

Hydrologiczny aspekt funkcjonowania dróg polnych w zlewni pogórskiej (Pogórze Ciężkowickie, Karpaty)

Rafał Krocza*^{*}

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Zakład Geomorfologii i Hydrologii Gór i Wyżyn, ul. św. Jana 22, 31-018 Kraków

Pogórze Ciężkowickie stanowiące część północnej granicy Karpat poddane jest znaczącej antropopresji już od XII w. Najistotniejsze zmiany zaszły w ciągu ostatnich 150 lat, gdy dokonał się widoczny do dziś podział na łąny, a następnie systematyczne rozdrabnianie arealu powodowane głodem ziemi. Każdy użytek rolny wymagał dojazdu, a więc podział gruntów determinował powstanie nowych fragmentów sieci komunikacyjnej. Współcześnie sieć dróg polnych, choć znacząco zmieniona, w sposób istotny może modyfikować naturalną sieć drenażu. Drogi polne podczas gwałtownych opadów stanowią uzupełnienie sieci hydrograficznej (Soja 2002), są źródłem dostawy wody i zwietrzeliny do koryta cieków (Froehlich, Słupik 1980, 1986), drenują poziomy wód gruntowych (Lach 1985), warunkują początek i kierunek przekształceń środowiska (Soja, Prokop 1995), w zależności od materiału, w którym są wycięte, mogą przekształcać się w debrze, wciosa, wąwozy (Starkel 1960).

Teren badań

Do analizy wybrano zlewnię położoną w środkowej części Pogórza Ciężkowickiego (ryc. 1). Reprezentuje ona mikroregion Pogórze Ryglickie (German 1992). Zlewnia Zalasówki posiada cechy typowe dla zlewni pogórskiej: płaskie garby i płaskodenne doliny do 150 m głębokości (Klimaszewski 1972). Zajmuje powierzchnię 9,4 km², a gęstość sieci rzecznej wyliczona z mapy to 1,6 km/km². Gęstość sieci drogowej wynosi 7 km/km² na tle 7,7 km/km² na ca-

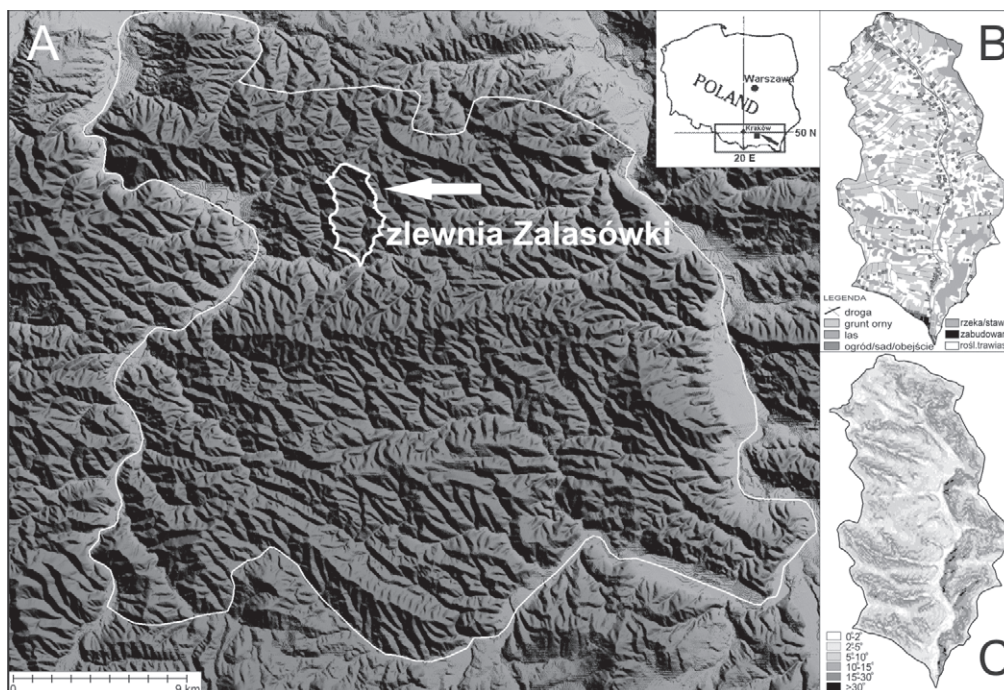
łym Pogórzu Ciężkowickim (Krocza 2006). Ma przebieg południkowy. Wycięta jest w słabo odpornych warstwach krośnieńskich wykształconych w litofacji łupkowopiaszkowej. Budowa geologiczna zdeterminowała wyraźną asymetrię doliny. Deniwelacje osiągają tu 120 m (maks. wysokość 368 m n.p.m., min. 240 m n.p.m.)

Cel i metody

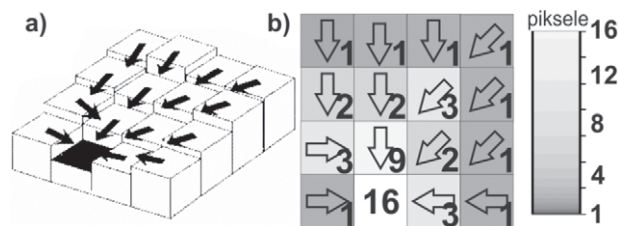
Celem pracy była budowa hydrogramu odpływu ze zlewni niekontrolowanej, będącej pod wpływem antropopresji. Proces ten polega na modyfikacji naturalnych linii odpływu ze stoku przez sieć dróg polnych. W toku konstrukcji hydrogramu sprawdzono zależności niezbędne do poprawnej symulacji odpływu, a wypracowane dla zlewni nie uwzględniających takich zmian. Przeanalizowano: linie odpływu opadu ze stoku z uwzględnieniem sieci dróg polnych, opad efektywny oraz jego przestrzenne zróżnicowanie w zlewni, sprawdzono prawa Hortona w zlewni zmodyfikowanej drogami rozumianymi jako linie odpływu. Sprawdzono również przestrzenne zróżnicowanie reakcji zlewni na opad, tj. czas potrzebny na transformację opadu w kulminacyjną falę wezbraniową.

Mapę linii odpływu ze stoku sporządzono w oparciu o cyfrowy model terenu zbudowany na podstawie mapy topograficznej w skali 1:10 000. Algorytm sporządzenia mapy polegał na znalezieniu drogi odpływu dla każdej „kropli” opadu (Heng i in. 2003). Opad transformowany jest w odpływ i odprowadzany

* e-mail: krocza@zg.pan.krakow.pl



Ryc. 1. A – Położenie Pogórza Ciężkowickiego według Kondrackiego oraz lokalizacja terenu badań, B – Użytkowanie terenu w badanej zlewni, C – Nachylenia terenu w badanej zlewni



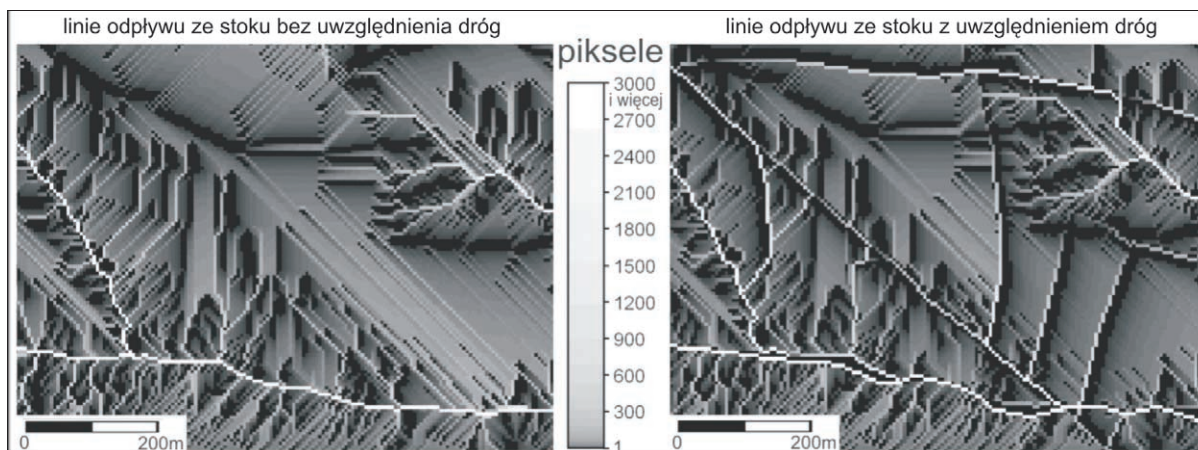
Ryc. 2. Schemat budowy modelu terenu z liniami odpływu

po liniach zawsze zmierzających z punktu położonego wyżej n.p.m. do punktu położonego niżej – układ zbiorników liniowych. Na cyfrowym modelu terenu sytuację analogiczną osiągnięto, szukając dla każdego piksela określonego w metrach n.p.m. piksela sąsiedniego położonego niżej (ryc. 2a). W etapie końcowym każdemu pikselowi przypisano wartość, którą była suma ilości pikseli położonych wyżej względem danego piksela i połączonych zgodnie z zależnością określoną jako układ zbiorników liniowych. W praktyce oznaczało to określenie ilości pikseli, z których odpływ był odprowadzany przez dany piksel (ryc. 2b). W ten sposób powstała mapa linii odpływu ze stoku.

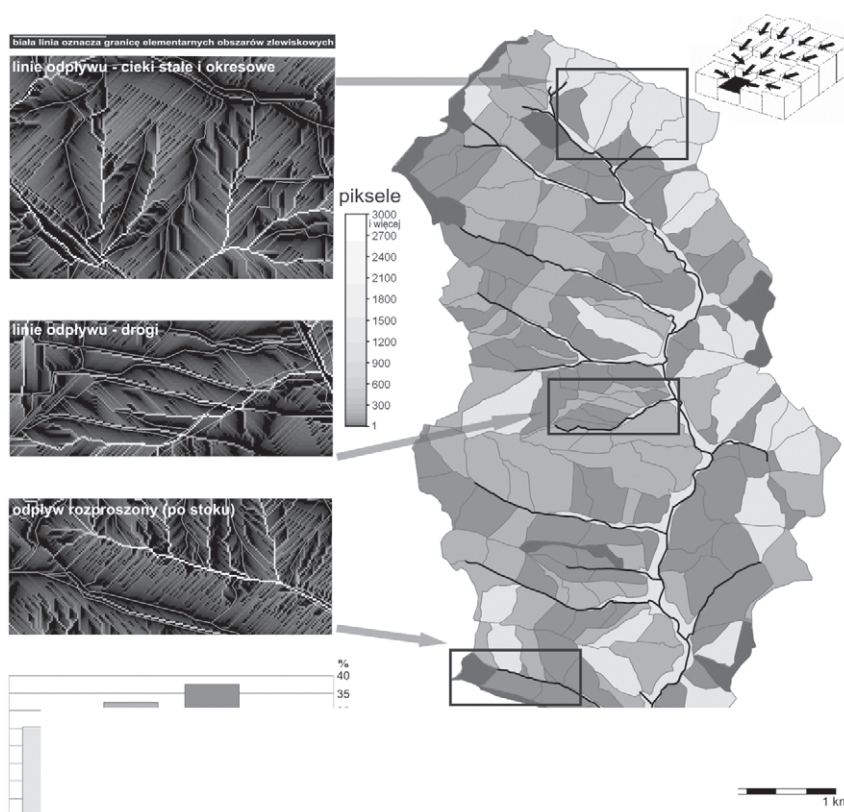
Linie odpływu opadu ze stoku a sieć dróg polnych

W kolejnym kroku na tak skonstruowaną mapę nałożono mapę sieci drogowej z założeniem, że każda droga jest wcięta o 0,5 m poniżej powierzchni terenu.

Takie rozwiązanie podyktowane było stanem dróg rozpoznanych podczas kartowania. Jak wynika z obserwacji terenowych, do 90% dróg w zlewni (w wypadku gwałtownego opadu) może uczestniczyć w odprowadzaniu wody ze stoku. Jest to możliwe, ponieważ drogi, które nie są wcięte, mają wyraźne koleiny bądź rowy ułatwiające odpływ. Mapa obejmująca drogi w sposób istotny zmodyfikowała linie odpływu nie uwzględniające owych antropogenicznych wcięć na stoku (ryc. 3). W tak pojętej zlewni wydzielono 186 elementarnych obszarów zlewiskowych, w ten sposób, że każdy z nich łączył się z główną doliną bądź jej dopływem i funkcjonował niezależnie od obszaru sąsiedniego. Na każdym obszarze elementarnym zaznaczono ciek główny. Jako ciek główny (linię odpływu) potraktowano ciąg kolejnych pikseli o najwyższych, rosnących w dół stoku wartościach. Wszystkie elementarne tereny zlewiskowe zostały podzielone na 4 grupy ze względu na charakter cieku głównego (ryc. 4). Dla całej wyznaczonej linii odpływu przyjęto taki typ podłoża, jaki stanowił największy udział. Ze względu na szorstkość podłoża wyodrębniono 4 typy: ciek stały bądź okresowy, droga nieutwardzona, droga asfaltowa, brak skoncentrowanego odpływu (odpływ rozproszony). Udział poszczególnych typów głównych linii odpływu w odprowadzaniu wody z całej zlewni jest istotny ze względów praktycznych i teoretycznych. Podczas gwałtownego opadu niska szorstkość podłoża przyczynia się do przyspieszenia kulminacji fali powodziowej. Szorstkość podłoża cieku jest również składową modeli odpływu. W zlewni Zalasówki z 37% powierzchni opad jest odprowadzany do doliny



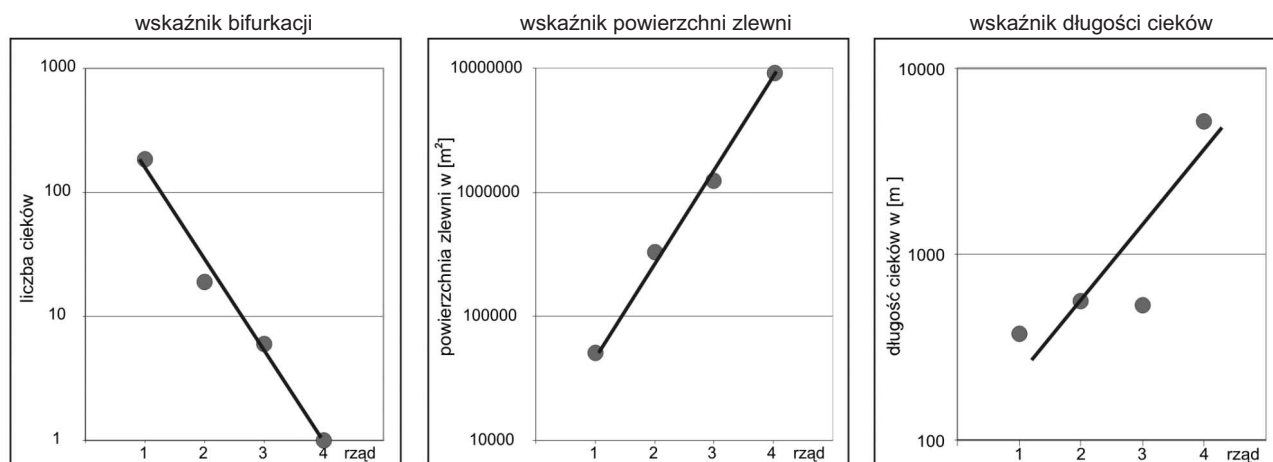
Ryc. 3. Mapy linii odpływu bez uwzględnienia dróg oraz z uwzględnieniem dróg



Ryc. 4. Mapa obszarów elementarnych wydzielonych ze względu na charakter cieku głównego

za pośrednictwem sieci dróg (zarówno asfaltowych, jak i nieutwardzonych). 38% zlewni to obszary, gdzie nie ma skoncentrowanego odpływu – opad spływa po stoku bezpośrednio do doliny, a 25% obszaru odwadnianie jest przez sieć cieków naturalnych. Stan taki jest wyrazem antropopresji, która ingeruje w naturalny mechanizm obiegu wody w zlewni. Dodatkowo brak symetryczności zlewni powoduje grupowanie typów obszarów elementarnych wydzielonych ze względu na charakter cieku głównego. Lewobrzeżna część zlewni to rejon o nachyleniach większych względem części prawobrzeżnej (zob. ryc. 1c). Znaj-

duje to odzwierciedlenie w pokryciu terenu i sieci dróg, a co za tym idzie – charakterze linii odpływu. W części prawobrzeżnej przeważają obszary odwadniane przez cieki naturalne i obszary bez skoncentrowanego odpływu. Odmienna sytuacja po przeciwnej stronie zlewni może determinować różne czasy reakcji na odpływ obu jej części. Zaproponowany i skonstruowany za pomocą cyfrowego modelu terenu podział zlewni i sieci drenażu jest zbliżony z obserwacjami terenowymi, a metoda odzwierciedla silną modyfikację linii odpływu przez sieć dróg.



Ryc. 5. Wskaźniki geomorfologicznych praw Horton dla zlewni Zalasówki

Geomorfologiczne prawa Horton w zlewni ze zmodyfikowaną siecią odpływu

Przy budowie modelu odpływu, szczególnie w zlewniach niekontrolowanych, gdzie nie ma możliwości weryfikacji wyniku, istotna jest dokładność danych wejściowych. Dane wejściowe mają często charakter empiryczny, są efektem rozważań teoretycznych bądź też wynikiem analiz parametrów fizycznogeograficznych nieuwzględniających modyfikacji antropogenicznych. Jednym z parametrów w modelach jest spełnianie przez zlewnię geomorfologicznych praw Horton: wskaźnik bifurkacji, wskaźnik długości cieków i wskaźnik powierzchni zlewni cieków. Prawa te określają hierarchię cieków i ich zlewni – są wielkościami bezwymiarowymi. Podstawowym elementem topologicznym jest rząd cieków, przy czym rzędem 1 określa się cieki, które mają punkty źródłowe (Więzik 1987). Na przykładzie Zalasówki sprawdzono, czy pogórska zlewnia zmodyfikowana siecią dróg spełnia te prawa (ryc. 5).

Zlewnia spełnia prawa Horton, jeśli składowe poszczególnych wskaźników zmieniają się w postępie geometrycznym o stały iloraz. Wskaźnik bifurkacji (liczby cieków) wyraża stały stosunek liczby cieków rzędu i do liczby cieków rzędu $i+1$. W badanej zlewni parametr jest spełniony (niewielkie odchylenia od linii trendu) i wynosi średnio 6,32; upraszczając jego interpretację, można przyjąć, że każdy ciek rzędu $i+1$ odprowadza opad z 6 cieków rzędu i . Na poszczególnych szczeblach hierarchii cieków wskaźnik waha się, co nie jest sytuacją nietypową. Podobną wartość uzyskuje wskaźnik powierzchni zlewni cieków (5,94) określany jako: stały stosunek średniej powierzchni zlewni rzędu $i+1$ do średniej powierzchni zlewni cieków rzędu i . Również w tym przypadku występują wahania w zależności od rzędów cieków badanych. Uśrednione dla całej zlewni powyższe dwa wskaźniki ściśle korespondują ze sobą. Zarówno po-

wierzchnia cieków, jak i ich hierarchia przyjmują wartości w okolicy 6, czyli ilość cieków rzędu i proporcjonalnie odpowiada średniej powierzchni zlewni rzędu i . Stan taki jest zgodny z założeniami praw Horton, ale i korzystny z punktu widzenia założeń modelu odpływu. Największe odstępstwa od kryterium uznania zlewni za hortonowską posiada wskaźnik długości cieków. W tym przypadku widać bezpośrednio udział sieci dróg w modyfikacji linii odpływu i lokalnych działów wodnych. Jeżeli wziąć pod uwagę tylko naturalne drogi odpływu, to opad transformowany w odpływ transportowany jest do cieków głównego: najpierw prostopadle do poziomic, po stoku, a następnie za pośrednictwem lokalnych dolin i obniżeń. W zlewni antropogenicznie zmodyfikowanej opad może odpływać nie tylko we wcięciu równoległe do stoku, ale również wcięcie może przejmować odpływ ze stoku położonego powyżej i w sposób istotny zmieniać drogi odpływu. Sytuację taką odzwierciedla właśnie wskaźnik długości cieków. Jest to stały stosunek średniej długości cieków rzędu $i+1$ do średniej długości cieków rzędu i . Wyliczony średni dla całej zlewni wynosi 4. Największe modyfikacje zachodzą na etapie wydzielenia cieków 1 rzędu, gdyż to głównie ich bieg jest silnie zmieniony względem naturalnego. Cieki wyższych rzędów pokrywają się z ciekami naturalnymi, ale skutki wydziału cieków rzędu 1 owocują dużymi zaburzeniami. Z analizy wszystkich wskaźników wynika, że ostatni jest najsilniej zależny od przekształceń antropogenicznych na stoku, aczkolwiek nie zaburza całości w sposób, który dawałby podstawy do nieuznania tak pojętej i zmodyfikowanej zlewni jako niehortonowskiej. Tym bardziej, że w literaturze bardzo rzadko tematem rozważań są zależności matematyczne opisujące zlewnie pod wpływem silnej antropopresji – szczególnie pod kątem zmian hydrologicznych. Ujęcie matematyczne niezbędne jest w celu budowy hydrogramów odpływu, a określenie stanu faktycznego (czyli jak opisano, a nie z mapy) jest korzystniejsze z

punktu widzenia wyniku końcowego, rozważany jest bowiem stan faktyczny, a nie hipotetyczny.

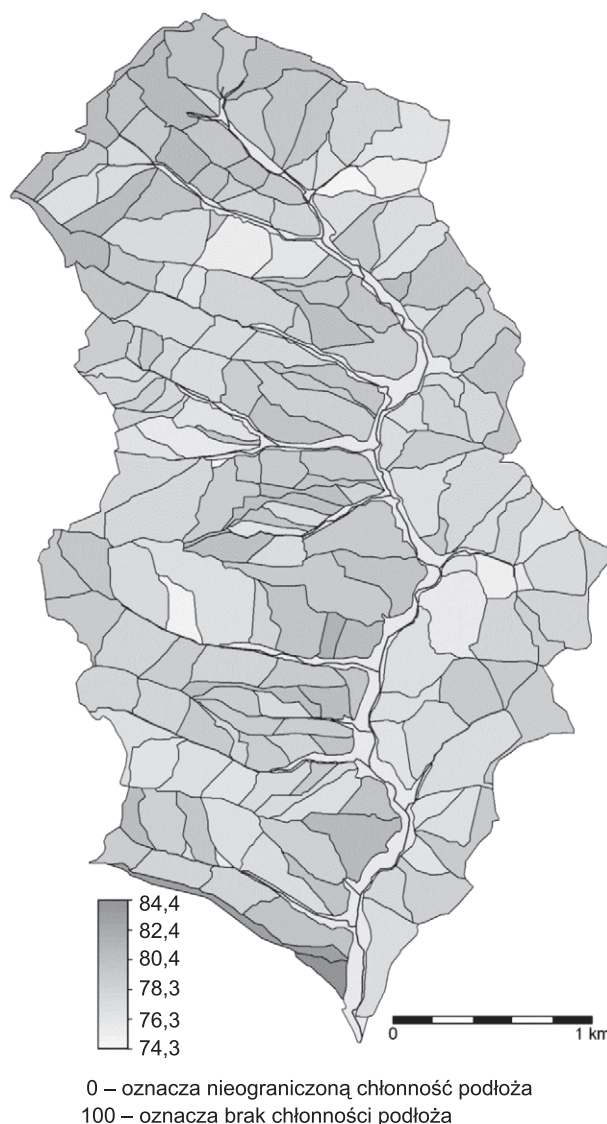
Opad efektywny

Opad może się gromadzić na powierzchni terenu, spływać zgodnie z nachyleniem stoku bądź wsiąkać i krążyć śródpokrywowo. Kierunek jego transformacji uzależniony jest w dużym stopniu od użytkowania terenu wraz z wszystkimi jego konsekwencjami. Część opadu, która przemieszczając się, trafia do koryta, nazywa się opadem efektywnym bądź skutecznym. Do wyznaczenia wielkości opadu efektywnego w każdym elementarnym obszarze zlewni Zalasówki użyto metody opracowanej w USA i znanej pod nazwą SCS (*Soil Conservation Service*). Również w polskich warunkach metoda jest stosowana i opisana w literaturze (Jankowski 1995, Byczkowski 1996, Pociask-Karteczka 2003), czego wymiernym efektem jest zaadaptowanie i dostosowanie wartości parametrów składowych do polskich warunków. W metodzie SCS opad efektywny uzależniony jest od:

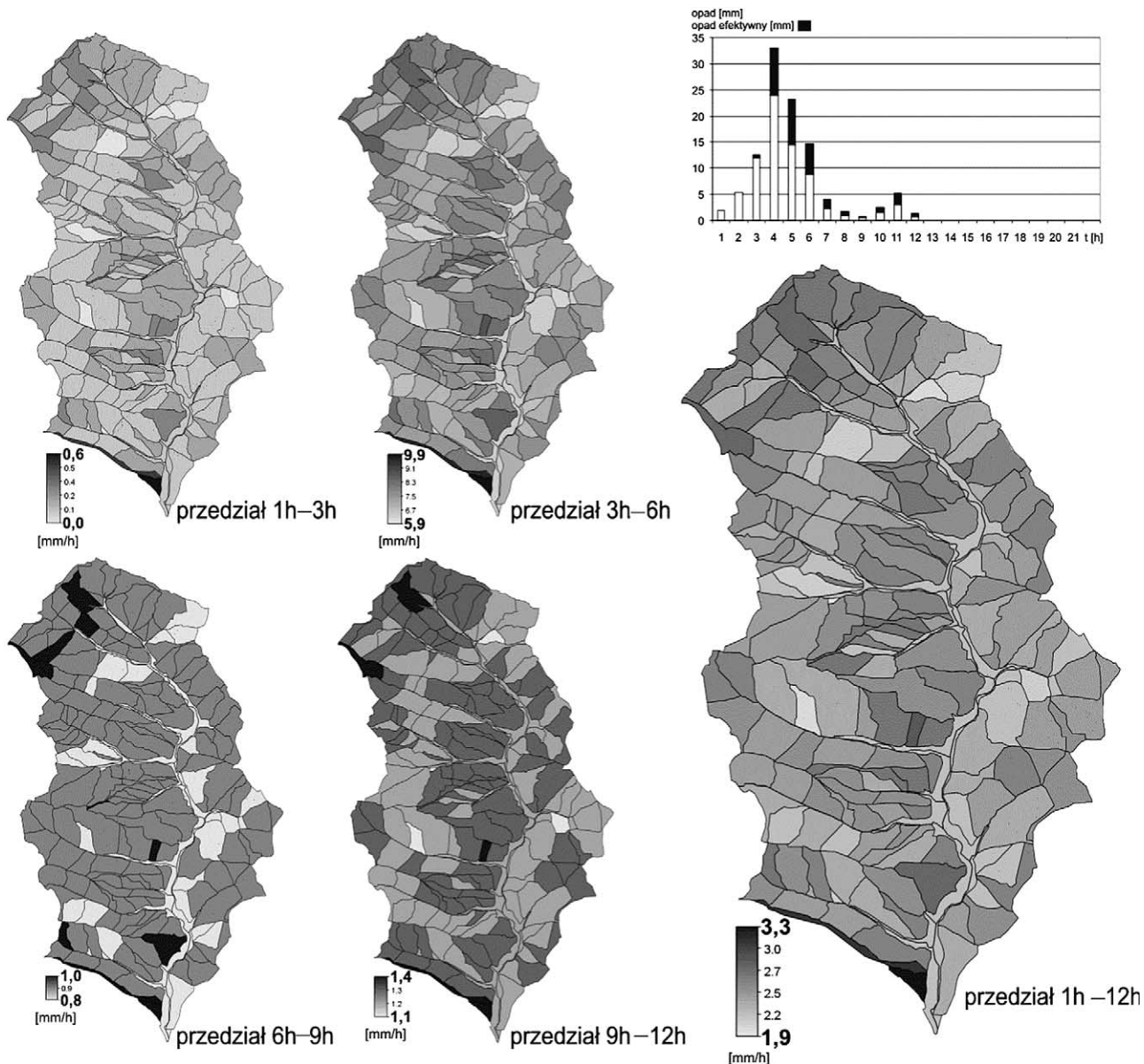
- *rodzaju gleby*; gleby w modelu SCS podzielone są na 4 grupy (A, B, C, D) w zależności od podatności na retencję; zlewnia Zalasówki została zaliczona do grupy C;
- *struktury użytkowania ziemi*; struktura użytkowania decyduje o parametrze CN (relacja opad–odpływ), przyjmuje on wartość od 0 do 100. 0 oznacza, że istnieje nieograniczona chłonność, 100 – brak chłonności, opad efektywny równa się opadowi całkowitemu; dla każdego sposobu użytkowania, warunków hydrologicznych oraz roślinności stabilizowane są wartości parametru CN; obliczono średnią ważoną dla wszystkich 186 obszarów elementarnych oraz całej zlewni (ryc. 6);
- *charakter pokrywy roślinnej*; określa on zależność pomiędzy stadium wegetacji a podatnością zlewni na wystąpienie opadu efektywnego i fali wezbraniowej; przyjęto, że w całej zlewni roślinność była w okresie pełnej wegetacji;
- *stanu uwilgocenia zlewni przed wystąpieniem opadu*; jest wyrażany przez sumę opadów z 5 dni poprzedzających opad wywołujący wezbranie (przyjęto poziom II, opad w przedziale <35 mm–53 mm> dla całego obszaru).

Z powodu braku danych opadowych z tego terenu do obliczeń użyto danych z literatury (Jankowski 1995). Sam opad efektywny nie przekłada się bezpośrednio na czas powstania fali powodziowej. Czas ten zależy też od innych parametrów (nachylenie terenu, szorstkość podłoża itp.), ale informuje o możliwościach retencyjnych zlewni, które determinują czas reakcji. Zastosowana w sposób tradycyjny metoda SCS określa opad efektywny, nie różnicując go przestrzennie – zakładając, że cała zlewnia reaguje jed-

nocześnie. Poszczególne części zlewni, reagując w różnym czasie, mogą wzmacniać bądź osłabiać kulminację. Podział zlewni na obszary elementarne funkcjonujące niezależnie pozwolił na przestrzenne zróżnicowanie zjawiska. Jeżeli podzielić cały dwunastogodzinny opad na 4 interwały czasowe, to najistotniejsze różnice rysują się w przedziale 3–6 h, kiedy to opad całkowity jest najwyższy. Różnice w opadzie efektywnym pomiędzy wyodrębnionymi obszarami sięgają w tym czasie 4 mm/h. Oznacza to, że na obszarze X opad przekroczył granicę strat początkowych i transformowany był w odpływ (9,9 mm/h opadu było odprowadzane). W tym samym czasie z terenu Y odprowadzane było 5,9 mm/h, a 4 mm/h podlegało jeszcze retencji. Zastosowany podział zlewni uwidatnia różnice w potencjalnych stratach początkowych wywołanych przez różne typy zagospodarowania terenu. Szczególnie wyrazisty jest obszar elementarny położony granicznie w południowo-zachodniej części zlewni. Stanowi go mała zlewnia (obszar elementarny) drogi poprowadzonej



Ryc. 6. Mapa parametru CN

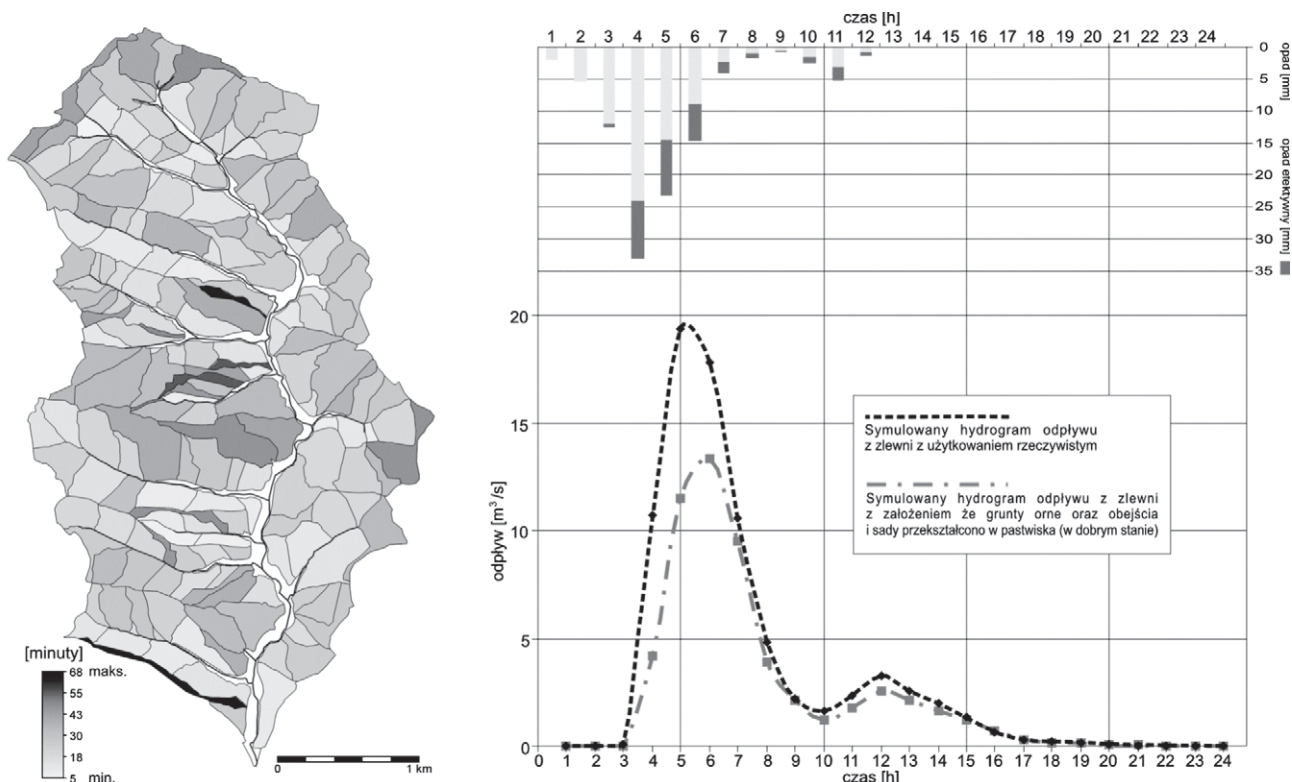


Ryc. 7. Średni rozkład opadu efektywnego

lokalnym grzbieciem. Droga ta pokryta jest asfaltem i z racji swojego poprowadzenia odwadnia tylko niewielki rejon położony po jej południowej stronie, a także odprowadza wodę opadową z niej samej – w tym przypadku charakter podłoża zdeteterminował szybką reakcję na opad spowodowany mniejszymi możliwościami retencji. Podobną sytuację zanotowano na innych obszarach o podobnych parametrach kształtu, gdzie linię odpływu stanowi droga. W pozostałych przedziałach czasowych opad efektywny zróżnicowany był w niewielkim stopniu (od 0,2 mm/h w przedziale 6–9 h do 0,6 mm/h w przedziale 1–3 h). Średni opad efektywny w czasie całego zdarzenia opadowego (12 h) był w granicach 1,9–3,3 mm/h.

Hydrogram odpływu – geomorfoklimatyczny model transformacji opadu w odpływ

Złożoność czynników wpływających na formowanie się odpływu w zlewni wymaga szerokiego spojrzenia na mechanizm obiegu wody, gdyż jest on uzależniony zarówno od opadów, jak i wielu czynników środowiska geograficznego zlewni. Na podstawie związku pomiędzy parametrami hydrogramu odpływu a ilościowymi charakterystykami geomorfologicznymi zlewni Rodriguez-Iturbe i Valdes w 1979 r. (Więzik 1987) przedstawili geomorfoklimatyczny model transformacji opadu w odpływ (GIUH). Model bazuje na probabilistycznej teorii dobiegania kropli deszczu z różnych miejsc na obszarze zlewni do profilu zamykającego zlewnię. Konstruowany z zastosowa-



Ryc. 8. Mapa czasu wystąpienia kulminacji fali wezbraniowej na obszarach elementarnych zlewni oraz hydrogram odpływu dla całej zlewni

niem modelu GIUH hydrogram został zweryfikowany w zlewniach kontrolowanych, dając dużą zbieżność z hydrogramem odpływu rzeczywistego (Więzik 1987).

Model posiada następujące założenia:

- zlewnia spełnia geomorfologiczne prawa sieci rzecznej;
- znane są funkcje prawdopodobieństwa czasu dobiegu w ciekach różnego rzędu;
- znany jest opad efektywny.

W toku symulacji otrzymuje się hydrogramy jednostkowe w określonej jednostce czasu, które po przeliczeniu na odpływ wyrażony w m^3/s i z zastosowaniem zasady superpozycji służą do budowy hydrogramu całkowitego. Jak wynika z wcześniejszej analizy, zmodyfikowana sieć dróg zlewni Zalasówki spełnia założenia modelu, co pozwoliło zastosować go do symulacji odpływu. Dodatkowo obliczono czas potrzebny do wystąpienia kulminacji fali wezbraniowej w każdym z elementarnych obszarów zlewiskowych (z konieczności użyto tu do obliczeń opad średni z całego epizodu). Oprócz danych omówionych powyżej model wymaga dodatkowych geomorfologicznych danych wejściowych, takich jak: długość cieków głównego, powierzchnia zlewni najwyższego rzędu, średni spadek podłużny koryta, przeciętny współczynnik szorstkości Manninga dla koryta cieków, szerokość koryta cieków i kilku innych będących zależnościami określonymi na podstawie wymienionych danych.

Zróznicowane warunki naturalne w zlewni przyczyniają się do nierównomiernego czasu reakcji na opad oraz jego odpływ do głównej doliny. Różnica pomiędzy minimalnym i maksymalnym czasem wystąpienia fali kulminacyjnej przekracza 1 h (min. 5 minut, maks. – minut 68), jednak po wyeliminowaniu 20 przypadków skrajnych różnica spada tylko do 40 min. Na tle wielu danych wejściowych długość cieków i powierzchnia najsilniej wpływają na czas wystąpienia fali. Z obszarów zlewiskowych o wąskim wydłużonym kształcie wezbranie dociera najpóźniej do doliny, notabene tereny te pokrywają się z poligonami, na których najszybciej formował się opad efektywny. Przyczyną ich wyodrębnienia była droga biegnąca po lokalnym grzbiecie. Sytuacja odmienna notowana jest na poligonach, gdzie droga przejmuje odpływ z części stoku i odwadnia większy, bardziej okrągły obszar. Wyróżnia się lewobrzeżna strona zlewni (część południowa), gdzie występują duże na tle reszty terenu (zob. ryc. 1) nachylenia, obszar ten reaguje stosunkowo szybko. W górnym odcinku nie notuje się obszarów o radykalnie szybszym czasie reakcji niż reszta zlewni, a stan taki mógł sugerować parametr CN, który w tym regionie osiągał wysokie wartości. Podobna sytuacja dotyczy środkowego odcinka prawobrzeżnej części – można stwierdzić, że jest wręcz odwrotnie. Świadczy to o złożoności mechanizmu kształtowania się odpływu w zlewni. Dla uwypuklenia związku użytkowania (poprzez parametr CN) z

czasem reakcji całej zlewni na opad na hydrogramie odpływu zaznaczono dwie linie. Pierwsza krzywa pokazuje przebieg wezbrania obliczony na podstawie rzeczywistego użytkowania zlewni (średnia z wszystkich obszarów elementarnych) określonego na podstawie ortofotomapy (CN 79,6). Druga krzywa pokazuje przebieg wezbrania z założeniem, że wszystkie grunty orne, sady i obojścia zostałyby przekształcone w pastwiska utrzymywane w dobrym stanie (CN 73,5). Obserwując przemiany zachodzące współcześnie na tym obszarze, należy stwierdzić, że schemat zbliżony do założonego nie jest czystą abstrakcją, a możliwości retencyjne podłoża przed, jak i w trakcie opadu mają duże znaczenie. Druga opcja spowodowałaby wyraźnie mniejszą pierwszą kulminację (o 30%), ponadto opóźniając jej wystąpienie o 1 h. Podczas pierwszego maksimum opadu zlewnia reaguje odpowiednio po 2 h i 3 h. Drugie maksimum powoduje falę, wykresu z użytkowaniem rzeczywistym większą o około 20%, ale opad jest ponad sześciokrotnie mniejszy, a sam opad efektywny stanowi około 40% (przy pierwszym maksimum opad efektywny wyniósł 20%); kluczową rolę odgrywa tu grunt, który ma w takim momencie już mocno ograniczone możliwości retencji.

Podsumowanie

Drugi polne funkcjonujące na pogórzu w sposób istotny zmieniają naturalną sieć odpływu opadu ze stoku do doliny, implikuje to szereg zmian w mechanizmie odprowadzania wody. Zaburza kryteria wedle których zlewnię określa się mianem hortonowskiej, aczkolwiek skala dysfunkcji wywołana tym stanem nie dyskwalifikuje jej w badaniach modelowych nad symulacją odpływu. Znacząco wyróżniają się elementarne obszary zlewiskowe, gdzie ciekim głównym jest droga, szczególnie jeśli droga poprowadzona jest po lokalnych wierzchołkach. Opad efektywny rozkłada się stosunkowo równomiernie na całym obszarze i tylko jego największe natężenia w sposób istotny różnicują się na terenie zlewni. Parametr CN pozwala na przestrzenne zróżnicowanie potencjalnych możliwości retencyjnych zlewni wywołanych użytkowaniem. Zależność jest istotna szczególnie w aspekcie symulowanego hydrogramu odpływu, gdzie zmiana użytkowania w sposób jednoznaczny wpłynęła na obliczony hydrogram. Zastosowanie geomorfoklimatycznego modelu odpływu do symulacji hydrogramu odpływu ze zlewni zmodyfikowanej siecią dróg polnych rozumianych jako linie odpływu daje zadowalające efekty. Znaczącym ułatwieniem w jego konstrukcji jest zastosowanie cyfro-

wego modelu terenu do wyznaczania linii odpływu opadu, szczególnie do określenia skali modyfikacji naturalnych linii drenażu przez sieć dróg polnych.

Literatura

- Byczkowski A. 1996. Hydrologia. T. 2. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Froehlich W., Słupik J. 1980. Drogi polne jako źródło dostawy wody i zwierzelin do koryta cieku. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 235.
- Froehlich W., Słupik J. 1986. Rola dróg w kształtowaniu spływu i erozji w karpaccich zlewniach fliszowych. Przegląd Geograficzny, 58.
- German K. 1992. Typy środowiska przyrodniczego w zachodniej części pogórza karpacciego. Rozprawa habilitacyjna, UJ, 246.
- Heng T., Gruber S., Shrehsta D.P. 2003. Digital terrain analysis in Ilwis. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede.
- Jankowski A. 1995. Hydrologia. Przewodnik do ćwiczeń. Wydawnictwo UŚ, Katowice.
- Klimaszewski M. 1972. Karpaty Zewnętrzne. [W:] Geomorfologia Polski. T. 1. PWN, Warszawa.
- Kondracki J. 1994. Geografia Polski. Mezoregiony fizycznogeograficzne. PWN, Warszawa.
- Krocak R. 2006. Gęstość dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim (Karpaty). Dokumentacja Geograficzna, 32, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Lach J. 1985. Transformacja rzeźby wywołana gospodarczą działalnością człowieka w dorzeczu Mleczki. Folia Geographica, series Geographica-Physica, Komisja Nauk Geograficznych PAN, Kraków, 17.
- Pociask-Karteczka J. 2003. Zlewnia właściwości i procesy. Wydawnictwo UJ, Kraków.
- Soja R. 2002. Antropogeniczne aspekty antropopresji w Polskich Karpatach, Prace Geograficzne, nr 186, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Soja R., Prokop P. 1995. Drogi jako element antropogenicznego przekształcenia środowiska. [W:] R. Soja, P. Prokop, (red.), Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Monitoring Geosystemów Górskich Warszawa.
- Starkel L. 1960. Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie, Prace Geograficzne, nr 22, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Więzik B. 1987. Geomorfoklimatyczny hydrogram odpływu. [W:] Przegląd Geofizyczny, Rocznik XXXII, zeszyt 5, PWN, Warszawa.