pomiędzy daną

parą gmin (gmina zamieszkania i gmina zatrudnienia) w związku z dojazdami do pracy. W opublikowanym przez GUS raporcie dotyczącym badania (Przepływy ludności… 2019) wskazano, że w 2016 r. do pracy dojeżdżało 3 273 515 osób. Przepływ jest definiowany przez Chojnickiego (1961) jako miara ukazująca wielkość dóbr lub liczbę osób przemieszczanych ze źródła podróży do jej celu bez podawania drogi, po której wspomniane przemieszczanie się odbywa. Dlatego też tego pojęcia nie należy stosować równoznacznie z terminem przewóz, w którym to w sposób jednoznaczny określa się drogę transportu (Potrykowski i Taylor 1982). Umieszczenie w kontekście powyższych pojęć zagadnienia podróży wydaje się być stosunkowo proste do określenia. Podróżą jest tutaj każde umotywowane dojazdem do pracy (Lijewski 1967) przemieszczenie (z wykorzystaniem jednego lub więcej przejazdów) pomiędzy źródłem a celem podróży. W tym kontekście przejazdem jest ta część podróży, która odbywa się z wykorzystaniem jednego środka transportu. Źródłem podróży jest miejsce, w którym następuje jej rozpoczęcie, zaś cel podróży to miejsce, w którym podróż się kończy. Efektem podróży jest ruch w sieci transportowej, a podstawowymi jego miarami są natężenie i gęstość ruchu (Kaczkowski i Krych 2010).

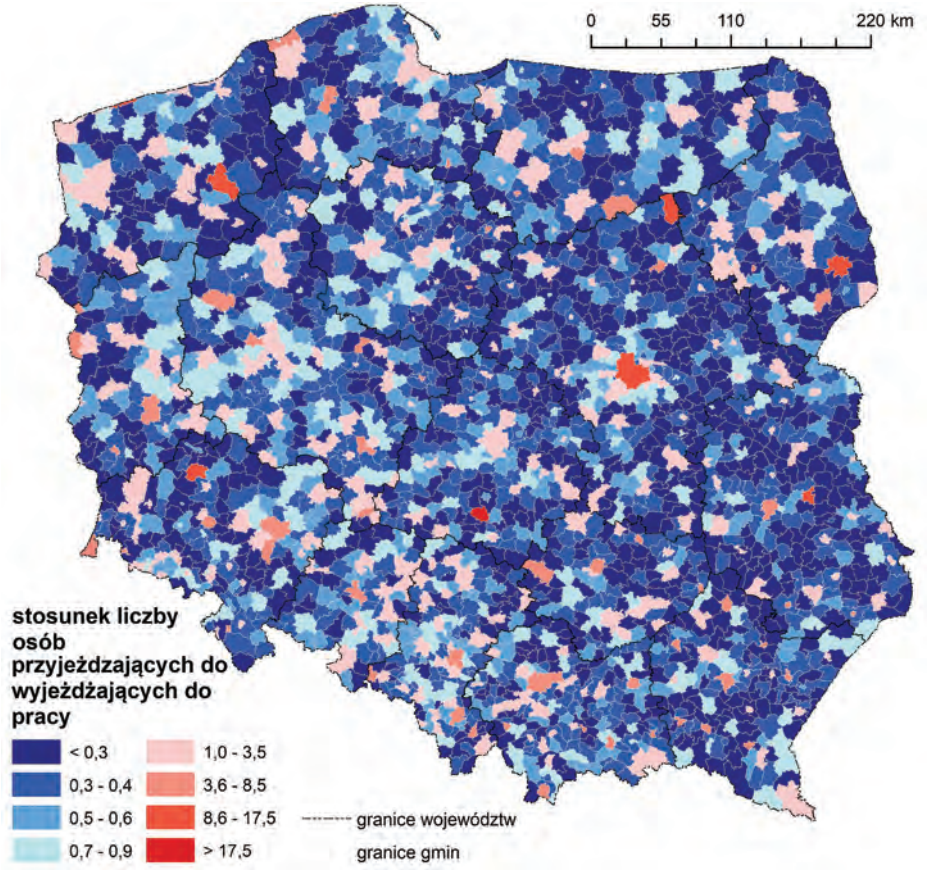
Uwzględnienie w interpretacji osób wyjeżdżających i przyjeżdżających do pracy liczby mieszkańców gminy w wieku produkcyjnym (ryc. 5.14) wyraźnie potwierdza prawidłowość, w której wysoki potencjał atrakcji ruchu koncentruje się przede wszystkim w dużych ośrodkach miejskich, natomiast gminy stanowiące ich sąsiedztwo charakteryzują się dużym potencjałem produkcji ruchu w tej motywacji.

Przyjeżdżający do pracy spoza gminy stanowią średnio blisko 6% jej ludności w wieku produkcyjnym. Zdecydowanie najwyższe udziały występują w przypadku gmin: Kleszczów (powiat bełchatowski), Puchaczów (powiat łęczyński), Kobierzyce (powiat wrocławski), Tarnowo Podgórne (powiat poznański) i Polkowice. Średnia dla udziału liczby osób wyjeżdżających przekracza 12%, a szczególnie niska jest w przypadku m.in. Krynicy Morskiej czy Świnoujścia. Zjawisko to dokładnie ilustruje również wzajemna relacja pomiędzy liczbą osób przyjeżdżających do pracy w danej gminie i wyjeżdżających do pracy poza gminę (ryc. 5.15). Wyraźnie zaznacza się przewaga jednostek z ujemnym saldem w tym zakresie, przede wszystkim we wschodniej części kraju, gdzie przewaga wyjeżdżających do pracy poza gminę jest znacznie wyższa. Jednostki szczególnie mocno przyciągające pracowników to wspomniane chwilę wcześniej miasta wojewódzkie oraz pojedyncze gminy o specyficznych uwarunkowaniach rynku pracy, jak np. Kleszczów.



Ryc. 5.14. Stosunek procentowy liczby osób przyjeżdżających do pracy spoza gminy (I) i wyjeżdzających do pracy poza gminę (II) do liczby mieszkańców gminy w wieku produkcyjnym w Polsce w 2016 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS (2019 r.) oraz Banku Danych Lokalnych GUS (2016 r.)



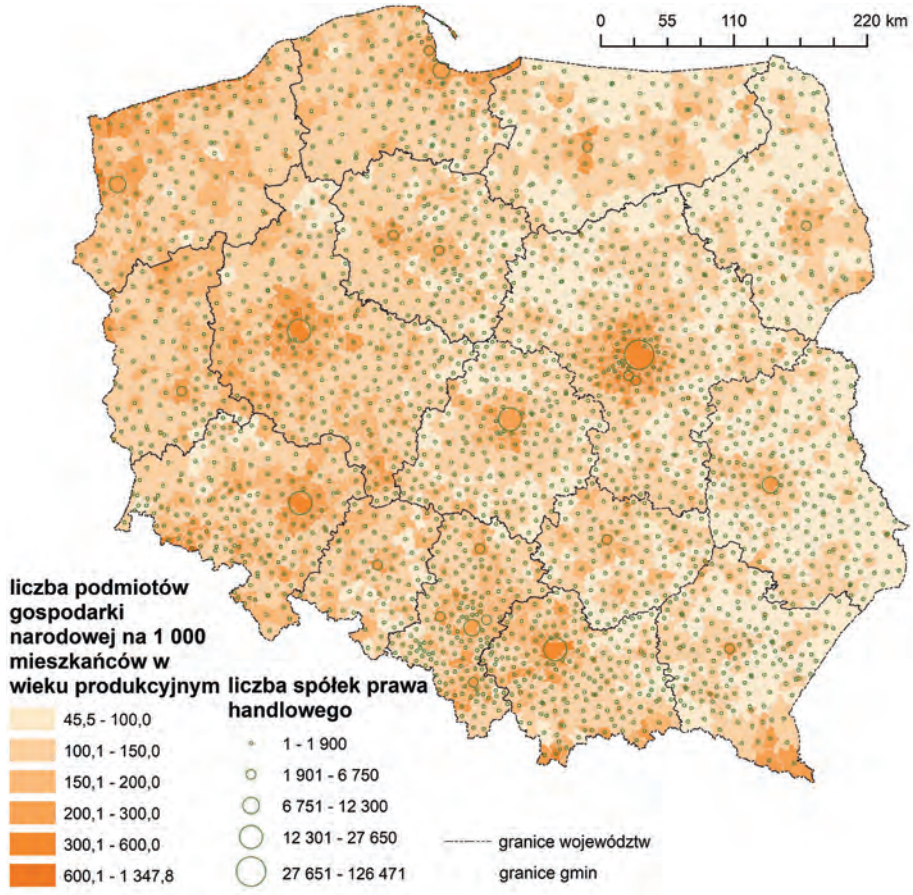
Ryc. 5.15. Dysproporcje pomiędzy liczbą przyjeżdżających do pracy w danej gminie i wyjeżdżających do pracy poza gminę w Polsce w 2016 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2019 r.

Zgodnie z bazą danych prezentującą poszczególne relacje, obejmującą tylko przemieszczenia przynajmniej dziesięciu osób, dojeżdżających jest 2 867 186 (w 34 986 relacjach) – różnica względem całkowitej liczby wynosi więc 12,4%. W przypadku poprzednich tego rodzaju badań prowadzonych przez GUS (2011) różnica stanowiła 12,6% (Dojazdy do pracy 2014). Przemieszczenia pomiędzy obszarami wiejskimi i miastami w gminach miejsko-wiejskich dotyczą niespełna 8% ludności dojeżdżającej do pracy i nieco ponad 3% relacji. Uwzględniając założenie projektu KoMaR, w myśl którego przemieszczenia trwające dłużej niż dwie godziny należy wyłączyć z zestawienia dotyczącego dojazdów do pracy (zostały one tam potraktowane jako podróże związane z motywacją dotyczącą odwiedzin krewnych i znajomych – przyjęto, że osoby dojeżdżające do pracy dłużej niż 120 minut w większości mieszkają w gminie miejsca pracy, a do domu rodzinnego

dojeżdżają przede wszystkim w weekendy; Rosik i in. 2018, s. 105), redukcja w przypadku dojazdów do pracy w 2016 r. zmniejszyła liczbę osób podróżujących o 4,5%, natomiast liczbę relacji o 10,7% (przy założeniu, że czas przejazdu samochodem osobowym ustalany jest zgodnie z modelem prędkości ruchu).

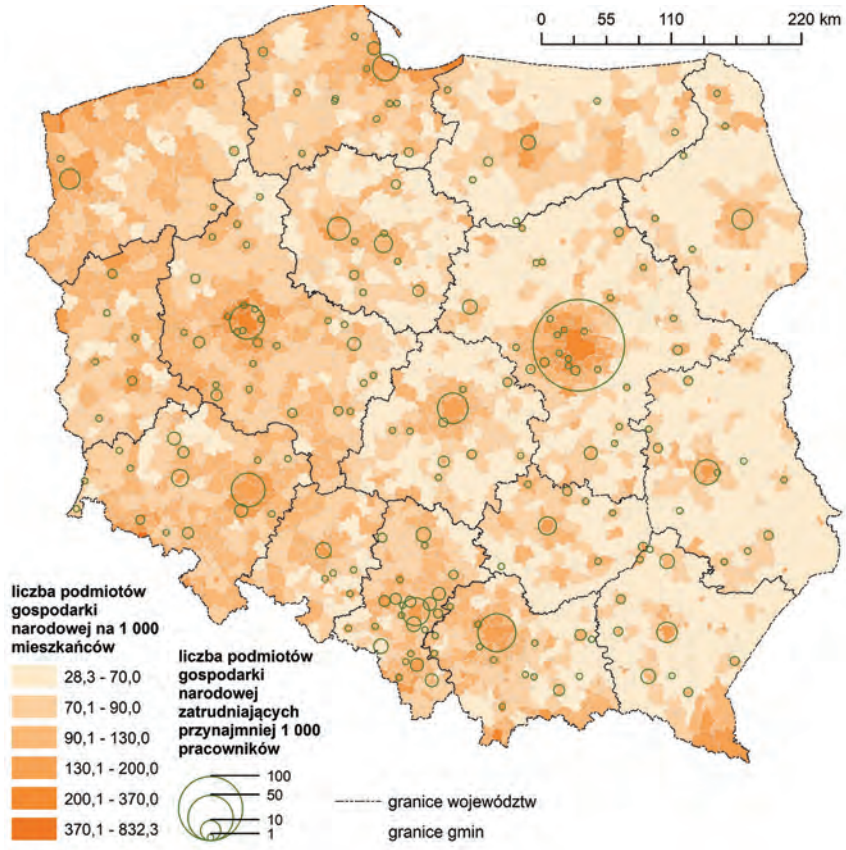
W przypadku motywacji związanej z podróżami służbowymi nie występują dane macierzowe, więc konieczne jest określenie potencjałów ruchotwórczych poprzez wskazanie ich determinant. W jedynym jak dotąd modelu ruchu o zasięgu krajowym, uwzględniającym uwarunkowania na poziomie gminnym (Rosik i in. 2018), jako zmienną charakteryzującą potencjał produkcji i atrakcji ruchu w tej motywacji wskazano liczbę spółek prawa handlowego (ryc. 5.16).



Ryc. 5.16. Liczba podmiotów gospodarki narodowej przypadająca na 1000 mieszkańców gminy w wieku produkcyjnym oraz liczba spółek prawa handlowego w gminach w Polsce w 2018 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Banku Danych Lokalnych GUS, 2018 r.

Tutaj jeszcze dobitniej niż w przypadku podróży w ramach dojazdów do pracy uwidacznia się koncentracja potencjału w największych ośrodkach miejskich. W skali kraju pociąga to za sobą bardzo duże zróżnicowanie – przy średniej 198 odchylenie standardowe przekracza 2,7 tysiąca. Bardzo wyraźna jest również olbrzymia dysproporcja w rozkładzie przestrzennym analizowanego zjawiska. W grupie znacznej większości gmin liczba spółek prawa handlowego to od kilku do kilkunastu podmiotów, podczas gdy w przypadku stolic regionów to kilkanaście czy wręcz kilkadziesiąt tysięcy spółek. Bezkonkurencyjna jest w tym zestawieniu Warszawa, co w połączeniu ze stosunkowo niewielkim oporem przestrzeni w przypadku tej motywacji skutkuje generowaniem nieporównywalnego w skali kraju ruchu pojazdów związanego z tym rejonem komunikacyjnym. Jeszcze dobitniej tę siłę widać, kiedy uwzględnione zostaną wyłącznie największe (mierzone wielkością zatrudnienia) podmioty gospodarki narodowej (ryc. 5.17).

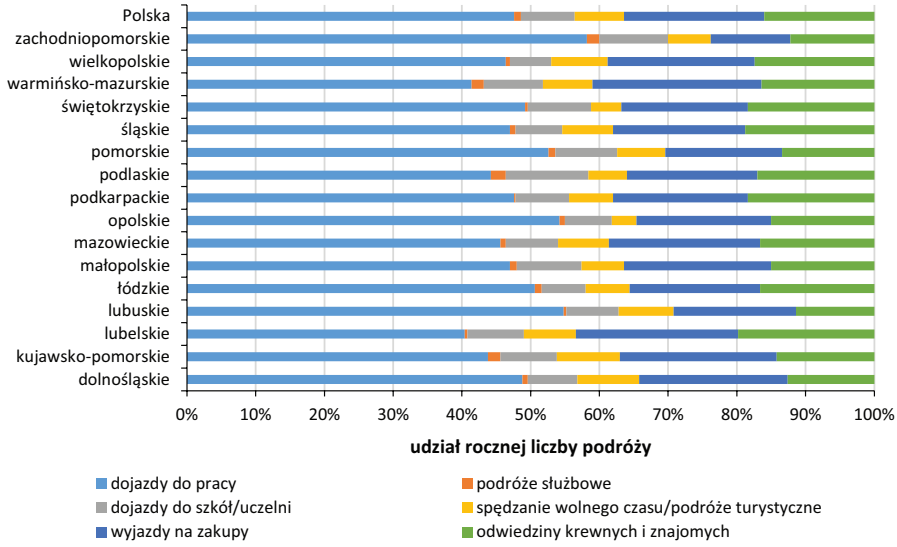


Ryc. 5.17. Liczba podmiotów gospodarki narodowej zatrudniających 1000 i więcej pracowników oraz liczba podmiotów gospodarki narodowej na 1000 mieszkańców gminy w Polsce w 2018 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych Banku Danych Lokalnych GUS, 2018 r.

W znacznie okrojonej pod tym względem grupie gmin dokładnie widać, pomiędzy którymi rejonami komunikacyjnymi odbywać się powinien największy ruch pojazdów realizujących podróże biznesowe.

Pozostając na etapie generacji ruchu, należy w tym miejscu zasygnalizować, jaki udział mają rozpatrywane w badaniu motywacje w ogóle podróży odbywanych w Polsce. Podstawą każdego modelowania (w tym modelowania ruchu) są empiryczne obserwacje. W ramach modelowania symulacyjnego ruchu wykorzystuje się informacje ilościowe (m.in. ilość i struktura pojazdów obserwowana na punktach kontrolnych rozmieszczonych w sieci transportowej oraz społeczne badania dotyczące mobilności mieszkańców). W Polsce zbierane są one cyklicznie w ramach Generalnego Pomiaru Ruchu (GPR), ale również Kompleksowych Badań Ruchu (KBR) i badań o różnym stopniu reprezentatywności, m.in. wykonanego przez GUS „Badania pilotażowego zachowań komunikacyjnych ludności w Polsce" (GUS 2015). Zgodnie z jego wynikami podróże związane z dojazdami do pracy stanowią w Polsce aż 48% podróży podejmowanych we wszelkich motywacjach, a zróżnicowanie regionalne wyrażone odchyleniem standardowym wynosi 4,8 punktu procentowego. Podróże służbowe natomiast to w tym zestawieniu motywacja skutkująca zdecydowanie najrzadziej podejmowanymi podróżami (1% ogółu) (ryc. 5.18).

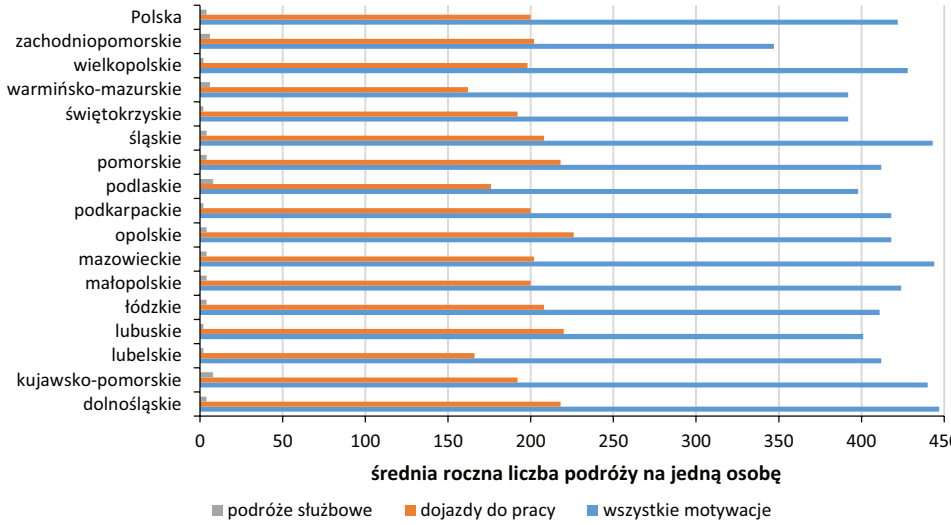


Badanie zachowań… (2015) uwzględniało dodatkową motywację w postaci powrotu do domu. Na potrzeby prezentowanego badania została ona „włączona" w inne motywacje w formie zdublowania ich wyników, np. dojazdy do pracy obejmują również powrót z pracy do domu. Zgodnie z Rosikiem i in. (2018) przez motywację związaną ze spędzaniem wolnego czasu należy rozumieć m.in. podróże turystyczne. Natomiast odwiedzinom krewnych i znajomych w badaniu GUS odpowiadały sprawy osobiste.

Ryc. 5.18. Udział rocznej liczby podróży wg poszczególnych motywacji w Polsce w 2015 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.

Przy średnio 422 podróżach odbywanych przez jedną osobę w Polsce w 2015 r. te związane z pracą stanowiły aż 200, przy jedynie czterech motywowanych służbowo (ryc. 5.19) o charakterze sporadycznym i średnio znacznie dłuższym dystansie.



Ryc. 5.19. Średnia roczna liczba podróży przypadająca na jedną osobę realizowana w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi i wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r.

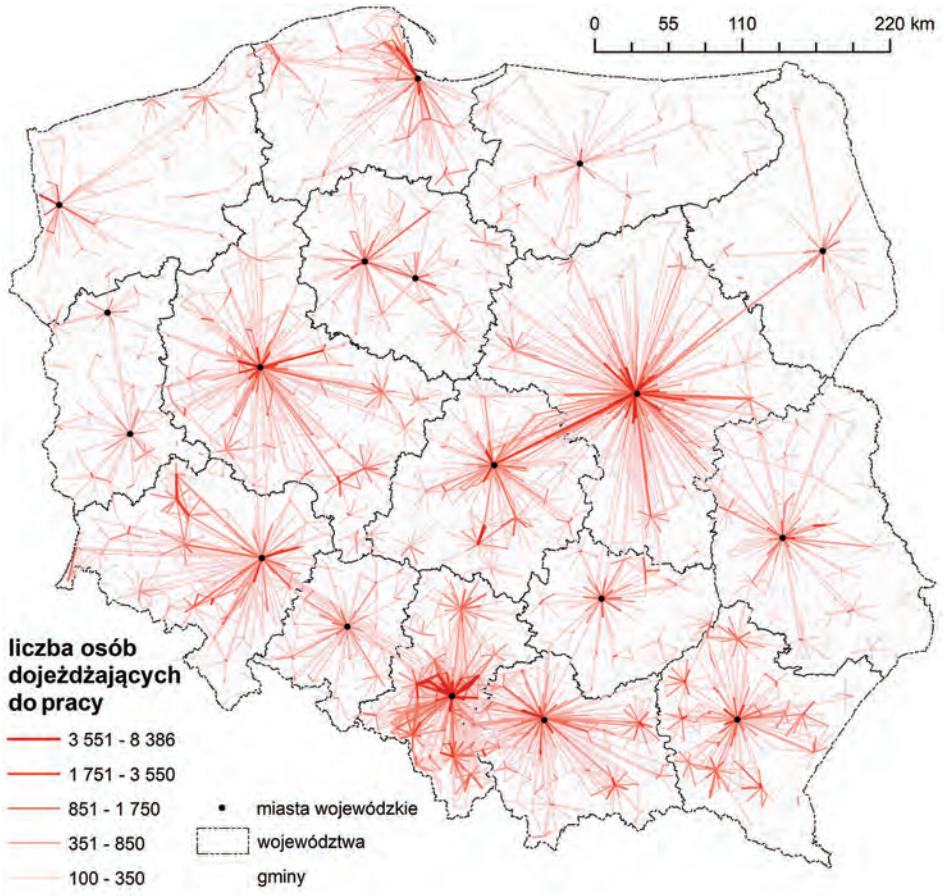
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.

Aby umożliwić porównywanie uzyskiwanych w rezultacie realizowanych na dalszych etapach wyników symulacji, dokonano, zgodnie z procedurą ujętą w projekcie KoMaR, ujednolicenia całkowitych wielkości mas potencjałów dla obu z rozpatrywanych motywacji.

5.3.3. Rozkład przestrzenny podróży i podział zadań przewozowych

Drugie stadium wymagające omówienia to rozkład przestrzenny podróży. To nic innego jak rozdzielenie potencjałów ruchotwórczych pomiędzy pary rejonów komunikacyjnych (rejony źródłowe i docelowe). W jego wyniku powstaje macierz podróży, inaczej nazywana macierzą źródło-cel (O-D matrix) o wymiarze odpowiadającym liczbie rejonów komunikacyjnych, a jej graficznym wyrazem jest więźba ruchu. W przypadku motywacji związanej z dojazdami do pracy macierz obrazująca liczbę osób dojeżdżających była zawarta w danych udostępnianych przez GUS. Należało jedynie „oczyścić" ją z tych wartości, które reprezentowały wzmiankowaną wcześniej wartość czasu podróży przekraczającą 120

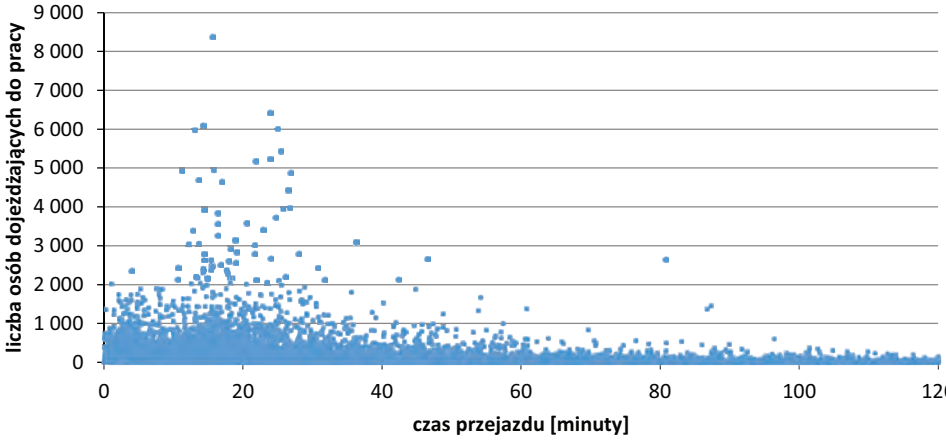
minut. Przypisanie poszczególnym relacjom międzygminnym liczby osób podróżujących na tej relacji do pracy umożliwiło skonstruowanie więźby ruchu dla tej motywacji (ryc. 5.20).



Ryc. 5.20. Liczba osób dojeżdżających do pracy w Polsce w 2016 r. (wyłączono przemieszczenia poniżej 100 osób i trwające dłużej niż 120 minut przy założeniu, że środkiem transportu jest samochód osobowy)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2019 r.

W przypadku ponad 62% relacji międzygminnych i blisko 3/4 osób dojeżdżających do pracy czas podróży nie przekracza pół godziny. Wydłużenie podróży do godziny poszerza grupę relacji o kolejnych blisko 25 punktów procentowych, a udział ludności o niespełna 18 (ryc. 5.21).



Ryc. 5.21. Liczba osób dojeżdżających do pracy w Polsce w 2016 r. w stosunku do długości trwania podróży realizowanej samochodem osobowym

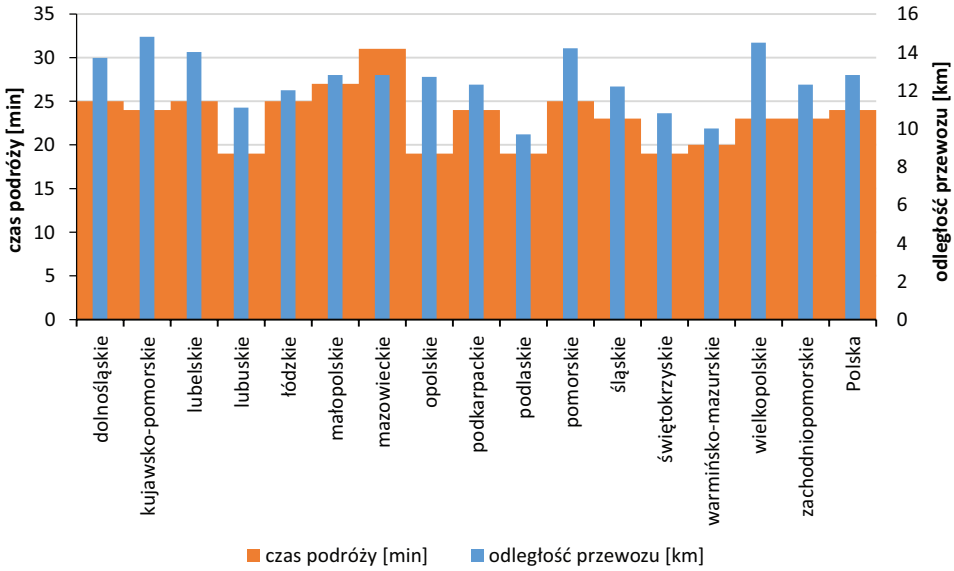
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2019 r.

Należy mieć świadomość, że część uzyskanych wyników przedstawia zafałszowany obraz zjawiska, co jest związane ze sposobem prezentacji danych źródłowych. Prezentowane są tutaj bowiem czasy podróży pomiędzy gminami (a właściwie reprezentującymi je punktami) bez uwzględniania rzeczywistych miejsc zamieszkania i zatrudnienia. Nieuwzględniane są również podróże wewnątrz gmin (poza podziałem na obszary wiejskie i miasta w gminach miejsko-wiejskich), które przecież w wielu przypadkach mogą trwać znacznie dłużej niż te związane nawet z przekraczaniem gminnej granicy. W świetle pilotażowych badań GUS średni czas dojazdu do pracy w Polsce wahał się w 2015 r. od 19 do 31 minut (ryc. 5.22).

W przypadku podróży służbowych nie dysponowano tak „wygodnymi" danymi i w związku z tym konieczne było zastosowanie klasycznego w tym zakresie modelu grawitacyjnego, w myśl którego między dwoma rejonami komunikacyjnymi odbywa się określona liczba podróży realizowanych po najkrótszej ścieżce przejazdu łączącej punkty centralne, które je reprezentują (Rudnicki 2014):

$$P_{ij} = \frac{G_i A_j f_{ij}(L_{ij})}{\sum A_j f_{ij}(L_{ij})}$$

gdzie:
P_{ij} – liczba podróży rozpoczynanych w rejonie i oraz kończonych w rejonie j;
G_i – liczba podróży generowanych w rejonie źródłowym i;
A_j – liczba podróży absorbowanych w rejonie docelowym j;
f_{ij} – wartość funkcji oporu dla relacji pomiędzy rejonem i oraz j;
L_{ij} – odległość między rejonem i oraz j.



Ryc. 5.22. Średni czas trwania podróży i odległość przewozu w dojazdach do pracy w Polsce w 2015 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.

Liczba tychże podróży rośnie wraz z wielkością potencjałów ruchotwórczych i maleje wraz z funkcją oporu przestrzeni. Rosik i in. (2018) określili dla podróży służbowych opór przestrzeni na poziomie $\beta = 0{,}046210$, którego zastosowanie skutkuje redukcją atrakcyjności celu podróży o 50% po podróży trwającej kwadrans[4].

Ustalenie parametrów funkcji oporu przestrzeni jest zadaniem niełatwym, nawet przy założeniu, że podróż odbywana jest w „normalnych" warunkach. Odzwierciedlają one szereg typowych czynników mogących oddziaływać na postrzeganie atrakcyjności celu podróży. Jeszcze trudniejszym zadaniem wydaje się próba skwantyfikowania wpływu zdarzeń nietypowych (np. takich jak klęski żywiołowe) na wielkość i dynamikę spadku atrakcyjności atrakcji generującej ruch w danej motywacji. Zakładając nawet, że na etapie generacji ruchu nie dojdzie do rezygnacji z części podróży (np. tych fakultatywnych), to szczególne okoliczności towarzyszące podróżowaniu np. w skrajnie złych warunkach atmosferycznych mogą w inny sposób zniechęcać do przejazdów w celu realizacji poszczególnych celów. Chociażby przejazdy do sklepu w związku z zakupem

[4] Wybór parametru funkcji oporu przestrzeni wynikał z poziomu dopasowania modelu (współczynnik determinacji R^2), który w przypadku podróży służbowych wyniósł w projekcie KoMaR 0,62 (Rosik i in. 2018, s. 132).

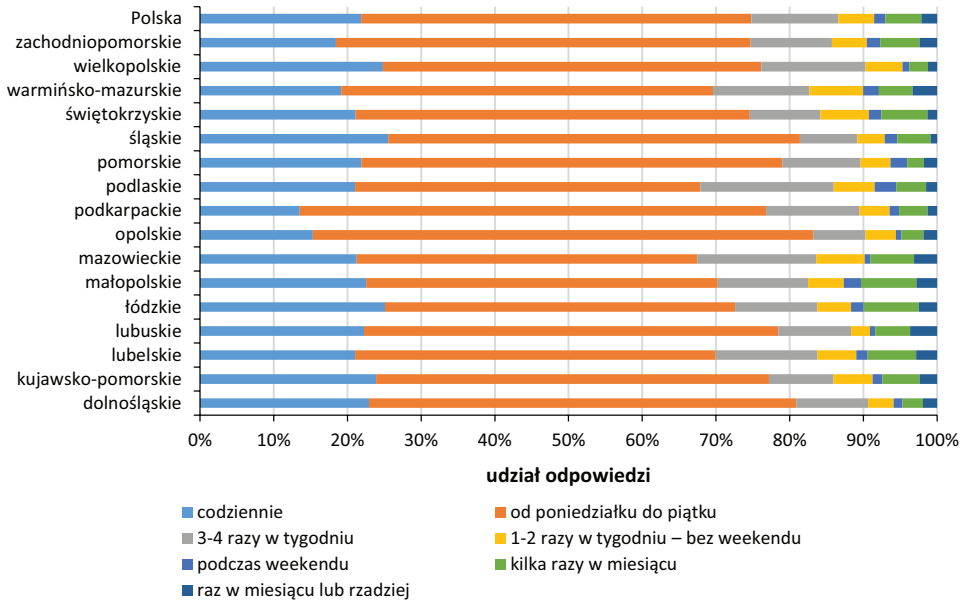
żywności realizowane na krótkich dystansach nie utracą na swej częstotliwości tak znacząco jak te, których destynacją są centra handlowe. Ich oferta handlowa i atrakcyjność jako miejsca spędzania wolnego czasu znacznie wydłuża czas, jaki klienci są skłonni przeznaczyć, aby z nich skorzystać, jednak wobec szczególnie niekorzystnych warunków ruchowych mogą okresowo stracić na swojej atrakcyjności. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na zachowania kierowców i ich skłonność do realizacji podróży w kontekście występowania zdarzeń nietypowych jest dynamika wystąpienia utrudnienia – czy daje szansę na przygotowanie się do nowych okoliczności, czy też wymusza reakcję na już zachodzące procesy.

Trzecie ze stadiów dotyczy podziału zadań przewozowych, a więc na jego etapie określa się udział poszczególnych środków transportu w podróżach. Można mówić tutaj o podziale pierwotnym, który odbywa się już na etapie generacji podróży, oraz podziale wtórnym, po rozkładzie przestrzennym podróży, który jest wynikiem uwzględnienia wielu różnych czynników (np. odległość, czas podróży) przez realizującego podróż. Wybór środka transportu w podróżach osób ma złożony charakter i zależy m.in. od: dostępności do samochodu osobowego i transportu zbiorowego, dochodu gospodarstwa domowego, postrzegania wygody, motywacji podróży czy przyzwyczajeń dotyczących zachowań komunikacyjnych. Jego ustalenie stanowi chociażby podstawę dla wymiarowania sieci transportowych (gęstość i przepustowość sieci ulicznej czy gęstość i zdolność przewozowa sieci linii transportu zbiorowego) czy oddziaływania na zachowania komunikacyjne (np. wymuszenia ograniczające udział samochodów w podróżach) (Fierek i Zak 2012, Bieńczak i in. 2015, Sawicki i in. 2016). Ponieważ całe badanie koncentruje się na transporcie samochodowym, konieczne było określenie, jaka część dojazdów do pracy i podróży służbowych odbywa się przy wykorzystaniu samochodu osobowego. Jak wskazują wyniki Badania pilotażowego… (2015) przeprowadzonego przez GUS, samochód osobowy jest wykorzystywany w dojazdach do pracy/szkoły przez blisko 75% respondentów nie rzadziej niż pięć razy w tygodniu. Ujęcie regionalne wskazuje, że szczególnie skorzy do podróży samochodem osobowym są mieszkańcy Polski południowo-zachodniej (ryc. 5.23).

Zgodnie z badaniem GUS udział podróży do pracy realizowanych przy wykorzystaniu samochodu osobowego wynosi od 57,4% dla województwa mazowieckiego do 74,6% dla województwa podkarpackiego. Zróżnicowanie to uwzględniono w zastosowanym podziale modalnym, biorąc pod uwagę region zamieszkania osoby podróżującej do pracy[5]. Jeśli zaś chodzi o podróże służbo-

[5] Dolnośląskie – 66,4%, kujawsko-pomorskie – 61,4%, lubelskie – 61,6%, lubuskie – 70,0%, łódzkie – 62,7%, małopolskie – 61,7%, mazowieckie – 57,4%, opolskie – 69,3%, podkarpackie – 74,6%, podlaskie – 60,9%, pomorskie – 58,5%, śląskie – 67,9%,

we, to w związku z brakiem sprecyzowanej wartości udziału samochodu osobowego w tej motywacji podróży w wynikach badania GUS i znacznym jego zróżnicowaniem ze względu na szczegółowy cel/charakter podróży wskazanym przez Rosika i in. (2018) przyjęto stałą wartość udziału na poziomie 70%. Zgodnie z badaniami Jamroza i in. (2014) 88% pracy przewozowej wyrażonej w pasażerokilometrach w ogóle transportu lądowego w Polsce wykonano przy użyciu samochodu.



Ryc. 5.23. Częstotliwość korzystania z samochodu osobowego w podróżach do pracy/szkoły w Polsce w 2015 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.

Jeśli zaś chodzi o napełnienie środków transportu indywidualnego, przyjęto, że wynosi ono 1,5 osoby na pojazd. Wartości tej nie różnicowano przestrzennie i wykorzystano dla obu rozpatrywanych motywacji podróży. Przegląd badań odnoszących się do kwestii średniej liczby osób podróżujących jednym samochodem osobowym wskazuje na pewne zróżnicowanie tej zmiennej. Dla przykładu w Transportowym modelu prognostycznym podróży dla Obszaru Metropolitalnego w ramach Strategii Transportu i Mobilności Obszaru Metropolitalnego Gdańsk-Gdynia-Sopot do roku 2030 (2015) prognozowano

---

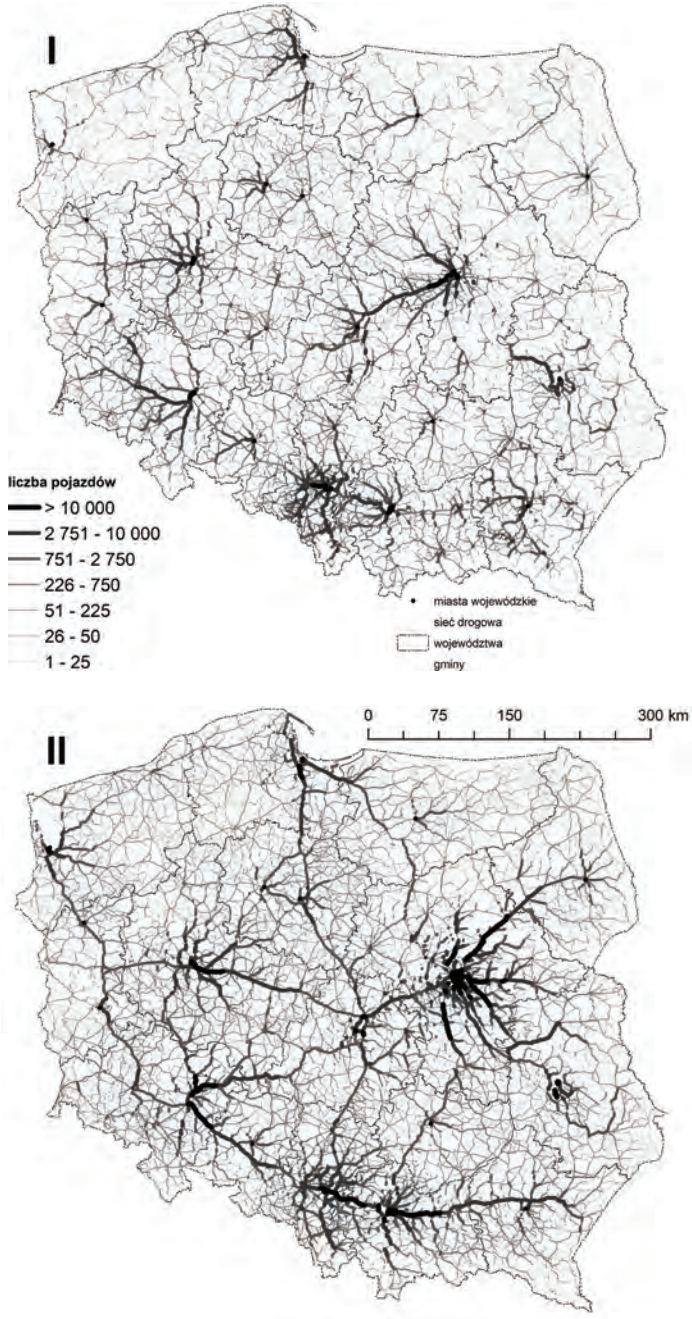
świętokrzyskie – 70,4%, warmińsko-mazurskie – 63,1%, wielkopolskie – 64,1%, zachodniopomorskie – 60,9% (Badanie pilotażowe… 2015).

wartości napełnienia w 2020 r. osobno dla podróży mieszkańców Trójmiasta (1,42) i podróży mieszkańców poza Trójmiastem (1,58). Gdańskie badanie ruchu (2016) wskazuje, że średnie napełnienie samochodu osobowego to właśnie 1,5 osoby. W Koncepcji integracji systemów transportowych na terenie Krakowskiego Obszaru Funkcjonalnego (2017) wskazano, że wypełnienie dla tak określonego obszaru badań wynosi 1,3 osoby na pojazd. W przypadku projektu KoMaR, bazując na danych za 2008 r., także przyjęto wartość 1,5. Również Badanie pilotażowe… (2015) obejmowało kwestie liczby osób w pojeździe („liczba osób podróżujących w pojeździe łącznie z kierowcą"), jednak nie odniesiono się do tej zmiennej w raporcie z wyników pilotażu, lecz we wnioskach raportu „Zasady metodologiczne ankietowego badania mobilności komunikacyjnej ludności" (2015) wskazano na istotne wady w sposobie zbierania danych tego rodzaju.

5.3.4. Rozkład ruchu na sieć

Ostatnie ze stadiów to rozkład ruchu na sieć. W kroku tym następuje określenie trasy wybranej przez użytkowników sieci związanej z realizacją podróży ze źródła do celu. Wyznaczona zostaje liczba pojazdów (pasażerów) obciążających dany odcinek sieci transportowej (drogi, ulicy, trasy transportu zbiorowego). Rozkład ruchu pozwala na podjęcie decyzji o zastosowaniu określonego typu skrzyżowania czy węzła, wymiarowanie elementów drogi, projektowanie organizacji ruchu, ocenę warunków ruchu oraz chociażby projektowanie zorientowane na ruch, jaki wystąpi w przyszłości. Założenia projektu badawczego, którego wyniki zostały zawarte w monografii, obejmowały wyłącznie rozkład ruchu na sieć bez działań związanych z kalibracją. Jest to bowiem zadanie na tyle złożone, że może stanowić przedmiot osobnego projektu badawczego (czego dowodem jest np. projekt KoMaR). Zadanie to stanowi zapewne potencjalny przedmiot dalszych prac w ramach tematyki wpływu zdarzeń nietypowych na funkcjonowanie transportu drogowego. Wyzwaniem jest tutaj chociażby dynamiczny wzrost stopnia nieuporządkowania układu towarzyszący katastrofom naturalnym oraz ich epizodyczny charakter wobec permanentnych przemian systemów transportowych i otoczenia, w którym funkcjonują, co może czynić obserwacje dokonane wcześniej podczas tego typu okoliczności mało pomocnymi przy próbach modelowania zachowań podróżujących w przyszłości.

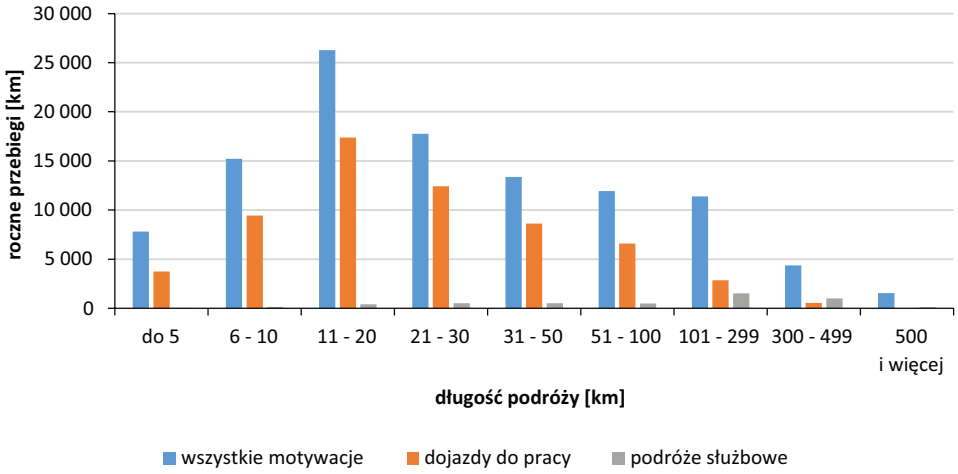
Rozkład na sieć ruchu związanego z dojazdami do pracy i podróżami służbowymi (ryc. 5.24) dobrze obrazuje charakter tych przemieszczeń realizowanych z wykorzystaniem samochodu osobowego. Wzrost długości podróży powoduje wzrost roli dróg o najwyższych parametrach – autostrad i dróg ekspresowych.



Ryc. 5.24. Obciążenie sieci drogowej w wyniku realizacji dojazdów do pracy (I) oraz podróży służbowych (II) w Polsce

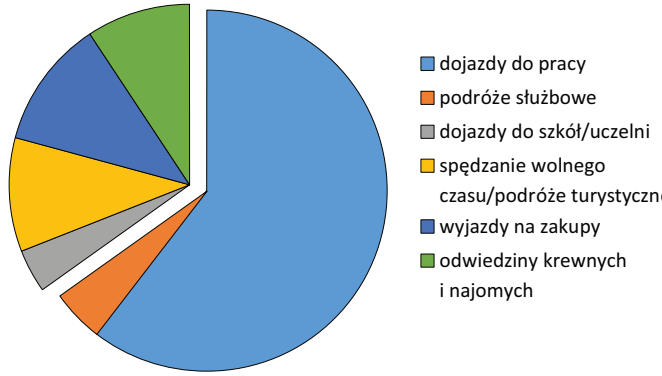
Źródło: opracowanie własne

Zróżnicowanie długości podróży dobrze ilustruje również zestawienie rocznych przebiegów samochodów osobowych w odniesieniu do motywacji podróży (ryc. 5.25). Uwidacznia się tutaj bardzo wysoki udział pracy eksploatacyjnej realizowanej w ramach dojazdów do pracy. Największe potoki ruchu związane z dojazdami do pracy w Polsce występują w naturalny sposób w relatywnie krótkich relacjach, tzn. w przypadku, kiedy czas dojazdu nie jest dłuższy niż pół godziny. Podróże służbowe, choć realizowane są z reguły na dłuższych dystansach, to wobec znacznie mniejszej częstotliwości występowania przekładają się na nieporównywalnie mniejszy udział w przebywanych przez samochody osobowe kilometrach. Łącznie podróże rozpatrywane w badaniu stanowią niewiele ponad 65% ogólnej sumy rocznych przebiegów samochodów osobowych w Polsce (ryc. 5.26) (Badanie pilotażowe… 2015). Średnio niemalże połowa wszystkich kilometrów przebywanych w Polsce do pracy samochodem osobowym dotyczy przejazdów w zakresie do 20 km (ryc. 5.27). W przypadku podróży służbowych 56% przejechanych kilometrów dotyczyło podróży dłuższych niż 100 km.



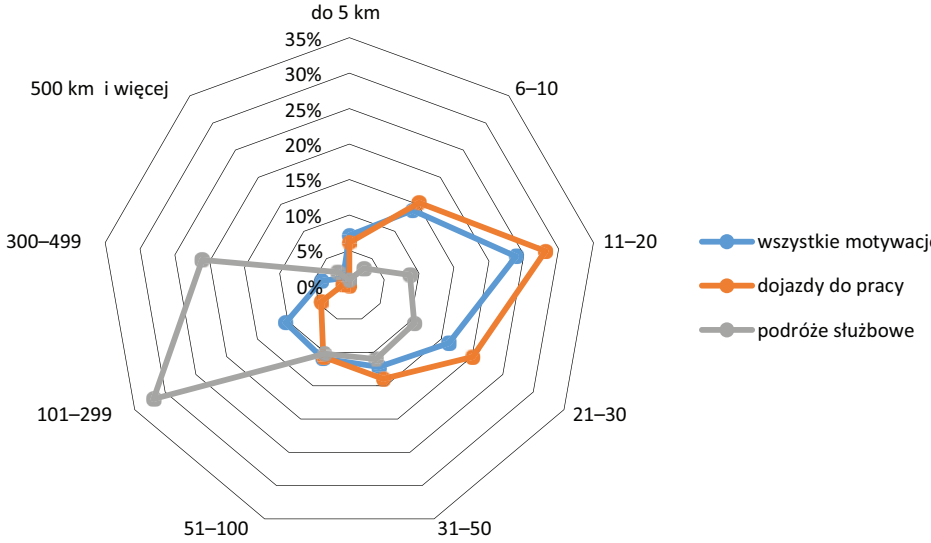
Ryc. 5.25. Roczne przebiegi samochodów osobowych dla określonych długości podróży realizowanych w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi oraz wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.



Ryc. 5.26. Struktura rocznych przebiegów samochodów osobowych wg motywacji podróży w Polsce w 2015 r.

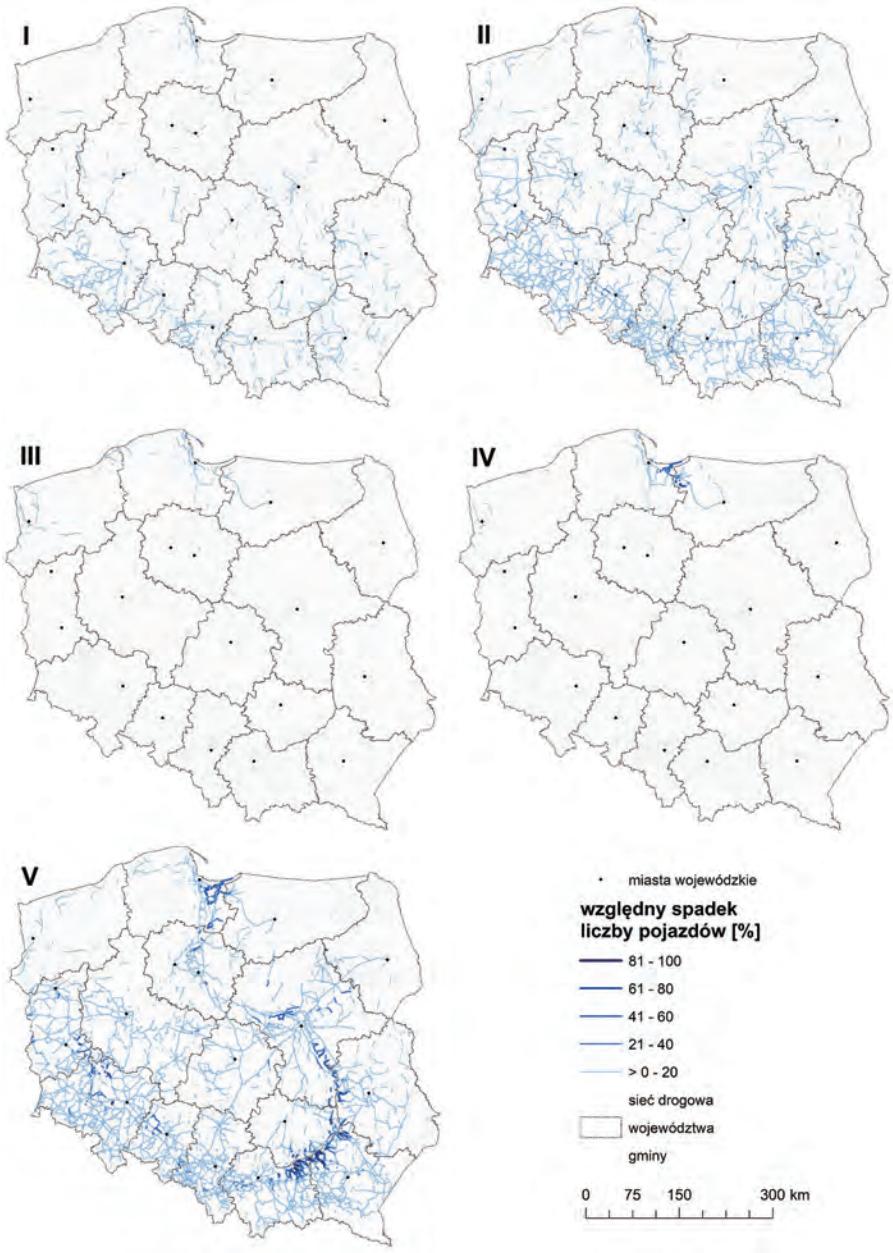
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.



Ryc. 5.27. Struktura rocznych przebiegów samochodów osobowych wg długości realizowanych podróży w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi i wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r.

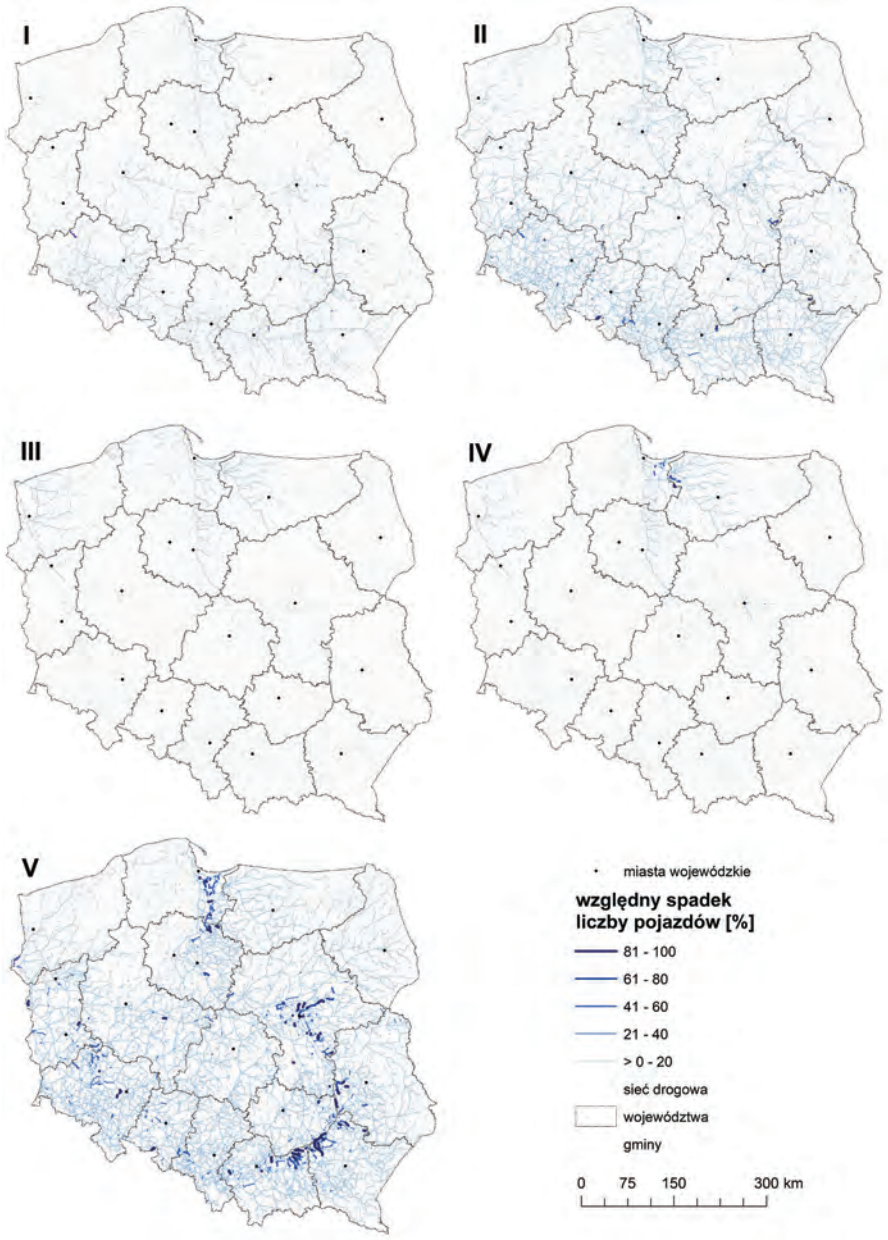
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS, 2015 r.

Dla określenia różnic w obciążeniu sieci drogowej następujących na skutek wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu i obszarze kraju porównywano liczby pojazdów na poszczególnych segmentach sieci drogowej w wariancie „normalnym" oraz dane uzyskane po rozkładzie ruchu na sieć przy uwzględnieniu odcinków zalanych oraz „odciętych" w wyniku zalania odcinków sąsiednich.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 5.28. Względny spadek liczby pojazdów w obrębie sieci drogowej wynikający z redukcji potencjałów produkcji ruchu w motywacji związanej z dojazdami do pracy w poszczególnych scenariuszach powodziowych w Polsce 2019 r.
Źródło: opracowanie własne



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 5.29. Względny spadek liczby pojazdów w obrębie sieci drogowej wynikający z redukcji potencjałów produkcji ruchu w motywacji związanej z podróżami służbowymi w poszczególnych scenariuszach powodziowych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Podobnie jak w przypadku badań dostępności potencjałowej, również tutaj na etapie generacji ruchu dokonywano redukcji potencjałów atrakcji i produkcji ruchu. Były one pomniejszane proporcjonalnie do udziału liczby osób zamieszkujących na terenach zagrożonych zalaniem w danym scenariuszu do ogólnej liczby mieszkańców gminy (np. jeśli 5% ludności wybranej gminy zamieszkuje tereny zagrożone powodzią o prawdopodobieństwie 10%, to podczas symulacji wpływu powodzi w takim scenariuszu na obciążenie sieci drogowej związanej z dojazdami do pracy potencjał produkcji i atrakcji tej gminy jest obniżany o 5%). Tym samym przyjęto, że w przypadku obu motywacji podróży nastąpi rezygnacja z ich części (mogą oczywiście pojawić się inne o szczególnej, charakterystycznej dla tych okoliczności motywacji, jak np. ewakuacja do miejsc bezpiecznych). W przypadku podróży do pracy redukcja potencjałów ruchotwórczych przeprowadzona bez zróżnicowania przestrzennego wystąpienia powodzi skutkowała spadkiem obciążenia sieci drogowej przedstawionym na rycinie 5.28 (względny spadek liczby pojazdów w odniesieniu do całkowitego ruchu generowanego w tej motywacji). Występujące spadki są z natury rzeczy najbardziej wyraźne w przypadku powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) oraz towarzyszącej zniszczeniu wałów przeciwpowodziowych. W porównaniu z tego samego typu zmianami, ale dla podróży służbowych, przedstawionymi na ryc. 5.29, uwidacznia się wyraźnie mniejszy zakres przestrzenny sieci objętej zmianami.

5.4. Zasady działania aplikacji RoadLoad

W Instytucie Zagospodarowania Środowiska i Polityki Przestrzennej UŁ od kilku lat prowadzone są prace nad aplikacją umożliwiającą predykcję zmian natężenia i kierunków potoków ruchu pojazdów (rozkład ruchu na sieć). Dzięki środkom uzyskanym na realizację projektu, którego wyniki zawiera monografia, możliwa była intensyfikacja działań zmierzających do przygotowania wersji prototypowej (Borowska i in. 2018, 2020) (funkcjonującej w aprobowanym czasie na stosunkowo niewielkich modelach sieci drogowych) do efektywnej pracy w obrębie sieci obejmującej obszar całego kraju oraz jej rozbudowanie o dodatkowe funkcjonalności, które podnosiłyby jej operatywności.

Aby narzędzie to mogło rozpocząć pracę, konieczne jest wprowadzenie dwóch plików wejściowych (w formacie CSV), które stanowią jednocześnie bazę danych opisującą sieć drogową i macierz będącą wynikiem rozkładu przestrzennego podróży. Tak jak wspomniano, aplikacja służy wyłącznie do rozkładu ruchu na sieć, pozostałe stadia (w myśl modelu czterostadiowego) muszą zostać przeprowadzone przez użytkownika niezależnie. Pierwszy ze wskazanych plików obejmuje informacje o węzłach sieci. Są to elementy punktowe obrazujące miejsca połączenia poszczególnych krawędzi (odcinków) sieci, a część z nich

reprezentuje punkty centralne rejonów komunikacyjnych. Każdy z węzłów opatrzony jest niepowtarzalnym numerem identyfikacyjnym. Odpowiada on numeracji węzłów w analogicznej bazie przygotowanej w środowisku GIS i umożliwia tworzenie relacji pomiędzy obiema bazami. Ponadto opis atrybutowy każdego z węzłów zawiera informacje o współrzędnych geograficznych, liczbie pojazdów, jaka wyrusza z reprezentowanego przez niego rejonu komunikacyjnego, oraz numerze identyfikacyjnym węzła (rejonu komunikacyjnego), do którego dany wolumen pojazdów zmierza. Dla przykładu: jeśli z danego węzła (rejonu) wyruszają pojazdy do pięciu innych węzłów (rejonów), to w pliku wejściowym będzie to opisane pięcioma wierszami tabeli. Dodatkowo użytkownik ma możliwość określenia opóźnienia (poprzez wskazanie wartości czasu) rozpoczęcia podróży z poszczególnych węzłów względem rozpoczęcia całej symulacji oraz oznaczenia, która z relacji źródło-cel (węzeł źródłowy – węzeł docelowy) ma być śledzona, a jej szczegóły są wyszczególnione w pliku wynikowym badania. Śledzenie przejazdu pozwala na określenie dokładnej ścieżki lub ścieżek przejazdu pojazdów, które realizują podróż w danej relacji źródło-cel. Śledzona może być dowolna liczba relacji.

Drugi z plików wejściowych zawiera dane dotyczące charakterystyki krawędzi (odcinków) sieci. Każdy z wierszy bazy danych opisuje kolejną krawędź poprzez podanie jej numeru identyfikacyjnego (zbieżnego z bazą danych GIS), numeru identyfikacyjnego węzła początkowego i końcowego, maksymalnej jego przepustowości, prędkości w ruchu swobodnym oraz długości. Możliwe jest wprowadzenie dowolnej liczby innego rodzaju atrybutów określających poszczególne krawędzie, które na etapie pracy aplikacji mogą wpływać na wybór ścieżki przejazdu (np. finansowy koszt pokonania odcinka). Odrębną grupę krawędzi stanowią odcinki pełniące funkcję łączników pomiędzy węzłami reprezentującymi połączenia odcinków sieci a węzłami reprezentującymi źródła i cele podróży. Są to obiekty, których charakterystyka pozwala na dotarcie nawet dużego wolumenu pojazdów do węzła reprezentującego docelowy rejon komunikacyjny bez wydłużania czasu podróży pojawiającego się na skutek wzrostu natężenia ruchu na odcinku.

Po podaniu ścieżek dostępu do obu plików użytkownik określa strategię wyznaczania wag poszczególnych krawędzi. Wskazuje, jaki atrybut bądź jakie atrybuty z zakresu tych wprowadzonych do pliku wejściowego mają być uwzględniane w analizie. W prezentowanym badaniu był to wyłącznie czas przejazdu. Nie jest on podawany wprost w bazie danych, ale zostaje wyliczony na podstawie długości odcinka oraz prędkości w ruchu swobodnym (z uwzględnieniem funkcji oporu odcinka). Tym samym aplikacja będzie deprecjonować odcinki generujące wyższe czasy podróży.

Do obliczania poziomów obciążenia poszczególnych elementów sieci aplikacja grupuje poszczególne pojazdy w bardziej abstrakcyjne obiekty nazwane

pakietami transportowymi (*TransportPackage*). Przed uruchomieniem aplikacji użytkownik ma możliwość określenia maksymalnej wielkości (liczby pojazdów) takich pakietów. Aplikacja swoje działanie opiera na mechanizmie tur. Każda tura trwa określony okres czasu, podczas którego pakiety transportowe „przesuwane są" po wyznaczonych trasach. Ostatnim parametrem wejściowym, który użytkownik powinien wprowadzić, jest długość trwania poszczególnych rund (interwałów czasowych). Daje to możliwość zaobserwowania rezultatu całego procesu rozkładu ruchu na sieć, ale również jego obrazy dla wybranych interwałów czasowych (np. 30 sekund, 5 minut czy 1 godzina) od momentu pojawienia się wirtualnych pojazdów na sieci.

Po wprowadzeniu wszystkich parametrów wejściowych tworzonych jest kilka obiektów pomocniczych. Najważniejszymi z nich są: strategia wagowa (*WeightStrategy*) oraz kalkulator tras (*PathCalculator*). Bazując na danych dostarczonych z plików CSV, system zgodnie z ustaloną specyfikacją tworzy pakiety transportowe, ustala ich pozycję na węzłach startowych i oblicza najkrótszą (zgodnie z przyjętymi założeniami wstępnymi) drogę do węzła końcowego (obliczenia te wykonywane są w obrębie sieci pozbawionej jakiegokolwiek obciążenia, dzięki czemu wiadomo, że trasa, którą pakiet musi pokonać, jest najkrótsza; może ona jednak ulec zmianie przy kolejnych interacjach). W tym zakresie zostały zaimplementowane algorytmy Dijkstry (Dijkstra 1959, Beuthe i in. 2001, Deng i in. 2012, Goyal i in. 2014) oraz A* (Fu i in. 2006, Goldberg i in. 2006, Zeng i Church 2009). Po utworzeniu wszystkich pakietów i umiejscowieniu ich w sieci rozpoczyna się symulacja. Z listy wszystkich dostępnych w systemie pakietów transportowych wybierane są te, które nie dotarły jeszcze do celu oraz przekroczyły już czas swojego opóźnienia (każdy węzeł może określić, po jakim czasie startujące z niego pakiety powinny ruszyć; dzięki temu możliwe jest przeprowadzenie symulacji, w której do sieci w miarę upływu czasu włączają się nowe węzły). Następnie lista ta poddawana jest sortowaniu, tak aby pakiety, które mają najkrótszą trasę do pokonania, znalazły się na jej początku (dzięki temu unikana jest sytuacja, w której pakiety, których trasa jest obciążona kongestią, są w systemie aktywowane przed tymi, które je blokują). W kolejnym kroku zwiększona zostaje iteracja wewnętrznego licznika tur aplikacji. Wszystkim pakietom transportowym na liście z punktu (B) ustawiony zostaje wewnętrzny licznik czasu jazdy zgodny z danymi wejściowymi użytkownika. Określa on, jak długo w danej rundzie określony pakiet może pozostawać w ruchu. Następnie dochodzi do przesunięcia wszystkich pakietów transportowych (zob. poniżej: ruch pakietów). Pakiety, które dotarły do swojego miejsca przeznaczenia, przenoszone są na odrębną listę i nie biorą udziału w dalszych obliczeniach. Tworzony jest plik raportu rundy zawierający dane na temat obciążenia poszczególnych węzłów i krawędzi w sieci.

Ruch pakietów transportowych podzielony jest na dwie fazy. W pierwszej z nich system próbuje przesunąć wszystkie pakiety wzdłuż ich tras zgodnie

z następującym algorytmem. (A) Przesuwany jest pakiet wzdłuż krawędzi grafu, na którym się aktualnie znajduje (krawędź lub wierzchołek), o ilość dostępnego czasu. (B) Jeśli po przesunięciu pakiet nie ma już dostępnego czasu ruchu, jego status jest określany jako poruszony (*Moved*). (C) Jeśli po przesunięciu pakiet dotarł do końca krawędzi, na której się aktualnie znajduje, i nie wyczerpał całego czasu ruchu, należy sprawdzić następny punkt na trasie pakietu. (D) W przypadku, kiedy następny punkt na trasie jest zablokowany (znajduje się na nim za dużo pojazdów) lub nie istnieje (zob. poniżej), należy dodać pakiet do listy pakietów zablokowanych i przystąpić do przesuwania następnego pakietu. (E) Gdy kolejny punkt na trasie nie jest zablokowany, należy przesunąć pakiet na jego początek i przejść do punktu (A). Po poruszeniu wszystkich pakietów z listy pakietów, które były poddane przesuwaniu, należy wybrać te, które zostały oznaczone jako zablokowane, i przejść do fazy drugiej, która obejmuje (F) zliczanie zablokowanych pakietów, (G) tworzenie drugiej listy zablokowanych pakietów, a w jej ramach: (H) określane jest ich aktualne położenie, (I) przesuwane są wzdłuż aktualnego elementu, na którym się znajduje, (J) wskazywane są kolejne punkty w ramach ścieżki przejazdu (jeśli pakiet ma dostępny jeszcze czas ruchu), (K) pakiet dodawany jest do drugiej listy zablokowanych pakietów (jeżeli taki punkt nie istnieje lub istnieje, ale jest zablokowany) lub jeśli następny punkt na trasie istnieje i nie jest zablokowany, pakiet jest na niego przesuwany i następuje powrót do punktu (D).

Po wykonaniu próby poruszenia wszystkich pakietów należy sprawdzić, czy pierwsza i druga kolekcja zablokowanych pakietów mają te same wielkości. Jeśli druga lista zablokowanych elementów jest mniejsza od pierwszej (tej, z którą rozpoczęto algorytm), oznacza to, że któryś z pakietów poruszył się i potencjalnie mógł odblokować możliwość ruchu innym zablokowanym pakietom. W takim wypadku należy przejść do punktu (A) i kontynuować algorytm. Jeśli obie listy mają te same wielkości, oznacza to, że zablokowane pakiety nie mają już możliwości poruszenia się. W takim wypadku istnieje możliwość wyznaczenia każdemu zablokowanemu pakietowi nowej trasy do punktu docelowego. Uwzględniając nowe trasy, należy rekurencyjnie wywołać dla nich (i tylko dla nich) funkcję ruchu pakietów. Aplikacja umożliwia przeprowadzenie rozkładu ruchu poprzez przydzielenie go na jedną ścieżkę, tę która gwarantuje najmniejszy całkowity koszt podróży – w tym przypadku czas. Rozwiązanie to znajduje zastosowanie przy analizach prowadzonych w obrębie sieci o słabo rozbudowanej strukturze. Wtedy też przynosi wyniki najmniej odbiegające od symulowanej rzeczywistości. Procedura obliczeniowa w przypadku tego podejścia jest stosunkowo szybka i pochłania najmniej zasobów. Możliwe jest również działanie w myśl I zasady Wardropa (zasada równowagi z punktu widzenia użytkownika). Skutkuje to wyborem przez użytkownika ścieżki przejazdu, która z jego punktu widzenia cechuje się najmniejszym kosztem (tutaj czasem przejazdu) i nie zostaje wybrana inna, która nie gwarantuje tej własności. Występuje tutaj pierwsze założenie

upraszczające – każdy z użytkowników sieci posiada pełną informację o jej stanie. Podejście to wskazuje również, że wszyscy użytkownicy postrzegają koszty w identyczny sposób (drugie założenie upraszczające), a zmiana ścieżki przejazdu każdorazowo skutkuje zwiększeniem kosztów podróży.

Wynikiem pracy aplikacji jest zestaw plików wynikowych (w formatach CSV). Pierwszy z nich to plik obrazujący finalny rozkład ruchu na sieć. W pierwszej kolumnie zestawienia występują numery identyfikacyjne kolejnych krawędzi oraz węzłów. W drugiej określona jest całkowita liczba pojazdów dla każdego z elementów. W trzeciej i ewentualnych kolejnych kolumnach także znajdują się liczby pojazdów mówiące o obciążeniu kolejnych elementów sieci, jednak wyłącznie tych, które wchodziły w skład ścieżki pokonywanej przez pojazdy podróżujące w ramach śledzonej relacji. Każda kolejna śledzona relacja to kolejna kolumna w pliku wynikowym. W skład zestawu plików wynikowych wchodzą również zestawienia zawierające powyższe dane, ale nie w wersji finalnej, lecz dla każdej ze zdefiniowanych tur, dając tym samym obraz obciążenia sieci drogowej w formie swego rodzaju animacji poklatkowej. Dzięki występowaniu numerów identyfikacyjnych każdego z elementów sieci możliwe jest połączenie wygenerowanych plików wynikowych z wektorowym obrazem sieci w oprogramowaniu GIS oraz symbolizacja wielkości potoków ruchu na poszczególnych jej odcinkach.

6

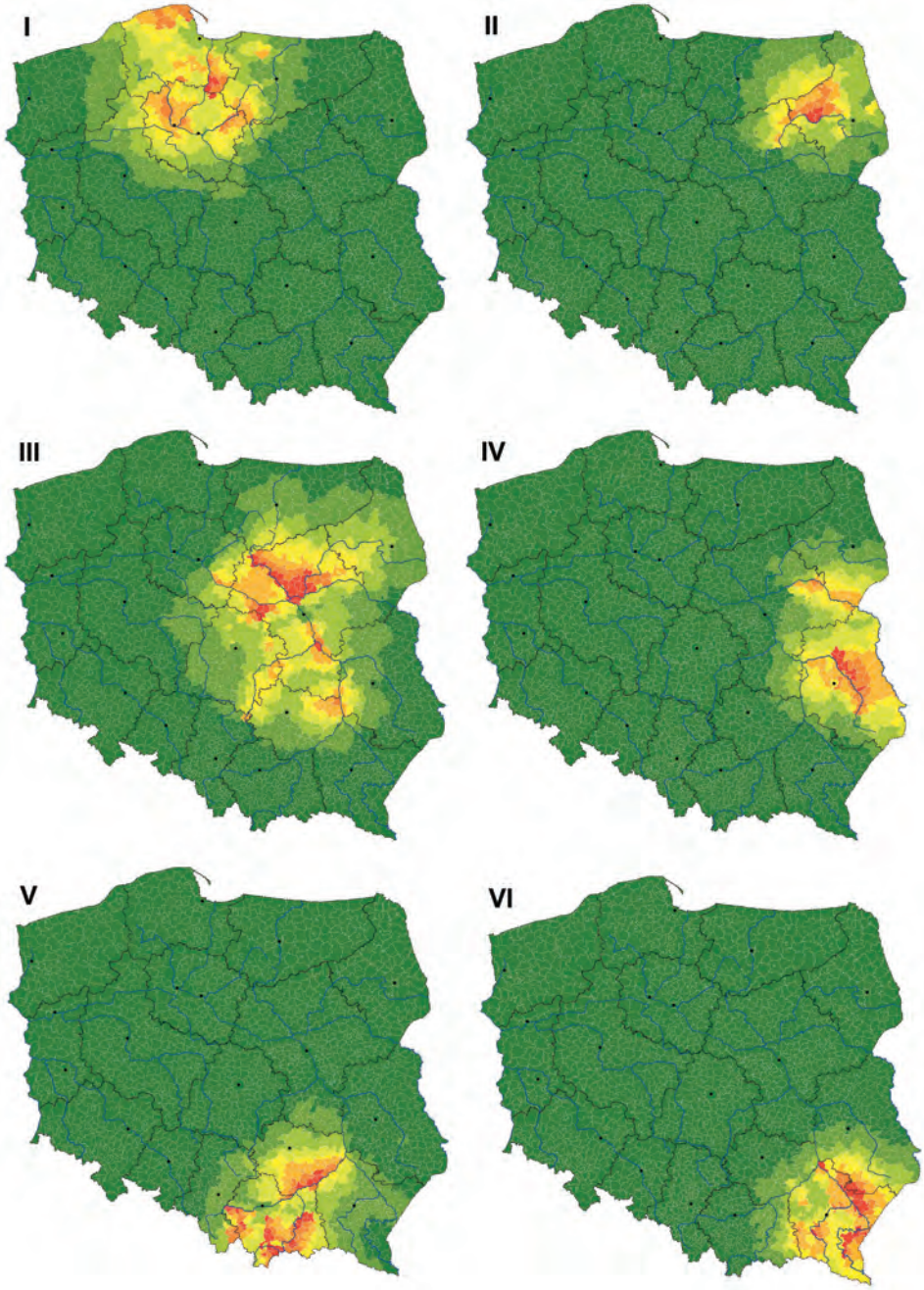
ZMIANY DOSTĘPNOŚCI TRANSPORTOWEJ W NASTĘPSTWIE POWODZI

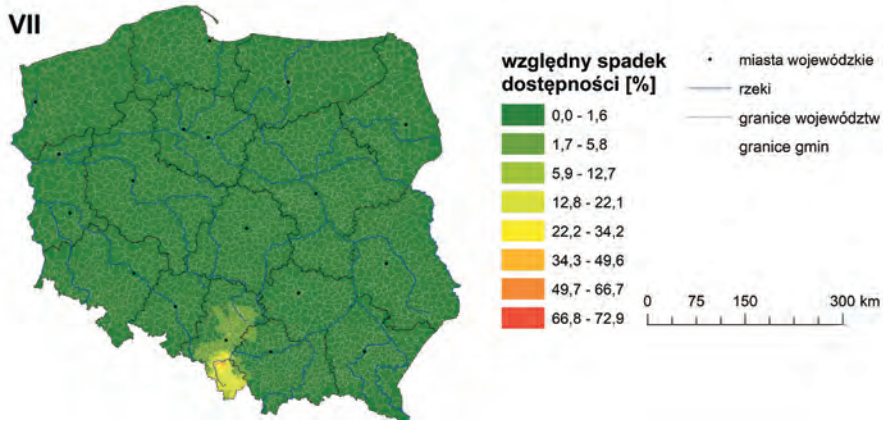
6.1. Podróże krótkie

Uwzględnienie realizacji podróży krótkich na potrzeby badań poziomu zmian dostępności transportowej wynikających z wystąpienia powodzi oraz cech ich zróżnicowania przestrzennego przekłada się na rezultaty posiadające pewien uniwersalny zestaw właściwości. Maksymalne zaobserwowane poziomy zmian dostępności potencjałowej rejonów komunikacyjnych przyjmują wyższe wartości, niż ma to miejsce w przypadku podróży długich badanych w dalszej części rozdziału. Z jednej strony wynika to ze stosunkowo dużej roli potencjału własnego rejonu komunikacyjnego, a więc i bardziej dotkliwa dla finalnych rezultatów jest jego redukcja, wynikająca z objęcia wodami powodziowymi części jego obszaru (ludności i sieci drogowej). Z drugiej strony względnie wysoki opór przestrzeni uzależnia poziom dostępności poszczególnych rejonów od stosunkowo ograniczonej przestrzennie liczby rejonów sąsiednich i charakterystycznych dla nich redukcji mas, wynikających z oddziaływania powodzi. Przekłada się to na występowanie obszarów dotkniętych obniżeniem poziomu dostępności potencjałowej w związku z symulacją powodzi w określonym regionie wodnym, w ramach których ujawnia się zazwyczaj kilka „wysp" dotkniętych jej szczególnym spadkiem. Spadki te jednak nie „rozlewają" się w znaczący sposób i obejmują zazwyczaj obszar tożsamy z regionem wodnym objętym symulacją. W przeważającej większości analizowanych scenariuszy i obszarów wystąpienia powodzi „cień" spadku poziomu dostępności w związku z realizacją podróży krótkich stanowi swego rodzaju bufor względem obszarów dotkniętych zasadniczymi spadkami. Nie może się tu bowiem w pełni ujawnić kluczowa dla rozkładu dostępności potencjałowej rola infrastruktury drogowej o najwyższych parametrach (drogi ekspresowe i autostrady). Cechą charakterystyczną jest również wyraźne zróżnicowanie przestrzenne uzyskiwanych wyników spadku poziomu dostępności potencjałowej w ramach poszczególnych regionów objętych symulacją.

6.1.1. Obszar dorzecza Wisły

Niezależnie od rozpatrywanego scenariusza wystąpienia powodzi (ryc. 6.1–6.3) najszerszy zasięg przestrzenny odnotowanych spadków dostępności potencjałowej ma miejsce w przypadku wystąpienia zagrożenia w regionach wodnych Dolnej i Środkowej Wisły. W znacznej mierze wynika to wprost z liczby rejonów komunikacyjnych objętych oddziaływaniem powodzi w tych regionach.

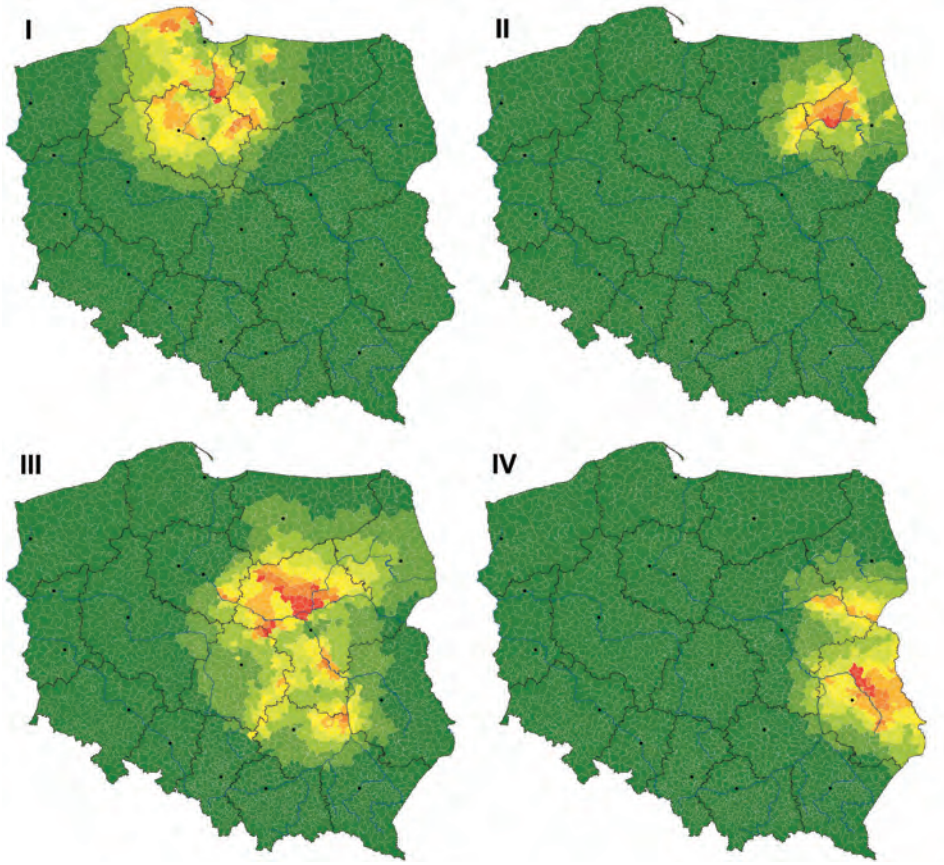

I
II
III
IV
V
VI

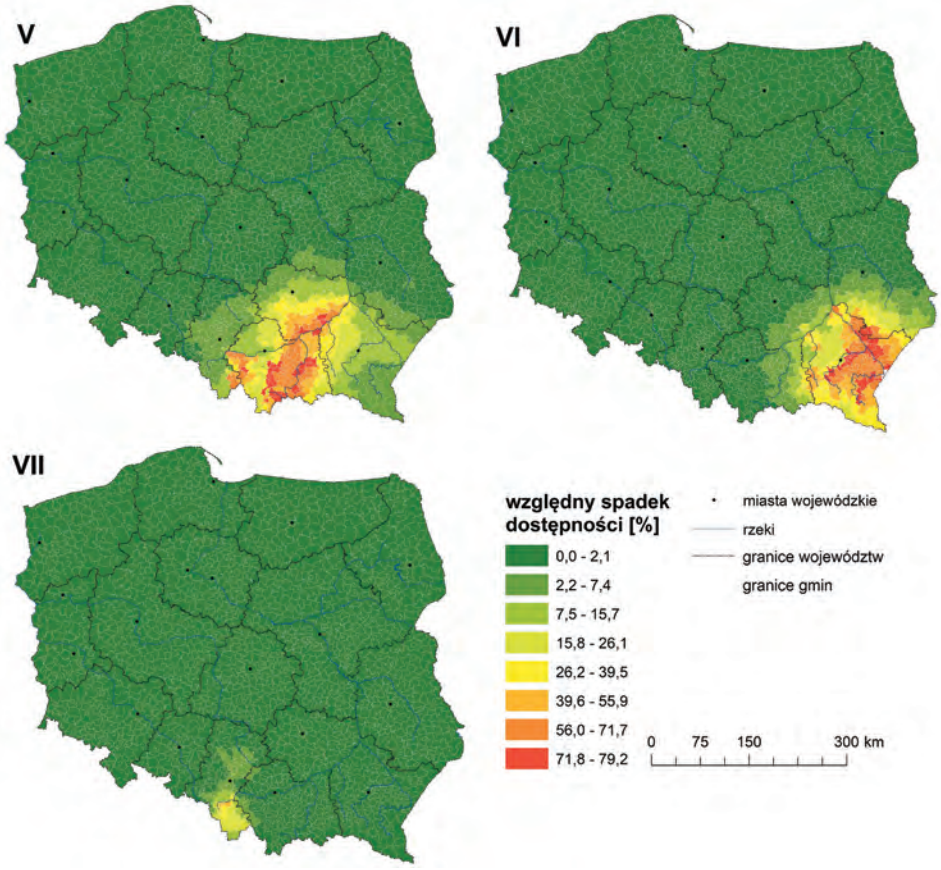


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 6.1. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

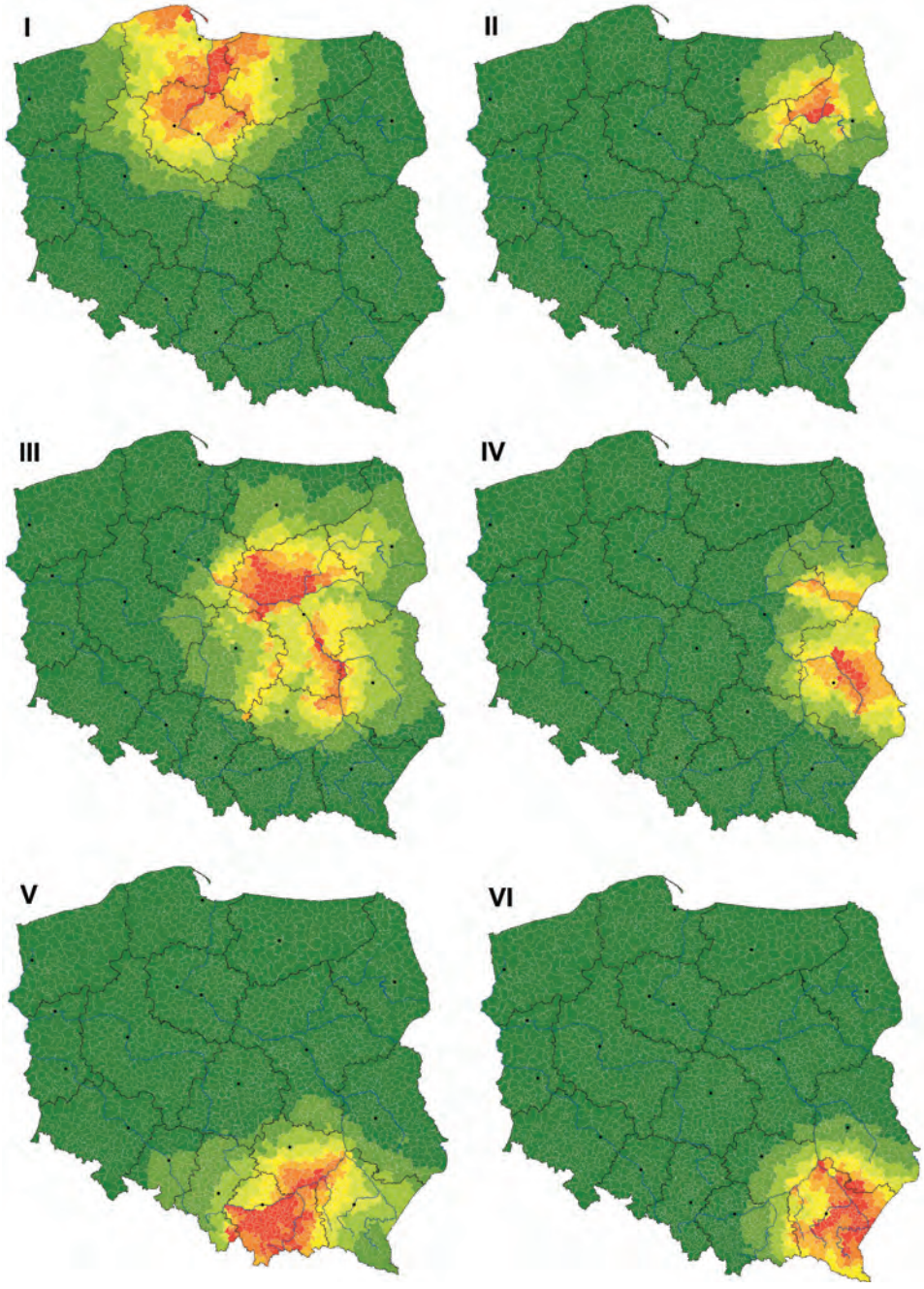


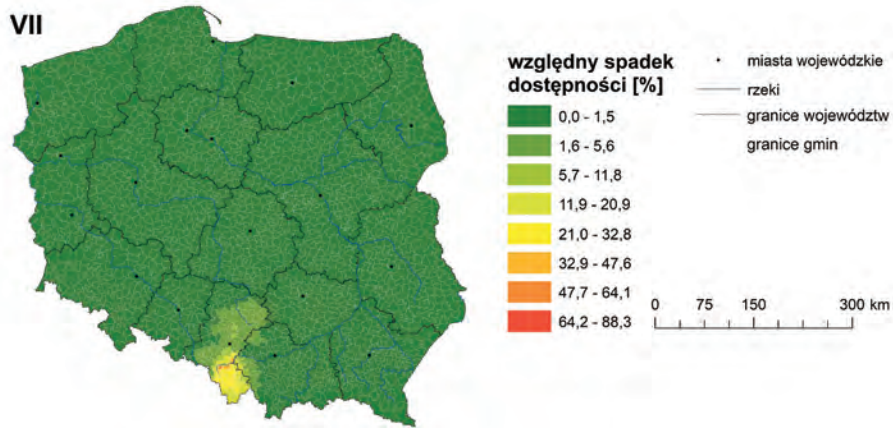


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 6.2. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne


I
II
III
IV
V
VI



I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

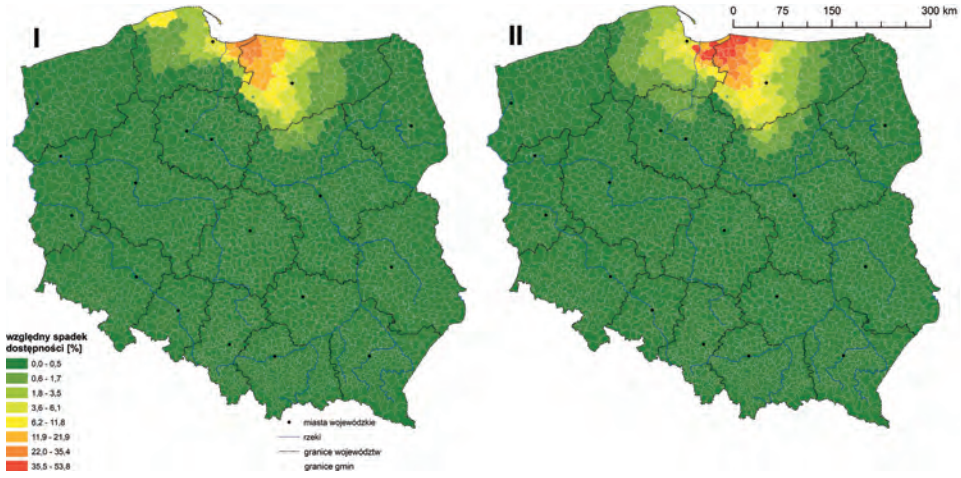
Ryc. 6.3. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z przedstawionych w rozdziale piątym analiz spadku poziomu dostępności w związku z redukcją mas rejonów komunikacyjnych, dopiero wariant związany z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych wyraźnie wpływa na tę składową oceny dostępności na środkowym i dolnym odcinku Wisły. Wystąpienie tego właśnie scenariusza powodziowego w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły szczególnie negatywnie oddziałuje na dostępność transportową rejonów komunikacyjnych zlokalizowanych na tym obszarze. Przede wszystkim gminy województwa małopolskiego dotknięte są tutaj istotnymi spadkami poziomu dostępności, do czego przyczyniają się również wysokie udziały ich ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych. Analiza opracowań kartograficznych, prezentujących wzmiankowane powyżej zjawiska, pozwala na zaobserwowanie ważnej roli autostrad i dróg ekspresowych w rozkładach przestrzennych zmian dostępności towarzyszących powodzi.

Na początku rozdziału wskazano, że krótki charakter podróży ogranicza „przenoszenie" przez nie spadków dostępności na rejony komunikacyjne pozostające z dala od bezpośredniego oddziaływania symulowanej powodzi. Niemniej jednak zjawisko to zaobserwować można chociażby w przypadku powodzi w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły i roli autostrady A4 czy Środkowej Wisły i drogi ekspresowej S8. Z drugiej zaś strony infrastruktura ta, pozostając odporna na niszczące oddziaływanie wód powodziowych, wyraźnie mityguje

spadki poziomu dostępności. Zjawisko to ma miejsce m.in. w przypadku autostrady A2 na tle każdego z rozpatrywanych scenariuszy powodzi w regionie wodnym Środkowej Wisły i ponownie A4 – szczególnie przy wystąpieniu powodzi 10-letniej w regionie Górnej-Zachodniej Wisły. Barierowa względem spadków dostępności wywołanych powodzią rola infrastruktury drogowej o najwyższych parametrach jest jednak uzależniona od miejscowych uwarunkowań związanych z jej włączeniem do lokalnej sieci drogowej. Stąd też jej skala przyjmuje zróżnicowane wielkości zarówno względem intensywności zjawisk powodziowych, jak i obszaru ich oddziaływania.

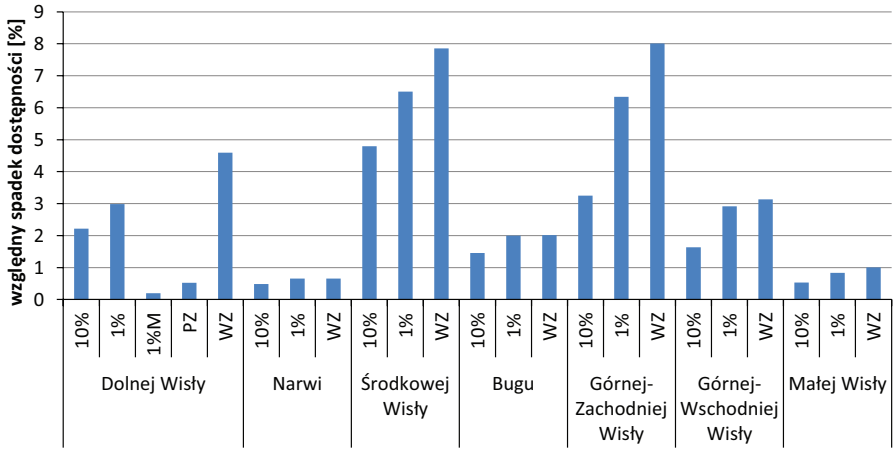


I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 6.4. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Wystąpienie zagrożenia od strony morza (ryc. 6.4) poza tym, że z natury rzeczy jest ograniczone przestrzennie, przekłada się również na mniej negatywne skutki w zakresie spadku poziomu potencjałowej dostępności transportowej. Są one nawet o blisko 20 punktów procentowych mniejsze od tych notowanych w przypadku symulacji zagrożenia od strony rzeki. Mając na uwadze skalę zjawiska należy jednak wskazać, że szczególnie niekorzystna sytuacja dotyczy północno-zachodniego krańca województwa warmińsko-mazurskiego, a mianowicie powiatów: elbląskiego, braniewskiego, a także częściowo ostródzkiego i iławskiego.



Ryc. 6.5. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju, towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.
Źródło: opracowanie własne

Dla określenia wpływu powodzi (w uwzględnianych w badaniu scenariuszach i regionach występowania) na poziom dostępności potencjałowej w skali kraju i porównania siły ich oddziaływania pomiędzy sobą dokonano skumulowania wartości transportowej dostępności potencjałowej poszczególnych regionów komunikacyjnych w warunkach „normalnych" oraz charakterystycznych dla każdego z analizowanych wariantów. Pozwoliło to na wskazanie udziału zredukowanego przez powódź poziomu dostępności w jej wielkości wyjściowej i tym samym ustalenie wartości spadku (ryc. 6.5). Zestawienie dla regionów wodnych na obszarze dorzecza Wisły wyraźnie wskazuje na niepokojącą sytuację w przypadku Środkowej Wisły i Górnej-Zachodniej Wisły. Szczególnie dotkliwe dla dostępności jest w ich przypadku całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych, zarówno ze względu na długość wyłączonej z eksploatacji sieci drogowej, jak i liczbę ludności pozostającej w zagrożeniu. Wyłącznie lokalny charakter wpływu na poziom dostępności ma miejsce w przypadku wystąpienia powodzi (niezależnie od scenariusza) w regionie wodnym Małej Wisły. Potwierdzają to również wyniki rozkładu przestrzennego powstałych spadków dostępności. Liczba rejonów komunikacyjnych, których dostępność się obniżyła, i stopień tego obniżenia są bardzo ograniczone. Nieco inaczej sytuacja kształtuje się w przypadku wystąpienia zagrożenia w regionach wodnych Bugu i Narwi. W tych przypadkach spojrzenie z perspektywy poszczególnych rejonów komunikacyjnych pozwala dostrzec wyraźnie bardziej znaczne oddziaływanie ograniczeń związanych z powodzią, zarówno pod względem liczby jednostek, jak i utraconego potencjału, co jednak nie znajduje odzwierciedlenia w ujęciu ogólnokrajowym. Wynika to z wielkości wyjściowego potencjału rejonów komunikacyjnych objętych oddziaływaniem powodzi w tych regionach.

O ile udział utraconego w związku z zagrożeniem potencjału jest dla tych rejonów niemały, o tyle jego bezwzględny spadek jest niewielki, szczególnie w porównaniu z jednostkami położonymi w województwach łódzkim, mazowieckim, śląskim czy małopolskim. Interpretując uzyskane wyniki nie należy więc zapominać o pewnych słabościach wykorzystywanej tu metody potencjałowej, chociażby w postaci możliwości niedowartościowywania roli części zmian występujących w rejonach komunikacyjnych położonych peryferyjnie, blisko granicy kraju.

Uzupełnieniem analiz mających na celu określenie wpływu wystąpienia powodzi na dostępność transportową jest badanie zmian liczby jednostek osadniczych (ustrukturyzowanej pod względem wielkości populacji) i ludności je zamieszkującej w zasięgu określonych linii jednakowego czasu dojazdu. Zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale piątym w przypadku analiz związanych z podróżami krótkimi izochrony o wartościach przyjmujących wielokrotności 15 minut (do jednej godziny) tworzono względem punktów odzwierciedlających położenie siedzib władz powiatowych. Poniżej zamieszczono tabelę (tab. 6.1) prezentującą uzyskane rezultaty przy założeniu, że wystąpienie powodzi przyczyni się do zniszczenia wałów przeciwpowodziowych, co jest scenariuszem najdotkliwiej uderzającym w system transportu drogowego[1]. Zamieszczone w tabeli wartości wskazują na względne (%) zmiany kumulowanych elementów względem sytuacji „normalnej" w skali całej Polski.

Tab. 6.1. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–1,27	–1,42	–1,48	0,00	–5,26
		ludność	–1,43	–1,51	–1,76	0,00	–6,13
	15–30	jednostki osadnicze	–2,09	–1,42	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,48	–1,17	–1,50	–1,85	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,81	2,59	0,74	0,00	0,00
		ludność	1,62	2,45	1,11	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00

[1] Tabele obejmujące wyniki analiz uwzględniających wszelkie pozostałe rozpatrywane scenariusze powodzi zostały zamieszczone w aneksie.

Tab. 6.1 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Narwi	0–15	jednostki osadnicze	–0,16	–0,24	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,11	–0,23	–0,65	–1,84	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,43	0,24	0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,35	0,23	0,65	1,84	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	–0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Środkowej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,91	–1,18	–4,44	–4,26	–5,26
		ludność	–1,17	–1,98	–3,85	–3,67	–16,92
	15–30	jednostki osadnicze	–2,33	–0,24	2,96	2,13	0,00
		ludność	–1,31	0,43	2,49	2,03	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,60	0,71	0,00	2,13	2,63
		ludność	1,37	0,75	0,00	1,64	15,83
	45–60	jednostki osadnicze	0,77	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,48	0,00	0,70	0,00	0,00
Bugu	0–15	jednostki osadnicze	–0,28	–0,24	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,37	–0,43	–0,48	0,00	–3,24
	15–30	jednostki osadnicze	–1,22	–0,71	0,00	0,00	2,63
		ludność	–1,13	–0,73	0,00	0,00	3,24
	30–45	jednostki osadnicze	0,45	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,59	0,73	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,47	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,45	0,00	0,48	0,00	0,00
Górnej-Zachodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,30	–0,47	–1,48	–2,13	–2,63
		ludność	–1,16	–0,35	–1,37	–1,94	–6,95
	15–30	jednostki osadnicze	–1,26	–0,94	0,00	0,00	0,00
		ludność	–2,81	–0,64	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,25	0,47	0,00	2,13	0,00
		ludność	0,89	0,34	0,00	1,94	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,08	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,41	–0,29	0,00	0,00	0,00

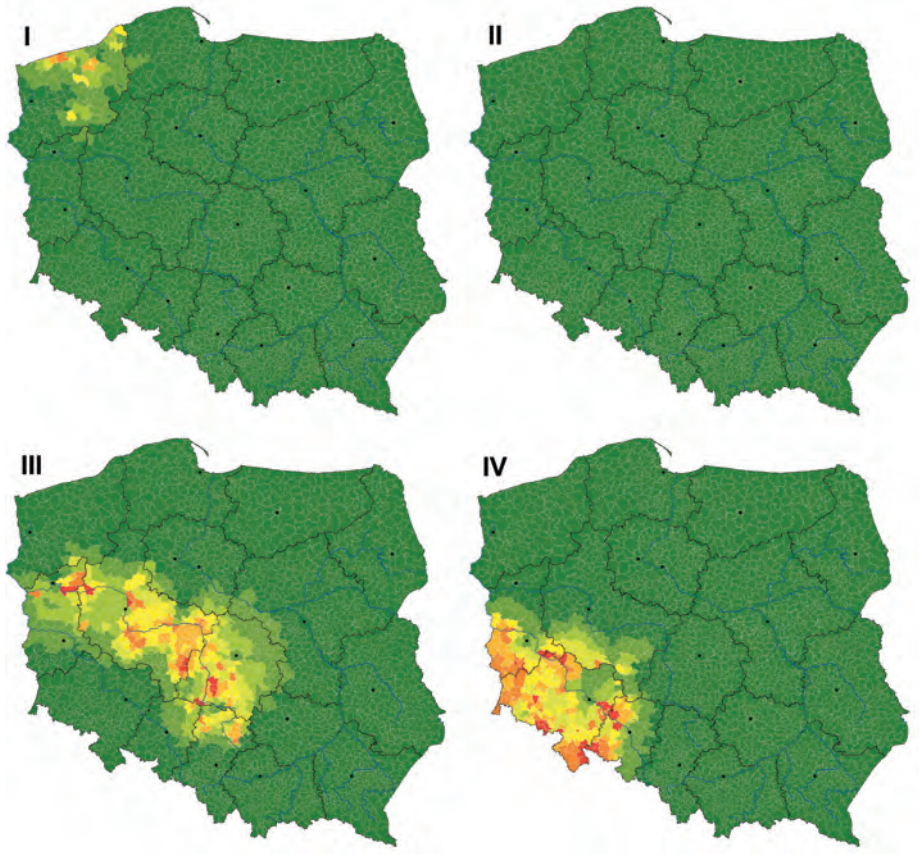
1	2	3	4	5	6	7	8
Górnej-Wschodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,33	–0,94	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–1,33	–0,61	–2,04	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,81	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,65	–0,01	0,92	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,24	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	1,16	0,35	1,12	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,37	0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,97	0,28	0,00	0,00	0,00
Małej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,03	–0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,09	–0,19	–0,83	0,00	0,00
	1–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,10	–0,10	0,83	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,04	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,19	0,29	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

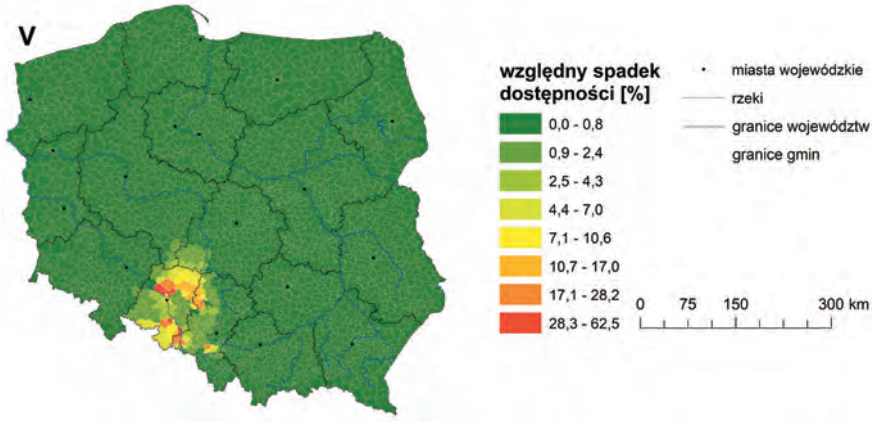
Źródło: opracowanie własne.

W przypadku grupy najmniejszych jednostek osadniczych (do 5 tys. mieszkańców) wpływ na ich dostępność czasową na skutek wystąpienia analizowanego zagrożenia naturalnego uwidacznia się w przypadku każdego z regionów wodnych, przy czym w przypadku Małej Wisły są to zmiany śladowe. Większe jednostki osadnicze doświadczają pogorszenia dostępności czasowej głównie w związku z wystąpieniem zagrożenia w regionach wodnych Dolnej i Środkowej Wisły. Niezależnie od umiejscowienia symulacji powodzi obniżenie dostępności czasowej dotyka w zasadniczy sposób te jednostki osadnicze, w których czas dojazdu do ośrodków powiatowych nie przekraczał kwadransa. Wynika to po pierwsze z ich dużej gęstości i dość równomiernego rozkładu przestrzennego w granicach kraju, ale również wysokiego poziomu opcjonalności ścieżek przejazdu, który w naturalny sposób wzrasta wraz z akceptowanym przez podróżujących wydłużaniem czasu dojazdu. Zasygnalizowane prawidłowości mają miejsce także w przypadku symulacji powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia wynoszącym 10 i 1% (od strony rzeki), a całkowity wolumen zaobserwowanych tam zmian jest niższy odpowiednio o około 19 i 8%.

6.1.2. Obszar dorzecza Odry

Kiedy występowanie potencjalnego zagrożenia rozpatrywane jest na obszarze dorzecza Odry, niezależnie od uwzględnianego scenariusza (ryc. 6.6–6.8) najdalej idące negatywne konsekwencje dla dostępności transportowej analizowanej w lokalnej rozdzielczości przestrzennej niesie za sobą powódź w regionie wodnym Środkowej Odry.

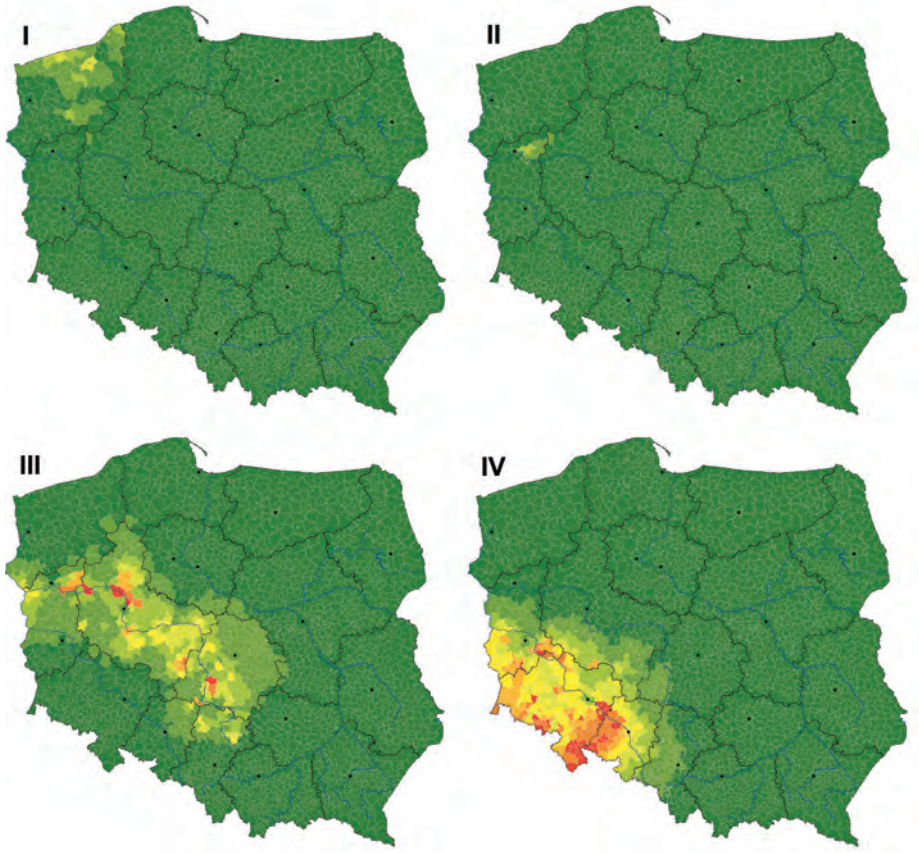


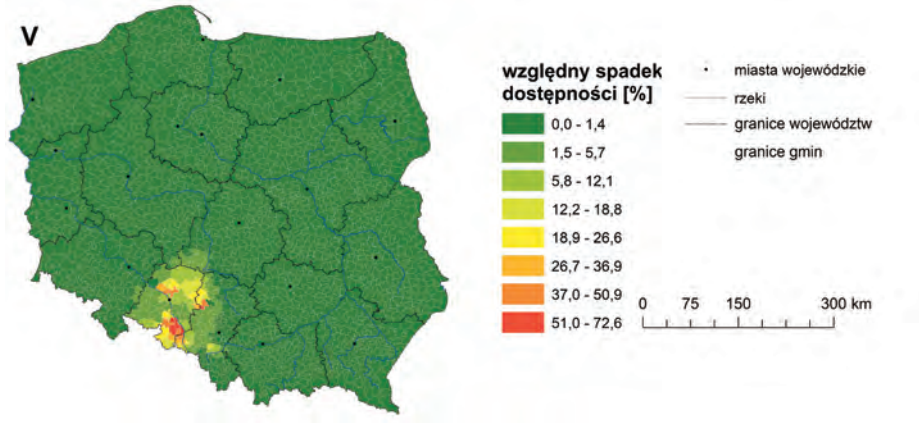


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.6. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

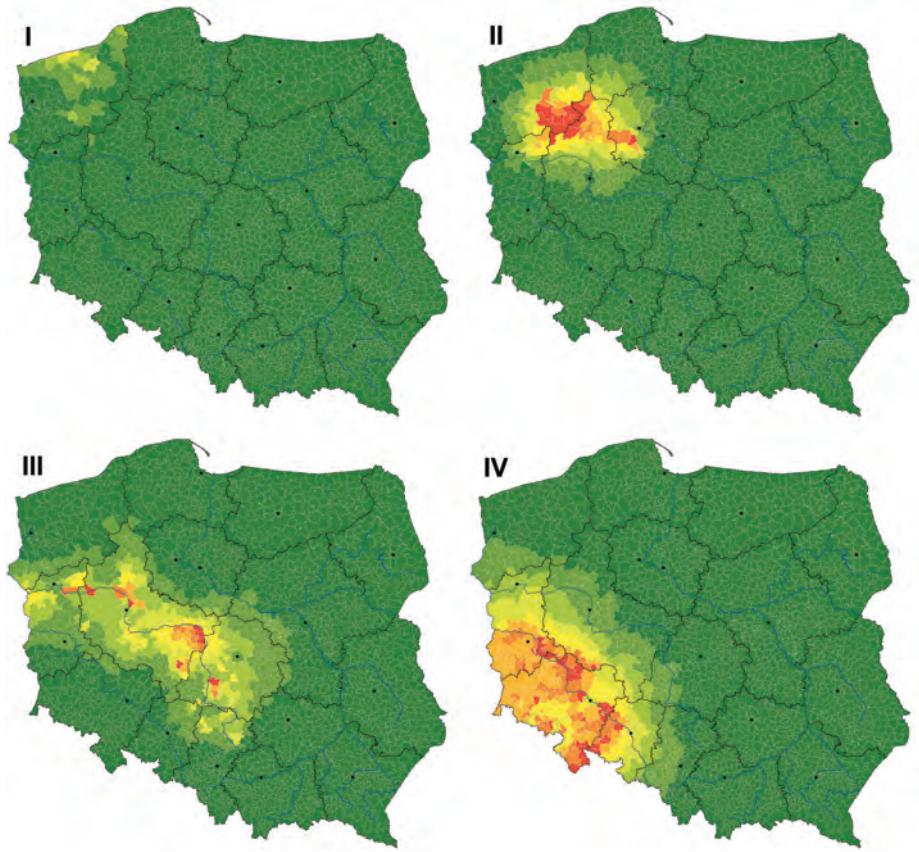


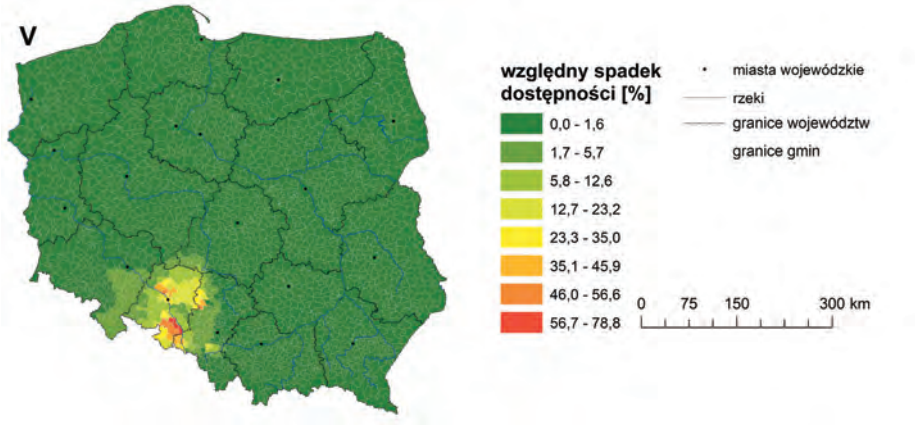


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.7. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne





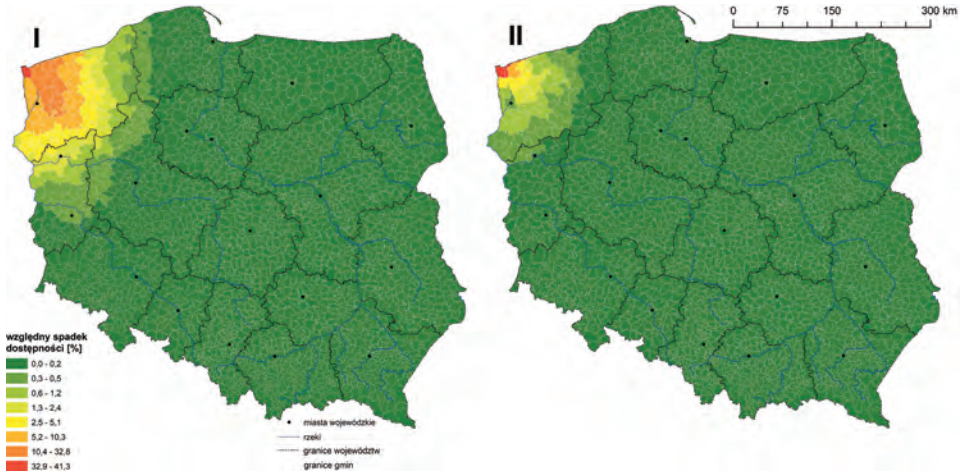
I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.8. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Duża rozpiętość przestrzenna zaobserwowanych spadków wynika wprost z rozległości tego regionu wodnego i licznej grupy rejonów komunikacyjnych, na terenie których doszło do bezpośredniego oddziaływania wód powodziowych na sieć drogową. Jest to również region, gdzie występują najwyższe względne redukcje potencjałów rejonów komunikacyjnych. W przypadku podróży krótkich potencjał wyjściowy gmin województwa lubuskiego nie należy do najwyższych, więc bezwzględne spadki dostępności również są ograniczone. Niemniej jednak w przypadku województwa dolnośląskiego czy zachodniej części opolskiego występują wyspowo obszary o wysokim poziomie dostępności potencjałowej (Wrocław czy powiat wrocławski oraz częściowo powiat brzeski), gdzie powódź może przynieść jego redukcję o ponad 30%. Analiza opracowań kartograficznych każe ponadto wspomnieć o sytuacji towarzyszącej ewentualnej powodzi w regionie wodnym Warty. O ile ze względu na swoją rozciągłość równoleżnikową wariant ten przynosi widoczne konsekwencje dla dostępności transportowej na dużym obszarze, o tyle jednak znaczące względne jej spadki dotyczą pojedynczych rejonów komunikacyjnych, które w warunkach „normalnych" nie należały do grupy gmin o ponadprzeciętnym potencjale. W przypadku centralnej i wschodniej części województwa opolskiego i zachodniej województwa śląskiego (objętych symulacją powodzi w regionie wodnym Górnej Odry) bardzo istotną rolę dla rozkładu przestrzennego zaburzeń poziomu dostępności odgrywa autostrada A4.

Stanowi swego rodzaju „klin" wobec spadków będących konsekwencją ingerencji w sieć drogową i masy rejonów komunikacyjnych, chociażby powiatu opolskiego czy kędzierzyńsko-kozielskiego.



I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

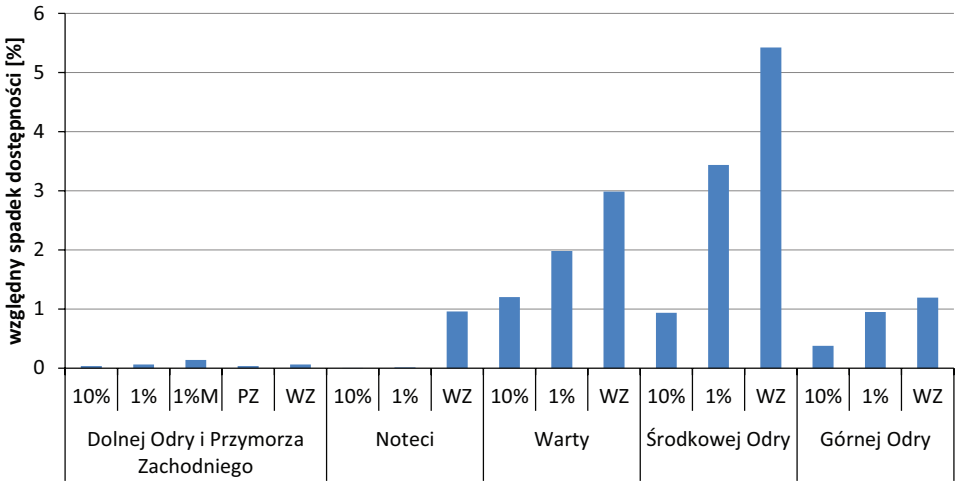
Ryc. 6.9. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Chociaż rejony komunikacyjne i sieć drogowa województwa zachodniopomorskiego narażone są na bezpośrednie oddziaływanie powodzi, zarówno od strony rzeki, jak i morza (ryc. 6.9), to można powiedzieć, że nie jest to zagrożenie mogące znacząco wpłynąć na równowagę transportową tego obszaru. Potencjalne niebezpieczeństwo pojawiające się od strony rzeki, występujące w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, to spadki potencjału nieprzekraczające 10%. Jedynie przypadek całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w związku z powodzią w regionie wodnym Noteci może przynieść dalej idące konsekwencje w południowo-wschodniej części województwa. Ewentualne zagrożenie od strony morza skutkować może najczęściej kilkuprocentowym spadkiem poziomu dostępności potencjałowej (poza Świnoujściem, gdzie redukcja jest wyraźniejsza). W związku z symulacją zagrożenia od strony morza wyłączone zostają z eksploatacji te odcinki sieci drogowej, które z perspektywy krajowej umiejscowione są peryferyjnie. Powoduje to, że bardzo ograniczona liczba podróży realizowanych pomiędzy włączonymi do badania rejonami komunikacyjnymi odbywa się po ścieżkach obejmujących zagrożone odcinki.

Największy ich udział stanowią te o charakterze lokalnym, stąd o ile spadki dostępności potencjałowej są tu ograniczone, ale dostrzegalne, o tyle w przypadku podróży długich (analizowanych w dalszej części rozdziału) są marginalne. Tam bowiem, w związku z obniżeniem oporu przestrzeni, wpływ wzrostu czasu przejazdu (wynikający z konieczności wyszukania nowej, bezpiecznej ścieżki) w mniejszym stopniu decyduje o redukcji potencjału.

Spojrzenie na skutki wystąpienia powodzi w poszczególnych wariantach z perspektywy zmian potencjałowej dostępności transportowej w skali ogólnokrajowej (ryc. 6.10) potwierdza konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na symptomy zagrożenia, kiedy pojawiają się w regionie wodnym Środkowej Odry.



Ryc. 6.10. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Powódź 10-letnia pociąga za sobą bardzo ograniczone konsekwencje, jednak w regionie tym występują najdynamiczniejsze spadki poziomu dostępności w związku z uwzględnieniem jednoprocentowego prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi oraz scenariusza, w którym zniszczeniu ulegają wały przeciwpowodziowe. Dlatego też bardzo istotny jest w związku z tym stały monitoring powodzi podczas wystąpienia pierwszych jej symptomów. O ile bowiem jej oddziaływanie na sieć drogową charakterystyczne dla zasięgu wody 10-letniej nie skutkuje nawet jednoprocentowym spadkiem dostępności potencjałowej w skali Polski i nie wymusza na podróżujących i zarządcach sieci daleko idących zmian zachowań komunikacyjnych czy organizacji ruchu, o tyle odpowiednio wczesne zauważenie oznak omawianego zagrożenia niosącego większe potencjalne

niebezpieczeństwo może umożliwić wdrożenie rozwiązań (technicznych i organizacyjnych), które mogą ograniczyć negatywne konsekwencje w postaci wzrostu kosztów (odtworzenia infrastruktury i osiągnięcia nowego poziomu równowagi) w systemie transportu drogowego.

Ingerencja w sieć drogową skutkująca najwyraźniejszym zaburzeniem dostępności czasowej na poziomie lokalnym wiąże się z wystąpieniem powodzi w regionie wodnym Środkowej Odry (tab. 6.2).

Tab. 6.2. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	4	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–15	jednostki osadnicze	–0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,10	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,09	–0,32	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,22	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,13	0,32	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Noteci	0–15	jednostki osadnicze	–0,13	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,13	–0,31	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,39	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,31	–0,20	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,34	0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,36	0,51	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00

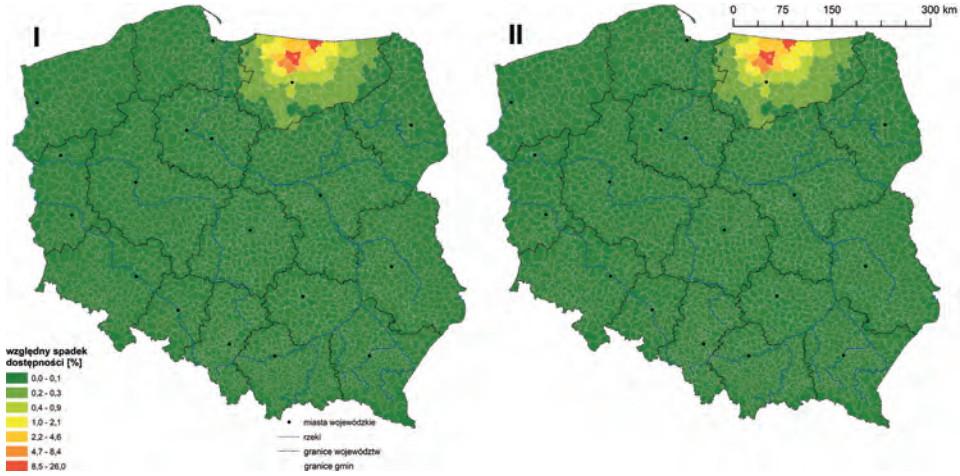
1	2	4	4	5	6	7	8
Warty	0–15	jednostki osadnicze	–0,39	–0,94	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–0,39	–1,28	–1,57	0,00	–4,98
	15–30	jednostki osadnicze	–1,31	–0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,80	–0,42	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,17	1,65	1,48	0,00	0,00
		ludność	0,84	1,70	1,57	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,52	0,00	0,00	0,00	2,63
		ludność	0,35	0,00	0,00	0,00	4,98
Środkowej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,73	–1,42	–3,70	–4,26	0,00
		ludność	–1,07	–1,36	–3,45	–5,64	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–1,37	–2,36	0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,25	–2,33	0,49	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,30	1,89	0,74	2,13	0,00
		ludność	1,33	2,06	0,56	3,11	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,54	1,42	2,22	2,13	0,00
		ludność	0,66	1,23	2,40	2,52	0,00
Górnej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,14	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,28	–0,51	–0,51	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,29	0,00	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,51	–0,01	–0,36	–1,69	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,28	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,46	0,14	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,15	0,24	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,34	0,38	0,86	1,69	0,00

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku scenariuszy obrazujących prawdopodobieństwo powodzi na poziomie 10% i 1% wydłużenie czasu przejazdu jest również widoczne, kiedy symulacja dotyczy regionu wodnego Warty. Niemniej jednak występujące tam względne zmiany liczby jednostek osadniczych i ich mieszkańców są wyraźnie mniejsze. Wskazać należy również, że niezależnie od rozpatrywanego scenariusza omawianej klęski żywiołowej to jednostki osadnicze o populacji od 5 do 20 tys. osób stanowią grupę, do której podróże najczęściej ulegają wydłużeniu.

6.1.3. Obszar dorzecza Pregoły

W zakresie wpływu na dostępność transportową wystąpienie powodzi w granicach najmniejszego z włączonych do badania obszarów dorzeczy można właściwe jedynie rozpatrywać na poziomie lokalnym, choć i w tym przypadku jest on bardzo ograniczony (ryc. 6.11). Niezależnie, jakie prawdopodobieństwo powodzi zostanie przyjęte, spadek poziomu dostępności potencjałowej w skali ogólnopolskiej jest bliski, ale nie osiąga nawet 0,025%. Spadki potencjału zaobserwowane na poziomie rejonów komunikacyjnych niemalże nie wykraczają poza granice województwa warmińsko-mazurskiego, a o widocznych konsekwencjach dla dostępności transportowej można mówić jedynie w przypadku powiatów kętrzyńskiego, bartoszyckiego czy olsztyńskiego.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1%

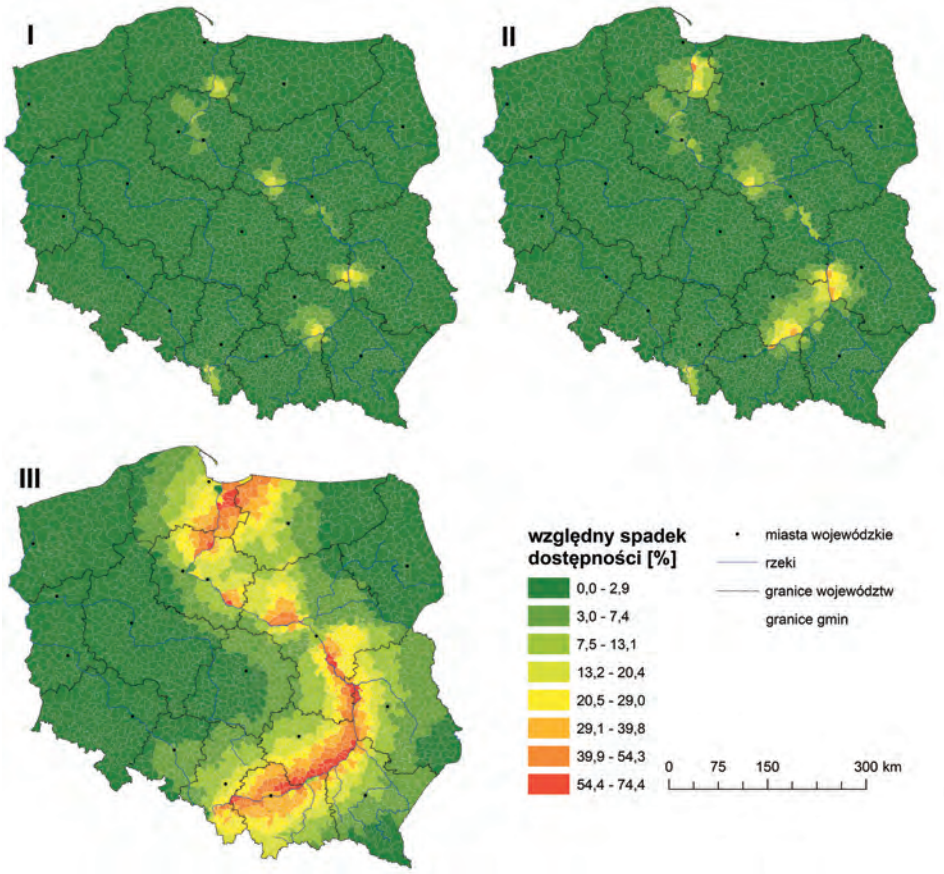
Ryc. 6.11. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Znikomy wpływ powodzi w regionie wodnym Łyny i Węgorapy na sieć drogową uwidacznia się również wtedy, kiedy analizie poddaje się dostępność transportową na poziomie podróży pomiędzy poszczególnymi jednostkami osadniczymi. Jedyny odnotowany wzrost czasu przejazdu dotyczył grupy jednostek najmniejszych (do 5 tys. mieszkańców) i objął 0,01% ludności zamieszkującej jednostki tej wielkości.

6.1.4. Główne rzeki

Analizy zmian dostępności transportowej prowadzone przy założeniu wystąpienia powodzi na głównych (ze względu na długość i powierzchnię dorzecza) rzekach w Polsce (Wisła, Odra, Warta) nie są w żaden sposób motywowane chęcią sprawdzenia, w jaki sposób powódź na całym ich biegu jednocześnie oddziaływać może na funkcjonowanie transportu drogowego. Wnioskowanie pod takim kątem, bez świadomości roli zmienności w czasie tak rozległego przestrzennie zjawiska, byłoby zapewne obarczone znaczną nadinterpretacją. Pobudką, dla której włączono do badania kolejne scenariusze, jest konieczność określenia cech zmian dostępności transportowej (przy uwzględnieniu podróży krótkich i długich) powstałych wskutek wprowadzenia odmiennego w stosunku do regionów wodnych układu obszarów zagrożonych powodzią. Podobnie jak w przypadku badania opartego na symulacjach w poszczególnych regionach wodnych, tak i w przypadku podejścia uwzględniającego główne rzeki przyjęte zostało założenie, zgodnie z którym z eksploatacji wyłączane są wszystkie odcinki sieci drogowej, które zostają zalane lub „odcięte" w granicach całego uwzględnianego obszaru. To cecha, w której upatrywać można zbyt daleko idącego uproszczenia i słabości analizy, której drogą eliminacji mogą być kolejne badania, ale o charakterze dynamicznym. Wymagają one jednak danych przestrzennych z atrybutem czasu, dotyczących zjawiska powodzi, lecz również sieci drogowej, ponieważ moment powrotu jej poszczególnych fragmentów do pierwotnej funkcjonalności będzie zapewne zróżnicowany względem ustąpienia omawianego zagrożenia. Z drugiej strony jednak podejście to pozwala na wychwycenie prawidłowości, które mogą ujawnić się w szczególnych warunkach współwystępowania powodzi w zgoła mało prawdopodobnych konfiguracjach przestrzennych. Tym samym analiza zaobserwowanych zmian w dostępności transportowej powinna być prowadzona nie przy założeniu, że powódź występuje na całej długości rzeki, ale raczej przy uwzględnieniu szeregu wariantów składających się na całą jej długość, które ze względu na ułatwianie percepcji zostały włączone do badania równolegle. Podejście takie (także przy zastosowaniu symulacji w poszczególnych regionach wodnych) daje ponadto możliwość uwzględnienia sytuacji, w której prężność sieci transportowej jest na poziomie uniemożliwiającym przywracanie sprawności jej poszczególnych odcinków systematycznie, wraz z ustępowaniem zagrożenia. Może to skutkować współwystępowaniem w jednym czasie ograniczeń w eksploatacji sieci drogowej, których przyczyna (oddziaływanie wód powodziowych) w rzeczywistości wystąpiła na różnych jej odcinkach, ale również w różnych momentach czasowych.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.12. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

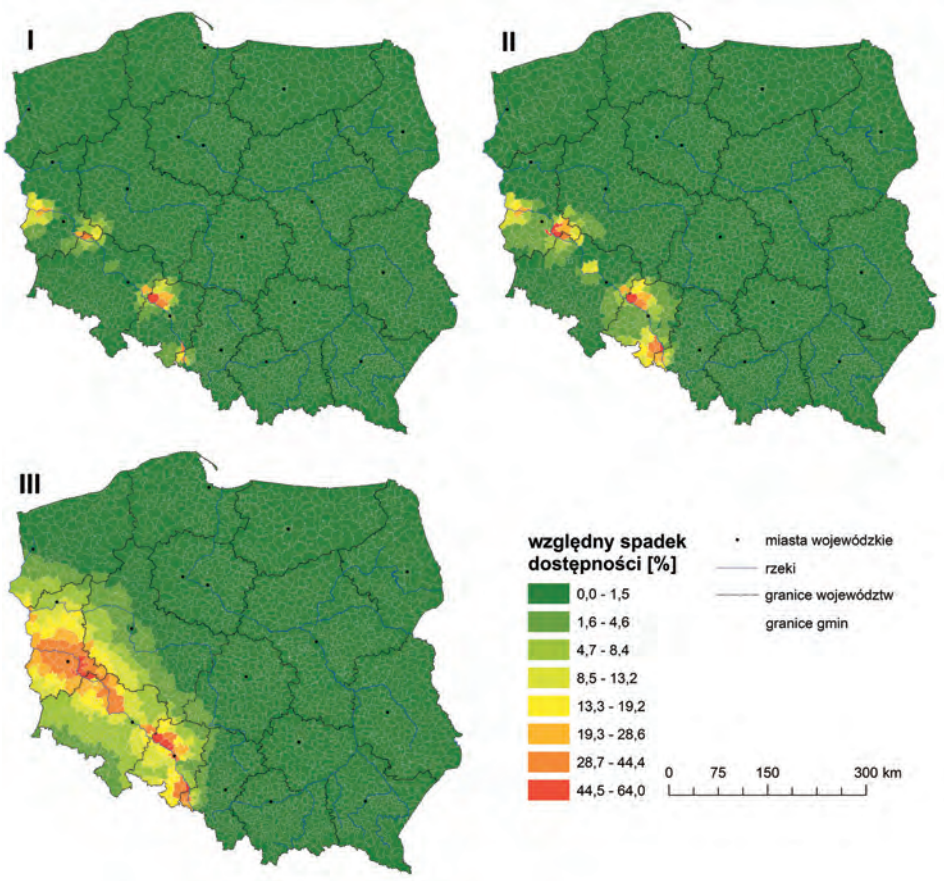
Źródło: opracowanie własne

W przypadku Wisły (ryc. 6.12) wystąpienie powodzi 10-letniej czy nawet 100-letniej w bardzo niewielkim stopniu redukuje poziom dostępności potencjałowej nielicznej grupy rejonów komunikacyjnych. W związku z przygotowaniem drogowych obiektów inżynierskich do pełnienia swojej funkcji nawet wobec tak dużego zagrożenia spadki poziomu dostępności potencjałowej występują jedynie wyspowo i są w głównej mierze konsekwencją wyłączenia z użytkowania odcinków sieci drogowej istotnych dla podróży pomiędzy sąsiadującymi ze sobą rejonami komunikacyjnymi, co w przypadku określania

dostępności potencjałowej przy uwzględnieniu podróży krótkich ma istotne znaczenie. Taka sytuacja w sposób szczególny rzutuje na spadki poziomu dostępności w powiecie kwidzyńskim, sztumskim, malborskim czy płockim i płońskim. Dodatkowym czynnikiem potęgującym obniżenie dostępności jest redukcja mas rejonów komunikacyjnych, która wyraźnie wpływa na poziom dostępności rejonów województwa świętokrzyskiego, małopolskiego i podkarpackiego. Zmiany potencjału, w tym potencjału własnego, mają w przypadku badań związanych z podróżami krótkimi duże znaczenie i w połączeniu ze wcześniej wspomnianą ingerencją w lokalną sieć drogową uwidaczniają się głównie w powiecie buskim i kazimierskim czy opolskim i kraśnickim. Zgoła inaczej kształtuje się sytuacja towarzysząca wystąpieniu powodzi w scenariuszu przewidującym całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych. Tutaj rejony komunikacyjne dotknięte spadkiem poziomu dostępności tworzą wyraźne pasmo nawiązujące swym kształtem do biegu Wisły z istotnym wytłumieniem tej redukcji w korytarzu autostrady A2. Również zestawienie ujawniające względne spadki poziomu dostępności potencjałowej w skali ogólnopolskiej (ryc. 6.15) dobitnie wskazuje na nieporównywalnie bardziej negatywny w konsekwencjach scenariusz całkowitego zniszczenia obwałowań na skutek wystąpienia powodzi na Wiśle, w tym na tle tego samego scenariusza na obu pozostałych badanych ciekach.

Wyraźny, choć niosący za sobą zdecydowanie bardziej ograniczone przestrzennie konsekwencje w postaci spadku dostępności transportowej, jest wpływ wystąpienia powodzi na Odrze, której towarzyszy zniszczenie wałów przeciwpowodziowych (ryc. 6.13). Wysoka odporność autostrad, dróg ekspresowych, w tym również obiektów inżynierskich w ich ciągach, na badany rodzaj sytuacji krytycznej uwidacznia się tutaj w formie redukcji spadku potencjału grup rejonów komunikacyjnych położonych w sąsiedztwie autostrady A4 i drogi ekspresowej S8.

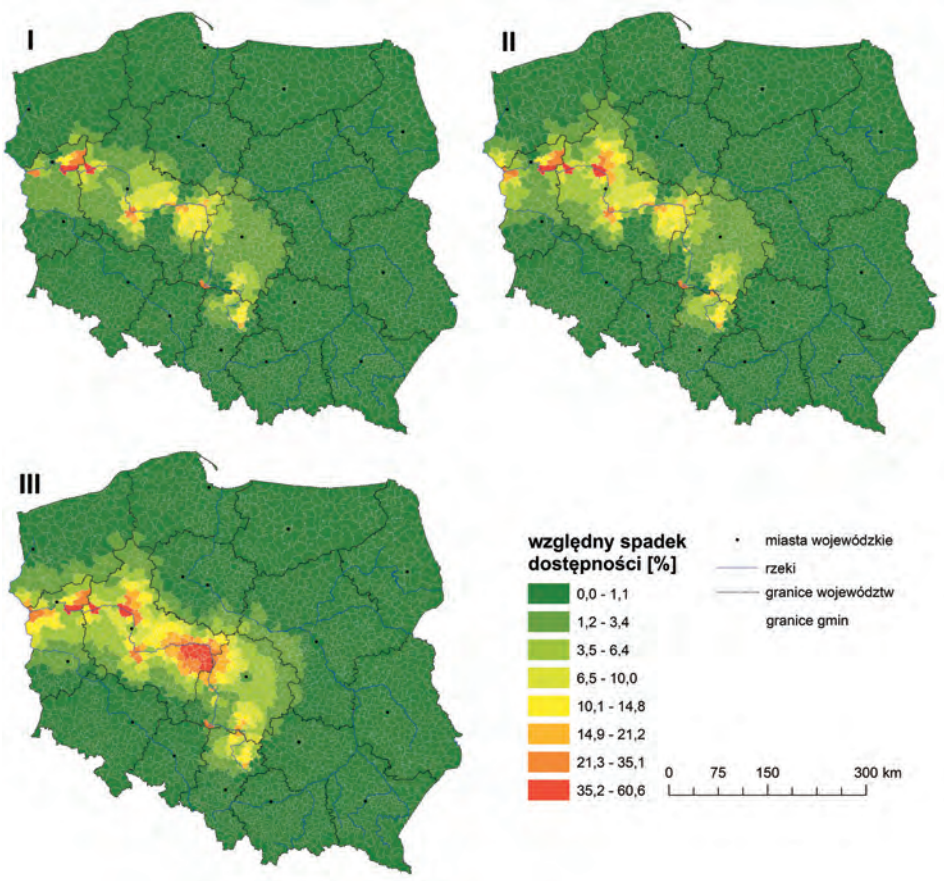
W przypadku analiz dotyczących powodzi na Warcie na szczególną uwagę zasługuje sytuacja, która może wpływać na poziom dostępności rejonów komunikacyjnych położonych w powiatach międzyrzeckim, obornickim, śremskim oraz konińskim i tureckim – przy założeniu, że zniszczeniu ulegną wały przeciwpowodziowe. Poza tym najbardziej katastrofalnym wariantem oddziaływanie powodzi na Warcie na poziom dostępności potencjałowej w skali krajowej nie odbiega od pozostałych rozpatrywanych scenariuszy.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.13. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

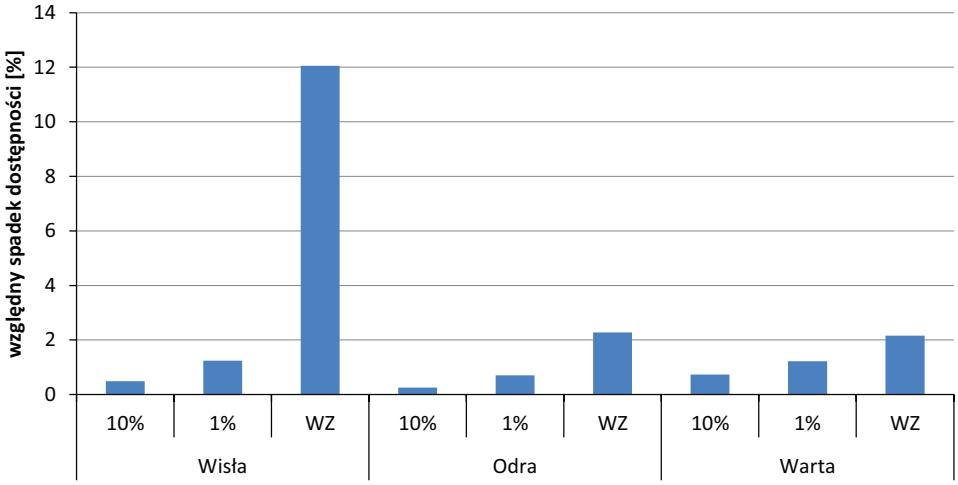
Źródło: opracowanie własne



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.14. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 6.15. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Odnotowane zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych potwierdzają, że wystąpienie powodzi 10-letniej i 100-letniej na Wiśle nie stanowi zagrożenia dla spójności przestrzennej i bezpieczeństwa mieszkańców, które wiązałoby się z wykluczeniem transportowym. Te dwa scenariusze ujawniają większą podatność na oddziaływanie związane z powodzią odcinków sieci drogowej przebiegających przez doliny Odry i Warty.

Sytuacja ta przybiera odwrotny charakter, kiedy rozpatrywany jest wariant zalania przez wody powodziowe terenów, których bezpieczeństwo zależne jest od wałów przeciwpowodziowych (tab. 6.3). W takich okolicznościach wyraźnie większa część sieci drogowej zlokalizowana jest na terenach potencjalnie zagrożonych powodzią na Wiśle. Wysoki poziom dostępności czasowej gwarantowany przez odcinki sieci o niskiej podatności na tego typu zagrożenia (np. autostrady i drogi ekspresowe) jest często niedostępny dla terenów pozostających w ich bezpośrednim oddziaływaniu w związku z zalaniem dróg umożliwiających dotarcie do wjazdów/zjazdów. W przypadku Odry i Warty zmiany przebiegu wyznaczonych izochron w stosunku do dwóch innych badanych scenariuszy powodziowych nie ingerują istotnie w relacje w sieci osadniczej.

Tab. 6.3. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych w następstwie powodzi na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Rzeka	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Wisła	0–15	jednostki osadnicze	–0,60	–0,94	–2,96	0,00	–10,53
		ludność	–0,77	–1,25	–2,76	0,00	–25,74
	15–30	jednostki osadnicze	–1,77	–0,94	0,74	–2,13	5,26
		ludność	–2,09	–0,41	0,67	–1,85	2,96
	30–45	jednostki osadnicze	0,62	0,94	0,00	0,00	2,63
		ludność	0,68	0,85	0,00	0,00	15,83
	45–60	jednostki osadnicze	1,09	0,71	0,74	0,00	2,63
		ludność	1,56	0,58	0,58	0,00	6,95
Odra	0–15	jednostki osadnicze	–0,22	–0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,39	–0,80	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,75	–0,47	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,77	–0,73	–0,86	–1,69	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,55	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,55	0,76	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,38	0,47	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,58	0,77	0,86	1,69	0,00
Warta	0–15	jednostki osadnicze	–0,20	–0,47	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–0,24	–0,69	–1,57	0,00	–4,98
	15–30	jednostki osadnicze	–1,02	–0,94	0,00	0,00	2,63
		ludność	–0,58	–0,74	0,00	0,00	4,98
	30–45	jednostki osadnicze	1,05	1,42	1,48	0,00	0,00
		ludność	0,73	1,43	1,57	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00

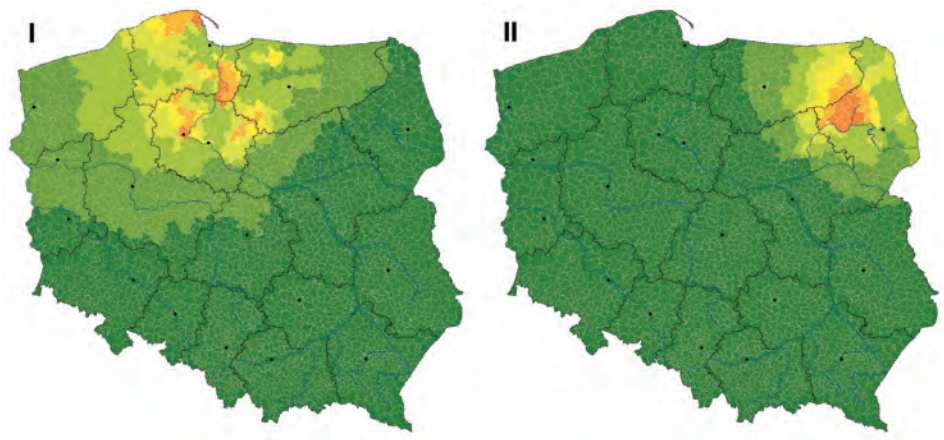
Źródło: opracowanie własne.

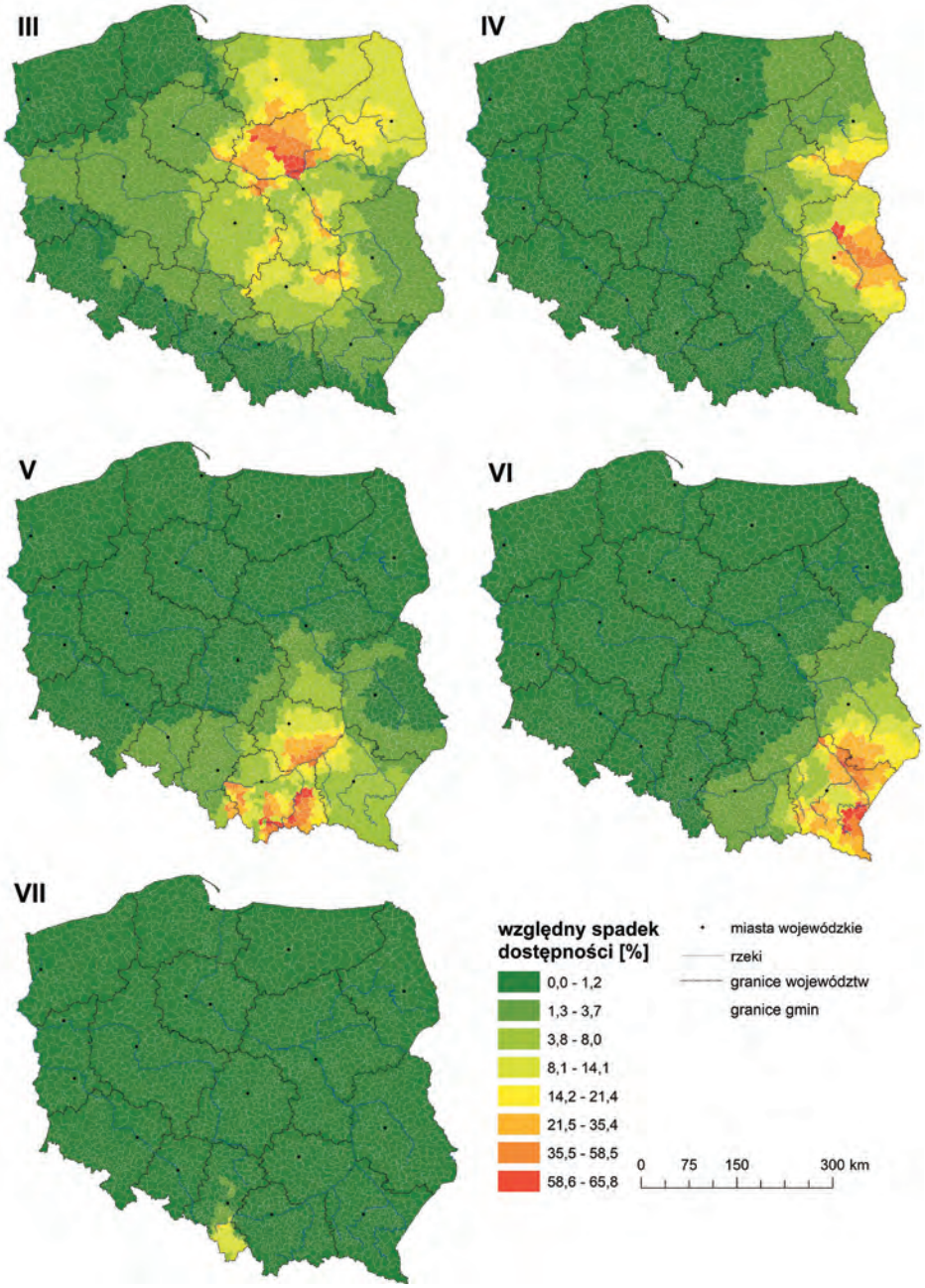
6.2. Podróże długie

Prowadzenie analiz zmian dostępności transportowej związanych z wystąpieniem powodzi, zakładając, że realizowane są podróże długie, powiązane jest z obniżeniem oporu przestrzeni, skutkującym zmniejszeniem wrażliwości dynamiki redukcji potencjału rejonu komunikacyjnego na czas podróży. Atrakcyjność jej celu spada tutaj o połowę po podróży trzykrotnie dłuższej, niż miało to miejsce przy analizowanych wcześniej zmianach uwzględniających podróże krótkie. Generalnie rzecz ujmując, redukcja wielkości mas rejonów komunikacyjnych dotkniętych powodzią oraz wydłużenie czasu przejazdu pomiędzy nimi na skutek konieczności omijania zagrożonych zalaniem odcinków sieci drogowej w przypadku podróży długich przekłada się na następujące różnice względem podróży krótkich: maksymalne względne spadki dostępności potencjałowej rejonów komunikacyjnych są niższe (w zależności od scenariusza wynoszą od niespełna jednego do ponad 20 punktów procentowych); zróżnicowanie przestrzenne względnych spadków dostępności potencjałowych rejonów komunikacyjnych objętych symulacją w określonym wariancie badania jest mniejsze – nie występują tak diametralne różnice potencjału pomiędzy rejonami ze sobą sąsiadującymi; w większości uwzględnionych scenariuszy zasięg przestrzenny istotnych zmian dostępności transportowej jest znacząco większy; nieznacznie wyższe są również względne spadki dostępności transportowej rozpatrywanej w skali ogólnokrajowej w przypadku większości scenariuszy uwzględniających całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych (maksymalnie o nieco ponad trzy punkty procentowe); w przypadku pozostałych scenariuszy powodzi spadki są przeważnie niższe, choć różnice przyjmują znacznie mniejsze wartości i nie przekraczają 0,75 punktu procentowego. Różnice te można tłumaczyć również większą liczbą rejonów komunikacyjnych, których masy składają się na poziom dostępności potencjałowej poszczególnych gmin. W większości przypadków wiąże się to z uwzględnieniem mas rejonów pozostających poza bezpośrednim oddziaływaniem powodzi (i tym samym bez redukcji ich atrakcyjności), które dodatkowo w związku ze stosunkowo niewielkim oporem przestrzeni zostały także w niewielkim stopniu obniżone. To powoduje, że podczas określania względnych spadków dostępności potencjałowej redukcja masy rejonu objętego powodzią, którego dostępność jest szacowana, oraz redukcje, których doświadczyły rejony objęte badaniem w tym samym scenariuszu, odnoszone są do większych wartości, niż miało to miejsce w przypadku podróży krótkich. W szczególnych przypadkach, kiedy ingerencja w sieć drogową i udział ludności mieszkającej na terenach zagrożonych powodzią są bardzo daleko idące i dotyczą licznej grupy rejonów komunikacyjnych, jak chociażby wtedy, kiedy ochrony przed zagrożeniem powodzią nie zapewniają wały przeciwpowodziowe, prawidłowość ta w naturalny sposób spotęguje zaobserwowane na etapie badania podróży krótkich spadki dostępności.

6.2.1. Obszar dorzecza Wisły

Ingerencja w spójność sieci drogowej i atrakcyjność rejonów komunikacyjnych mająca miejsce w przypadku wystąpienia powodzi na obszarze poszczególnych regionów wodnych dorzecza Wisły, przy założeniu, że odbywają się na niej podróże długie, przynosi negatywne konsekwencje dla dostępności transportowej gmin wszystkich województw. Szczególny przypadek stanowi sytuacja, kiedy omawiana klęska żywiołowa występuje w regionie wodnym Małej Wisły (ryc. 6.16–6.18), gdzie redukcja dostępności potencjałowej koncentruje się w województwie śląskim, a w pozostałych regionach jest marginalna. Nie ulega też niemalże zwiększeniu w związku z symulacją zagrożeń obejmujących większe obszary. W pozostałych przypadkach następstwa mają zdecydowanie ponadregionalny charakter. W zakresie zasięgu przestrzennego wyraźnie najdotkliwsze dla systemu transportowego jest wystąpienie powodzi w regionie wodnym Środkowej Wisły. Niezależnie od scenariusza analizowanego zagrożenia powstałe na jego skutek spadki dostępności potencjałowej przyjmują kilkuprocentowe wartości we wszystkich 16 województwach. Jak jednak wskazują wyniki badania prowadzonego z uwzględnieniem zmian dostępności potencjałowej w skali ogólnopolskiej, jest to najbardziej problematyczny wariant jedynie w przypadku powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% (ryc. 6.20). Natomiast powódź 100-letnia jest najbardziej problematyczna dla funkcjonowania systemu transportu drogowego (z perspektywy dostępności), kiedy ma miejsce w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły. Całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych na tym obszarze również pociąga za sobą dalece większe niż w przypadku innych scenariuszy powodzi zaburzenia dostępności potencjałowej.

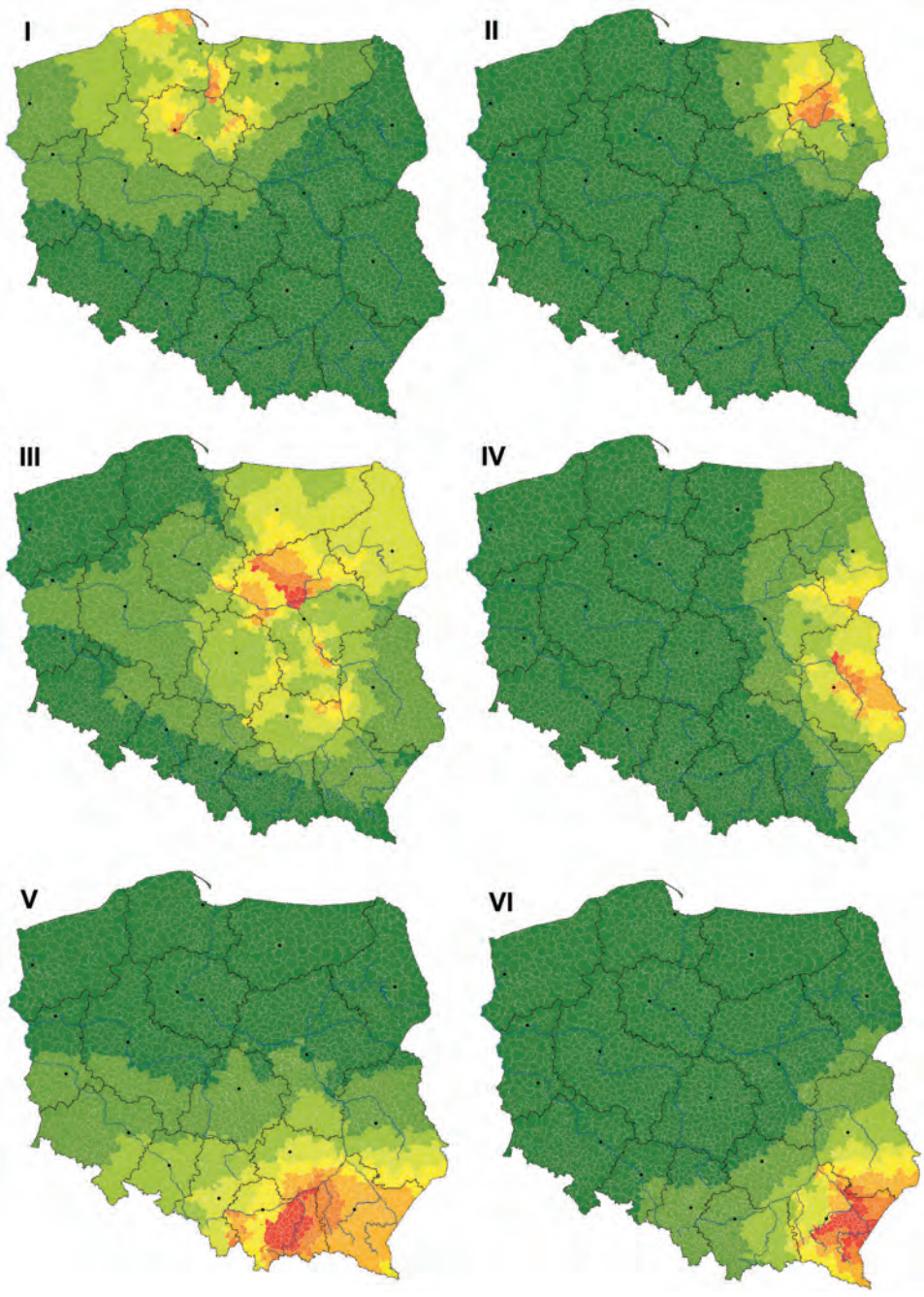


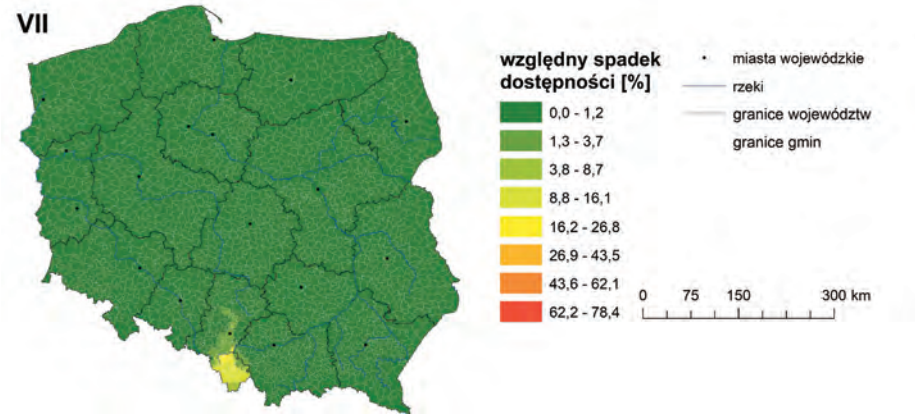


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 6.16. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

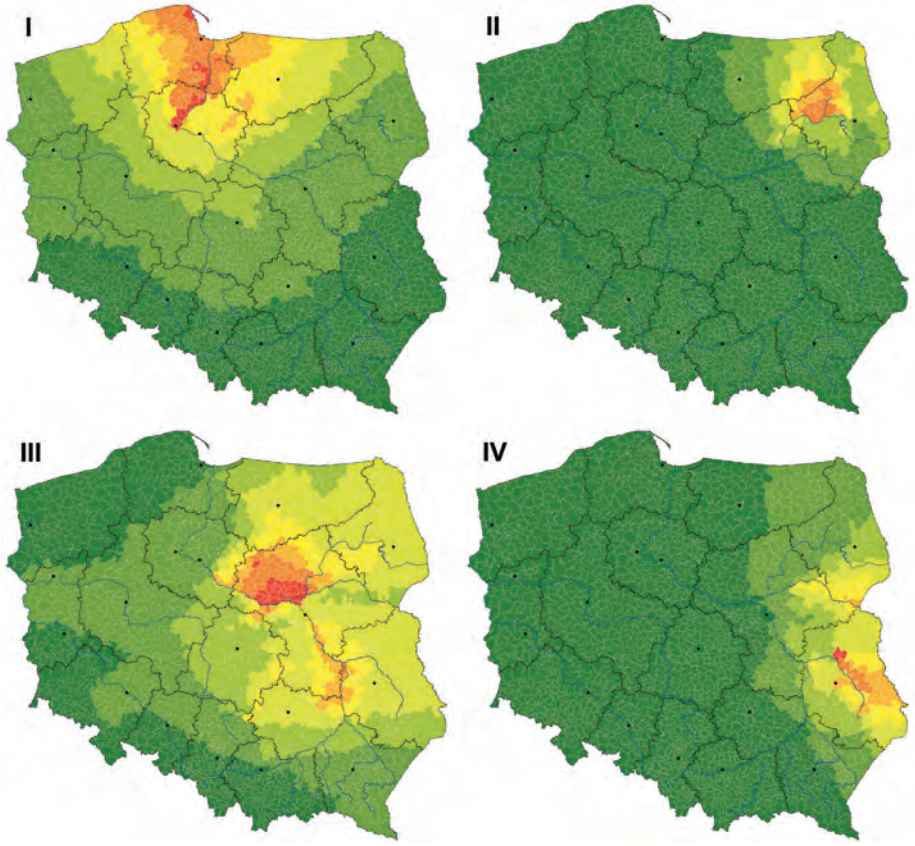

I
II
III
IV
V
VI

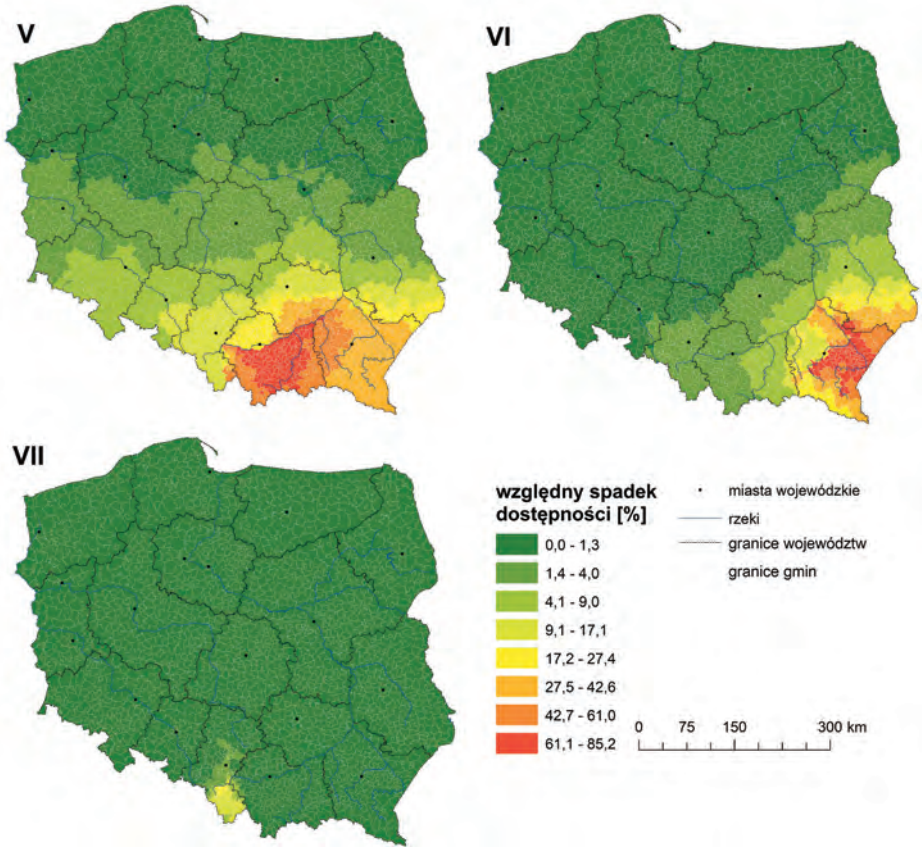


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 6.17. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



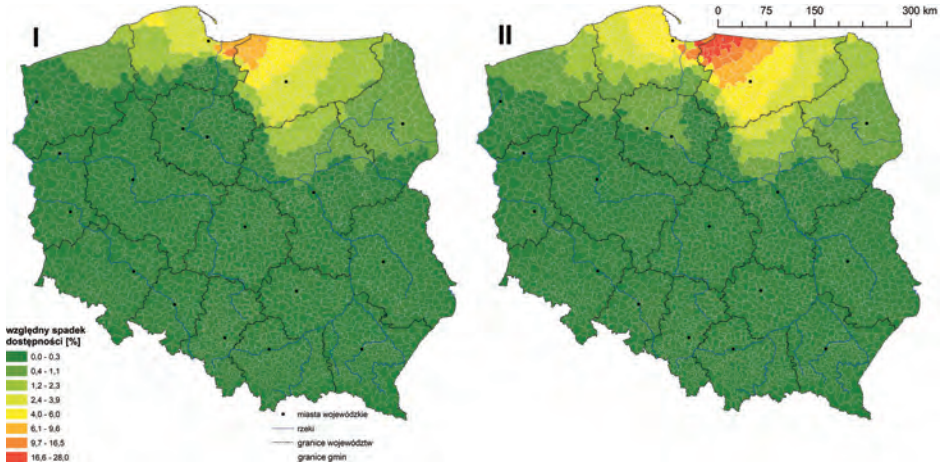


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 6.18. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Z perspektywy realizacji podróży długich wyłączenia odcinków w sieci drogowej powstałe na skutek powodzi od strony morza w obszarze dorzecza Wisły mają bardzo ograniczony wpływ na dostępność potencjałową (ryc. 6.19). Pomimo dużego udziału ludności zamieszkującej tereny narażone na zalanie w ogóle mieszkańców rejonów komunikacyjnych objętych oddziaływaniem wód powodziowych (szczególnie w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego) funkcjonowanie infrastruktury drogowej o wysokiej odporności (np. droga ekspresowa S7 wraz z budowlami inżynierskimi w jej ciągu) nie pozwoliło na diametralny wzrost czasu podróży do pozostałych destynacji i nie spotęgowało redukcji poziomu dostępności potencjałowej.

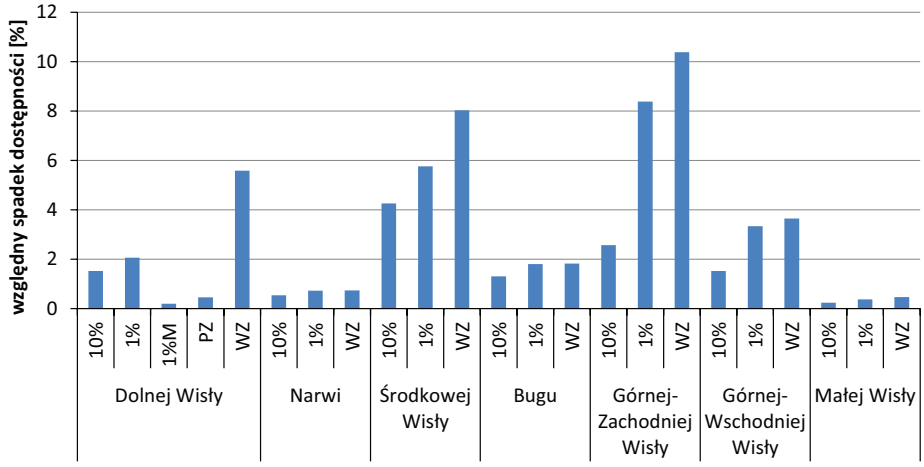


I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 6.19. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Owe nieznaczne zachwiania w dostępności potwierdza również zestawienie jej względnych spadków w ujęciu ogólnopolskim (ryc. 6.20). Ich poziom koresponduje z degresją występującą wskutek następstw powodzi w regionie wodnym Małej Wisły i nie przekracza 0,5%.



Ryc. 6.20. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Skutki powodzi w zakresie dostępności zmierzono, podobnie jak w przypadku podróży krótkich, względną zmianą liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności wobec określonych celów podróży i w zdefiniowanych strefach czasu dojazdu. Tu jednak jako cele podróży ustalono ośrodki wojewódzkie, zaś interwały czasowe przyjęły wartość pół godziny (tab. 6.4).

Tab. 6.4. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,70	–1,18	–0,74	0,00	–5,26
		ludność	–0,95	–1,12	–0,65	0,00	–6,13
	30–60	jednostki osadnicze	–2,77	–2,83	–3,70	–2,13	–2,63
		ludność	–2,24	–2,93	–3,48	–1,85	–1,17
	60–90	jednostki osadnicze	–0,69	–0,47	–0,74	–2,13	2,63
		ludność	–0,17	–0,76	–1,34	–2,33	1,17
	90–120	jednostki osadnicze	2,20	2,83	2,22	0,00	0,00
		ludność	1,74	3,02	2,42	–0,57	0,00
Narwi	0–30	jednostki osadnicze	–0,05	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,05	–0,60	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,16	0,47	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,06	0,60	0,00	–1,93	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,05	–0,24	–0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,60	–0,24	–0,52	1,93	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,03	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,24	0,00	0,00	0,00

Tab. 6.4 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Środkowej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,45	–2,59	–4,44	–2,13	–2,63
		ludność	–0,95	–3,29	–4,20	–1,81	–15,83
	30–60	jednostki osadnicze	–4,00	–3,30	–5,93	–2,13	–2,63
		ludność	–3,68	–3,76	–6,05	–1,65	–1,09
	60–90	jednostki osadnicze	–3,86	0,94	5,19	–2,13	–2,63
		ludność	–1,67	1,18	4,68	–2,84	–1,19
	90–120	jednostki osadnicze	4,98	3,77	3,70	4,26	5,26
		ludność	4,15	4,71	4,38	4,65	17,02
Bugu	0–30	jednostki osadnicze	–0,45	–0,24	–2,22	0,00	–2,63
		ludność	–0,78	–0,16	–1,96	0,00	–3,24
	30–60	jednostki osadnicze	–1,65	–0,47	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–1,42	–0,82	–0,22	–2,06	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,67	–1,18	0,74	–2,13	2,63
		ludność	–1,28	–1,80	0,97	–2,06	3,24
	90–120	jednostki osadnicze	0,48	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,62	1,02	0,73	0,25	0,00
Górnej-Zachodniej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,53	–1,42	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–1,58	–1,42	–1,05	0,00	–6,95
	30–60	jednostki osadnicze	–1,73	–2,83	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–3,49	–2,65	–1,64	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,42	–1,42	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,76	–0,62	–1,20	–2,64	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,18	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,68	–0,26	0,11	0,00	0,00

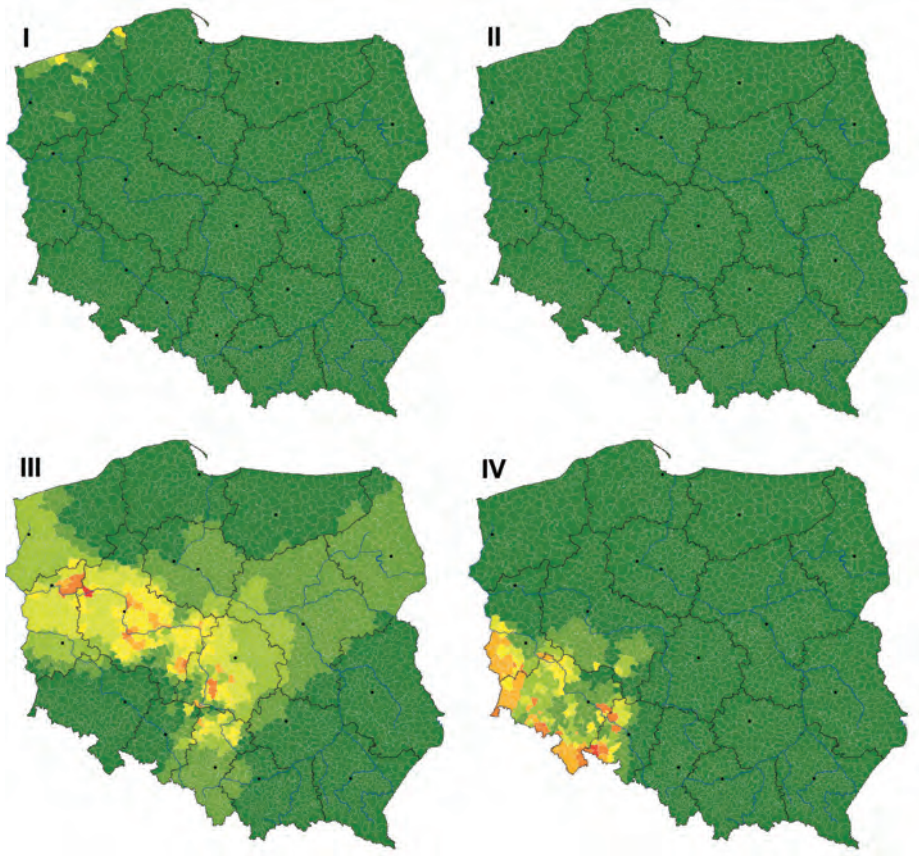
1	2	3	4	5	6	7	8
Górnej-Wschodniej Wisły	0-30	jednostki osadnicze	–0,11	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,59	–0,56	0,00	0,00	0,00
	30-60	jednostki osadnicze	–0,65	–2,36	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–2,15	–2,07	–2,04	0,00	0,00
	60-90	jednostki osadnicze	–1,10	0,71	–2,22	–2,13	0,00
		ludność	–2,21	0,71	–2,94	–2,01	0,00
	90-120	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	1,48	0,00	0,00
		ludność	0,47	0,00	2,02	0,00	0,00
Małej Wisły	0-30	jednostki osadnicze	–0,02	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	–0,34	0,00	0,00	0,00
	30-60	jednostki osadnicze	–0,12	–1,42	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,63	–1,39	–0,83	0,00	–1,65
	60-90	jednostki osadnicze	0,04	0,71	0,00	0,00	2,63
		ludność	0,17	0,92	0,07	0,00	1,65
	90-120	jednostki osadnicze	0,09	1,18	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,46	0,81	0,76	0,00	0,00

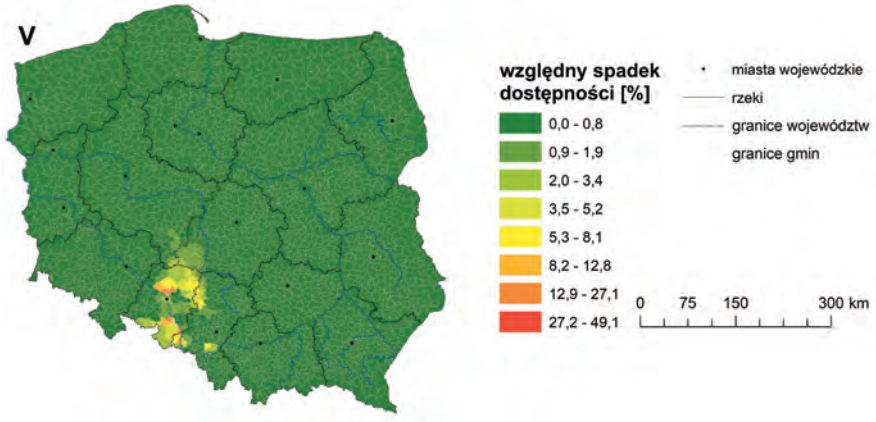
Źródło: opracowanie własne.

W przypadku analizowanych zagrożeń pojawiających na obszarze dorzecza Wisły w scenariuszu obejmującym 10 i 1% prawdopodobieństwo jego wystąpienia dostępność czasowa do ośrodków wojewódzkich szczególnie obniża się w związku z powodzią w regionach wodnych Dolnej Wisły i Bugu. W związku z powodzią 100-letnią istotna zmiana kształtu linii jednakowego czasu dojazdu do miast regionalnych ma miejsce również w regionie wodnym Środkowej Wisły i Górnej-Wschodniej Wisły. W obu przypadkach wydłużenie czasu przejazdu koncentruje się szczególnie w obrębie relacji z najmniejszymi jednostkami osadniczymi (do 5 tys. mieszkańców). W scenariuszu uwzględniającym całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych negatywne konsekwencje w zakresie dostępności czasowej stolic regionów wyraźnie koncentrują się w następstwie zniszczenia tego typu budowli w regionie wodnym Środkowej Wisły. Zaobserwowane ingerencje w dostępność czasową są zdecydowanie najdalej idące w grupie dotychczas rozpatrywanych scenariuszy powodzi oraz najbardziej wyraźne pośród innych obszarów objętych tymi symulacjami.

6.2.2. Obszar dorzecza Odry

Wprowadzenie do rozważań nad wpływem powodzi na dostępność transportową podróży długich wskazuje, że na obszarze dorzecza Odry zagrażające równowadze transportowej jest zalanie odcinków sieci drogowej w regionach wodnych Warty i Środkowej Odry. Ich położenie na tle ponadlokalnej i ponadregionalnej sieci drogowej powoduje rozległe przestrzennie negatywne skutki w zakresie dostępności potencjałowej rejonów komunikacyjnych w Polsce. Ze względu na stosunkowo niewielką powierzchnię zagrożoną zalaniem w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% ograniczona jest też liczba ludności zamieszkującej na tych obszarach, a więc i redukcje atrakcyjności rejonów komunikacyjnych nie przyjmują tutaj znacznych wartości. Stąd też o ile najwyższe względne zmiany dostępności potencjałowej poszczególnych rejonów komunikacyjnych koncentrują się głównie w granicach regionu wodnego Środkowej Odry, o tyle najszerszy zakres przestrzenny spadków (chociaż bardzo niewielkich) występuje wskutek pojawienia się omawianego zagrożenia naturalnego w regionie wodnym Warty (ryc. 6.21), w przypadku którego dominującą rolę odgrywa ingerencja w komponent transportowy.

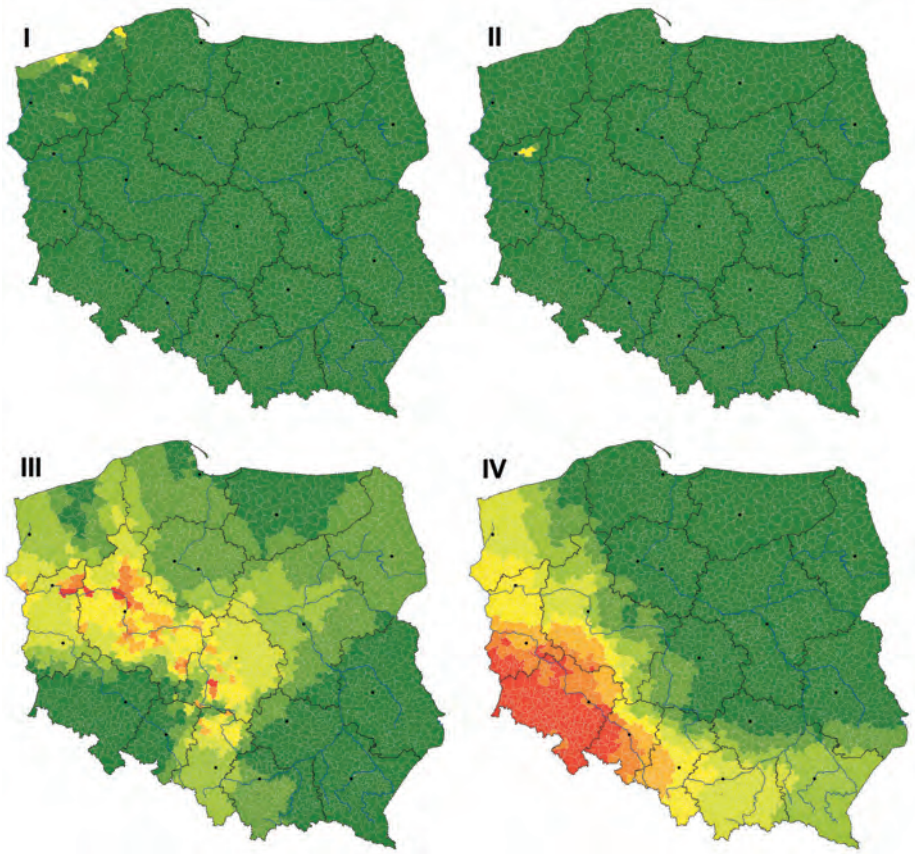


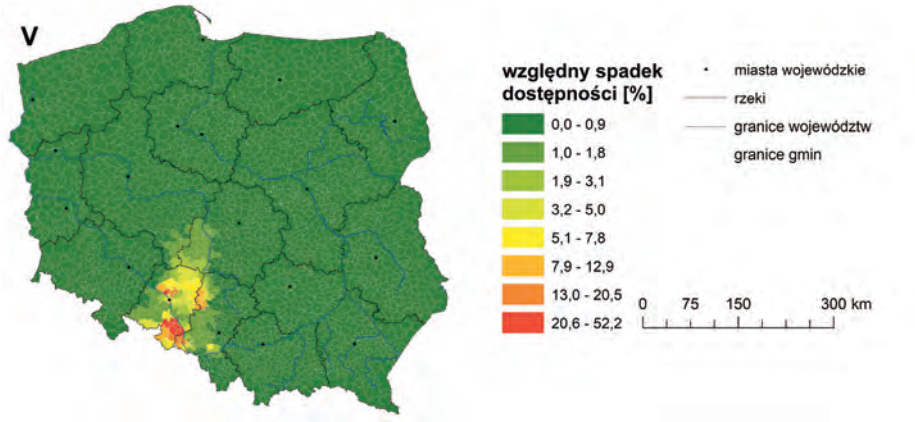


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.21. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

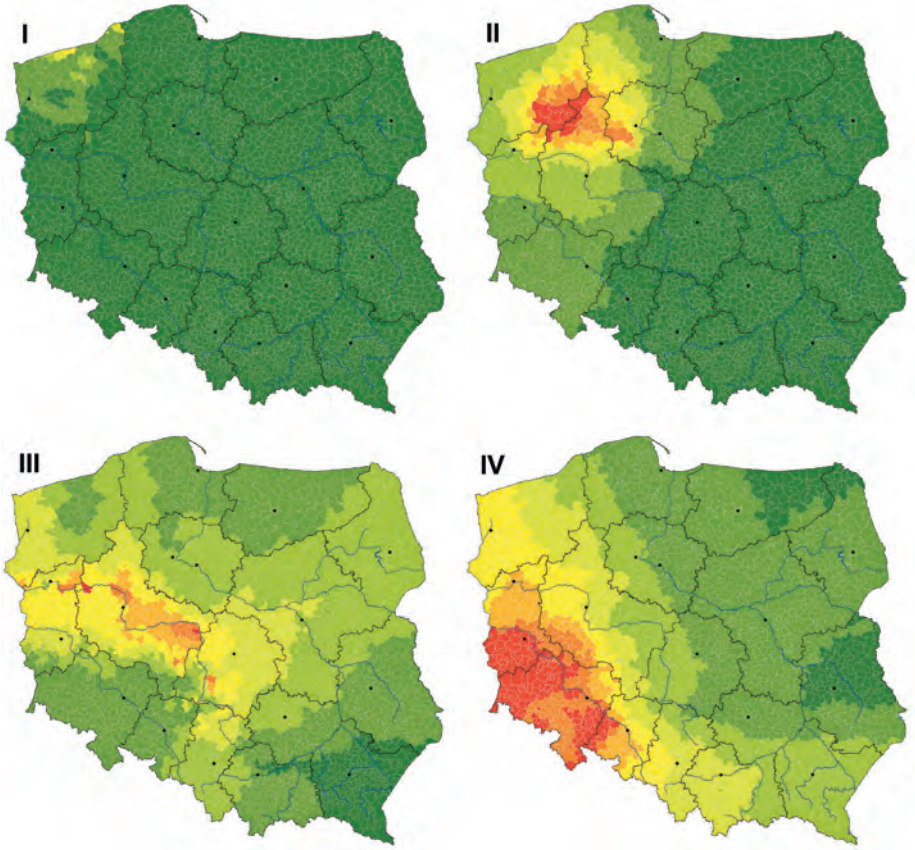


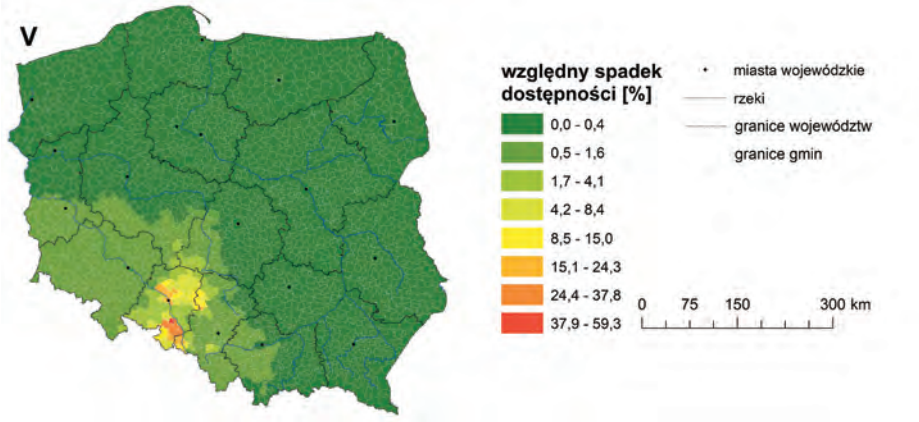


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.22. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



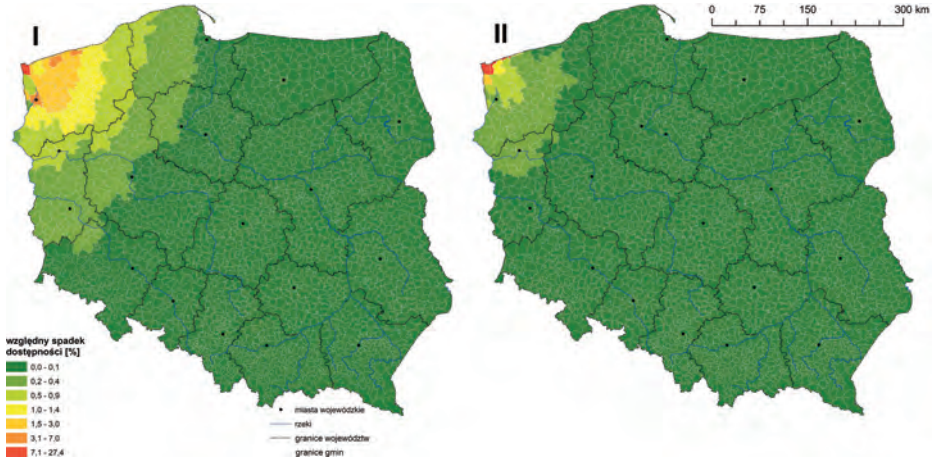


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 6.23. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

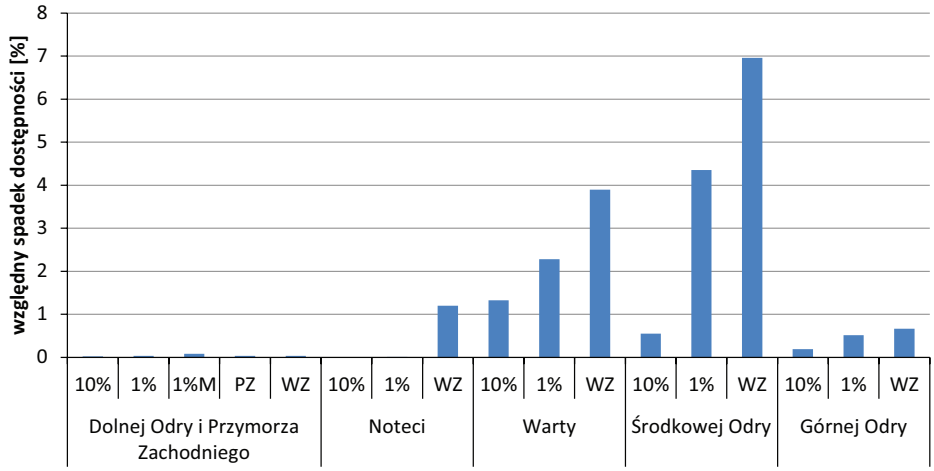
Prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi 1% i całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych wiąże się z dynamicznym wzrostem roli komponentu użytkowania terenu w występujących dużych i rozległych spadkach dostępności, przede wszystkim w województwie dolnośląskim (ryc. 6.22 i 6.23). Z kolei komponent transportowy w decydującym stopniu wpływa na względne spadki dostępności potencjałowej na pograniczu województw wielkopolskiego i zachodniopomorskiego, kiedy swoją rolę przestają odgrywać wały przeciwpowodziowe. Choć lokalnie uszczuplenia potencjału przekraczają w związku z tą sytuacją nawet 1/3 wyjściowego poziomu dostępności położonych tam rejonów komunikacyjnych, to w skali ogólnopolskiej są porównywalne z następstwami powodzi 10-letniej w regonie wodnym Warty (ryc. 6.25).



I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 6.24. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 6.25. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Powódź w regionach wodnych Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego (niezależnie od scenariusza) oraz Noteci niemalże w ogóle nie wpływa na dostępność czasową jednostek osadniczych do ośrodków wojewódzkich. Analiza

prowadzona w oparciu o zmiany przebiegu policentrycznych izochron dojazdu do tej grupy miast potwierdziła, że powódź w regionach wodnych Warty, a szczególnie Środkowej Odry, nie pozostaje bez wpływu na spójność sieci osadniczej. Ujawniła dodatkowo, że choć dostępność potencjałowa rejonów transportowych nie ulega znacznemu pogorszeniu wskutek wystąpienia powodzi w regionie wodnym Górnej Odry, to ingerencja w sieć drogową mająca miejsce na tym obszarze dość wyraźnie wydłuża czas dojazdu do miasta wojewódzkiego (szczególnie dla grupy jednostek osadniczych o wielkości od 5 do 20 tys. mieszkańców) (tab. 6.5).

Tab. 6.5. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,04	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	–0,36	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,01	0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,36	–1,08	0,00	0,00
Noteci	0–30	jednostki osadnicze	–0,07	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,14	–0,22	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,53	–0,94	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,44	–0,91	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,12	0,94	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,05	0,98	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	–0,08	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	0,07	–0,60	–0,61	0,00	0,00

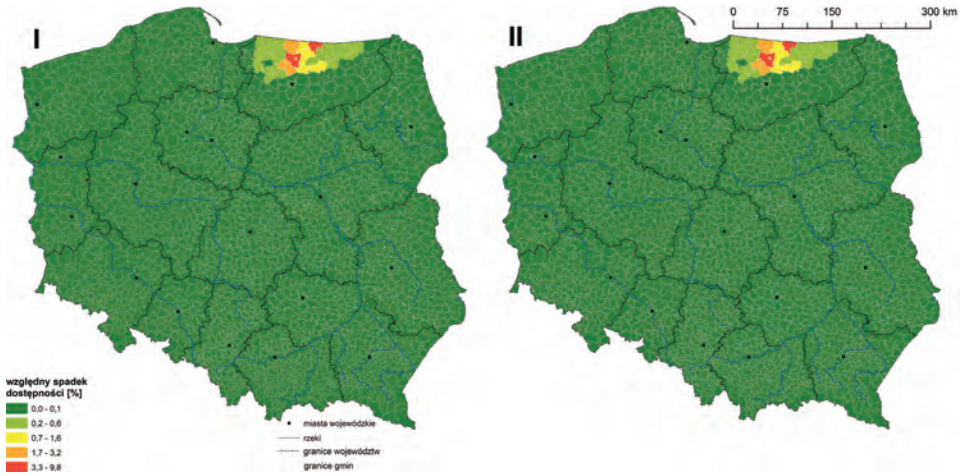
Tab. 6.5 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Warty	0–30	jednostki osadnicze	–0,18	–0,94	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,22	–0,85	0,00	0,00	–4,98
	30–60	jednostki osadnicze	–1,17	0,00	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,00	–0,17	–1,61	–1,62	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,75	0,71	–0,74	2,13	2,63
		ludność	–0,29	0,86	–0,63	1,62	4,98
	90–120	jednostki osadnicze	2,01	0,24	2,22	0,00	0,00
		ludność	1,44	0,16	2,25	0,00	0,00
Środkowej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,35	–0,71	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,41	–0,65	–1,39	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–1,61	–2,12	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,79	–2,00	–1,83	–3,11	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,05	0,47	–2,96	–2,13	0,00
		ludność	–0,28	0,77	–2,14	–2,29	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	1,52	0,94	4,44	4,26	0,00
		ludność	1,87	0,56	3,65	5,41	0,00
Górnej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,20	–0,94	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,49	–0,82	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,78	–0,24	–2,96	0,00	0,00
		ludność	–0,81	–0,17	–3,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,18	0,24	2,22	–2,13	0,00
		ludność	0,35	0,03	2,50	–1,69	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,79	0,71	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,96	0,81	0,51	1,69	0,00

Źródło: opracowanie własne.

6.2.3. Obszar dorzecza Pregoły

Zmiany poziomu dostępności transportowej, analizowane z zastosowaniem podejścia potencjałowego, wskazują, że niezależnie od prawdopodobieństwa powodzi, która pojawi się w regionie wodnym Łyny i Węgorapy, funkcjonowanie transportu drogowego praktycznie nie zostanie zaburzone.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1%

Ryc. 6.26. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r.

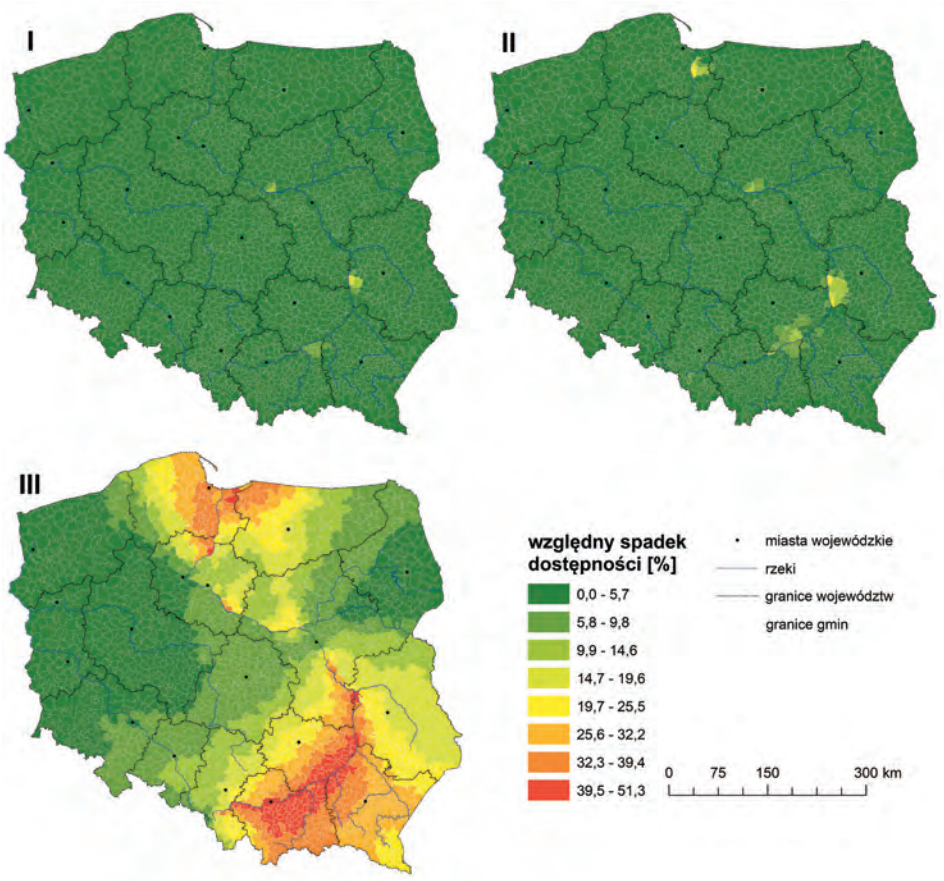
Źródło: opracowanie własne

Przy uwzględnieniu podróży długich ingerencje w integralność sieci drogowej i atrakcyjność rejonów komunikacyjnych charakterystyczne dla analizowanych scenariuszy powodzi występujących na obszarze dorzecza Pregoły dają maksymalnie zaledwie kilkuprocentowe spadki dostępności wąskiej grupy gmin województwa warmińsko-mazurskiego, a w skali analiz ogólnopolskich jest to redukcja na poziomie 0,01% potencjału początkowego.

6.2.4. Główne rzeki

Z perspektywy realizacji podróży krótkich symulacje bazujące na wariantach, w których powódź występuje na głównych rzekach, wskazują, że pogorszenie dostępności potencjałowej w skali krajowej, niezależnie od przyjętego prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi, następuje jedynie wskutek jej wystąpienia na Warcie. Są to wzrosty niewielkie, nieprzekraczające 1,5 punktu procentowego,

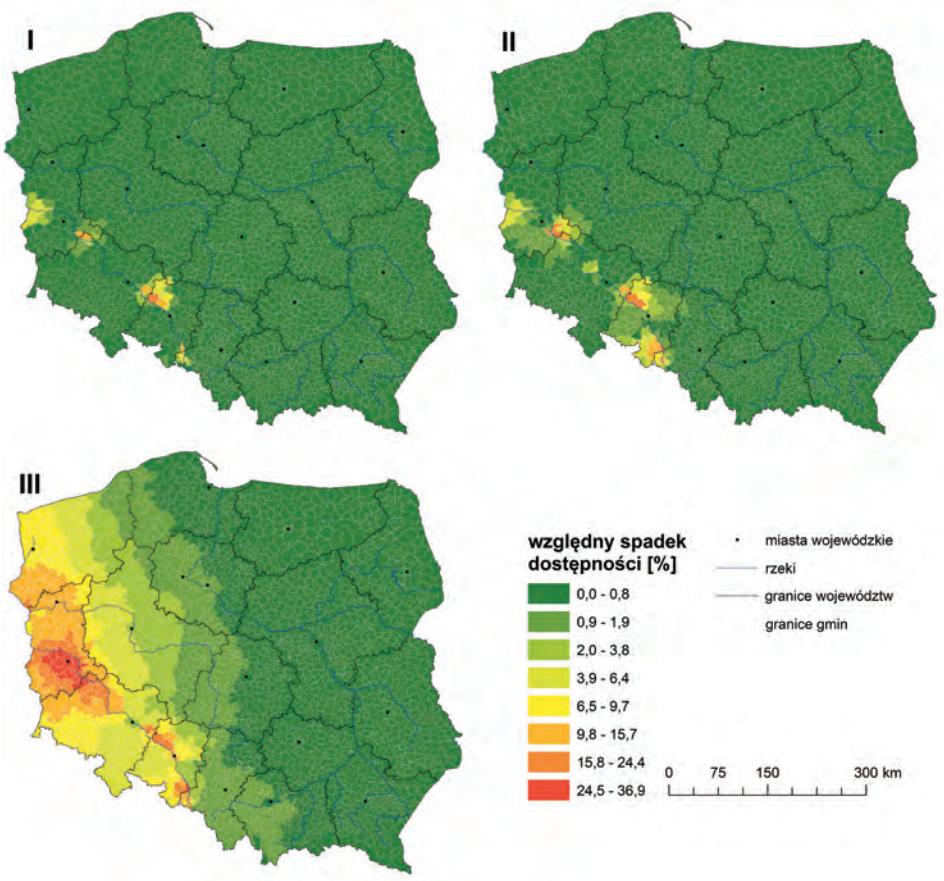
jednak wobec niższych wartości maksymalnych spadków dostępności na poziomie rejonów komunikacyjnych potwierdzają większy zasięg przestrzenny zjawiska w przypadku podróży długich (ryc. 6.27–6.29). Położenie na zagrożonym terenie odcinków sieci drogowej podatnych na oddziaływanie powodzi w połączeniu z ich rolą w realizacji podróży ponadlokalnych, wynikającą w dużej mierze z cech układu terenów zagrożonych względem biegu infrastruktury drogowej, w przypadku podróży długich jest szczególnie problematyczne w razie powodzi na Warcie.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.27. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

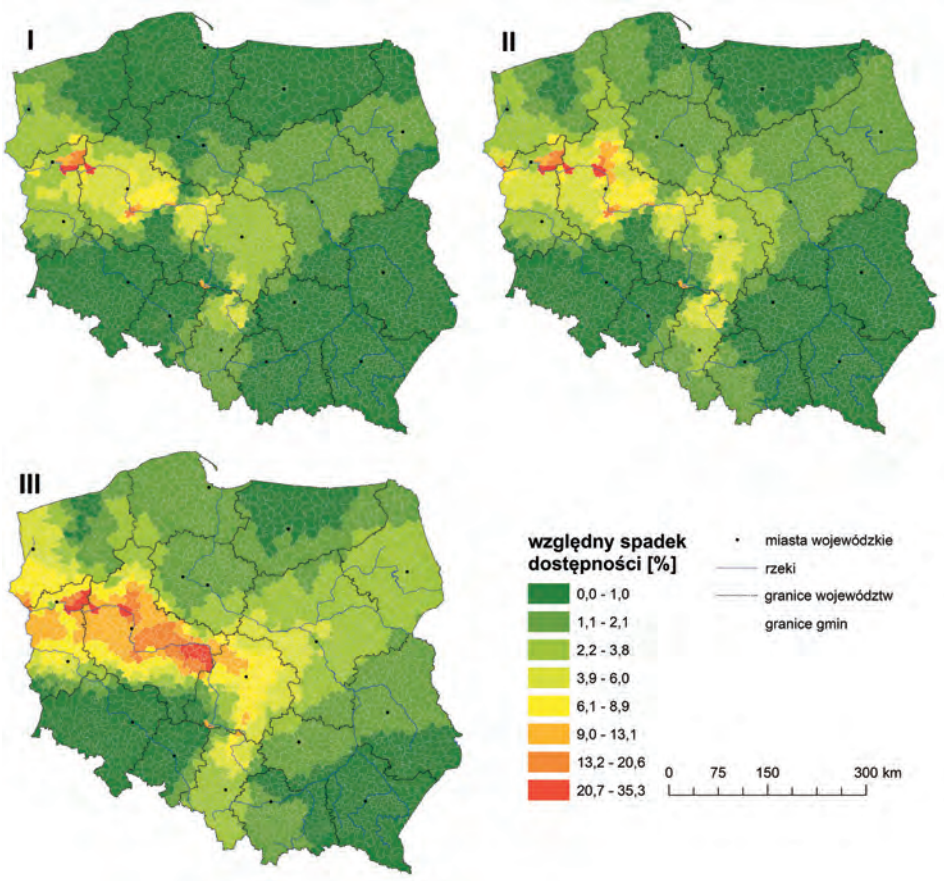
Źródło: opracowanie własne



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.28. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



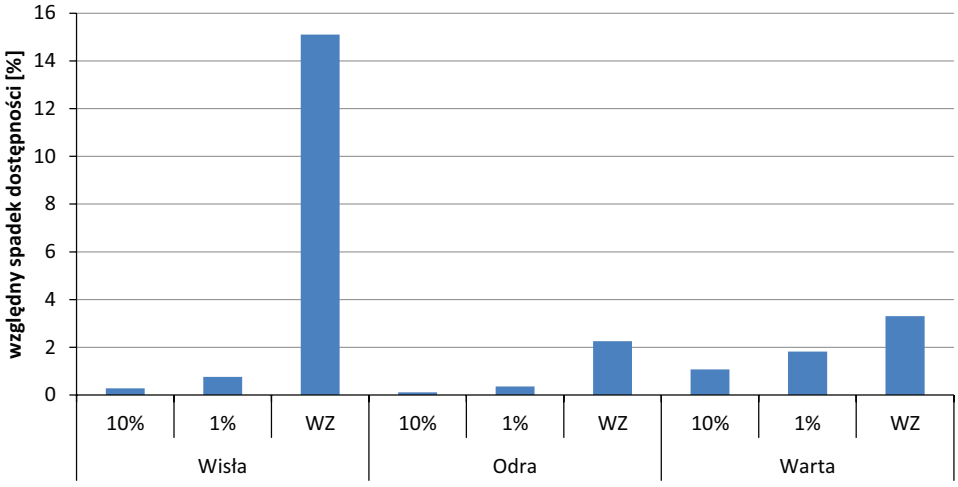
I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 6.29. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Najwyższy jednak przyrost względnego spadku dostępności potencjałowej (ponad trzy punkty procentowe) względem podróży krótkich towarzyszy zniszczeniu wałów przeciwpowodziowych wskutek wystąpienia powodzi na Wiśle (ryc. 6.30). W tym przypadku redukcja została zintensyfikowana w wyniku współwystępowania kilku czynników: licznej i skupionej przestrzennie grupy rejonów komunikacyjnych objętych dużym obniżeniem mas własnych, ich wysokiego poziomu dostępności potencjałowej w warunkach „normalnych" oraz

infrastruktury drogowej pozostającej poza oddziaływaniem powodzi i zapewniającej ich efektywne skomunikowanie (np. drogi krajowe nr 19 i 79 oraz 55 i 92 czy autostrady A4 i A1). Z punktu widzenia komponentu transportowego liczna grupa sąsiadujących ze sobą rejonów komunikacyjnych, których lokalne sieci drogowe są nieprzejezdne, stanowi barierę dla realizacji części podróży. Chodzi szczególnie o te, których punkty źródłowe i docelowe zlokalizowane są w niewielkiej odległości od zalanych rejonów komunikacyjnych, a jednocześnie znajdują się daleko od siebie. Ze względu na skalę potencjalnych utrudnień w ruchu, jakie mogą zaistnieć w następstwie powodzi na Wiśle w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych (przede wszystkim w jej górnym biegu), towarzyszące im wzrosty czasu przejazdu mogą zacząć widocznie redukować dostępność potencjałową pomimo oporu przestrzeni cechującego podróże długie.



Ryc. 6.30. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Z perspektywy dostępności transportowej do sieci miast wojewódzkich w Polsce 10-letnia czy nawet 100-letnia powódź na Wiśle nie stanowi istotnej bariery. W przypadku tych dwóch scenariuszy barierą jest jednak obszar zagrożony zalaniem w przypadku powodzi na Warcie, a wzrosty czasów przejazdu obejmują jednostki osadnicze o zróżnicowanej wielkości (tab. 6.6).

Tab. 6.6. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych w następstwie powodzi na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Rzeka	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Wisła	0–30	jednostki osadnicze	–1,17	–3,77	–5,93	–2,13	–5,26
		ludność	–2,74	–4,35	–5,25	–1,81	–22,78
	30–60	jednostki osadnicze	–5,82	–7,55	–8,89	–4,26	–7,89
		ludność	–7,76	–7,65	–9,32	–3,50	–3,91
	60–90	jednostki osadnicze	–3,26	–1,65	1,48	–2,13	7,89
		ludność	–2,15	–0,34	0,91	–3,21	18,09
	90–120	jednostki osadnicze	6,08	7,08	8,15	6,38	2,63
		ludność	6,24	7,83	8,06	6,66	1,65
Odra	0–30	jednostki osadnicze	–0,31	–1,18	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,52	–1,20	–0,51	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–1,27	–0,24	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–1,39	–0,13	–1,92	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,58	0,71	2,22	–2,13	0,00
		ludność	0,91	0,53	2,43	–1,69	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	1,00	0,47	0,00	2,13	0,00
		ludność	1,00	0,67	0,00	1,69	0,00
Warta	0–30	jednostki osadnicze	–0,15	–0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,16	–0,59	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,65	0,94	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–0,57	0,76	–1,61	–1,62	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,27	–0,24	–0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,07	–0,18	–0,63	1,62	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	1,07	0,00	2,22	0,00	0,00
		ludność	0,79	0,00	2,25	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Diametralną zmianę w dostępności do miast wojewódzkich przynosi całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych. Tak jak w przypadku analiz dostępności potencjałowej, tutaj również wyłączenia części odcinków sieci drogowej w związku z powodzią na Wiśle niosą za sobą wydłużenia czasu przejazdu o najwyższych wartościach – i do tego dotyczą jednostek osadniczych z każdej grupy wielkościowej.

7

ZMIANY OBCIĄŻENIA SIECI DROGOWEJ W NASTĘPSTWIE POWODZI

7. 1. Dojazdy do pracy

Główne cechy zmian w zakresie obciążenia sieci drogowej ruchem związanym z dojazdami do pracy są determinowane kluczowymi własnościami podróży realizowanych w tej motywacji. Wzrosty i spadki liczby pojazdów zazwyczaj dotyczą odcinków sieci drogowej, które nie wykraczają poza granicę regionu wodnego, na którego obszarze symulowana jest powódź. Wynika to przede wszystkim z faktu, że przejazdy do pracy to w dominującej mierze podróże krótkie. Ponieważ pomiędzy punktem rozpoczęcia podróży a jej celem jest względnie niewielka odległość i czas przejazdu, to w przypadku wystąpienia przeszkody w postaci odcinka wyłączonego z użytkowania występuje ograniczona przestrzennie grupa racjonalnych ścieżek objazdu.

W przeciwieństwie do podróży długich (np. podróży służbowych) wariantowość sieci opiera się w znacznej mierze na odcinkach zmuszających do jazdy z mniejszą średnią prędkością i tym samym wydłużających czas podróży. Istnieją alternatywne ścieżki obejmujące drogi o najwyższych parametrach (o najwyższej odporności na oddziaływanie powodzi, np. odcinki autostrad A1 i A2 w przypadku zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w regionie wodnym Środkowej Wisły), jednak stosunkowo duża liczba celów podróży (gmin miejsca pracy) o podobnym potencjale ruchotwórczym rozmieszczona w przestrzeni kraju bez znacznych dysproporcji skutkuje wyraźnym wykorzystaniem lokalnych sieci transportowych. Również konsekwencje redukcji potencjałów ruchotwórczych rejonów komunikacyjnych objętych powodzią w określonym scenariuszu w zakresie liczby podróży uwidaczniają się na odcinkach sieci w regionie objętym symulacją zalania. Niemniej jednak widoczna jest ona wyraźnie (choć nie tak bardzo jak w przypadku podróży służbowych) w formie redukcji wzrostu pracy eksploatacyjnej będącej skutkiem zmuszenia do wyboru ścieżki przejazdu, która nie gwarantuje minimalnego czasu osiągnięcia celu podróży. Szczególnie dotyczy to scenariusza uwzględniającego całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych, kiedy to wspomniane redukcje osiągają najwyższe udziały, przy jednoczesnych najdotkliwszych ingerencjach wód powodziowych w funkcjonowanie sieci transportowej. Na etapie analizy podatności sieci drogowej na zalanie przez wody powodziowe zidentyfikowana została wyraźna

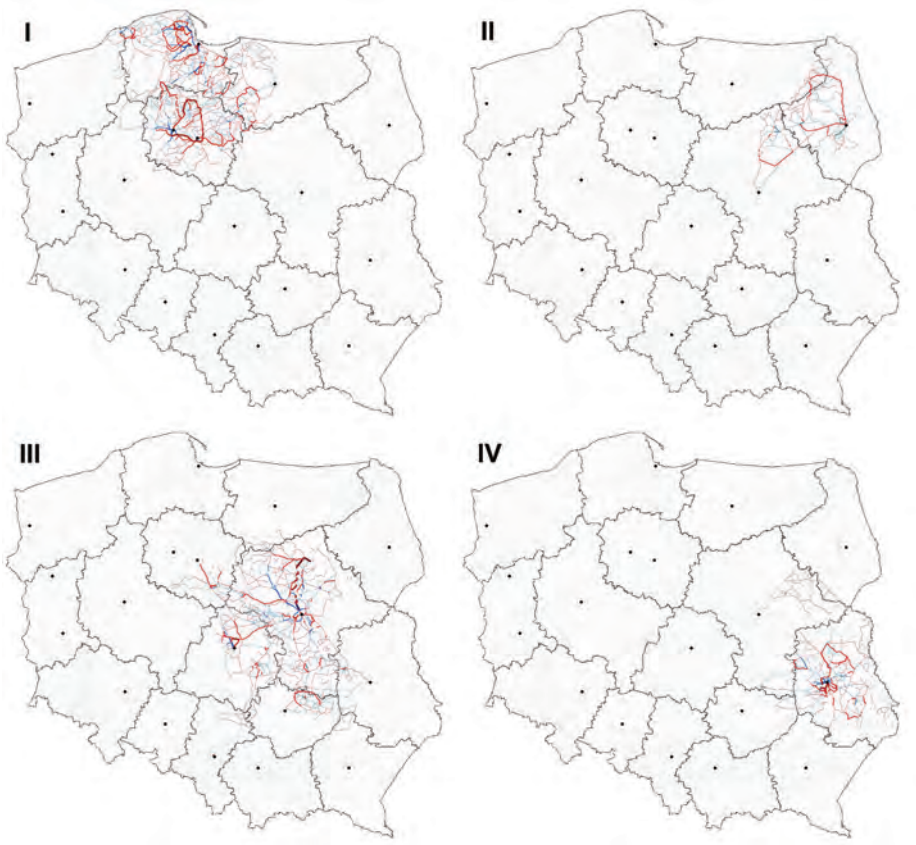
jej intensyfikacja, towarzysząca wprowadzaniu scenariuszy wystąpienia powodzi, których zasięgi oddziaływania były coraz większe (szczególnie całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych).

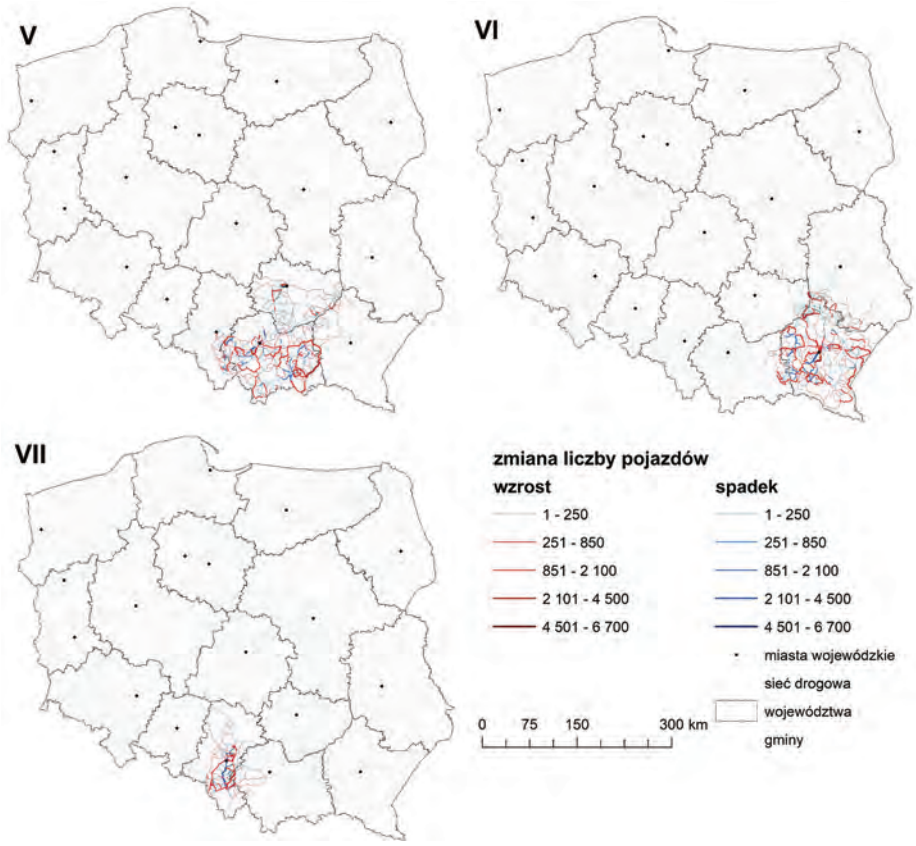
Tak wyraźne zmiany w zakresie przyrostów pracy eksploatacyjnej w następstwie symulowania powodzi o większym zasięgu przestrzennym oddziaływania nie występują. Ma tutaj miejsce swego rodzaju spłaszczenie przyrostów pracy eksploatacyjnej ujawniających się na skutek wyłączania z użytkowania coraz większych długości sieci. W żadnym wypadku nie jest to zależność liniowa. Warunkowana jest natomiast przez szereg czynników, których zakres oddziaływania w poszczególnych scenariuszach powodzi i obszarach jej symulacji jest bardzo zróżnicowany, a zmienność ta dotyczy zarówno elementów komponentu transportowego, jak i zagospodarowania. Dopiero nałożenie na siebie tych uwarunkowań przynosi wynik w postaci zmian w rozkładzie ruchu na sieć drogową oraz wielkości pracy eksploatacyjnej. W przypadku komponentu transportowego kluczowa jest nie tyle ekspozycja konkretnego odcinka sieci, ile jego istotność dla realizacji podróży do pracy pomiędzy rejonami komunikacyjnymi położonymi na obszarze objętym symulacją powodzi. Jeśli zaś chodzi o komponent użytkowania terenu, który reprezentowany jest tutaj przez potencjał ruchotwórczy, to bezwzględna wielkość redukcji ruchu pojazdów będąca skutkiem jego redukcji zależy nie tylko od stopnia zagrożenia działaniem powodzi, ale również od roli, jaką odgrywa dana gmina na rynku pracy – jak wielu pracowników zaczyna lub kończy w niej podróż do pracy. Wspomniane wcześniej spłaszczenie wynika więc z faktu ograniczenia wielkości ruchu przełożonego wskutek generalnego obniżenia liczby podróży oraz cech rozmieszczenia odcinków sieci potencjalnie narażonych na zalanie. W dużej mierze wyłączenia towarzyszące wystąpieniu powodzi obejmujących większe obszary dotyczą tych samych segmentów sieci, ale na dłuższych odcinkach. Znaczne wydłużenie odcinka drogi, który może podlegać potencjalnemu zalaniu podczas powodzi występującej na większym obszarze, nie przekłada się na proporcjonalny do niego spadek liczby pojazdów, które pierwotnie się po nim poruszały. Odcinek ten bowiem stracił już na swojej atrakcyjności, choćby kiedy na niewielkiej długości był zalany podczas wystąpienia powodzi obejmującej mniejszy obszar.

Dla rozkładu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej bardzo istotny jest charakter danych, na podstawie których dokonano rozkładu ruchu na sieć. Wykorzystanie danych macierzowych o rzeczywistych przemieszczeniach motywowanych dojazdami do pracy wyraźnie ogranicza zakres przestrzenny wystąpienia zmian w obciążeniu sieci drogowej w stosunku do podejścia modelowego (wykorzystywanego chociażby w przypadku uwzględnienia podróży służbowych).

7.1.1. Obszar dorzecza Wisły

Największy zasięg przestrzenny zmian obciążenia sieci drogowej ruchem związanym z dojazdami do pracy towarzyszących powodzi od strony rzeki ma miejsce w przypadku jej wystąpienia w regionie wodnym Środkowej Wisły (ryc. 7.1–7.3). Wynika to z jednej strony z powierzchni regionu największej spośród wszystkich pozostałych, z drugiej zaś z położenia w jego granicach dominującego w skali kraju rynku pracy – Warszawy. Powódź na tym obszarze skutkuje zmianami w liczbie pojazdów na sieci również w najliczniejszej grupie województw.

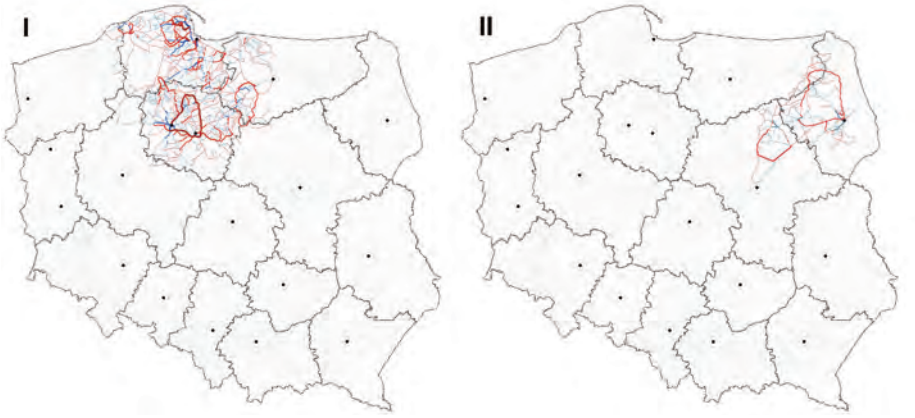


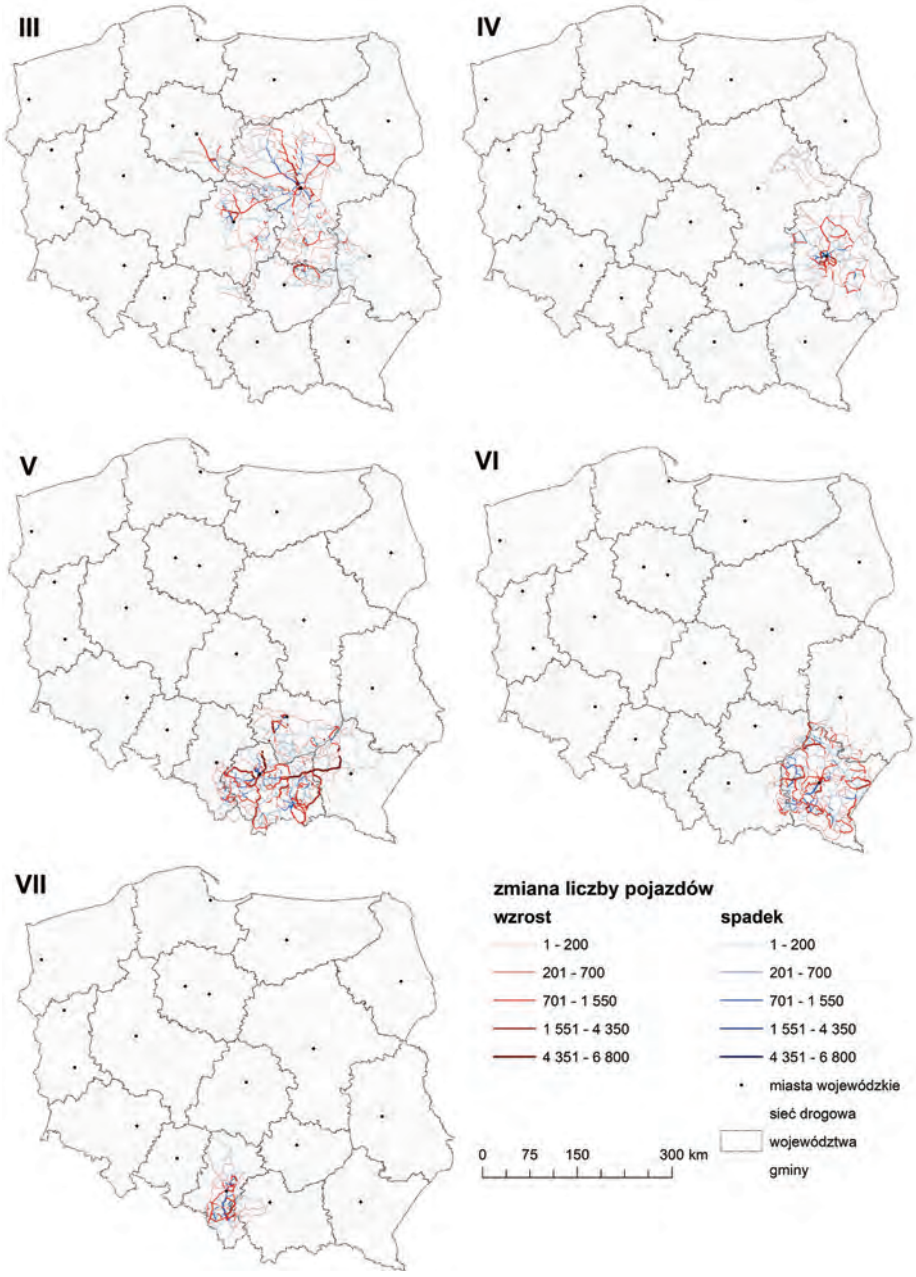


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.1. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

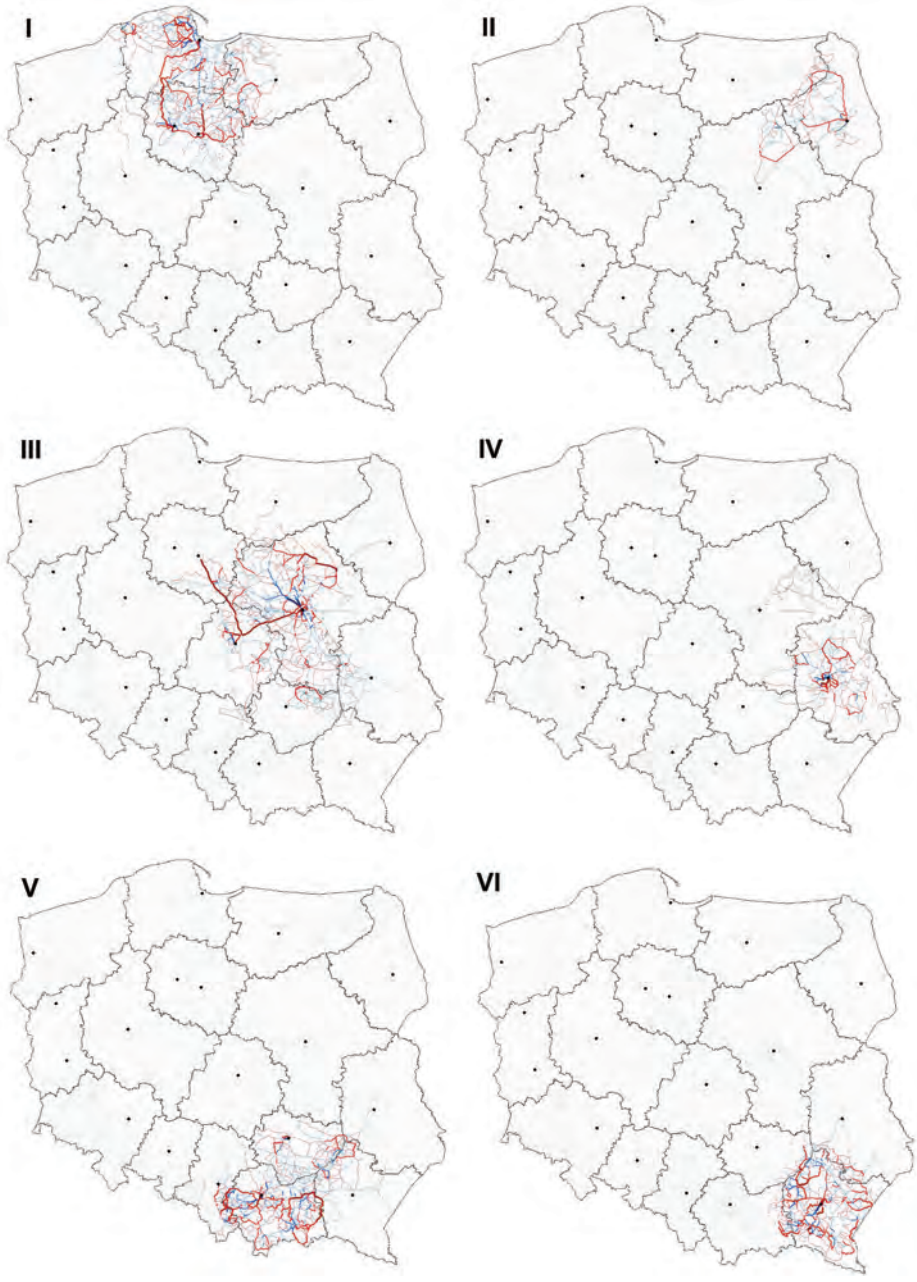


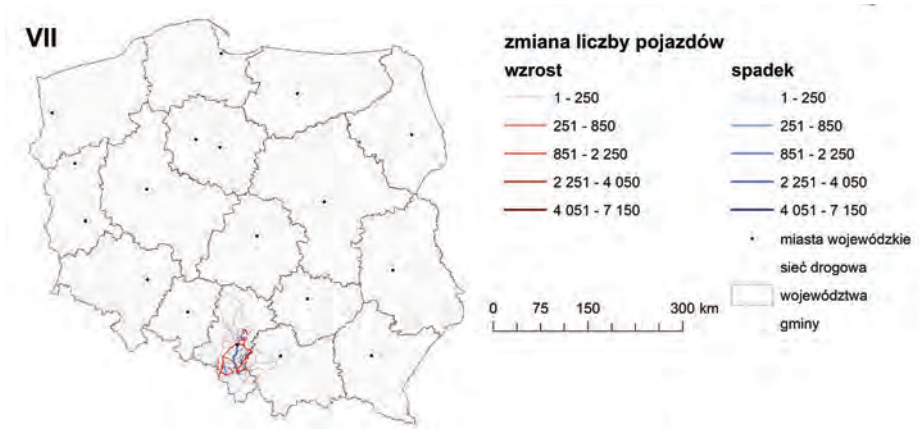


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.2. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne


I
II
III
IV
V
VI

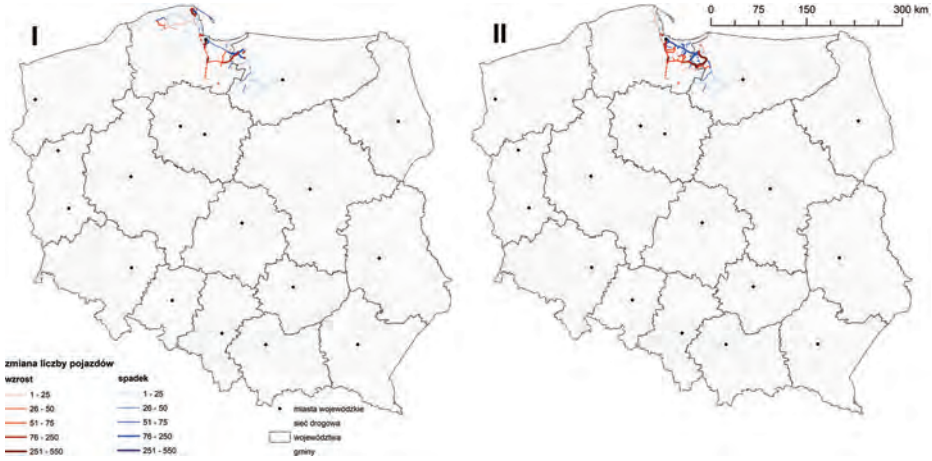


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.3. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Skutki powodzi od strony morza (ryc. 7.4) są nieporównywalnie mniej dotkliwe dla funkcjonowania transportu drogowego związanego z dojazdami do pracy niż którykolwiek scenariusz uwzględniający powódź rzeczną.

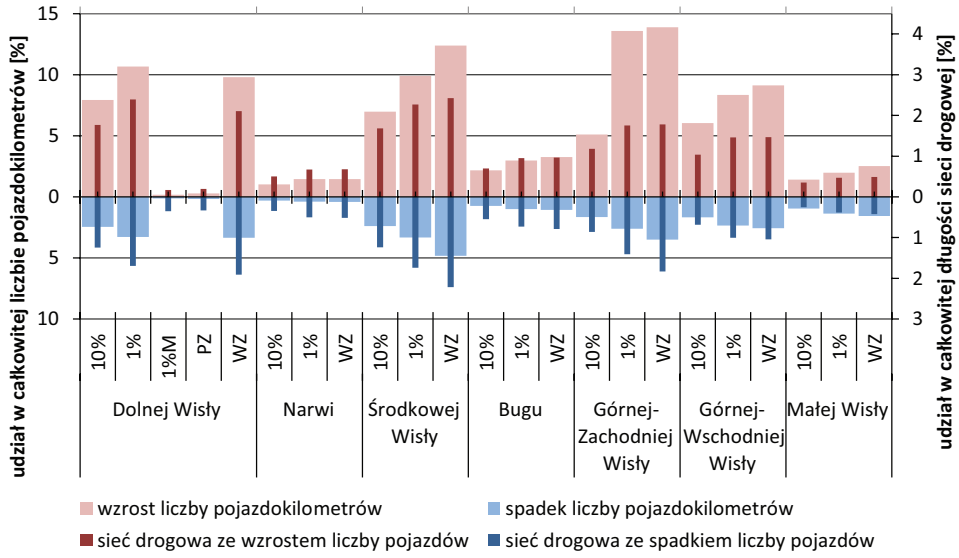


I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 7.4. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Skalę zróżnicowania wpływu poszczególnych scenariuszy powodziowych na podróże do pracy w Polsce realizowane z wykorzystaniem samochodu osobowego dobrze prezentuje zestawienie wzrostów i spadków liczby pojazdokilometrów wynikających z konieczności rezygnacji z wyboru optymalnych ścieżek przejazdu w warunkach „normalnych" na rzecz wyboru ścieżki optymalnej, ale w warunkach wystąpienia powodzi (ryc. 7.5). Szczególnie obciążające dla krajowego systemu transportowego jest wystąpienie omawianej klęski żywiołowej w trzech regionach wodnych – Górnej-Zachodniej Wisły, Środkowej Wisły i Dolnej Wisły; nie przekracza jednak 15% całkowitej pracy eksploatacyjnej związanej z dojazdami do pracy w Polsce. Odnosząc uzyskane wyniki do zasięgu przestrzennego poszczególnych regionów wodnych, wyraźnie najbardziej alarmująca sytuacja dotyczy górnego odcinka Wisły. Zaobserwować można tutaj wspomniane wcześniej stosunkowo niewielkie przyrosty pracy eksploatacyjnej pomiędzy kolejnymi symulowanymi scenariuszami.



Ryc. 7.5. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku scenariusza obrazującego całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych na obszarze regionu wodnego Dolnej Wisły ma miejsce mniejszy przyrost liczby pojazdokilometrów niż w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% na tym obszarze. Wynika to po pierwsze z wysokiego poziomu redukcji potencjałów ruchotwórczych rejonów komunikacyjnych

ulegających zalaniu na skutek całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze chociażby Żuław Wiślanych. Z drugiej zaś strony przez obszar ten prowadzi infrastruktura drogowa (droga ekspresowa S7) o dużej odporności na tego typu zagrożenia, co w znacznej mierze umożliwia odbycie podróży, szczególnie pomiędzy rejonami komunikacyjnymi nieobjętymi bezpośrednim oddziaływaniem powodzi w tym scenariuszu. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku symulacji powodzi w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły. W tym miejscu należy zwrócić dodatkowo uwagę na wyraźną różnicę pomiędzy wzrostem liczby pojazdokilometrów w przypadku wystąpienia powodzi o średnim prawdopodobieństwie w stosunku do powodzi o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia.

Bardzo istotne informacje na temat oddziaływania analizowanego rodzaju zdarzeń nietypowych na funkcjonowanie transportu drogowego przynosi analiza struktury wielkości zmian pracy eksploatacyjnej ze względu na kategorie dróg, które dotknięte zostały bezwzględnym wzrostem lub spadkiem wielkości potoków ruchu (tab. 7.1).

Tab. 7.1. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Region wodny	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Małej Wisły	WZ	wzrost	7,1	6,9	18,7	39,0	24,3	3,8	0,2
		spadek	3,3	7,1	69,8	10,7	7,5	1,4	0,0
	1%	wzrost	4,9	8,3	23,7	29,9	30,2	2,6	0,3
		spadek	3,9	7,8	67,0	11,6	8,1	1,5	0,0
	10%	wzrost	5,2	7,8	27,5	27,8	29,0	2,4	0,3
		spadek	4,2	9,1	66,2	10,9	7,9	1,6	0,0
Górnej-Wschodniej Wisły	WZ	wzrost	10,8	1,8	12,9	21,9	47,1	4,8	0,6
		spadek	0,1	0,2	49,1	30,8	18,4	1,4	0,0
	1%	wzrost	13,8	1,7	10,9	21,2	48,3	3,5	0,6
		spadek	0,1	0,1	48,3	30,6	19,4	1,5	0,0
	10%	wzrost	9,3	0,7	11,1	26,6	48,3	3,7	0,3
		spadek	1,0	3,1	50,9	25,9	17,6	1,5	0,0

Tab. 7.1 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Górnej-Zachodniej Wisły	WZ	wzrost	13,6	1,9	27,0	23,3	30,0	4,0	0,2
		spadek	3,0	3,9	35,6	38,2	15,2	4,0	0,0
	1%	wzrost	27,3	2,2	24,5	22,6	18,6	4,6	0,1
		spadek	3,0	4,5	39,7	35,6	13,8	3,3	0,1
	10%	wzrost	9,8	2,2	27,3	22,9	32,0	5,7	0,2
		spadek	2,8	5,1	32,6	38,9	16,6	4,0	0,0
Bugu	WZ	wzrost	0,1	14,8	11,3	28,4	42,1	3,0	0,2
		spadek	0,0	8,5	35,8	42,0	11,8	1,7	0,3
	1%	wzrost	0,0	14,2	12,2	30,1	40,4	2,9	0,2
		spadek	0,0	8,6	37,1	41,1	11,2	1,7	0,3
	10%	wzrost	0,0	13,9	13,0	30,6	39,3	3,0	0,2
		spadek	0,0	8,5	37,6	40,5	11,4	1,7	0,3
Środkowej Wisły	WZ	wzrost	41,1	6,3	18,8	14,4	16,8	2,3	0,4
		spadek	0,7	8,9	51,0	28,2	9,3	1,7	0,2
	1%	wzrost	15,5	9,4	21,9	28,3	20,6	3,6	0,7
		spadek	1,9	9,6	44,3	32,6	9,7	1,7	0,3
	10%	wzrost	8,8	4,8	30,8	22,8	29,1	3,2	0,5
		spadek	2,1	8,9	44,9	31,9	10,4	1,4	0,3
Narwi	WZ	wzrost	0,0	23,9	35,7	26,5	8,5	4,6	0,8
		spadek	0,0	1,6	53,8	34,8	6,6	2,9	0,2
	1%	wzrost	0,0	23,5	35,6	27,0	8,5	4,6	0,8
		spadek	0,0	1,6	54,1	34,5	6,7	3,0	0,2
	10%	wzrost	0,0	22,5	37,0	25,8	9,0	4,9	0,8
		spadek	0,0	1,5	54,1	34,5	6,6	3,0	0,2
Dolnej Wisły	WZ	wzrost	8,7	4,3	14,2	30,6	30,2	11,5	0,4
		spadek	4,0	7,5	55,5	19,9	10,4	2,4	0,2
	PZ	wzrost	17,1	19,7	14,4	14,1	17,5	16,7	0,5
		spadek	0,1	34,4	25,0	15,6	19,3	5,0	0,6
	1%M	wzrost	24,8	12,2	30,1	17,5	10,7	4,7	0,0
		spadek	0,1	26,8	6,0	31,6	33,2	2,0	0,3
	1%	wzrost	12,4	6,3	22,4	17,6	32,0	8,8	0,6
		spadek	0,3	6,1	61,7	20,3	9,1	2,3	0,2
	10%	wzrost	12,1	6,1	22,9	17,8	31,8	8,8	0,5
		spadek	0,3	6,1	61,6	20,5	9,1	2,3	0,2

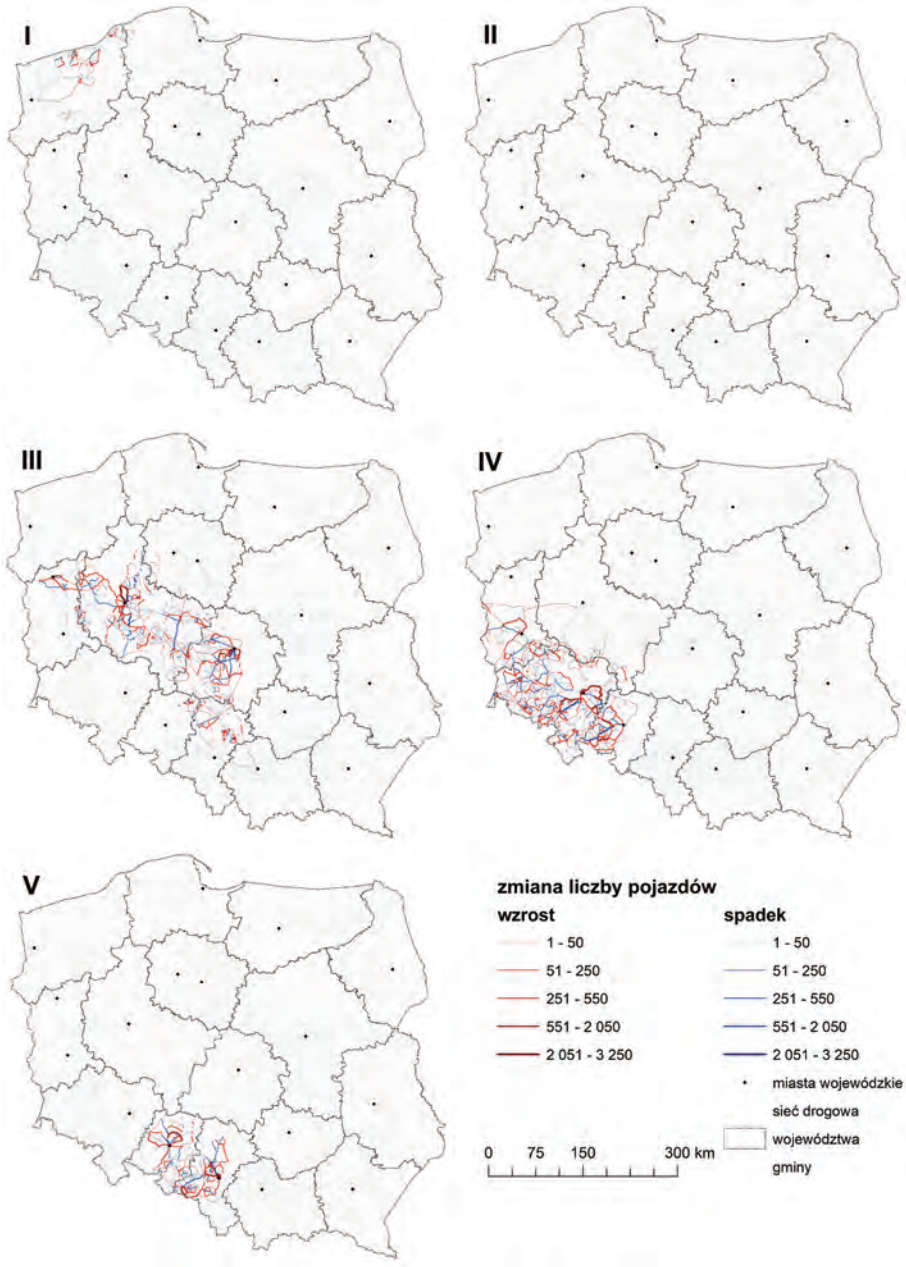
Źródło: opracowanie własne.

Generalnie rzecz ujmując, najbardziej istotnymi w takim zakresie kategoriami są drogi krajowe oraz wojewódzkie. To one przeciętnie doświadczają największych skumulowanych wzrostów i spadków liczby pojazdów na skutek wystąpienia powodzi. Warte odnotowania są również znaczne udziały autostrad w obsłudze wzmożonej pracy eksploatacyjnej. Szczególnie w przypadku

całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze regionów wodnych Górnej Wisły i Środkowej Wisły mają one kluczowe znaczenie. Informacje te wydają się wyjątkowo cenne dla operatorów Krajowego Systemu Zarządzania Ruchem Drogowym, który jako narzędzie stworzone do dynamicznego zarządzania ruchem pojazdów w celu podnoszenia bezpieczeństwa uczestników ruchu i płynności transportu drogowego mógłby w czasie rzeczywistym reagować na acykliczne zmiany w wielkości potoków ruchu i usprawniać ich efektywną dyslokację.

7.1.2. Obszar dorzecza Odry

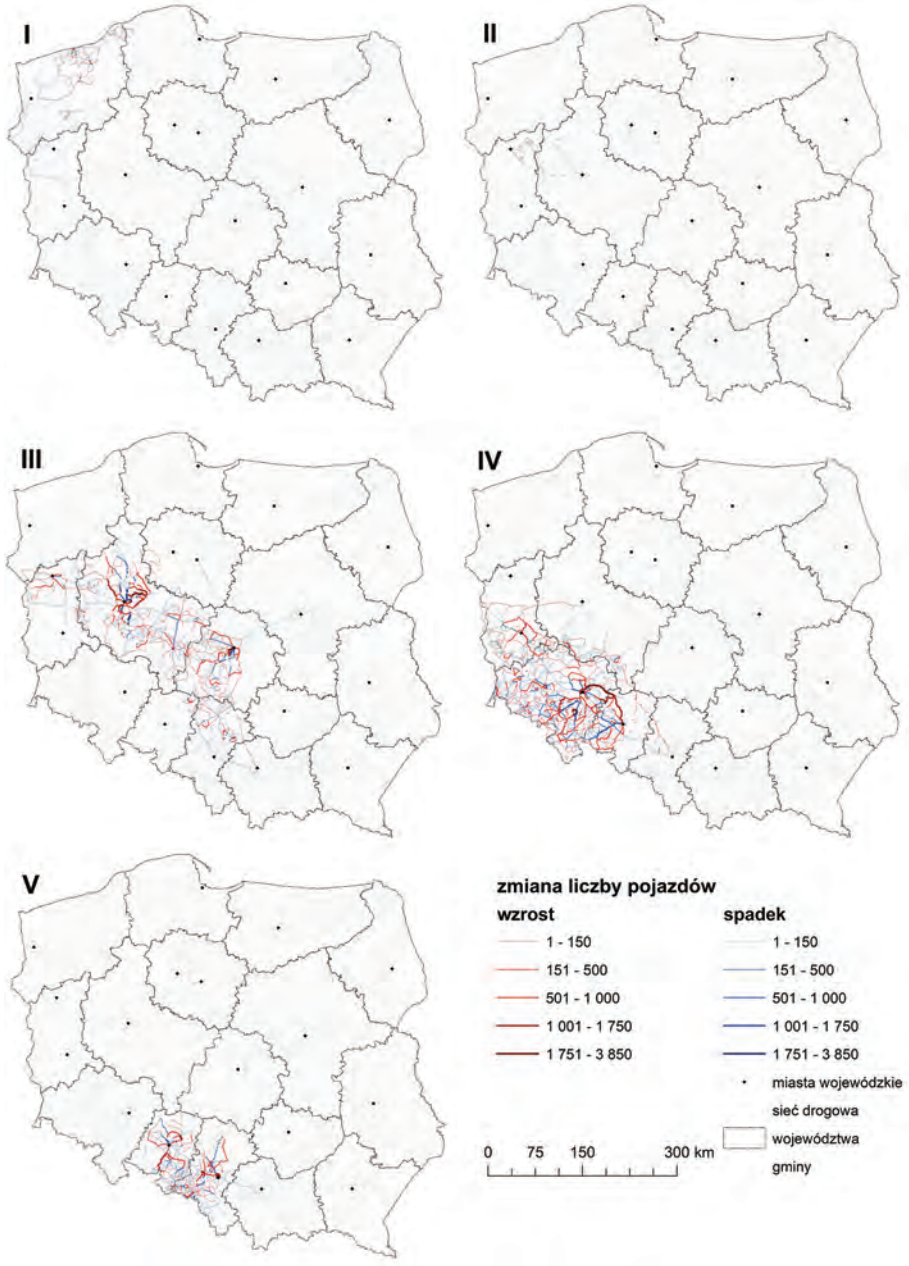
W przypadku obszaru dorzecza Odry szczególnym zagrożeniem dla równowagi systemu transportowego w zakresie obsługi podróży motywowanych dojazdem do pracy jest wystąpienie powodzi w regionie wodnym Środkowej Odry (ryc. 7.6–7.8). Chociaż zmiany obciążenia sieci drogowej wywołane powodzią w tym regionie (niezależnie od scenariusza) uwidaczniają się na obszarze o znacznym zasięgu przestrzennym, to jednak nie są to tak daleko idące perturbacje jak w przypadku chociażby powodzi w regionie wodnym Środkowej Wisły. Przyczyn takiej sytuacji upatrywać można w braku tak zasadniczej dominacji jednego ośrodka stanowiącego cel dojazdów do pracy na rzecz bardziej równomiernego rozmieszczenia mniejszych ośrodków oraz dwóch kluczowych w postaci Wrocławia i Zielonej Góry, których obszar rynkowy jest nieporównywalnie mniejszy od warszawskiego. Analiza map obrazujących zmiany obciążenia sieci drogowej zwraca ponadto uwagę na sytuację na obszarze regionu wodnego Warty. O ile zasięg przestrzenny zmian w wielkości potoków ruchu pojazdów jest znaczący (ze względu na kształt regionu wodnego), to jednak ich wolumen nie jest tak pokaźny jak w przypadku wzmiankowanych wcześniej regionów. Stosunkowo niewielkim zagrożeniem dla podróży do pracy realizowanych samochodem osobowym jest wystąpienie powodzi w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego oraz Noteci. W przypadku drugiego z nich wyraźna ingerencja w równowagę systemu transportowego następuje dopiero wobec całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych.



I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.6. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

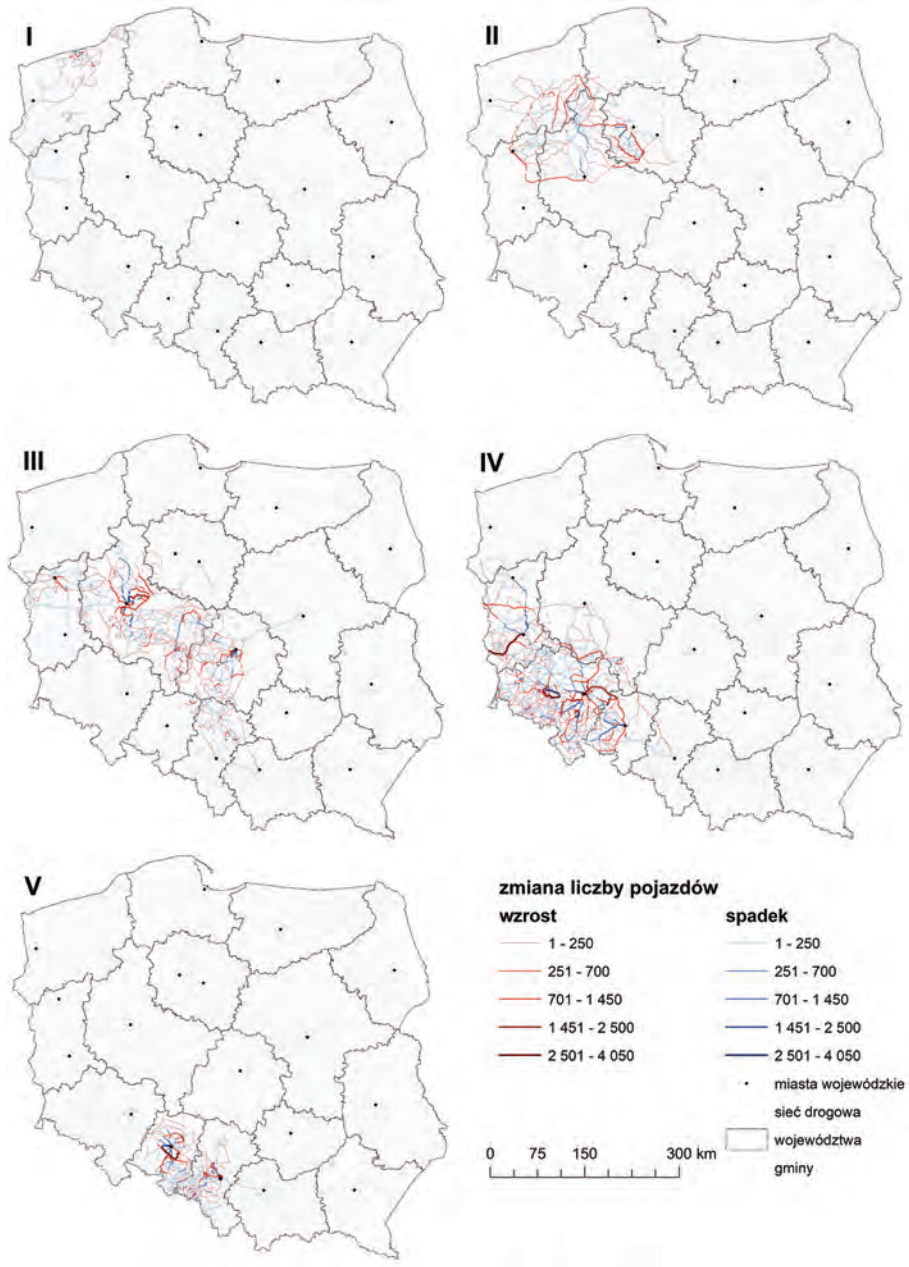
Źródło: opracowanie własne



I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.7. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

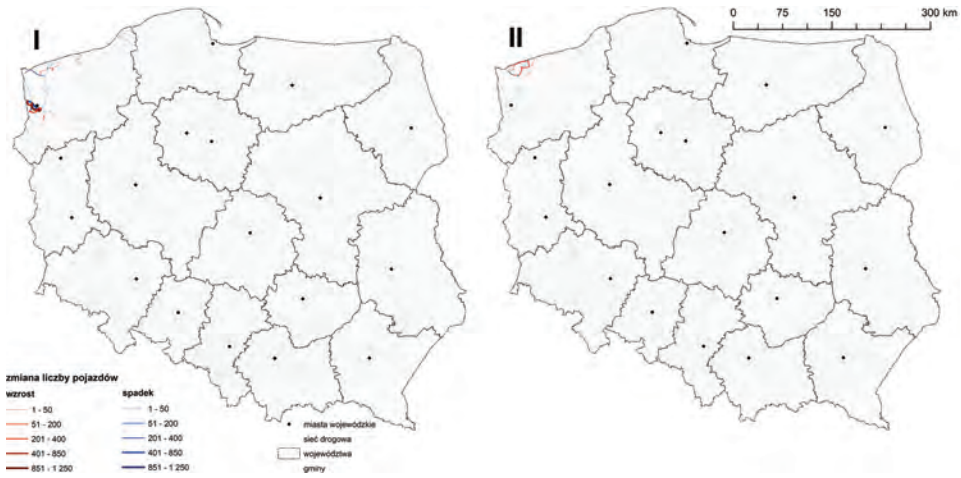


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.8. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Uwzględnienie powodzi od strony morza (ryc. 7.9) w symulacjach wpływu na sieć transportową daje podstawę do stwierdzenia, że nie stanowi ona istotnego zagrożenia dla realizacji dojazdów do pracy w Polsce. Zakres przestrzenny zaobserwowanych zmian obciążenia sieci drogowej i ich wielkość są bardzo ograniczone.

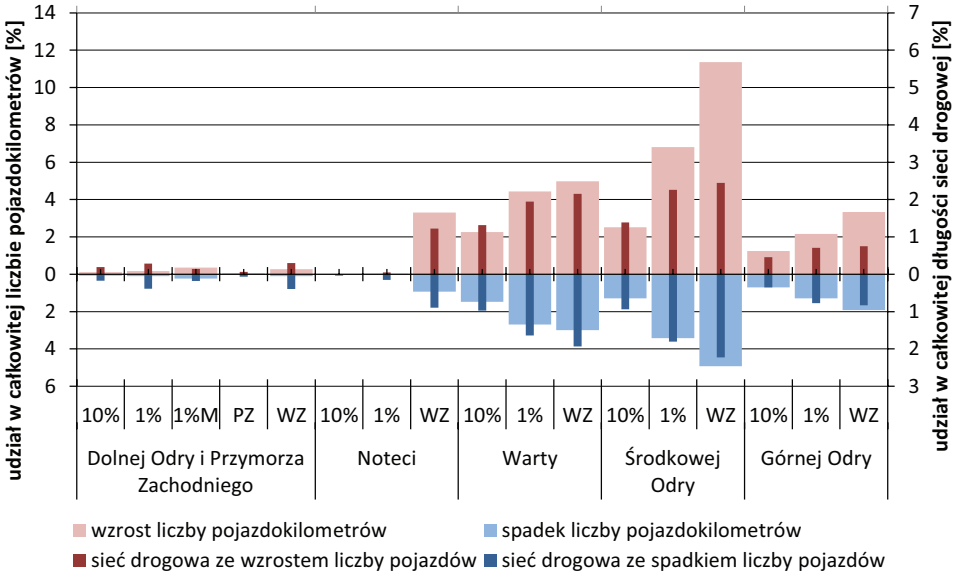


I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 7.9. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Analiza zmian wielkości pracy eksploatacyjnej towarzyszących wystąpieniu powodzi w poszczególnych scenariuszach na obszarze dorzecza Odry potwierdza zaobserwowaną wcześniej alarmującą sytuację, która może wystąpić w związku wystąpieniem omawianej sytuacji nietypowej w regionie wodnym Środkowej Odry (ryc. 7.10). Szczególnie niepokojąca wydaje się sytuacja, w której dochodzi do całkowitego zniszczenia na tym obszarze wałów przeciwpowodziowych; wtedy bowiem wzrost liczby pojazdokilometrów bliski jest poziomowi charakterystycznemu dla tego samego scenariusza, ale dla regionu wodnego Środkowej Wisły. Jest to również region wodny, w przypadku którego intensyfikacja zagrożenia przekłada się najwyraźniej na przyrosty pracy eksploatacyjnej.



Ryc. 7.10. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku obszaru dorzecza Odry szczególne znaczenie dla obsługi ruchu pojazdów wykorzystywanych w podróżach do pracy w sytuacji wystąpienia powodzi mają drogi wojewódzkie, ponieważ to im w największym udziale przypadają zaobserwowane wzrosty i spadki wielkości potoków ruchu (tab. 7.2).

Tab. 7.2. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Region wodny	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	9
Górnej Odry	WZ	wzrost	31,8	0,2	21,0	18,2	26,7	1,5	0,7
		spadek	4,8	0,1	46,0	39,8	8,7	0,5	0,1
	1%	wzrost	21,8	0,3	29,4	25,5	20,1	2,2	0,7
		spadek	6,8	0,1	33,4	47,0	12,0	0,6	0,1
	10%	wzrost	23,0	0,4	36,2	20,8	17,9	0,9	0,9
		spadek	2,5	0,0	30,2	56,0	10,3	1,0	0,1

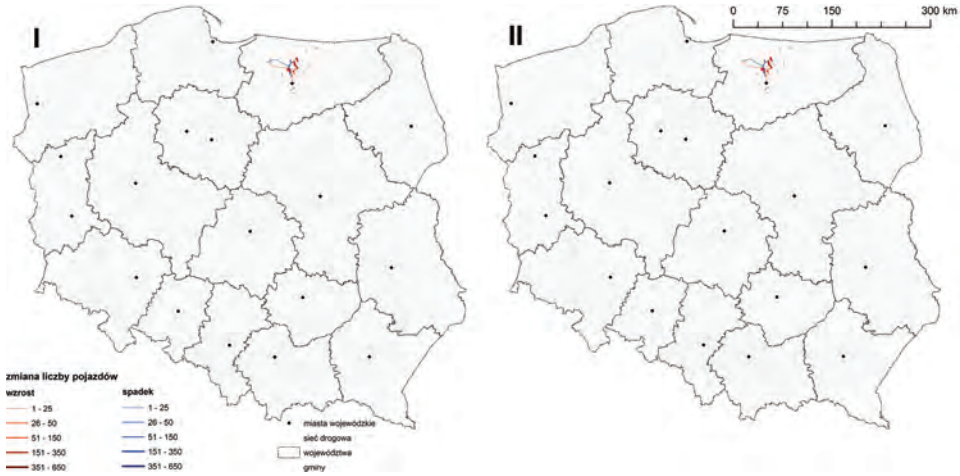
1	2	3	4	5	6	7	8	9	9
Środkowej Odry	WZ	wzrost	9,1	14,5	26,9	29,3	16,8	3,1	0,3
		spadek	18,6	12,2	35,9	22,2	9,3	1,3	0,4
	1%	wzrost	8,5	12,7	13,1	38,7	22,7	3,7	0,4
		spadek	9,5	1,6	45,7	29,2	11,9	1,5	0,6
	10%	wzrost	15,2	8,6	15,3	26,5	26,9	6,8	0,7
		spadek	5,3	2,8	44,9	31,0	13,5	1,7	0,8
Warty	WZ	wzrost	6,4	10,1	13,2	33,4	27,5	8,6	0,8
		spadek	5,5	2,7	35,7	40,3	12,2	3,3	0,4
	1%	wzrost	8,1	10,1	13,4	34,6	24,8	8,2	0,7
		spadek	3,0	2,9	33,8	43,5	12,7	3,5	0,4
	10%	wzrost	8,3	5,9	20,0	35,3	21,7	7,4	1,3
		spadek	3,6	4,1	29,8	44,7	13,6	3,8	0,5
Noteci	WZ	wzrost	7,8	11,7	30,3	20,4	19,5	8,9	1,4
		spadek	0,1	2,3	37,1	42,1	12,1	4,5	1,8
	1%	wzrost	0,0	60,9	9,0	12,1	8,7	6,6	2,6
		spadek	0,0	2,2	1,0	55,5	13,9	13,4	14,0
	10%	wzrost	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		spadek	0,0	21,2	11,9	52,0	0,2	14,4	0,4
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	WZ	wzrost	0,0	0,1	15,9	36,1	32,5	14,7	0,7
		spadek	0,6	4,1	21,8	45,3	24,1	3,8	0,3
	PZ	wzrost	0,0	0,1	6,1	70,5	17,5	5,2	0,6
		spadek	0,2	10,0	55,4	22,4	7,9	3,8	0,2
	1%M	wzrost	28,5	0,4	34,0	3,9	31,9	1,4	0,0
		spadek	3,4	1,9	47,3	22,5	18,0	6,9	0,0
	1%	wzrost	0,0	0,1	9,6	33,3	30,8	25,2	1,0
		spadek	0,4	4,2	21,3	52,7	17,2	3,8	0,3
	10%	wzrost	0,0	0,1	5,0	32,0	33,9	27,8	1,2
		spadek	0,0	4,6	23,9	49,0	18,0	4,1	0,3

Źródło: opracowanie własne.

Nieznacznie pod tym względem ustępują im odcinki dróg krajowych. Jeśli zaś chodzi o rolę sieci dróg ekspresowych i autostrad, to podkreślić należy istotność odcinka autostrady A4 w zakresie obsługi ruchu pojazdów towarzyszącego każdemu z rozpatrywanych scenariuszy powodziowych w regionie wodnym Górnej Odry oraz A6 w przypadku wystąpienia powodzi od strony morza. Odcinki dróg ekspresowych (szczególnie S3, S5 i S8) odgrywają istotną rolę w przypadku wystąpienia omawianego zagrożenia w regionie wodnym Środkowej Odry i Warty.

7.1.3. Obszar dorzecza Pregoły

Wystąpienie powodzi w regionie wodnym Łyny i Węgorapy pociąga za sobą jedynie lokalne konsekwencje dla funkcjonowania ruchu drogowego w zakresie dojazdów do pracy (ryc. 7.11). Ze względu na znikomą liczbę podróży realizowanych w analizowanej motywacji w przebiegu ścieżek przejazdu, w których występują zagrożone zalaniem odcinki dróg, zaobserwowane zmiany wielkości potoków ruchów są bardzo ograniczone. Jeszcze bardziej nieznaczna jest zmiana wielkości potoków pojazdów idąca w parze ze wzrostem powierzchni obszaru objętego analizowanym zagrożeniem, co tłumaczyć można minimalnym udziałem powierzchni terenów zagrożonych w powierzchni rejonów komunikacyjnych objętych powodzią w tym regionie wodnym oraz bardzo ograniczoną liczbą potencjalnie zagrożonej ludności. Skutkowało to niemalże niezauważalną redukcją potencjałów ruchotwórczych.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1%

Ryc. 7.11. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Wyłącznie lokalny charakter zmian w sieci drogowej w konsekwencji wystąpienia powodzi na obszarze dorzecza Pregoły potwierdza również nieprzekraczający 0,05% pracy eksploatacyjnej związanej z podróżami do pracy w Polsce wzrost liczby pojazdokilometrów towarzyszący obu z rozpatrywanych prawdopodobieństw powodzi. Tak ograniczony charakter potencjalnych zmian w równowadze systemu transportowego koncentruje się niemalże całkowicie na

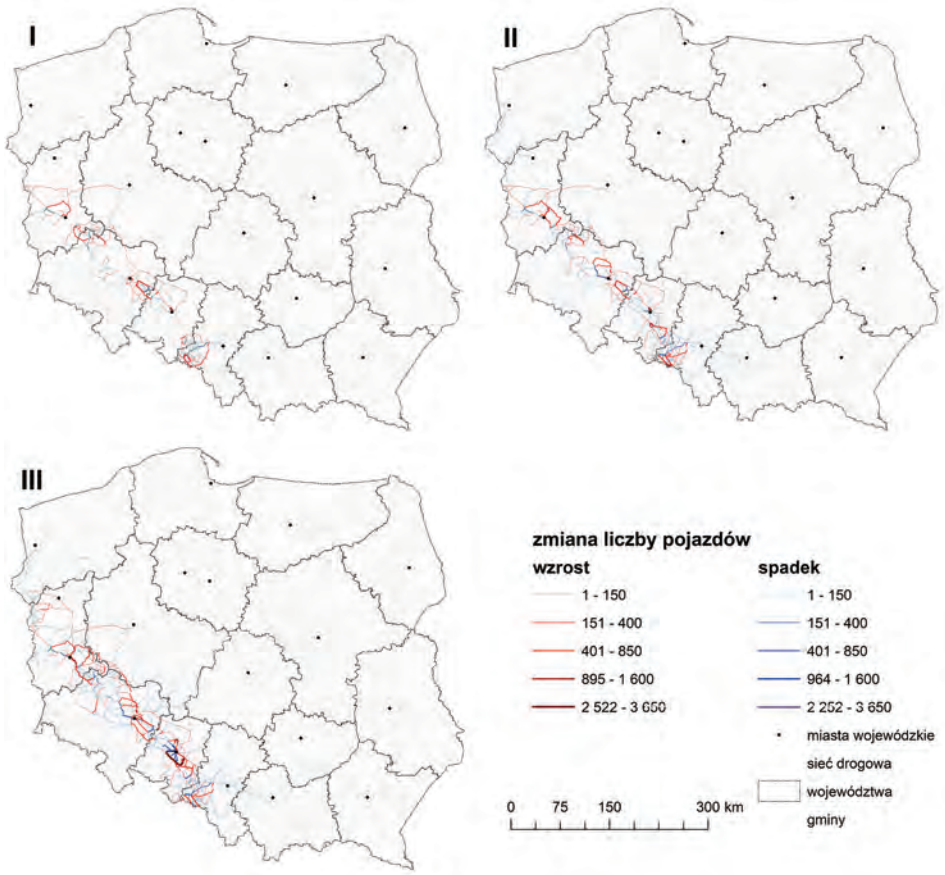
lokalnej infrastrukturze drogowej. Przeważający udział (blisko 90%) wzrostu pracy eksploatacyjnej związanego z wystąpieniem zjawiska nietypowego dotyczy odcinków dróg gminnych i powiatowych. Są to rzecz jasna niewielkie wolumeny pojazdów, przez co i bezwzględne różnice przypadające na poszczególne kategorie dróg są nieznaczne w porównaniu z większością pozostałych obszarów, dla których przeprowadzono symulacje.

7.1.4. Główne rzeki

Zgodnie z argumentacją przedstawioną w rozdziale szóstym prowadzenie analiz zmian obciążenia sieci drogowej uwzględniających wystąpienie powodzi na głównych rzekach w kraju pozwala ocenić, w jaki sposób inne niż w przypadku podejścia biorącego pod uwagę regiony wodne skonfigurowanie współwystępowania obszarów zagrożonych powodziami przełoży się na zamodelowane zachowania podróżujących do pracy czy też służbowo (w dalszej części rozdziału).

W przypadku Wisły (ryc. 7.12) szczególną uwagę zwraca scenariusz, w którym symulowane jest całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych. Poza wzrostami liczby pojazdów na odcinkach dróg umożliwiających objazd zalanych w tym wariancie terenów wyraźnie uwidaczniają się spadki wielkości potoków ruchu pojazdów wynikające z ograniczenia potencjałów ruchotwórczych. Dotyczy to przede wszystkim Warszawy, Krakowa i Gdańska, w przypadku których występuje jednoczesny bardzo wysoki potencjał atrakcji ruchu oraz duży udział ludności potencjalnie zagrożonej wystąpieniem powodzi w tym scenariuszu. Stąd też spadki te obejmują sieć drogową występującą na stosunkowo dużej przestrzeni (w dużej odległości od miejsc wystąpienia bezpośredniego oddziaływania wód powodziowych), ale charakteryzują się niewielkim wolumenem pojazdów.

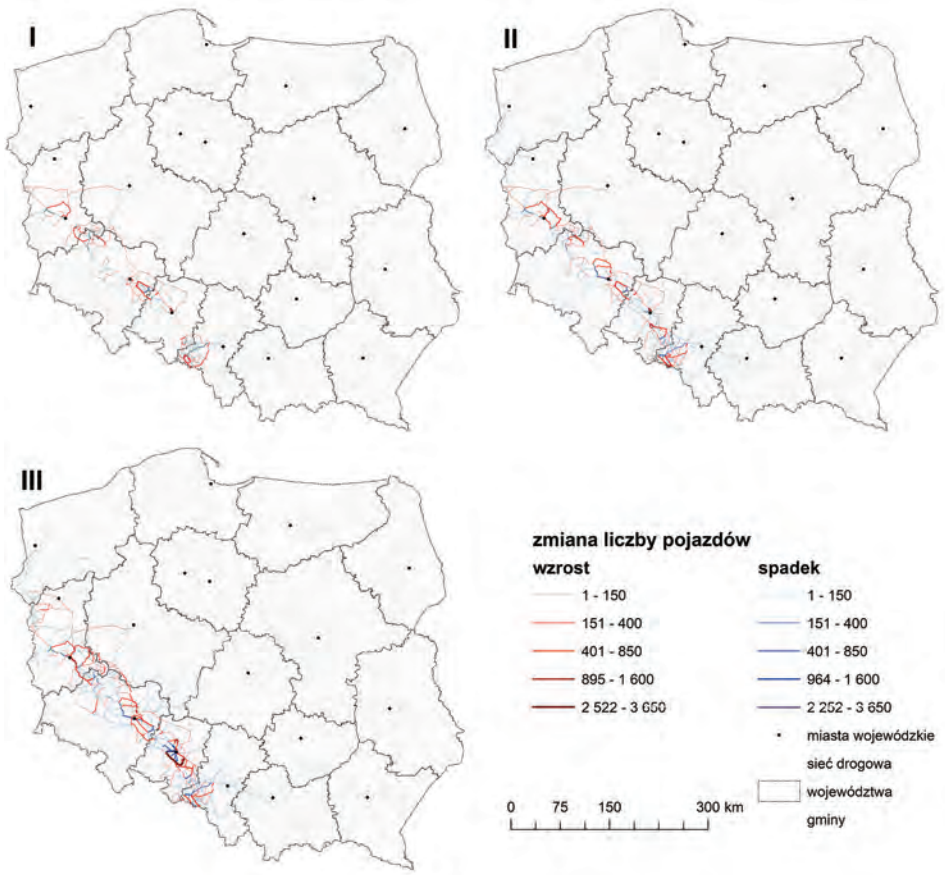
Tak dużego zróżnicowania zmian w obciążeniu sieci drogowej pomiędzy symulowanymi scenariuszami powodzi nie odnotowano w przypadku Odry i Warty (ryc. 7.13 i 7.14). Wynika to z wyraźnie mniejszej powierzchni terenów narażonych na zalanie w wyniku całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w następstwie wystąpienia powodzi na tych rzekach. Należy również podkreślić, że zaobserwowane wzrosty i spadki liczby pojazdów na poszczególnych odcinkach sieci drogowej przyjmują średnio znacznie niższe wartości, niż miało to miejsce w przypadku symulacji obejmujących odcinki tychże cieków, ale w ramach analiz poświęconych poszczególnym regionom wodnym.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.12. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

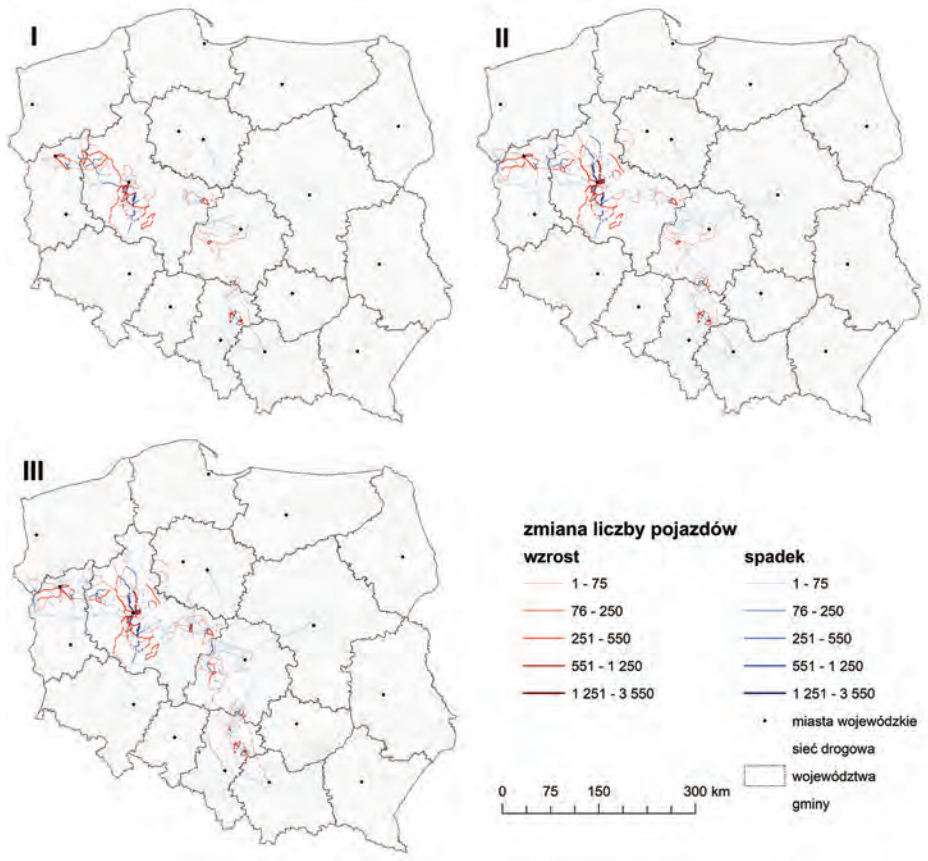
Źródło: opracowanie własne



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.13. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

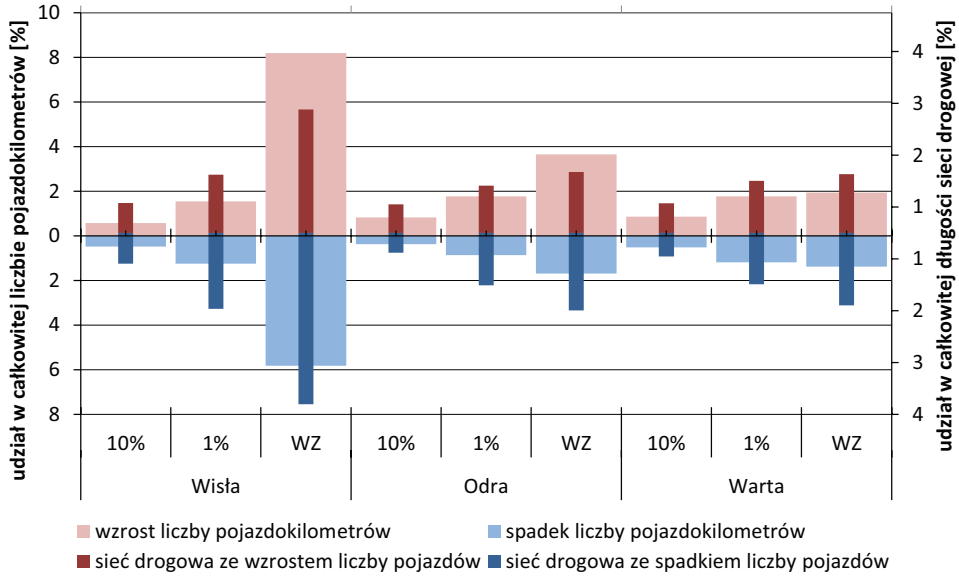


I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.14. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Wyraźnie zarysowany w obrębie sieci drogowej spadek liczby podróży do pracy w następstwie całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych wzdłuż Wisły ujawnił się też w zestawieniu zmian pracy eksploatacyjnej będących skutkiem wystąpienia tego rodzaju zagrożenia (ryc. 7.15). Znacznie większemu od dwóch pozostałych wariantów przyrostowi liczby pojazdokilometrów towarzyszy w tym scenariuszu ich podobnie duża liczba, ale związana ze zmniejszeniem wielkości potoków ruchu. Analiza opracowań kartograficznych wskazuje, że na wielkość tę w większym zakresie wpływ miała skumulowana długość sieci objętej spadkami niż ubytek pojazdów na niej zaobserwowany.



Ryc. 7.15. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Uwzględnienie struktury rodzajowej (kategorii) odcinków sieci drogowej, której dotyczą zmiany obciążenia ruchem pojazdów realizujących podróże do pracy, nie wykazuje szczególnych zmian w stosunku do obserwacji dotyczących badań poświęconych poszczególnym regionom wodnym (tab. 7.3). Największe wahania liczby pojazdów koncentrują się na drogach wojewódzkich, co w wynika z ich stosunkowo dużej podatności na negatywne oddziaływanie powodzi oraz jednoczesnej dużej gęstości i wyraźnie lepszych względem dróg lokalnych parametrów prędkości przejazdu i przepustowości.

Potwierdzona została bardzo istotna rola odcinków autostrad i dróg ekspresowych w obsłudze ruchu pojazdów towarzyszącego objeżdżaniu wyłączonych z eksploatacji odcinków sieci o niższych kategoriach w przypadku wystąpienia powodzi na Odrze.

Tab. 7.3. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na głównych rzekach w Polsce w 2019 r.

Rzeka	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
Warta	WZ	wzrost	6,4	7,3	22,2	27,8	28,9	6,6	0,7
		spadek	5,2	1,2	28,2	45,2	16,5	3,0	0,7
	1%	wzrost	6,5	8,1	21,5	29,0	28,2	6,1	0,6
		spadek	4,1	0,3	24,5	49,7	17,5	3,1	0,9
	10%	wzrost	9,0	10,7	18,5	29,7	22,5	8,2	1,3
		spadek	5,3	0,8	10,8	57,6	19,9	4,3	1,2
Odra	WZ	wzrost	25,1	17,0	11,2	18,3	25,4	2,1	0,9
		spadek	4,4	1,0	45,5	38,3	8,2	1,6	0,8
	1%	wzrost	11,1	12,0	21,5	27,8	25,5	1,5	0,5
		spadek	6,8	2,2	33,6	43,0	10,5	2,5	1,4
	10%	wzrost	14,3	10,1	26,8	23,6	23,2	1,3	0,7
		spadek	6,2	2,2	25,5	51,1	9,2	3,7	2,0
Wisła	WZ	wzrost	6,9	13,0	38,2	25,9	13,2	2,7	0,2
		spadek	6,5	12,0	46,8	23,3	8,5	2,8	0,2
	1%	wzrost	4,4	7,9	34,5	39,6	11,4	2,0	0,2
		spadek	6,1	6,8	49,5	28,1	6,4	2,3	0,8
	10%	wzrost	4,9	4,7	32,9	45,5	9,4	2,2	0,3
		spadek	5,7	4,8	49,8	29,4	7,9	1,3	1,1

Źródło: opracowanie własne.

7.2. Podróże służbowe

Uzasadnienia dla większości uniwersalnych cech charakteryzujących zmiany w obciążeniu sieci drogowej związanej z realizacją podróży służbowych na skutek wystąpienia powodzi należy doszukiwać się we właściwościach przemieszczeń dotyczących tej motywacji i danych, dzieki którym możliwe było zbudowanie więźby ruchu. Przejazdy obejmujące wypełnianie obowiązków służbowych należą do grupy podróży długich, co skutkuje towarzyszącym im stosunkowo niewielkim oporem przestrzeni. W ujęciu modelowym, przyjmującym jednakowe potencjały produkcji i atrakcji ruchu rejonów komunikacyjnych rozmieszczonych równomiernie w przestrzeni o ujednoliconym wyposażeniu w infrastrukturę drogową w stosunku np. do podróży do pracy (reprezentujących głównie podróże krótkie), skutkuje to występowaniem większego zasięgu przestrzennego

celów podróży dla każdego z ich źródeł. Zjawisko to jest dodatkowo uwydatnione w związku z brakiem danych o rzeczywistych podróżach w tej motywacji i koniecznością bazowania na modelu grawitacyjnym. Stąd też tak wyraźne różnice w zestawieniu z wynikami symulacji dotyczących dojazdów do pracy, które po pierwsze odbywają się na znacznie krótszych dystansach, a po drugie – bazując na danych macierzowych o realnych przemieszczaniach, pozwalały na wyeliminowanie podróży, które z „grawitacyjnego" punktu widzenia powinny występować, lecz w rzeczywistości nie mają miejsca.

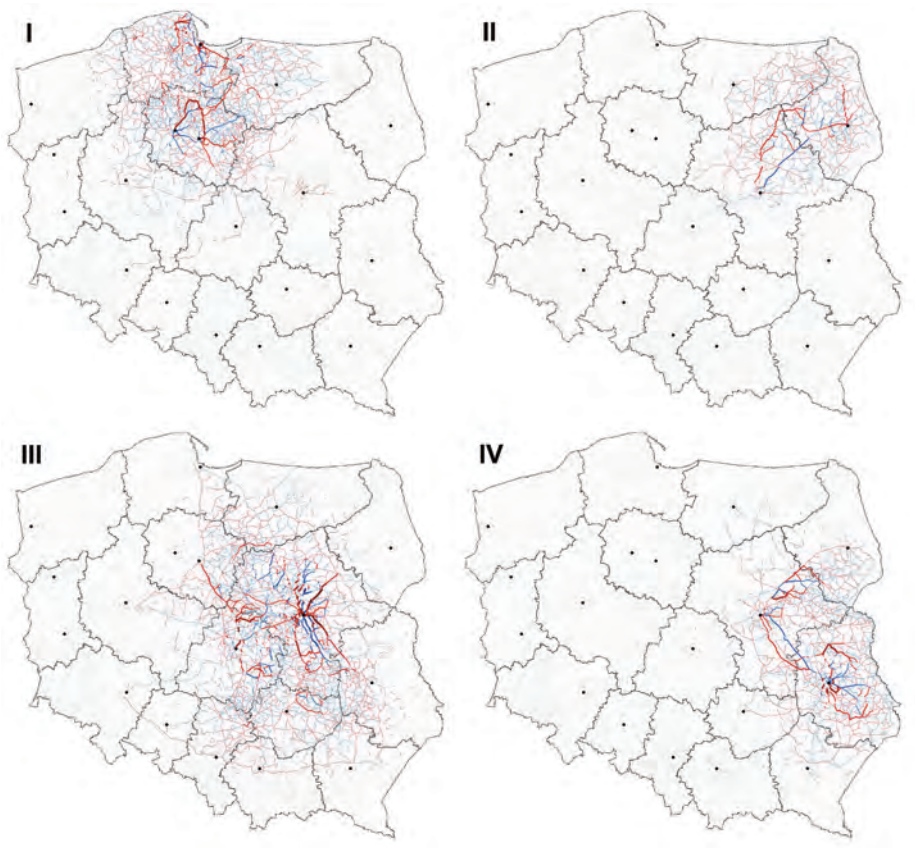
W przypadku podróży służbowych występują również, jeszcze bardziej intensywne niż w przypadku rynku pracy, dysproporcje w alokacji potencjałów produkcji i atrakcji ruchu. Skupienie jedynie w kilku miejscach w przestrzeni kraju znacznej większości źródeł i celów podróży jest szczególnie niekorzystne z punktu widzenia bezpieczeństwa systemu o takiej charakterystyce w obliczu sytuacji kryzysowych. Zaburzenie, które dotknie któregoś z kluczowych elementów systemu, może promieniować na obszary pozostające poza wpływem bezpośredniego oddziaływania powodzi. W przypadku badania poświęconego zmianom w obciążeniu sieci drogowej objawem tego rodzaju oddziaływania mogą być chociażby symboliczne spadki liczby pojazdów w obrębie sieci drogowej w części kraju odległej od objętego powodzią celu podróży.

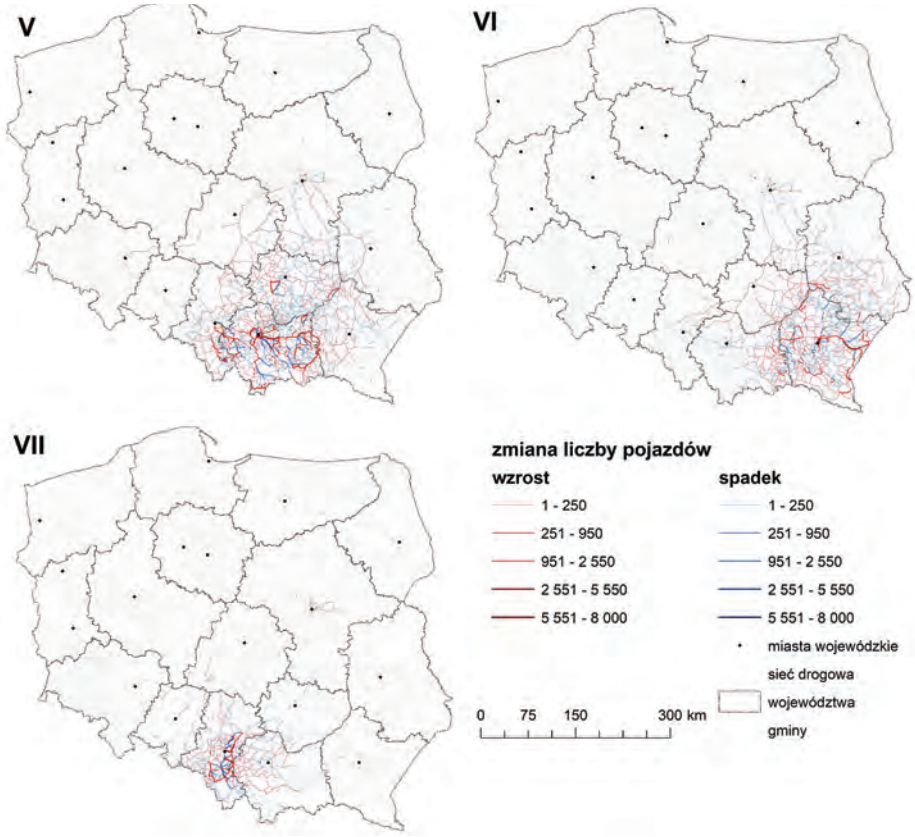
Z drugiej zaś strony często znaczna odległość do celu podróży biznesowej, który nie stracił na swojej atrakcyjności w związku z omawianą sytuacją kryzysową, ale do którego dojazd w związku z zalaniem został utrudniony, umożliwia wykorzystanie większej liczby racjonalnych ścieżek przejazdu, wynikających chociażby z ujawniającego się przy dłuższych podróżach zysku czasowego towarzyszącego przejazdom siecią autostrad i dróg ekspresowych. Analizując zaprezentowane w dalszej części rozdziału zmiany w obciążeniu sieci drogowej związane z podróżami służbowymi w następstwie wystąpienia powodzi, należy pamiętać o przeprowadzonym na etapie generacji podróży ujednoliceniu całkowitych wielkości mas potencjałów dla obu z rozpatrywanych motywacji i jednocześnie stosunku tychże motywacji do siebie w zakresie chociażby struktury rocznych przebiegów samochodów osobowych.

7.2.1. Obszar dorzecza Wisły

Analiza zasięgu przestrzennego zmian wielkości potoków ruchu występujących w związku z symulacją powodzi od strony rzeki w poszczególnych regionach wodnych obszaru dorzecza Wisły (ryc. 7.16-7.18) wskazuje w większości przypadków na występowanie swego rodzaju rdzenia, gdzie zmiany dotyczą wyraźnie większych liczb pojazdów, ale skoncentrowanych na stosunkowo niewielkim obszarze, oraz tła charakteryzującego się zmianami w zakresie zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu pojazdów, lecz w obrębie sieci drogowej obejmującej znacznie

większy obszar. Charakterystyczne jest również występowanie niewielkich zmian liczby pojazdów w sąsiedztwie kluczowych dla tej motywacji podróży rejonów komunikacyjnych (przede wszystkim Warszawy), nawet w przypadku, kiedy symulacja powodzi dotyczy regionu wodnego innego niż Środkowej Wisły. O ile uwzględnieniu w symulacji obejmującej odcinki sieci wyłączone z eksploatacji w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% towarzyszy przyrost długości odcinków, na których potoki ruchu obejmowały większą liczbę pojazdów w stosunku do powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia 10%, o tyle wprowadzenie scenariusza zakładającego całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych bardziej uwidacznia jego spadki, szczególnie w obszarze wskazanego wcześniej tła.

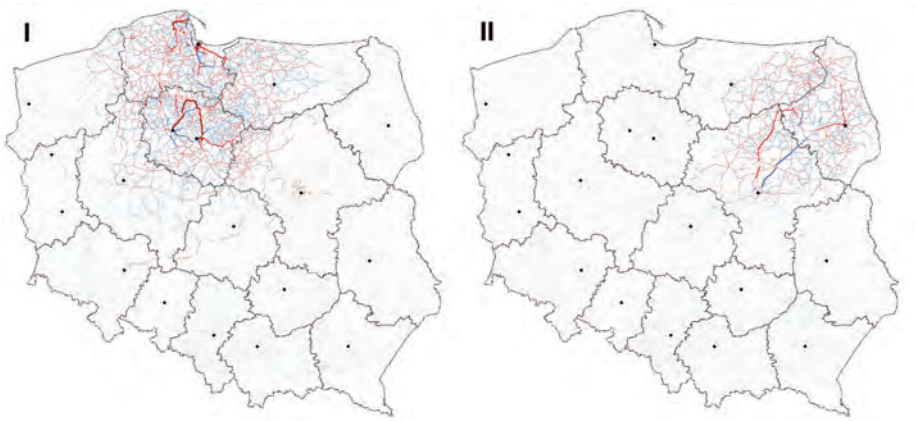


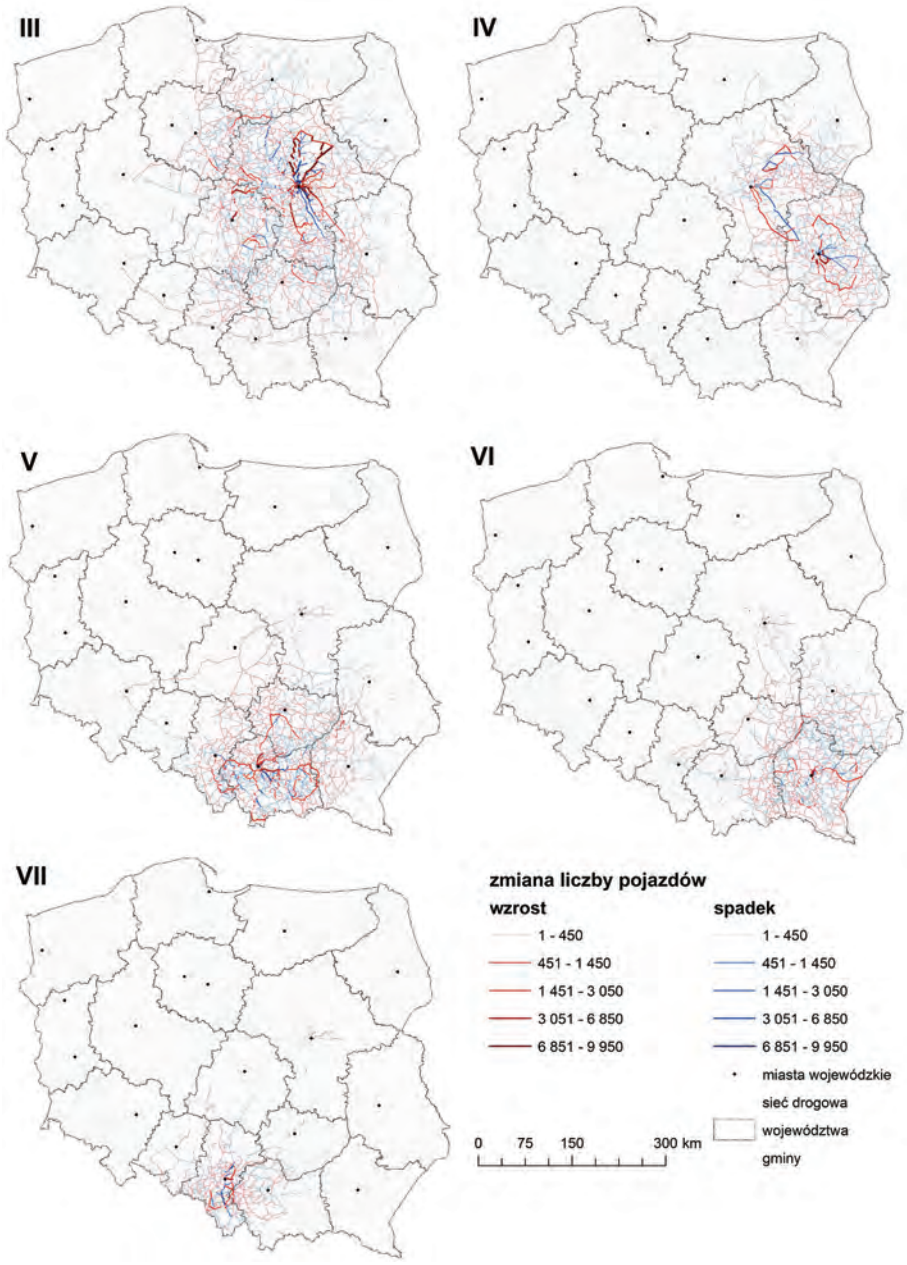


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.16. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

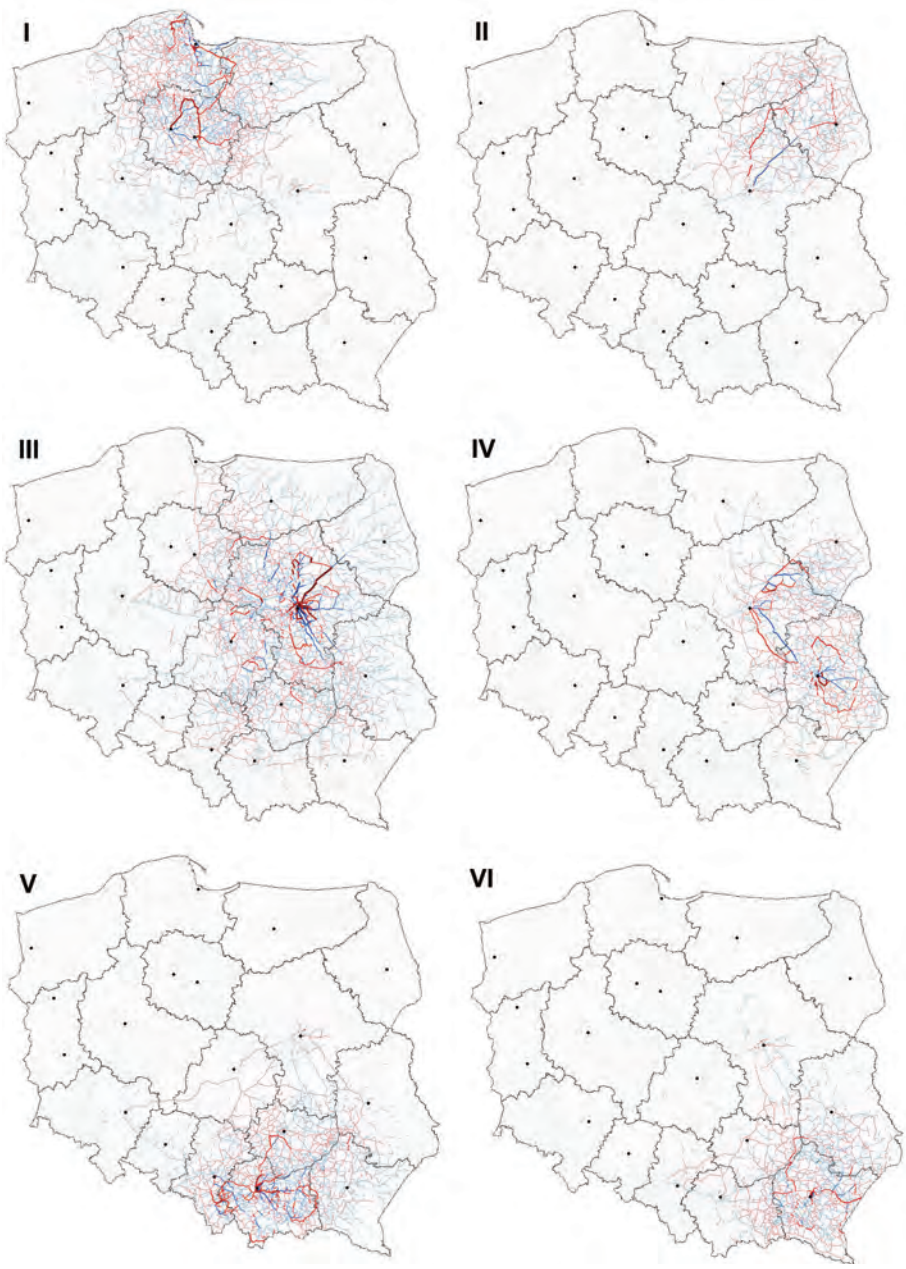


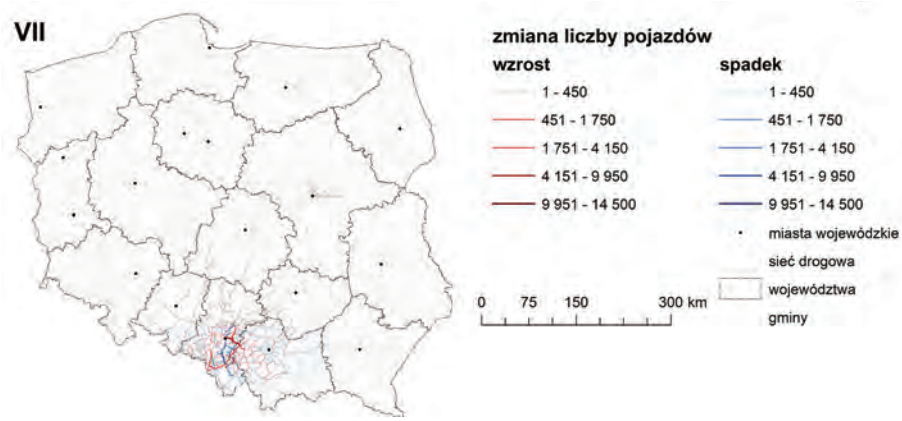


I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.17. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne


I
II
III
IV
V
VI



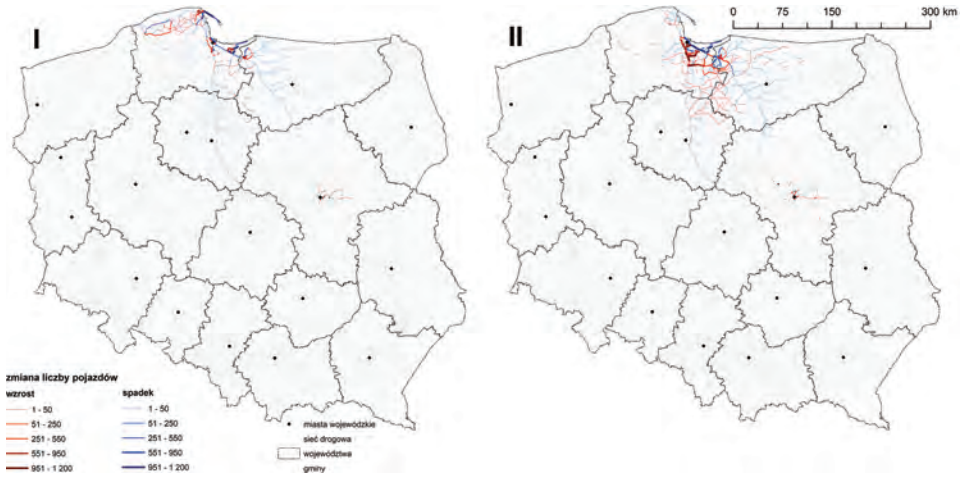
I – Dolnej Wisły, II – Narwi, III – Środkowej Wisły, IV – Bugu, V – Górnej-Zachodniej Wisły, VI – Górnej-Wschodniej Wisły, VII – Małej Wisły

Ryc. 7.18. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku wystąpienia powodzi od strony morza o prawdopodobieństwie 1% czy też w wyniku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego (ryc. 7.19) zmiany w obciążeniu sieci drogowej wystąpią przede wszystkim na obszarze województwa pomorskiego oraz warmińsko-mazurskiego (tutaj głównie w postaci nieznacznych spadków liczby pojazdów na skutek redukcji potencjałów ruchotwórczych głównych ośrodków miejskich Pomorza Gdańskiego).

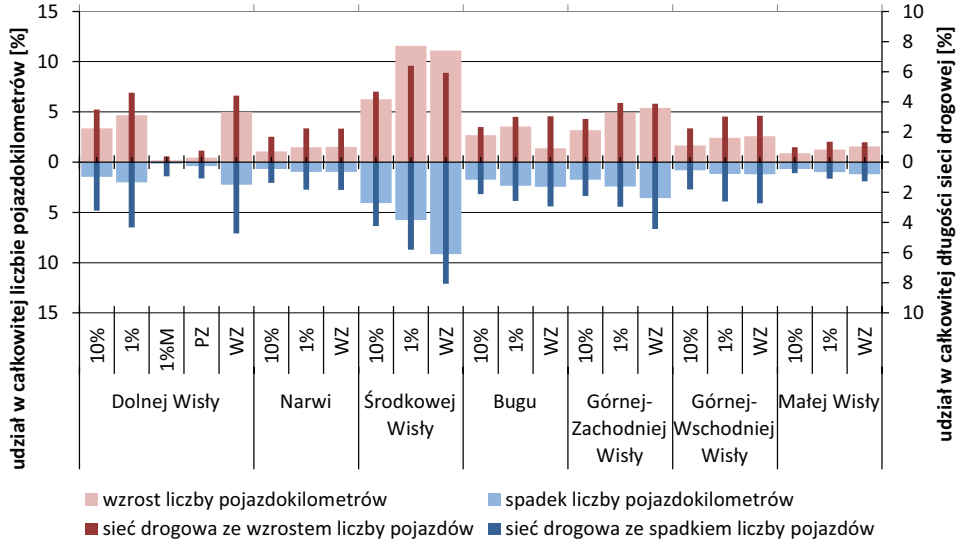
Zaobserwowane w obrębie sieci drogowej zmiany liczby pojazdów, choć wydają się dotkliwymi konsekwencjami dla systemu transportowego, to w najbardziej problematycznym pod tym względem scenariuszu nie stanowią nawet 12% wielkości pracy eksploatacyjnej związanej z analizowaną motywacją w Polsce (ryc. 7.20). Sygnalizowany chwilę wcześniej zauważalny wzrost liczby odcinków, których dotknął spadek liczby pojazdów w związku ze zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych, przełożył się w kilku przypadkach na bardzo niewielkie wzrosty pracy eksploatacyjnej w stosunku do scenariusza zakładającego wystąpienie powodzi o prawdopodobieństwie 1%. W przypadku regionów wodnych Środkowej Wisły i Bugu występuje sytuacja wręcz odwrotna – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych tak dalece wpłynęło na potencjały ruchotwórcze rejonów komunikacyjnych objętych symulacją, że bezwzględny przyrost pracy eksploatacyjnej był tu niższy niż w scenariuszu powodzi 100-letniej. W porównaniu z badaniem dotyczącym dojazdów do pracy w przypadku podróży służbowych konsekwencje dla osobowego ruchu drogowego koncentrują się wyraźnie na jednym regionie.



I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowitego zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 7.19. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne



Ryc. 7.20. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Blisko 60% zaobserwowanych zmian w zakresie wielkości potoków ruchu związanych z podróżami służbowymi, towarzyszących wystąpieniu powodzi na obszarze dorzecza Wisły we wszystkich analizowanych scenariuszach, dotyczy odcinków dróg krajowych i wojewódzkich (tab. 7.4). Około 1/3 opisywanych zmian dotyczy natomiast autostrad i dróg ekspresowych. Ich duży udział w obsługiwaniu ruchu pojazdów objeżdżających zagrożone tereny podczas realizacji podróży służbowych dotyczy niemalże każdego z uwzględnianych scenariuszy i obszarów symulacji.

Tab. 7.4. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

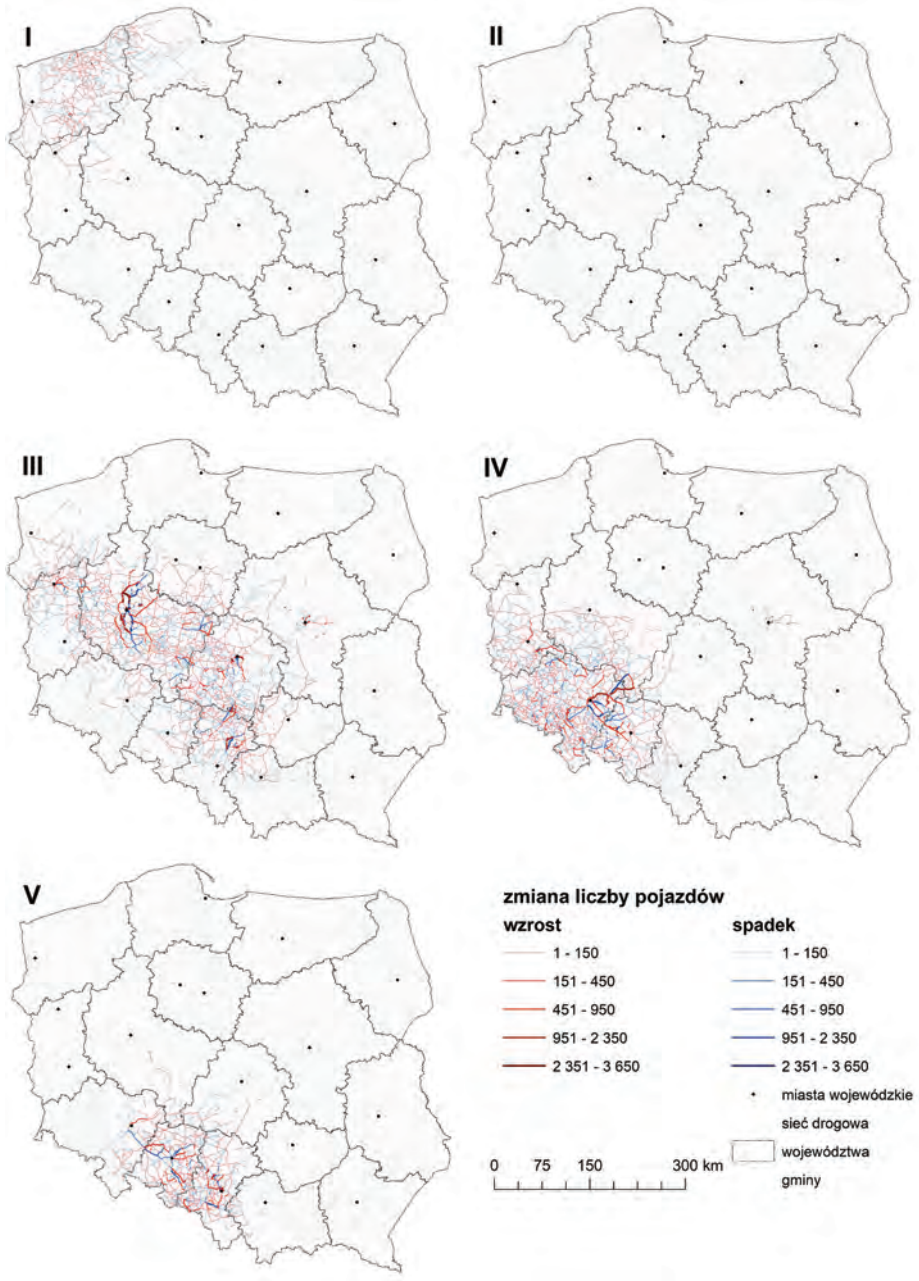
Region wodny	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Małej Wisły	WZ	wzrost	24,8	16,4	14,3	21,7	15,0	7,3	0,5
		spadek	2,6	10,6	65,6	11,9	8,3	1,0	0,1
	1%	wzrost	10,3	17,3	27,1	25,8	16,5	2,5	0,5
		spadek	3,4	13,7	63,0	12,5	6,7	0,7	0,1
	10%	wzrost	11,3	17,0	30,3	24,0	14,9	1,7	0,7
		spadek	3,6	15,2	61,2	11,9	7,3	0,8	0,1
Górnej-Wschodniej Wisły	WZ	wzrost	23,7	3,0	11,7	23,8	34,2	3,1	0,4
		spadek	1,6	3,4	47,6	33,0	12,9	1,2	0,2
	1%	wzrost	23,8	2,9	10,6	24,0	35,2	3,0	0,5
		spadek	1,8	3,5	46,1	33,8	13,2	1,2	0,2
	10%	wzrost	25,2	1,6	10,3	24,7	34,7	3,1	0,4
		spadek	1,1	4,4	45,4	34,1	13,5	1,3	0,2
Górnej-Zachodniej Wisły	WZ	wzrost	18,0	3,7	25,2	22,4	25,1	5,0	0,5
		spadek	8,0	5,4	35,3	32,8	14,9	3,4	0,2
	1%	wzrost	20,7	4,5	23,1	22,7	23,0	5,5	0,5
		spadek	4,1	4,2	35,4	37,8	14,4	3,9	0,2
	10%	wzrost	22,8	5,3	24,4	18,7	23,4	4,9	0,5
		spadek	5,0	4,6	37,5	34,4	13,9	4,4	0,2
Bugu	WZ	wzrost	0,2	9,1	27,8	40,7	20,8	1,3	0,1
		spadek	0,2	18,9	46,9	23,0	9,8	1,1	0,1
	1%	wzrost	0,3	7,8	28,1	44,4	18,2	1,1	0,1
		spadek	0,0	19,8	47,0	22,7	9,4	1,1	0,1
	10%	wzrost	0,1	9,2	29,2	40,6	19,9	0,9	0,1
		spadek	0,2	16,7	48,3	23,8	9,8	1,2	0,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Środkowej Wisły	WZ	wzrost	2,3	37,1	19,7	14,3	23,2	3,3	0,1
		spadek	2,1	3,1	44,8	36,8	11,7	1,4	0,0
	1%	wzrost	2,6	24,6	25,1	20,6	23,1	3,9	0,1
		spadek	0,7	7,2	44,6	34,4	11,6	1,4	0,0
	10%	wzrost	6,9	21,6	32,1	16,6	17,0	5,6	0,2
		spadek	0,8	6,1	41,2	37,8	12,8	1,3	0,0
Narwi	WZ	wzrost	0,2	9,3	38,4	31,5	16,7	3,2	0,6
		spadek	0,4	62,0	18,3	12,5	7,8	1,9	0,1
	1%	wzrost	0,2	9,5	37,9	31,6	17,0	3,2	0,6
		spadek	0,4	59,4	18,1	12,3	7,7	1,9	0,1
	10%	wzrost	0,2	9,8	37,3	31,1	17,6	3,3	0,7
		spadek	0,4	58,0	18,7	12,7	7,9	2,0	0,2
Dolnej Wisły	WZ	wzrost	14,7	16,6	15,8	15,1	29,4	8,2	0,1
		spadek	4,2	4,2	45,1	28,4	12,8	4,6	0,7
	PZ	wzrost	14,8	24,6	24,4	6,7	25,8	3,6	0,1
		spadek	1,5	32,7	17,3	23,8	16,6	5,2	2,7
	1%M	wzrost	2,3	18,4	20,5	7,8	25,9	25,1	0,0
		spadek	2,3	15,0	7,4	57,7	12,5	1,8	3,4
	1%	wzrost	16,2	10,6	19,6	14,4	30,9	8,0	0,2
		spadek	4,5	4,9	46,0	28,5	11,7	4,2	0,1
	10%	wzrost	15,6	11,3	19,2	14,8	30,7	8,3	0,1
		spadek	4,5	4,9	46,0	28,2	11,9	4,3	0,1

Źródło: opracowanie własne.

7.2.2. Obszar dorzecza Odry

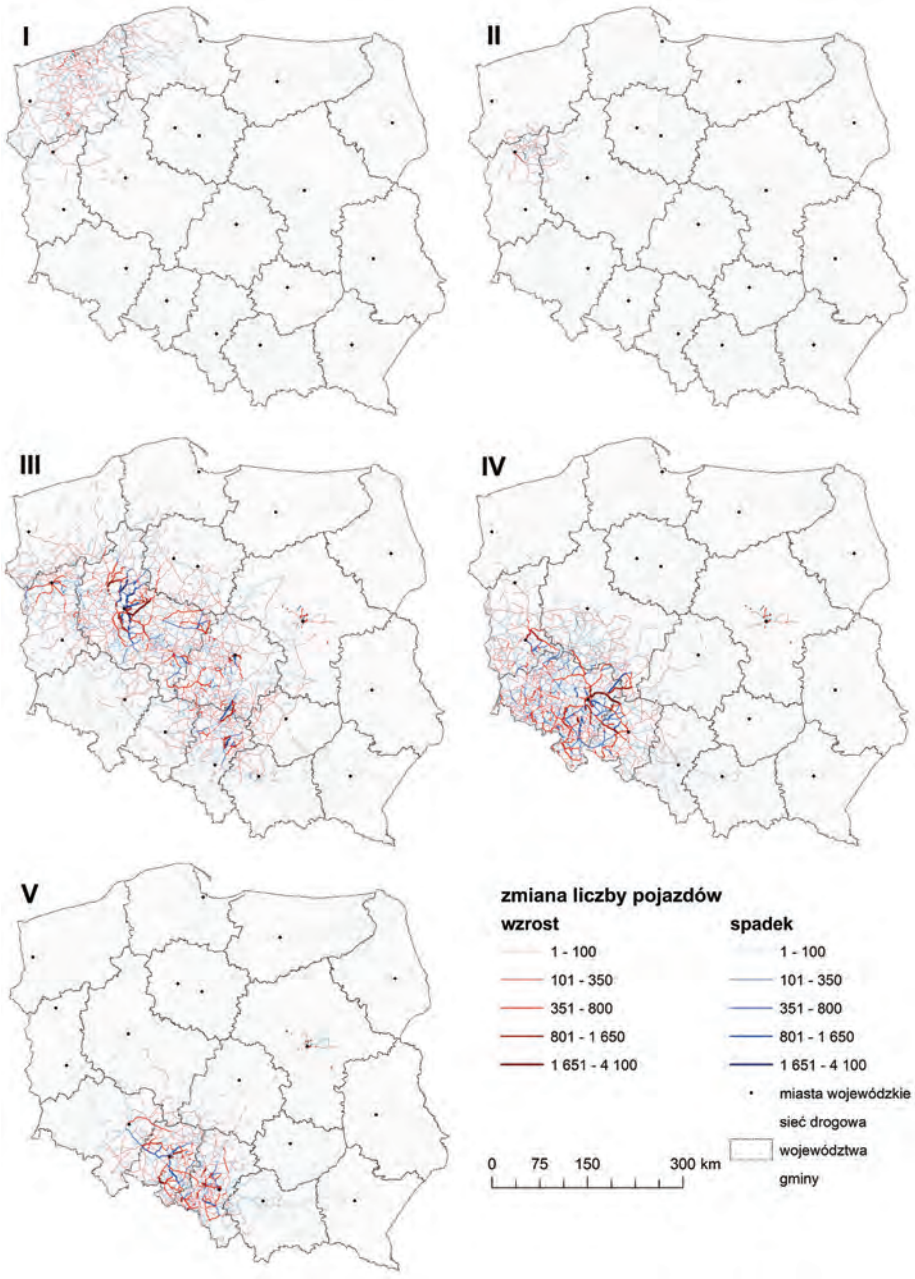
Choć zakres przestrzenny sieci drogowej dotkniętej zmianami liczby jadących nią pojazdów w porównaniu ze zmianami występującymi w przypadku symulacji do obszaru dorzecza Wisły jest w obszarze dorzecza Odry porównywalny, to wolumen pojazdów, który w tej zmianie uczestniczy, jest już jednak zasadniczo mniejszy (ryc. 7.21–7.23). Ze względu na rozległość symulacji zagrożenia i występowanie istotnych atraktorów ruchu w postaci Poznania, Wrocławia czy Zielonej Góry z najpoważniejszymi zagrożeniami dla równowagi transportowej muszą radzić sobie sieci drogowe w przypadku wystąpienia powodzi w regionach wodnych Warty i Środkowej Odry. W regionie wodnym Noteci, tak jak w przypadku analiz poświęconych dojazdom do pracy, również wyraźne zaburzenie funkcjonowania osobowego transportu drogowego przynieść może dopiero całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych.



I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty,
IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.21. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

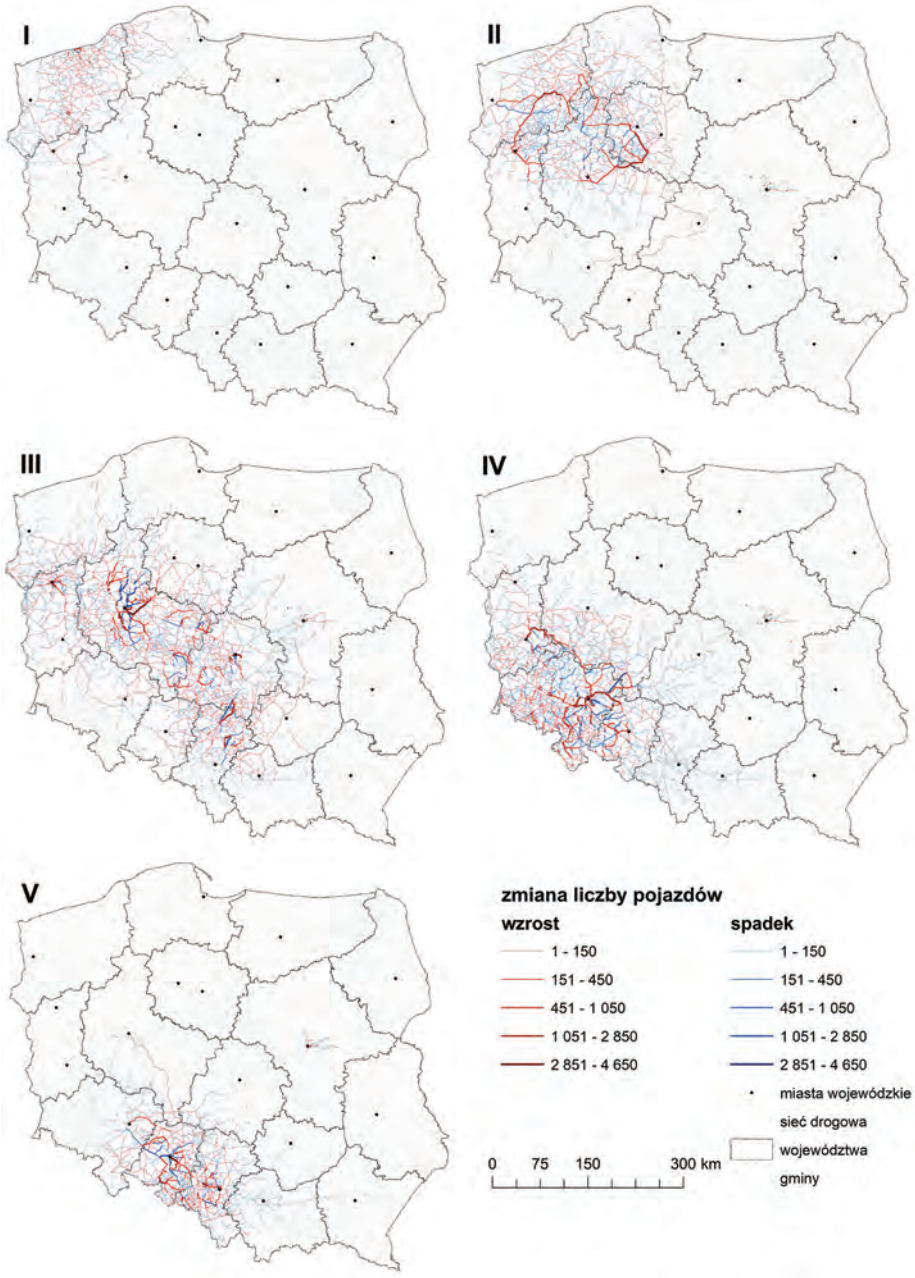
Źródło: opracowanie własne



I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty, IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.22. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

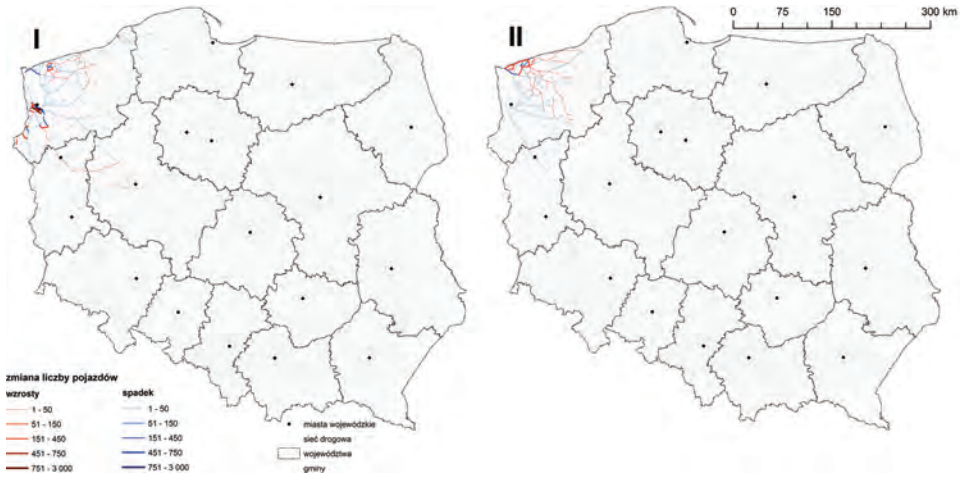


I – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, II – Noteci, III – Warty,
IV – Środkowej Odry, V – Górnej Odry

Ryc. 7.23. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Powódź od strony morza, podobnie jak ta od strony rzeki, nie stanowi dla sieci transportowej województw północno-zachodniej Polski dużego wyzwania (ryc. 7.24). Przy założeniu, że jest ona wykorzystywana do realizacji podróży służbowych, zasięg zaobserwowanych zmian obciążenia sieci drogowej dotyczy niemal wyłącznie województwa zachodniopomorskiego. Intensyfikacja mogących stanowić zagrożenie dla równowagi systemu transportowego zaburzeń w rozkładzie ruchu występuje w bezpośrednim sąsiedztwie Szczecina, Koszalina i Kołobrzegu.

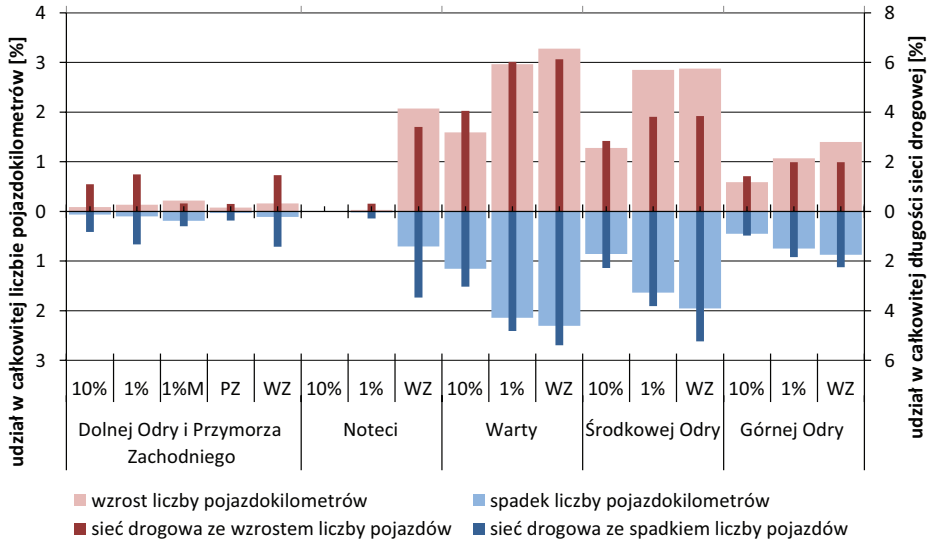


I – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), II – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego

Ryc. 7.24. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W grupie wariantów przestrzennych objętych symulacją powodzi realizacja podróży służbowych wydaje się niezagrożona, jeśli klęska wystąpi na obszarze regionów wodnych Dolnej Wisły i Przymorza Zachodniego, Noteci oraz Górnej Odry (ryc. 7.25). W przypadku dwóch pozostałych regionów koszty podróży (wyrażane chociażby w jednostkach czasu), które pomimo powodzi dojdą do skutku, mogą wyraźnie wzrosnąć.



Ryc. 7.25. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W porównaniu ze strukturą zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg odnotowaną dla obszaru dorzecza Wisły w obszarze dorzecza Odry niemalże nie uległa zmianie rola dróg krajowych i wojewódzkich (tab. 7.5). O ponad połowę niższy jest jednak udział dróg o najwyższych parametrach. W przypadku obszaru dorzecza Odry istotną rolę, szczególnie dla pojazdów zmuszonych do wyboru nowej ścieżki przejazdu, odgrywają odcinki lokalnej infrastruktury drogowej (mniej więcej jedna czwarta z odnotowanych bezwzględnych zmian liczby pojazdów dotyczy odcinków dróg tych kategorii).

Tab. 7.5. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r.

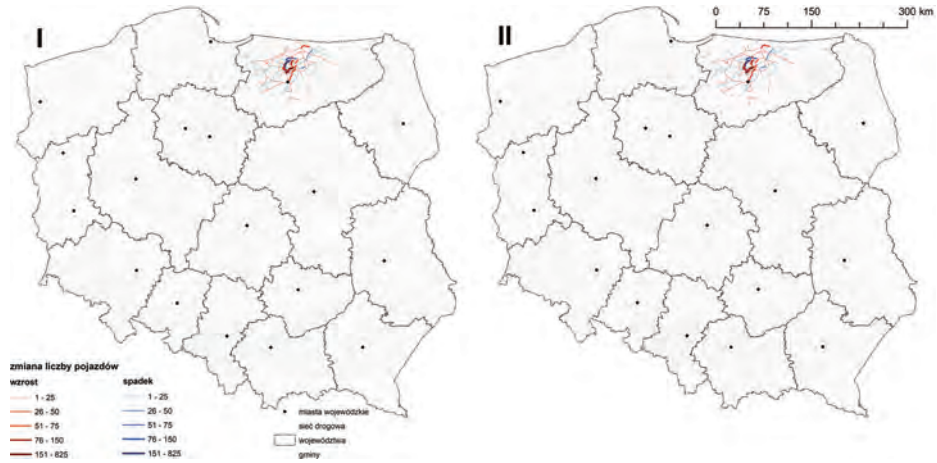
Region wodny	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Górnej Odry	WZ	wzrost	10,9	3,2	31,0	24,4	28,3	1,6	0,6
		spadek	16,6	0,4	45,0	26,5	11,0	0,4	0,1
	1%	wzrost	11,9	4,7	28,8	24,7	27,4	1,8	0,7
		spadek	16,9	0,4	41,2	29,8	11,0	0,5	0,1
	10%	wzrost	13,7	5,0	33,0	24,1	21,8	1,8	0,6
		spadek	17,4	0,3	37,6	32,6	11,3	0,6	0,3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Środkowej Odry	WZ	wzrost	13,2	17,0	12,8	30,4	21,2	4,6	0,7
		spadek	3,7	5,3	38,3	29,9	18,3	4,0	0,5
	1%	wzrost	12,3	20,4	12,9	31,5	18,9	3,1	0,8
		spadek	1,1	3,7	40,5	30,6	19,4	4,1	0,6
	10%	wzrost	11,6	21,3	16,8	22,2	21,0	6,1	0,9
		spadek	6,9	1,6	38,3	29,6	19,3	3,9	0,4
Warty	WZ	wzrost	7,4	19,8	20,2	20,7	25,4	5,6	0,8
		spadek	2,9	4,6	37,1	38,3	12,9	3,9	0,4
	1%	wzrost	6,8	17,7	21,9	21,5	25,8	5,5	0,7
		spadek	3,0	4,9	35,2	39,8	12,7	4,0	0,4
	10%	wzrost	4,8	9,9	22,8	28,7	23,9	8,0	1,9
		spadek	4,2	5,4	26,0	45,0	15,6	3,6	0,2
Noteci	WZ	wzrost	3,4	15,1	35,8	21,5	12,7	10,4	1,1
		spadek	0,7	3,9	48,4	27,2	10,7	7,9	1,3
	1%	wzrost	0,7	24,6	21,8	18,6	13,0	19,3	1,9
		spadek	0,6	0,9	0,3	49,3	13,2	24,7	11,0
	10%	wzrost	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		spadek	6,7	1,2	40,8	40,9	3,1	7,3	0,0
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	WZ	wzrost	0,8	1,3	22,6	23,2	32,1	18,4	1,6
		spadek	0,3	2,2	17,7	50,5	16,2	11,6	1,6
	PZ	wzrost	0,0	0,6	0,8	77,7	15,6	4,8	0,6
		spadek	0,2	6,5	46,0	33,6	5,2	8,5	0,1
	1%M	wzrost	27,9	1,7	41,0	7,3	13,2	8,8	0,0
		spadek	0,1	1,9	67,7	21,4	5,1	3,6	0,1
	1%	wzrost	1,0	1,7	15,4	32,0	27,7	20,3	1,9
		spadek	0,2	2,4	18,5	48,9	16,8	11,6	1,7
	10%	wzrost	1,2	2,2	11,6	34,6	26,3	21,8	2,3
		spadek	0,1	2,6	21,6	47,0	15,7	10,9	2,0

Źródło: opracowanie własne.

7.2.3. Obszar dorzecza Pregoły

Uwzględnienie motywacji związanej z podróżami służbowymi nie zmieniło zasadniczo oceny wpływu wystąpienia powodzi w regionie wodnym Łyny i Węgorapy na funkcjonowanie osobowego transportu drogowego. Niezależnie od prawdopodobieństwa wystąpienia powodzi jej potencjalne skutki w zakresie zmian w obciążeniu sieci drogowej pozostają bardzo ograniczone zarówno co do liczby pojazdów, których zmiana dotyczy, jak i obszaru, na którym występuje (ryc. 7.26). Pomimo uwzględnienia motywacji o mniejszym oporze przestrzeni niż dojazdy do pracy zaobserwowane zmiany nie wykraczają poza granice województwa warmińsko-mazurskiego.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1%

Ryc. 7.26. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r.

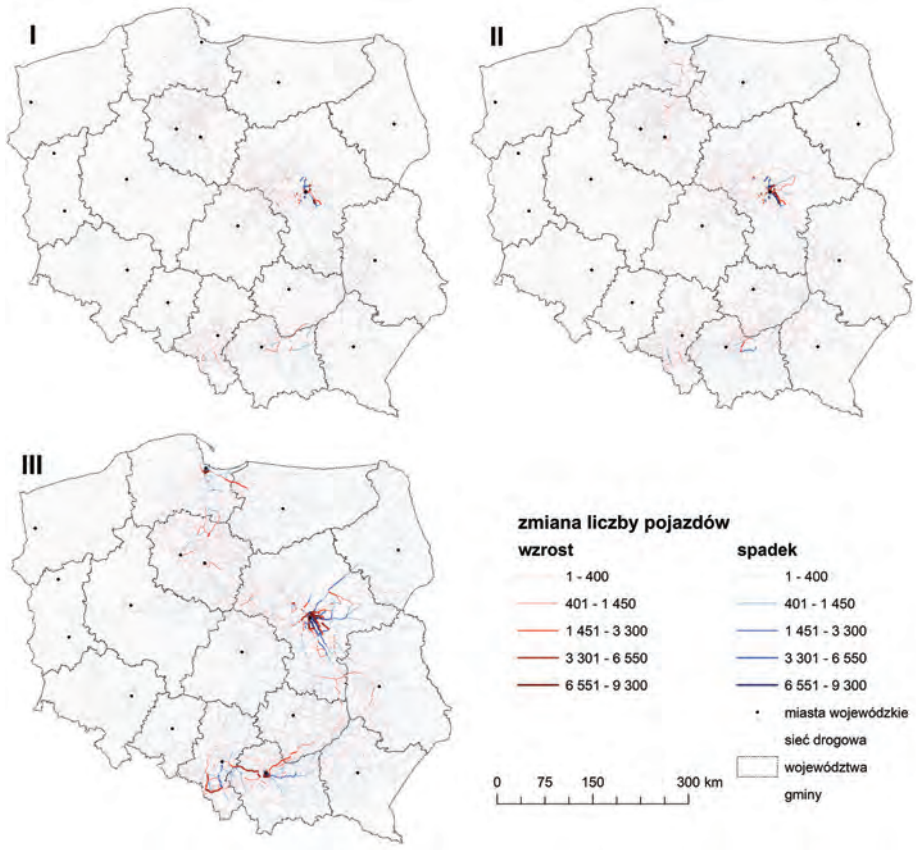
Źródło: opracowanie własne

Lokalny charakter zmian w sieci drogowej w konsekwencji wystąpienia powodzi na obszarze dorzecza Pregoły uwidacznia się w – ograniczonym do niecałych 0,06% pracy eksploatacyjnej związanej z podróżami służbowymi w Polsce – wzroście liczby pojazdokilometrów towarzyszącym obu z rozpatrywanych prawdopodobieństw powodzi. W zestawieniu uwzględniającym kategorie dróg, które zostały objęte zmianami liczby pojazdów, zauważa się duże różnice względem obserwacji z symulacji podróży krótkich (dojazdów do pracy). W tym przypadku zmiany koncentrują się na drogach krajowych, choć równie istotne są drogi wojewódzkie i gminne. W przeciwieństwie do przedstawionych wcześniej wyników symulacji powódź w regionie wodnym Łyny i Węgorapy „przenosi" ruch pojazdów na drogi o niższych kategoriach. Niezmienny pozostaje jednak niewielki wolumen pojazdów, których wzrost bądź spadek występuje w obrębie poszczególnych kategorii.

7.2.4. Główne rzeki

Przeniesienie rozważań na poziom największych polskich rzek generalnie wskazuje, że o ile wystąpienie powodzi nie pozostaje bez wpływu na funkcjonowanie osobowego transportu drogowego, o tyle poza wariantem, w którym całkowitemu zniszczeniu ulegają wały przeciwpowodziowe wzdłuż Wisły, scenariusze zanadto go nie obciążają. Zmiany w sieci drogowej powstałe na skutek oddziaływania wód powodziowych w połączeniu z rezygnacją z części podróży w ujęciu bezwzględnym przyjmują stosunkowo duże wartości, jednak w porównaniu z badaniem w formie symulacji dla poszczególnych regionów wodnych są one wyraźnie

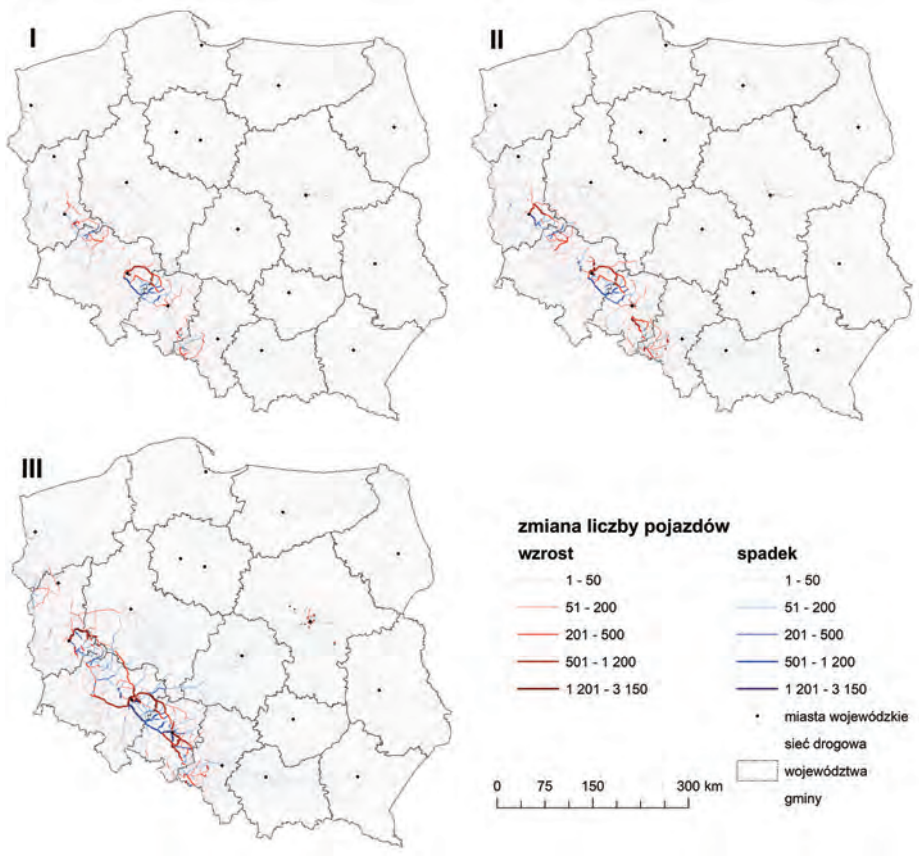
niższe (ryc. 7.27–7.29). Uzyskane rezultaty (szczególnie te chrakteryzujące powódź na Wiśle) cechują się bardzo wyraźnym występowaniem wcześniej zasygnalizowanego obszaru koncentracji zmian obciążenia sieci drogowej i nieporównywalnie większego obszaru zmian jedynie symbolicznych (głównie nieznacznych spadków wielkości potoków ruchu). Potwierdza to zaobserwowaną wcześniej kluczową rolę największych ośrodków miejskich w kształtowaniu rozkładu przestrzennego podróży biznesowych. Spadek atrakcyjności zaledwie kilku rejonów komunikacyjnych daje o sobie znać na odcinkach sieci oddalonych od nich nawet o kilkaset kilometrów. Naturalnie zmiany te koncentrują się w obrębie kategorii dróg ponadlokalnych (tab. 7.6), gwarantujących najwyższe prędkości poruszania się. Dlatego też zakres przestrzenny zmian wydaje się bardzo rozległy, ale udział sieci nimi objętej w skumulowanej długości sieci drogowej kraju na to nie wskazuje (ryc. 7.30).



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.27. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

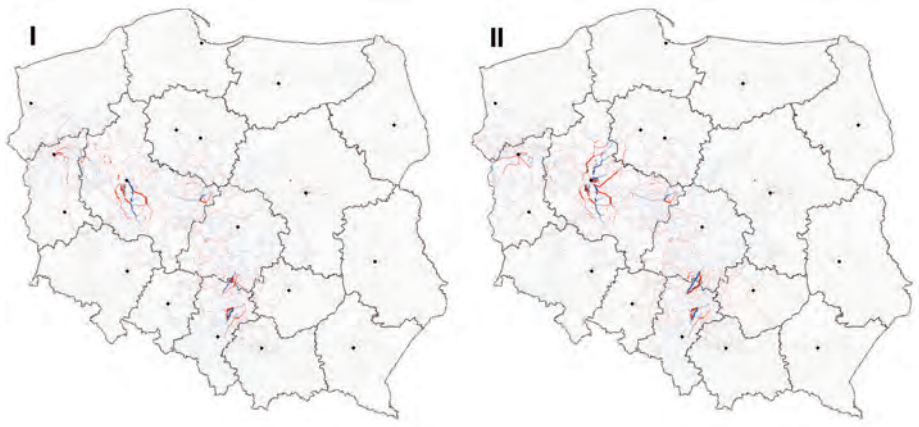
Źródło: opracowanie własne

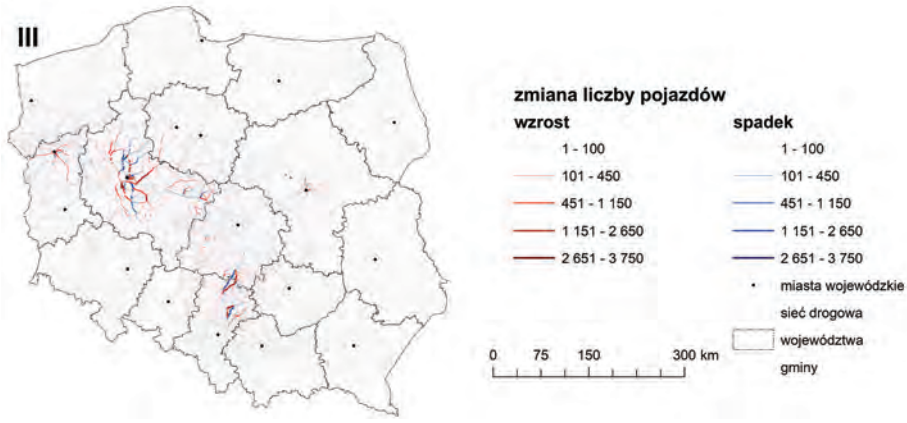


I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki),
III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.28. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne





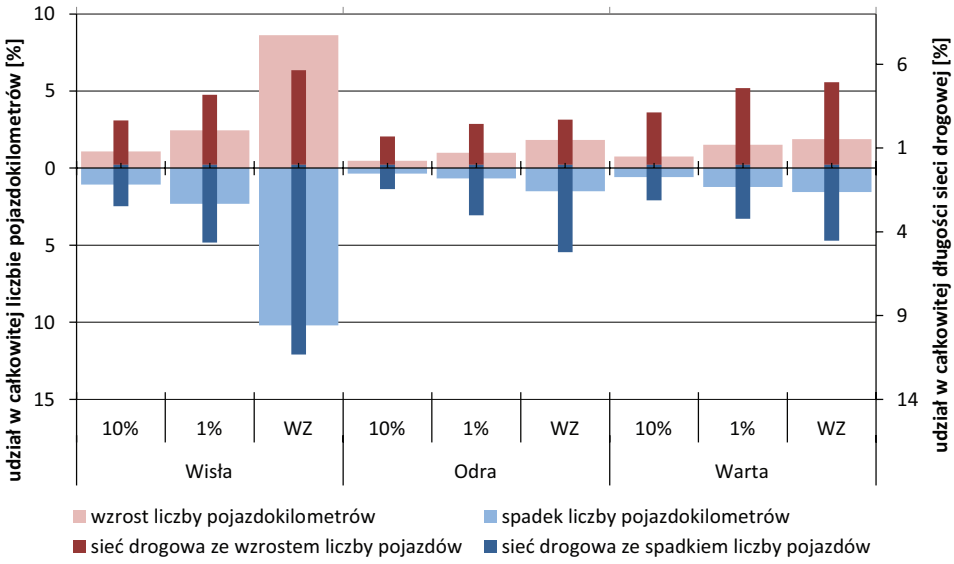
I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 7.29. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Duże znaczenie redukcji liczby podróży służbowych (szczególnie wobec ograniczonej długości sieci drogowej pozostającej pod bezpośrednim wpływem wód powodziowych) w przypadku symulacji powodzi na głównych rzekach uwidacznia się w niedużych różnicach pomiędzy wzrostami i spadkami pracy eksploatacyjnej towarzyszącymi poszczególnym analizowanym wariantom (ryc. 7.30). W przypadku całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych wzdłuż Wisły występuje nawet przewaga po stronie spadku liczby pojazdokilometrów oraz sumarycznej długości odcinków sieci drogowej, gdzie doszło do bezwzględnego spadku liczby pojazdów w potokach ruchu.

Wspomniane spadki liczby pojazdów w ciągach dróg krajowych, ekspresowych i autostrad widoczne są również w strukturze zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg (tab. 7.30). I chociaż trudno tu mówić o prawidłowości ujawniającej się we wszystkich uwzględnianych wariantach, to bez wątpienia spadki te są wyraźniejsze od notowanych dla drugiej z rozpatrywanych motywacji podróży czy też symulacji obejmujących poszczególne regiony wodne. Pomijając kierunek zmian obciążenia sieci drogowej, udział odcinków (1) autostrad i dróg ekspresowych, (2) dróg krajowych i wojewódzkich oraz (3) sieci lokalnej w obsłudze zmian wielkości ruchu pozostaje mniej więcej w relacji (1) 60% do (2) 20%, do (3) 20%.



Ryc. 7.30. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Tab. 7.6. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na głównych rzekach w Polsce w 2019 r.

Rzeka	Scenariusz powodzi	Zmiana	Kategoria drogi						
			autostrada (w %)	ekspresowa (w %)	krajowa (w %)	wojewódzka (w %)	powiatowa (w %)	gminna (w %)	inna (w %)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Warta	WZ	wzrost	4,7	12,4	27,3	21,4	28,9	4,9	0,5
		spadek	3,8	6,3	38,1	36,6	11,6	3,1	0,5
	1%	wzrost	3,5	11,5	35,2	18,9	26,1	4,4	0,5
		spadek	4,2	5,3	30,8	44,0	12,7	2,7	0,4
	10%	wzrost	2,8	5,8	29,2	24,9	29,5	7,0	0,9
		spadek	5,6	8,0	26,2	44,1	12,4	3,4	0,3
Odra	WZ	wzrost	16,4	17,0	21,9	24,5	16,6	2,4	1,1
		spadek	24,7	7,6	31,5	23,1	10,8	1,9	0,4
	1%	wzrost	10,2	19,7	18,8	32,1	16,8	1,9	0,3
		spadek	20,5	5,1	30,9	27,5	13,2	2,3	0,5
	10%	wzrost	11,2	16,3	17,3	35,2	15,9	3,6	0,5
		spadek	24,0	3,7	30,4	24,6	15,3	1,6	0,4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Wisła	WZ	wzrost	12,3	17,2	21,0	23,9	21,1	4,4	0,1
		spadek	7,5	9,7	38,8	31,4	10,4	2,0	0,2
	1%	wzrost	3,9	2,4	24,4	52,9	13,3	3,0	0,0
		spadek	7,9	12,9	32,4	37,5	7,9	1,3	0,0
	10%	wzrost	6,6	3,3	30,1	40,0	18,3	1,7	0,0
		spadek	5,5	14,4	38,5	31,3	8,7	1,5	0,1

Źródło: opracowanie własne.

8

KONSEKWENCJE POWODZI DLA OSOBOWEGO TRANSPORTU DROGOWEGO – PRÓBA SYNTEZY

Oszacowanie wpływu zdarzeń nietypowych (niezależnie od ich pochodzenia) na funkcjonowanie transportu (niezależnie od jego formy) jest zawsze dużym wyzwaniem i bez względu na zaangażowany nakład danych źródłowych czy zaawansowanie zastosowanego potencjału metodycznego zmusza badacza do oceny jedynie w ściśle określonym spektrum tego zagadnienia. W przypadku oddziaływania powodzi na funkcjonowanie transportu drogowego dochodzi do nałożenia się na siebie dwóch niezwykle złożonych zjawisk. Każde z osobna może stanowić przedmiot zainteresowania specjalistów wielu dziedzin nauki. Oba poddawane są również modelowaniu, tak aby pomimo swojej złożoności pozostały do pewnego stopnia przewidywalne, a co za tym idzie – by można było badać ich zmienność wobec labilności cech systemu, w którym funkcjonują. Dzięki modelom odwzorowującym granice terenów zagrożonych powodzią, sieć drogową, zmienność prędkości poruszania się po niej samochodów osobowych czy też ścieżki przejazdów osób podróżujących do pracy albo w sprawach służbowych możliwe staje się włączenie do badań tak wielu czynników i dodatkowo o tak rozległym, krajowym zasięgu przestrzennym. Należy jednocześnie pamiętać, że rezultaty uzyskane na bazie analiz prowadzonych z wykorzystaniem modeli mogą być obarczone cechującymi je słabościami. W prezentowanym badaniu skutki wystąpienia powodzi dla funkcjonowania transportu drogowego rozpatrywane są jedynie pod kątem zmian w dostępności transportowej i obciążeniu sieci drogowej. Pomimo że skoncentrowano się wyłącznie na badaniach podróży krajowych i indywidualnym transporcie samochodowym, bez odrębnych badań dotyczących oddziaływania powodzi chociażby na jego społeczną czy ekonomiczną sferę, to różnorodność scenariuszy wystąpienia powodzi oraz długości i motywacji podróży przynosi szeroki zasób rezultatów. Wprawdzie symulacje obejmujące poszczególne kombinacje obu zmiennych stanowią cenne źródło informacji, lecz konieczna wydaje się także próba ich uogólnienia.

8.1. Konsekwencje w zakresie dostępności transportowej

Wyniki badań zawarte w rozdziale szóstym wyraźnie dowodzą wpływu wystąpienia powodzi na dostępność transportową. Ujawnia się on zarówno w obliczu analiz opartych wyłącznie na komponencie transportowym (dostępność izochronowa), jak i tych obejmujących również komponent zagospodarowania/demograficzny (dostępność kumulatywna i potencjałowa). Uzyskane wyniki ujawniają również zróżnicowanie siły ingerencji w bazowy poziom dostępności i jej zakresu przestrzennego.

Po metody badania dostępności sięgano w licznych analizach dotyczących szacowania skutków oddziaływania różnego rodzaju zmian inicjowanych w systemie transportowym. Często wielkością wpływu na dostępność mierzono efektywność wprowadzania do sieci transportowej Polski nowych odcinków dróg czy modernizacji już wcześniej funkcjonujących. W artykule Rokickiego i Stępniaka (2018) posłużono się wskaźnikiem dostępności potencjalnej dla Polski w celu weryfikacji ogólnego efektu produktywności dużych inwestycji w infrastrukturę transportową w latach 2004–2014. Podobną tematykę podejmowali również między innymi Rosik, Komornicki i Goliszek (2017), Rosik i in. (2013), Komornicki i in. (2010, 2015, 2017), Rosik, Stępniak i Komornicki (2015), Stępniak i Rosik (2013, 2016, 2018), Śleszyński i Kretowicz (2016), Bul (2016) czy Wiskulski i Taraszkiewicz (2015). Podejście to znajdowało zastosowanie także w odniesieniu do podsystemu transportu zbiorowego, w przypadku którego zmiany dostępności w stosunku do przyjętego poziomu bazowego informowały między innymi o trafności decyzji dotyczących rozmieszczenia infrastruktury punktowej (np. Gadziński i Beim 2009, Wolański 2010, Puławska i Starowicz 2011, Koźlak 2012, Kwarciński 2013, Goliszek 2014ab, 2016, Goliszek i Połom 2016ab, Guzik 2016, Malasek 2017).

Zazwyczaj w literaturze przedmiotu i opracowaniach o charakterze eksperckim podejmuje się więc rozważania nad skalą oczekiwanego wzrostu dostępności transportowej, jaki wyniknąć może z realizacji określonych zadań inwestycyjnych czy też zmian w organizacji transportu (np. zmian w organizacji ruchu). Rzadziej spotykane są badania, gdzie analizy dostępności służą do określenia siły oddziaływania czynników, których występowanie z natury rzeczy powinno obniżać efektywność funkcjonowania systemu transportowego. W mniej licznych publikacjach spadki dostępności odzwierciedlają np. konsekwencje występowania barier o charakterze administracyjnym, np. w związku z zamknięciem granic państwowych (np. Jacobs-Crisioni i Koomen 2017, Rosik i in. 2020b, Wells, Sah i Moghadas 2020). Trzeba w tym miejscu zaznaczyć, że choć zdroworozsądkowe przyjmowanie określonego zwrotu wektora zmian dostępności zazwyczaj znajduje swoje potwierdzenie w rezultatach badań, to nie należy podchodzić do tego zagadnienia bezrefleksyjnie. Złożona natura

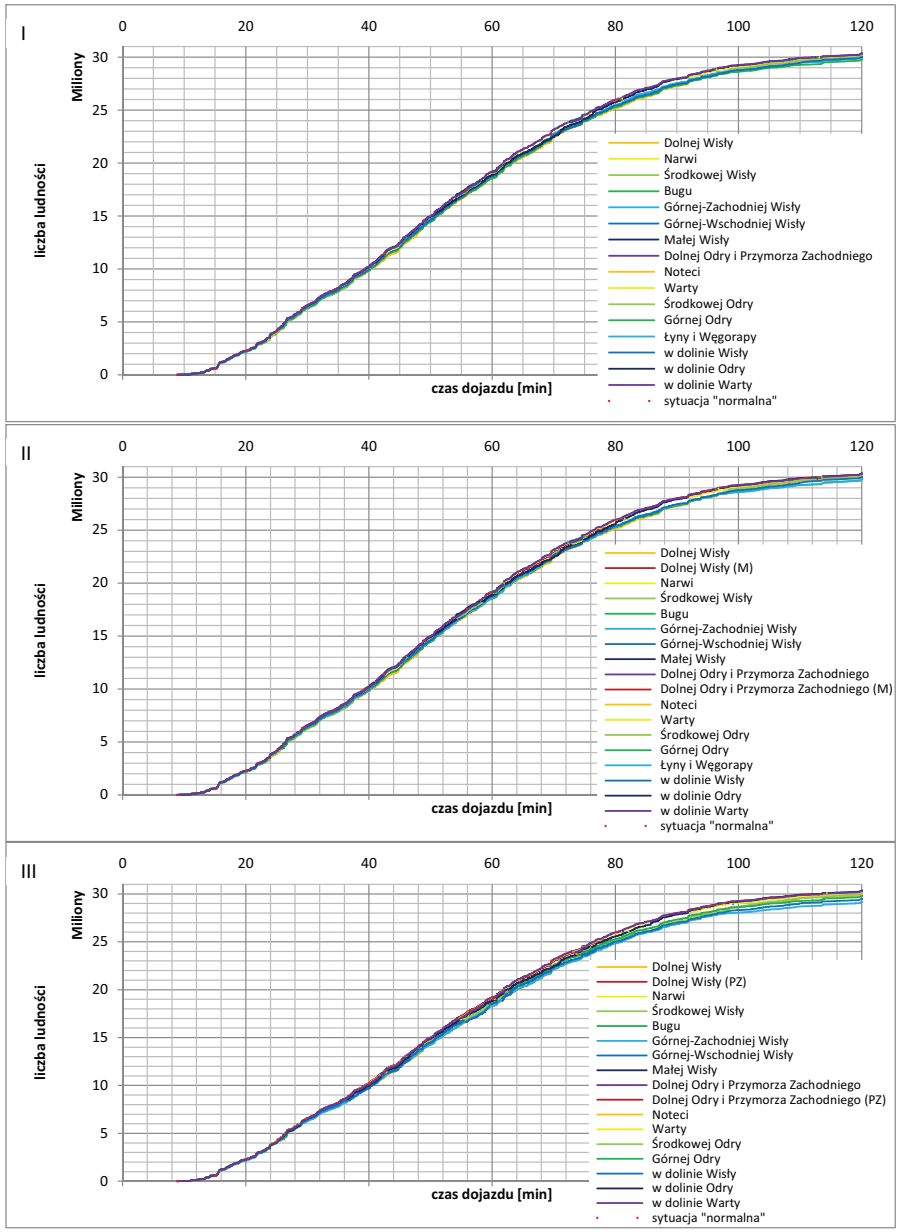
czynnika uwzględnianego w analizie zmian dostępności może bowiem przynieść zgoła niespodziewane wyniki.

W przywołanych wcześniej badaniach wielokrotnie podkreślano istotną rolę rozwoju infrastruktury transportowej w kształtowaniu potencjału społeczno-gospodarczego w różnych skalach przestrzennych. Przyczynia się on między innymi do poprawy dostępności regionów, miejsc pracy, ale również ograniczaja kongestię, pozwala zmniejszyć koszty eksploatacji środków transportu oraz skrócić czas podróży (Komornicki i in. 2010, Pawlak i Brdulak 2018). Równie rozległego spektrum oddziaływania, ale o odwrotnym charakterze należy więc się spodziewać w następstwie wystąpienia czynników całkowicie wyłączających fragment infrastruktury z użytkowania czy też częściowo obniżających jego właściwości użytkowe. Przełożyć się to może na okresowe spowolnienie wzrostu produktywności czy ograniczenie konkurencyjności przedsiębiorstw. Nie bez znaczenia jest również społeczny aspekt obniżenia dostępności towarzyszącej problemom w prawidłowym funkcjonowaniu sieci drogowej. Choćby czasowe ograniczenie dostępu do usług publicznych, wynikające tylko z ingerencji w spójność sieci drogowej, może się przyczynić do spotęgowania poczucia wykluczenia komunikacyjnego na obszarach, gdzie nawet przy w pełni sprawnej infrastrukturze występowały deficyty w tym zakresie. Ponieważ wpływ na dostępność transportową i czas podróży to kluczowe elementy oceny efektywności inwestycji transportowych, konsekwencje powodzi dla osobowego transportu drogowego zdecydowano się ocenić właśnie przez ich pryzmat. Przeprowadzenie symulacji obejmujących ingerencje w sieć drogową w poszczególnych wariantach wystąpienia omawianego zdarzenia nietypowego przyniosło informacje o ich produktach w postaci spadków dostępności czy wzmożonego obciążenia fragmentów sieci drogowej. Pokazało również, że owe produkty mogą wystąpić w lokalizacji innej, niż miał miejsce ich czynnik sprawczy.

Wystąpienie powodzi i towarzysząca temu zjawisku ingerencja w sieć drogową rzadko prowadzi do trwałej zmiany przebiegu odcinków dróg. Ma to miejsce tylko w przypadku bardzo poważnych zniszczeń infrastruktury i sytuacji, kiedy dany odcinek wielokrotnie zostawał już objęty bezpośrednim oddziaływaniem powodzi. Dochodzi wtedy do zwiększenia odchylenia ujemnego względem prostolinijnego przebiegu infrastruktury drogowej (Potrykowski i Taylor 1982). Znacznie częściej występuje jedynie okresowe wyłączenie segmentu sieci z eksploatacji (aż do ustąpienia niebezpieczeństwa i usunięcia ewentualnych uszkodzeń). Tak więc obserwowany jest trwały lub czasowy wzrost wskaźnika wydłużenia trasy, mówiącego o spadku sprawności układu drogowego – obniżeniu sprawności transportowo-osadniczej (Śleszyński 2014). Śleszyński (2014) odnosi się również do efektywności czasowej, definiując ją w zakresie układu drogowo-osadniczego jako porównanie nakładów

poniesionych na realizację inwestycji w stosunku do uzyskiwanych prędkości przejazdów, a co za tym idzie – czasów podróży. Owe nakłady można postrzegać w bardzo różnorodny sposób; Śleszyński wymienia chociażby finansowe i środowiskowe. Gdyby jednak za nakład przyjąć długość odcinków dróg wyłączonych z użytkowania w wyniku wystąpienia powodzi, jako ekwiwalent szerokiego spektrum oddziaływania powodzi na system transportu drogowego, w zestawieniu ze stratami odnotowanymi w zakresie wydłużenia czasów przejazdu i spadków dostępności, możliwe jest określenie „efektywności" poszczególnych wariantów wystąpienia zagrożenia. Określenie „efektywność" w tym kontekście trudno uznać za zasadne. Bliższa natury badanego zjawiska byłaby chociażby destrukcyjność czy szkodliwość.

Pomiar wspomnianego powyżej wydłużenia czasu przejazdu w osobowym transporcie drogowym w związku z wystąpieniem powodzi przeprowadzono przy wykorzystaniu podejścia izochronowego i kumulatywnego. Potencjalne zalanie czy też „odcięcie" fragmentów sieci drogowej nie pozostaje bez wpływu na czasy podróży do najbliższych ośrodków powiatowych i wojewódzkich. Szczegółowe analizy (zawarte w rozdziale szóstym) wskazują jednak, że w dominującej większości przypadków symulowanych wystąpień analizowanego zagrożenia przyrosty czasu podróży nie przekraczają interwału 15 minut w przypadku grupy miast powiatowych i 30 minut w przypadku miast regionalnych. Jest to wynik zarówno wysokiego poziomu opcjonalności dostępnych ścieżek przejazdu, których wybór nie pociąga za sobą nieakceptowalnych wzrostów czasu podróży, jak i cech rozmieszczenia ośrodków powiatowych i wojewódzkich. Dojazd do kolejnego położonego najbliżej miasta o danej randze wiąże się bowiem z mniejszym przyrostem czasu niż ten, który wystąpiłby przy niezmiennym celu podróży realizowanej podczas wystąpienia utrudnień związanych z powodzią. Podejście kumulatywne znalazło swoje zastosowanie między innymi w badaniach Śleszyńskiego i Kretowicza (2016) czy Komornickiego i in. (2018). Sięgnięto po nie w celu oceny efektów inwestycji drogowych pod względem dostępności przestrzennej rozpatrywanej w skali regionalnej i krajowej. Dokonując ewaluacji i monitoringu zmian dostępności, Komornicki i in. (2018) przeprowadzili analizy w izochronach 60-minutowej i 90-minutowej, uzasadniając je odpowiednio zasięgiem rynku pracy oraz odległością czasową odpowiadającą „relatywnie dogodnym" podróżom o charakterze fakultatywnym w przypadku usług wyższego rzędu. W prezentowanym badaniu izochronę jednogodzinną zastosowano w przypadku badania zmian dostępności względem grupy miast powiatowych, zaś w przypadku grupy miast wojewódzkich zdecydowano się na zwiększenie wartości do 120 minut, tak aby uchwycić nawet możliwie najdalej idące przyrosty czasu podróży (ryc. 8.1).



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki lub od strony morza (M), III – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych lub całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego (PZ)

Ryc. 8.1. Czasowa dostępność kumulatywna według liczby ludności o czasie dojazdu do ośrodków wojewódzkich w poszczególnych wariantach symulacji powodzi w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku dostępności do sieci miast wojewódzkich najpoważniejsze negatywne dla dostępności czasowej konsekwencje pociągnąć może za sobą całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły. Scenariusz ten wiąże się ze spadkiem liczby ludności w zasięgu izochrony 90-minutowej o 3,31%. Tym samym ponad 1,1 miliona osób może zostać pozbawionych możliwości względnie komfortowego dostępu do najbliższego ośrodka regionalnego. Wartość tę uznać można za wysoką. Dla porównania badania przeprowadzone przez Komornickiego i in. (2018) wykazały, że pomiędzy 2013 a 2023 rokiem dojdzie do przyrostu udziału ludności objętej izolinią 90-minutowego czasu dojazdu do sieci miast wojewódzkich o 1,8%. Znacznie bliższe tej wartości są spadki związane z wystąpieniem powodzi w regionie wodnym Dolnej Wisły. Wyłącza ona z zasięgu półtoragodzinnego dojazdu 2,13% bazowej liczby ludności w przypadku 10% prawdopodobieństwa wystąpienia i kolejne 0,54%, w sytuacji gdy wystąpiłaby powódź 100-letnia od strony rzeki. Są to jednocześnie maksymalne osiągane spadki wartości dla tychże prawdopodobieństw. Wystąpienie omawianego zagrożenia od strony morza to redukcje udziału ludności nieprzekraczające 0,30% wartości bazowej. Z badań Komornickiego i in. (2018) skupiających się na dostępności do sieci miast wojewódzkich w jednogodzinnej izochronie wynika, że w 2023 r. obejmie ona swoim zasięgiem o 5,6% ludności więcej, niż obejmowała w roku 2013. Nawet najdalej idąca ingerencja w sieć drogową mająca miejsce w związku z wystąpieniem powodzi daleka jest od takich wartości w przypadku izochrony 60-minutowej. Najwyższy odnotowany spadek o wartości 3,51% zaobserwowany został na skutek wystąpienia omawianego zdarzenia nietypowego doprowadzającego do całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w regionie wodnym Dolnej Wisły. Powódź 10-letnia i 100-letnia w regonie wodnym Bugu skutkuje zmianami w przebiegu izochrony 60-minutowej, które pozostawiają poza jej zasięgiem największe grupy ludności, odpowiednio 2,40 i 3,31% wartości bazowej.

W porównaniu ze zmianami zasięgu izochrony 90-minutowej wystąpienie powodzi od strony morza wyraźnie bardziej oddziałuje na 60-minutową dostępność do sieci miast wojewódzkich, chociaż wpływ ten nadal pozostaje bardzo ograniczony i nie przekracza 0,62% bazowej liczby ludności. Podobnie niewielki rząd spadku czasowej dostępności kumulatywnej według liczby ludności ma miejsce w przypadku sieci miast powiatowych[1]. Nawet wobec całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły tylko nieco ponad 200 tys. osób (0,54%) przestanie być objętych jedno-

[1] Wykresy prezentujące czasową dostępność kumulatywną według liczby ludności o czasie dojazdu do ośrodków powiatowych w poszczególnych wariantach symulacji powodzi zostały zamieszczone w aneksie (ryc. A.1).

godzinną izochroną dojazdu do najbliższego miasta powiatowego. Konsekwencje innych rozpatrywanych w tym kontekście scenariuszy powodzi, nie przekraczają spadków liczby ludności na poziomie 0,36% względem wielkości bazowej, a w licznych przypadkach (np. w związku z powodzią od strony morza) zmiany nie występują.

Ograniczenie dostępności kumulatywnej do miast wojewódzkich czy powiatowych to wykluczenie z możliwości korzystania z części ich potencjału, chociażby w postaci rynku pracy czy też usług pożytku publicznego. W przypadku powodzi ograniczenia te mają przeważnie charakter jedynie czasowy i w związku z tym nie mają możliwości trwale wpłynąć na zachowania komunikacyjne ludności. Niemniej jednak na obszarach, gdzie wystąpienie powodzi pociąga za sobą najdotkliwsze pod względem przyrostu czasu przejazdu konsekwencje, wskazane jest szczególnie skrupulatne monitorowanie infrastrukturalnych inwestycji drogowych pod kątem ich odporności na oddziaływanie wód powodziowych. Systematycznej obserwacji powinny podlegać również zmiany populacji na tych obszarach. Wobec jej przyrostu i braku niezbędnych inwestycji infrastrukturalnych poziom wykluczenia może się bowiem spotęgować.

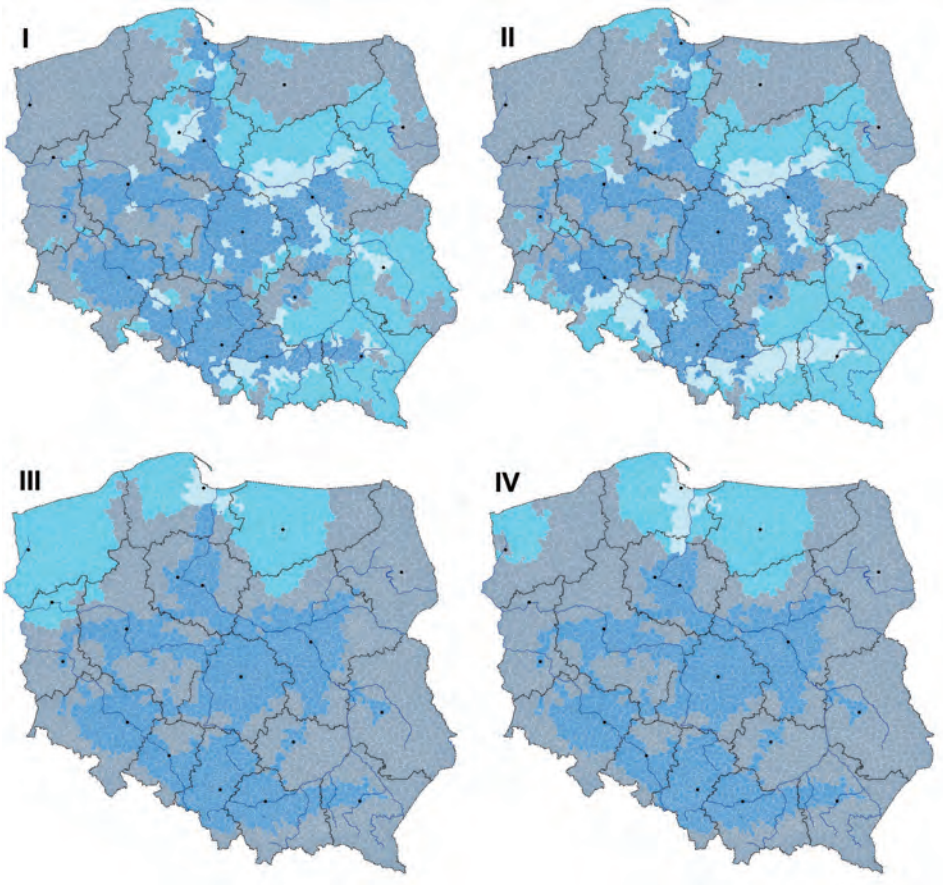
Z perspektywy ograniczenia spadków wskaźników dostępności kumulatywnej szczególnie istotne jest podnoszenie odporności infrastruktury drogowej, umożliwiającej dotarcie przede wszystkim do miast wojewódzkich. W ośrodkach tych skoncentrowany jest znaczny potencjał demograficzny, co w przypadku występowania infrastruktury o wysokiej podatności na oddziaływanie powodzi może skokowo zwiększać liczbę ludności objętej wykluczaniem, kiedy pojawi się zagrożenie. Ograniczenie negatywnych konsekwencji tego rodzaju przyniesie zapewne ujawnienie się opisanego przez Komornickiego i in. (2018) efektu sieciowego realizacji drogowych inwestycji infrastrukturalnych. Wchodzenie poszczególnych miast w zasięgi oddziaływania sąsiednich ośrodków wojewódzkich spowoduje, że wobec utrudnionego dojazdu do jednego z miast jego rolę będzie mógł przejąć inny, bez znaczniejszych wzrostów kosztów podróży po stronie dojeżdżających użytkowników sieci (substytucyjność nie występuje tutaj w pełni, chociażby ze względu na szereg funkcji administracyjnych). Co więcej, taka sytuacja pozwala na niwelowanie nierówności w rozwoju poprzez zapewnianie wysokiego poziomu dostępności do obszarów o najwyższym jego poziomie (Domański 1997, Komornicki 2019) nawet wobec wystąpienia różnego rodzaju barier, w tym tych o genezie związanej ze zdarzeniami nietypowymi (np. powodzi). W tym kontekście istotna jest postulowana przez Komornickiego i in. (2018) koncepcja takiego trasowania przebiegu dróg ekspresowych, aby pełniły one funkcje wewnątrzregionalne. Wynika to po pierwsze z wysokiej odporności tej klasy infrastruktury drogowej (w tym budowli inżynierskich w jej przebiegu) na oddziaływanie powodzi,

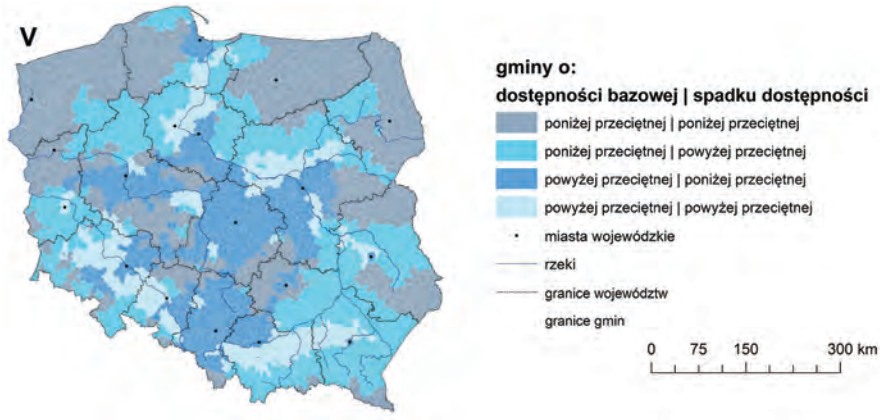
a po drugie z jej parametrów użytkowych. Szczególnie w przypadku podróży krótkich umożliwia objeżdżanie zagrożonych obszarów przy zachowaniu możliwości przejazdu z dużą prędkością nawet w obliczu wzmożonego ruchu, bez konieczności znacznego nadłożenia drogi w związku ze stosunkowo gęsto rozmieszczonymi wjazdami/zjazdami, uwzględniającymi lokalizacje ośrodków subregionalnych (w tym powiatowych). Istotność tego rozwiązania potwierdza również fakt, że polaryzacja dostępności przyjmuje coraz częściej formę regionalną i lokalną, bowiem łatwość dotarcia do celu podróży jest często uzależniona właśnie od jego położenia względem najbliższego punktu (wjazdu/zjazdu), w którym możliwe jest włączenie się do użytkowania infrastruktury o najwyższych parametrach (np. autostrady) (Komornicki 2019).

Dla jednoczesnego uwzględnienia wpływu powodzi na komponent transportowy i ludnościowy sięgnięto po syntetyczną miarę zmian sytuacji transportowej, opartą na podejściu potencjałowym. Skala zaobserwowanych zmian sum relacji poszczególnych rejonów komunikacyjnych z wszystkimi innymi włączonymi do badania, wynikających z równoległej redukcji potencjałów i wydłużenia czasów podróży w następstwie powodzi, każe uznawać ten czynnik za znaczący dla efektywności funkcjonowania transportu drogowego w Polsce. W licznych badaniach (m.in. Li, Cao, Huang 2012, Rosik i Stępniak 2015, Jacobs-Crisioni, Silva i Lavalle 2016, Komornicki i in. 2018, Stępniak i Rosik 2018) podkreślana jest silna współzależność elementów demograficznego i infrastrukturalnego w kształtowaniu dostępności, co znalazło swoje potwierdzenie również w okolicznościach tak specyficznego przedmiotu analizy.

Punktem wyjścia dla badania zmian dostępności, a w dalszej kolejności także identyfikacji obszarów, w przypadku których spadki te są szczególnie problematyczne, było określenie bazowego rozmieszczenia przestrzennego potencjału zarówno dla podróży krótkich, jak i długich. Uzyskane rezultaty są w znacznej mierze potwierdzeniem wcześniejszych badań w tym zakresie (np. Stępniak i Rosik 2016, Komornicki i in. 2018). Szczególnie w przypadku podróży krótkich wyraźnie widoczne są dwa obszary koncentracji najwyższych poziomów dostępności w układzie Łódź–Warszawa oraz konurbacja górnośląska – Kraków. Wyspowo występuje również w okolicach Poznania, Trójmiasta oraz Wrocławia, pozostając w „korytarzach" podwyższonej dostępności biegnących odpowiednio w kierunku województwa łódzkiego i śląskiego. Uwzględnienie podróży długich spaja ten wyspowy charakter, tworząc wyraźny rdzeń (nawiązujący do metropolii sieciowej wskazanej w KPZK 2030), obejmujący obszar pomiędzy stolicami województw mazowieckiego, małopolskiego, dolnośląskiego, wielkopolskiego i pomorskiego, rozlewając się nieznacznie ku wschodowi, w kierunku Białegostoku, Lublina, Rzeszowa, a na zachodzie wkraczając do województwa lubuskiego. Problematyczna

pozostaje sytuacja województw zachodniopomorskiego, warmińsko-mazurskiego, wschodnich krańców podlaskiego i lubelskiego oraz południowej części województwa podlaskiego. W celu uczytelnienia rozmieszczenia gmin z perspektywy poziomu dostępności bazowej dokonano ich podziału pod względem jej wartości przeciętnej (ryc. 8.2 i 8.3). W ten sam sposób przyporządkowano gminy pod kątem spadku dostępności występującego w związku z poszczególnymi scenariuszami powodziowymi (na podstawie rezultatów zawartych w rozdziale szóstym). Pozwoliło to na uzyskanie czterech typów gmin ze względu na poziom bazowej dostępności potencjałowej i wielkość jego spadku w podróżach krótkich i długich. Szczególnej uwagi wymagają jednostki, w przypadku których współwystępuje niska dostępność wyjściowa i jej duża redukcja w sytuacji zagrożenia.

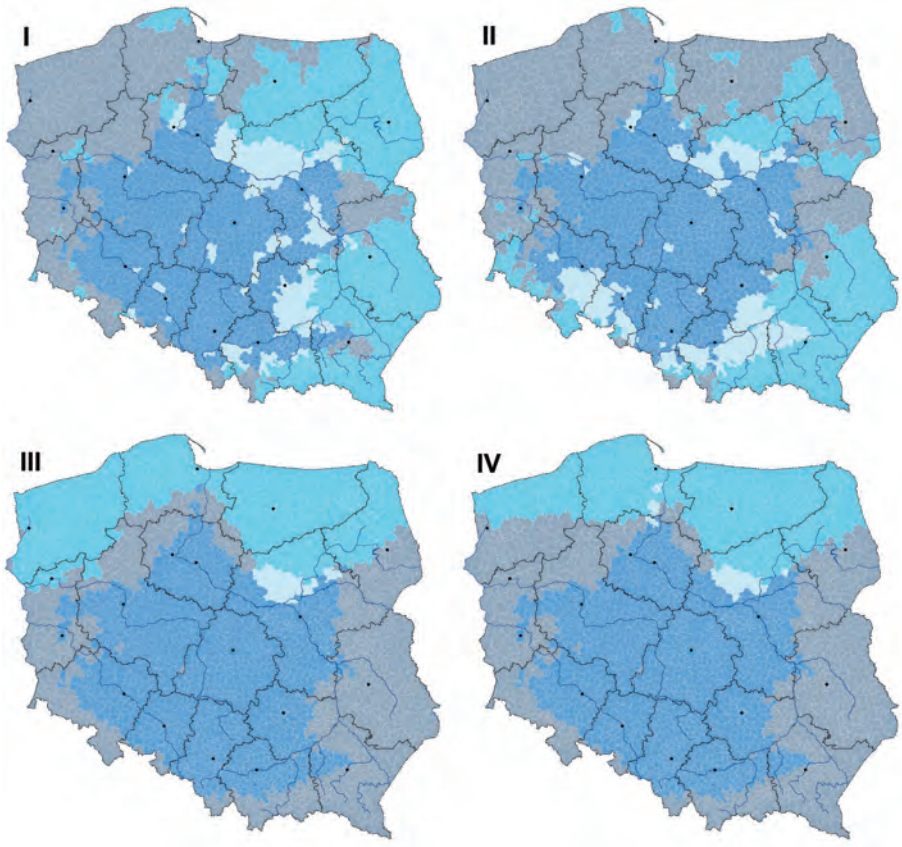


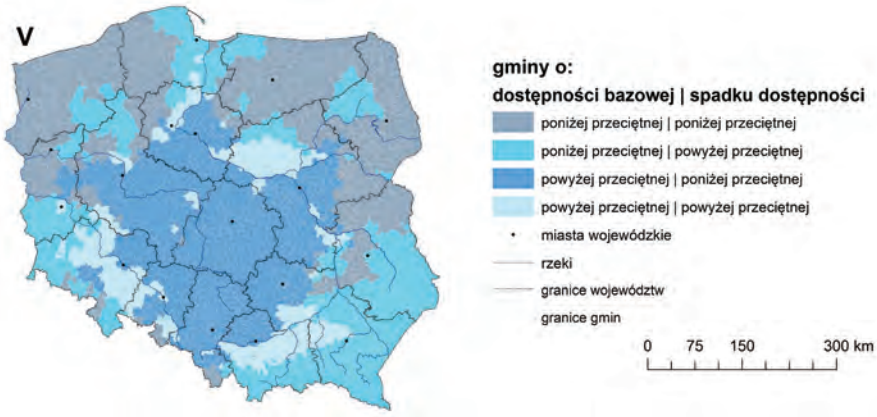


I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 8.2. Typologia gmin w Polsce ze względu na poziom bazowej dostępności potencjałowej i wielkość jego spadku w podróżach krótkich w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne





I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 8.3. Typologia gmin w Polsce ze względu na poziom bazowej dostępności potencjałowej i wielkość jego spadku w podróżach długich w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

Bez względu na długość rozpatrywanych podróży w przypadku wystąpienia powodzi od strony rzeki szczególnie niekorzystna z perspektywy dostępności transportowej sytuacja może dotyczyć północnej części województwa mazowieckiego oraz znacznego terytorium województw Polski Wschodniej. Z tej perspektywy bardzo ważny jest względny wzrost dostępności drogowej makroregionu Polski Wschodniej, który zgodnie z badaniami Komornickiego i in. (2017) ma nastąpić do 2023 roku. W zakres metropolii sieciowej włączone w tym czasie zostaną Rzeszów i Lublin, a w ograniczonym zakresie również Białystok. Obszary o niskim bazowym poziomie dostępności i jego dużej redukcji w związku z powodzią uzupełnia południowa część Małopolski oraz ujawniające się głównie wobec całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych północna Wielkopolska oraz Nizina Śląska, Przedgórze Sudeckie czy Pojezierze Lubuskie. Niski bazowy poziom dostępności nie ulega natomiast szczególnemu uszczupleniu ze względu na ewentualną powódź w przypadku województw zachodniopomorskiego i warmińsko-mazurskiego. Negatywne dla dostępności transportowej konsekwencje wystąpienia powodzi w większości przypadków nie pogłębiają istotnie barier wynikających z polityki transportowej, o których pisze Śleszyński i in. (2019, s. 21). „Oderwany komunikacyjnie od centrum gospodarczo-decyzyjnego kraju" (Śleszyński i in. 2019, s. 21) Szczecin nie zostaje objęty istotnym spadkiem dostępności w związku z zagrożeniami od strony rzeki. Pozostaje on jednak, wraz z miastami województw pomorskiego i warmińsko-mazurskiego, w zasięgu ponadprzeciętnego obniżenia dostępności na skutek powodzi od strony morza.

Należy jednak pamiętać, że odnotowane dla tych scenariuszy powodziowych redukcje przyjmowały bardzo niewielkie wartości procentowe.

Istotnego obniżenia dostępności mogą potencjalnie doświadczyć częściowo także bieguny jej najwyższej bazowej wartości. Szczególnie dotyczy to gmin położonych na północ i północny zachód od Warszawy, okolic Bydgoszczy (w przypadku podróży długich) oraz obszarów nawiązujących przebiegiem do autostrady A4 na odcinkach Wrocław–Opole oraz Kraków–Rzeszów. Znamienne jest występowanie wysokich bezwzględnych spadków dostępności na obszarach związanych z ośrodkami o dużym potencjale (np. demograficznym) za sprawą infrastruktury pozwalającej na wysoką prędkość przejazdu, kiedy ma miejsce redukcja tego potencjału lub infrastruktura ta cechuje się dużą podatnością na destrukcyjne oddziaływanie powodzi na odcinkach położonych w niedużej odległości od tego ośrodka. Dlatego też zaburzenia tego rodzaju powodują efekt redukcji potencjału na całym terenie obsługiwanym przez daną drogę. Obszar negatywnego oddziaływania jest jednak znacznie mniejszy, kiedy dojdzie do zalania na tej samej drodze, ale na odcinku bliższym ośrodków mniejszych – o mniejszym potencjale demograficznym.

W ustaleniu skali konsekwencji wystąpienia powodzi dla osobowego transportu drogowego pomocne jest zestawienie uzyskanych rezultatów z wynikami analiz zmian dostępności transportowej monitorowanych w Polsce głównie w związku z realizacją inwestycji infrastrukturalnych. Wyniki szczegółowych analiz podróży krótkich (zawartych w rozdziale szóstym) wskazują, że w zależności od obszaru wystąpienia powodzi maksymalne spadki poziomu dostępności w skali krajowej wynoszą od nieco ponad 5%, kiedy ma ona miejsce na obszarze dorzecza Odry, do około 8%, gdy do sytuacji kryzysowej dochodzi na obszarze dorzecza Wisły. W przypadku podróży długich maksymalne spadki wzrastają odpowiednio do niecałych 7% i nieco ponad 10%. Dla porównania badania Komornickiego i in. (2017) wskazały, że w okresie 2013-2023 na skutek realizacji drogowych inwestycji infrastrukturalnych Wskaźnik Drogowej Dostępności Transportowej wzrośnie w skali kraju o ponad 19% (przy bazowym 2013 r.). Natomiast badania dotyczące wpływu wybranych korytarzy drogowych na środowisko i rozwój społeczno-ekonomiczny obszarów przyległych (Komornicki i in. 2015) wykazały, że inwestycje infrastrukturalne w latach 2004–2013 (przy bazowym 2004 r.) przyniosły wzrost poziomu krajowej dostępności potencjałowej bliski 20% w przypadku podróży krótkich i sięgający niecałych 17,5% dla podróży długich. Choć uzyskane w wyniku symulacji wystąpienia powodzi wartości bezwzględne zmian dostępności są wyraźnie mniejsze, to biorąc pod uwagę zakres inwestycji infrastrukturalnych, które uwzględniały przytoczone badania, wyniki te uznać można za alarmujące. Przy najbardziej dotkliwych dla dostępności scenariuszach powodzi może bowiem okresowo dojść do redukcji dostępności o wartości wyraźnie wyższej niż przyrost towarzyszący realizacji np. odcinka autostrady A4 Wrocław-Opole czy A1 Pruszcz Gdański – Grudziądz

(Komornicki i in. 2015). Należy jednak pamiętać, że tak poważne perturbacje są potencjalnie możliwe zaledwie tylko w przypadku kilku rozpatrywanych wariantów wystąpienia omawianej klęski żywiołowej.

Ocenę konsekwencji powodzi dla osobowego transportu drogowego uzupełnić należy o miarę pozwalającą na odzwierciedlenie skali jej bezpośredniego oddziaływania, charakterystycznej dla poszczególnych scenariuszy. W tym celu wprowadzono wskaźnik ekspozycji systemu transportu drogowego uwzgledniający cechy ilościowe i jakościowe komponentu transportowego oraz komponent ludnościowy. Przyjmuje on formę iloczynu długości dróg (wyrażonej w kilometrach), maksymalnej dopuszczalnej prędkości poruszania się po ich poszczególnych segmentach (wyrażonej w km/h, zgodnie z przepisami ruchu drogowego) oraz liczby ludności zamieszkującej tereny zagrożone powodzią w określonym scenariuszu. Na rycinie 8.4 wartości wskaźnika ekspozycji zestawione zostały z wartościami wskaźnika ogólnokrajowego wpływu na dostępność (ONAE) w ujęciu względnym. W wersji bezwzględnej przyjmuje on formę ważonej populacją (P) różnicy w poziomie dostępności w skali krajowej pomiędzy analizowanym scenariuszem powodzi (AS) a sytuacją „normalną", bazową (AB) (Stępniak i Rosik 2013):

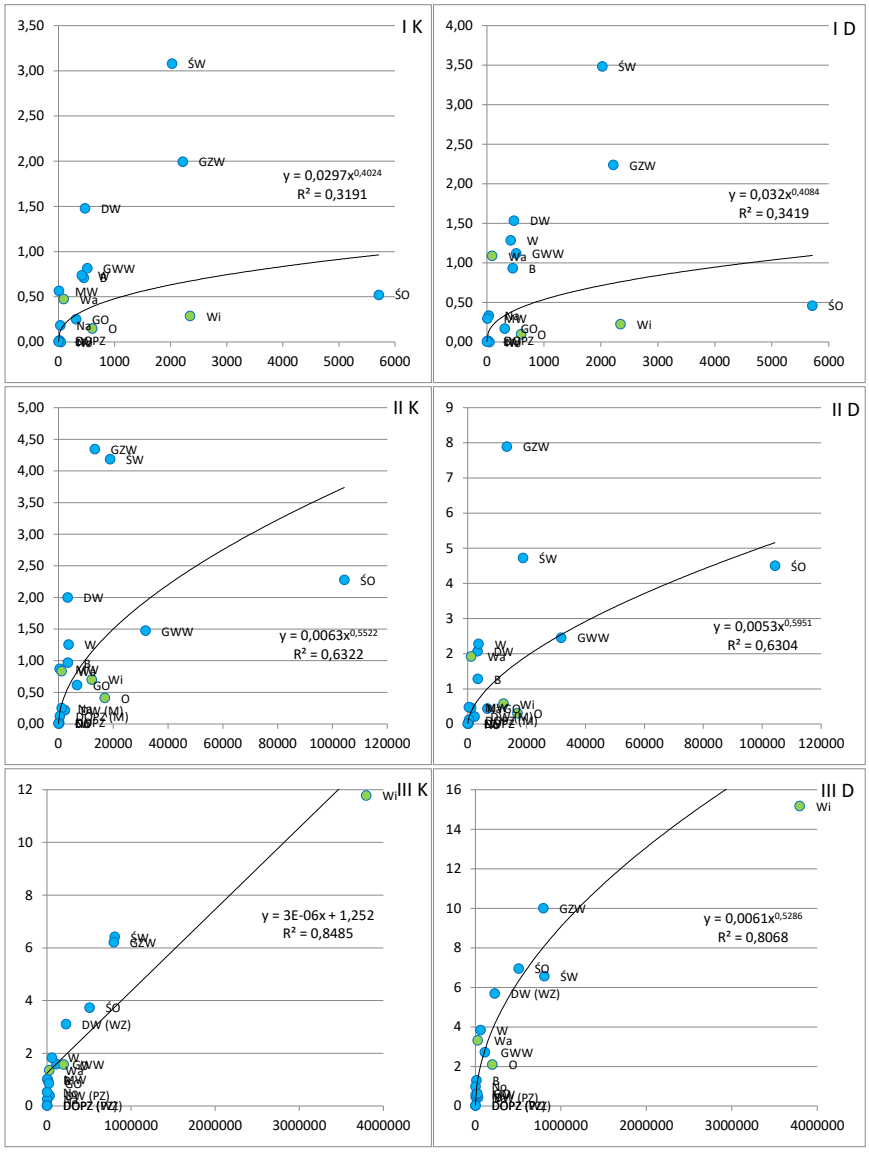
$$\text{ONAE} = \frac{\sum A_{iS} * P_i}{\sum P_i} - \frac{\sum A_{iB} * P_i}{\sum P_i}$$

W ujęciu względnym wskazuje natomiast na udział procentowy owej różnicy w wartości bazowej (ryc. 8.4).

Przy uwzględnieniu podróży krótkich znaczna większość scenariuszy wystąpienia powodzi przynosi względną wartość ONAE na poziomie nieprzekraczającym 1%. Niezależnie od przyjętego prawdopodobieństwa szczególnie problematyczne dla dostępności jest wystąpienie powodzi w regionach wodnych Środkowej Wisły oraz Górnej-Zachodniej Wisły. Z kolei w przypadku symulacji 10-letniej i 100-letniej powodzi w regionie wodnym Środkowej Odry występuje najwyższy wskaźnik ekspozycji systemu transportu drogowego, który nie przekłada się na proporcjonalnie dotkliwe zmiany w dostępności, bowiem ONAE nie przekracza 2,5%. Dla porównania względna zmiana ONAE w przypadku wprowadzenia do polskiej sieci drogowej odcinka autostrady A2 Łódź–Warszawa wyniosła zgodnie z badaniami Stępniaka i Rosika (2013) 1,49% dla krajowych podróży krótkich, zaś dla krajowych podróży długich uzyskali wartość 1,19%. Wprowadzenie odcinka od granicy polsko-niemieckiej do Nowego Tomyśla dało natomiast znacznie mniejsze wyniki – odpowiednio 0,06 i 0,05%[2].

---

[2] Przyjęto następujące parametry oporu przestrzeni: dla podróży krótkich (średni czas podróży na poziomie 30 minut) $\beta = 0{,}023105$, dla podróży długich (średni czas podróży na poziomie 120 minut) $\beta = 0{,}005775$.



oś pozioma – wskaźnik ekspozycji systemu transportu drogowego, oś pionowa – wskaźnik ogólnokrajowego wpływu na dostępność (ONAE) w ujęciu względnym [%]

Ryc. 8.4. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach[3] do towarzyszącego im ogólnokrajowego wpływu na dostępność w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

[3] I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie budowli

Zdecydowany, kilkuprocentowy przyrost wskaźnika ONAE towarzyszy symulacjom całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych. Zarówno pod względem wielkości wskaźnika ekspozycji, jak i wpływu na dostępność dominuje scenariusz uwzględniający zmiany w systemie transportu drogowego związane z powodzią na Wiśle. Uwzględnienie podróży długich przynosi wyniki wskazujące na szczególnie problematyczne w skutkach wystąpienie powodzi w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły.

Uzupełnieniem analizy konsekwencji powodzi dla osobowego transportu drogowego w zakresie dostępności jest badanie stopnia jej zróżnicowania towarzyszącego poszczególnym uwzględnianym w badaniu scenariuszom. Polaryzacja dostępności, choć ma charakter przejściowy (Komornicki i in. 2018), jest związana z występowaniem obszarów o ograniczonym dostępie do szeregu usług publicznych, których deficyt może przekładać się z czasem na obniżenie poziomu życia wykluczonej transportowo ludności. Wystąpienie barier związanych z klęskami żywiołowymi może okresowo pogłębiać opisywaną przez Komornickiego (2019) niesprawiedliwość komunikacyjną. Czasowy wzrost zróżnicowania przestrzennego dostępności związany z wystąpieniem omawianej klęski żywiołowej będzie zapewne mniej niepokojący, kiedy zakończone zostaną duże inwestycje drogowe (jak i te dotyczące innych środków transportu). Przyniesie to bowiem obniżenie bazowego poziomu polaryzacji dostępności.

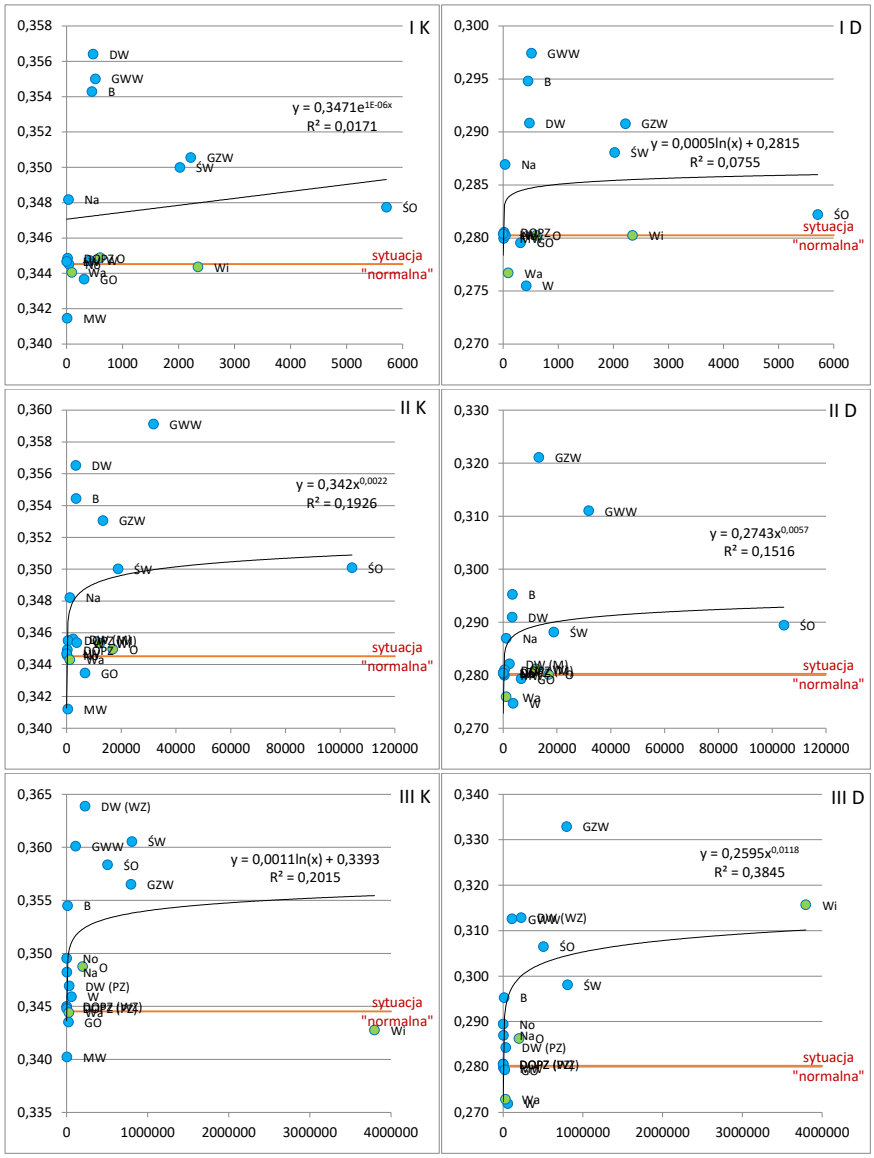
Wpływ na spójność został zmierzony przy wykorzystaniu wskaźnika dyspersji PAD (*Potential Accessibility Dispersion*), który stanowi iloraz odchylenia standardowego wskaźnika dostępności (SD_A) i średniej, ważonej liczbą ludności (P), wartości wskaźnika na poziomie gminnym (A_i) (Ortega i in. 2012, Stępniak i Rosik 2013, Rosik i in. 2015):

$$\mathrm{PAD} = \frac{SD_{A_i}}{\frac{\sum A_i * P_i}{\sum P_i}}$$

Im niższe są wartości PAD, tym mniej spolaryzowany jest obszar badań pod względem dystrybucji dostępności. Z punktu widzenia analizy konsekwencji powodzi dla osobowego transportu drogowego negatywnym zjawiskiem jest więc wzrost wartości wskaźnika PAD na skutek wystąpienia zagrożenia w określonym scenariuszu (ryc. 8.5).

---

ochronnej pasa technicznego (PZ); regiony wodne: DW – Dolnej Wisły, Na – Narwi, ŚW – Środkowej Wisły, B – Bugu, GZW – Górnej-Zachodniej Wisły, GWW – Górnej-Wschodniej Wisły, MW – Małej Wisły, DOPZ – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, No – Noteci, W – Warty, ŚO – Środkowej Odry, GO – Górnej Odry, ŁW – Łyny i Węgorapy; główne rzeki (znaczniki w kolorze zielonym): Wi – Wisła, O – Odra, Wa – Warta.



oś pozioma – wskaźnik ekspozycji systemu transportu drogowego, oś pionowa – zróżnicowanie dostępności (wskaźnik dyspersji PAD)

Ryc. 8.5. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach[4] do towarzyszącego im poziomu zróżnicowania przestrzennego dostępności w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r.
Źródło: opracowanie własne

[4] I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie budowli

Wpływ powodzi na zróżnicowanie dostępności przeanalizowano również w ujęciu dynamicznym, wprowadzając wskaźnik jego procentowej zmiany względem wartości chrakterystycznej dla sytuacji „normalnej". Na rycinie 8.6 został on zestawiony ze wskaźnikiem ogólnokrajowego wpływu na dostępność (ONAE) w ujęciu względnym, tak aby możliwe było prześledzenie relacji pomiędzy siłą oddziaływania na dostępność i zróżnicowaniem poziomu konsekwencji jej wystąpienia. Wyraźnie widać, że nie występuje pomiędzy tymi dwoma elementami jasna, proporcjonalna zależność. Przyrostowi oddziaływania na dostępność w skali krajowej towarzyszy przeważnie wzrost jej polaryzacji, jednak występują także takie scenariusze powodzi, jak np. powódź 10-letnia w regionie wodnym Małej Wisły, które przynoszą wręcz odwrotny skutek. Niemniej jednak niezależnie od rozpatrywanych długości podróży czy prawdopodobieństwa sytuacji kryzysowej wyraźnie widać, że wystąpienie powodzi na obszarze dorzecza Wisły (przede wszystkim w regionach wodnych Dolnej Wisły, Górnej-Zachodniej Wisły i Górnej-Wschodniej Wisły) niesie za sobą zazwyczaj zarówno najdalej idące spadki dostępności w skali ogólnopolskiej, jak i znacząco potęguje jej polaryzację.

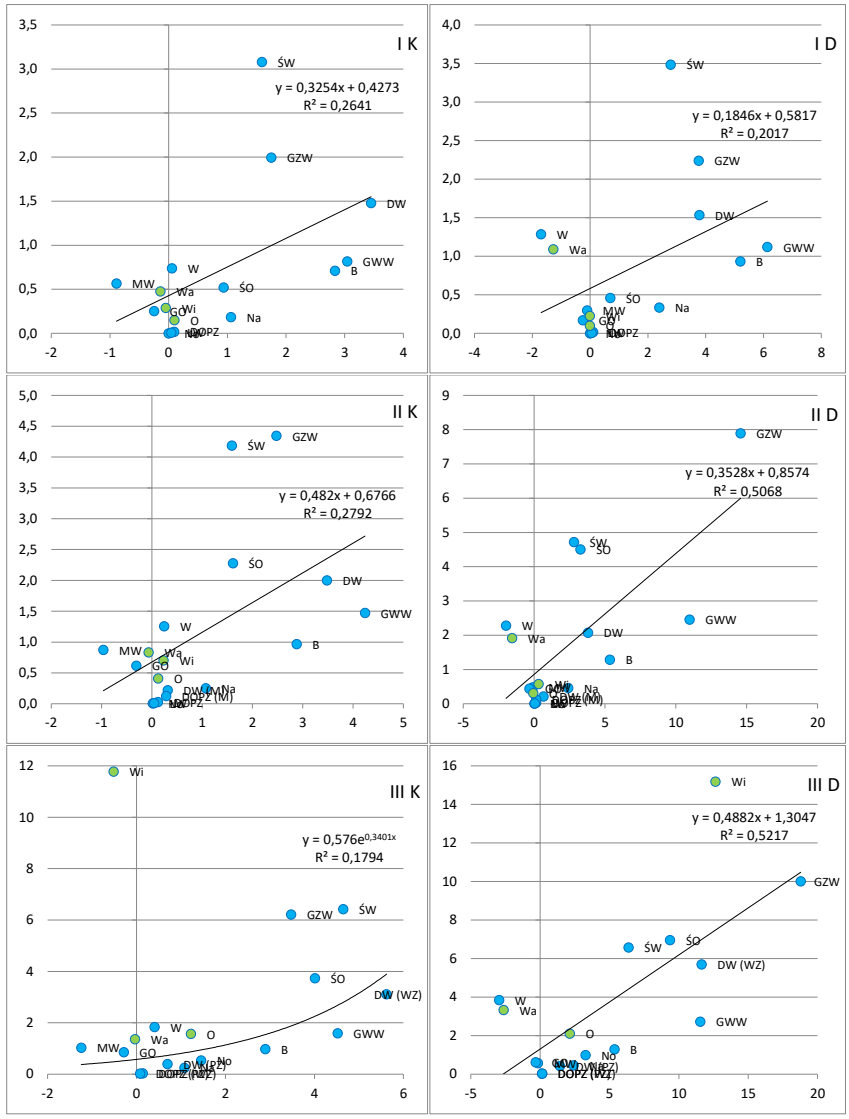
Skalę wzrostu zróżnicowania pozwala uchwycić porównanie z rezultatami charakteryzującymi inne istotne dla funkcjonowania systemu transportu drogowego okoliczności – drogowymi inwestycjami infrastrukturalnymi. Przywoływana już budowa odcinków autostrady A2 Łódź-Warszawa i granica polsko-niemiecka – Nowy Tomyśl zgodnie z badaniem Stępniaka i Rosika (2013) przyniosła zmianę zróżnicowania dostępności o odpowiednio 0,70 i –0,13% dla podróży krótkich oraz 0,97 i –0,14% dla podróży długich. Jak pokazują wyniki badań Rosika i in. (2015) oraz Stępniaka i Rosika (2016), dekada realizacji odcinków autostrad i dróg ekspresowych po wstąpieniu Polski do UE przyniosła wzrost PAD o 0,44%[5]. Podobną, nieprzekraczającą 1% skalę zmian PAD w przypadku podróży krótkich przynieść może wystąpienie powodzi 10-letniej w regionie wodnym Środkowej Odry. Powódź o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły może natomiast skutkować wzrostem zróżnicowania poziomu dostępności bliskim 2%. Nieco wyższy wskaźnik (2,13%[6]) otrzymali Komornicki i in. (2018), badając wpływ drogowych

---

ochronnej pasa technicznego (PZ); regiony wodne: DW – Dolnej Wisły, Na – Narwi, ŚW – Środkowej Wisły, B – Bugu, GZW – Górnej-Zachodniej Wisły, GWW – Górnej-Wschodniej Wisły, MW – Małej Wisły, DOPZ – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, No – Noteci, W – Warty, ŚO – Środkowej Odry, GO – Górnej Odry, ŁW – Łyny i Węgorapy; główne rzeki (znaczniki w kolorze zielonym): Wi – Wisła, O – Odra, Wa – Warta.

[5] Dla podróży krajowych przyjęto parametr β wynoszący 0,013862, w przypadku którego atrakcyjność celu podróży spada o połowę przy podróży trwającej 50 minut.

[6] Obliczenia własne na podstawie danych zawartych w Komornicki i in. (2018).



oś pozioma – względna zmiana zróżnicowania dostępności (wskaźnik dyspersji PAD) w stosunku do sytuacji „normalnej" [%], oś pionowa – wskaźnik ogólnokrajowego wpływu na dostępność (ONAE) w ujęciu względnym [%]

Ryc. 8.6. Relacja ogólnokrajowego wpływu na dostępność powodzi w poszczególnych wariantach[7] do towarzyszących im zmian zróżnicowania przestrzennego dostępności w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

[7] I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie budowli

inwestycji infrastrukturalnych w latach 2004–2023[8]. Zgodnie z wynikami ich badań najwyższy wskaźnik (3,46%[9]) wystąpił w latach 2004-2006. Zmiany zróżnicowania dostępności o tej skali w przypadku podróży krótkich przynieść może wystąpienie powodzi 100-letniej w regionie wodnym Dolnej Wisły czy też Górnej-Zachodniej Wisły w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych. Zaobserwowana zmienność wskaźników dyspersji świadczy o tym, że funkcjonowanie transportu drogowego będącego pod wpływem oddziaływania powodzi skutkuje przeważnie wzrostem polaryzacji dostępności. Biorąc pod uwagę rozmieszczenie obszarów, na terenie których powódź może wywołać największe dysproporcje w poziomie dostępności transportowej, potwierdza się już wcześniej sygnalizowana konieczność zapewnienia wysokiej odporności infrastruktury włączającej w sieć transportowo-osadniczą ośrodki o największym potencjale demograficznym, nawet jeśli ich bazowa dostępność odbiega od poziomu cechującego duże ośrodki miejskie w kształtującej się metropolii sieciowej. Będzie to miało szczególne znaczenie, kiedy zrealizowane zostaną już wszystkie kluczowe inwestycje infrastrukturalne. Wtedy bowiem wprowadzona do analizy zmian dostępności transportowej związanych z powodzią redukcja potencjałów demograficznych obszarów nią objętych zacznie w coraz większym stopniu decydować o finalnym całkowitym jej spadku.

8.2. Konsekwencje w zakresie obciążenia sieci drogowej

Poza wpływem na dostępność zmiany w funkcjonowaniu systemu transportowego w wyniku ingerencji w krajową sieć drogową charakteryzowane są również przy wykorzystaniu danych o natężeniu ruchu pojazdów (np. Komornicki i in. 2015, 2017, Rosik i Kowalczyk 2015). Zazwyczaj analizy tego rodzaju opierają się na wtórnych danych, pochodzących z regularnych badań obciążeń sieci drogowej, jak chociażby Generalne Pomiary Ruchu (GPR). Zestawienie wyników uzyskanych w poszczególnych okresach badawczych daje możliwość pozyskania

---

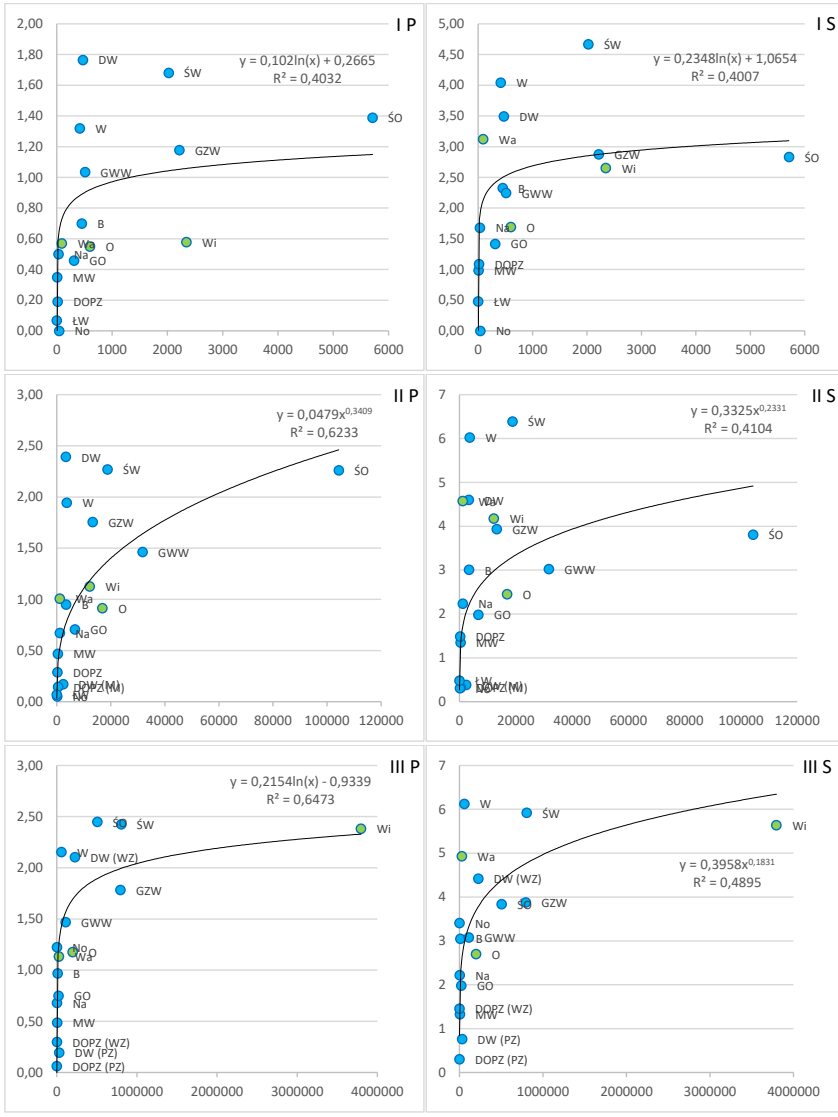
ochronnej pasa technicznego (PZ); regiony wodne: DW – Dolnej Wisły, Na – Narwi, ŚW – Środkowej Wisły, B – Bugu, GZW – Górnej-Zachodniej Wisły, GWW – Górnej-Wschodniej Wisły, MW – Małej Wisły, DOPZ – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, No – Noteci, W – Warty, ŚO – Środkowej Odry, GO – Górnej Odry, ŁW – Łyny i Węgorapy; główne rzeki (znaczniki w kolorze zielonym): Wi – Wisła, O – Odra, Wa – Warta.

[8] Przyjęto parametr β wynoszący 0,023105, w przypadku którego atrakcyjność celu podróży spada o połowę przy podróży trwającej 30 minut.

[9] Obliczenia własne na podstawie danych zawartych w Komornicki i in. (2018).

danych o wielkości zmian natężeń ruchu oraz ich rozmieszczeniu na sieci, ograniczonej zazwyczaj do jej kluczowych elementów (w GPR są to pozamiejskie drogi krajowe i wojewódzkie). Podejście takie umożliwia więc prowadzenie obserwacji zmian w skali krajowej, jednak bez sposobności prześledzenia sytuacji w obrębie lokalnych sieci drogowych. Problematyczne może być również występowanie wielu czynników (m.in.: infrastrukturalnych, demograficznych, ekonomicznych, administracyjnych) determinujących rozkład ruchu w obrębie sieci drogowej przez okres między kolejnymi badaniami, kiedy przedmiotem analizy jest ocena siły oddziaływania tylko wybranych z nich. Innym podejściem jest bazowanie na modelu ruchu, którego rozwiązanie w postaci symulacji przy zadanej konfiguracji układu komunikacyjnego uwzględnia ograniczenia ruchowe oraz warunki brzegowe i początkowe charakteryzujące uwzględniany w badaniach czynnik. Tego typu podejście najczęściej jednak odnosi się do skali znacznie mniejszych niż krajowa. Zmiany obciążenia sieci drogowej obserwowane są zazwyczaj w skali miejskiej sieci drogowej lub jej fragmentu (np. Karoń, Żochowska i Sobota 2014, Bochniak i Krzaczek 2015, Budyn i Sowa 2016, Drabicki, Szarata i Kucharski 2018, Sarna 2018).

Symulacje przeprowadzane w celu określenia konsekwencji powodzi dla osobowego transportu drogowego w zakresie obciążenia sieci drogowej przeprowadzono tak, aby możliwa była obserwacja w skali całej krajowej sieci drogowej przy jednoczesnym uwzględnieniu czynnika, którego wpływ na system transportowy nie jest możliwy do uchwycenia w żadnych regularnie prowadzonych pomiarach. Zastosowanie symulacyjnych modeli ruchu stworzyło też sposobność względnego „wyizolowania" charakterystycznych reakcji systemu transportu drogowego na wystąpienie klęski żywiołowej. Jej ingerencja przyczyniać się może zarówno do pogorszenia warunków drogowych, jak i ruchowych, co skutkuje wzrostem czasu przejazdu, a w konsekwencji może uwidocznić się w postaci wystąpienia ruchu przełożonego (Lee, Klein i Camus 1999). Bezwzględne zmiany liczby pojazdów w wybranych segmentach sieci zaobserwowane w wyniku przeprowadzenia symulacji poszczególnych scenariuszy powodziowych są wynikiem przesunięcia przestrzennego podróży (ryc. 8.7). Uwzględnienie przesunięcia czasowego czy modalnego powinno stanowić przedmiot dalszych, pogłębionych analiz szczególnie dla tych obszarów, w obrębie których doszło do największych przesunięć przestrzennych. Biorąc jednak pod uwagę obligatoryjny charakter uwzględnianych w badaniu podróży, możliwości ich odłożenia w czasie są mocno ograniczone.



oś pozioma – wskaźnik ekspozycji systemu transportu drogowego, oś pionowa – udział długości odcinków sieci drogowej, na których wystąpił bezwzględny wzrost liczby pojazdów, w całkowitej długości sieci drogowej kraju [%]

Ryc. 8.7. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach[10] do towarzyszących im wzrostów obciążenia sieci drogowej w związku z dojazdami do pracy (P) i podróżami służbowymi (S) w Polsce w 2019 r.
Źródło: opracowanie własne

[10] I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie

Zestawienie wskaźnika ekspozycji systemu transportu drogowego z udziałami długości odcinków sieci drogowej, na których wystąpił bezwzględny wzrost liczby pojazdów, w stosunku do całkowitej długości sieci drogowej kraju dla poszczególnych scenariuszy powodziowych dowodzi, że szczególnie daleko idące konsekwencje dla równowagi systemu niesie za sobą powódź w regionach wodnych Dolnej Wisły, Środkowej Wisły i Warty. Niezależnie od motywacji podróży w ich przypadku występuje nadzwyczaj alarmująca dysproporcja pomiędzy skalą bezpośredniego oddziaływania powodzi a wielkością następstw w zakresie przyrostu natężenia ruchu. Na uzyskany obraz rozkładu ruchu na sieć zmodyfikowaną w związku z wystąpieniem powodzi ma również wpływ ubytek podróży związany ze zjawiskiem ruchu tłumionego (Szarata 2010). Występują bowiem odcinki sieci, gdzie odnotowywane spadki natężenia ruchu nie wynikały z ich wyłączenia z eksploatacji, lecz z pozostawania poza nowymi, optymalnymi trasami przejazdu. Zastosowana w prezentowanym badaniu redukcja potencjałów ruchotwórczych miała za zadanie odzwierciedlić ograniczenie lub rezygnację z odbywania podróży do pracy czy służbowych, jaka może towarzyszyć osobom pozostającym w zagrożeniu. W tym kontekście należy podkreślić, że wskazane powyżej zjawiska, tak jak powód ich wystąpienia, mają zazwyczaj charakter okresowy, a zmiany w sieci drogowej czy skłonności do odbywania podróży mogą oddziaływać na ruch jedynie w sposób bezpośredni. Drabicki, Szarata i Kucharski (2018) przywołują za doniesieniami portalu Transport Publiczny przykład mostu Łazienkowskiego, który w 2015 r. został raptownie zamknięty. Blisko roczne wyłączenie z eksploatacji tego obiektu inżynierskiego spowodowało, że jedynie połowa podróżujących decydowała się przedostać na drugą stronę Wisły z wykorzystaniem sąsiednich obiektów. Pozostali dokonali przesunięcia modalnego, byli w stanie osiągnąć swój cel bez przekraczania rzeki lub po prostu z podróży zrezygnowali.

W przypadku powodzi zazwyczaj krótkotrwały charakter modyfikacji w połączeniu z ekstremalnymi okolicznościami, na skutek których wystąpiły, jest dużą przeszkodą dla określenia możliwości zmian aktywności ruchowych (Litman 2017) charakterystycznych dla poszczególnych scenariuszy powodziowych. Przyjęcie wielkości popytu na niezmienionym poziomie mogłoby doprowadzić do zbyt poważnych dysproporcji w rozkładzie ruchu względem sytuacji „normalnej", zaś precyzyjne jego określenie wiąże się z przeprowadzeniem badań ankietowych, które w tej skali analizy byłyby ogromnie czaso– i kosztochłonne (co

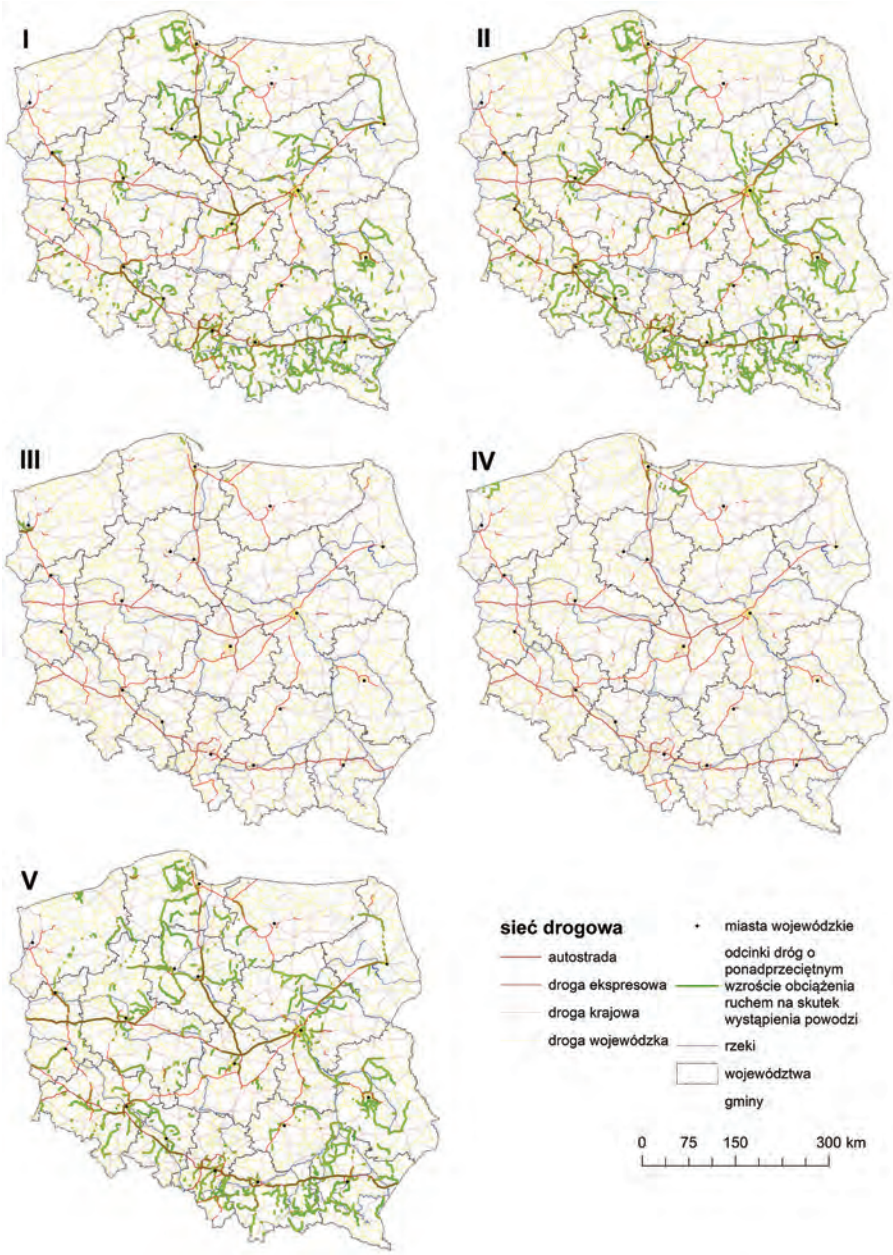
---

budowli ochronnej pasa technicznego (PZ); regiony wodne: DW – Dolnej Wisły, Na – Narwi, ŚW – Środkowej Wisły, B – Bugu, GZW – Górnej-Zachodniej Wisły, GWW – Górnej-Wschodniej Wisły, MW – Małej Wisły, DOPZ – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, No – Noteci, W – Warty, ŚO – Środkowej Odry, GO – Górnej Odry, ŁW – Łyny i Węgorapy; główne rzeki (znaczniki w kolorze zielonym): Wi – Wisła, O – Odra, Wa – Warta.

potwierdził przeprowadzony pilotaż). W związku z tym wprowadzono wariant pośredni, nieco uelastyczniający popyt i jednocześnie powiązany z cechami użytkowników (miejscem zamieszkania na terenach zagrożonych). Wobec braku danych mówiących o rzeczywistej liczbie ludności, której dotyczyć może spadek ruchliwości, rozwiązaniem dla określenia liczby podróży tłumionych wynikających z wystąpienia poszczególnych scenariuszy powodzi może być przeprowadzenie modelowania symulacyjnego uwzględniającego czynnik dostępności transportowej (Szarata 2013). Zgodnie z tym podejściem spadki dostępności cechujące poszczególne rejony komunikacyjne, które pojawiają się w następstwie wydłużenia czasów przejazdów w poszczególnych scenariuszach powodzi, można przełożyć na redukcję liczby podróży związanych z każdym z rejonów.

Wyłączenie z eksploatacji części sieci drogowej w związku z jej zalaniem lub „odcięciem" przez wody powodziowe w połączeniu z występowaniem lokalnych ograniczeń przepustowości, ale również redukcją potencjałów ruchotwórczych, przyniosło zmiany natężenia ruchu w związku z dojazdami do pracy sięgające od kilkuset pojazdów w przypadku symulacji powodzi na obszarze dorzecza Pregoły, przez ponad 4 tys. dla obszaru dorzecza Odry, aż po prawie 7,2 tys. dla obszaru dorzecza Wisły. Uwzględnienie podróży służbowych nieco tylko wpływa na spotęgowanie zmian liczby pojazdów na obszarze dorzecza Odry, dając maksymalny wynik bliski 4,7 tysiąca. Zmiana motywacji zupełnie inaczej oddziałuje na wielkość zaburzeń na obszarze dorzecza Wisły w najdotkliwszym dla sieci drogowej wariancie całkowitego zniszczenia wałów przeciwpowodziowych, przynosząc modyfikacje sięgające 14,5 tys. pojazdów. Dla porównania, zgodnie z wynikami GPR 2015, średni dobowy ruch roczny na zamiejskich drogach wojewódzkich wynosił nieco ponad 3,5 tys. poj./dobę (z czego 83,8% stanowiły samochody osobowe), a dla zamiejskich dróg krajowych ponad 11 tys. poj./dobę (z czego 71,7% stanowiły samochody osobowe). W województwach leżących na obszarze dorzecza Odry Średni Dobowy Ruch Roczny (SDRR) w roku 2015 dla zamiejskich dróg wojewódzkich wynosił od ponad 1,7 tys. (lubuskie) do ponad 4,6 tys. (śląskie) samochodów osobowych na dobę (Opoczyński 2016ab). Zaobserwowane zmiany natężeń ruchu w związku z powodzią na tym obszarze nie przekraczają tych wartości. Zmianom zarejestrowanym w związku z powodziami na obszarze dorzecza Wisły bliższe są wartości SDRR 2015 dla zamiejskich dróg krajowych. W województwach leżących na obszarze dorzecza Wisły wynosił on od ponad 4,3 tys. (warmińsko-mazurskie) do ponad 14,3 tys. samochodów osobowych na dobę (śląskie). Zaobserwowane zmiany natężeń ruchu w związku z powodzią na tym obszarze również nie przekraczają tych wartości.

Przeprowadzenie symulacji ujmujących zmiany w infrastrukturze transportowej i potencjałach ruchotwórczych finalnie umożliwiło wskazanie rozmieszczenia odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem drogowym związanym z podróżami do pracy i służbowymi (ryc. 8.8 i 8.9).



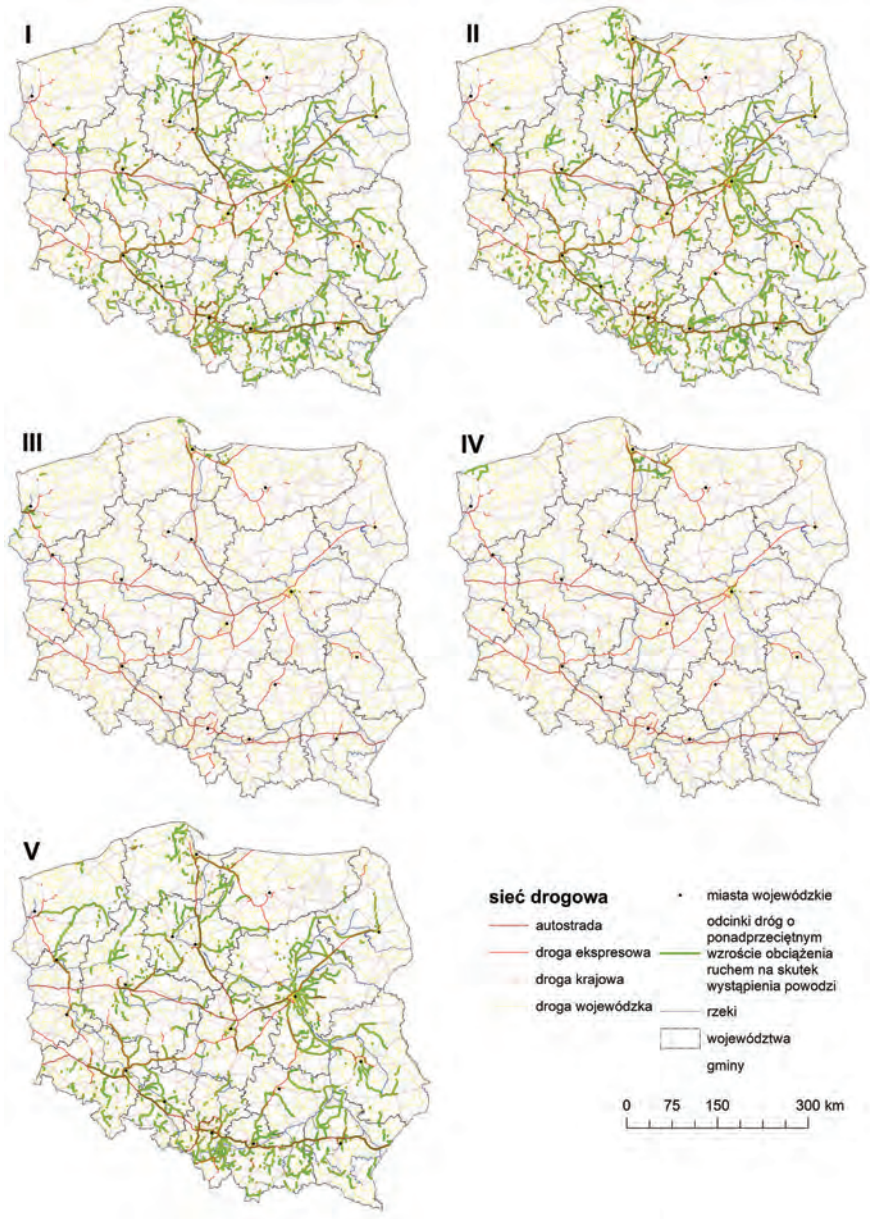
I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 8.8. Rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z dojazdami do pracy na skutek wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

W przypadku gdy podróż jest motywowana dotarciem do miejsc pracy, szczególnie wysokie przyrosty liczby pojazdów występują zazwyczaj na fragmentach sieci sąsiadujących z dużymi aglomeracjami – chłonnymi rynkami pracy (przede wszystkim Warszawa, Trójmiasto, Lublin, Poznań, Wrocław i Opole) – oraz na południe od korytarza autostrady A4. Potwierdza to słuszność koncepcji ujmowania w planach realizacji niezbędnych drogowych zadań inwestycyjnych w pierwszej kolejności tych odcinków, które łączą się z dużymi ośrodkami miejskimi. Z perspektywy uodpornienia systemu transportu drogowego na występowanie dodatkowych potoków ruchu związanych z wystąpieniem tak nietypowego zdarzenia jak powódź bardziej uzasadnione wydaje się przeznaczenie środków na inwestycje w odcinki dróg nawet o niższych kategoriach, lecz wprowadzających ruch do aglomeracji, niż ich rozproszenie na liczne, często punktowe działania, dotyczące np. problematycznych w czasie powodzi przepustów czy małych mostów. Badania wskazują, że sieć drogowa charakteryzuje się najczęściej na tyle wysokim poziomem opcjonalności ścieżek przejazdu, że zalanie określonego jej odcinka wiąże się zazwyczaj z koniecznością znalezienia objazdu, a nie rezygnacją z podróży. Ten przeważnie niewielki, lokalny, przełożony przestrzennie ruch prędzej czy później obciąży już w sposób skumulowany odcinki sieci prowadzące bezpośrednio do obszarów koncentracji miejsc pracy.

Tak szczególne towarzyszące zdarzeniom nietypowym rozkłady ruchu nie mogą determinować procesu planowania infrastruktury drogowej; powinny być jednak brane pod uwagę jako ekstremalne warunki brzegowe. W przypadku podróży krótkich (dojazdów do pracy) dokończenie dużych inwestycji drogowych może w krótkim okresie nie przynieść dużych zmian w obrazie rozmieszczenia odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem drogowym w związku z powodzią. W krótkiej perspektywie czasowej zmiany obejmą przede wszystkim tę grupę podróży, których realizacja dzięki nowym inwestycjom może się wiązać z mniejszymi kosztami (przede wszystkim czasem) przejazdu. Większych zmian można się spodziewać w dłuższej perspektywie czasowej, kiedy wzrost dostępności towarzyszący „domknięciu" inwestycji będzie skutkować przestrzennym wzrostem oddziaływania rynków pracy dużych ośrodków miejskich (rekompensując często ich własne problemy demograficzne). Inwestycje, o których mowa, charakteryzują się wysoką odpornością na oddziaływanie powodzi, co finalnie powinno się przyczynić do redukcji obserwowanych w przyszłości zmian natężeń ruchu towarzyszących takim zdarzeniom nietypowym jak powódź. Niepewność tych przewidywań leży też w samej powodzi i zmienności zasięgu terenów nią objętych, wynikającej z ingerencji człowieka w środowisko przyrodnicze, w tym przy okazji realizacji drogowych inwestycji infrastrukturalnych.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% (od strony rzeki), III – prawdopodobieństwo 1% (od strony morza), IV – całkowite zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego, V – całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych

Ryc. 8.9. Rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z podróżami służbowymi na skutek wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

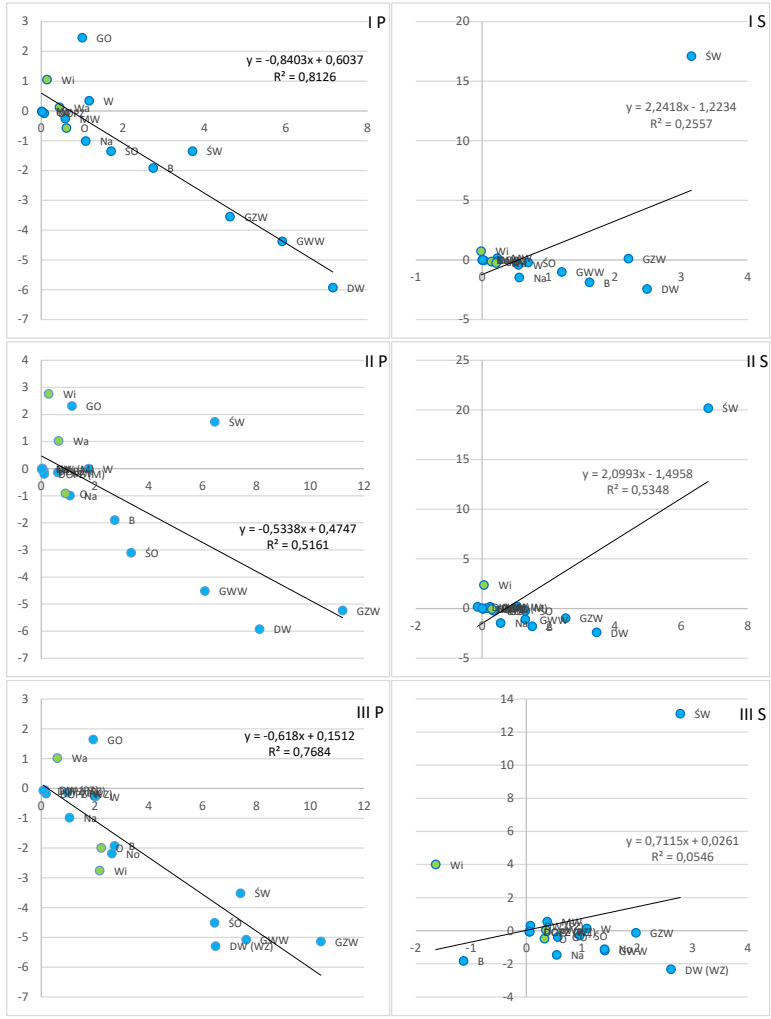
Duża część prawidłowości cechujących rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z podróżami do pracy na skutek wystąpienia powodzi ma również miejsce w sytuacji, kiedy przemieszczenia wynikają z konieczności realizacji zadań (podróży) służbowych. Niemniej jednak w sposób szczególny i nieporównywalny skalą przestrzenną do innych aglomeracji ogniskują się one wokół Warszawy i generalnie sieci drogowej na obszarze województwa mazowieckiego.

Modyfikacje ścieżek przejazdu oraz redukcje liczby podróży do pracy i podróży służbowych proporcjonalnie do udziału ludności rejonu komunikacyjnego zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią w całkowitej liczbie mieszkańców przyniosły zmiany pracy eksploatacyjnej o zróżnicowanych wielościach. W przypadku podróży motywowanych dotarciem do miejsca pracy maksymalny odnotowany przyrost w stosunku do sytuacji „normalnej" wyniósł ponad 11% i towarzyszył powodzi 100-letniej w regionie wodnym Górnej-Zachodniej Wisły. Nieco mniejszy wzrost (10,39%), wynikający z większych spadków ruchliwości, pociągnęło za sobą całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych w tym regionie wodnym. Region wodny Dolnej Wisły to natomiast obszar, gdzie powódź 10-letnia przynosi największe względne przyrosty liczby pojazdokilometrów (7,14%). Dla porównania, zgodnie z badaniami GUS (2015), nieco mniej, bo 6,1% ogółu pracy eksploatacyjnej wykonanej przez samochody osobowe wykorzystywane do przemieszczeń do pracy w Polsce, dotyczy dojazdów w strefie do 5 kilometrów. Z kolei wcześniej wskazane wartości przyrostów można przyrównać do 10,7% udziału pracy eksploatacyjnej wykonanej przez samochody osobowe wykorzystywane do przemieszczeń do pracy w Polsce, lecz w strefie od 51 do 100 kilometrów.

W przypadku podróży służbowych przyrosty pracy eksploatacyjnej są nie tylko mniejsze, ale dochodzi wręcz do niewielkich jej spadków (maksymalnie –1,64%). Niemniej jednak, niezależnie od rozpatrywanego prawdopodobieństwa powodzi, w tej motywacji podróży największe wzrosty towarzyszą zagrożeniu w regionie wodnym Środkowej Wisły. Powódź 10-letnia może spowodować zwiększenie pracy eksploatacyjnej o blisko 3,2% względem sytuacji „normalnej". Jest to wartość taka sama jak udział w całkowitej pracy eksploatacyjnej wykonanej przez samochody osobowe wykorzystywane do podróży służbowych w Polsce w strefie od 6 do 10 kilometrów. Natomiast wzrost związany z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych (2,78%) przyrównać można do udziału w całkowitej pracy eksploatacyjnej wykonanej przez samochody osobowe w tej motywacji, ale w grupie podróży nie krótszych niż 500 km. Największy wzrost pracy eksploatacyjnej (7%) ma miejsce w przypadku powodzi o prawdopodobieństwie wystąpienia raz na sto lat.

Względne zmiany pracy eksploatacyjnej związanej z obiema motywacjami podróży i poszczególnymi scenariuszami powodzi zestawiono ze wskaźnikiem zróżnicowania obciążenia sieci drogowej. Przyjmuje on postać stosunku odchylenia standardowego wartości natężeń ruchu odnotowywanych na poszczególnych segmentach sieci drogowej do ilorazu całkowitej pracy eksploatacyjnej i liczby

pojazdów. Obliczenie wartości wskaźnika na bazie zmiennych chrakteryzujących poszczególne scenariusze powodziowe oraz sytuację „normalną" daje możliwość określenia wielkości i zwrotu wektora jego zmiany (ryc. 8.10).



oś pozioma – zmiana wielkości pracy eksploatacyjnej w stosunku do sytuacji „normalnej" [%], oś pionowa – względna zmiana wskaźnika zróżnicowania obciążenia sieci drogowej [%]

Ryc. 8.10. Relacja zmian wielkości pracy eksploatacyjnej towarzyszących powodzi w różnych wariantach[11] do odpowiadających im zmian zróżnicowania obciążenia sieci drogowej w związku z dojazdami do pracy (P) i podróżami służbowymi (S) w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

[11] I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie

W przypadku podróży do pracy uwagę zwraca sytuacja towarzysząca powodzi w regionie wodnym Górnej Odry. Pomimo stosunkowo niewielkich przyrostów liczby pojazdokilometów, które mają miejsce w związku z wystąpieniem powodzi w tym regionie, niezależnie od uwzględnianego prawdopodobieństwa natężenie ruchu pojazdów na krajowej sieci drogowej przyjmuje bardziej zróżnicowane wartości. Jest to wynik współwystępowania niewielkiej redukcji liczby podróży oraz wysokich bazowych wartości natężeń ruchu w obrębie sieci objętej oddziaływaniem powodzi w tym regionie wodnym. W większości innych symulacji spadek maksymalnych wartości natężeń ruchu na sieci (mimo lokalnych przyrostów liczby pojazdów) przyczyniał się do spadku całkowitej pracy eksploatacyjnej, co przy zachowaniu na obszarach pozostających poza bezpośrednim oddziaływaniem powodzi wartości minimalnych na poziomie bazowym przekładało się na spadki zróżnicowania obciążenia sieci drogowej w skali krajowej. Jeśli zaś chodzi o podróże służbowe, uwagę należy przenieść na region wodny Środkowej Wisły. Powodziom na tym obszarze obok najwyższych w tej motywacji przyrostów pracy eksploatacyjnej towarzyszy bowiem również nieporównywalne zwiększenie zróżnicowania odnotowywanych natężeń ruchu pojazdów.

W analizie konsekwencji powodzi dla osobowego transportu drogowego w zakresie obciążenia sieci uwzględniono także ich wymiar przestrzenny. Rozległość oddziaływania zmian zachodzących w infrastrukturze drogowej na jej otoczenie stanowi wyzwanie, chociażby ze względu na trudność określenia granic obszaru analizy. Stosowane są podejścia oparte na uwzględnianiu granic administracyjnych (Ortega i in. 2012), wprowadzaniu różnorodnych izolinii (Holl 2004) czy też np. łączące oba te podejścia (Stępniak i Rosik 2013). W prezentowanym badaniu zastosowano dwa rozwiązania. Wykorzystano podejście związane z podziałem administracyjnym, obliczając stosunek liczby gmin, na terenie których wystąpiły zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom w obu rozpatrywanych motywacjach, do liczby gmin objętych powodzią w danym scenariuszu powodziowym (tab. 8.1 i 8.2).

---

budowli ochronnej pasa technicznego (PZ); regiony wodne: DW – Dolnej Wisły, Na – Narwi, ŚW – Środkowej Wisły, B – Bugu, GZW – Górnej-Zachodniej Wisły, GWW – Górnej-Wschodniej Wisły, MW – Małej Wisły, DOPZ – Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego, No – Noteci, W – Warty, ŚO – Środkowej Odry, GO – Górnej Odry, ŁW – Łyny i Węgorapy; główne rzeki (znaczniki w kolorze zielonym): Wi – Wisła, O – Odra, Wa – Warta.

Tab. 8.1. Stosunek liczby gmin, na terenie których wystąpiły zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy, do liczby gmin objętych powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

	Scenariusz powodzi				
Region wodny	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Bugu	3,18	3,14	–	–	3,24
Dolnej Wisły	2,06	2,11	2,71	2,66	2,09
Górnej-Wschodniej Wisły	2,54	2,52	–	–	2,48
Górnej-Zachodniej Wisły	2,18	2,69	–	–	2,86
Małej Wisły	3,89	4,06	–	–	4,11
Narwi	2,78	2,91	–	–	2,91
Środkowej Wisły	2,65	2,63	–	–	2,86
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	1,40	2,00	1,76	1,77	1,96
Górnej Odry	2,11	2,42	–	–	2,47
Noteci	0,43	0,96	–	–	4,04
Środkowej Odry	1,39	1,66	–	–	1,83
Warty	2,21	2,43	–	–	2,59
Łyny i Węgorapy	1,50	2,10	–	–	–
rzeka	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Wisła	2,21	3,32	–	–	4,43
Odra	2,64	3,43	–	–	4,14
Warta	2,86	4,00	–	–	4,48

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 8.2. Stosunek liczby gmin, na terenie których wystąpiły zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym, do liczby gmin objętych powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

	Scenariusz powodzi				
Region wodny	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
1	2	3	4	5	6
Bugu	8,15	7,92	–	–	8,28
Dolnej Wisły	4,90	4,89	8,06	10,25	5,12
Górnej-Wschodniej Wisły	6,58	6,33	–	–	6,60
Górnej-Zachodniej Wisły	6,28	6,35	–	–	7,32
Małej Wisły	11,77	12,51	–	–	12,86
Narwi	9,18	9,00	–	–	9,13
Środkowej Wisły	7,01	6,98	–	–	8,12
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	5,15	5,62	6,20	6,85	5,63
Górnej Odry	3,68	7,51	–	–	8,55
Noteci	0,25	1,71	–	–	12,45
Środkowej Odry	2,84	3,39	–	–	4,35

1	2	3	4	5	6
Warty	5,72	6,18	–	–	6,50
Łyny i Węgorapy	11,50	13,10	–	–	–
rzeka	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Wisła	8,12	9,19	–	–	10,62
Odra	7,64	9,55	–	–	12,42
Warta	10,94	11,36	–	–	12,99

Źródło: opracowanie własne.

Dla obu motywacji najwyższy średni iloraz występuje w przypadku scenariuszy powodzi uwzględniających całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych, przy czym w przypadku dojazdów do pracy jest to grupa wyników o największym zróżnicowaniu. Z kolei w grupie symulacji podróży służbowych rezultaty dla tego scenariusza są najbardziej jednorodne. Wprowadzono również rozwiązanie bazujące na określeniu relacji zasięgu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej towarzyszących obu motywacjom podróży do zasięgu przestrzennego wyłączeń odcinków sieci drogowej w związku z powodzią w danym scenariuszu (tab. 8.3 i 8.4). Owe zasięgi zdefiniowano jako pola powierzchni najmniejszych wypukłych wielokątów opisanych na odcinkach sieci drogowej, których dotyczyły odpowiednio zmiana natężenia ruchu i wyłączenie z eksploatacji w związku z danym scenariuszem powodzi.

Tab. 8.3. Stosunek zasięgu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej towarzyszących dojazdom do pracy do zasięgu przestrzennego wyłączeń odcinków sieci drogowej w związku z powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

	Scenariusz powodzi				
Region wodny	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
1	2	3	4	5	6
Bugu	1,95	1,95	–	–	1,95
Dolnej Wisły	1,81	1,96	3,43	2,76	2,14
Górnej-Wschodniej Wisły	2,74	2,82	–	–	2,77
Górnej-Zachodniej Wisły	1,81	2,58	–	–	2,82
Małej Wisły	8,15	8,04	–	–	12,51
Narwi	2,99	2,95	–	–	2,95
Środkowej Wisły	2,61	2,63	–	–	2,61
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	1,26	2,67	3,35	8,18	2,65
Górnej Odry	2,67	2,87	–	–	2,85
Noteci	3,45	2,57	–	–	3,00
Środkowej Odry	1,33	1,44	–	–	1,64
Warty	2,29	2,52	–	–	2,54
Łyny i Węgorapy	3,07	3,07	–	–	–

Tab. 8.3 (cd.)

1	2	3	4	5	6
rzeka	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Wisła	1,63	2,09	–	–	2,33
Odra	2,58	3,04	–	–	2,70
Warta	2,64	3,05	–	–	3,25

Źródło: opracowanie własne.

Tab. 8.4. Stosunek zasięgu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej towarzyszących podróżom służbowym do zasięgu przestrzennego wyłączeń odcinków sieci drogowej w związku z powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r.

	Scenariusz powodzi				
Region wodny	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Bugu	6,45	7,10	–	–	7,23
Dolnej Wisły	5,38	5,43	11,36	11,89	5,90
Górnej-Wschodniej Wisły	8,23	8,09	–	–	9,74
Górnej-Zachodniej Wisły	7,94	7,38	–	–	10,14
Małej Wisły	68,98	67,47	–	–	70,85
Narwi	11,50	11,35	–	–	12,96
Środkowej Wisły	5,44	5,51	–	–	6,29
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	5,08	4,97	9,95	34,13	5,01
Górnej Odry	13,77	16,79	–	–	17,44
Noteci	3,36	4,25	–	–	11,58
Środkowej Odry	3,66	4,34	–	–	5,21
Warty	4,80	5,29	–	–	5,79
Łyny i Węgorapy	15,00	15,02	–	–	–
rzeka	**10%**	**1%**	**1%M**	**PZ**	**WZ**
Wisła	3,09	3,17	–	–	3,49
Odra	7,79	8,24	–	–	7,87
Warta	5,71	5,75	–	–	7,37

Źródło: opracowanie własne.

W tym ujęciu potencjalne całkowite zniszczenie wałów przeciwpowodziowych również daje średnio najwyższe wartości ilorazu. Przy czym w przeciwieństwie do wcześniejszego podejścia tutaj to wariant podróży służbowych cechuje się największym zróżnicowaniem rezultatów. Zaobserwowana regionalna zmienność reakcji systemu transportowego na wystąpienie powodzi, rozpatrywana jedynie z perspektywy zasięgu przestrzennego, potwierdza złożoność jego natury i jednocześnie trudność wyzwania dotyczącego kreowania infrastrukturalnej polityki inwestycyjnej (Koziarski 2018), która poza bieżącym zapotrzebowaniem na usługi transportowe, zgodnie z tym, co stwierdza Komornicki (2019), powinna jeszcze w coraz większym stopniu uwzględniać cele polityki regionalnej.

9

WNIOSKI I REKOMENDACJE

9.1. Wnioski i wytyczne do dalszych badań

Za główny cel badań prowadzonych w prezentowanej monografii przyjęto określenie wrażliwości osobowego transportu drogowego w Polsce poprzez identyfikację charakteru i skali zmian dostępności transportowej oraz zmian obciążenia sieci osobowym ruchem drogowym w sytuacji powodzi w wybranych scenariuszach. Został on osiągnięty dzięki zrealizowaniu zestawu zadań szczegółowych o naturze poznawczej, metodycznej i aplikacyjnej.

Przeprowadzony w zakresie celów poznawczych przegląd uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju sieci drogowej na terenach zagrożonych powodzią umożliwił między innymi opracowanie metodyki wyznaczania odcinków sieci drogowej wyłączonej z użytkowania podczas powodzi. Dzięki temu wypełniono w dalszej kolejności pierwszoplanowe zadania polegające na określeniu charakteru i skali zmian dostępności czasowej – izochronowej/kumulatywnej i potencjałowej – towarzyszących wystąpieniu powodzi oraz zidentyfikowanie cech zmian wielkości potoków ruchu (związanych z motywacjami obligatoryjnymi) wynikających z wyłączeń zalanych odcinków sieci i redukcji wielkości potencjałów ruchotwórczych. Dało to finalnie możliwość rozliczenia jednego z celów aplikacyjnych w postaci sformułowania rekomendacji odnośnie do polityki transportowej i przestrzennej dla obszarów narażonych na zalanie.

W zakresie zadań metodycznych powodzeniem zakończyła się budowa modeli sieci drogowej i prędkości osobowego ruchu drogowego w Polsce o gęstości sieci umożliwiającej analizy wewnątrzgminne. Wypełniając założenie zachowania dużej szczegółowości modelu, osiągnięto wyniki odzwierciedlające lokalne zmiany w systemie transportowym wywołane powodzią. Zrealizowano również plan przygotowania oprogramowania komputerowego (równolegle cel aplikacyjny), umożliwiającego realizację procesu rozmieszczenia popytu na sieć systemu transportowego. Zastosowane w tym zakresie rozwiązania pozwoliły na skuteczne zbadanie i zwizualizowanie wpływu zmian rozkładu ruchu na sieć towarzyszących wystąpieniu zjawisk nietypowych.

Dokonany przegląd zdarzeń nietypowych, jakie mogą wpływać na funkcjonowanie transportu drogowego w Polsce, wskazuje, że znaczna ich część dotyczy relacji woda – infrastruktura drogowa i woda-pojazd. Całkowita liczba możliwych konsekwencji wzajemnego oddziaływania na siebie tych par czynników

jest trudna do określenia, niemniej jednak część z nich została już gruntownie przebadana na gruncie różnych dyscyplin naukowych. Formą oddziaływania wody na infrastrukturę drogową i jej użytkowników, która wystawia te elementy systemu transportowego na szczególną próbę, jest wystąpienie powodzi. Form jej oddziaływania jest bardzo wiele. Te zaś przy odpowiedniej kombinacji wielkości zagrożenia, ekspozycji i wrażliwości mogą stanowić istotną barierę transportową, co potwierdzają liczne, tragiczne w skutkach, doświadczenia historyczne.

Świadczą one również, wraz z wynikami wielu prac badawczych, że pojawienie się symptomów zagrożenia czy też jego rzeczywiste wystąpienie może się przyczynić do realizacji przemieszczeń ludności związanych z ucieczką przed niebezpieczeństwem. Przeanalizowane wyniki badań oraz zapisy wytycznych dotyczących realizacji procesu ewakuacji w sferze organizacji transportu świadczą o tym, że problematyka jego optymalizacji stanowi wyzwanie zarówno jako przedmiot rozważań teoretycznych, jak i praktycznych. Oba te podejścia uwzględniają zazwyczaj wzajemną zależność pomiędzy przemieszczeniami realizowanymi w związku z ewakuacją a mobilnością wynikającą z realizacji innych, „zwykłych" motywacji podróży. Wyniki ich obopólnego oddziaływania mogą przyjąć tak różne skutki w obrębie obu grup przemieszczeń, jak zróżnicowane mogą być okoliczności ich realizacji. Niejednolitość wdrażanych narzędzi optymalizacji procesu ewakuacji, zróżnicowanie poziomów równowagi systemu transportowego, a przede wszystkim różnorakość cech użytkowników systemu i ich reakcji na zagrożenie oraz zmienność cech samego zagrożenia – wszystko to wskazuje, że uwzględnienie ewakuacji jako czynnika wpływającego na funkcjonowanie transportu drogowego jest uzasadnione. Jednocześnie, aby dawało realne wyniki, konieczne jest wzięcie pod uwagę lokalnych uwarunkowań i również takiej skali przestrzennej analiz.

Analiza wybranych cech powodzi w Polsce dowodzi, że generują one najwyższe szkody w Polsce południowej (w dorzeczu górnej i środkowej Odry oraz górnej Wisły), co w znacznej mierze znalazło swoje potwierdzenie także w przypadku konsekwencji w zakresie ingerencji w sieć drogową i perturbacji dla całego krajowego systemu transportu drogowego. Badanie wybranych cech środowiska przyrodniczego oraz elementów zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią poszerzone o analizę rozmieszczenia ludności pozwoliło na określenie zasadniczych uwarunkowań funkcjonowania i rozwoju sieci drogowej na tych terenach. Uwzględnienie realiów prawno-administracyjnych towarzyszących gospodarowaniu na terenach zagrożonych wskazuje, że kluczowym elementem charakteryzującym zarządzanie terenami zagrożonymi omawianą klęską żywiołową powinna być stabilność głównych zasad mu przyświecających – odpornych na koniunkturę gospodarczą. Zmienność zasad gospodarowania na tych terenach, choć zapewne dokonywana w dobrej wierze, uniemożliwia wykrystalizowanie się zakładanych pozytywnych rezultatów ze względu na zbyt wąski horyzont

czasowy, który wyznacza kolejna zmiana. Każdej z nich musi towarzyszyć okres przejściowy, który wprowadza element niepewności i jest potencjalną areną dla wystąpienia nadużyć i nieprawidłowości. Dla sieci drogowych problematyczna jest również niespójność ustaleń i to zarówno w rozumieniu przestrzennym, jak i rzeczowym. Nawet najrzetelniej prowadzona polityka przestrzenna chroniąca tereny zalewowe przed niepożądanym zagospodarowaniem przez jedną z nadrzecznych gmin nie przyniesie pozytywnych efektów zewnętrznych, jeśli jej sąsiedzi traktować ją będą jako barierę na drodze rozwoju lokalnego. Poprzez budowanie świadomości społecznej i odpowiedzialności środowiskowej należy dążyć do sytuacji, w której bez działań zagrażających samorządności poszczególnych społeczności lokalnych w kwestii gospodarowania ich przestrzenią będzie można liczyć na ich czynny udział w prawidłowym kształtowaniu roli tych terenów, któremu towarzyszyć będzie spadek ich ruchotwórczości.

Przegląd materiałów źródłowych odnoszących się do zasady budowy i eksploatacji infrastruktury drogowej na terenach zagrożonych powodzią daje szeroki zakres przepisów i dobrych praktyk, których wdrażanie ma gwarantować możliwie wysoki poziom odporności infrastruktury na niszczące oddziaływanie wód powodziowych. Ich duża liczba i bogaty zakres tematyczny poruszanych wątków potwierdza, że istotność tego czynnika dla funkcjonowania transportu drogowego została już gruntownie usankcjonowana na polu projektowania i realizacji inwestycji. Bogaty zasób dokumentacji warunkującej zarządzanie systemem transportu drogowego wobec wystąpienia sytuacji kryzysowej dowodzi jednak, że nawet najrzetelniejsze wypełnianie wytycznych może nie zagwarantować odporności wystawionych na oddziaływanie powodzi segmentów sieci drogowej. Dostrzegając w tego rodzaju zdarzeniach nietypowych niebezpieczeństwo dla stabilności funkcjonowania struktur państwowych, opracowane zostały dokumenty o charakterze strategicznym i operacyjnym, w myśl których uzyskane w monografii rezultaty stanowią niezbędny materiał diagnostyczny dla poprawy bezpieczeństwa systemu transportu drogowego. Wypracowana metodyka oceny wpływu powodzi na funkcjonowanie transportu drogowego pozwala bowiem na ujęcie zagrożeń nawet o bardzo małym prawdopodobieństwie i katastrofalnych skutkach. Dzięki identyfikacji tych elementów sieci, których zniszczenie lub zakłócenie ich funkcjonowania przyniosło najpoważniejsze konsekwencje dla dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej, organy zaangażowane w zarządzanie infrastrukturą krytyczną (operatorzy) są w stanie przygotować i wdrażać plany ochrony infrastruktury krytycznej o treści lepiej dopasowanej do zamodelowanych zmian. Daje to również możliwość efektywniejszego rozporządzania własnymi zasobami rezerwowymi. Dzięki przeprowadzonym symulacjom możliwe jest sprawniejsze rozlokowywanie w przestrzeni i czasie sił i środków zapewniających bezpieczeństwo oraz podtrzymujących funkcjonowanie infrastruktury drogowej do czasu jej pełnego odtworzenia. Uzyskane w prezentowanym

badaniu rezultaty mogą tym samym ułatwić spełnienie standardów zarządzania infrastrukturą krytyczną. Dane o rozmieszczeniu obszarów szczególnie narażonych na ograniczenie dostępności pozwalają na podjęcie z odpowiednim wyprzedzeniem działań gwarantujących utrzymanie wysokiej dostępności infrastruktury transportu drogowego w dowolnym czasie. Wskazanie odcinków sieci, które są potencjalnie zagrożone zalaniem lub „odcięciem", a także tych, które przejmą ich rolę w rozprowadzaniu ruchu drogowego, umożliwia spełnienie postulatu niezawodności w kontekście wzajemnej zastępowalności poszczególnych jej elementów. Sprecyzowanie krytycznych elementów sieci (jednocześnie zagrożonych i istotnych) znacznie ułatwia również utrzymanie niezawodności w sferze realizacji napraw doraźnych i planowych oraz ich harmonogramowania.

Żadne z powyższych możliwości wspomagania zarządzania infrastrukturą czy wręcz systemem transportu drogowego nie byłoby możliwe bez zidentyfikowania miejsc, w których stosunek zagrożenia do ekspozycji i wrażliwości infrastruktury jest na tyle niekorzystny, że musi ona zostać wyłączona z eksploatacji. Opracowanie postępowania umożliwiającego identyfikowanie odcinków sieci drogowej zagrożonych zalaniem w wyniku wystąpienia powodzi o wysokim i średnim prawdopodobieństwie oraz w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowań lub budowli ochronnej pasa technicznego już na etapie koncepcji wydawało się dużym wyzwaniem. Wiązało się bowiem z pracą na bardzo dużych zbiorach danych o zróżnicowanej przestrzennie aktualności. Towarzysząca przejściu z etapu koncepcyjnego do operacyjnego kontrola kompletności i poprawności danych ujawniła potrzebę wprowadzenia dodatkowego procesu szczegółowej weryfikacji sytuacji w przypadku drogowych obiektów inżynierskich i nowych inwestycji. Wiązało się to z pozyskaniem bardzo obszernego materiału źródłowego od instytucji zaangażowanych w realizację drogowych inwestycji infrastrukturalnych. Materiał ten również cechuje się wyraźnym zróżnicowaniem w zależności od terytorium, jakie obejmuje. Tutaj jednak zmienność dotyczy głównie formy i objętości treściowej zapisów. Niemniej jednak, kosztem znacznego wzrostu czaso– i pracochłonności, możliwe stało się określenie rozmieszczenia zagrożonych odcinków sieci drogowej w Polsce. Trudności towarzyszące analizie i interpretacji zapisów w zbiorczej dokumentacji dotyczącej realizacji inwestycji w infrastrukturze drogowej uzasadniają postulat większej unifikacji treści opisującej inwestycję, a sporządzanej przez różne organy o różnym zasięgu terenowym. Wobec niedogodności związanych z dostępem do dokumentacji projektowych i ich analizą takie ujednolicenie i uszczegółowienie zapisów na poziomie wykazu byłoby znacznym ułatwieniem.

Pozostając w tematyce baz danych, wykazów i dokumentacji, należy zasygnalizować braki i nieaktualności występujące w charakterystyce nawet podstawowych parametrów technicznych obiektów inżynierskich (mostów, przepustów) ujmowanych np. w ogólnodostępnych wektorowych bazach danych. Mając na względzie strategiczną rolę tego typu obiektów dla obronności państwa, można

jednak postulować dopracowanie istniejących lub utworzenie nowych baz danych, których zakres opisanych parametrów mógłby być powszechnie dostępny i nie zagrażałby bezpieczeństwu kraju. Poza ogromnym ułatwieniem w dostępie do informacji wiązałoby się to również ze standaryzacją zapisów, które aktualnie zawarte są najczęściej w licznych dokumentach o różnej aktualności i dostępności. Wykorzystanie w szerszym zakresie informacji o cechach konstrukcji budowli inżynierskich dałoby możliwość większego zróżnicowania ich „reakcji" na zagrożenie na etapie budowy modeli sieci drogowych dla poszczególnych scenariuszy powodziowych.

Z punktu widzenia badań dotyczących transportu drogowego niezwykle cenne byłoby także uszczegółowienie informacji o poziomie wody powodziowej w obrębie obecnie funkcjonującego pierwszego przedziału – do 50 centymetrów. Przegląd badań wskazuje, że nawet kilkunastocentymetrowe różnice poziomu wody mogą przynieść bardzo różne negatywne skutki dla funkcjonowania sieci i realizowanych na niej podróży. Wartości progowe są nadal dyskusyjne i nie ma co do nich zgodności w stosowanej w badaniach metodyce, co nie zmienia faktu, że cenna była sama możliwość włączenia się w tego typu rozważania. Mając na uwadze wielkość zasobów (danych, mocy obliczeniowej itd.) niezbędnych do zamodelowania wartości poziomu wody powodziowej, wprowadzenie chociażby jednego dodatkowego przedziału klasowego (np. do 25 cm) byłoby modyfikacją mogącą zaowocować dużym potencjałem dodatkowych pól badawczych.

Dalsze badania mogłyby odnosić się również do prężności systemu transportowego dzięki uwzględnieniu zmienności zjawiska powodzi w czasie. Chodzi tutaj zarówno o przemieszczanie się fali powodziowej, jak i o okres, po którym woda ustąpi i możliwe będzie rozpoczęcie działań zmierzających do przywrócenia sieci drogowej do stanu pierwotnego. Otworzyłoby to drogę dla analiz związanych z czasowym przesunięciem podróży. Niestety dane odnoszące się do dynamiki czasowo-przestrzennej zjawiska dla przyjętej skali badania nie są dostępne, dlatego też ich uwzględnienie nie było możliwe. Cennym uzupełnieniem zaprezentowanego podejścia modelowego byłoby włączenie informacji na temat zmian zachowań komunikacyjnych ludności w czasie tak szczególnym, jak okres pojawiania się symptomów zagrożenia, wystąpienia powodzi oraz etap powrotu do sytuacji wyjściowej. Jest to jednak zadanie wyjątkowo trudne, bowiem możliwość przeprowadzenia analiz w czasie trwania rzeczywistego zagrożenia jest uwarunkowana prawdopodobieństwem wystąpienia klęski, a w dodatku ograniczana dużą dynamiką zjawiska i okolicznościami zniechęcającymi do udziału we wszelkiego rodzaju badaniach społecznych. Jednakże zaspokajałoby to poniekąd potrzebę większego zaangażowania czynnika ludzkiego w tego rodzaju badaniach, dając np. możliwość bardziej precyzyjnego określenia elastyczności popytu drogowego, oporu przestrzeni czy przesunięcia modalnego, które charakteryzowałyby sytuację kryzysową.

Dalsze badania mogłyby zostać ukierunkowane także na wprowadzenie innych motywacji podróży czy wręcz zastosowanie wielomotywacyjnego modelu ruchu. Ruch związany z dojazdami do pracy i podróżami służbowymi stanowi jedynie część (choć znaczącą) potoków ruchu towarzyszących wszelkim motywacjom i w związku z tym niemożliwe jest w oparciu jedynie o tę motywację pełne wnioskowanie o poziomie zatłoczenia sieci czy wynikających z tego spadkach prędkości (z tej przyczyny zastosowano model urzeczywistniający prędkość przejazdu). Dlatego też możliwe jest przeprowadzenie zastosowanego w monografii postępowania badawczego również dla zmiennych charakterystycznych dla kolejnych motywacji i długości podróży, a następnie rozłożenie ruchu uwzględniającego strukturę poszczególnych celów podróży w potokach pojazdów w obrębie sieci drogowej. Niepewne wydaje się podejmowanie kwestii podróży międzynarodowych czy też drogowego transportu towarowego, bowiem jak wykazały badania, infrastruktura drogowa odpowiedzialna w zasadniczej mierze za obsługę tego ruchu pozostaje w większości przypadków poza spektrum bezpośredniego oddziaływania wód powodziowych. Otwarta pozostaje jednak kwestia wpływu pośredniego, w postaci np. wzmożonego ruchu pojazdów objeżdżających zalane tereny w związku z realizacją m.in. dojazdów do pracy.

Samo zdefiniowanie zmian w sieci drogowej, powstających w związku z powodzią, to jedynie podstawa do tego, by określić, jak modyfikacje te mogą przełożyć się na jej użytkowanie. Realizacji tego zadania służyło opracowanie modelu prędkości ruchu drogowego oraz wprowadzenie metod oceny zmian dostępności transportowej i obciążenia sieci drogowej. Zaproponowane podejście do wyznaczania prędkości poruszania się pojazdów po poszczególnych, dalece zróżnicowanych pod względem stopnia swobody ruchu odcinkach sieci o dużej szczegółowości, wydaje się dobrze spełniać swoją rolę. Założenia modelu i jego późniejsza kalibracja pozwoliła na uzyskanie narzędzia badawczego obejmującego zarówno szeroki zakres przestrzenny badania, jak i wysoką rozdzielczość modelu sieci drogowej przy jednocześnie akceptowalnym poziomie rozbieżności uzyskiwanych wyników względem przyjętego wzorca. Nie zmienia to jednak faktu, że mimo starań, aby model najelastyczniej dopasowywał prędkość do okoliczności podróży, podejście to może być traktowane nadal jako zbyt „sztywne", szczególnie wobec tak nietypowych, symulowanych okoliczności. Rozwiązania tego problemu można dopatrywać się w zastosowaniu modeli ruchu i danych o prędkości ruchu będących ich produktem. O ile rozwiązanie tego rodzaju przy zachowaniu tak wysokiego poziomu szczegółowości modelu sieci wydaje się realizowalne w skali lokalnej czy nawet regionalnej, o tyle badania na szerszą skalę wydają się niezwykle trudne do przeprowadzenia.

Powiązanie badań zmian dostępności transportowej z symulacyjnymi modelami ruchu daje również możliwość określenia zmian w ruchliwości towarzyszącej ingerencjom w integralność sieci drogowej. W prezentowanym badaniu,

zarówno w zakresie analiz dostępności, jak i natężeń ruchu, sięgnięto jednak do szczegółowych danych dotyczących liczby ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią. Podejście to wysoce uprawdopodabnia skalę przyjętych redukcji potencjałów, jednak możliwe jest udoskonalenie tego rozwiązania. Poza uwzględnieniem danych o ludności zamieszkującej obszary mogące ulec zalaniu wskazane byłoby również zinwentaryzowanie wszelkich innych generatorów ruchu i zdefiniowanie wielkości redukcji ruchu, jaka mogłaby towarzyszyć ich niefunkcjonowaniu w związku z powodzią. Tak szczegółowe analizy także wydają się możliwe przede wszystkim na poziomie lokalnym. Podobnie zresztą jak próby kalibracji modelu odzwierciedlającego rozkład ruchu w związku z wystąpieniem zdarzenia nietypowego w postaci powodzi. Rozważyć można ponadto zastosowanie innego niż deterministyczny rozkład równowagi użytkownika podejścia do rozkładu ruchu na sieć transportową w czasie symulacji w trakcie powodzi ze względu na dużą dynamikę zjawiska i trudność w pozyskiwaniu wiedzy o najkrótszej trasie wobec zmieniających się szybko okoliczności.

Wszystkie wymienione dotychczas rezultaty realizacji poznawczych i metodycznych szczegółowych celów opracowania umożliwiły finalnie realizację celu głównego – określania wrażliwości osobowego transportu drogowego w Polsce poprzez identyfikację charakteru i skali zmian dostępności transportowej oraz zmian obciążenia sieci osobowym ruchem drogowym. Dla obu zakresów tematycznych przeprowadzono symulacje przy uwzględnieniu pięciu różnych scenariuszy powodzi, jak i przy zróżnicowaniu przestrzennym uwzględniającym obszary poszczególnych regionów wodnych w Polsce i dodatkowo warianty obejmujące wystąpienie powodzi na trzech głównych rzekach kraju. Zrealizowane badania wskazały, że system transportu drogowego charakteryzuje się zróżnicowaną przestrzennie wrażliwością na wystąpienie zdarzeń nietypowych w zakresie obniżenia dostępności transportowej i cech eksploatacji sieci drogowej. Ujawnia się ona zarówno w zakresie komponentu transportowego, jak i zagospodarowania (demograficznego). Uzyskane rezultaty ujawniają ponadto zróżnicowanie siły ingerencji w bazowe poziomy dostępności oraz natężeń ruchu drogowego ze względu na przyjęte długości podróży oraz ich motywacje.

Niezależnie od długości rozpatrywanych podróży w przypadku wystąpienia powodzi od strony rzeki szczególnie niekorzystna z perspektywy dostępności transportowej sytuacja może dotyczyć północnej części województwa mazowieckiego oraz znacznego udziału terytorium województw Polski Wschodniej. Obszary o niskim bazowym poziomie dostępności i jego dużej redukcji w związku z powodzią uzupełnia południowa część Małopolski, północna Wielkopolska oraz Nizina Śląska, Przedgórze Sudeckie czy Pojezierze Lubuskie. Pomorze Zachodnie nie zostaje objęte istotnym spadkiem dostępności w związku z wystąpieniem powodzi od strony rzeki we wszystkich analizowanych scenariuszach. Pozostaje jednak, wraz z miastami województw pomorskiego i warmińsko-mazurskiego, w zasięgu

ponadprzeciętnego obniżenia dostępności na skutek powodzi od strony morza. Należy jednakże pamiętać, iż odnotowane dla tych scenariuszy powodziowych redukcje przyjmowały bardzo niewielkie wartości procentowe. Do grupy obszarów stanowiących bieguny najwyższej bazowej wartości dostępności, które mogą zostać dotknięte istotnym obniżeniem dostępności w związku z powodzią, należą szczególnie: gminy na północ i północny zachód od Warszawy, okolice Bydgoszczy (w przypadku podróży długich) oraz obszary nawiązujące przebiegiem do autostrady A4 na odcinkach Wrocław–Opole i Kraków–Rzeszów. W przypadku gdy podróż jest motywowana dotarciem do miejsc pracy, szczególnie wysokie przyrosty liczby pojazdów występują zazwyczaj na fragmentach sieci sąsiadujących z dużymi aglomeracjami. Badania wskazują, że sieć drogowa charakteryzuje się najczęściej na tyle wysokim poziomem opcjonalności ścieżek przejazdu, że zalanie określonego jej odcinka wiąże się z reguły z koniecznością objazdu, a nie rezygnacji z podróży. Ten przeważnie niewielki, lokalny, przełożony przestrzennie ruch prędzej czy później obciąży już w sposób skumulowany odcinki sieci prowadzące bezpośrednio do obszarów koncentracji miejsc pracy. Duża część prawidłowości cechujących rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z podróżami do pracy na skutek wystąpienia powodzi ma również miejsce w sytuacji, kiedy przemieszczenia wynikają z konieczności realizacji zadań (podróży) służbowych. Niemniej jednak, w sposób szczególny i nieporównywalny skalą przestrzenną do innych aglomeracji, ogniskują się one wokół Warszawy i generalnie sieci drogowej na obszarze województwa mazowieckiego.

Ogólnie rzecz ujmując, powodziom obejmującym większe obszary towarzyszą dotkliwsze spadki dostępności transportowej, a system zmuszony jest obsłużyć większą pracę eksploatacyjną. Niejednorodność sieci drogowej i zróżnicowane względem terenów zagrożonych zalaniem rozmieszczenie potencjału nie pozwalają, aby zależność ta miała charakter wprost proporcjonalny. Związku o takiej naturze trudno doszukać się również pomiędzy zasięgiem bezpośredniego oddziaływania wód powodziowych na infrastrukturę drogową a konsekwencjami dla systemu transportu drogowego rozpatrywanymi w skali ogólnopolskiej. Niemniej jednak można wskazać grupę regionów wodnych, na terenie których powódź najdotkliwiej ingeruje w równowagę systemu transportu drogowego, polaryzując będącą jego produktem dostępność. W przypadku regionów wodnych Środkowej Odry, Górnej-Zachodniej Wisły, Środkowej Wisły i Dolnej Wisły występują bowiem jednocześnie znaczna ekspozycja i infrastruktura o dużej istotności dla całego krajowego systemu transportu drogowego oraz ośrodki o kluczowym znaczeniu dla kształtowania dostępności i rozkładu ruchu w warunkach „normalnych". Należy mieć jednak świadomość, że aktualnie realizowane pierwszoplanowe drogowe inwestycje infrastrukturalne przyczynią się bez wątpienia do zawężenia zaobserwowanych w badaniu potencjalnych negatywnych konsekwencji dla użytkowników sieci.

Obszerność i wielowątkowość uzyskanego materiału badawczego oraz zakres potencjalnych dalszych, pogłębiających go analiz wskazują na duży potencjał poznawczy problematyki wpływu zdarzeń nietypowych w formie powodzi na funkcjonowanie transportu drogowego. Należy mieć jednocześnie poczucie, że ze względu na złożoność podejmowanej problematyki nie do uniknięcia jest wprowadzanie pewnych założeń upraszczających czy też warunków brzegowych, których świadomość powinna towarzyszyć interpretacji otrzymanych rezultatów.

9.2. Rekomendacje w zakresie obniżenia wrażliwości transportu drogowego na powódź

Działania zmierzające do obniżenia wrażliwości transportu drogowego na wystąpienie zdarzenia nietypowego w formie powodzi należy prowadzić zasadniczo w odniesieniu do trzech sfer: infrastruktury drogowej i zarządzania nią, użytkowników sieci drogowej oraz pozostałego zagospodarowania terenów zagrożonych powodzią.

Działania dotyczące pierwszego obszaru tematycznego są już w znacznej części przeprowadzane, bowiem realizowane są z większą lub mniejszą systematycznością zasadnicze inwestycje infrastrukturalne służące zakończeniu krajowych planów w tym zakresie. Niemniej jednak, również z perspektywy wystąpienia perturbacji w następstwie powodzi czy też innych zdarzeń nietypowych, bardzo istotne jest ukończenie toczącego się procesu inwestycyjnego, tak aby zapewnić możliwie wysoki poziom bazowej dostępności transportowej i, co ważniejsze, aby poziom ten był jak najmniej zróżnicowany przestrzennie. Eliminacja obszarów wykluczonych z możliwości swobodnego i wygodnego korzystania z możliwości dostępnych w miejscach, gdzie skupia się potencjał rozwojowy, w okolicznościach niezaburzonej równowagi systemu transportowego, zapobiegnie nałożeniu się na siebie niskiego poziomu dostępności wyjściowej i dużej skali jego redukcji w związku z zaistnieniem zagrożenia.

Poza uniwersalnym postulatem ukończenia kluczowych inwestycji konieczne jest jednak także podejście do polityki inwestycyjnej w sposób dostosowany do potrzeb lokalnych systemów transportu drogowego. Zróżnicowanie ich reakcji na symulowane wystąpienie powodzi ujawnia wymóg przemyślanej alokacji środków inwestycyjnych nie tylko względem bieżących potrzeb infrastrukturalnych, ale przede wszystkim przy uwzględnieniu aktualnych i przyszłych cech mobilności. Dla części lokalnych sieci kluczowy będzie jedynie remont budowli inżynierskiej, inne zaś musiałyby przygotować znaczny procent swoich odcinków dróg na przyjęcie ruchu pojazdów, do którego obsługi w warunkach „normalnych" nie są zdolne. Nie bez znaczenia jest również harmonogramowanie tego rodzaju działań. Konieczne jest w tym zakresie nie tylko

uwzględnienie doraźnych przesłanek pierwszeństwa określonej inwestycji, ale również branie pod uwagę prognozowanych zmian demograficznych, m.in. w kontekście zapewnienia bezpieczeństwa podczas przemieszczeń wynikających z ewakuacji. Wiąże się to pośrednio z drugą ze wskazanych sfer w postaci wzajemnego poszanowania dążącego do kompatybilności pomiędzy polityką transportową (bądź chociażby próbami jej formułowania) i polityką przestrzenną, zwłaszcza na terenach szczególnego zagrożenia powodzią, ale także tam, gdzie może ono wystąpić jedynie potencjalnie. Osobnym wyzwaniem jest również powiązanie wspomnianych wcześniej kluczowych inwestycji z sieciami lokalnymi. Punkty styku obu tych skali powinny stanowić przedmiot szczególnie wnikliwych analiz, również ze względu na ich podatność na wystąpienie różnego rodzaju zdarzeń nietypowych, w tym powodzi.

Rezultaty badań podjętych w monografii uzasadniają potrzebę sporządzania analiz zmian dostępności transportowej szczególnie dla obszarów zagrożonych powodzią – i to w różnych skalach przestrzennych. Konieczna jest również regularna aktualizacja badań w związku z rozwojem sieci transportowej, zmianą liczby, rozmieszczenia i siły oddziaływania potencjałów ruchotwórczych oraz cech samej powodzi (np. granic obszaru, który może być nią objęty). Aktualne i szczegółowe wyniki umożliwią sformułowanie, a następnie odpowiednio wczesne wdrożenie procedur zarządzania transportem na poszczególnych poziomach przestrzennych. Dzięki zawczasu opracowanym zmianom w organizacji ruchu i ustaleniu kanałów informacyjnych, którymi zmiany te można odpowiednio wcześnie przekazać użytkownikom sieci drogowej, możliwe będzie szybsze doprowadzenie systemu transportowego do równowagi na nowym poziomie. Zaangażowania w tym względzie spodziewać się można ze strony m.in. operatorów Inteligentnych Systemów Transportowych zarówno na poziomie aglomeracyjnym, jak i krajowym. Dysponują oni różnego rodzaju narzędziami, za pomocą których komunikować się mogą z podróżującymi, przekazując informacje o utrudnieniach na sieci drogowej i wskazówki dla ich uniknięcia w czasie rzeczywistym. Na poziomie regionalnym i krajowym daje to możliwość kształtowania pożądanych zachowań transportowych w sytuacjach kryzysowych. W skali lokalnej, poza opracowaniem strategii i planów operacyjnych na poziomie zarządców i organizatorów transportu, wskazane jest wykorzystanie uzyskanych rezultatów i metodyki badawczej dla opracowania programów informacyjnych dla mieszkańców terenów zagrożonych powodzią i obszarów w ich bezpośrednim sąsiedztwie. Na poziomie lokalnym, gdzie powódź bezpośrednio i natychmiastowo dotyka lokalnej społeczności, kluczowe są wyuczone zachowania odnoszące się do wyboru środka transportu, drogi oraz czasu rozpoczęcia podróży. Pozwoliłoby to na ograniczenie negatywnych skutków powodzi w zakresie zdrowia i życia ludności oraz podniosło efektywność działań służb ratowniczych w kontekście ochrony przeciwpowodziowej.

Mając na uwadze, że niemożliwym jest uniknięcie powodzi i prędzej czy później obejmie ona swoim oddziaływaniem któryś z obszarów objętych symulacją, konieczne jest konsekwentne podejmowanie działań nastawionych na redukowanie liczby generatorów ruchu na tychże obszarach. W tym zakresie konieczne jest tworzenie konsekwentnego prawodawstwa warunkującego zagospodarowanie terenów zagrożonych, a następnie jego restrykcyjne przestrzeganie.

Cennym uzupełnieniem dla obowiązującej polityki w zakresie zarządzania terenami zagrożonymi powodzią, również ze względu na funkcjonowanie i rozwój infrastruktury drogowej, byłoby uwzględnienie sytuacji, w której ich granice ulegają poszerzeniu i obejmują obszary, których gospodarowanie w żaden sposób nie było dotychczas warunkowane takimi czynnikami. Globalne zmiany środowiska przyrodniczego i lokalne gospodarowanie człowieka może doprowadzić do sytuacji, kiedy granice wyznaczające tereny o 1% prawdopodobieństwie wystąpienia powodzi obejmą obszary chrakteryzujące się obecnie prawdopodobieństwem na poziomie 0.2%. Jako tereny uznawane w świadomości społecznej za całkowicie bezpieczne charakteryzują się one zgoła inną strukturą użytkowania ziemi, której przekształcenia idą w kierunku intensyfikacji zagospodarowania obarczonego wzrastającymi wartościami szkód w sieci drogowej w wyniku potencjalnego zalania. Odpowiednio wcześnie uwzględnienie ewentualnego zagrożenia dałoby szansę na wypracowanie rozwiązań, które uszanowałby potencjał zagospodarowania transportowego tych terenów przy jednoczesnym uwzględnieniu wystąpienia zdarzeń nietypowych, w tym w szczególności powodzi. Pomocne w tym zakresie byłoby zapewne również uwzględnienie danych o zmianach zagospodarowania w ujęciu historycznym, które po zaimplementowaniu do procesu prognozowania przyszłych kierunków przemian mogłyby zasygnalizować potrzebę wprowadzenia ewentualnych zmian do prawodawstwa zapobiegających niepożądanym praktykom.

ANEKS

Tab. A.1. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–1,08	–1,18	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–1,26	–1,28	–1,11	0,00	–1,87
	15–30	jednostki osadnicze	–1,71	–1,18	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,04	–1,03	–1,50	–1,85	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,87	2,36	1,48	0,00	0,00
		ludność	1,64	2,31	2,02	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,74	0,00	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,50	0,00	0,60	0,00	1,87
Narwi	0–15	jednostki osadnicze	–0,16	–0,24	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,10	–0,23	–0,65	–1,84	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,40	0,24	0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,34	0,23	0,65	1,84	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.1 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Środkowej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,83	–0,71	–3,70	–4,26	–5,26
		ludność	–1,06	–1,16	–3,15	–3,67	–16,92
	15–30	jednostki osadnicze	–1,77	0,24	2,96	2,13	2,63
		ludność	–0,91	0,58	2,45	2,03	1,09
	30–45	jednostki osadnicze	1,19	0,47	0,00	2,13	0,00
		ludność	1,07	0,57	0,00	1,64	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	1,22	0,00	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,76	0,00	0,70	0,00	15,83
Bugu	0–15	jednostki osadnicze	–0,26	–0,24	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–0,34	–0,43	–1,13	0,00	–3,24
	15–30	jednostki osadnicze	–1,09	–0,47	0,74	0,00	2,63
		ludność	–1,04	–0,58	0,65	0,00	3,24
	30–45	jednostki osadnicze	0,48	0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,59	0,58	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,53	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,49	0,00	0,48	0,00	0,00
Górnej-Zachodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,23	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,92	–0,35	–0,79	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,73	–1,18	0,00	0,00	0,00
		ludność	–1,73	–0,77	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,35	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,93	0,44	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,27	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,58	–0,26	0,00	0,00	0,00
Górnej-Wschodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,24	–0,71	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,03	–0,49	–1,12	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,64	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–1,25	0,13	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,16	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,86	0,36	1,12	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Małej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,01	–0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,02	–0,19	–0,83	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,08	–0,10	0,83	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,02	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,10	0,29	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.2. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–15	jednostki osadnicze	–0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,06	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,06	–0,32	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,18	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,11	0,32	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Noteci	0–15	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.2 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Warty	0–15	jednostki osadnicze	–0,26	–0,71	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,22	–0,86	–1,57	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,64	–0,24	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,43	–0,10	0,54	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,56	0,94	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,42	0,96	1,03	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Środkowej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,42	–0,94	–3,70	–2,13	0,00
		ludność	–0,59	–1,08	–3,45	–2,52	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,68	–0,71	0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,54	–0,70	0,49	2,52	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,88	1,18	2,22	0,00	0,00
		ludność	0,89	1,12	2,48	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,19	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,20	0,13	0,48	0,00	0,00
Górnej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,07	0,00	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,11	0,00	–0,51	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,13	0,00	–0,36	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,13	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,20	0,00	0,86	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.3. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Łyny i Węgorapy	0–15	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.4. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Rzeka	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Wisła	0–15	jednostki osadnicze	–0,03	0,00	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	–1,87
	15–30	jednostki osadnicze	–0,09	–0,24	0,00	0,00	2,63
		ludność	–0,09	–0,15	0,00	0,00	1,87
	30–45	jednostki osadnicze	0,11	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,09	0,15	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.4 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Odra	0–15	jednostki osadnicze	–0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,30	–0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,32	–0,32	–0,86	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,28	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,39	–0,07	0,86	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,10	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,07	0,38	0,00	0,00	0,00
Warta	0–15	jednostki osadnicze	–0,11	0,00	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,12	0,00	–1,57	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,35	–0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,21	–0,56	0,54	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,27	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,24	0,56	1,03	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.5. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–1,08	–1,18	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–1,26	–1,28	–1,76	0,00	–1,87
	15–30	jednostki osadnicze	–1,74	–1,18	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–1,09	–1,03	–0,86	–1,85	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	1,87	2,36	1,48	0,00	0,00
		ludność	1,65	2,31	2,02	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,77	0,00	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,53	0,00	0,60	0,00	1,87

1	2	3	4	5	6	7	8
Narwi	0–15	jednostki osadnicze	–0,16	–0,24	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,11	–0,23	–0,65	–1,84	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,43	0,24	0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,35	0,23	0,65	1,84	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	–0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Środkowej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,88	–0,71	–3,70	–4,26	–5,26
		ludność	–1,12	–1,16	–3,15	–3,67	–16,92
	15–30	jednostki osadnicze	–1,86	0,24	2,96	2,13	2,63
		ludność	–0,96	0,58	2,45	2,03	1,09
	30–45	jednostki osadnicze	1,40	0,47	0,00	2,13	2,63
		ludność	1,19	0,57	0,00	1,64	15,83
	45–60	jednostki osadnicze	1,14	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,74	0,00	0,70	0,00	0,00
Bugu	0–15	jednostki osadnicze	–0,28	–0,24	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,37	–0,43	–0,48	0,00	–3,24
	15–30	jednostki osadnicze	–1,22	–0,71	0,00	0,00	2,63
		ludność	–1,14	–0,73	0,00	0,00	3,24
	30–45	jednostki osadnicze	0,55	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,66	0,73	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,47	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,45	0,00	0,48	0,00	0,00
Górnej-Zachodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,25	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,96	–0,35	–0,79	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,82	–1,18	0,00	0,00	0,00
		ludność	–1,92	–0,77	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,39	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	1,06	0,44	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,32	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,63	–0,26	0,00	0,00	0,00

Tab. A.5 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Górnej-Wschodniej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,24	–0,71	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,03	–0,49	–1,12	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,64	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–1,25	0,13	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,16	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,86	0,36	1,12	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Małej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,02	–0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,06	–0,19	–0,83	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,08	–0,10	0,83	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,03	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,14	0,29	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.6. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–15	jednostki osadnicze	–0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,08	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,07	–0,32	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,23	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,15	0,32	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Noteci	0–15	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Warty	0–15	jednostki osadnicze	–0,26	–0,71	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,22	–0,86	–1,57	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,64	–0,24	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,43	–0,10	0,54	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,56	0,94	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,42	0,96	1,03	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Środkowej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,70	–1,18	–3,70	–4,26	0,00
		ludność	–1,06	–1,23	–3,45	–5,64	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–1,01	–1,89	0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,95	–1,90	0,49	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,91	1,42	1,48	2,13	0,00
		ludność	1,09	1,48	1,42	3,11	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,54	1,18	1,48	2,13	0,00
		ludność	0,54	1,26	1,54	2,52	0,00
Górnej Odry	0–15	jednostki osadnicze	–0,12	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,22	–0,51	–0,51	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,26	0,24	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,45	0,13	–0,36	–1,69	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,30	0,00	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,52	0,00	0,86	1,69	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,08	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,15	0,38	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.7. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Łyny i Węgorapy	0–15	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.8. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Rzeka	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Wisła	0–15	jednostki osadnicze	–0,09	0,00	–0,74	0,00	–5,26
		ludność	–0,10	0,00	–0,65	0,00	–2,96
	15–30	jednostki osadnicze	–0,18	–0,47	0,74	–2,13	5,26
		ludność	–0,17	–0,39	0,65	–1,85	2,96
	30–45	jednostki osadnicze	0,16	0,47	0,00	2,13	0,00
		ludność	0,20	0,39	0,00	1,85	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Odra	0–15	jednostki osadnicze	–0,17	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,30	–0,38	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,49	–0,24	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,52	–0,32	–0,86	–1,69	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,34	0,00	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,51	–0,07	0,86	1,69	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,28	0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,28	0,77	0,00	0,00	0,00
Warta	0–15	jednostki osadnicze	–0,14	–0,47	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	–0,17	–0,69	–1,57	0,00	–4,98
	15–30	jednostki osadnicze	–0,42	–0,94	0,74	0,00	2,63
		ludność	–0,29	–0,74	0,54	0,00	4,98
	30–45	jednostki osadnicze	0,38	1,42	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,36	1,43	1,03	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.9. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,05	–0,47	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,06	–0,47	0,00	0,00	–4,26
	15–30	jednostki osadnicze	–0,08	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,08	0,24	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.10. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–15	jednostki osadnicze	–0,03	–0,24	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,02	–0,15	0,00	0,00	–3,70
	15–30	jednostki osadnicze	–0,02	0,24	0,00	0,00	2,63
		ludność	0,00	0,15	0,00	0,00	3,70
	30–45	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.11. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Wisły	0–15	jednostki osadnicze	–0,17	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,14	–0,23	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,22	0,00	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,20	0,00	–0,91	–1,85	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.12. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%]

Region wodny	Czas przejazdu [minuty]	Kumulowane elementy	Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
			do 5 000	od 5 001 do 20 000	od 20 001 do 50 000	od 50 001 do 100 000	powyżej 100 000
			względne zmiany [%]				
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–15	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	15–30	jednostki osadnicze	–0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–45	jednostki osadnicze	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	45–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.13. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

Region wodny	Czas przejazdu [minuty]	Kumulowane elementy	Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
			do 5 000	od 5 001 do 20 000	od 20 001 do 50 000	od 50 001 do 100 000	powyżej 100 000
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,60	–1,18	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,81	–1,12	–0,65	0,00	–1,87
	30–60	jednostki osadnicze	–2,14	–2,36	–2,22	–2,13	2,63
		ludność	–1,65	–2,41	–2,24	–1,85	1,87
	60–90	jednostki osadnicze	–0,41	–0,24	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,01	–0,42	–0,43	–2,33	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	2,00	2,59	2,96	2,13	0,00
		ludność	1,63	2,63	3,32	1,29	0,00

Tab. A.13 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Narwi	0–30	jednostki osadnicze	–0,05	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,05	–0,36	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,16	0,24	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,07	0,36	0,00	–1,93	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,93	–0,24	–0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,55	–0,24	–0,52	1,93	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,06	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,05	0,24	0,00	0,00	0,00
Środkowej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,26	–0,94	–0,74	–2,13	–2,63
		ludność	–0,59	–0,91	–0,97	–1,81	–15,83
	30–60	jednostki osadnicze	–1,46	–0,47	–2,22	0,00	–2,63
		ludność	–0,74	–0,64	–1,56	0,16	–1,09
	60–90	jednostki osadnicze	–1,83	0,00	1,48	–2,13	0,00
		ludność	–1,02	–0,04	0,81	–2,28	–0,10
	90–120	jednostki osadnicze	2,56	0,47	0,74	2,13	5,26
		ludność	1,70	0,66	1,07	2,28	17,02
Bugu	0–30	jednostki osadnicze	–0,45	–0,24	–2,22	0,00	–2,63
		ludność	–0,78	–0,16	–1,96	0,00	–3,24
	30–60	jednostki osadnicze	–1,58	–0,94	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–1,40	–1,32	–0,22	–2,06	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,69	–0,71	0,74	–2,13	2,63
		ludność	–1,28	–1,29	0,97	–2,06	3,24
	90–120	jednostki osadnicze	0,56	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,68	1,02	0,73	0,25	0,00
Górnej–Zachodniej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,20	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,40	–0,49	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,77	–1,65	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,21	–1,61	–0,93	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,18	0,00	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,65	0,35	–0,62	–2,64	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,32	0,71	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,50	0,55	0,76	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Górnej-Wschodniej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,10	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,49	–0,15	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,48	–2,12	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–1,39	–1,70	–2,04	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,65	1,42	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,85	1,11	–0,87	–2,01	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,09	0,71	1,48	0,00	0,00
		ludność	0,68	0,61	1,79	0,00	0,00
Małej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,12	–1,65	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,52	–1,30	–0,83	0,00	–1,65
	60–90	jednostki osadnicze	0,04	0,94	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,18	0,78	0,83	0,00	1,65
	90–120	jednostki osadnicze	0,07	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,34	0,52	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.14. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,03	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,04	–0,36	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	–0,01	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,36	0,00	0,00	0,00

Tab. A.14 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Noteci	0–30	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Warty	0–30	jednostki osadnicze	–0,08	–0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,10	–0,64	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,63	0,71	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–0,54	0,51	–1,61	–1,62	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,03	–0,24	1,48	2,13	0,00
		ludność	0,12	–0,03	1,61	1,62	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,68	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,52	0,16	0,00	0,00	0,00
Środkowej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,08	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,08	–0,14	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,48	–0,47	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,59	–0,27	–1,92	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,24	–0,47	–0,74	0,00	0,00
		ludność	0,11	–0,47	0,18	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,26	0,71	2,22	0,00	0,00
		ludność	0,54	0,32	1,74	0,00	0,00
Górnej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,48	–0,24	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–0,47	–0,14	–1,37	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,25	0,24	1,48	0,00	0,00
		ludność	0,34	0,14	1,37	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.15. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%]

Region wodny	Czas przejazdu [minuty]	Kumulowane elementy	Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
			do 5 000	od 5 001 do 20 000	od 20 001 do 50 000	od 50 001 do 100 000	powyżej 100 000
			względne zmiany [%]				
Łyny i Węgorapy	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,04	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,18	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,05	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,05	–0,18	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.16. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

Rzeka	Czas przejazdu [minuty]	Kumulowane elementy	Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
			do 5 000	od 5 001 do 20 000	od 20 001 do 50 000	od 50 001 do 100 000	powyżej 100 000
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Wisła	0–30	jednostki osadnicze	–0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,10	0,03	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,13	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	–0,03	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. A.16 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Odra	0–30	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,26	0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,19	0,28	–0,86	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,26	–0,24	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,26	–0,28	0,86	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Warta	0–30	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,25	0,24	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,31	0,18	–1,03	–1,62	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,04	–0,24	0,74	2,13	0,00
		ludność	0,16	–0,18	1,03	1,62	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.17. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,63	–1,18	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,85	–1,12	–0,65	0,00	–1,87
	30–60	jednostki osadnicze	–2,14	–2,36	–2,22	–2,13	2,63
		ludność	–1,63	–2,41	–2,24	–1,85	1,87
	60–90	jednostki osadnicze	–0,38	–0,24	0,00	–2,13	0,00
		ludność	0,00	–0,42	–0,43	–2,33	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	2,00	2,59	2,96	2,13	0,00
		ludność	1,63	2,63	3,32	1,29	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Narwi	0–30	jednostki osadnicze	–0,05	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	–0,60	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,16	0,47	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,08	0,60	0,00	–1,93	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,05	–0,24	–0,74	2,13	0,00
		ludność	–0,60	–0,24	–0,52	1,93	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,04	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,04	0,24	0,00	0,00	0,00
Środkowej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,26	–0,94	–0,74	–2,13	–2,63
		ludność	–0,60	–0,91	–0,97	–1,81	–15,83
	30–60	jednostki osadnicze	–1,52	–0,47	–2,22	–2,13	–2,63
		ludność	–0,80	–0,64	–1,56	–1,49	–1,09
	60–90	jednostki osadnicze	–2,01	0,00	1,48	0,00	0,00
		ludność	–1,17	–0,04	0,81	–0,64	–0,10
	90–120	jednostki osadnicze	2,71	0,47	0,74	2,13	5,26
		ludność	1,85	0,66	1,07	2,28	17,02
Bugu	0–30	jednostki osadnicze	–0,45	–0,24	–2,22	0,00	–2,63
		ludność	–0,78	–0,16	–1,96	0,00	–3,24
	30–60	jednostki osadnicze	–1,62	–0,47	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–1,39	–0,82	–0,22	–2,06	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,69	–1,18	0,74	–2,13	2,63
		ludność	–1,31	–1,80	0,97	–2,06	3,24
	90–120	jednostki osadnicze	0,55	0,47	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,68	1,02	0,73	0,25	0,00
Górnej-Zachodniej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,20	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,40	–0,49	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,77	–1,65	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–1,21	–1,61	–0,93	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,18	0,00	–0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,65	0,35	–0,62	–2,64	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,32	0,71	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,50	0,55	0,76	0,00	0,00

Tab. A.17 (cd.)

1	2	3	4	5	6	7	8
Górnej-Wschodniej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,11	–0,47	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,59	–0,56	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,65	–2,36	–1,48	0,00	0,00
		ludność	–2,17	–2,07	–2,04	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–1,01	0,71	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–2,00	0,71	–1,79	–2,01	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	–0,09	0,00	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,27	0,00	0,87	0,00	0,00
Małej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,02	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	–0,21	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,09	–1,42	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,48	–1,09	–0,83	0,00	–1,65
	60–90	jednostki osadnicze	0,03	0,94	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,16	0,78	0,83	0,00	1,65
	90–120	jednostki osadnicze	0,08	0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,34	0,52	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.18. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry według regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,01	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	–0,36	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,00	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,05	0,36	0,00	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Noteci	0–30	jednostki osadnicze	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Warty	0–30	jednostki osadnicze	–0,09	–0,94	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,17	–0,85	0,00	0,00	–4,98
	30–60	jednostki osadnicze	–0,93	0,00	–1,48	–2,13	2,63
		ludność	–0,81	–0,17	–1,61	–1,62	4,98
	60–90	jednostki osadnicze	–0,15	0,71	1,48	2,13	0,00
		ludność	0,12	0,86	1,61	1,62	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	1,18	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,86	0,16	0,00	0,00	0,00
Środkowej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,18	–0,24	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,22	–0,14	–0,88	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,90	–1,65	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–0,97	–1,66	–1,84	–3,11	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,44	0,24	–2,22	0,00	0,00
		ludność	0,07	0,40	–1,28	0,82	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,30	0,24	3,70	2,13	0,00
		ludność	0,77	0,08	3,35	2,29	0,00
Górnej Odry	0–30	jednostki osadnicze	–0,07	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,24	–0,38	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,55	–0,71	–2,22	0,00	0,00
		ludność	–0,59	–0,48	–1,95	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,15	0,71	2,22	–2,13	0,00
		ludność	0,19	0,48	1,95	–1,69	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,47	0,24	0,00	2,13	0,00
		ludność	0,64	0,38	0,00	1,69	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.19. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Łyny i Węgorapy	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,04	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	0,18	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,05	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,05	–0,18	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,02	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.20. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Rzeka	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
1	2	3	4	5	6	7	8
Wisła	0–30	jednostki osadnicze	–0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,21	0,00	0,00	–2,13	0,00
		ludność	–0,24	0,03	0,00	–1,85	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,18	0,00	0,00	2,13	0,00
		ludność	0,02	–0,03	0,00	1,85	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00

1	2	3	4	5	6	7	8
Odra	0–30	jednostki osadnicze	–0,04	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,13	–0,38	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,49	0,00	–0,74	0,00	0,00
		ludność	–0,42	0,15	–0,86	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,50	0,24	0,74	0,00	0,00
		ludność	0,52	0,23	0,86	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Warta	0–30	jednostki osadnicze	–0,06	–0,71	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,10	–0,59	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,42	0,94	–1,48	–2,13	0,00
		ludność	–0,43	0,76	–1,61	–1,62	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	0,20	–0,24	1,48	2,13	0,00
		ludność	0,31	–0,18	1,61	1,62	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.21. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	–2,63
		ludność	–0,01	0,00	0,00	0,00	–4,26
	30–60	jednostki osadnicze	–0,33	0,00	–0,74	0,00	–2,63
		ludność	–0,29	–0,05	–0,91	0,00	–1,17
	60–90	jednostki osadnicze	0,17	–0,24	0,74	0,00	2,63
		ludność	0,16	–0,18	0,91	0,00	1,17
	90–120	jednostki osadnicze	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.22. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–30	jednostki osadnicze	–0,20	–0,24	–2,22	0,00	–2,63
		ludność	–0,27	–0,15	–1,78	0,00	–3,70
	30–60	jednostki osadnicze	–0,71	–0,24	0,74	–2,13	0,00
		ludność	–0,56	–0,38	0,50	–2,11	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,43	–1,18	1,48	2,13	2,63
		ludność	0,04	–1,29	1,28	2,11	3,70
	90–120	jednostki osadnicze	0,08	0,47	–1,48	0,00	–2,63
		ludność	0,04	0,77	–1,64	0,00	–1,02

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.23. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30 minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%]

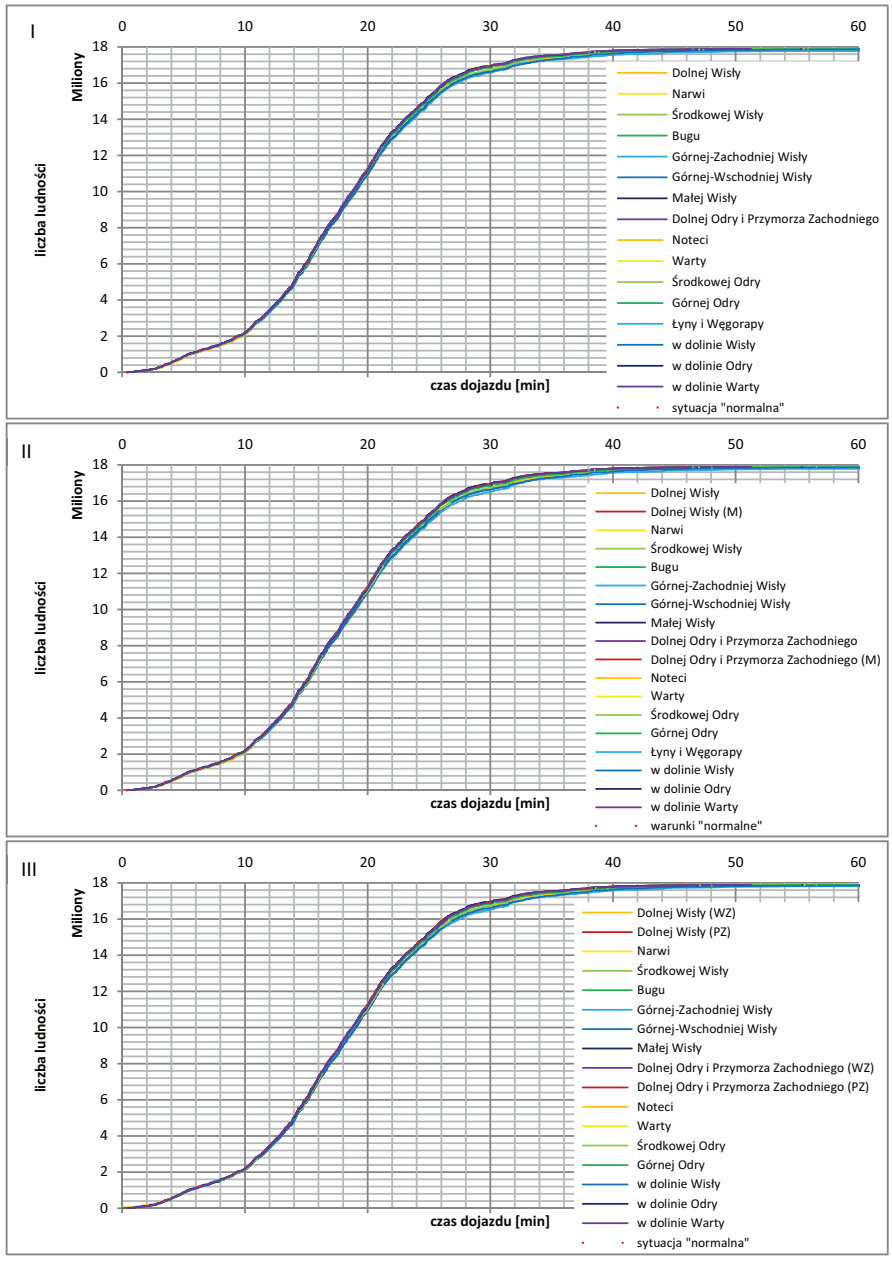
			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Wisły	0–30	jednostki osadnicze	–0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,41	0,00	–0,74	–2,13	–2,63
		ludność	–0,29	–0,05	–0,91	–1,85	–1,17
	60–90	jednostki osadnicze	0,04	–0,24	0,00	0,00	2,63
		ludność	0,00	–0,18	0,00	0,00	1,17
	90–120	jednostki osadnicze	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.

Tab. A.24. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%]

			Wielkość jednostki osadniczej [liczba ludności]				
Region wodny	**Czas przejazdu [minuty]**	**Kumulowane elementy**	**do 5 000**	**od 5 001 do 20 000**	**od 20 001 do 50 000**	**od 50 001 do 100 000**	**powyżej 100 000**
			względne zmiany [%]				
Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego	0–30	jednostki osadnicze	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	30–60	jednostki osadnicze	–0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
	60–90	jednostki osadnicze	–0,07	–0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	–0,01	–0,12	0,00	0,00	0,00
	90–120	jednostki osadnicze	0,07	0,24	0,00	0,00	0,00
		ludność	0,05	0,12	0,00	0,00	0,00

Źródło: opracowanie własne.



I – prawdopodobieństwo 10%, II – prawdopodobieństwo 1% od strony rzeki i od strony morza (M), III – zniszczenie wałów przeciwpowodziowych i zniszczenie budowli ochronnej pasa technicznego (PZ)

Ryc. A.1. Czasowa dostępność kumulatywna według liczby ludności o czasie dojazdu do ośrodków wojewódzkich w poszczególnych wariantach symulacji powodzi w Polsce w 2019 r.

Źródło: opracowanie własne

SUMMARY

An analysis of scientific literature and research papers into the impact of non-typical events on road transport indicates that the subject has yet to be comprehensively explored in Poland, especially by researchers who focus on the subfield of transport geography. Although there are rare studies on the impact of anthropogenic factors (mainly those related directly to transport networks) on the state of equilibrium (researched primarily from the perspective of traffic engineering), there are few papers on the effects that natural environmental factors have on transport. This is where we can see a research gap that should be filled, primarily, through the systematisation of correlations between the road transport and non-typical events that interfere with its effectiveness (with particular focus on natural phenomena), through the development of a methodology to examine the severity and spatial scope of the impact, and the synthetic inference on the importance of such phenomena in Poland. What is more, the review of Polish scientific output on the subject presented in this monograph distinctly shows a severe shortage of comprehensive studies conducted from the spatial perspective. Namely, this concerns analyses performed on different spatial scales (locally, regionally, and inter-regionally) and to a degree that makes it possible to eliminate, or at least mitigate, the border effect. This would enable the researcher to detect regularities typical for transport systems of various scales, and capture those phenomena which become visible only in the course of studies so spatially vast that they eliminate the co-occurrence of phenomena (e.g., their simultaneous appearance in different areas of the transport system). This monograph should fill the aforementioned research gap. Another reason that justifies the need for studies devoted to changes in transport accessibility and flood-related load on the road network in Poland is the topicality of the issue on an international scale, with the number of publications, scientific conferences, and journals on the subject matter growing dramatically. Therefore, it feels only justifiable that such publications should appear in Poland, however, based on source materials that illustrate the particular conditions behind such phenomena in this country.

The importance of studies into the impact of natural disasters on transport systems must be recognised in view of the fact that the influence this impact has on our life is increasing dynamically. Even if we do not delve into scientific papers on the matter, and only restrict ourselves to news reports and our own observations, we are certain to notice the intensification of extreme weather conditions, which

– when combined with other unfavourable circumstances – may transform into a situation that poses a threat to the regular operation of the transport system. Existing knowledge indicates that floods are the most common natural disasters and generate widespread damage across the world. Alas, researchers are convinced that the frequency of extreme floods will only increase due to climate change and land use. Moreover, the 21st century has seen exceptional growth of car ownership, and considerable qualitative and quantitative developments in road infrastructure. Despite this investment in road infrastructure, there is still an obvious disproportionality between the two, increasingly impacting on the load on the road networks, which – in consequence – puts administrators and designers under constantly escalating pressure to meet the ever-growing demand. This pressure multiplies in the event of a non-typical occurrence (e.g., a flood), when management of the transport system becomes an exceptionally formidable challenge. This is when rational and effective command of the infrastructure becomes crucial, because – in the face of road closures, plummeting accessibility, and changes in the network load – the authorities are able to counteract road network issues that directly impact both people's safety and the state of the economy. A flood that causes damage to a road section may result in unexpected behaviour among the network users, so different to previously researched transport behaviours that it makes them thoroughly worth analysis. This shows the essential need for studies which could, in future, contribute to more effective responses to emergency situations. Therefore, the importance of studies into transport accessibility and road network load in the event of a flood should be seen through the prism of two spheres: the management of the infrastructure itself and people's behaviour in emergency situations.

This topic also possesses a significant cognitive dimension, since, regardless of its utilitarian function, we depend on the transport infrastructure. And in the face of an emergency situation it is the mitigation of the negative effects on human life and health, and on business activity that are ultimate goals of flood risk management. Flood risk management helps to identify to what extent the Polish road network and its accompanying transport are vulnerable to the destructive effects of floods as well as highlighting those regions where they may occur, as shown in scenarios of various probability. As a result, we can determine which areas are particularly prone to flood risk and its consequences with regard to the efficiency of the transport system. In this respect, however, the literature offers studies on direct material losses, while indirect ones are usually ignored, being difficult to express. Moreover, research that combines analysis of flood-related issues, transport accessibility, and mobility is particularly important in view of flood-induced transport disruption that may not only paralyse local transportation, but also have a knock-on effect on a nationwide scale, posing a direct threat to national security.

This monograph is an attempt at determining the impact of a flood (in various probability scenarios) on transport accessibility and the load on the national road network within specified water regions in Poland. The research was conducted on the basis of secondary data on flood hazard areas in Poland and their management, as well as on the road network and land use in their vicinity.

The main purpose of the study is to assess the vulnerability of the road network in Poland through the identification of the nature and scale of changes in transport accessibility and the traffic load on the network in the event of a riverine, estuarine or coastal flood of a medium probability of occurrence (1%), of a high probability of occurrence (10%), or in flood hazard areas due to destruction of a stopbank and the protective structure of the service strip.

The main purpose of the monograph has translated into a series of detailed goals that are cognitive, methodological, and applicational in their nature. The cognitive objective includes recognition of conditions (natural, environmental, legal and administrative) that determine the operation and development of road networks in flood hazard areas. The completion of this goal allowed the author to develop a methodology for determining which segments of the road network were inaccessible during a flood (one of the methodological goals), and enabled him to formulate recommendations for transport and spatial policies of flood hazard areas. The detailed cognitive objectives involved determining the nature and scale of flood-related changes over time, accessibility (isochronous/cumulative, and potential – at the municipality level), and recognition of the properties of changes in volumes of traffic flows (related to obligatory motivations) that stem from the closure of flooded network sections and reduction of traffic generators.

The first detailed methodological goal was to develop a procedure to identify those sections of the road network that are at risk of a flood of a high and medium probability of occurrence, or when a stopbank or the protective structure of the service strip is completely destroyed. The second goal was to construct a model of the road network with vehicle traffic speeds with a resolution that would allow for intra-municipal analyses to be performed. Such a tool is indispensable for studying transport accessibility as it makes the returned results more realistic. A high resolution is a prerequisite so that the model can, to an acceptable degree, reflect even local flood-related changes in the transport system. The final methodological goal was to develop software (named RoadLoad) that enables the assessment of the process of demand distribution across the network of the transport system, whose returned results allow the effective analysis and visualisation of the distribution of traffic that accompanies a flood. It is, at the same time, an applicational goal, since the software – with numerous features for modelling traffic distribution on the road network – can be used for analyses of other criteria, e.g., studies that take into account other non-typical events. The detailed goals are completed with the last task – of an applicational nature – namely, the

formulation of recommendations for spatial policy on the rationalisation of the road transport system where it faces flood hazards. The conclusions drawn in the course of the study will be translated into a number of proposals aimed at those decision-makers responsible for creating policies for flood risk management, and strategies for the development of transport infrastructure.

The monograph contains the results of the research project *Changes in Theoretical Transport Accessibility and Load of the Road Network Resulting from a Flood on the Territory of Poland*, implemented between 2019 and 2021 under the number 2018/29/B/HS4/01020, and funded by the National Science Centre in Poland.

The monograph presents analyses related to three research matters: land use and its development in flood hazard areas, transport accessibility, and spatial mobility (examined therein as one of its products, i.e., road traffic). The study was conducted with the assumption that potential trips are taken by private car. The mutual relationships between the aforementioned research matters translate into analyses of the impact a flood has on transport accessibility in its temporal perspective. This is about the identification of those sections of the road network that will be flooded. Travel isochrones between reference points (centroids of voivodeship capitals) are constructed for a road network with no flooded segments, and the juxtaposition of isochrones for the periods when there is and there isn't a flood makes it possible to perform a quantifiable assessment of the travel delays resulting from flooding. In Poland, both population changes and elements of the spatial development in the vicinity of particular points (under 'normal' circumstances and during a flood) are indicators of possible accessibility issues. Spatial development focuses, inter alia, on the recognition of vehicle flows within the road network in the event of a flood or other natural disaster, and involves different research scenarios: In order to visualise the vehicle traffic it is necessary to use data on starting points and destinations, and the volume of vehicles that move between them. The author analysed the trips for obligatory motivations that remain relatively steady (commuting to work and business trips) even when there is a non-typical occurrence. The volumes of vehicle flows were scrutinised for a 'regular' road network load, and for flood-related changes to the load of individual sections of the network, while considering the structure of the load by road class.

The scope of the research reflects two major purposes of flood risk management – reducing risk and improving risk management, and more specifically: reducing the vulnerability of the infrastructure (here: transport) and the people who use it to flood, increasing the effectiveness when rebuilding the road network and restoring the transport system to its pre-flood state, as well as developing educational programmes to improve the awareness and knowledge when dealing with flood risk and hazards (e.g., during self-evacuation from flood hazard areas).

The temporal scope of the study was mainly determined by the availability of the key source databases used in the monograph. The large time spans that surfaced when the data was prepared stem, on the one hand, from the complexity of the methodology applied to process it, and on the other hand, from the vastness of the territory for which it was collected and processed. This creates a problem of up-to-datedness of the source data, which posed a significant methodological challenge. the network and speed models reflect the state of affairs for the third quarter of 2019 – a period that should be considered the main time frame of the study – even though some statistical material within the generator-attractor data on motivations behind commuting to school and business trips come from 2018 and the data obtained for commuter traffic availability required the use of the latest data compilation of this type – from 2016. The main time frame was also taken into account when reviewing and interpreting the legislation on the subject matter.

The spatial scope of the study is strictly limited to the road network, with the model encompassing the whole territory of Poland and a buffer area of several dozen kilometres around the country's borders. The network includes all motorways and expressways, national, regional, district roads, as well as a substantial portion of local roads. The applied buffer zone was to make the results of the simulation more realistic, and to enable the inclusion of vehicles going around closed road sections (due to flood) to use the road infrastructure located outside the territory of Poland. The analyses were conducted for three flooding scenarios: areas of a high (10%), and medium probability of flooding (1%) (including estuarine and coastal floods, 1%M), and hazard areas at risk of flooding due to a complete destruction of a stopbank (SD) and the protective structure of the service strip (SSD). Flood simulations were performed for each of the thirteen water regions of Poland, in the catchment areas of the Vistula, the Oder, and the Pregolya, and for the three largest rivers: the Vistula, the Oder, and the Warta. Obviously, any attempt to classify or categorise a complex phenomenon like flood is a gargantuan task. As a result, the author was forced to apply some form of delimitation when considering the spatial changeability of the disaster. He decided to use water regions (not administrative units), since they are delineated on the basis of a hydrographic criterion, and thus, they seem to better reflect the purpose of the study. In addition, their number and spatial distribution allows for simulations that capture the diversity of how the road transport system is affected by flood depending on the region. Based on this choice for flood simulations, analyses of changes in transport accessibility were conducted for a regional and local level, whereas analyses of changes in the road network load were performed for an inter-municipal scale.

A review of the non-typical occurrences that may impact road transport in Poland shows that a vast majority concern the way floods affect the road

infrastructure and vehicle journeys. Even though the total number of possible effects of flooding on these two factors is difficult to determine, some have already been thoroughly scrutinised by other branches of science. In terms of non-typical disruptive events, flooding puts the road infrastructure and its users to a particularly difficult test. The scale of its impact – especially when there is an unfortunate coincidence of such factors as large scale exposure and vulnerability – is reflected by the many tragic, historical reports. Numerous studies show that the appearance of the first signs of the disaster or its actual occurrence may induce people to flee. A review of research results and the various evacuation guidelines in transport management indicate that the optimisation of evacuation procedures poses a challenge in both theoretical and practical deliberations. These two approaches usually take into account both the correlation between journeys due to evacuation and mobility that results from 'regular' trip motivators. For both of the above, the results of their mutual influence may bring effects as varied as are the circumstances in which trips are taken. The current state of the transport system, combined with the changeability of the threat itself and, above all, the variety of users and their reactions to the danger reveal how invaluable it is to assess evacuation as a factor impacting road transport, even if we realise that the nonuniformity of tools implemented to optimise evacuation makes this more difficult. At the same time, it is imperative to take into account local conditions and the local scale of spatial analysis in order to return realistic results.

An analysis of floods in Poland shows that they cause greatest damage in the south (in the basins of the upper and middle Oder, and the upper Vistula), which is – to a large extent – reflected in the consequences for the road network and resulting perturbations for the whole national system of road transport. The study into individual features of the natural environment and elements of land use that are at risk of flooding, expanded with research on the distribution of the population, allowed the author to determine the principal conditions that impact the operation and development of the road network in the said territories. The incorporation of legal and administrative regulations that accompany land use and management in flood hazard areas indicates that a key element characterising the development of flood hazard areas should be their stability, which must be resistant to fluctuations of the economic situation. Constantly changing the rules governing land use in these areas, even if done in good faith, impedes the expected positive effects due to an overly narrow time horizon set by each successive modification, as each change includes a transition period, which brings an element of insecurity and may lead to malpractice and improprieties. Another issue that creates problems for road networks is the fact that decisions can be spatially and substantively inconsistent. A local spatial policy, aimed at protecting floodplains and soundly conducted by a given municipality, will still be doomed to failure if the neighbouring authorities refuse to adopt such a plan

perceiving it as an obstacle to regional development. One should aim at a state of affairs where no measures are taken to compromise the self-governance of local communities regarding the management of their own flood-hazard areas. Where such communities willingly and actively participate in sustainable use and land development it will result in a decreased fallout from any flooding scenario. Naturally, this requires raising both social awareness and environmental responsibility.

A review of source materials on the principles of construction and the use of the road infrastructure in flood hazard areas reveals a wide spectrum of regulations and good practices, the implementation of which is to ensure that the infrastructure has the highest possible level of resistance to the damaging effects of flood waters. The amount of regulations, combined with the broad range of discussed threads shows that the significance of this factor for the appropriate operation of road transport has already been thoroughly considered in the realm of design and construction. However, the abundant documentation regulating the management of the road transport system in emergency situations proves that even the most earnest obedience to the guidelines cannot guarantee sufficient resistance of those network segments exposed to flooding. Recognising the danger non-typical events pose for the stability of the state's infrastructure, decision-makers need to regularly re-evaluate the strategic and operational guidelines, in light of which the results obtained in this monograph provide indispensable diagnostic material to improve the security of the road transport system. It is so because the developed method for assessing the impact of flood risk on road transport allows for the reduction of hazards of extremely low probability but catastrophic effects. Identification of those parts of the road network where disturbance or destruction would have the worst consequences for transport accessibility and road network load allows the bodies involved in managing critical infrastructure (operators) to prepare and implement plans to protect critical infrastructure once they are more precisely adjusted to the modelled scenarios. This also enables them to manage the available reserve resources more effectively. What is more, the conducted simulations facilitate more efficient spatiotemporal distribution of means and forces that ensure safety and keep road infrastructure operational until it is fully recovered. In conclusion, the results returned in the monograph may also make it easier to raise standards of management of critical infrastructure. Data on the exact location of those areas that are at particular risk of reduced, or even curtailed, accessibility allows for prior measures that will guarantee that as high accessibility of the road transport infrastructure as possible is sustained at all times. The ability to recognise network segments that may be flooded and possibly 'cut off', as well as those sections that will take and distribute traffic from the closed roads makes it possible to satisfy the demand for reliability in the context of the substitutability of individual elements of

the network. What is more, the ability to identify the critical constituents of the network (especially those at risk) renders it significantly easier to maintain reliability when it comes to both interim and planned repairs and their scheduling.

None of the aforesaid support for infrastructure management, or even the road transport system as such, would be workable without identification of the locations where the exposure to hazard and infrastructural vulnerability is so unfavourable that the local infrastructure would be taken out of operation in the event of a flood. Development of a procedure to identify road sections at risk of inundation during a flood of a high and medium probability of occurrence or as a result of a complete destruction of a stopbank or the protective structure of the service strip posed a formidable challenge even in its conceptual stage, since it involved working with extremely large sets of data. Data which can be diverse in terms of its spatial up-to-datedness. The assessment of data completeness and validity performed during the transition from the conceptual to operational stage revealed the need to conduct an additional process of a detailed verification of both existing road engineering structures and new developments. This required the acquisition of extremely large source material from institutions involved in the implementation of investments in road infrastructure. The material also varies depending on the territory it refers to, but, in this case, diversity relates primarily to the material form and volume of records. Nevertheless, with time and effort, it was possible to determine those sections at risk in the road network in Poland. The difficulties encountered in the analysis and interpretation of provisions within the collective documentation on investments in road infrastructure justify a postulate for greater unification of content describing investments compiled by various bodies at different levels of territorial administration. In view of the inconveniences in accessing and analysing the design and construction documents, easier access to cross-referenced records would be a considerable facilitation.

As far as data and documentation are concerned, it must be stressed that there are substantial shortcomings and inaccuracies in the descriptions of even the most basic technical parameters of the civil engineering structures (e.g., bridges or culverts) that are listed, for instance, in open-access vector databases. If we consider the strategic importance of such facilities for national defence, we must postulate the improvement of the existing databases and the development of new ones which would contain parameters that should be freely available when there is no threat to national security. Besides simplifying access to data, it would also result in the standardisation of records, which are currently spread across numerous departments and of differing degrees of up-to-datedness and availability. More extensive use of data on the properties of civil engineering structures would also make it possible to increase their ability to deal with hazards during the phrase when road network models are being built for individual flooding scenarios.

Another important aspect for road transport studies would be access to more detailed data on flood water levels for the (currently applied) initial range of up to 50 cm. A review of research papers indicates that even a difference of a few centimetres may bring entirely different consequences for the road network and the journeys taken there. Threshold values remain a disputable issue, and there is no consensus regarding the methodology applied, which does not change the fact that the possibility to enter into this debate was a valuable experience. If we take into account the size of resources (data, computing power, etc.) necessary to model flood water levels, the implementation of just one extra class range (e.g., up to 25 cm) would be a modification that could bring the enormous potential of additional research fields.

What is more, further studies could also deliberate on the flexibility of the transport system when taking into account changeability of floods over time. This refers to both movement of any flood waves, the aftermath of flooding and when it becomes possible to initiate actions to restore the road network to its previous state. This would pave the way for time-dependant analysis. Alas, data on the spatiotemporal dynamics of the phenomenon – at a scale applied in this study – remains unavailable, which made it impossible to incorporate it in the monograph. A valuable supplement to the presented modelling approach would be to incorporate data not only on the changes in people's travel behaviours in such exceptional circumstances as a flood, but also on the period preceding the actual flooding and its aftermath. Unfortunately, this is an extremely difficult task since the possibility of conducting real-time analyses is conditioned by the occurrence of floods, limited by their high dynamics and by the fact that such circumstances may be overly unfavourable for residents to participate in any kind of social science's research. Were it possible, however, it would satisfy the need for a greater assessment of the impact of human factors in such analyses, enabling us to more accurately determine how flexible the road network is to demand change, distance decay, and modal shift, which would characterise the emergency situation.

Further studies could also focus on other trip motivators, or even the application of a multi-motivation traffic model. Commuter traffic and business trips are just a part (even if significant) of flows related to journey motivations, and, therefore, it is impossible to draw comprehensive conclusions on traffic congestion and the resultant drops in speed within the network solely on the basis of this particular motivation. For that reason, the author applied a model that makes travel speeds more realistic, which could be used with variables typical for other trip motivations and lengths, making it possible to distribute traffic reflecting the individual motivations in vehicle flows within the road network. What seems unnecessary is the incorporation of international trips and freight traffic, since many studies show that the majority of the road infrastructure

used for these purposes is directly unaffected by flood waters. However, the issue of indirect impact still remains a possibility, such as congestion caused by commuters' vehicles using the same roads as freight traffic while taking detours when avoiding flooded areas, for example.

The ability to recognise flood-related effects on the road network was merely a base for determining how it can impact the network's usability. This task was performed by means of a traffic speed model and the implementation of methods to assess changes in transport accessibility and road network load. The approach proposed by the author to calculate vehicle speeds for specific and more overall (in terms of free flow traffic) segments of the network serves its purpose. The initial assumptions of the model and its later calibration allowed the author to develop a research tool that encompasses a broad spatial spectrum of the study with a high resolution of the road network model, combined with an acceptable degree of discrepancy in the returned results when juxtaposed with the applied calibration benchmark. However, it does not change the fact that – despite the great efforts to make the model as flexible as possible in adjusting speeds to trip motivations – the approach may still be perceived as being too 'rigid', especially when it comes to non-typical and simulated circumstances. A solution to this problem might be the application of traffic models and the resultant data on traffic speed. While it seems feasible at a local or even regional scale as long as a high resolution of the network model is maintained, it would still be extremely difficult to conduct on a greater scale.

Another benefit of combining analyses of changes in transport accessibility with simulative traffic models is the possibility to determine the changes in mobility that follow interferences to the integrity of the road network. For analyses of accessibility and traffic density, the author decided to use detailed data on the population within flood hazard areas. Although this approach makes the changes to traffic flow more realistic, further upgrades on the solution are still possible. Besides the data on resident numbers in areas at risk of flooding, it would also be advisable to inventory all other traffic generators, and to define the degree of traffic reduction that would stem from their lack in the event of a flood. Such detailed analyses also seem feasible only at a local scale, just like any attempts to calibrate a model that is to reflect re-distribution of flood-related traffic. Due to the highly dynamic nature of this type of disaster and the resultant problems with determining the shortest detour routes, one could also consider applying an approach to traffic distribution within the transport network during a flood that is not based on situations which are deterministic from the user's perspective.

All the aforesaid results of the detailed cognitive and methodological goals of the monograph made it possible to achieve its major purpose – to determine the vulnerability of car transport in Poland through recognition of the nature and

scale of changes in transport accessibility, and changes in the load of traffic on the road network. For both of the above, simulations were conducted for five different flooding scenarios, with spatial diversity encompassing individual water regions in Poland and variants including valleys of major Polish rivers. The analyses revealed that, when it comes to reduced transport accessibility and possibilities to exploit the road network, the road transport system shows spatially differentiated vulnerability to non-typical events. This vulnerability manifests itself both with regard to the transport component and demographic component/use. Moreover, the returned results bring to light the range of interference to the basic levels of accessibility and traffic density due to the length of journeys undertaken and their motivations.

Regardless of the length of the analysed trips, a riverine flood may be particularly damaging for transport accessibility in the northern territories of the Mazovian Voivodeship and considerable parts of provinces in eastern Poland. Other regions that are characterised by a high basic level of accessibility and its substantial reduction due to flooding include the south of Lesser Poland, northern Greater Poland, Silesian Lowlands, Sudeten Foreland, and Lubusz Lake District. Even though there are no substantial drops in accessibility related to a riverine flood in Western Pomerania, or the Pomeranian and Warmian-Masurian Voivodeships, the region remains vulnerable to steep drops in accessibility due to estuarine and coastal flooding. However, it must be stated that the reductions of accessibility recorded for these flooding scenarios took relatively low percentage values. Locations that are the poles of the highest basic values of accessibility that can be struck by particularly significant flood-related traffic disruption in accessibility include: municipalities to the north and northwest of Warsaw, areas in the vicinity of Bydgoszcz (for long trips), and areas along the A4 motorway between Wroclaw and Opole, and Cracow and Rzeszow. For commuting to workplaces, particularly high increases in the numbers of vehicles are usually recorded on network segments adjacent to large urban agglomerations. Studies show that such road networks are most often characterised by such a high degree of optional travel routes that the flooding of one section may force users to look for a detour, but it does not make them abandon their travel plans. When diverted spatially, this (usually local and limited) traffic will sooner or later burden, in a cumulative manner, other network segments leading directly to areas with a high density of workplaces. A common characteristic of the location of sections with high increases in flood-related load of commuter traffic also occurs in locations where people have to travel on business. These were mainly accumulated around Warsaw and on the road network of Mazovian Voivodeship, and, to a spatial extent, are incomparable to any other agglomerations.

Generally speaking, floods of a lower probability of occurrence, or leading to a destruction of stopbanks are manifested by more extreme drops in accessibility,

and put a much greater strain on the transport system. However, inhomogeneity of the road network and the diverse range of potential in flood hazard areas do not allow this relationship to be directly proportional. Moreover, it is difficult to find a correlation of this kind between the range of the direct impact of flood waters on road infrastructure and the nationwide consequences for the road transport system as a whole. Nonetheless, we can pinpoint the water regions where a flood has the most severe impact on the state of the road transport system, and thus, disrupts accessibility. These include water regions of the Middle Oder, the Upper and Western Vistula, the Middle Vistula, and the Lower Vistula. Additionally, these are substantially exposed and possess infrastructure crucial for the entire national system of road transport, and centres vital for shaping accessibility and traffic distribution in 'normal' circumstances. However, one should be aware that current major investments and developments in road infrastructure will certainly mitigate the possible negative consequences for network users reported in this study.

The vastness of the derived research material, its multiple threads, together with the scope for possible further studies demonstrate the large cognitive potential of the subject of the impact of floods on road transport. At the same time, it must be stated that due to the complexity of the matter, it is impossible to avoid the implementation of certain simplifying assumptions or limitations, the awareness of which must accompany the process of interpreting the results.

Measures to reduce the vulnerability of road transport to floods should primarily be taken with regard to three spheres: road infrastructure and its management, road network users, and land use and management of flood hazard areas. For the first sphere, there are some significant infrastructural investments and developments which are being implemented reasonably systematically that are aimed at completing nationwide transport policies. It is crucial that these developments are completed, as they will ensure the highest possible level of basic transport accessibility and, more importantly, level the situation across the country spatially, which is also of great importance when we consider perturbations related to floods and other non-typical events. Elimination of those areas exposed to traffic disruption (and the ensuing loss of possibilities available in locations with high development potential that escape with an undisturbed transport system) will prevent the combined effects of low levels of basic accessibility and its substantial reductions due to an emergency situation.

Besides the postulate to complete these key developments, it is also imperative to approach the investment policy in a manner adjusted to the needs of local systems of road transport. When we consider how differently they were affected by simulated hazards, it becomes obvious that a clearly-deliberated allocation of investment funds is a necessity, not only in reference to current infrastructural needs, but above all, with regard to shaping the current and future

properties of mobility. For some local networks, all that is needed is to renovate civil engineering structures, while others may have to rebuild substantial parts of their road network to take vehicle traffic that they are presently not capable of accepting even in 'normal' circumstances. Another important aspect is the scheduling of such measures; as it should not only take into account short-term priorities for a given investment, but also prognosed demographic changes, e.g., with regard to safety during evacuation. This is directly related to the second sphere and takes the form of a mutuality, aimed at the compatibility between transport policy (or at least attempts to formulate it) and spatial policy, especially in territories at high risk of flooding, but also in areas where it is less likely. A separate challenge is to interlink the aforesaid key investments with local networks. The 'points of contact' of these two should be thoroughly analysed as they are particularly vulnerable to various non-typical events, including floods.

The research results discussed in this monograph validate the need to analyse changes in transport accessibility, especially for flood hazard areas at many spatial scales. It is also necessary to carry out regular updates in order to follow developments to the transport network, changes in the number, distribution, and strength of traffic generators, and the features of the disaster itself (e.g., potential extents of the area affected). Accurate and detailed results from such analyses will allow us to formulate and then implement procedures in a timely fashion that govern transport flows at various spatial levels. If improvements to traffic organisation are developed well in advance and combined with the appropriate channels of information for network users to be swiftly notified, it will take less time to return the system of road transport to its original state. It is the operators of the Intelligent Transport System who should get involved on a regional and national scale, as they have access to a range of tools to communicate with travellers, to send them warnings of disturbances within the road network and real-time advice on how to avoid them. On a regional and national scale, it gives operators the possibility to shape desired transport behaviours in emergency situations. Besides the operating strategies and plans developed by transport administrators and organisers, at a local scale it is also advisable to use the returned results and research methodology to compile information advice for residents of flood hazard areas and their immediate vicinity. At this level, if a flood directly and suddenly strikes a local community, a key role is attributed to well-drilled behaviours that would allow residents to choose the best route at the right time and using the most appropriate mode of transport.

Given that floods cannot be totally avoided (and, sooner or later, will affect an area for which the author conducted his simulations), it is imperative that constant steps are taken aimed at reducing the number of traffic generators in these areas. In this respect, it also seems necessary to develop and then strictly enforce coherent laws regulating land use and management of flood hazard areas.

A valuable supplement to the current management policy on flood hazard areas – also with operations and development of the road infrastructure in mind – would be to take into consideration the circumstances under which flood coverage may expand to incorporate territories the development of which had never before been conditioned by disaster-related factors. Global changes of the natural environment combined with local land use and development may lead to a situation where the extent of 1% flood hazard areas will expand to include territories that are currently at 0.2% risk of flooding. Such lands, customarily perceived as completely safe, are characterised by an entirely different profile of land use, and their ongoing intensive development may result in increased costs from loss and damage in the event of a flood. Therefore, early recognition of a possible flood hazard could allow us to develop solutions that would not compromise the economic potential of such areas, while still taking into account the hazard itself. It would be useful to take into account historical data on past land-use in areas where similar circumstances occurred, which may be useful in prognosing the future directions of changes and could signal the need for possible modifications of legislation to counteract undesired practices in such areas.

SPIS LITERATURY I MATERIAŁÓW ŹRÓDŁOWYCH

Abdullah, N.S. & Hua, T.K. (2017). *Using ford-fulkerson algorithm and max flow-min cut theorem to minimize traffic congestion in Kota Kinabalu, Sabah*. „Journal of Information System and Technology Management", 2(4), 18–34.

Adams, T.M., Bekkem, K.R., & Toledo-Durán, E.J. (2012). *Freight resilience measures*. „Journal of Transportation Engineering", 138(11), 1403–1409.

Adamson, M. (2018). *Flood risk management in Europe: the EU 'Floods' directive and a case study of Ireland*. „International Journal of River Basin Management", 16(3), 261–272.

Adger, W.N. (2006). *Vulnerability*. „Global Environmental Change", 16(3), 268–281.

Aerts, J.C.J.H., Botzen, W.J., Clarke, K., Cutter, S.L., Michel-Kerjan, E., Surminski, S., & Kunreuther, H. (2018). *Including human behavior in flood risk assessment*. „Nature Climate Change", 8, 193–199.

Alcántara-Ayala, I. (2002). *Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries*. „Geomorphology", 47(2–4), 107–124.

Antoniou, E.A., Stuyfzand, P.J., & van Breukelen, B.M. (2013). *Reactive transport modeling of an aquifer storage and recovery (ASR) pilot to assess long-term water quality improvements and potential solutions*. „Applied Geochemistry", 35, 173–186.

Asbjørnslett, B.E., & Rausand, M. (1999). *Assess the vulnerability of your production system*. „Production Planning and Control", 10(3), 219–229.

Badanie pilotażowe zachowań komunikacyjnych ludności w Polsce (2015). Główny Urząd Statystyczny.

Bajorek, J. (2001). *Wdrażanie rozwiązań proponowanych w planach: założenia i problemy praktyczne*. „Gospodarka Wodna", 8, 337–338.

Balijepalli, C., & Oppong, O. (2014). *Measuring vulnerability of road network considering the extent of serviceability of critical road links in urban areas*. „Journal of Transport Geography", 39, 145–155.

Banister, D.J. (2014). *Transport and Accessibility*. Progress in Rural Geography (Routledge Revivals), 130.

Bank Danych Lokalnych, Główny Urząd Statystyczny.

Barceló, J., Grzybowska, H., & Pardo, S. (2005). *Combining vehicle routing models and microscopic traffic simulation to model and evaluating city logistics applications*. The proceedings of the 16th mini-EURO conference and 10th meeting of EWGT, Italy.

Barczyk, A. (1999). *Przebieg wezbrania w dorzeczu Wisły*. W: J. Grela, H. Słota, J. Zieliński. (red.) *Dorzecze Wisły monografia powodzi lipiec 1997*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 45–72.

Barć, M. (2017). *Zarządzanie ewakuacją ludności i mienia podczas zagrożeń niemilitarnych przez oddziały i pododdziały Sił Zbrojnych RP*. „Roczniki Ekonomii i Zarządzania", 45(2), 61–78.

Barker, K., Ramirez-Marquez, J.E., & Rocco, C.M. (2013). *Resilience-based network component importance measures*. „Reliability Engineering & System Safety", 117, 89–97.

Barmpounakis, E. & Geroliminis, N. (2020). *On the new era of urban traffic monitoring with massive drone data: The pNEUMA large-scale field experiment*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 111, 50–71.

Baroud, H., Barker, K., Ramirez-Marquez, J.E., & Rocco, C.M. (2014a). *Importance measures for inland waterway network resilience*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 62(1), 55–67.

Barszcz, M., Theobald, S., & Rötz, A. (2013). *Metodyka planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla zlewni Fuldy w Niemczech*. „Gospodarka Wodna", 1, 21–24.

Bartosiewicz, B., & Pielesiak, I. (2012). *Powiązania transportowe w Łódzkim Obszarze Metropolitalnym*. „Studia KPZK".

Bartuška, L., Čejka, J., & Caha, Z. (2015). *The application of mathematical methods to the determination of transport flows*. „NAŠE MORE: znanstveno-stručni časopis za more i pomorstvo", 62(3 Special Issue), 91–96.

Bateman, I.J., Garrod, G.D., Brainard, J.S., & Lovett, A.A. (1996). *Measurement issues in the travel cost method: a geographical information systems approach*. „Journal of Agricultural Economics", 47(1–4), 191–205.

Bateman, I.J., Lovett, A.A., & Brainard, J.S. (1999). *Developing a methodology for benefit transfers using geographical information systems: modelling demand for woodland recreation*. „Regional Studies", 33(3), 191–205.

Baza Danych Obiektów Topograficznych, Główny Urząd Geodezji i Kartografii.

Baza danych wektorowych prezentujących sieć drogową Polski i krajów sąsiadujących, OpenStreetMap.

Berdica, K. (2002). *An intrduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*. „Transport Policy", 9(2), 117–127.

Berezowski, S. (1975). *Zarys geografii komunikacji*. Państwowe Wydawn. Naukowe.

Bergen, S.D., Bolton, S.M., & Fridley, J.L. (2001). *Design principles for ecological engineering*. „Ecological Engineering", 18(2), 201–210.

Berle, Ø, Norstad, I., & Asbjørnslett, B.E. (2013). *Optimization, risk assessment and resilience in LNG transportation systems*. Supply Chain Management: An International Journal, 18(3), 253–264.

Beuthe, M., Jourquin, B., Geerts, J.F., & à Ndjang'Ha, C.K. (2001). *Freight transportation demand elasticities: a geographic multimodal transportation network analysis*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 37(4), 253–266.

Bhamra, R., Dani, S., & Burnard, K. (2011). *Resilience: The concept, a literature review and future directions*. „International Journal of Production Research", 49(18), 5375–5393.

Biedroń, I., Bogdańska-Warmuz, R. & Kwiecień, M. (2011). *Szkody i straty powodziowe w dorzeczu Wisły*. W: M. Maciejewski, M.S. Ostojski, T. Walczykiewicz (red.)

Dorzecze Wisły monografia powodzi czerwiec 2010. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 171–182.

Bielecka, E., & Bober, A. (2013). *Reliability Analysis of Interpolation Methods in Travel Time Maps – The Case of Warsaw*. „Geodetski vestnik", 57(2), 299–312.

Bielecka, E., & Filipczak, A. (2010). *Zasady opracowywania map dostępności*. „Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics", 8(6 (42)), 29–38.

Bieńczak, M., Fierek, S., Kiciński, M., Kwaśnikowski, J., & Sawicki, P. (2014). *Regionalny model podróży na potrzeby planu zrównoważonego rozwoju transportu publicznego*. „Logistyka", 4, 1673–1682.

Bieńczak, M., Fierek, S., Kiciński, M., Kwaśnikowski, J., & Sawicki, P. (2015). *Planowanie zrównoważonego rozwoju transportu publicznego w oparciu o regionalny model podróży*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej: Transport, 105, 5–20.

Bland, S.H., O'Leary, E.S., Farinaro, E., Jossa, F., Krogh, V., Violanti, J.M., & Trevisan, M. (1997). *Social network disturbances and psychological distress following earthquake evacuation*. „The Journal of Nervous and Mental Disease", 185(3), 188–195.

Blockley, D., Godfrey, P., & Agarwal, J. (2012). *Infrastructure resilience for high-impact low-chance risks*. „Proceedings of the ICE – Civil Engineering", 165(CE6), 13–19.

Bobiński, E., & Żelaziński, J. (1996). *Czy można przerwać błędne koło ochrony przeciwpowodziowej?*. „Gospodarka Wodna", 4, 99–107.

Bochniak, A., & Krzaczek, P. (2015). *Wpływ zmian infrastruktury drogowej na ruch lokalny na trasie Lublin-Końskowola*. „Logistyka", 5 (CD 1), 63–70.

Boin, A., & McConnell, A. (2007). *Preparing for critical infrastructure breakdowns: the limits of crisis management and the need for resilience*. „Journal of Contingencies and Crisis Management", 15(1), 50–59.

Borkowski, A. (2014). *Numeryczne modele wysokościowe i produkty pochodne*. W: P. Wężyk (red.) *Podręcznik dla uczestnikówszkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. GUGiK, Warszawa, 110–131.

Borowska-Stefańska, M. (2014). *Ocena ryzyka powodziowego jako element wdrażania Dyrektywy Powodziowej – przykład Uniejowa*. „Problemy Rozwoju Miast", 3, 5–11.

Borowska-Stefańska, M. (2015a). *Flood risk assessment of Łódź province communes*. „Humanities and Social Sciences", 20(22), 9–23.

Borowska-Stefańska, M. (2015b). *Zagospodarowanie terenów zagrożonych powodziami w województwie łódzkim*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

Borowska-Stefańska, M. (2016). *Metodologia oceny ryzyka powodziowego gmin województwa łódzkiego*. „Prace Geograficzne", 147, 119–144.

Borowska-Stefańska, M., & Wiśniewski, S. (2018). *Changes in transport accessibility as a result of flooding: a case study of the Mazovia Province (Eastern Poland)*. „Environmental Hazards", 17(1), 56–83.

Borowska-Stefańska, M., Domagalski, A., & Wiśniewski, S. (2018). *Changes concerning commute traffic distribution on a road network following the occurrence of a natural disaster–The example of a flood in the Mazovian Voivodeship (Eastern Poland)*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 65, 116–137.

Borowska-Stefańska, M., Kobojek, S., Kowalski, M., Lewicki, M., Tomalski, P., & Wiśniewski, S. (2020b). *Changes in the spatial development of flood hazard areas in*

Poland between 1990 and 2018 in the light of legal conditions. „Land Use Policy", 102, 105–274.

Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., & Wiśniewski, S. (2019a). *The Measurement of Mobility-Based Accessibility – The Impact of Floods on Trips of Various Length and Motivation*. „ISPRS International Journal of Geo-Information", 8(12), 534.

Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., & Wiśniewski, S. (2019c). *Wewnętrzna samochodowa dostępność transportowa Łodzi w świetle pomiarów z Inteligentnych Systemów Transportowych*. „Prace Geograficzne", 159, 7–24.

Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., & Wiśniewski, S. (2020a). *On determining the weight of edges in map-representing graphs – applications of heuristic methods in planning escape routes*. „Journal of Traffic and Transportation Engineering" (English Edition), w druku.

Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., Turoboś, F., & Wiśniewski, S. (2019b). *Optimisation patterns for the process of a planned evacuation in the event of a flood*. „Environmental Hazards", 18(4), 335–360.

Borowska-Stefańska, M., Wiśniewski, S., & Andrei, M.T. (2017). *Accessibility to places of evacuation for inhabitants of flood-prone areas in Mazovia Province*. „Geomatics and Environmental Engineering", 11, 31–37.

Brijs, T., Karlis, D., & Wets, G. (2008). *Studying the effect of weather conditions on daily crash counts using a discrete time-series model*. „Accident Analysis & Prevention", 40(3), 1180–1190.

Brown, J.D., & Damery, S.L. (2002). *Managing flood risk in the UK: towards an integration of social and technical perspectives*. „Transactions of the institute of British Geographers", 27(4), 412–426.

Brown, R., Curley, J., & Smith, B. (2014). *Transport Resilience Review: A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*. Department for Transport: London (UK).

Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., & Von Winterfeldt, D. (2003). *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*. „Earthquake spectra", 19(4), 733–752.

Bryndal, T. (2014). *Parametry hydrologiczne wezbrań opadowo-nawalnych w polskiej, słowackiej i rumuńskiej części Karpat*. „Przegląd Geograficzny", 86(1), 5–21.

Buczek, A., & Nachlik, E. (2011). *Wykorzystanie BDOT w ocenie ryzyka powodziowego – problemy integracji informacji przestrzennej*. Roczniki Geomatyki – Annals of Geomatics, 9(6 (50), 77–87.

Budyn, M., & Sowa, A. (2016). *Skutki zmiany organizacji ruchu na wybranym skrzyżowaniu w Krakowie*. „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe", 17, 560–565.

Bul, R. (2016). *Wpływ infrastruktury transportowej na zmiany dostępności czasowej Poznania z obszaru województw a wielkopolskiego w latach 2010–2016*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 19(2), 16–30.

Burnewicz, J. (2017). *Economic paradoxes in transport*. „Transport Economics and Logistics", 67, 11–21.

Byczkowski, A. (2005). *W sprawie definicji powodzi*. „Przegląd Geofizyczny", 1–2, 73–76.

Caceres, N., Wideberg, J.P., & Benitez, F.G. (2008). *Review of traffic data estimations extracted from cellular networks*. „IET Intelligent Transport Systems", 2(3), 179–192.

Chalfen, M., & Kamińska, J. (2013). *Modelowanie przestrzennego rozkładu gęstości ruchu samochodowego w mieście o niejednorodnej prędkości przejazdu*. „TTS Technika Transportu Szynowego", 20, 665–674.

Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., & Lee, M. (2007). *Network-based accessibility measures for vulnerability analysis of degradable transportation networks*. „Networks and Spatial Economics", 7(3), 241–256.

Chen, L., & Miller-Hooks, E. (2012). *Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport*. „Transportation Science", 46(1), 109–123.

Chen, X., Kwan, M.P., Li, Q., & Chen, J. (2012). *A model for evacuation risk assessment with consideration of pre-and post-disaster factors*. „Computers, Environment and Urban Systems", 36(3), 207–217.

Chen, X., Meaker, J.W., & Zhan, F.B. (2006). *Agent-based modeling and analysis of hurricane evacuation procedures for the Florida Keys*. „Natural Hazards", 38(3), 321.

Chen, Z., Liu, X.C., & Zhang, G. (2016). *Non-recurrent congestion analysis using data-driven spatiotemporal approach for information construction*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 71, 19–31.

Chojnicki, Z. (1961). *Analiza przepływów towarowych w Polsce w układzie międzywojewódzkim*. Polska Akademia Nauk. Komitet Przestrzennego Zagospodarowania Kraju.

Chung, Y. (2012). *Assessment of non-recurrent congestion caused by precipitation using archived weather and traffic flow data*. „Transport Policy", 19(1), 167–173.

Church, R.L., & Cova, T.J. (2000). *Mapping evacuation risk on transportation networks using a spatial optimization model*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 8(1–6), 321–336.

Clarke, L. (1999). *Mission improbable: Using fantasy documents to tame disaster*. University of Chicago Press.

Condeço-Melhorado, A., Puebla, J.G., & Palomares, J.G. (2013). *Influence of distance decay on the measurement of spillover effects of transport infrastructure: a sensitivity analysis*. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, 13(1), 22–47.

Cook, B.R., & Zurita, M.D.L.M. (2016). *Planning to learn: an insurgency for disaster risk reduction (DRR)*. „International Journal of Disaster Risk Reduction", 19, 265–272.

Cools, M., Moons, E., & Wets, G. (2010). *Assessing the impact of weather on traffic intensity*. „Weather, Climate, and Society", 2(1), 60–68.

Cox, A., Prager, F., & Rose, A. (2011). *Transportation security and the role of resilience: A foundation for operational metrics*. „Transport Policy", 18(2), 307–317.

Cresswell, T. (2011). *Mobilities I: catching up*. „Progress in Human Geography", 35(4), 550–558.

Cui, M., & Levinson, D. (2018). *Full cost accessibility*. „Journal of Transport and Land Use", 11(1), 661–679.

Czaban, S. (2008). *Powodzie w Europie w latach 1985–2007*. „Infrastruktura i Ekologia terenów wiejskich", 7, 243–254.

Czaja, S.W. (2010). *Zmiany krajobrazów doliny Małej Wisły w obrębie Kotliny Oświęcimskiej przez wezbrania powodziowe w XVIII–XX wieku*. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, 13, 29–40.

Czerechowski, P. (2015). *Wybrane problemy ewakuacji ludności*. Zeszyty Naukowe Ruchu Studenckiego, 1, 71–78.

Dalziell, E.P., & McManus, S.T. (2004). *Resilience, vulnerability, and adaptive capacity: implications for system performance*.

Dane wysokościowe jako wsparcie procesu projektowania i realizacji inwestycji drogowych, GDDKiA.

Dash, N., & Gladwin, H. (2007). *Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household*. „Natural Hazards Review", 8(3), 69–77.

Dawson, R.J. (2016) *Infrastructure. UK Climate Change Risk Assessment Evidence Report*. Report prepared for the Adaptation Sub-Committee of the Committee on Climate Change, London.

Dąbrowska-Loranc, M., Wojsz, T., Bany, P., Jankowska-Karpa, D., Sicińska, K., Wnuk, A., Zielińska, A., Nadowski, A., Szyprowska, M., & Zieliński, J. (2015). *Prędkość pojazdów w Polsce w 2015 r*. Sesja I. Warszawa.

de Oliveira, E.L., da Silva Portugal, L., & Junior, W.P. (2014). *Determining critical links in a road network: vulnerability and congestion indicators*. „Procedia-Social and Behavioral Sciences", 162, 158–167.

De-Los-Santos, A., Laporte, G., Mesa, J.A., & Perea, F. (2012). *Evaluating passenger robustness in a rail transit network*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 20(1), 34–46.

Deng, B., Denman, S., Zachariadis, V., & Jin, Y. (2015). *Estimating traffic delays and network speeds from lowfrequency GPS taxis traces for urban transport modelling*. „European Journal of Transport and Infrastructure Research", 15(4).

Deng, Y., Chen, Y., Zhang, Y., & Mahadevan, S. (2012). *Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment*. „Applied Soft Computing", 12(3), 1231–1237.

D'este, G.A., & Taylor, M.A. (2003). *Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks*. Emerald Group Publishing Limited.

Diemientiew, G. (2018). *Ekstremalne zjawiska pogodowe w Polsce w dobie zmian klimatycznych na przykładzie powodzi i silnych wiatrów*. Kultura Bezpieczeństwa. Nauka–Praktyka–Refleksje, 32, 79–100.

Dijkstra, E.W. (1959). *A note on two problems in connexion with graphs*. „Numerische mathematik", 1(1), 269–271.

Do, M., & Jung, H. (2018). *Enhancing road network resilience by considering the performance loss and asset value*. „Sustainability", 10(11), 4188.

Dojazdy do pracy w Polsce (2014), Główny Urząd Statystyczny.

Domański R. (2002). *Gospodarka przestrzenna*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Drabicki, A., Szarata, A., & Kucharski, R. (2018). *Analiza symulacyjna postulowanych zmian w ciągu III oraz II obwodnicy Krakowa i ich oddziaływania na układ drogowy*

miasta pod kątem potencjalnego zjawiska ruchu wzbudzonego. „Transport Miejski i Regionalny", 7, 18–26.

Drabicki, A., Szarata, A., & Kucharski, R. (2019). *Modelowanie skutków zjawiska wzbudzenia (tłumienia) ruchu w analizach efektywności miejskich inwestycji drogowych*. „Annały Inżynierii Ruchu i Planowania Transportu", 3(XII), 183–196.

Drobot, S.D., Benight, C., & Gruntfest, E.C. (2007). *Risk factors for driving into flooded roads*. „Environmental Hazards", 7(3), 227–234.

Drozdowska, K., & Grabowski, L. (2014). *Sytuacje kryzysowe na obiektach komunikacyjnych podczas wielkich powodzi. Przykłady zniszczeń wybranych obiektów i ważniejsze skutki zakłóceń funkcjonowania społecznego*. „Logistyka", 6, 3247–3255.

Du, E., Cai, X., Sun, Z., & Minsker, B. (2017). *Exploring the role of social media and individual behaviors in flood evacuation processes: An agent-based modeling approach*. „Water Resources Research", 53(11), 9164–9180.

Dubicki, A. (1999). *Ocena rozmiaru powodzi 1997 roku na tle powodzi historycznych*. W: A. Dubicki, H. Słota, J. Zieliński (red.). *Dorzecze Odry: monografia powodzi lipiec 1997*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 119–124.

Dubicki, A. (1999). *Rzeczowe i finansowe straty powodziowe*. W: A. Dubicki, H. Słota, J. Zieliński (red.). *Dorzecze Odry: monografia powodzi lipiec 1997*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 177–190.

Dybicz, T. (2001). *Modelowanie ruchu generowanego przez centra usługowo-handlowe*. „Inżynieria komunikacyjna", 4, 15-22.

Dybicz, T. (2009). *Modelowanie i symulacje ruchu, rys historyczny i aktualnie stosowane oprogramowanie*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej, Oddział w Krakowie, 90, 57–73.

Dybicz, T. (2014). *Odwzorowanie fenomenu dwóch przepustowości w mikrosymulacyjnym modelu ruchu w programie Vissim*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, 1, 41–56.

Dynowska, I. (1994). *Reżim odpływu rzecznego*. Mapa 1: 2 500 000, 32–33.

Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (Dz. Urz. UE L 327 z dnia 22 grudnia 2000 r., s. 1, ze zm.).

Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodziowego i zarządzania nim (tzw. Dyrektywa Powodziowa) (Dz. Urz. UE L 288 z dnia 6 listopada 2007 r., s. 27).

Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/105/WE z dnia 16 grudnia 2008 r. w sprawie środowiskowych norm jakości w dziedzinie polityki wodnej, zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy Rady 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG i 86/2.

Dziadek, S. (1986). *Sieć komunikacyjna w ośrodkach zurbanizowanych*.

Dziadek, S. (1991). *Systemy transportowe ośrodków zurbanizowanych*. Państwowe Wydawn. Nauk.

Dzieszko, P., Bartkowiak, K., & Giełda-Pinas, K. (2013). *Agenci w modelowaniu agentowym (ABM)*. „Roczniki Geomatyki", 11, 17–23.

Eckert, M. (1925). *Kartenwissenschaft. Forschungen Und Grundlagen zu einer Kartographie ais Wissenschaft*. Bd. 2., De Gruyter, Berlin.

Eikenberg, C. (1998). *Journalist's manual on disaster management: 1998*. German IDNDR Committee for Natural Disaster Reduction.

Einarsson, S., & Rausand, M. (1998). *An approach to vulnerability analysis of complex industrial systems*. „Risk Analysis", 18(5), 535–546.

Esm, S.O., Oam, P.C., & Davies, B. (2010). *Timeline modelling of flood evacuation operations*. „Procedia Engineering", 3, 175–187.

Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2014a). *A mathematical framework for quantifying and optimizing protective actions for civil infrastructure systems*. „Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering", 29, 572–589.

Faturechi, R., & Miller-Hooks, E. (2014b). *Measuring the performance of transportation infrastructure systems in disasters: A comprehensive review*. „Journal of Infrastructure Systems", 21(1), 1–15.

Fellendorf, M., & Vortisch, P. (2010). *Microscopic traffic flow simulator VISSIM*. In Fundamentals of traffic simulation (63–93). Springer, New York, NY.

Fierek, S., & Zak, J. (2012). *Planning of an integrated urban transportation system based on macro-simulation and MCDM/A methods*. „Procedia-Social and Behavioral Sciences", 54, 567–579.

Fiksel, J. (2003). *Designing resilient, sustainable systems*. „Environmental Science and Technology", 37(23), 5330–5339.

Flooding in Wales: A National Assessment of Flood Risk. UK: Environment Agency Wales, 2009.

Ford Jr, L.R., & Fulkerson, D.R. (2015). *Flows in networks*. Princeton university press.

Forman, R., Sperling, D., Bissonette, J., Clevenger, A.P., Cutshall, C., Dale, V., & Jones, J. (2009). *Ekologia dróg*. Związek Stowarzyszeń „Polska Zielona Sieć".

Fox, I.B. (2003). *Introduction to Flood Management–Getting ADB's Water Policy to Work*. The Impact of Floods, Drought, and Other Water Disasters on the Poor.

Francis, R., & Bekera, B. (2014). *A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems*. Reliability Engineering & System Safety, 121, 90–103.

Franczak, P. (2014). *Rola wielkich wezbrań powodziowych w kształtowaniu życia ludności w zlewni górnej Skawy od XV wieku*. W: P. Krąż (red.) *Współczesne problemy i kierunki badawcze w geografii*, 2, 117–129.

Franczak, P., Listwan-Franczak, K., Działek, J., & Biernacki, W. (2016). *Planowanie przestrzenne na obszarach zalewowych w zlewniach górskich różnego rzędu w dorzeczu górnej Wisły oraz górnej i środkowej Odry*. Prace i Studia Geograficzne, 61(4), 25–45.

Fröhlich, P., & Axhausen, K.W. (2002). Development of Car-based Accessibility in Switzerland from 1950 Through 2000: First Results: 2nd Swiss Transport Research Conference, Monte Verità, Ascona, March 20–22, 2002. Arbeitsberichte Verkehrs--und Raumplanung, 111.

Fröhlich, P., & Axhausen, K.W. (2004). *Sensitivity of accessibility measurements to the underlying transport network model*. Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung, 245.

Fu, L., Sun, D., & Rilett, L.R. (2006). *Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: state of the art*. „Computers & Operations Research", 33(11), 3324–3343.

Fu, R., Li, Z., Sun, Q., & Wang, C. (2019). *Human-like car-following model for autonomous vehicles considering the cut-in behavior of other vehicles in mixed traffic*. Accident „Analysis & Prevention", 132, 105–260.

Gaca, S., Suchorzewski, W., & Tracz, M. (2008). *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.

Gadziński, J. (2016). *Wpływ dostępności transportu publicznego na zachowania transportowe mieszkańców – przykład aglomeracji poznańskiej*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 19(1), 31–42.

Gadziński, J. (2018). *Perspectives of the use of smartphones in travel behaviour studies: Findings from a literature review and a pilot study*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 88, 74–86.

Gadziński, J., & Beim, M. (2009). *Dostępność przestrzenna lokalnego transportu publicznego w Poznaniu*. „Transport Miejski i Regionalny", 5, 10–16.

Gadziński, J., & Beim, M. (2010). *Dostępność czasowa celów podróży przy dojazdach lokalnym transportem publicznym w Poznaniu*. „Transport Miejski i Regionalny", 3, 9–13.

Gadziński, J., & Goras, E. (2019). *Jak zmieniła się codzienna ruchliwość mieszkańców polskich miast? 50 lat badań zachowań transportowych ludności w Polsce*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 22(4), 8–24.

Galton, F. (1881). *On the construction of isochronic Passage-Charts*. Proceedings of the Royal Geographical Society and Monthly Record of Geography, 3(11), 657–658.

Garnaut, R. (2008). *The Garnaut climate change review*. Cambridge, Cambridge.

Gdańskie badanie ruchu (2016).

Geertman, S.C., & Ritsema Van Eck, J.R. (1995). *GIS and models of accessibility potential: an application in planning*. International journal of geographical information systems, 9(1), 67–80.

Geroliminis, N., & Daganzo, C.F. (2007). *Macroscopic modeling of traffic in cities*. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, 07-0413.

Geurs, K. (2006). *Accessibility, Land Use and Transport: Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Developments and Policy Strategy*. Eburon Uitgeverij BV.

Geurs, K.T., & Ritsema van Eck, J.R. (2001). *Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transportation scenarios, and related social and economic impact*. RIVM rapport 408505006.

Geurs, K.T., & Van Wee, B. (2004). *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions*. „Journal of Transport Geography", 12(2), 127–140.

Gissing, A., Opper, S., Tofa, M., Coates, L., & McAneney, J. (2019), *Influence of road characteristics on flood fatalities in Australia*. Environmental Hazards, 1–12.

Głosińska, E. (2013). *Zastosowanie GIS w szacowaniu potencjalnych strat powodziowych w kontekście zagospodarowania obszarów zalewowych na przykładzie miast województwa zachodniopomorskiego*. „Roczniki Geomatyki", 11, 25–39.

Głosińska, E. (2014). *Spatial planning in floodplains for implementation by the Floods Directive in Poland*. „Geographia Polonica", 87(1), 127–142.

Goetz, A.R., & Szyliowicz, J.S. (1997). *Revisiting transportation planning and decision making theory: The case of Denver International Airport*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 31(4), 263–280.

Goldberg, A.V., & Tarjan, R.E. (1988). *A new approach to the maximum-flow problem*. „Journal of the ACM", 35(4), 921–940.

Goldberg, A.V., Kaplan, H., & Werneck, R.F. (2006). Reach for A*: Efficient point-to-point shortest path algorithms. 2006 Proceedings of the Eighth Workshop on Algorithm Engineering and Experiments (ALENEX) (129–143). Society for Industrial and Applied Mathematics.

Goliszek, S. (2014a). *Zmiany dostępności miejskim transportem zbiorowym w Lublinie w wyniku inwestycji infrastrukturalnych finansowanych z funduszy UE do roku 2020*. „Transport Miejski i Regionalny", 9, 15–21.

Goliszek, S. (2014b). *Poprawa dostępności miejskim transportem zbiorowym w Olsztynie w świetle inwestycji infrastrukturalnych z perspektywy UE 2014–2020*. „Transport Miejski i Regionalny", (5), 30–36.

Goliszek, S. (2016). *Zmiany dostępności komunikacyjnej transportem zbiorowym w Kielcach – badanie wpływu środków z perspektywy finansowej UE na lata 2014–2020*. „Transport Miejski i Regionalny", (2), 12–19.

Goliszek, S., & Połom, M. (2016a). *Dostępność komunikacyjna transportem zbiorowym w ośrodkach wojewódzkich Polski Wschodniej*. „TTS Technika Transportu Szynowego", 23, 20–29.

Goliszek, S., & Połom, M. (2016b). *Wpływ budowy nowej linii tramwajowej w Olsztynie na zmianę dostępności transportem zbiorowym*. „Acta Scientarum Polonorum Administratio Locorum", 15(3), 19–34.

Gołembska, E., & Szymczak, M. (2004). *Logistyka międzynarodowa*, 146. Poznań: Wyd. AE w Poznaniu.

Goyal, A., Mogha, P., Luthra, R., & Sangwan, N. (2014). *Path finding: A* or Dijkstra's?* „International Journal in IT & Engineering", 2(1), 1–15.

Grant-Muller, S. M., & Laird, J. J. (2007). *Costs of congestion: literature based review of methodologies and analytical approaches* (p. 79). Scottish Executive, Edinburgh.

Grela, J., Zieliński, J. & Słota, H. (red.) (1999). *Dorzecze Wisły: monografia powodzi lipiec 1997*. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Grochulski, J. (1975). *Hydrologiczno-ekonomiczne kryteria oceny wezbrań dla potrzeb ochrony przeciwpowodziowej*. „Gospodarka Wodna", 1, 14–22.

Gromek, P. (2014). *Aspekt społeczny analizy ryzyka ewakuacji ludności w obliczu klęski żywiołowej w Polsce*. „Prace i Studia Geograficzne", 53, 43–53.

Gromek, P., & Kozioł, J. (2015). *Wpływ samoewakuacji na wybrane parametry ruchu drogowego podczas masowej ewakuacji ludności* – część 1. Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 53(1), 58–70.

Gromek, P., Gawroński, W., & Wróbel, R. (2014). *Wpływ samoewakuacji na masową ewakuację ludności w Polsce – wprowadzenie do problematyki*. Zeszyty Naukowe SGSP/Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 51(3), 70–83.

Gunes, A.E., & Kovel, J.P. (2000). *Using GIS in emergency management operations*. „Journal of Urban Planning and Development", 126(3), 136–149.

Gutiérrez, J. (2001). *Location, economic potential and daily accessibility: an analysis of the accessibility impact of the high-speed line Madrid–Barcelona–French border*. „Journal of Transport Geography", 9(4), 229–242.
Gutiérrez, J., & Urbano, P. (1996). *Accessibility in the European Union: the impact of the trans-European road network*. „Journal of Transport Geography", 4(1), 15–25.
Gutiérrez, J., Condeço-Melhorado, A., & Martín, J.C. (2010). *Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment*. „Journal of Transport Geography", 18(1), 141–152.
Guzik, R. (2011). *Dostępność komunikacyjna wybranych miast Małopolski 2011–2020*. Transport availability of selected towns of Małopolska, 2020.
Guzik, R. (2014). *Dostępność transportowa wybranych miast Małopolski 2014–2023*: raport z badania dostępności w 2014 roku wraz z prognozą dostępności w latach 2020 i 2023.
Guzik, R. (2016). *Transport publiczny a dostępność na obszarach wiejskich Szwajcarii*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 19(4), 49–61.
Guzman, L.A., Oviedo, D., & Rivera, C. (2017). *Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region*. „Journal of Transport Geography", 58, 236–246.
Haimes, Y.Y. (2009). *On the definition of resilience in systems*. „Risk Analysis", 29(4), 498–501.
Halama, A. (2013a). *Polityka przestrzenna na terenach zalewowych w małych miastach*. „Studia Ekonomiczne", 144, 311–322.
Halama, A. (2013b). *Zrównoważony rozwój małych miast w aspekcie zagrożenia powodziowego*. Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Socio-Oeconomica, 15(3), 255–269.
Hamilton, K., Price, S., Keech, J.J., Peden, A.E., & Hagger, M.S. (2018). *Drivers' experiences during floods: Investigating the psychological influences underpinning decisions to avoid driving through floodwater*. „International Journal of Disaster Risk Reduction", 28, 507–518.
Hannam, K., Sheller, M., & Urry, J. (2006). *Mobilities, immobilities and moorings*. „Mobilities", 1(1), 1–22.
Hassinger, H., *Beiträge zur Siedlungs– und Verkehrs-Geographie von Wien*, Mitt. d. K.K. Geogr. Ges. in Wien, 53, 1910, No. 1, 5–88.
Helbing, D., Hennecke, A., Shvetsov, V., & Treiber, M. (2002). *Micro-and macro-simulation of freeway traffic*. „Mathematical and Computer Modelling", 35(5–6), 517–547.
Hensher, D. A., & Button, K.J. (2000). Handbook of transport modelling (No. 1).
Holl, A. (2004). *Manufacturing location and impacts of road transport infrastructure: empirical evidence from Spain*. „Regional Science and Urban Economics", 34(3), 341–363.
Holling, C.S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems*. Annual Review of Ecology and Systematics, 4, 1–23.
Hossain, M.S., & Davies, C.G. (2004). *A GIS to reduce flood impact on road transportation systems*. In ESRI International User Conference. San Diego, California.

Hranac, R., Sterzin, E.D., Krechmer, D., Rakha, H., & Farzaneh, M. (2006). *Empirical studies on traffic flow in inclement weather* (No. FHWA-HOP-07-073). United States. Federal Highway Administration. Road Weather Management Program.

Hsu, Y.T., & Peeta, S. (2014). *Risk-based spatial zone determination problem for stage-based evacuation operations*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 41, 73–89.

Hunt, J.D., Kriger, D.S., & Miller, E.J. (2005). *Current operational urban land-use–transport modelling frameworks: A review*. „Transport Reviews", 25(3), 329–376.

Ilba, M. (2018). *Ryzyko powodziowe miasta Krakowa w kontekście polityki planowania przestrzennego*. „Świat Nieruchomości", 3(105), 61–67.

Immers, B., Yperman, I., Stada, J., & Bleukx, A. (2004). *Reliability and robustness of transportation networks; problem survey and examples*. In proceedings of the NECTAR Cluster Meeting on Reliability of Networks.

Instrukcja w sprawie zasad ewakuacji ludności, zwierząt i mienia na wypadek masowego zagrożenia (2008). Szef Obrony Cywilnej Kraju. Warszawa.

Jacobs-Crisioni, C., & Koomen, E. (2017). *Population growth, accessibility spillovers and persistent borders: Historical growth in West-European municipalities*. „Journal of Transport Geography", 62, 80–91.

Jacobs-Crisioni, C., e Silva, F.B., Lavalle, C., Baranzelli, C., Barbosa, A., & Castillo, C.P. (2016). *Accessibility and territorial cohesion in a case of transport infrastructure improvements with changing population distributions*. „European Transport Research Review", 8(1), 9.

Jacyna, M. (2009). *Modelowanie i ocena systemów transportowych*, Oficyna Wydaw. Politechnika Warszawska. Warszawa.

Jamroz, K., Birr, K., Grulkowski, S., Kalkowski, K., & Budziszewski, T. (2014). *Analiza możliwości wzrostu udziału transportu zbiorowego w wojewódzkich przewozach pasażerskich na przykładzie województwa pomorskiego*. „Transport Miejski i Regionalny", 8, 11–18.

Jarzębińska, T. (2006). *Zagrożenie powodziowe. Vademecum Ochrony Przeciwpowodziowej*. Gdańsk.

Jąkała, M., Michno, M., (2004). *Budowa systemów wieloagentowych*. W: *Techniki wnioskowania z użyciem rozproszonej inteligencji*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

Jeihani, M., & Ardeshiri, A. (2017). *Transportation Network Modeling and Calibration*. Momentum Press.

Jeleński, J. (2004). *Droga i jej odwodnienie jako trwałe uszkodzenie doliny i łożyska cieku*. Zesz. Nauk.-Techn. SITK RP, Oddział w Krakowie, 112, 115–135.

Jenelius, E., & Mattsson, L.G. (2006). *Developing a methodology for road network vulnerability analysis*. „Nectar Cluster", 1, 1–9.

Jenelius, E., & Mattsson, L.G. (2012). *Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(5), 746–760.

Jenelius, E., Petersen, T., & Mattsson, L.G. (2006). *Importance and exposure in road network vulnerability analysis*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 40(7), 537–560.

Jia, Y., Wu, J., & Xu, M. (2017). *Traffic flow prediction with rainfall impact using a deep learning method*. „Journal of Advanced Transportation", 1–10.

Jonkman, S.N. (2005). *Global perspectives on loss of human life caused by floods*. „Natural Hazards", 34(2), 151–175.

Jonkman, S.N., Vrijling, J.K., & Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2008). *Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method*. „Natural Hazards", 46(3), 353–389.

Junming, F., Taowei, Y., & Erpu, Y. (2013). *The Study of City Circle's Interval Traffic Forecast based on Volume Spatial Contact Model*. „Procedia-Social and Behavioral Sciences", 96, 1721–1727.

Karoń, G., & Łazarz, B. (2010). *Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu*. „Logistyka", 4, 1–11.

Karoń, G., & Mikulski, J. (2011). *Transportation systems modelling as planning, organisation and management for solutions created with ITS*. In International Conference on Transport Systems Telematics (277–290). Springer, Berlin, Heidelberg.

Karoń, G., Janecki, R., & Sobota, A. (2010). *Modelowanie ruchu w konurbacji górnośląskiej – sieć publicznego transportu zbiorowego*. „Zeszyty Naukowe". Transport/Politechnika Śląska, 35–42.

Karoń, G., Żochowska, R., & Sobota, A. (2014). *Oczekiwana płynność ruchu w gęstych sieciach zatłoczonych – wąskie gardło sieci transportowej aglomeracji*. „Logistyka", 6, 5234–5243.

Kaufmann, V. (2002). *Re-thinking mobility*.

Keay, K., & Simmonds, I. (2005). *The association of rainfall and other weather variables with road traffic volume in Melbourne, Australia*. Accident analysis & Prevention, 37(1), 109–124.

Kendra, J.M., & Wachtendorf, T. (2003). *Elements of resilience after the world trade center disaster: reconstituting New York City's Emergency Operations Centre*. „Disasters", 27(1), 37–53.

Kieć, M., Tracz, M., & Gaca, S. (2012). *Design of cross-section on roads through built-up areas*. „Archives of Civil Engineering", 3, 243–257.

Kim, S., & Yeo, H. (2016). *A flow-based vulnerability measure for the resilience of urban road network*. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 218, 13–23.

Kim, S., Lewis, M.E., & White, C.C. (2005). *Optimal vehicle routing with real-time traffic information*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 6(2), 178–188.

Klemm, K. (2013). *Kryterium komfortu człowieka w terenach zabudowanych*. „Budownictwo i Architektura", 12(2), 127–133.

Knoop, V.L., Snelder, M., van Zuylen, H.J., & Hoogendoorn, S.P. (2012). *Link-level vulnerability indicators for real-world networks*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46(5), 843–854.

Koetse, M.J., & Rietveld, P. (2009). *The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 14(3), 205–221.

Komar, Z., & Wołek, C. (1994). *Inżynieria Ruchu Drogowego – Wybrane Zagadnienia*. Politechnika Wrocławska.

Komornicki, T. (1999). *Granice Polski. Analiza zmian przenikalności w latach 1990–1996*, „Geopolitical Studies", 5, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.

Komornicki, T. (2019a). *Efektywny czy równomierny? Jakiemu rozwojowi służą inwestycje transportowe w Polsce? Równość czy efektywność rozwoju: Eseje inspirowane dorobkiem naukowym Grzegorza Gorzelaka*, 132.

Komornicki, T. (2019b). *Polska sprawiedliwa komunikacyjnie*. Fundacja im. Stefana Batorego.

Komornicki, T., Bański, J., Śleszyński, P., Rosik, P., Swiątek, D., Czapiewski, K., Bednarek-Szczepańska, M., Stępniak, M., Mazur, M., Wiśniewski, R. & Solon, B. (2010). *Ocena wpływu inwestycji infrastruktury transportowej realizowanych w ramach polityki spójności na wzrost konkurencyjności regionów (w ramach ewaluacji ex post npr 2004–2006)*, IGiPZ PAN.

Komornicki, T., Rosik, P., & Stępniak, M. (2011). *Dostępność transportowa w Polsce Wschodniej*, ekspertyza wykonana na zlecenie Ministerstwa Rozwoju Regionalnego.

Komornicki, T., Rosik, P., Stępniak, M., Goliszek, S. & Kowalczyk, K. (2017). *Oszacowanie oczekiwanych rezultatów interwencji za pomocą miar dostępności transportowej dostosowanych do potrzeb dokumentów strategicznych i operacyjnych dot. perspektywy finansowej 2014–2020 (aktualizacja)*, IGiPZ PAN.

Komornicki, T., Rosik, P., Stępniak, M., Śleszyński, P., Goliszek, S., Pomianowski, W., & Kowalczyk, K. (2018). *Ewaluacja i monitoring zmian dostępności transportowej w Polsce z wykorzystaniem wskaźnika WMDT*. Ministerstwo Inwestycji i Rozwoju.

Komornicki, T., Śleszynski, P., Rosik, P., Pomianowski, W., Stępniak, M., & Siłka, P. (2009). *Dostępność przestrzenna jako przesłanka kształtowania polskiej polityki transportowej*. Biul. Kom. Przestrz. Zagospod. Kraj. Pan, 241, 163.

Komornicki, T., Wiśniewski, R., Baranowski, J., Błażejczyk, K., Degórski, M., Goliszek, S., & Zawiska, I. (2015). *Wpływ wybranych korytarzy drogowych na środowisko przyrodnicze i rozwój społeczno-ekonomiczny obszarów przyległych*. Prace Geograficzne, 249, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN.

Koncepcja integracji systemów transportowych na terenie Krakowskiego Obszaru Funkcjonalnego (2017).

Koncepcja przestrzennego zagospodarowania kraju 2030. Ministerstwo Rozwoju Regionalnego, Warszawa.

Kongsomsaksakul, S., Yang, C., & Chen, A. (2005). *Shelter location-allocation model for flood evacuation planning*. „Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies", 6, 4237–4252.

Kordel, Z. (2003). *Rola transportu samochodowego w łańcuchu dostaw*, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.

Kordel, Z. (2013). *Problematyka funkcjonowania transportu samochodowego w łańcuchach dostaw*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Gdańskiego. Ekonomika Transportu i Logistyka, 46(12), 195–202.

Kowalczak, P. (2008). *Zagrożenia związane z deficytem wody*. Wydawnictwo Kurpisz.

Kowalewski, Z. (2006). *Powodzie w Polsce – rodzaje, występowanie oraz system ochrony przed ich skutkami*. „Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie", 6, 207–220.

Kowalski, M., & Wiśniewski, S. (2017). *Dostępność transportowa łódzkich centrów handlowych*. „Handel Wewnętrzny", 3(368), Tom II, 339–357.

Kowalski, M., & Wiśniewski, S. (2019). *Transport accessibility and mobility: a forecast of changes in the face of planned development of the network of expressways and motorways in Poland*. „European Spatial Research and Policy", 26(2), 151–176.

Koziarski, S. (2007). *Transport lądowy na świecie*, Studia i monografie UO, Opole.

Koziarski, S. (2018). *Kierunki rozwoju sieci autostrad i dróg ekspresowych w Polsce*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 21(3), 7–30.

Koziarski, S. (2020). *Expanding the network of highways and expressways in the post-socialist countries of the European Union in the years 2004–2019*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 23(3), 41–60.

Koźlak, A. (2010). *Znaczenie dostępności transportowej dla rozwoju regionalnego i metody jej oceny*. Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, 110, 287–298.

Koźlak, A. (2012). *Znaczenie usprawnienia pasażerskich powiązań międzygałęziowych dla poprawy dostępności transportowej*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Gdańskiego. Ekonomika Transportu i Logistyka, 45, 57–71.

Kraft, S. (2014). *Daily spatial mobility and transport behaviour in the Czech Republic: pilot study in the Písek and Bystrice and Pernštejnem regions*. „Human Geographies – Journal of Studies & Research in Human Geography", 8(2).

Krajowy Plan Zarządzania Kryzysowego, część A aktualizacja 2020, część B aktualizacja 2019, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa.

Kruszyna, M. (2014). *Modelowanie podróży do centralnego miasta aglomeracji z otaczających go miejscowości*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, 1(103), 205–214.

Krych, A. (2018). *Badania kompleksowe, modelowanie i planowanie ruchu*. Słownik terminologiczny. Annały Inżynierii Ruchu i Planowania Transportu, 2(XI).

Krych, A., & Kaczkowski, M. (2010). *Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne.

Krych, A., Cejrowski, M., Fierek, S., Kaczmarek, M., Maćkowiak, A., McFarland, K., & Żak, J. (2012). *Wielopoziomowe struktury syntetyczne a struktury dedykowane w modelowaniu i prognozowaniu potoków ruchu*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały konferencyjne, 1(97), 123–158.

Kryk, B. (2003). *Ekologiczne aspekty integracji europejskiej a działalność polskich przedsiębiorstw przemysłowych*. Monografie i Opracowania / Szkoła Główna Handlowa, 521, 189–200.

Kułakowska-Bicz, A. (2011). *System finansowania strat ludności po zdarzeniach katastroficznych w świetle badań empirycznych*. Zeszyty Naukowe SGSP / Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 41, 167–180.

Kurczyński, Z. (2012). *Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego a dyrektywa powodziowa*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 23, 209–217.

Kurczyński, Z. (2014). *Korzyści płynące z realizacji projektu ISOK*, W: P. Wężyk (red.) *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. GUGiK, Warszawa, 20–21.

Kwarciński, T. (2013). *Dostępność usług transportowych jako kryterium oceny publicznego regionalnego systemu transportowego*. „Studia Ekonomiczne", 143, 230–236.

Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P., & Kitchener, F. (2000). *Effect of environmental factors on free-flow speed*. US National Academy of Sciences Transportation Research Board, 18(1), 10–25.

Lambor, J. (1954). *Klasyfikacja typów powodzi i ich przewidywanie*. „Gospodarka Wodna", 4, 129–133.

Laska, S.B. (1990). *Homeowner adaptation to flooding: An application of the general hazards coping theory*. „Environment and Behavior", 22(3), 320–357.

Lee Jr, D.B., Klein, L.A., & Camus, G. (1999). *Induced traffic and induced demand*. „Transportation Research Record", 1659(1), 68–75.

Leveson, N., Dulac, N., Zipkin, D., Cutcher-Gershenfeld, J., Carroll, J., & Barrett, B. (2006). *Engineering resilience into safety-critical systems*. Resilience engineering: Concepts and precepts, 95–123.

Leyn, U., & Vortisch, P. (2015). *Calibrating VISSIM for the German highway capacity manual*. „Transportation Research Record", 2483(1), 74–79.

Li, Q., Zhang, T., Wang, H., & Zeng, Z. (2011). *Dynamic accessibility mapping using floating car data: a network-constrained density estimation approach*. „Journal of Transport Geography", 19(3), 379–393.

Li, T., Cao, X.S., & Huang, X.Y. (2012). *The relationship between spatial structure of accessibility and population change in Pearl River Delta*. „Geographical Research", 31(9), 1661–1672.

Lijewski, T. (1967). *Dojazdy do pracy w Polsce*. Państwowe Wydawn. Naukowe.

Lijewski, T. (1986). *Geografia transportu Polski*. Państwowe Wydawn. Ekonomiczne.

Litman, T. (2017). *Generated traffic and induced travel*. Victoria Transport Policy Institute.

Liu, K., Yamamoto, T., & Morikawa, T. (2009). *Feasibility of using taxi dispatch system as probes for collecting traffic information*. „Journal of Intelligent Transportation Systems", 13(1), 16–27.

Liu, Y., Hatayama, M., & Okada, N. (2006). *Development of an adaptive evacuation route algorithm under flood disaster*. Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 49, 189–195.

Lovett, A., Haynes, R., Sünnenberg, G., & Gale, S. (2002). *Car travel time and accessibility by bus to general practitioner services: a study using patient registers and GIS*. „Social Science & Medicine", 55(1), 97–111.

Lucas, K., Van Wee, B., & Maat, K. (2016). *A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches*. „Transportation", 43(3), 473–490.

Lumbroso, D. (2008). *Evacuation and traffic management*. T17-07-02.

Ładyka, S. (2012). *Liberalizm czy neoliberalizm w polityce gospodarczej państwa*. „International Business and Global Economy", 31.

Ładysz, J., & Ładysz, I. (2010). *Zarządzanie kryzysowe jako dziedzina współpracy transgranicznej*. Zeszyty Naukowe / Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki, 3, 126–137.

Maciejewski, M., Ostojski, M.S. i Tokarczyk, T. (red.) (2011). *Dorzecze Odry: monografia powodzi 2010*. Warszawa: IMGW – Państwowy Instytut Badawczy.

Madaj, A., & Wołowicki, W. (2003). *Podstawy projektowania budowli mostowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Madaj, A., & Wołowicki, W. (2013). *Budowa i utrzymanie mostów: wymagania techniczne, badania, naprawy*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

Malasek, J. (2017). *Metoda oceny dostępności i atrakcyjności przystanków miejskiego transportu zbiorowego*. „Transport Miejski i Regionalny", 9, 26–32.

Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego, Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie.

Marchetti, C. (1994). *Anthropological invariants in travel behavior*. „Technological Forecasting and Social Change", 47(1), 75–88.

Marcinkowski, R. (2006). *Osłona techniczna infrastruktury drogowej*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad.

Marcinkowski, R. (2009). *Inżynieria eksploatacji infrastruktury drogowej w sytuacjach kryzysowych: zadania, technologie, wspomaganie*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad.

Martínez, L.M., & Viegas, J.M. (2013). *A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies*. „Journal of Transport Geography", 26, 87–96.

Masłowska-Szczerba, M. (2015). *Ewakuacja – pojęcie, zasady i podstawy prawne*. „Ostry Dyżur", 2, 37–40.

Maślanka, M., & Wężyk, P. (2014). *Podstawowe informacje o projekcie ISOK*. W: P. Wężyk (red.) *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. GUGiK, Warszawa, 12–19.

Maze, T.H., Agarwal, M., & Burchett, G. (2006). *Whether weather matters to traffic demand, traffic safety, and traffic operations and flow*. Transportation Research Record, 1948(1), 170–176.

Mazur, E. (1985). *Wpływ transportu na degradację ziemi*. „Przegląd Komunikacyjny", 8, 144.

Mazur, E. (1998). *Transport a środowisko przyrodnicze Polski*, wyd. II popr. Wydawnictwo Naukowe US, Szczecin.

McConnell, A., & Drennan, L. (2006). *Mission impossible? Planning and preparing for crisis*. „Journal of Contingencies and Crisis management", 14(2), 59–70.

Merz, B., & Thieken, A.H. (2004). *Flood risk analysis: Concepts and challenges*. Österreichische Wasser-und Abfallwirtschaft, 56(3–4), 27–34.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). *Review article'Assessment of economic flood damage'*. „Natural Hazards and Earth System Sciences", 10(8), 1697–1724.

Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., & Schmidtke, R. (2004). *Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings*. „Natural Hazards and Earth System Sciences", 4, 153–163.

Mikulski, Z. (1962). *Występowanie niżówek, wezbrań i powodzi w rzekach polskich*. „Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej", 49, 3–23.
Mikulski, Z. (1963). *Zarys hydrografii Polski*. Warszawa. Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
Mikulski, Z. (1997). *Powódź jako odwieczna klęska żywiołowa*. Gospodarka Wodna, 11, 364–370.
Mikulski, Z. (1998). *Gospodarka wodna*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
Miller-Hooks, E., Zhang, X., & Faturechi, R. (2012). *Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks*. „Computers & Operations Research", 39(7), 1633–1643.
Mindur, M. (2005). *Związki i zależności między transportem a gospodarką*. „Przegląd Komunikacyjny", 44(12), 10–13.
Mioduszewski, W. (1998). *Woda jako czynnik zagrozenia w krajobrazie rolniczym*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 459, 43–69.
Mitsakis, E., Stamos, I., Papanikolaou, A., Aifadopoulou, G., & Kontoes, H. (2014). *Assessment of extreme weather events on transport networks: case study of the 2007 wildfires in Peloponnesus*. „Natural Hazards", 72(1), 87–107.
Moore, E.J., Kichainukon, W., & Phalavonk, U. (2013). *Maximum flow in road networks with speed-dependent capacities-application to Bangkok traffic*. „Songklanakarin Journal of Science & Technology", 35(4), 489–499.
Moretti, F., Pizzuti, S., Panzieri, S., & Annunziato, M. (2015). *Urban traffic flow forecasting through statistical and neural network bagging ensemble hybrid modeling*. „Neurocomputing", 167, 3–7.
Murray-Tuite, P., & Wolshon, B. (2013). *Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 27, 25–45.
Murray-Tuite, P., Garrido, R.H., & Nune, R. (2006). *Path prediction methodology for hazardous materials transported by malicious entities*. 11th World Conference on Transport Research.
Nachlik, E. (2007). *Miejsce ochrony przed powodzią w programowaniu rozwoju społeczno-gospodarczego*. Gospodarka Wodna, 7, 269–275.
Nachlik, E. (2008). *Ograniczenia zagrożenia przed powodzią*. Zeszyt Aktualne uwarunkowania stanu i potencjału ekologicznego rzek i potoków górskich w obszarze działania RZGW w Krakowie, Kraków.
Nachlik, E., & Drużyńska, E. (2006). *Podstawy metodyczne i standardy zintegrowanego planowania w gospodarce wodnej*. Kraków.
Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej 2020, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa.
Neutens, T., Schwanen, T., Witlox, F., & De Maeyer, P. (2010). *Equity of urban service delivery: a comparison of different accessibility measures*. „Environment and Planning A", 42(7), 1613–1635.
Nicholson, A.J., & Du, Z.P. (1994). *Improving transportation system reliability: a framework*. 17th ARRB Conference, Gold Coast, Queensland, 15–19 August 1994; Proceedings, 17 (6).

Noulas, A., Scellato, S., Lambiotte, R., Pontil, M., & Mascolo, C. (2012). *A tale of many cities: universal patterns in human urban mobility*. „PloS one", 7(5), e37027.

Numeryczny model pokrycia terenu w formacie ASCII XYZ GRID, Główny Urząd Geodezji i Kartografii.

Nutley, S., & Thomas, C. (1995). *Spatial mobility and social change: the mobile and the immobile*. „Sociologia Ruralis", 35(1), 24–39.

Ogrodniczak, M., & Ryba, J. (2015). *Planowanie ewakuacji, jako element zarządzania kryzysowego*. „Logistyka", 5, 1185–1190.

Okazawa, Y., Yeh, P.J.F., Kanae, S., & Oki, T. (2011). *Development of a global flood risk index based on natural and socio-economic factors*. „Hydrological Sciences Journal", 56(5), 789–804.

Olszewski, P., Dybicz, T., & Śleszyński, P. (2013). *Proponowane miary dostępności czasowej w transporcie publicznym*. „Przegląd Komunikacyjny", 12, 10–17.

Omer, M., Mostashari, A., Nilchiani, R., & Mansouri, M. (2012). *A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems*. „Maritime Policy & Management", 39(7), 685–703.

Opoczyński, K. (2016a). *Synteza wyników GPR 2015 na zamiejskiej sieci dróg krajowych*.

Opoczyński, K. (2016b). *Synteza wyników GPR 2015 na zamiejskiej sieci dróg wojewódzkich*.

Ortega, E., López, E., & Monzón, A. (2012). *Territorial cohesion impacts of high-speed rail at different planning levels*. „Journal of Transport Geography", 24, 130–141.

Östh, J., Lyhagen, J., & Reggiani, A. (2016). *A new way of determining distance decay parameters in spatial interaction models with application to job accessibility analysis in Sweden*. „European Journal of Transport and Infrastructure Research", 16(2).

Ostrowski, J., Czarnecka, H., Glowacka, B., Krupa-Marchlewska, J., Zaniewska, M., Sasim, M., & Dobrowolski, A. (2012). *Nagłe powodzie lokalne (flash flood) w Polsce i skala ich zagrożeń*. W: H. Lorenc (red.), *Wpływ zmian klimatu na środowisko, gospodarkę i społeczeństwo*, 3, 123–149.

Pajewska-Kwaśny, R. (2012). *Zagrożenie katastrofami naturalnymi w Polsce*. „Wiadomości Ubezpieczeniowe", 3, 77–87.

Parysek, J. (2006). *Wprowadzenie do gospodarki przestrzennej*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Parysek, J., & Mierzejewska, L. (2013). *Życie miasta. Studium Poznania*. Miasto i jego mieszkańcy, Poznań, Bogucki Wydawnictwo Naukowe.

Pawlak, P., & Brdulak, J. (2018). *Infrastructure barriers, in the development aspect of the problematic regions. AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja*, „Systemy Transportowe", 19(10), 62–65.

Pel, A.J., Hoogendoorn, S.P., & Bliemer, M.C. (2010). *Evacuation modeling including traveler information and compliance behavior*. „Procedia Engineering", 3, 101–111.

Piepiora, Z. (2019). *Ekonomiczna efektywność strukturalnej ochrony przeciwpowodziowej w Polsce*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.

Piepiora, Z., & Brzywcz, M. (2017). *Powodzie w Jeleniej Górze – przyczyny i skutki*. „Słupskie Prace Geograficzne", 14.

Plate, E.J. (2002). *Flood risk and flood management*. „Journal of Hydrology", 267(1–2), 2–11.

Pociask-Karteczka, J., & Żychowski, J. (2014). *Powodzie błyskawiczne (flash floods): przyczyny i przebieg*. W: T. Ciupa, R. Suligowski (red.) *Woda w mieście*. Monografie Komisji Hydrologicznej Polskiego Towarzystwa Geograficznego, 2.

Posthumus, H., Hewett, C.J.M., Morris, J., & Quinn, P.F. (2008). *Agricultural land use and flood risk management: engaging with stakeholders in North Yorkshire*. „Agricultural Water Management", 95(7), 787–798.

Potrykowski, M., & Taylor, Z. (1982). *Geografia transportu. Zarys problemów, modeli i metod badawczych*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.

Pregnolato, M. (2019). *Bridge safety is not for granted – a novel approach to bridge management*. „Engineering Structures", 196, 109193.

Pregnolato, M., Ford, A., Wilkinson, S.M., & Dawson, R. J. (2017). *The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 55, 67–81.

Pregnolato, M., Sarhosis, V., & Kilsby, C. (2018). *Transport resilience to flood-induced bridge failures*. EPiC Series in Engineering, 3, 1698–1702.

Priest, S.J., Parker, D.J., & Tapsell, S.M. (2011). *Modelling the potential damage-reducing benefits of flood warnings using European cases*. „Environmental Hazards", 10(2), 101–120.

Program bezpieczeństwa powodziowego w dorzeczu Wisły Środkowej – założenia, 2011.

Programu Budowy Dróg Krajowych (PBDK) na lata 2014–2023 (z perspektywą do 2025 r.), Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad.

Przepływy ludności związane z zatrudnieniem w 2016 r. (2019). Główny Urząd Statystyczny.

Przeworski, K. (2002). *Ewakuacja jako sposób ochrony ludności*. AON, Warszawa.

Przybyszewski, R., & Wędrowska, E. (2005). *Aksjomatyczna teoria entropii*. „Przegląd Statystyczny", 52(2), 85–101.

Puławska, S., & Starowicz, W. (2011). *Dostępność miejskich systemów transportu zbiorowego*. „Transport Miejski i Regionalny", 12, 6–11.

Radosavljevic, V., Belojevic, G., & Pavlovic, N. (2017). *Tool for decision-making regarding general evacuation during a rapid river flood*. „Public Health", 146, 134–139.

Radzimski, A. (2012). *Ruch pieszy i rowerowy jako elementy systemu zrównoważonego transportu miejskiego w Kopenhadze*. „Transport Miejski i Regionalny", 2, 13–22.

Rakha, H., Farzaneh, M., Arafeh, M., Hranac, R., Sterzin, E., & Krechmer, D. (2007). *Empirical studies on traffic flow in inclement weather*. Final Report–Phase I, 385.

Raport z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej.

Raport z wykonania map zagrożenia powodziowego i map ryzyka powodziowego, załącznik nr 3, Metodyka opracowania map zagrożenia powodziowego dla obszarów narażonych na zalanie w przypadku zniszczenia lub uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych – wariant całkowitego zniszczenia obwałowania.

Rawłuszko, K. (2016). *Podstawy prawne ewakuacji podczas powodzi*. „Logistyka", 1(2) (CD 1), 376–383.

Reggiani, A. (2013). *Network resilience for transport security: Some methodological considerations*. „Transport Policy", 28, 63–68.

Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie, https://warszawa.wody.gov.pl/ (dostęp: 05.10.2020 r.).

Renkiel, P. (2014). *Przegląd możliwości zastosowania systemu wieloagentowego w transporcie*. „Transport Miejski i Regionalny", 2, 17–22.

Rewieńska, W. (1929). *Izochrony Wilna*, Prace Zakładów Geologii i Geografi i Uniwersytetu im. S. Batorego w Wilnie, 4, 1–20.

Reynard, N.S., Prudhomme, C., & Crooks, S.M. (2001). *The flood characteristics of large UK rivers: potential effects of changing climate and land use*. „Climatic Change", 48(2–3), 343–359.

Richter, K.F., Shi, M., Gan, H.S., & Winter, S. (2013). *Decentralized evacuation management*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 31, 1–17.

Rietveld, P., & Bruinsma, F. (2012). *Is transport infrastructure effective?: transport infrastructure and accessibility: impacts on the space economy*. Springer Science & Business Media.

Rokicki, B., & Stępniak, M. (2018). *Major transport infrastructure investment and regional economic development–An accessibility-based approach*. „Journal of Transport Geography", 72, 36–49.

Romanowska, A., & Jamroz, K. (2015). *Wielkopowierzchniowe obiekty handlowe – zwykłe generatory ruchu czy źródła problemów transportowych?* „Transport Miejski i Regionalny", 2, 4–13.

Rose, G. (2006). *Mobile phones as traffic probes: practices, prospects and issues*. „Transport Reviews", 26(3), 275–291.

Rosik, P. (2009). *Potencjał własny oraz szacowanie parametrów dostępności wewnetrznej na przykładzie Warszawy*. „Czasopismo Geograficzne", 80(1–2).

Rosik, P. (2012). *Dostępność lądowa przestrzeni Polski w wymiarze europejskim*. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 233.

Rosik, P., & Kowalczyk, K. (2015). *Rozwój infrastruktury drogowej i kolejowej a przesunięcie modalne w Polsce w latach 2000–2010*. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 248.

Rosik, P., & Stępniak, M. (2015). *Monitoring of changes in road potential accessibility at municipality level in Poland, 1995–2015*. „Geographia Polonica", 88(4), 607–620.

Rosik, P., & Śleszyński, P. (2009). *Wpływ zaludnienia w otoczeniu drogi, ukształtowania powierzchni terenu oraz natężenia ruchu na średnią prędkość jazdy samochodem osobowym*. „Transport Miejski i Regionalny", 10, 26–31.

Rosik, P., Komornicki, T., & Goliszek, S. (2017). *The Role of Eu Funds in the Perspective 2014–2020 for Changes in National and International Road Accessibility*. Research Journal of the University of Gdańsk. Transport Economics and Logistics, 74, 369–378.

Rosik, P., Komornicki, T., Goliszek, S. & Duma, P. (2020b). *Dostępność potencjałowa regionów w Europie – zasięg przestrzenny, długość podróży i efekt granicy (EU-ROAD-ACC)*. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 270.

Rosik, P., Komornicki, T., Goliszek, S., Śleszyński, P., Szarata, A., Szejgiec-Kolenda, B., & Kowalczyk, K. (2018). *Kompleksowe modelowanie osobowego ruchu drogowego w Polsce: uwarunkowania na poziomie gminnym*. Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 267.

Rosik, P., Komornicki, T., Stępniak, M., & Pomianowski, W. (2013). *Dostępność transportowa, czyli jak ocenić za pomocą modelu potencjału, które inwestycje są najważniejsze?* „Przegląd Komunikacyjny", 12, 18–22.

Rosik, P., Pomianowski, W., Goliszek, S., Stępniak, M., Kowalczyk, K., Guzik, R., & Komornicki, T. (2017). *Multimodalna dostępność transportem publicznym gmin w Polsce (MULTIMODACC)*. „Prace Geograficzne IGiPZ PAN", 258.

Rosik, P., Pomianowski, W., Komornicki, T., Goliszek, S., Szejgiec-Kolenda, B., & Duma, P. (2020a). *Regional dispersion of potential accessibility quotient at the intra-European and intranational level. Core-periphery pattern, discontinuity belts and distance decay tornado effect*. „Journal of Transport Geography", 82, 102–554.

Rosik, P., Stępniak, M., & Komornicki, T. (2015). *The decade of the big push to roads in Poland: Impact on improvement in accessibility and territorial cohesion from a policy perspective*. „Transport Policy", 37, 134–146.

Rothfeld, R., Straubinger, A., Paul, A., & Antoniou, C. (2019). *Analysis of European airports' access and egress travel times using Google Maps*. „Transport Policy", 81, 148–162.

Rowicki, M. (1934). *Izochrony Warszawy*, „Wiadomości Służby Geograficznej", 8, 435–466.

Rozmieszczenia form ochrony przyrody, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska.

Rozporządzenia Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 r. w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego, 2013, Dz.U., poz. 104.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej oraz Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 24 stycznia 2019 r. w sprawie zakresu wymagań oraz warunków dla planowanej zabudowy oraz planowanego zagospodarowania terenów położonych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią oraz sposobu ich ustalania, Dz.U. 2019, poz. 244.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej oraz Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 24 stycznia 2019 r. w sprawie zakresu wymagań, jakie dla obiektów budowlanych lokalizowanych na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią może określać pozwolenie wodnoprawne, Dz.U. 2019, poz. 227.

Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. 2000, nr 63, poz. 735.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Odry.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Pregoły.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 października 2016 r. w sprawie przyjęcia Planu zarządzania ryzykiem powodziowym dla obszaru dorzecza Wisły.

Rucińska, D. (1998). *Zarządzanie marketingowe działalnością transportową*. Wydaw. Uniwersytetu Gdańskiego.

Rudnicki, A. (2014). *Porównanie modeli podróży dla wybranych dużych polskich miast*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, 1(103), 329–349.

Ruin, I., Lutoff, C., & Shabou, S. (2017). *Anticipating or coping: Behaviors in the face of flash floods*. „Floods", 2, 259–275.

Sabir, M., Van Ommeren, J., Koetse, M., & Rietveld, P. (2011). *Adverse weather and commuting speed*. „Networks and Spatial Economics", 11(4), 701–712.

Sadri, A.M., Ukkusuri, S.V., Murray-Tuite, P., & Gladwin, H. (2014). *Analysis of hurricane evacuee mode choice behavior*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 48, 37–46.

Salas-Olmedo, M.H., García, P., & Gutiérrez, J. (2015). *Accessibility and transport infrastructure improvement assessment: The role of borders and multilateral resistance*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 82, 110–129.

Salonen, M., & Toivonen, T. (2013). *Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport*. „Journal of Transport Geography", 31, 143–153.

Samuels, P.G., Morris, M.W., Sayers, P., Creutin, J.D., Kortenhaus, A., Klijn, F., & Schanze, J. (2009). *Advances in flood risk management from the FLOODsite project. Flood risk management: research and practice*. London: Taylor & Francis Group, 433–443.

Sarna, S. (2018). *Analiza zmian natężeń ruchu drogowego w obszarach dużych aglomeracji*. „Drogownictwo", 5, 160–168.

Sawicki, P., Kiciński, M., & Fierek, S. (2016). *Selection of the most adequate trip-modelling tool for integrated transport planning system*. „Archives of Transport", 37(1), 55–66.

Schanze, J., Zeman, E., & Marsalek, J. (Eds). (2007). *Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, 67, Springer Science & Business Media.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., & Walker, B. (2001). *Catastrophic shifts in ecosystems*. „Nature", 413(6856), 591–596.

Schjerning, W. (1903). *Studien über Isochronenkarten*, Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde, 4, 693–705.

Shahabi, K., & Wilson, J.P. (2014). *CASPER: Intelligent capacity-aware evacuation routing*. „Computers, Environment and Urban Systems", 46, 12–24.

Sieradzka-Stasiak, A. (2010). *Prewencja przestrzenna lekarstwem na negatywne skutki powodzi?* „Przegląd Komunalny", 7, 52–54.

Sierpiński, G. (2010). *Miary dostępności transportowej miast i regionów*. Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska, 66, 91–96.

Sierpiński, G. (2012). *Zachowania komunikacyjne osób podróżujących a wybór środka transportu w mieście*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 84, 93–106.

Simonovic, S.P., & Ahmad, S. (2005). *Computer-based model for flood evacuation emergency planning*. „Natural Hazards", 34(1), 25–51.

Siqueira-Gay, J., Giannotti, M.A., & Tomasiello, D.B. (2016). *Accessibility and flood risk spatial indicators as measures of vulnerability*. XVII GEOINFO, 17, 93–104.

Skabardonis, A., Varaiya, P., & Petty, K.F. (2003). *Measuring recurrent and nonrecurrent traffic congestion*. „Transportation Research Record", 1856(1), 118–124.

Skrzypczak, I., Kokoszka, W., Rojowski, R., & Kogut, J. (2015). *Zagrożenia infrastruktury komunikacyjnej na terenach osuwiskowych i zalewowych*. „ITS Technika Transportu Szynowego", 22(12), 1385–1390.

Słysz, K., & Pawłowska, K. (2010). *Powodzie a planowanie przestrzenne*. W: Forum Naukowo-Techniczne Powódź 2010. IMGW-PIB, Warszawa, 174–186.

Solon, J., Borzyszkowski, J., Bidłasik, M., Richling, A., Badora, K., Balon, J., & Jodłowski, M. (2018). *Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data*. „Geographia Polonica", 91(2), 143–170.

Southworth, F. (1991). *Regional evacuation modeling: A state-of-the-art review*. Technical Raport 1991, U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information.

Spiekermann, K., & Neubauer, J. (2002). *European accessibility and peripherality: Concepts, models and indicators*. Nordregio Working Paper, 9.

Spiekermann, K., & Schürmann, C. (2007). *Update of selected potential accessibility indicators. Final report*. Spiekermann & Wegener, urban and regional research (S&W), RRG Spatial Planning and Geoinformation.

Spiekermann, K., Wegener, M., Květoň, V., Marada, M., Schürmann, C., Biosca, O., & Bielańska, D. (2013). *TRACC transport accessibility at regional/local scale and patterns in Europe. Draft final report*. ESPON applied research.

Stachy, J. (1996). *Niezwykłe przybory wody na małym potoku górskim*. Gazeta Obserwatora IMGW, 45(5), 3–4.

Starkel, L. (1999). *Geografia Polski: Środowisko przyrodnicze*. Wydaw. Naukowe PWN.

Stathopoulos, A., Dimitriou, L., & Tsekeris, T. (2008). *Fuzzy modelling approach for combined forecasting of urban traffic flow*. „Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering", 23(7), 521–535.

Stępniak, M. & Rosik, P. (2013). *Accessibility improvement, territorial cohesion and spillovers: a multidimensional evaluation of two motorway sections in Poland*. „Journal of Transport Geography", 31, 154–163.

Stępniak, M., & Rosik, P. (2016). *From improvements in accessibility to the impact on territorial cohesion: the spatial approach*. „Journal of Transport and Land Use", 9(3), 1–13.

Stępniak, M., & Rosik, P. (2018). *The role of transport and population components in change in accessibility: the influence of the distance decay parameter*. „Networks and Spatial Economics", 18(2), 291–312.

Strang, K. D. (2013). *Homeowner Behavioral Intent to Evacuate After Flood Risk Warnings*. International Journal of Risk and Contingency Management (IJRCM), 2(3), 1–22.

Suarez, P., Anderson, W., Mahal, V., & Lakshmanan, T.R. (2005). *Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 10(3), 231–244.

Suliborski, A. (2018). *Geografia versus gospodarka przestrzenna*. Studia KPZK, 183, 17–26.

Sun, D., Zhang, L., & Su, Z. (2020). *Evacuate or stay? A typhoon evacuation decision model in China based on the evolutionary game theory in complex networks*. „International Journal of Environmental Research and Public Health", 17(3), 682.

Szarata, A. (2010). *Modelowanie symulacyjne ruchu wzbudzonego i tłumionego*. „Transport Miejski i Regionalny", 3, 14–17.

Szarata, A. (2013). *Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej*. Kraków: Wydawnictwo PK.

Szarata, A., & Nosal Hoy, K. (2019). *Wpływ awarii infrastruktury drogowej na warunki ruchu i zachowania komunikacyjne na obszarach miejskich – przykład Mostu Łazienkowskiego w Warszawie*. Monografia awarie budowlane: zapobieganie, diagnostyka, naprawy, rekonstrukcje, M. Kaszyńska (red.), Wydaw. Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, 501–504.

Szczuraszek, T. (2009). *Prędkość pojazdów w ruchu swobodnym jako wyznacznik jakości ruchu*. „Magazyn Autostrady", 11, 16–21.

Szczuraszek, T., & Chmielewski, J. (2017). *Opis sieci transportowej na potrzeby budowy symulacyjnych modeli transportowych*. „Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe", 18(12), 1630–1635.

Szerszynski, B., & Urry, J. (2006). *Visuality, mobility and the cosmopolitan: inhabiting the world from afar*. „The British Journal of Sociology", 57(1), 113–131.

Szwagrzyk, M., Kramarczyk, M., & Szczęśniak, M. (2014). *Opracowanie map zagrożenia i ryzyka powodziowego*. W: P. Wężyk (red.) *Podręcznik dla uczestnikówszkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. GUGiK, Warszawa, 161–168.

Szymonik, A. (2013). *Ekonomika transportu dla potrzeb logistyka (i): teoria i praktyka*. Difin.

Śleszyński, P. (2009). *Dostępność metropolii jako warunek konkurencyjności polskiej przestrzeni*. Mazowsze Studia Regionalne, 2, 53–72.

Śleszyński, P. (2014). *Dostępność czasowa i jej zastosowania*. „Przegląd Geograficzny", 86(2), 171–215.

Śleszyński, P., & Kretowicz, P. (2016). *Ocena efektów inwestycji drogowych pod względem dostępności przestrzennej wskutek realizacji Regionalnego Programu Operacyjnego województwa mazowieckiego (2007–2013)*. Prace Komisji Geografii Komunikacji PTG, 19 (4), 30–48.

Śleszyński, P., Dybicz, T., & Olszewski, P. (2015). *Stopień dostępności czasowej jako syntetyczny wskaźnik poziomu obsługi transportowej*. „Przegląd Komunikacyjny", 6, 23–27.

Śleszyński, P., Komornicki, T., Rosik, P., Duma, P., Goliszek, S., Kubiak, Ł., Wiśniewski, R., Guzik, R., Fiedeń, Ł., Kocaj, A., Kołoś, A., Wiedermann, K. (2019). *Analiza relacji funkcjonalno-przestrzennych między ośrodkami miejskimi i ich otoczeniem. Raport syntetyczny*.

Tadeuszewski, B., & Wilczak, M. (2011). *Przebieg powodzi w zlewni Warty*. W: M. Maciejewski, M.S. Ostojski, T. Tokarczyk (red.). *Dorzecze Odry: monografia powodzi 2010*, 63–68.

Tagg, A., Davison, M., & Wetton, M. (2016). *Use of agent-based modelling in emergency management under a range of flood hazards*. E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 7, 19006.

Tarski, I. (1973). *Ekonomika i organizacja transportu międzynarodowego*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne.
Taylor, Z. (1998). *Możliwości poprawy dostępności usług w obszarach wiejskich*. „Przegląd Geograficzny", 70(1–2), 47–68.
Taylor, Z. (1999). *Przestrzenna dostępność miejsc zatrudnienia, kształcenia i usług a codzienna ruchliwość ludności wiejskiej*, Prace Geograficzne IGiPZ PAN, 171.
Taylor, Z. (2004). *Przestrzenna dostępność i codzienna ruchliwość ludności w warunkach polskiej wsi*. W: T. Markowski (red.), *Przestrzeń w zarządzaniu rozwojem regionalnym i lokalnym*, Biuletyn, 211, KPZK PAN, Warszawa, 453–485.
Taylor, M.A., & D'Este, G.M. (2007). *Transport network vulnerability: a method for diagnosis of critical locations in transport infrastructure systems*. „Critical Infrastructure" (pp. 9–30). Springer, Berlin, Heidelberg.
Teodorovic, D. (2003). *Transport modeling by multi-agent systems: a swarm intelligence approach*. „Transportation Planning and Technology", 26(4), 289–312.
Tokarczyk, T., Chudzik, B., Garncarz-Wilk, B., Pasiecznik-Dominiak, A., & Wojczakowska, Z. (2012). *Wstępna ocena ryzyka powodziowego jako element wdrażania dyrektywy powodziowej*. „Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich", 3/III.
Transportation Research Board of the National Academies 2010.
Transportowy model prognostyczny podróży dla Obszaru Metropolitalnego w ramach Strategii Transportu i Mobilności Obszaru Metropolitalnego Gdańsk–Gdynia–Sopot do roku 2030, 2015.
Tsakiris, G., Bellos, V., & Ziogas, C. (2010). *Embankment dam failure: a downstream flood hazard assessment*. „European Water", 32, 35–45.
Tsakiris, G., Nalbantis, I., & Pistrika, A. (2009). *Critical technical issues on the EU flood directive*. „European Water", 25(26), 39–51.
Tsapakis, I., Cheng, T., & Bolbol, A. (2013). *Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times*. „Journal of Transport Geography", 28, 204–211.
Tukamuhabwa, B.R., Stevenson, M., Busby, J., & Zorzini, M. (2015). *Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study*. „International Journal of Production Research", 53(18), 5592–5623.
Tyszka, Z. (1954). *Powodzie w Polsce i ochrona przed nimi w zarysie historycznym*. „Gospodarka Wodna", 4, 144–146.
Uno, K., & Kashiyama, K. (2008). *Development of simulation system for the disaster evacuation based on multi-agent model using GIS*. „Tsinghua Science and Technology", 13(S1), 348–353.
Ustawa z dnia 24 października 1974 r. – Prawo budowlane, Dz.U. 1974, Nr 38, poz. 229 ze zm.
Ustawa z dnia 24 października 1974 r. – Prawo wodne, Dz.U. Nr 38, poz. 230 ze zm.
Ustawa z dnia 12 lipca 1984 r. o planowaniu przestrzennym, tekst jedn. Dz.U. 1989 r. Nr 17, poz. 99 ze zm.
Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych, tekst jedn Dz.U. 1985, Nr 14, poz. 60 ze zm.
Ustawa z dnia 21 marca 1991 r. o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej, tekst jedn. Dz.U. 1991, Nr 32, poz. 131 ze zm.

Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. o zagospodarowaniu przestrzennym, tekst jedn. Dz.U. 1999, Nr 15, poz. 139 ze zm.
Ustawa z dnia 21 sierpnia 1997 r. o gospodarce nieruchomościami, tekst jedn. Dz.U. 1997, nr 115, poz. 741 ze zm.
Ustawa z dnia 21 grudnia 2000 r. o żegludze śródlądowej, tekst jedn. Dz.U. 2001, Nr 5, poz. 43 ze zm.
Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2001, Nr 115, poz. 1229 ze zm; Dz.U. 2012, poz. 145 ze zm.
Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2011, Nr 32, poz. 159.
Ustawa z dnia 18 lipca 2001 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2017 r. poz. 1121 ze zm.
Ustawa z dnia 27 marca 2003 r. o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym, tekst jedn. Dz.U. 2003, nr 80, poz. 717 ze zm.
Ustawa z dnia 10 kwietnia 2003 r. o szczególnych zasadach przygotowania i realizacji inwestycji w zakresie dróg publicznych, tekst jedn. Dz.U. 2003, nr 80, poz. 721 ze zm.
Ustawa z dnia 26 kwietnia 2007 r. o zarządzaniu kryzysowym, tekst jedn. Dz.U. 2007, Nr 89, poz. 590 ze zm.
Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, Dz.U. 2018 poz. 2268.
Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne, tekst jedn. Dz.U. 2017 poz. 1566 ze zm.
Vickerman, R., Spiekermann, K., & Wegener, M. (1999). *Accessibility and economic development in Europe*. „Regional Studies", 33(1), 1–15.
Voorhees, A.M. (2013). *A general theory of traffic movement*. „Transportation", 40(6), 1105–1116.
Vugrin, E.D., Warren, D.E., Ehlen, M.A., & Camphouse, R.C. (2010). *A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems. In Sustainable and resilient critical infrastructure systems* (pp. 77–116). Springer, Berlin, Heidelberg.
Wan, C., Yang, Z., Zhang, D., Yan, X., & Fan, S. (2018). *Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions*. „Transport Reviews", 38(4), 479–498.
Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L.A., Cox, D., & Park, H. (2016). *An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 64, 86–100.
Warakomska, K. (1993). *Izochrony zmodyfikowane jako kartograficzna metoda przedstawiania dostępności ludności do miasta wojewódzkiego (na przykładzie województwa lubelskiego)*. „Polski Przegląd Kartograficzny", 25(2), 66–72.
Wardrop, J.G. (1952). *Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1(3), 325–362.
Wells, C.R., Sah, P., Moghadas, S.M., Pandey, A., Shoukat, A., Wang, Y., & Galvani, A.P. (2020). *Impact of international travel and border control measures on the global spread of the novel 2019 coronavirus outbreak*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(13), 7504–7509.
Wężyk, P. (2015). *Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR*. Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
Wiedemann, R. (2019). *Materiały dydaktyczne, Inżynieria Ruchu i Planowanie Transportu*, Zakład Systemów Transportowych Politechniki Poznańskiej.
Wiskulski, T. (2013). *Dostępność transportowa centrów turystycznych Chorwacji na przykładzie transportu lotniczego*. Współczesne zagadnienia, problemy i wyzwania w badaniach geograficznych, 2, 165–172.

Wiskulski, T., & Taraszkiewicz, T. (2015). *Inwestycje w infrastrukturę transportową a atrakcyjność turystyczna regionu na przykładzie Portu Lotniczego Gdańsk*. „Logistyka", 4, 6613–6620.

Wiśniewski, S. (2015). *Zróżnicowanie dostępności transportowej miast w województwie łódzkim*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

Wiśniewski, S. (2016). *Teoretyczna i rzeczywista wewnętrzna dostępność transportowa Łodzi*. „Prace i studia Geograficzne", 61(3), 95–108.

Wiśniewski, S., Kowalski, M., & Borowska-Stefańska, M. (2020a). *Flooding and mobility: a polish analysis*. „Environmental Hazards", 20(3), 300–322.

Wiśniewski, S., Borowska-Stefańska, M., Kowalski, M., & Sapińska, P. (2020b). *Vulnerability of the accessibility to grocery shopping in the event of flooding*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 87, 102510.

Wolański, M. (2010). *Możliwości zwiększania wpływu inwestycji unijnych na poprawę dostępności komunikacyjnej transportem zbiorowym obszarów peryferyjnych*. „Transport Miejski i Regionalny", 1, 14–17.

Wołoszyn, E., (2006). *Oddziaływanie powodzi na środowisko*. W: S. Bednarczyk, T. Jarzębińska, S. Mackiewicz, E. Wołoszyn (red.), *Vademecum ochrony przeciwpowodziowej*. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, Gdańsk, 125–158.

Yang, J., Sun, H., Wang, L., Li, L., & Wu, B. (2013). *Vulnerability evaluation of the highway transportation system against meteorological disasters*. „Procedia-Social and Behavioral Sciences", 96, 280–293.

Yin, J., Yu, D., Yin, Z., Liu, M., & He, Q. (2016). *Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China*. „Journal of Hydrology", 537, 138–145.

Yuan, L.F.V., Argyroudis, S.A., Tubaldi, E., Pregnolato, M., & Mitoulis, S.A. (2019). *Fragility of bridges exposed to multiple hazards and impact on transport network resilience. Proceedings of the 2019 Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics conference (SECED 2019)*. Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics (SECED).

Yuan, S., Chun, S.A., Spinelli, B., Liu, Y., Zhang, H., & Adam, N.R. (2017). *Traffic evacuation simulation based on multi-level driving decision model*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 78, 129–149.

Zaktualizowana metodyka wstępnej oceny ryzyka powodziowego (2018).

Załącznik do Narodowego Programu Ochrony Infrastruktury Krytycznej 2020, Rządowe Centrum Bezpieczeństwa, Standardy służące zapewnieniu sprawnego funkcjonowania infrastruktury krytycznej – dobre praktyki i rekomendacje.

Załącznik do rozporządzenia Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 17 listopada 2011 r. w sprawie bazy danych obiektów topograficznych oraz bazy danych obiektów ogólnogeograficznych, a także standardowych opracowań kartograficznych, t. I, Dz.U. 2011, Nr 279, poz. 1642.

Załącznik do Zarządzenia nr 14 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 7 lipca 2005 roku w sprawie wprowadzenia instrukcji przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich, które są stosowane w czasie wykonywania okresowych kontroli obiektów inżynierskich zarządzanych przez Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad.

Zarządzenie nr 4 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 11 lutego 2019 r. w sprawie organizacji Punktu Informacji Drogowej oraz zasad gromadzenia i przekazywania informacji o warunkach ruchu na drogach krajowych.

Zarządzenie nr 10 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 26 marca 2019 r. w sprawie przygotowania Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad do realizacji zadań zarządzania kryzysowego wskazano kategorie utrudnień.

Zarządzenie nr 56 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 17 listopada 2015 r. w sprawie wytycznych dokonywania objazdów dróg krajowych.

Zasady metodologiczne ankietowego badania mobilności komunikacyjnej ludności (2015). Główny Urząd Statystyczny.

Zasady zachowania się ludności w czasie ogłoszenia informacji o konieczności ewakuacji – poradnik dla ludności (2016). Obrona Cywilna, Urząd Miejski w Bornem Sulinowie.

Zeng, W., & Church, R.L. (2009). *Finding shortest paths on real road networks: the case for A*. „International Journal of Geographical Information Science", 23(4), 531–543.

Zhan, F.B., & Chen, X. (2008). *Agent-based modeling and evacuation planning*. Geospatial Technologies and Homeland Security (pp. 189–208). Springer, Dordrecht.

Zhang, X., Miller-Hooks, E., & Denny, K. (2015). *Assessing the role of network topology in transportation network resilience*. „Journal of Transport Geography", 46, 35–45.

Zmuda-Trzebiatowski, P. (2016). *Dostępność transportowa a partycypacja w aktywnościach, ubóstwo oraz zagrożenie wykluczeniem społecznym*. „Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe", 17(12), 754–759.

Żochowska, R., & Karoń, G. (2012). *Przegląd literatury na temat zjawiska kongestii i zakłóceń ruchu w systemie transportowym miasta w aspekcie modelowania podróży*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne, 2(98), 252–276.

Żochowska, R., & Karoń, G. (2018). *Model kształtowania mobilności miejskiej w ujęciu systemowo-funkcjonalnym*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 120, 471–480.

Żochowska, R., Sobota, A., & Karoń, G. (2016). *Modele generowania podróży w obszarze miejskim na przykładzie Bielska-Białej*. „Transport Miejski i Regionalny", 7, 13–17.

SPIS RYCIN

Ryc. 1.1. Schemat układu treści monografii 26
Ryc. 2.1. Zróżnicowanie przestrzenne występowania poszczególnych typów powodzi w Polsce ze względu na ich genezę i przebieg, na tle sieci drogowej w 2019 r. 38
Ryc. 2.2. Doświadczenie powodzi a znajomość instrukcji ewakuacji wśród ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2020 r. 54
Ryc. 3.1. Podział Polski na obszary dorzeczy na tle sieci drogowej w 2019 r. 60
Ryc. 3.2. Podział obszaru dorzecza Wisły na regiony wodne na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r. 62
Ryc. 3.3. Podział obszaru dorzecza Odry na regiony wodne na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r. 63
Ryc. 3.4. Obszar dorzecza Pregoły na tle podziału administracyjnego i sieci drogowej w 2019 r. 64
Ryc. 3.5. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Wisły w 2019 r. 69
Ryc. 3.6. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Odry w 2019 r. 71
Ryc. 3.7. Tereny zagrożone powodzią na tle ukształtowania powierzchni terenu na obszarze dorzecza Pregoły w 2019 r. 72
Ryc. 3.8. Formy ochrony przyrody na tle terenów zagrożonych powodzią w Polsce w 2019 r. 73
Ryc. 3.9. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią o prawdopodobieństwie wystąpienia 10% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r. 75
Ryc. 3.10. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią od rzeki o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r. 76
Ryc. 3.11. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią od morza o prawdopodobieństwie wystąpienia 1% na tle sieci drogowej w Polsce w 2019 r. 77
Ryc. 3.12. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 78

Ryc. 3.13. Udział powierzchni gmin objętych terenami zagrożonymi powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r. 79
Ryc. 3.14. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r. 83
Ryc. 3.15. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 84
Ryc. 3.16. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 85
Ryc. 3.17. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wielkości potencjalnych start materialnych związanych z wystąpieniem powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 86
Ryc. 3.18. Przypadające na hektar terenów zagrożonych oraz całkowite wysokości potencjalnych strat materialnych związanych z wystąpieniem powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r. 87
Ryc. 3.19. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r. 91
Ryc. 3.20. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 92
Ryc. 3.21. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 93
Ryc. 3.22. Udział powierzchni oraz potencjalnych strat wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 94
Ryc. 3.23. Udział powierzchni oraz potencjalnych start wynikających z zalania terenów komunikacyjnych w ogóle powierzchni terenów zagrożonych i potencjalnych strat w gminach na skutek wystąpienia powodzi w przypadku całkowitego zniszczenia obwałowania w Polsce w 2019 r. 95
Ryc. 3.24. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r. 98

Ryc. 3.25. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 99
Ryc. 3.26. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 100
Ryc. 3.27. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 101
Ryc. 3.28. Powierzchnia oraz udział potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi w ogóle zagrożonych terenów komunikacyjnych w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r. 102
Ryc. 3.29. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią o prawdopodobieństwie 10% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r. 105
Ryc. 3.30. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią od rzeki o prawdopodobieństwie 1% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r. 106
Ryc. 3.31. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią od morza o prawdopodobieństwie 1% oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r. 107
Ryc. 3.32. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią w przypadku całkowitego zniszczenia budowli ochronnej pasa technicznego oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r. 108
Ryc. 3.33. Liczba ludności zamieszkującej na terenach zagrożonych powodzią w efekcie całkowitego zniszczenia obwałowania oraz jej udział w całkowitej liczbie ludności gmin w Polsce w 2019 r. 109
Ryc. 4.1. Przykłady wyznaczonych obszarów narażonych na wystąpienie powodzi od strony rzeki i od strony morza w 2019 r. 134
Ryc. 4.2. Przykład odcinka drogi w nasypie, pozostającej poza zasięgiem wód powodziowych w gminie Tryńcza (powiat przeworski) w 2019 r. 136
Ryc. 4.3. Przykład fragmentu sieci drogowej „odciętej" w wyniku zalania sąsiednich odcinków dróg w gminie Gronowo Elbląskie (powiat elbląski) w 2019 r. 141
Ryc. 4.4. Wizualizacja danych NMPT obejmująca most na Wiśle w ciągu autostrady A1 w pobliżu Grudziądza w 2019 r. 145
Ryc. 4.5. Przykład zestawienia danych NMPT i maksymalnej rzędnej zwierciadła wody (most na Odrze w ciągu autostrady A4) w 2019 r. 147

Ryc. 4.6. Skumulowane długości zalanych i „odciętych" odcinków sieci drogowej wg kategorii i scenariusza powodziowego w Polsce w 2019 r. 149
Ryc. 4.7. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r. 153
Ryc. 4.8. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 154
Ryc. 4.9. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 155
Ryc. 4.10. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 156
Ryc. 4.11. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r. 157
Ryc. 4.12. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% w Polsce w 2019 r. 158
Ryc. 4.13. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od rzeki o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 159
Ryc. 4.14. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi od morza o prawdopodobieństwie 1% w Polsce w 2019 r. 160
Ryc. 4.15. Długość „odciętych" odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem budowli ochronnej pasa technicznego w Polsce w 2019 r. 161
Ryc. 4.16. Długość zalanych odcinków dróg oraz ich udział w całkowitej długości dróg w gminach w przypadku wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem obwałowania w Polsce w 2019 r. 162
Ryc. 5.1. Postępowanie badawcze związane z budową modelu prędkości ruchu 175
Ryc. 5.2. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem skrzyżowań dla dróg krajowych 179
Ryc. 5.3. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem zabudowy dla dróg krajowych 179
Ryc. 5.4. Redukcja prędkości spowodowana zagęszczeniem ludności dla dróg krajowych 180
Ryc. 5.5. Względne spadki prędkości przejazdu odcinka sieci wynikające z zastosowania modelu prędkości ruchu względem prędkości kodeksowych w Polsce w 2019 r. 181

Ryc. 5.6. Prędkości przejazdu odcinków sieci wyznaczone zgodnie z modelem prędkości ruchu w Polsce w 2019 r. 182
Ryc. 5.7. Czas dojazdu do miast wojewódzkich w warunkach „normalnych" oraz podczas wystąpienia powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 186
Ryc. 5.8. Czas dojazdu do siedzib władz powiatowych w warunkach „normalnych" oraz podczas wystąpienia powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 187
Ryc. 5.9. Względne przyrosty czasu przejazdu pomiędzy gminami w poszczególnych województwach a ich stolicami w związku z wystąpieniem powodzi na skutek zniszczenia wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 190
Ryc. 5.10. Dostępność potencjałowa gmin w przypadku podróży krótkich (I) i długich (II) w Polsce w 2019 r. 192
Ryc. 5.11. Względne spadki dostępności potencjałowej gmin (podróże krótkie) w związku z wystąpieniem powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 194
Ryc. 5.12. Względne spadki dostępności potencjałowej gmin (podróże długie) w związku z wystąpieniem powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 195
Ryc. 5.13. Liczba pracujących oraz liczba pracujących przypadająca na 1000 mieszkańców gminy w Polsce w 2018 r. 203
Ryc. 5.14. Stosunek procentowy liczby osób przyjeżdżających do pracy spoza gminy (I) i wyjeżdzających do pracy poza gminę (II) do liczby mieszkańców gminy w wieku produkcyjnym w Polsce w 2016 r. 205
Ryc. 5.15. Dysproporcje pomiędzy liczbą przyjeżdżających do pracy w danej gminie i wyjeżdżających do pracy poza gminę w Polsce w 2016 r. 206
Ryc. 5.16. Liczba podmiotów gospodarki narodowej przypadająca na 1000 mieszkańców gminy w wieku produkcyjnym oraz liczba spółek prawa handlowego w gminach w Polsce w 2018 r. 207
Ryc. 5.17. Liczba podmiotów gospodarki narodowej zatrudniających 1000 i więcej pracowników oraz liczba podmiotów gospodarki narodowej na 1000 mieszkańców gminy w Polsce w 2018 r. 208
Ryc. 5.18. Udział rocznej liczby podróży wg poszczególnych motywacji w Polsce w 2015 r. 209
Ryc. 5.19. Średnia roczna liczba podróży przypadająca na jedną osobę realizowana w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi i wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r. 210
Ryc. 5.20. Liczba osób dojeżdżających do pracy w Polsce w 2016 r. (wyłączono przemieszczenia poniżej 100 osób i trwające dłużej niż 120 minut przy założeniu, że środkiem transportu jest samochód osobowy) 211

Ryc. 5.21. Liczba osób dojeżdżających do pracy w Polsce w 2016 r. w stosunku do długości trwania podróży realizowanej samochodem osobowym 212
Ryc. 5.22. Średni czas trwania podróży i odległość przewozu w dojazdach do pracy w Polsce w 2015 r. 213
Ryc. 5.23. Częstotliwość korzystania z samochodu osobowego w podróżach do pracy/szkoły w Polsce w 2015 r. 215
Ryc. 5.24. Obciążenie sieci drogowej w wyniku realizacji dojazdów do pracy (I) oraz podróży służbowych (II) w Polsce 217
Ryc. 5.25. Roczne przebiegi samochodów osobowych dla określonych długości podróży realizowanych w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi oraz wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r. 218
Ryc. 5.26. Struktura rocznych przebiegów samochodów osobowych wg motywacji podróży w Polsce w 2015 r. 219
Ryc. 5.27. Struktura rocznych przebiegów samochodów osobowych wg długości realizowanych podróży w związku z dojazdami do pracy, podróżami służbowymi i wszystkimi motywacjami w Polsce w 2015 r. 219
Ryc. 5.28. Względny spadek liczby pojazdów w obrębie sieci drogowej wynikający z redukcji potencjałów produkcji ruchu w motywacji związanej z dojazdami do pracy w poszczególnych scenariuszach powodziowych w Polsce 2019 r. 220
Ryc. 5.29. Względny spadek liczby pojazdów w obrębie sieci drogowej wynikający z redukcji potencjałów produkcji ruchu w motywacji związanej z podróżami służbowymi w poszczególnych scenariuszach powodziowych w Polsce w 2019 r. 221
Ryc. 6.1. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 229
Ryc. 6.2. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 230
Ryc. 6.3. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 232
Ryc. 6.4. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r. 233
Ryc. 6.5. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju, towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 234

Ryc. 6.6. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 239
Ryc. 6.7. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 240
Ryc. 6.8. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 241
Ryc. 6.9. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r. 242
Ryc. 6.10. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 243
Ryc. 6.11. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r. 246
Ryc. 6.12. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 248
Ryc. 6.13. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 250
Ryc. 6.14. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 251
Ryc. 6.15. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom krótkim w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 252
Ryc. 6.16. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 256
Ryc. 6.17. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 258

Ryc. 6.18. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 259

Ryc. 6.19. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r. 260

Ryc. 6.20. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 260

Ryc. 6.21. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 265

Ryc. 6.22. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 266

Ryc. 6.23. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 267

Ryc. 6.24. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r. 268

Ryc. 6.25. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 268

Ryc. 6.26. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r. 271

Ryc. 6.27. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 272

Ryc. 6.28. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 273

Ryc. 6.29. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 274

Ryc. 6.30. Względne spadki potencjałowej dostępności transportowej w skali kraju towarzyszące podróżom długim w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 275
Ryc. 7.1. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 282
Ryc. 7.2. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 283
Ryc. 7.3. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 285
Ryc. 7.4. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r. 285
Ryc. 7.5. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 286
Ryc. 7.6. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 290
Ryc. 7.7. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 291
Ryc. 7.8. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 292
Ryc. 7.9. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r. 293
Ryc. 7.10. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 294
Ryc. 7.11. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r. 296
Ryc. 7.12. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 298

Ryc. 7.13. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 299
Ryc. 7.14. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 300
Ryc. 7.15. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 301
Ryc. 7.16. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 305
Ryc. 7.17. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 306
Ryc. 7.18. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 308
Ryc. 7.19. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Wisły w Polsce w 2019 r. 309
Ryc. 7.20. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 309
Ryc. 7.21. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 312
Ryc. 7.22. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 313
Ryc. 7.23. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 314
Ryc. 7.24. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Dolnej Odry i Przymorza Zachodniego w Polsce w 2019 r. 315
Ryc. 7.25. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 316

Ryc. 7.26. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w regionie wodnym Łyny i Węgorapy w Polsce w 2019 r. 318
Ryc. 7.27. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Wiśle w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 319
Ryc. 7.28. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Odrze w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 320
Ryc. 7.29. Zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na Warcie w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 321
Ryc. 7.30. Względne zmiany liczby pojazdokilometrów towarzyszące podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi na głównych rzekach w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 322
Ryc. 8.1. Czasowa dostępność kumulatywna według liczby ludności o czasie dojazdu do ośrodków wojewódzkich w poszczególnych wariantach symulacji powodzi w Polsce w 2019 r. 329
Ryc. 8.2. Typologia gmin w Polsce ze względu na poziom bazowej dostępności potencjałowej i wielkość jego spadku w podróżach krótkich w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach w Polsce w 2019 r. ... 334
Ryc. 8.3. Typologia gmin w Polsce ze względu na poziom bazowej dostępności potencjałowej i wielkość jego spadku w podróżach długich w związku z wystąpieniem powodzi w poszczególnych scenariuszach w Polsce w 2019 r. ... 335
Ryc. 8.4. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach do towarzyszącego im ogólnokrajowego wpływu na dostępność w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r. 338
Ryc. 8.5. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach do towarzyszącego im poziomu zróżnicowania przestrzennego dostępności w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r. 340
Ryc. 8.6. Relacja ogólnokrajowego wpływu na dostępność powodzi w poszczególnych wariantach do towarzyszących im zmian zróżnicowania przestrzennego dostępności w podróżach krótkich (K) i długich (D) w Polsce w 2019 r. 342
Ryc. 8.7. Relacja wielkości ekspozycji systemu transportu drogowego na powódź w poszczególnych wariantach do towarzyszących im wzrostów obciążenia sieci drogowej w związku z dojazdami do pracy (P) i podróżami służbowymi (S) w Polsce w 2019 r. 345
Ryc. 8.8. Rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z dojazdami do pracy na skutek wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 348

Ryc. 8.9. Rozmieszczenie odcinków sieci drogowej o ponadprzeciętnym wzroście obciążenia ruchem związanym z podróżami służbowymi na skutek wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 350

Ryc. 8.10. Relacja zmian wielkości pracy eksploatacyjnej towarzyszących powodzi w różnych wariantach do odpowiadających im zmian zróżnicowania obciążenia sieci drogowej w związku z dojazdami do pracy (P) i podróżami służbowymi (S) w Polsce w 2019 r. 352

Ryc. A.1. Czasowa dostępność kumulatywna według liczby ludności o czasie dojazdu do ośrodków wojewódzkich w poszczególnych wariantach symulacji powodzi w Polsce w 2019 r. 394

SPIS TABEL

Tab. 2.1. Systematyka typów powodzi 41
Tab. 3.1. Powierzchnia terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na obszary dorzeczy w 2019 r. [ha] 65
Tab. 3.2. Powierzchnia terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na regiony wodne w 2019 r. [ha] 67
Tab. 3.3. Struktura zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami w podziale na obszary dorzeczy w Polsce w 2019 r. [%] 81
Tab. 3.4. Struktura zagospodarowania terenów zagrożonych powodziami w Polsce w podziale na regiony wodne w 2019 r. [%] 89
Tab. 3.5. Struktura wielkości potencjalnych strat związanych z zalaniem terenów komunikacyjnych wg regionów wodnych i scenariuszy powodziowych w Polsce w 2019 r. [%] 97
Tab. 3.6. Struktura wielkości strat związanych z zalaniem terenów pod drogami kołowymi wg regionów wodnych oraz udział ich powierzchni w ogóle tych terenów w Polsce w 2019 r. [%] 104
Tab. 3.7. Struktura przestrzenna ludności na terenach zagrożonych powodziami wg obszarów dorzeczy i regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 110
Tab. 4.1. Struktura udziałów zalanych i „odciętych" odcinków sieci drogowej wg kategorii, scenariusza powodziowego i położenia w Polsce w 2019 r. [%] ... 151
Tab. 5.1. Czynniki wpływające na prędkości samochodów osobowych w wybranych modelach prędkości 170
Tab. 5.2. Przepustowość i prędkość w ruchu swobodnym dla typów odcinków sieci drogowej 176
Tab. 5.3. Maksymalny wpływ na ograniczenie prędkości [gdzie 1 = 100%, czyli całkowite zatrzymanie ruchu] trzech cech opisujących w modelu stopień swobody ruchu na zmniejszenie prędkości na poszczególnych typach odcinków 177
Tab. 5.4. Statystyki prędkości przejazdu wg typów odcinków wyznaczone zgodnie z modelem prędkości ruchu w Polsce w 2019 r. 182
Tab. 6.1. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 235

Tab. 6.2. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 244

Tab. 6.3. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych w następstwie powodzi na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 253

Tab. 6.4. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 261

Tab. 6.5. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 269

Tab. 6.6. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z całkowitym zniszczeniem wałów przeciwpowodziowych w następstwie powodzi na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 276

Tab. 7.1. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 287

Tab. 7.2. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 294

Tab. 7.3. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca dojazdom do pracy w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. 302

Tab. 7.4. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 310

Tab. 7.5. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. 316

Tab. 7.6. Struktura zmian liczby pojazdokilometrów wg kategorii dróg towarzysząca podróżom służbowym w następstwie wystąpienia powodzi w określonym scenariuszu na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. 322

Tab. 8.1. Stosunek liczby gmin, na terenie których wystąpiły zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące dojazdom do pracy, do liczby gmin objętych powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 354
Tab. 8.2. Stosunek liczby gmin, na terenie których wystąpiły zmiany obciążenia sieci drogowej towarzyszące podróżom służbowym, do liczby gmin objętych powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 354
Tab. 8.3. Stosunek zasięgu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej towarzyszących dojazdom do pracy do zasięgu przestrzennego wyłączeń odcinków sieci drogowej w związku z powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 355
Tab. 8.4. Stosunek zasięgu przestrzennego zmian w obciążeniu sieci drogowej towarzyszących podróżom służbowym do zasięgu przestrzennego wyłączeń odcinków sieci drogowej w związku z powodzią w danym scenariuszu w Polsce w 2019 r. 356
Tab. A.1. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. w Polsce w 2019 r. [%] 369
Tab. A.2. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 371
Tab. A.3. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%] 373
Tab. A.4. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 373
Tab. A.5. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 374
Tab. A.6. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 376
Tab. A.7. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz

powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%] 378
Tab. A.8. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 378
Tab. A.9. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%] 379
Tab. A.10. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%] 380
Tab. A.11. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%] 380
Tab. A.12. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 15-minutowych interwałach czasu dojazdu do siedzib władz powiatowych w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%] 381
Tab. A.13. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 381
Tab. A.14. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 383
Tab. A.15. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%] 385
Tab. A.16. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 10% na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 385
Tab. A.17. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Wisły wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 386

Tab. A.18. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Odry wg regionów wodnych w Polsce w 2019 r. [%] 388

Tab. A.19. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na obszarze dorzecza Pregoły w Polsce w 2019 r. [%] 390

Tab. A.20. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony rzeki) na głównych rzekach w Polsce w 2019 r. [%] 390

Tab. A.21. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%] 391

Tab. A.22. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku z wystąpieniem powodzi o prawdopodobieństwie 1% (od strony morza) na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%] 392

Tab. A.23. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30 minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Wisły w Polsce w 2019 r. [%] 392

Tab. A.24. Względne zmiany liczby jednostek osadniczych i zamieszkującej je ludności w 30-minutowych interwałach czasu dojazdu do miast wojewódzkich w związku ze zniszczeniem budowli ochronnych pasa technicznego na obszarze dorzecza Odry w Polsce w 2019 r. [%] 393