



**WSPÓŁCZESNE PROBLEMY  
INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

**Laura Radczuk**

**MODELOWANIE PROCESÓW  
HYDROLOGICZNYCH W DORZECZU  
GÓRNEJ I ŚRODKOWEJ ODRY**

**VIII**



**Wrocław 2008**

*Autor*  
Laura Radczuk

*Opiniodawca*  
prof. dr hab. inż. Marek Madeyski

*Redaktor merytoryczny*  
dr hab. inż. Krzysztof Pulikowski, prof. nadzw.

*Opracowanie redakcyjne*  
dr Ewa Jaworska

*Korekta:*  
mgr Elżbieta Winiarska-Grabosz  
Janina Szydłowska

*Łamanie*  
Alina Gebel

*Projekt okładki*  
Krzysztof Wyszatycki

Monografie LVII



Publikacja dofinansowana przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej we Wrocławiu

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2008

ISSN 1898-1151  
ISBN 978-83-60574-31-7

**WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO WE WROCŁAWIU**

**Redaktor Naczelny – prof. dr hab. Andrzej Kotecki**  
**ul. Sopocka 23, 50-344 Wrocław, tel. 071 328-12-77**  
**e-mail: wyd@up.wroc.pl**

---

Nakład 150 + 16 egz. Ark. druk. 7,5  
Druk i oprawa: Wydawnictwo Tekst Sp. z o.o.  
ul. Kossaka 72, 85-307 Bydgoszcz

## SPIS TREŚCI

<b>Od autorki</b> .....	<b>5</b>
<b>1. Wprowadzenie</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Charakterystyka dorzecza górnej i środkowej Odry</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Interdyscyplinarność w badaniach naukowych</b> .....	<b>14</b>
<b>4. Osobliwości modelowania systemu hydrologicznego</b> .....	<b>17</b>
<b>5. Model matematyczny przepływu wód powierzchniowych i podziemnych</b> .....	<b>20</b>
5.1. Ogólna struktura modelu .....	26
5.2. Badania eksperymentalne w zlewni Ciesielskiej Wody .....	27
5.3. Model symulacyjny systemu hydrologicznego zlewni Ciesielskiej Wody .....	32
5.4. Ocena prowadzonych badań .....	37
<b>6. Modelowanie zjawisk ekstremalnych</b> .....	<b>51</b>
6.1. Modelowanie zjawisk powodziowych .....	51
6.2. Modelowanie suszy .....	67
<b>7. Charakterystyki hydrologiczne w zlewniach niekontrolowanych</b> .....	<b>83</b>
<b>8. Przykłady opracowań z zakresu inżynierii środowiska</b> .....	<b>91</b>
<b>9. Zamiast podsumowania</b> .....	<b>101</b>
<b>10. Piśmiennictwo</b> .....	<b>102</b>



## *Od Autorki*

Dzięki tej monografii mam wspaniałą możliwość przedstawienia środowiska, z którego wyrosłam i w którym rozwiązywałam problemy z zakresu hydrologii, gospodarki wodnej i inżynierii środowiska. Nie sposób każdego, z kim współpracowałam, wymienić z imienia i nazwiska, dlatego jednocześnie wszystkich w prezentowanej pracy pod pojęciem Zespół.

Zamierzenia moje były dwojakie: z jednej strony pragnęłam opisać różnorodne rozwiązania w wymienionych wyżej dyscyplinach, z drugiej zaś przedstawić, w jaki sposób poważny skok w rozwoju modelowania procesów hydrologicznych, odnotowany w latach 60. i 70. ubiegłego wieku, wkraczał do naszego środowiska. W tym miejscu pragnę podkreślić, że dzięki bezpośredniej koleżeńskiej współpracy z grupą matematyków naszej Uczelni było możliwe tak powszechne dziś stosowanie modeli matematycznych.

Wyrażam gorące podziękowanie wszystkim, którzy współpracowali ze mną. Zawarte w monografii opracowania świadczą o tym, że nie był to czas stracony.

Pragnę serdecznie podziękować wszystkim, którzy mnie wspierali w opracowaniu monografii, a w szczególności: dr inż. Tamarze Tokarczyk, mgr inż. Barbarze Goncarz, dr inż. Joannie Markowskiej oraz najbliższym moim współpracownikom – mgr Oldze Szarskiej i Izabelli Schauer, które pomagały mi w każdej sytuacji życiowej.

Nie mniej gorąco dziękuję Dyrektorowi Instytutu Inżynierii Środowiska, prof. Stanisławowi Czabanowi, za sposobność napisania i opublikowania tej monografii w przeddzień zakończenia mojej pracy w Instytucie.

Osobno składam szczególne podziękowania prof. Włodzimierzowi Parzonce za wnikliwe przeczytanie tej monografii i serdeczne uwagi.



## 1. WPROWADZENIE

Przedkładaną monografię poświęcam Zespołowi, z którym przez 42 lata wspólnie rozwiązywaliśmy problemy hydrologiczne w zlewniach rzek dorzecza górnej i środkowej Odry. Naszym pierwszym nauczycielem był prof. Julian Wołoszyn, który nie hamował twórczych myśli członków zespołu, a wspierał i pomagał wchodzić w świat wielkiej nauki.

Na pytanie, czy przyroda jest matematyczna, uzyskiwaliśmy odpowiedzi na Seminarium Zastosowań Matematyki zorganizowanym przez doc. dr. Jana Anweilera od 1970 r. oraz w szkole „Współczesne zagadnienia hydrologii” (funkcjonującej od 1972 r.), której twórczynią i kierowniczką jest prof. Maria Ozga-Zielińska.

Koleżeństwo wśród nas, przychylność oraz życzliwość przełożonych wydziałowych, katedralnych, a później instytutowych, były podstawą rozwoju naukowego naszego Zespołu. W jego skład wchodził pracownicy z Instytutu Inżynierii Środowiska, Katedry Matematyki oraz Katedry Agro- i Hydrometeorologii, a także – w ostatnich latach – Wydziałowego Laboratorium Komputerowego, Politechniki Wrocławskiej, wrocławskiego Oddziału Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz wrocławskiego Hydroprojektu. Badania naukowe w wymienionych jednostkach obejmowały między innymi:

### **w Instytucie Inżynierii Środowiska:**

- kształtowanie i wykorzystanie zasobów wodnych,
- hydrologię i hydrogeologię inżynierską,
- modelowanie matematyczne procesów hydrologicznych i hydrogeologicznych,
- ochronę od powodzi,
- projektowanie i gospodarowanie wodą w zbiornikach retencyjnych;

### **w Katedrze Matematyki:**

- metody matematyczne w hydrologii i hydrogeologii,
- metody statystyczne w naukach przyrodniczych i technicznych,
- geometrię różniczkową;

### **w Katedrze Agro- i Hydrometeorologii:**

- badania podstawowe na stacji badawczej, która funkcjonuje jako Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii AR Wrocław-Swojec,
- parowanie terenowe,
- modelowanie matematyczne procesu ewapotranspiracji;

### **w Wydziałowym Laboratorium Komputerowym:**

- modelowanie komputerowe przepływu wody w sieci koryt rzecznych.

Lata siedemdziesiąte XX w. przyniosły rozwój matematycznego modelowania w polskiej hydrologii. Ważnym impulsem było Sympozjum Międzynarodowej Asocjacji Nauk Hydrologicznych, zorganizowane przez Polską Akademię Nauk w lipcu 1971 r.,

w Warszawie. W tym czasie zaczęto rozwijać metody modelowania cyklu hydrologicznego i systemów hydrologicznych, głównie wśród hydrologów Politechniki Warszawskiej, Akademii Rolniczej we Wrocławiu oraz w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Ten intensywny rozwój matematyzacji Hydrologii, a zarazem konieczność wniknięcia w istotę cyklu hydrologicznego jako systemu procesów przyrodniczych wymusiły wyraźne rozszerzenie grupy specjalistów świadomych złożoności warunków oddziałujących na obieg wody i inne procesy przyrodnicze.

Stworzony interdyscyplinarny zespół badawczy, w skład którego wchodził: hydrologi, hydrogeolodzy, meteorolodzy, gleboznawcy oraz partnerska grupa matematyków, wyznaczył sobie następujący kierunek badawczy obejmujący:

- opracowanie i weryfikację zbioru modeli opisujących procesy hydrologiczne, procesy przemian jakościowych w wodach śródlądowych,
- stosowanie statystycznych metod w hydrologii i gospodarce wodnej,
- modelowanie zjawisk ekstremalnych,
- wyznaczanie charakterystyk hydrologicznych w zlewniach niekontrolowanych.

Ponieważ nasze badania koncentrowały się głównie na dorzeczu Odry, w pierwszej kolejności przedstawię krótką charakterystykę obiektu, a następnie efekty badań na podstawie ważniejszych prac będących wspólnym dziełem Zespołu lub poszczególnych jego członków.



## 2. CHARAKTERYSTYKA DORZECZA GÓRNEJ I ŚRODKOWEJ ODRY

Środowisko geograficzne wywiera zasadniczy wpływ na formowanie się zasobów wodnych w dorzeczu. W przypadku Odry na specjalne podkreślenie zasługuje kształt powierzchni dorzecza oraz orografia terenu. Dorzecze Odry jest bardzo rozwinięte i wyjątkowo asymetryczne. Zlewnie lewostronnych dopływów, których obszary źródłowe leżą w Sudetach i na Przedgórzu Sudeckim oraz prawostronnej Olzy wypływającej z Beskidu Śląskiego, zalicza się do rzek górsko-nizinnych. Układ hipsometryczny całego tego mezoregionu jest zróżnicowany, charakteryzuje się piętrowym układem jednostek geoeologicznych. Wyróżnić tu można trzy zasadnicze typy krajobrazu: górski i podgórski, wyżynny oraz nizinny. Zróżnicowanie środowiska tego dorzecza wpływa nie tylko na ilość opadów, ale także na szybkość spływu i możliwości retencyjne dorzecza [Dubicki A. 1993].

Główne lewostronne dopływy Odry to: Osobłoga, Nysa Kłodzka, Oława, Śleza, Bystrzyca, Kaczawa, Bóbr, Nysa Łużycka. Prawobrzeżne dopływy, jak np. Kłodnica, Mała Panew, Widawa i Barycz, są rzekami nizinnymi. Natomiast Warta, której długość i powierzchnia zlewni są prawie równe długości i powierzchni Odry, przy połączeniu się obu rzek koło Kostrzyna, oddziałuje w sposób bardzo znaczący jedynie na dolny bieg Odry. Całkowita powierzchnia dorzecza Odry wynosi 118861 km<sup>2</sup>, z tego ok. 89% znajduje się na terenie Polski, 5% na terenie Niemiec i 6% na terenie Czech. Odra, co jest dla tej rzeki charakterystyczne, przepływa przez pradoliny, kolejno: Wrocławsko-Magdeburgską, Barycko-Głogowską, Warszawsko-Berlińską i Toruńsko-Kostrzyńską. Bieg Odry składa się zatem z odcinków dolinowych, wykorzystujących wspomniane szerokie pradoliny oraz ciasnych odcinków przelomowych, przebiegających prostopadle do pradolin. Wpłynęło to na ogólne ukształtowanie zarówno koryta Odry, jak i całego Nadodrza.

Bieg Odry był niegdyś bardzo kręty i został na przestrzeni ostatnich 200 lat na wielu odcinkach skrócony przez wykonanie przekopów wielu zakoli w XVIII wieku. Można ocenić ogólne skrócenie Odry na ok. 160 km, a obecny krajobraz jej doliny jest bogaty w starorzecza. Aktualne obwałowania często przecinają starorzecza, co znacznie osłabia ich wytrzymałość.

Na terenie dorzecza Odry ścierają się dwa klimaty, morski i kontynentalny, co powoduje dużą zmienność pogody. Jak wynika z danych IMGW [Gospodarka zasobami wodnymi w dorzeczu górnej i środkowej Odry, RZGW – Wrocław 1993], sumy roczne w trzydziestoleciu 1961–1980 wahały się od 545 mm w dorzeczu Kaczawy do 1380 mm w dorzeczu Bobru.

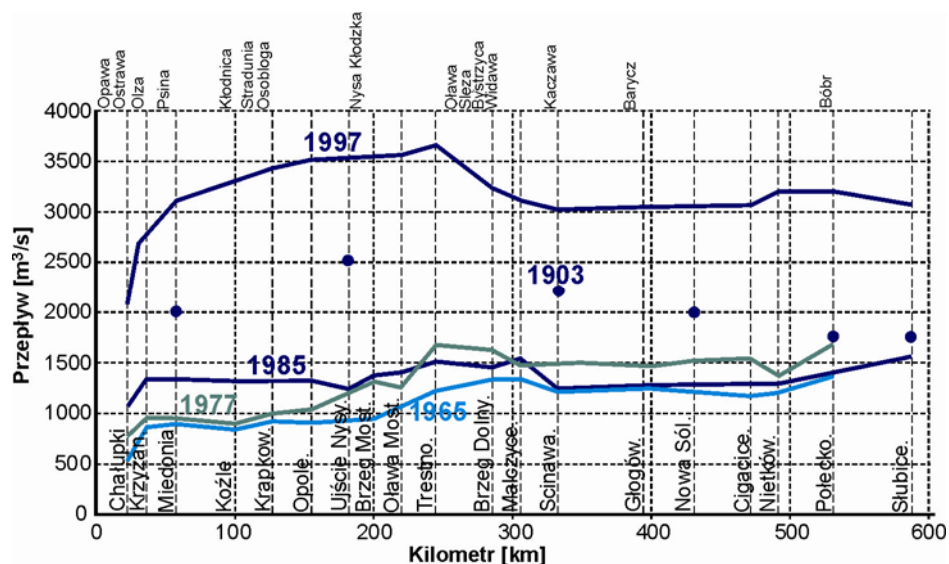
Odra należy, w porównaniu do innych rzek europejskich, do najmniej zasobnych w wodę. Można to zilustrować na podstawie stosunku przepływu średniego (SSQ)

Łaby, Wisły, Dunaju i Renu do przepływu średniego Odry, którego wartość średnia wynosi odpowiednio 1,06; 1,7; 2,9; 5,0. Współczynnik odpływu wynosi tylko 0,24 dla Odry, gdy dla Wisły – 0,28, dla Dunaju – 0,31, a dla Renu – 0,52. Ze względu na spadek podłużny wyróżnia się Odrę górną, środkową i dolną:

- górna: od źródeł do Koźła, ma długość 202 km. Na długości pierwszych 54 km Odra ma charakter rzeki górskiej o spadku 7,2‰, natomiast na terytorium Polski spadek jest dużo mniejszy i wynosi ok. 0,33‰;
- środkowa: od Koźła do ujścia Warty, o spadkach od 0,28 do 0,19‰, ma długość 522 km (w tym odcinek skanalizowany o długości 187 km i swobodnie płynący o długości 335 km);
- dolna: od ujścia Warty do Zalewu Szczecińskiego, o spadkach od 0,05 do 0,00‰.

Wezbrania powodziowe występują w dolinie Odry prawie każdego roku, bądź w górnym jej biegu, bądź w dolnym lub też na całej jej długości. Miesiącami o dużym zagrożeniu powodziowym w dorzeczu Odry są lipiec i sierpień.

W latach 988–1774 kroniki zanotowały 36 wielkich powodzi w dorzeczu Odry. W XIX w. katastrofalne powodzie wystąpiły w latach: 1813, 1854, 1855 i 1888. W XX w. miało miejsce szereg groźnych wezbrań, między innymi w latach: 1903, 1915, 1924, 1938, 1940, 1947, 1958, 1960, 1963, 1964, 1965, 1970, 1972, 1977, 1980, 1985, 1997. Największa powódź o niespotykanych dotychczas rozmiarach, przekraczających najbardziej katastroficzne oceny, wystąpiła w lipcu 1997 r. Druga pod względem wielkości – to powódź z lipca 1903 r. Jej umiejscowienie na tle wybranych wezbrań ilustruje rysunek 1.



Rys. 1. Przepływy maksymalne dla największych wezbrań na Odrze w XX w.  
Fig. 1. Maximal flows for the largest Odra floods in XX century

Na podstawie analizy historycznych przebiegów wezbrań w dorzeczu Odry można wyróżnić trzy typy formowania się fal powodziowych:

- zasięg opadów krytycznych obejmuje górską część dorzecza, powodując gwałtowny wzrost stanów wody na górnej Odrze, jak również na wszystkich dopływach jej górnego i środkowego biegu, np. wezbranie z 1997 r.;
- zasięg opadów krytycznych dotyczy źródłowej części dorzecza Odry. Koncentryczny układ rzek w tej części zlewni (Odra, Ostrawica, Olza, Opawa) oraz zbliżone ich długości powodują nakładanie się fal na krótkim odcinku Odry od ujścia Opawy do ujścia Ostrawicy. Opawa uczestniczy najczęściej w rozbudowie jej części opadającej, natomiast Olza powoduje wydłużanie czasów trwania stanów wysokich w fazie kulminacji względnie tworzy odrębny szczyt, np. wezbranie z 1985 r.;
- zasięg opadów krytycznych obejmuje zlewnie dopływów środkowego biegu Odry (Kaczawa, Bóbr, Nysa Łużycka), jak np. fala z 1965 r.

Pierwszymi obwałowaniami Odry w końcu XIII w. były groble ziemne chroniące lokalne grunty ich właścicieli. W XVI i XVII w. istniało już wiele terenów obwałowanych, które były budowane tak chaotycznie, że według ówczesnych opinii powodowały więcej szkód niż pożytku. Od drugiej połowy XVII w. pojawiały się związki wałowe, które stopniowo przebudowywały stare wały. Na przełomie XIX i XX w. kolejne ustawy – z lat: 16 IX 1899, 3 VII 1900, 12 VIII 1905 – przewidywały wiele robót związanych z ochroną od powodzi, wtedy zostały rozpoczęte poważniejsze prace przy obwałowaniu Odry. Po wielkiej powodzi z 1903 r. zintensyfikowano je i rozszerzono, m.in. uzupełniając system obwałowań, podwyższając wały istniejące do wielkiej wody z tego roku, budując wiele małych zbiorników na górskich dopływach Odry, polderów w dolinie Odry oraz kanałów ulgi w obrębie większych miast. Obwałowania Odry powstawały w różnych okresach i przy różnych założeniach technicznych. Należy stwierdzić, że nie tworzą ciągłego jednolitego systemu ochronnego.

Ostatnie powodzie (1972, 1985, 1997) wykazały, że dla ochrony ważnych aglomeracji miejskich i przemysłowych wiele wałów jest zbyt niskich. Ich podwyższenie powinno iść jednocześnie z budową zbiorników i modernizacją polderów, które zrekompensowałyby odcinaną wałami retencję dolinową.

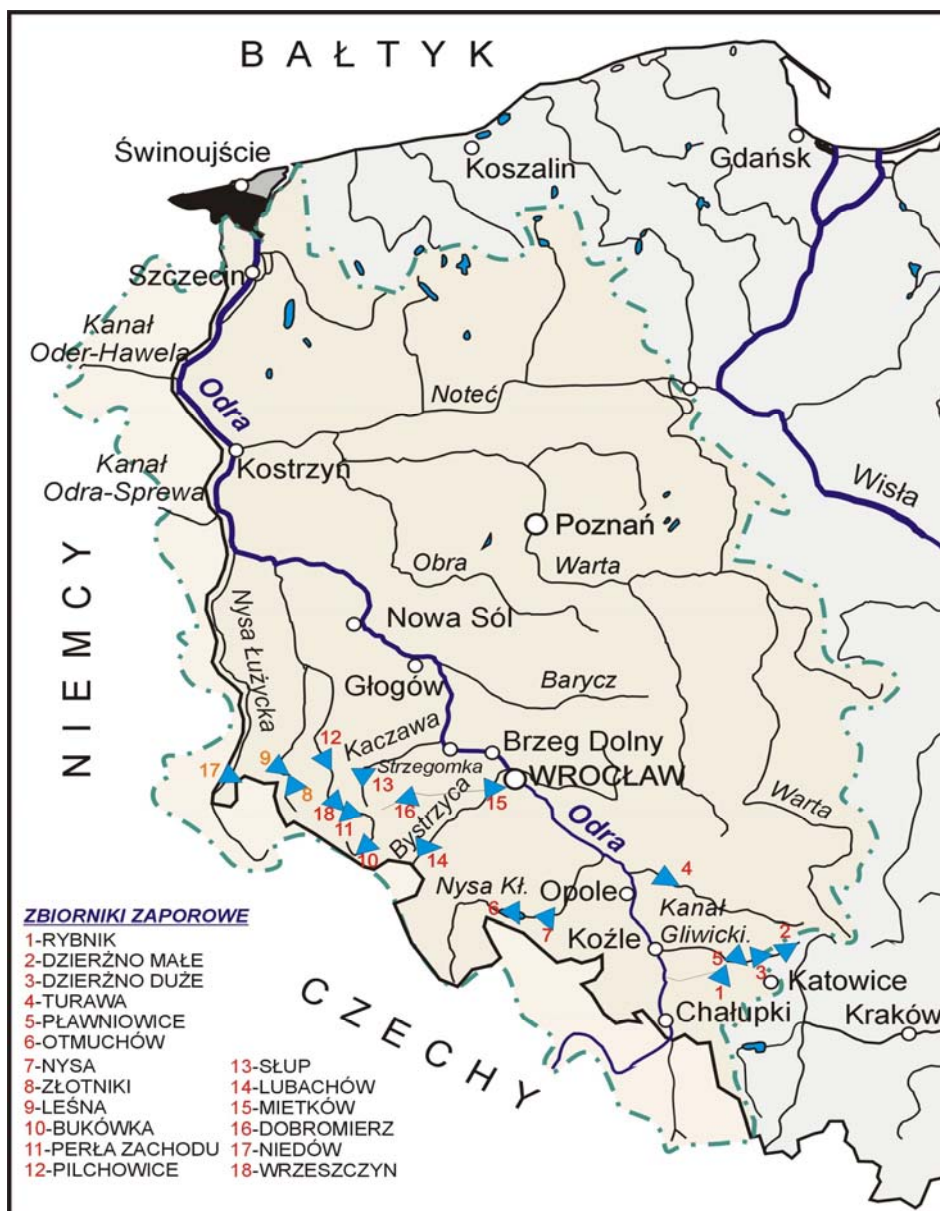
Na podstawie ustawy z 1905 r., dla lepszego zabezpieczenia przed powodzią, wykonano wiele przelewowych zbiorników polderowych na Odrze, od Wrocławia w górę rzeki. Ogólna ich pojemność wynosiła 140 mln m<sup>3</sup>, przy czym największy polder poniżej Oławy zajmował obszar około 4000 ha. Miały one za zadanie obniżyć zwierciadło wielkiej wody w obrębie Wrocławia o 50 cm. Brak możliwości sterowania nimi oraz presją rolników, którzy dążyli do całkowitego wyeliminowania zalewów i niekiedy do zamiany łągów na grunty orne, spowodowały, że w niektórych przypadkach odstępowano od wykorzystania tych polderów w czasie wezbrań. W ostatnim dwudziestoleciu, szczególnie po powodzi w latach 1977, 1985 i 1997 coraz częściej wraca się do koncepcji polderowej. Ogólna pojemność polderów oceniana jest dziś na 228 mln m<sup>3</sup>. Według oceny specjalistów system zabudowy polderowej, szczególnie górnej Odry, jest mało efektywny ze względu na małe możliwości obniżania kulminacji wezbrań. W czasie powodzi w 1985 r. większość z nich była skutecznie chroniona, a zalaniu uległy jedynie poldery: Żelazna, Bliżanowice, Trestno, Obrowiec i Lipki-Oława, natomiast w 1997 r. zalane zostały wszystkie poldery.

W trakcie modyfikacji lub budowy obwałowań, dla zabezpieczenia większych miast przed powodzią, zaprojektowano kanały ulgi w Raciborzu, Opolu, Wrocławiu i Głogowie, które po powodzi w 1997 r. zostały poddane modernizacji.

Na podstawie ustawy z 1900 r. wybudowano w dorzeczu Odry 18 zbiorników, w tym 6 wielozadaniowych i 12 suchych. Aktualnie w dorzeczu górnej i środkowej Odry po stronie polskiej znajduje się 21 zbiorników retencyjnych o pojemności całkowitej 968,48 mln m<sup>3</sup>. Pierwsze zbiorniki wodne, jak: „Pilchowice”, „Leśna”, „Złotniki” i „Lubachów”, budowane w latach 1908–1924, były przeznaczone na potrzeby energetyki wodnej. Zbiorniki te zlokalizowane są w górskiej części zlewni; ich całkowita pojemność  $V_c = 92,4$  mln m<sup>3</sup>, natomiast pojemność użytkowa  $V_{uz} = 34,0$  mln m<sup>3</sup>. Jednakże największe zbiorniki budowano na potrzeby Odrzańskiej Drogi Wodnej w celu zwiększenia głębokości tranzytowych i wydłużenia okresu żeglugowego. Zbiorniki te zlokalizowane są na zasobnych w wodę rzekach górskich oraz na prawostronnych dopływach nizinnych. Typowe zbiorniki żeglugowe to: „Otmuchów”, „Nysa”, „Turawa”, „Mietków”, „Dzierżno Duże” i „Dzierżno Małe”. Po roku 1960, z myślą o zaspokojeniu zapotrzebowania na wodę komunalną i przemysłową, wybudowano zbiorniki: „Słup”, „Bukówka”, „Dobromierz”, „Pławniowice”, „Rybnik”, „Niedów”, „Zatonie” i „Bielawa”, o łącznej pojemności  $V_c = 126,03$  mln m<sup>3</sup>. W ostatnich latach wybudowano trzy zbiorniki: „Sosnówka” – na potrzeby zaopatrzenia w wodę aglomeracji miejskiej Jeleniej Góry oraz „Topola” i „Kozielno” – w związku z eksploatacją kruszywa i ochroną powodziową.

W górnym dorzeczu Odry znajduje się 7 zbiorników zlokalizowanych na terenie Czech. Całkowita ich pojemność wynosi 386,4 mln m<sup>3</sup>, w tym 56 mln m<sup>3</sup> pojemności powodziowej. Zbiorniki te wybudowano w okresie lat 1955–1969. Podstawowym ich przeznaczeniem jest zaopatrzenie w wodę ludności i przemysłu, a w następnej kolejności ochrona przed powodzią. W dorzeczu Odry retencjonowanych jest więc 1354,88 mln m<sup>3</sup> w zbiornikach, na których rezerwa przeciwpowodziowa wynosi 384,9 mln m<sup>3</sup>.

Tak bogatą zabudowę hydrotechniczną, mającą bezpośredni związek hydrauliczny z ochroną przeciwpowodziową, ma w Polsce jedynie dorzecze Odry (rys. 2).



Rys. 2. Rozmieszczenie zbiorników na obszarze RZGW Wrocław  
 Fig. 2. Location of storage reservoirs in the activity area of Regional Water Management Board in Wrocław

### **3. INTERDYSCYPLINARNOŚĆ W BADANIACH NAUKOWYCH**

Poszukiwanie nowego paradygmatu zrównoważonego wykorzystania zasobów wodnych i ich nowego wymiaru [Zalewski i in. 1997] stworzyło szansę na interdyscyplinarne podejście do rozwiązywania problemów zlewni i na adaptację metod systemowych oraz modeli matematycznych. Przedstawiony w monografii L. Radczuk [2000] pogląd na znaczenie badań interdyscyplinarnych w zlewniach użytkowanych rolniczo jest wynikiem prac badawczych, prowadzonych w latach 1986–1990 na zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda. Niezbędne okazują się aktualnie obserwacje prowadzone razem z badaczami z innych dyscyplin naukowych na tej samej zlewni, które są atrakcyjne, ale i trudne.

Badania obiegu wody w zlewniach organizowane były najczęściej przez hydrologów, którzy według własnych potrzeb organizowali prace pomocnicze naukowców z innych dyscyplin. Z własnego doświadczenia mogę powiedzieć, iż przedstawiciele tych ostatnich najczęściej nie byli zainteresowani uczestnictwem w podobnych projektach, gdyż wydawały się one im zupełnie nieprzydatne w badaniach własnych. Ich udział kończył się najczęściej na przeprowadzeniu wycinkowego zadania. Wspólnie prowadzone prace terenowe powinny mieć charakter partnerski, gdyż tylko w takim układzie następuje wzajemna wymiana usług badawczych, wzajemna weryfikacja obserwacji, prowadzonych pod różnymi aspektami. Powietrze, woda, gleby to trzy czynniki, bez których nie byłoby życia takiego, jakie wykształciło się w ciągu milionów lat na naszej planecie i jakie obecnie znamy. Te trzy elementy są głównymi składnikami biotopu, podstawą wszystkich procesów środowiskowych, przy czym woda i powietrze, poprzez klimat i reakcje biochemiczne, odgrywają zasadniczą rolę w tych procesach.

Zlewnia hydrologiczna tworzy naturalny system przyrodniczy, w którym w zależności od celu badań można wyróżnić następujące podsystemy:

- agrometeorologiczny,
- wód powierzchniowych,
- wód podziemnych,
- glebowy,
- ekologiczny (fauna i flora),
- fizjologiczny,
- gospodarczy, społeczny itd.

Poznanie wzajemnych oddziaływań podsystemów i uwarunkowań wewnętrznych pozwoli na opracowanie:

- zasad i przykładów tworzenia interdyscyplinarnej wiedzy o środowisku przyrodniczym,
- zintegrowanych podstaw przyrodniczych dla polityki środowiskowej kraju (regionu),
- sposobów wykorzystania wiedzy o środowisku przyrodniczym dla celów naukowych, planistycznych, decyzyjnych i dydaktycznych.

O potrzebie takich badań najdobitniej świadczy wypowiedź J. Tischnera: „Myślenie bez doświadczenia jest puste; doświadczenie bez myślenia jest ślepe”.

Uważam, że na obecnym poziomie rozwoju nauk o Ziemi oraz możliwości pomiarowych skoordynowanie badań nie powinno stwarzać większych trudności. Przykładowy profil badawczy dla zlewni o charakterze rolniczym winien zawierać następujące podsystemy:

- **meteorologiczny:** opad, chemizm opadów, temperatura powietrza, promieniowanie całkowite, prędkość i kierunek wiatrów, wilgotność powietrza, ewapotranspiracja, temperatura gleby, intercepcja szaty roślinnej, grubość pokrywy śnieżnej;
- **geomorfologiczny:** erozja gleb, zamulanie zbiorników, przeobrażenie koryt rzecznych;
- **hydrologiczny:** stany i przepływy na rzekach, chemizm wód powierzchniowych, odpływy drenarskie i ich chemizm, transport rumowiska unoszonego i wlezonego;
- **hydrauliczny:** spadki zwierciadła wody, prędkości przepływu i ich rozkłady, złożenia itp.;
- **hydrogeologiczny:** stany wód gruntowych, infiltracja, chemizm wód podziemnych;
- **ekologiczny:** miejscowe układy ekologiczne i ich rozwój;
- **gleboznawczy:** wilgotność gleb, zawartość węgla, próchnicy i azotu w glebach, właściwości fizykochemiczne gleb, zaskorupianie gleb, erozja gleb;
- **rolniczo-uprawowy:** produkcja pierwotna pól uprawnych, skład gatunkowy, biomasa edafonu pól uprawnych, pomiar plonowania roślin uprawnych.

Odpowiednie wyposażenie zlewni doświadczalnej w nowoczesną aparaturę pomiarowo-kontrolną jest podstawą do podjęcia przykładowych tematów badawczych, z gwarancją ich realizacji na wysokim poziomie naukowym, zaś dokładny profil badawczy może być sporządzony dla poszczególnych bloków przez specjalistów z danej dziedziny, przykładowo:

- Badanie zależności między stężeniami i depozycją zanieczyszczeń powietrza i wód a zdrowotnością ekosystemów leśnych, rolniczych itp.;
- Badanie obiegu wody i procesów erozji, transportu i sedimentacji w zlewni użytkowanej rolniczo;
- Wpływ rolnictwa na zanieczyszczenie wód powierzchniowych;
- Wpływ zmiany użytkowania na odpływy ze zlewni;
- Badanie przepływu składników w układzie gleba-roślina-powietrze;
- Badanie mechanizmów recyrkulacji fosforu w zbiornikach sztucznych i naturalnych;
- Modelowanie przepływu materii i energii w ekosystemach;
- Znaczenie struktury krajobrazu rolniczego dla obiegu wody w zlewni;
- Ekologiczne zasady kształtowania krajobrazu rolniczego;
- Znaczenie małych zbiorników wodnych dla redukcji fosforanów i azotanów.

Kosztowne badania w zlewniach eksperymentalnych powinny być prowadzone zgodnie z integralnym modelem hydrodynamicznym, będącym najwyższą klasą modeli matematycznych. Jedynie na bazie takiego modelu istnieje możliwość uwzględnienia procesów hydrologicznych i biogeochemicznych w zlewni jako zbiorze ekosystemów, opisanych za pomocą wielu modułów jakościowo-ilościowych.

Aktualnym tematem badawczym jest ocena wpływu intensywnie rozwijających się miast i osiedli na odpływ ze zlewni.



## 4. OSOBLIWOŚCI MODELOWANIA SYSTEMU HYDROLOGICZNEGO

Pod względem genetycznym w cyklu hydrologicznym można wyodrębnić dwa główne typy procesów różniące się dynamiką oraz ośrodkiem, w którym zachodzą. Są to procesy hydrauliczne opisujące ruch wody w sieci rzecznej i na powierzchni zlewni oraz procesy filtracyjne związane z przepływem wody w ośrodku porowatym. Modelowanie procesów filtracji w interakcji z procesami hydraulicznymi w skali zlewni (regionu wodno-gospodarczego) stwarza trudności z uwagi na:

- znaczną niejednorodność środowiska, w którym zachodzą,
- różną zmienność czasową i przestrzenną modelowanych procesów,
- zmianę istotności czynników, zależnie od skali modelowanych zagadnień,
- złożone obliczenia wynikające m.in. z dużej bazy danych o rzeczywistym obiekcie.

Sformułowanie zbioru zasad tworzących model symulacyjny systemu hydrologicznego **MSSH** jest użyteczne tylko w takim stopniu, w jakim dopuszcza znalezienie rozwiązań z dokładnością wystarczającą w praktyce przy użyciu komputerów. Przyjmując wieloaspektową ocenę jakości takiego systemu, uwzględniającą głównie adekwatność do opisywanych procesów fizycznych, dokładność oraz złożoność obliczeniową, wydaje się, że efektywne rozwiązanie można uzyskać przy zastosowaniu metod dekompozycji. Metody te stanowią aparat matematyczny, umożliwiający rozwiązywanie skomplikowanych problemów poprzez sprowadzenie ich do pewnej sekwencji problemów prostszych [Marczuk 1985].

Modelowanie systemu hydrologicznego wymaga dekompozycji względem procesów fizycznych, skali modelowanego zjawiska oraz zmienności przestrzennej. Na pierwszym etapie przyjmuje się kryteria umożliwiające wydzielenie procesów, opisanie ich odpowiednimi formułami matematycznymi i określenie obszaru ich działania. Wybór kryteriów zależy od celu modelowania oraz potrzeby wyróżnienia istotnych w danym zadaniu procesów czy zjawisk charakteryzujących zlewnię. W trakcie modelowania cyklu hydrologicznego należy uwzględnić także ograniczenia wynikające z:

- połączenia procesów o różnej fizyce i dynamice zjawiska (procesy filtracyjne i hydrauliczne),
- przyjętych kroków czasowych i przestrzennych, które są podyktowane dokładnością aproksymacji i stabilnością metod obliczeniowych,
- niejednakowego stopnia rozpoznania i szczegółowości opisu poszczególnych procesów.

Zaproponowany podział jest konieczny w przypadku modelowania złożonych systemów dynamicznych, w których pojęcie zmiennych zależnych i niezależnych w odniesieniu do całego modelu nie jest ściśle sprecyzowane i traci praktyczny sens.

Wprowadzając za Ozga-Zielińską [1975] podział zmiennych na endogeniczne i egzogeniczne, otrzymuje się uzasadnienie dokonanego rozgraniczenia, ważnego z praktycznego punktu widzenia. Przez zmienne endogeniczne rozumie się zmienne, których fizykę opisuje się równaniami modelu, natomiast zmienne egzogeniczne nie są wyjaśnione przez model. Wpływają one jednak znacząco na wartości przyjmowane przez zmienne endogeniczne. Stąd też, ze względu na charakter zmiennych, wynika podział modeli na:

- podstawowe – dla zmiennych endogenicznych,
- parametryczne – dla zmiennych egzogenicznych.

Ponieważ procesy przepływu wody przedstawia się za pomocą cząstkowych równań różniczkowych (modele podstawowe), jest konieczne rozwiązanie odpowiednio sformułowanych zagadnień początkowo-brzegowych w zadanym obszarze trójwymiarowym  $D^3$  i w określonym przedziale czasowym  $(0;T)$ . Przy występujących ograniczeniach technicznych, ze względu na obiekt modelowania (zlewnia), powyższe zagadnienie musi ulec dekompozycji. Pod pojęciem dekompozycji trójwymiarowego zagadnienia granicznego należy rozumieć zbiór dwu-, jednowymiarowych lub punktowych zagadnień brzegowych w obszarze  $D^3$ , który jest sumą otrzymanych w procesie dekompozycji podobszarów  $D^3_i$ . Przyjęcie takiej metody rozwiązywania zadania zależy od dwóch kwestii. Pierwsza wiąże się z możliwością powszechnego stosowania metod jednowymiarowych o prostej postaci równań, dających stosunkowo łatwo efektywne rozwiązania. Natomiast druga – to syntetyczność informacji i wystarczająca dokładność uzyskiwana w ramach modeli jednowymiarowych w hydraulice, a dwuwymiarowych w procesach filtracyjnych. W poszczególnych obszarach trójwymiarowych  $D^3_i$  rozwiązuje się równania:

- dwuwymiarowe  $D^2$ ,
- jednowymiarowe  $D^1$ ,
- punktowe.

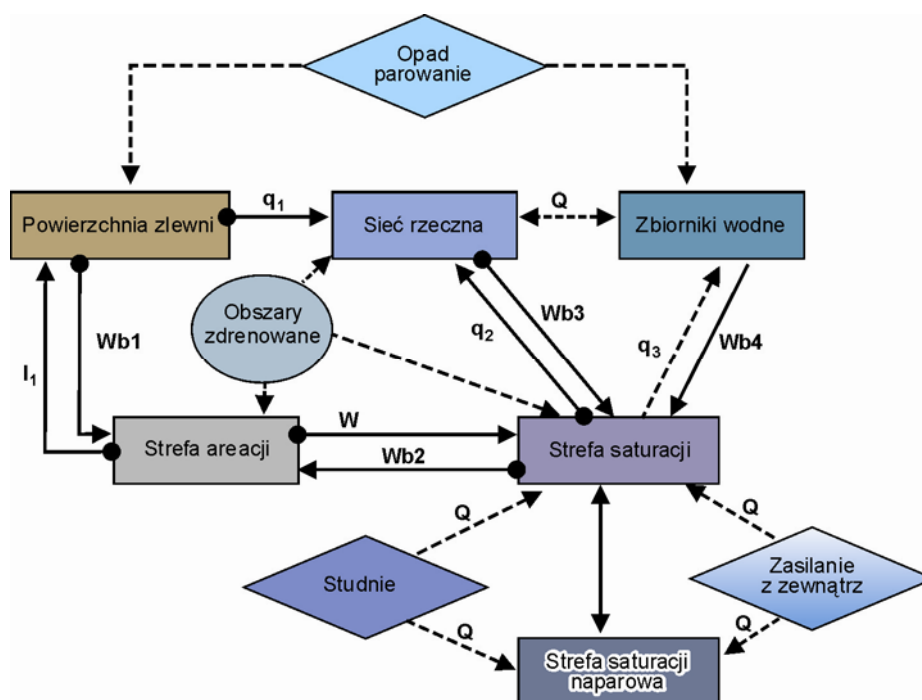
Modelowany obiekt (zlewnia) jest ograniczony przez trzy ośrodki: od góry przez atmosferę, od dołu przez spąg warstwy nieprzepuszczalnej, na bokach przez wewnętrzne granice wododziałów. Jedno- i dwuwymiarowe równania są „zszywane” na wewnętrznych granicach przy użyciu warunków brzegowych i funkcji źródłowych, przy czym w całym obszarze modelowanego obiektu zachowuje się bilans masy wody (rys. 3).

Modele parametryczne są przyporządkowane modelom podstawowym i interpretuje się je jako wewnętrzne warunki brzegowe w węzłach szablonu. Wśród tych modeli wydziela się dwa rodzaje:

- niezależne od rozwiązania ogólnego (np. model studni, dopływ spoza zlewni),
- zależne od hydrologicznych warunków modelowanego obiektu (tereny zalewowe, deszczownie).

Należy zauważyć, że taki podział jest umowny i istnieje możliwość wymiany, np. strefa aeracji, opisana równaniem empirycznym, przechodzi do klasy modeli parametrycznych. Zastosowanie takiej klasyfikacji przy modelowaniu zadań regionalnych pozwala określić wpływ gospodarczej działalności człowieka (drenowanie pól, obwałowanie rzek itp.) na reżim hydrologiczny zlewni.

Równania różniczkowe rozwiązuje się metodami dyskretnymi na siatkach. Układ takich siatek, połączonych między sobą, nazywa się szablonem modelowanego obiektu. Siatki spływu powierzchniowego i wód gruntowych są połączone w węzłach jednowymiarową siatką o wysokości odpowiadającej różnicy rzędnych.



Rys. 3. Obszary działania i związki przyczynowo-skutkowe między modelowanymi procesami [wg Antoncev i in. 1986]

Fig. 3. Activity areas and relations type cause-result between modelled processes [according to Antoncev et al. 1986]

Modele procesów lokalnych (np. przepływy na terenach zalewowych i w sieciach drenarskich itp.) są łączone węzłami siatki szablonu. Rozwiązanie otrzymane w tych węzłach interpoluje się na cały obszar.

Przed przystąpieniem do dekompozycji należy:

- wykonać jakościową analizę procesów w wydzielonych strefach,
- rozwiązać szereg lokalnych zadań odwrotnych dla określenia charakterystyk litologicznych i hydraulicznych.

Dekompozycja obiektu modelowania (zlewni) powinna być przeprowadzona przez interdyscyplinarny zespół. Podstawowym jego zadaniem jest taki opis zlewni, aby uzyskana dekompozycja uwzględniała zarówno podstawowe własności fizyczne modelowanych procesów, jak i warunki zdeterminowane przez model matematyczny. Właśnie na tym etapie muszą uzupełniać się wzajemnie: teoria matematyczna, modele komputerowe i eksperyment.

## 5. MODEL MATEMATYCZNY PRZEPLYWU WÓD POWIERZCHNIOWYCH I PODZIEMNYCH

Przedstawione w pracy podejście pochodzi w głównej mierze z doświadczeń zespołu autorskiego, zdobytych w ramach realizacji programu badawczego CPBP-03.09 [Radczuk, Jakubowski, Szulczewski, Czamara 1994] oraz najnowszej literatury [Antoncew i in. 1986; Radczuk 1986; Kundzewicz 1985; Ozga-Zielińska 1976; Soczyńska 1989] na temat modelowania matematycznego w hydrologii.

W modelu integralnym zlewni do modeli podstawowych zaliczono: modele sływu powierzchniowego, przepływu w korytach rzecznych, migracji wody w strefie aeracji i saturacji, natomiast do klasy modeli parametrycznych zaliczono modele procesów opisanych formułami empirycznymi (np. parowanie).

### ➤ Model dynamiczny procesu sływu powierzchniowego

Model sływu powierzchniowego został opisany dwuwymiarowym równaniem St. Venanta [Ślusarz 1988]. Praktyczne wykorzystanie tych równań jest silnie ograniczone z uwagi na:

- bardzo dużą liczbę danych niezbędnych do określenia parametrów modelu,
- trudną osiągalność tych danych,
- zmienność opadów, niejednorodność pokrycia terenu oraz wychodzenie na powierzchnię wód gruntowych, prowadzące bardzo często do „zwyrodnienia” tych równań [Antoncew i in. 1986].

Dlatego powszechnie stosuje się uproszczone modele sływu powierzchniowego. W modelu sływu powierzchniowego w systemie **MSSH** przyjmuje się schematyzację terenu w postaci zestawu powierzchni prostokątnych o zmiennej szerokości i długości oraz różnych kątach nachylenia.

Przyjęto założenie, że sływ odbywa się w postaci ruchu cienkiej warstwy wody po nachylonej powierzchni. W zależności od rodzaju ruchu proces ten może być opisany równaniami:

- dla ruchu laminarnego:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_j}{dt} = \frac{G_{j-1}q_{j-1}(t) - G_j q_j(t)}{G_j \Delta x_j} + I_e(t), \\ q_j(t) = \begin{cases} \frac{g \sin \rho_j}{3\nu} (y_j(t) - c_j)^3, & \text{gdy } y_j(t) > c_j, \\ 0, & \text{gdy } y_j(t) \leq c_j, \end{cases} \\ q_0(t) = 0, \quad y_j(0) = d_j, j = 1, 2, \dots, N; \end{array} \right. \quad (1)$$

- dla ruchu turbulentnego:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_j}{dt} = \frac{G_{j-1}q_{j-1}(t) - G_j q_j(t)}{G_j \Delta x_j} + I_e(t), \\ q_j(t) = \begin{cases} \frac{(\sin \rho_j)^{1/2}}{3\nu} (y_j(t) - c_j)^{5/3}, & \text{gdy } y_j(t) > c_j, \\ 0, & \text{gdy } y_j(t) \leq c_j, \end{cases} \\ q_0(t) = 0, \quad y_j(0) = d_j, j = 1, 2, \dots, N; \end{array} \right. \quad (2)$$

gdzie:

$y_j$  – głębokość warstwy wody na  $j$ -tej powierzchni [L],

$q_j$  – natężenie przepływu z  $j$ -tej powierzchni na jednostkę powierzchni [ $LT^1$ ],

$G_j$  – iloraz szerokości  $j$ -tej powierzchni spływowej do średniej szerokości powierzchni,

$\rho_j$  – kąt nachylenia  $j$ -tej powierzchni,

$d_j$  – głębokość warstwy wody na  $j$ -tej powierzchni dla  $t=0$  [L],

$n_j$  – współczynnik szorstkości Manninga dla  $j$ -tej powierzchni [ $TL^{1/3}$ ],

$\Delta x_j$  – długość  $j$ -tej powierzchni [L],

$\nu$  – współczynnik lepkości kinematycznej [ $L^2T^{-1}$ ],

$c_j$  – wielkość retencji powierzchniowej na  $j$ -tej powierzchni [L],

$N$  – liczba powierzchni spływowych,

$I_e$  – natężenie opadu skutecznego.

Prezentowany model zweryfikowano na przykładzie zlewni laboratoryjnej oraz poletka spływowego [Ślusarz 1988]. Realizacja modelu w postaci użytkowego programu komputerowego SPŁYW umożliwia wygodne jego stosowanie w praktyce.

➤ **Model przepływu w systemie sieci rzecznej**

Ruch jednowymiarowy w korytach otwartych można opisać układem równań St. Venanta, umożliwiającym modelowanie systemu sieci rzecznej, w postaci równania ciągłości:

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta x} = d_1(x, t) \quad (3)$$

oraz równania zachowania pędu:

$$\frac{1}{g} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{1}{g} \frac{\delta}{\delta x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + A \frac{\delta v}{\delta x} + AS_f - AI \frac{d_1(v_q - v)}{g} = 0 \quad (4)$$

gdzie:

$x$  – zmienna oznaczająca odległość od źródła [L],

$t$  – czas [T],

$A = A(x, t)$  – pole przekroju zwilżonego w punkcie  $(x, t)$ , [L<sup>2</sup>],

$Q = Q(x, t)$  – natężenie przepływu przez pionowy przekrój cieku [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>],

$y = y(x, t)$  – wysokość zwierciadła wody nad dnem cieku [L],

$S_f = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 y^{4/3}}$  – spadek linii energii w ruchu jednostajnym (nachylenie tarcia),

$I$  – nachylenie dna cieku,

$d_1$  – dopływ boczny [L<sup>3</sup>L<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>],

$n$  – współczynnik szorstkości Manninga [TL<sup>-1/3</sup>],

$v_q$  – rzut wektora prędkości dopływu bocznego na oś cieku [LT<sup>-1</sup>],

$v$  – prędkość [LT<sup>-1</sup>].

W powyższym zagadnieniu dopływ boczny  $d_1$  jest definiowany jako suma dwóch składowych spływu powierzchniowego obliczonego równaniem (1) lub (2) oraz dopływu wód gruntowych, obliczonego równaniem Boussinesq'a. Na połączeniu cieków w funkcji  $d_1$  uwzględnia się dodatkowo skoncentrowany dopływ boczny.

Rozwiązanie układów równań (3) i (4) uzależniono od następujących warunków:

- początkowe

$$y(x, 0) = y_p(x),$$

$$Q(x, 0) = Q_p(x),$$

- brzegowe

$$y(0, t) = y_b(t),$$

$$Q(0, t) = Q_b(t).$$

Przybliżone rozwiązanie tego zagadnienia otrzymano, stosując metodę iteracyjną, skonstruowaną w oparciu o niejawny dwuwarstwowy schemat różnicowy [Dąbrowski 1990].

➤ **Model zmian wilgotności w profilu glebowym**

Procesy wolnego przepływu wody przez glebę są opisywane przez równanie dyfuzji, zwane także równaniem Fokkera-Plancka [Szulczewski, 1988], w każdej z jednorodnych warstw:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} - K(\Theta) \right] - q(\Theta, z), \quad (5)$$

gdzie:

$z, t$  – odpowiednio: zmienna przestrzenna skierowana zgodnie z działaniem siły ciężkości [L] i czasem [T],

$\Theta = \Theta(z, t)$  – wilgotność objętościowa gleby na głębokości  $z$  w chwili  $t$  [ $L^3L^{-3}$ ],

$D = D(\Theta)$  – współczynnik dyfuzji gleby [ $L^2T^{-1}$ ] związany z przewodnością hydrauliczną gleby  $K = K(\Theta)$  [ $LT^{-1}$ ] oraz ciśnieniem ssącym gleby  $h = h(Q)$  [L] określony zależnością:

$$D(\Theta) = K(\Theta) \left( \frac{dh}{d\Theta} \right), \quad (6)$$

$q = q(\Theta, z)$  – funkcja źródłowa charakteryzująca się jednostkową konsumpcją wody w glebie (pobór wody przez korzenie roślin) [ $L^3L^{-3}T^{-1}$ ].

Profil glebowy o głębokości  $L$  jest złożony z  $r$  jednorodnych warstw. W każdej z nich gleba jest charakteryzowana przez funkcje  $h_s(\Theta)$ ,  $K_s(\Theta)$ ,  $D_s(\Theta)$ . Niech  $z_s$  będą punktami styku warstw dla  $s = 1, 2, \dots, r-1$ . Na granicy warstw przyjęto następujące warunki wynikające z interpretacji fizycznej rozpatrywanego zagadnienia:

- ciągłość ciśnień

$$\lim_{x \rightarrow z_s - 0} h_s(\Theta) = \lim_{x \rightarrow z_s + 0} h_{s+1}(\Theta), \quad (7)$$

- ciągłość przepływu

$$\lim_{x \rightarrow z_s - 0} \left[ -D_s(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} = K_s(\Theta) \right] = \lim_{x \rightarrow z_s + 0} \left[ -D_{s+1}(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} = K_{s+1}(\Theta) \right] \quad (8)$$

gdzie:

$s = 1, 2, \dots, r-1$ .

Uzyskany model matematyczny procesów hydrologicznych zachodzących w rozpatrywanym profilu glebowym składa się w tym przypadku z równań różniczkowych postaci (5) oraz  $2(r-1)$  równań spełnionych na granicy warstw. Rozwiązanie równania (5) podlega następującym warunkom:

- warunek początkowy

$$\Theta(z, 0) = \Theta_p(z), \quad \text{dla } 0 \leq z \leq L,$$

gdzie:

$L$  – głębokość rozważanego profilu glebowego;

- warunki brzegowe typu Dirichleta:

$$\begin{aligned}\Theta(0,t) &= \Theta_g(z), & \text{dla } t > 0, \\ \Theta(L,t) &= \Theta_d(z), & \text{dla } t > 0;\end{aligned}\tag{9}$$

- warunki brzegowe typu Neumana:

$$\begin{aligned}q_g(t) &= \left[ -D_1(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + K_1(\Theta) \right], z = 0, \\ q_d(t) &= \left[ D_{r-1}(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} - K_{r-1}(\Theta) \right], z = L,\end{aligned}\tag{10}$$

gdzie:

$q_g(t)$  – przepływ przez powierzchnię gleby ( $q_g(t) > 0$  – proces sorpcji,  $q_g(t) < 0$  – proces desorpcji),

$q_d(t)$  – przepływ do rozpatrywanego profilu glebowego.

Aby przystąpić do rozwiązania równania (5), po uwzględnieniu warunków początkowo-brzegowych, konieczna jest znajomość funkcji  $K_s = K(\Theta)$ ,  $h_s = h_s(\Theta)$ , dla  $s = 1, 2, \dots, r$ , oraz  $q(\Theta, z)$ . Natomiast współczynnik dyfuzji dla rozpatrywanych gleb wyznacza się za pomocą równania (6).

Szczególnie istotnym zagadnieniem w wyznaczaniu strat wody do atmosfery z gleby porośniętej roślinnością jest określenie funkcji  $q$  odpowiedzialnej w równaniu (5) za proces poboru wody przez korzenie roślin. Została ona skonstruowana w ten sposób, aby został wzięty pod uwagę gatunek rośliny, stadium jej rozwoju oraz warunki wilgotnościowo-klimatyczne [Szulczewski 1989].

Przybliżone rozwiązanie tak określonego zagadnienia różniczkowego z odpowiednio dobranymi warunkami początkowo-brzegowymi oraz wyżej określonymi funkcjami otrzymano metodą schematów różnicowych. Metody rozwiązania tego zagadnienia i opisy procesów zachodzących w strefie aeracji przedstawiono w pracach Szulczewskiego [1988, 1989]. Opracowano także metody pozwalające na wyznaczanie parametrów fizycznych gleby [Szulczewski 1990].

### ➤ Model odpływu podziemnego

Do opisu nieustalonego ruchu wód gruntowych wykorzystano równanie Boussinesq:

$$\mu \frac{\delta H}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left( T_x \frac{\delta H}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left( T_y \frac{\delta H}{\delta y} \right) + W, \tag{11}$$

gdzie:

$H$  – wysokość naporu hydraulicznego w punkcie o współrzędnych  $(x, y)$ , [L],

$t$  – czas [T],

$T_x, T_y$  – przewodność wodna pozioma [ $L^2T^{-1}$ ], przy czym



$$T_x = \begin{cases} K_1(H-a) & \text{dla filtracji swobodnej,} \\ K_1m & \text{dla filtracji naporowej,} \end{cases}$$

$$T_y = \begin{cases} K_2(H-a) & \text{dla filtracji swobodnej,} \\ K_2m & \text{dla filtracji naporowej,} \end{cases}$$

$K_1, K_2$  – współczynniki wodoprzepuszczalności w kierunku osi  $OX$  i  $OY$ , odpowiednio:

$a$  – rzędna spągu,

$m$  – miąższość warstwy przepuszczalnej, [L]

$\mu$  – współczynnik odsączalności, odpowiednio dla filtracji swobodnej i naporowej [-],

$W$  – funkcja źródłowa, suma zasilania lub poboru wody [L, T].

Równanie (11) uzupełniono warunkiem początkowym:

$$H(x, y, 0) = h_0(x, y)$$

oraz warunkami brzegowymi I, II i III rodzaju:

$$\begin{aligned} \text{I} \quad & H(x, y, t) = H_1(x, y, t), & \text{dla } (x, y) \in G_1 \quad t > 0, \\ \text{II} \quad & q(x, y, t) = q(x, y, t), & \text{dla } (x, y) \in G_2 \quad t > 0, \\ \text{III} \quad & q(x, y, t) = l_1 K_1 G_x + l_2 K_2 H_y + \alpha H, & \text{dla } (x, y) \in G_3 \quad t > 0, \end{aligned}$$

gdzie:

$H_1 q_1$  – zadana wysokość piezometryczna lub natężenie przepływu,

$[l_1, l_2]$  – wektor normalny do brzegu,

$\alpha$  – współczynnik kombinacji liniowej,

$G_1, G_2, G_3$  – fragmenty brzegu  $\partial G$  obszaru filtracji  $G_1 \cup G_2 \cup G_3 = \partial G$ .

Do rozwiązania równania (11) uzupełnionego warunkami początkowymi i brzegowymi zastosowano metodę elementu skończonego. Pełny opis metody oraz programu użytkowego przedstawiono w pracy Chalfena [1990].

### ➤ Modele parametryczne

Przykładem niezbyt skomplikowanego modelu matematycznego opisującego odpływ z sieci drenarskiej w glebie o strukturze warstwowej jest równanie:

$$\frac{d}{dx} = \left( F(y) + \frac{dy}{dx} \right) + f(y) = 0, \quad (12)$$

gdzie:

$x$  – zmienna przestrzenna ( $0 < c < L$ ),  $L$  – rozstaw drenów,

$y$  – wysokość zwierciadła ponad spągiem [L],

$f$  – natężenie infiltracji, [LT]<sup>-1</sup>

$F$  – funkcja zależna od miąższości i współczynników filtracji rozpatrywanych warstw glebowych.

Pełny opis zagadnienia przedstawiono w monografii Ćwikowskiego [1989], natomiast inne uproszczone modele procesów omówiono w opracowaniu Radczuk [1986].

Modelem parametrycznym mającym duże zastosowanie w bilansowaniu zasobów wodnych jest parowanie. Parowanie odbywa się z każdej wilgotnej powierzchni będącej w kontakcie z powietrzem nienasyconym – parą wodną [Musiał 2001].

Parowanie z powierzchni zlewni to proces ewapotranspiracji, którego przebieg zależy od następujących czynników:

- meteorologicznych: temperatura, prędkość wiatru, usłonecznienie, niedosyt wilgotności i powietrza;
  - roślinnych: gatunek rośliny, faza rozwoju, stopień zawartości szaty roślinnej, wielkość masy podziemnej i naziemnej;
  - glebowych: struktura i stan uwilgotnienia gleby, głębokość zalegania wód podziemnych;
  - agrotechnicznych: sposób uprawy gleby, nawożenie i nawodnienie.
- Najważniejsze używane w agrometeorologii metody [wg Musiał 2000] to:
- aerodynamiczne, do których należą metody: wirów, turbulenta, średniego profilu i oporowa;
  - bilans cieplny powierzchni parującej,
  - bilans wodny zlewni,
  - zależności empirycznych.

## 5.1. Ogólna struktura modelu

Strukturę połączeń poszczególnych procesów przedstawiono na rysunku 3. Prostokątami oznaczono procesy, których modele przyjęto jako podstawowe, takie jak: spływ powierzchniowy, przepływ w sieci rzecznej, migracja wody w strefie aeracji oraz w strefie saturacji, z wydzieleniem swobodnego zwierciadła wody, a także wód naporowych. Kółkami przedstawiono modele parametryczne, a rombami – procesy zewnętrzne w stosunku do modelowanego obiektu. Procesy w wydzielonych obszarach są łączone tylko warunkami granicznymi i funkcjami źródłowymi.

W modelu integralnym relacje przestrzenno-czasowe pomiędzy poszczególnymi wielkościami fizycznymi występującymi w elementach wewnętrznych modelu i elementach „zszycia”, a także zależności funkcyjne zachowują w aspekcie związku przyczynowo-skutkowego interakcję równoczesną. Na przykład transport wody między dwoma sąsiednimi modelami jest rezultatem gradientu potencjału i jednocześnie sam powoduje zmianę tego gradientu.

W **MSSH** spływ powierzchniowy modeluje się równaniem (1) lub (2), a funkcja „źródłowa” jest opadem efektywnym o postaci:

$$I_e = P - E - INF, \quad (13)$$

gdzie:

$P$  – opad,

$E$  – parowanie,

$INF$  – infiltracja.

Rozwiązując równanie spływu powierzchniowego, otrzymuje się część dopływu bocznego  $q_1$  do rzek. Z chwilą pełnego nasycenia wierzchniej warstwy gleby (wówczas funkcja źródłowa  $I_e > 0$ ) następuje początek spływu powierzchniowego. Początek spływu zmienia warunek brzegowy w równaniu opisującym strefę aeracji (5) z warunku II rodzaju (natężenie infiltracji jest równe natężeniu opadu) na warunek I rodzaju (wilgotność na powierzchni jest maksymalna dla danej gleby), (**Wb1**).

Przepływ wody w systemie sieci rzecznej opisuje się równaniami St. Venanta (3), (4). Dopływ boczny  $d_1$  składa się z dwóch składowych:  $q_1$  – spływu powierzchniowego oraz  $q_2$  – odpływu ze strefy saturacji. Przepływ rzeczny wyznacza dla strefy wód gruntowych wewnętrzny lub zewnętrzny warunek brzegowy I rodzaju (**Wb3**).

Proces ruchu wody w strefie aeracji opisuje się jednowymiarowym równaniem (5), z warunkami początkowym (9) i brzegowymi (10). Funkcja źródłowa dla strefy aeracji uwzględnia pobór wody przez korzenie roślin [funkcja  $q$  w równaniu (5)] i nie jest związana w sposób bezpośredni z podstawowymi procesami. Warunki brzegowe dla strefy aeracji są na powierzchni determinowane przez opad i parowanie oraz proces spływu powierzchniowego (**Wb1**). Dolny warunek brzegowy dla tej strefy pozostaje w interakcji ze strefą saturacji poprzez funkcję źródłową dla strefy saturacji określającą zasilanie infiltracyjne  $W$  w równaniu (11) oraz poziom wód gruntowych wynikający z ruchu w strefie saturacji jako warunek brzegowy I rodzaju dla strefy aeracji (**Wb2**).

Wody gruntowe są modelowane równaniem (11) z warunkami brzegowymi I, II i III rodzaju, określonymi w opisie modelu. Z rozwiązania równania (11) otrzymuje się zasilanie rzek wodami gruntowymi ( $q_2$ ).

## 5.2. Badania eksperymentalne w zlewni Ciesielskiej Wody

W planowaniu eksperymentu [Eliasiewicz i in. 1989, Chomicz i in. 1989] ważnym zagadnieniem jest ustalenie liczby czynników mających istotny wpływ na przebieg procesów zachodzących w zlewni. Źródłem wiadomości są przede wszystkim informacje wynikające z fizyki zjawiska. Ilościowy i jakościowy przebieg procesów zachodzących w zlewni został opisany modelem matematycznym MIZUR [Radczuk 1986]. Proponowany model zlewni rolniczej ma dostatecznie skomplikowaną i rozbudowaną strukturę, uwzględniającą wszystkie istotne procesy cyklu hydrologicznego. Organizację badań podstawowych rozpoczęto w 1983 r. na wytypowanej zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda.

Ciesielska Woda jest prawym dopływem rzeki Świerznej, stanowiącej z kolei prawy dopływ rzeki Widawy. Do podstawowych wskaźników charakteryzujących zlewnię i ciek należą:

A. Wskaźniki dotyczące zlewni:

- powierzchnia zlewni = 33,42 km<sup>2</sup>,
- współczynnik asymetrii zlewni  $\alpha = 2(F_L - F_p)/F = -0,554$ ,
- długość zlewni (mierzona od przekroju wodowskazowego do linii wododziału w linii prostej wzdłuż doliny)  $L_Z = 11,4$  km,
- średnia szerokość zlewni  $B = F_Z / L_Z = 2,93$  km,

- współczynnik rozwinięcia działu wodnego  $\beta = s/2\sqrt{\Pi F} = 1,58$ , s – obwód zlewni,
- średni spadek zlewni (dane orientacyjne),

$$I_{\text{szr}} = \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{min}}}{\sqrt{F}} \cdot 100 = 1,12\%$$

- średnie wzniesienie zlewni nad poziom morza – 174 m,
- zagospodarowanie zlewni:
 

a) grunty orne	25,70 km <sup>2</sup>	76,90%
b) lasy	3,19 km <sup>2</sup>	9,55%
c) łąki i pastwiska	3,58 km <sup>2</sup>	10,71%
d) obszar zabudowy wiejskiej	0,95 km <sup>2</sup>	2,84%

B. Wskaźniki charakteryzujące ciek:

- długość i spadek cieków głównych  $L = 13,130$  km,  $I = 3,66\text{‰}$ ,
- długość i spadek dopływów:
 

dopływ (l) A	$L_A = 3,640$ km,	$I_A = 6,92 \text{‰}$
dopływ (p) B	$L_B = 3,500$ km,	$I_A = 6,32 \text{‰}$
dopływ (p) C	$L_C = 2,380$ km,	$I_A = 7,56 \text{‰}$
dopływ (p) D	<u><math>L_D = 3,120</math> km,</u>	$I_A = 4,32 \text{‰}$
Łącznie $L_I = 27,770$ km		

- gęstość sieci rzecznej

$$d = \frac{\sum L_i}{F} = 0,831 \left[ \frac{\text{km}}{\text{km}^2} \right]$$

W dniu 17 lipca 1983 r. uruchomiono na obszarze zlewni bazową stację meteorologiczną. Zlokalizowano ją w miejscowości Kolonia Poniatowice na wysokości ok. 170,5 m n.p.m. Na pierwszym etapie wyposażania stacji zainstalowano klatkę meteorologiczną i standardowy deszczomierz Hellmanna.

W klatce meteorologicznej umieszczono również termometry do pomiaru minimalnej i maksymalnej temperatury powietrza oraz termohigrograf tygodniowy. W dniu 1 sierpnia 1983 r. założono dobowy pluwiograf pływakowy i ewaporometr Wilda oraz ewaporometr GGI-3000. Aby właściwie określić sumy parowania, zainstalowano obok tych przyrządów drugi ewaporometr GGI-300 spełniający rolę deszczomierza. W następnym roku założono wiatromierz Wilda na wysokości 10 m nad powierzchnią terenu oraz heliograf. Corocznie od 1983 r. przeprowadzane były na terenie zlewni masowe patrolowe pomiary mikroklimatyczne.

Pomiary były wykonywane ściśle wg instrukcji IMGW. Godzinowe i dobowe wartości opadów gromadzono w Banku Danych. Posterunek wodowskazowy na Ciesielskiej Wodzie założono 30 września 1982 r. w 1,76 km jej biegu, przy moście drogowym Stawy Oleśnica–Wyszogród. W dniu 17 sierpnia 1983 r. założono limnigraf typu KB-2 rejestrujący stany wody w skali 1:5. W przekroju tym wykonano 95 pomiarów hydrometrycznych, co pozwoliło na opracowanie krzywej natężenia przepływów. Usytuowanie stanowisk pomiarowych przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Usytuowanie stanowisk pomiarowych na terenie zlewni Ciesielska Woda  
 Fig. 4. Location of gauging stations in the Ciesielska Woda catchment

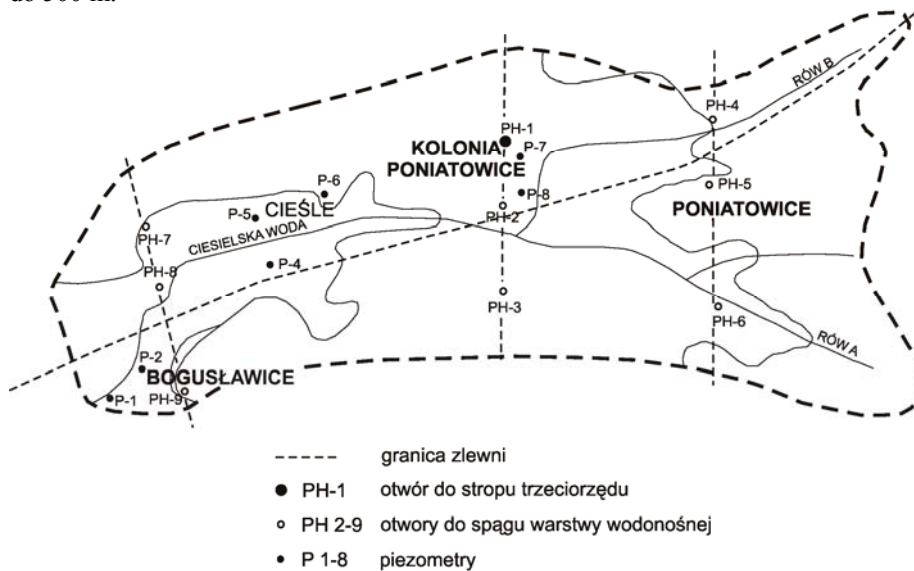
Obszar zlewni rzeki Ciesielska Woda wchodzi w skład jednostki fizjograficznej zwanej Równiną Oleśnicką. W morfologii terenu zaznacza się wyraźnie dolina tego ciek. W części zachodniej dno doliny znajduje się na rzędnej 147 m n.p.m., natomiast w części wschodniej, u źródeł ciek, na rzędnej 190 m n.p.m. Deniwelacje w przekrojach poprzecznych wahają się do 30 m.

W 1984 r. rozpoczęto na tym terenie badania geologiczne i hydrogeologiczne [Czamara 1989]. Ich celem było rozpoznanie rodzaju utworów geologicznych występujących na tym obszarze, określenie głębokości zalegania pierwszego poziomu wód gruntowych i jego wahań oraz określenie miąższości warstwy wodonośnej. W tym celu wykonano 200 otworów płytkich, umożliwiających określenie głębokości zalegania I poziomu wód gruntowych, 8 otworów do spągu warstwy wodonośnej dla określenia miąższości tej warstwy oraz 1 otwór do stropu utworów trzeciorzędowych, w celu określenia miąższości utworów czwartorzędowych. Ponadto na terenie zlewni zainstalowano 17 piezometrów, w których obserwuje się wahania poziomu wód gruntowych. W 8 piezometrach prowadzi się pomiary od r. 1984, a w pozostałych dziewięciu (PH-1-9) – od grudnia 1987 r. Pomiary wykonywane są minimum 1 raz w miesiącu, a w 3 piezometrach prowadzi się ciągłą rejestrację wahań zwierciadła wody za pomocą limnigrafów.

Usytuowanie stanowisk pomiarowych zwierciadła wód gruntowych przedstawiono na rys. 5, natomiast przekroje hydrogeologiczne na rysunku 6.

Na omawianym obszarze wody podziemne występują na 2 poziomach wodonośnych, w utworach trzecio- i czwartorzędowych. Wody w utworach trzeciorzędowych są pod ciśnieniem. Usytuowane są w obrębie warstwy piasków pylastych (otwór w Ligocie Polskiej). Warstwa ta charakteryzuje się niską zasobnością. Natomiast wody czwartorzędowe, głębsze, występują nieregularnie w piaskach międzymorenowych. Najpłycej, bo na głębokości 5,7 m, pojawiają się one w rejonie Poniatowic (otwór nr PH-4). Woda nawiercona tutaj w piaskach gliniastych ma charakter artezyjski. Zwierciadło ustalone znajduje się ok. 0,4 m nad powierzchnią terenu. Natomiast w okolicach Stroni i Zarzyska, miejscowości położonych w bezpośrednim sąsiedztwie południowych granic zlewni, wody czwartorzędowe międzymorenowe spotyka się w obrębie piasków

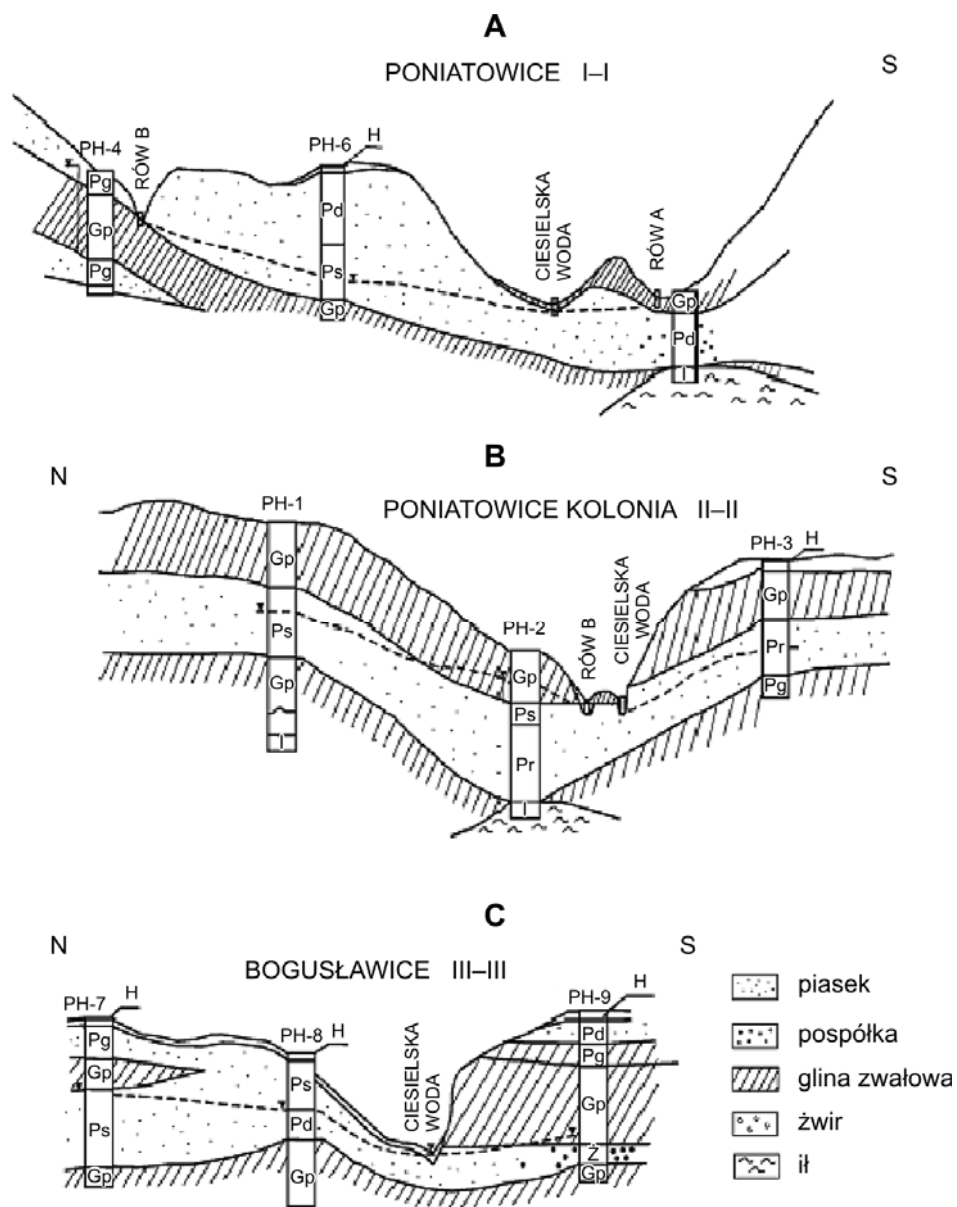
średnioziarnistych i piasków ze żwirem i otoczkami, na głębokości 20–30 m od powierzchni terenu. Zwierciadło wody jest tu napięte. Wydajność tych warstw jest znaczna, do 60–70 m<sup>3</sup>/h. Pierwszy poziom wód gruntowych mieści się na głębokości od 0,5 do 10 m. Zwierciadło wody jest na ogół swobodne. Najpłycej, na głębokości od 0 do 2,5 m, woda występuje w bezpośrednim sąsiedztwie cieków, w pasie o szerokości od 50 do 500 m.



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych stanów zwierciadła wody gruntowej na terenie zlewni Ciesielska Woda

Fig. 5. Location of gauging points measuring groundwater levels in the Ciesielska Woda catchment

W części zachodniej zlewni zwierciadło wody gruntowej znajduje się najczęściej na głębokości mniejszej niż 5,0 m. Natomiast we wschodniej części zlewni, na wschód od Poniatowic oraz lokalnie w rejonie Bogusławic i Poniatowic Kolonii, woda zalega na głębokości większej niż 5 m. Rzeka na terenie zlewni ma charakter drenującej. Istnieje związek hydrauliczny między wodą powierzchniową i gruntową. Znaczny wpływ wahań zwierciadła wody w rzece na stany wód gruntowych obserwuje się w odległości do 200 m od cieków. Wahania zwierciadła wody dochodzą 40–60 cm. Powyżej tej odległości wahania stanów są mniejsze i wynoszą 20–30 cm. Warstwa wodonośna zbudowana jest z piasków drobnych, średnich, grubych pospółek i żwirów. Jej miąższość jest zmienna i wynosi 1,2–6,0 m. Wartość współczynnika filtracji utworów budujących tę warstwę waha się od  $3 \times 10^{-5}$  do  $1 \times 10^{-3}$  m/s.



Rys. 6. Przekroje hydrogeologiczne przez dolinę Ciesielskiej Wody (A, B, C)  
 Fig. 6. Hydrogeological cross-sections across the Ciesielska Woda valley (A, B, C)

### 5.3. Model symulacyjny systemu hydrologicznego zlewni Ciesielskiej Wody

Zgodnie z makietą szablonu modelowanego obiektu (rys. 6) przyjęto dla strefy saturacji siatkę trójkątną. Wierzchołki trójkątów położonych na cieku są węzłami modelowania przepływów w rzekach. Gęstość siatki zależy od warunków hydrologicznych zlewni, od lokalizacji studni, akwenów, sieci drenarskiej itp. Profile strefy nienasyconej gruntu wynikają z podziału zlewni na powierzchnie *quasi*-jednorodnie ze względu na rodzaje gleby, szatę roślinną oraz warunki formowania się spływu powierzchniowego (topografię terenu). Przyjęto, że rozpatrywana jest zlewnia:

- o stropie nieprzepuszczalnym z jego zmienną wysokością,
- z różnorodną strukturą gleb,
- z różnorodną szatą roślinną,
- bez budowli wodnych,
- bez dużych naturalnych i sztucznych zbiorników wodnych.

Podprogramy adaptacyjne dopasowują założone wcześniej bazy danych opisujących zlewnię do struktury programu symulującego. W trakcie ich wykonania następuje:

- powiązanie danych o strukturze zlewni z danym węzłem dekompozycyjnym,
- powiązanie węzłów pomiędzy dekompozycjami,
- założenie zbiorów roboczych z danymi dostosowanymi do poszczególnych procedur symulacyjnych.

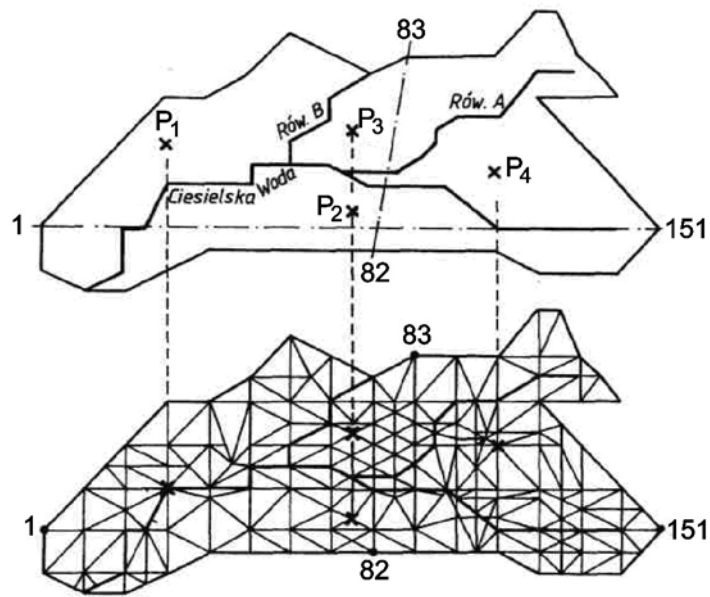
Podprogramy inicjujące wiążą warunki początkowe i brzegowe modelowanych procesów ze strukturą zlewni. W trakcie ich wykonywania jest badana niesprzeczność warunków, ponadto są zakładane zbiory robocze obsługujące proces symulacji.

W trakcie jednego kroku symulacji wyznacza się stan zlewni w zależności od warunków początkowych wyznaczonych w poprzednim kroku symulacji oraz od danych meteorologicznych i warunków brzegowych.

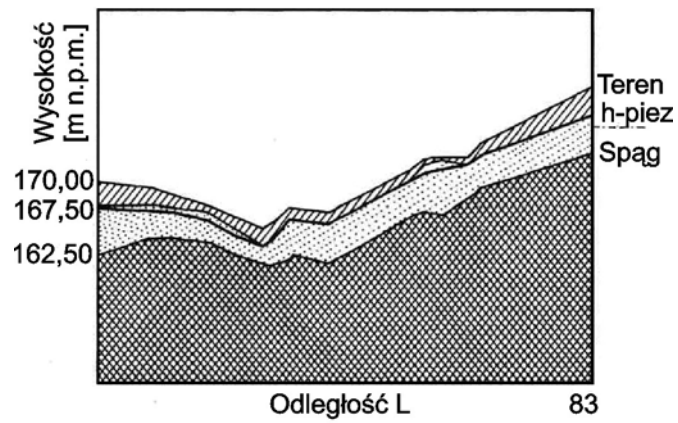
Ważnym problemem jest metoda „zszywania” poszczególnych procesów w danym węźle dekompozycji. Jak wynika z rys. 3, między modelowanymi procesami występują sprzężenia zwrotne. Zakłada się niejawną metodę zszywania, w której dla symulowanej chwili  $t_0$  stany procesów są niewiadome, a ich wyznaczenie przeprowadza się dla obu procesów jednocześnie (np. poprzez rozwiązanie układu równań).

W wyniku przeprowadzonej symulacji otrzymuje się przepływ oraz stan hydrologiczny zlewni. Obliczenia przeprowadzono dla zlewni Ciesielskiej Wody, a strukturę geometryczną zlewni przedstawiono na rys. 6a, zaś przykładowe przekroje geologiczne na rysunkach 7 i 8.

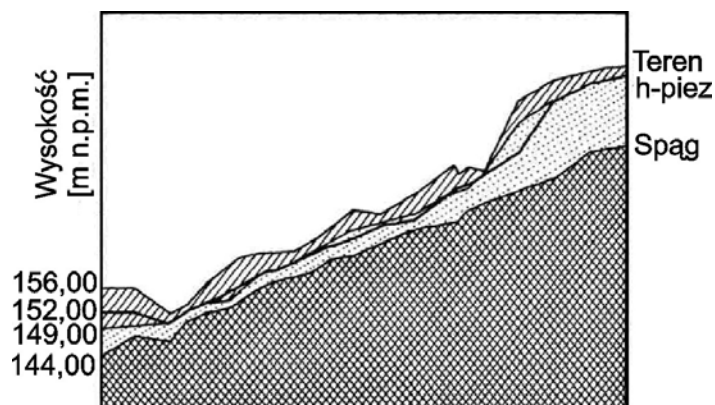




Rys. 6a. Zlewnia Ciesielskiej Wody (schemat)  
 Fig. 6a. Ciesielska Woda catchment (pattern)



Rys. 7. Przekrój hydrogeologiczny między węzłami 82–83  
 Fig. 7. Hydrogeological cross-section between knots 82–83



Rys. 8. Przekrój hydrogeologiczny między węzłami 1–151  
Fig. 8. Hydrogeological cross-section between knots 1–151

Dane o strefie saturacji:

- powierzchnia zlewni 33,4 km<sup>2</sup>,
- liczba węzłów 151, liczba elementów trójkątnych 257,
- współczynnik filtracji od 7,7 do 48,0 m/d,
- współczynnik odsączalności od 0,16 do 0,20.

Dane topograficzne zlewni (rzędna spągu, stropu, terenu) są zadane w każdym węźle siatki.

Warunek początkowy: ciśnienie piezometryczne w każdym węźle; warunki brzegowe: na brzegu zlewni warunek Neumanna ( $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ ), gdyż zlewnia jest izolowana oraz warunki Dirichleta w węzłach, w których znajdują się ciekі.

Zasilanie zewnętrzne ze strefy aeracji.

Parametry sieci rzecznej: Ciesielska Woda, Rów A, Rów B:

- krok przestrzenny zmienny, zgodny z siatką strefy saturacji Ciesielska Woda 47 węzłów, Rów A 22 węzły, Rów B 12 węzłów,
- szerokość cieków od 1,0 do 2,5 m,
- średni spadek dna: Ciesielskiej Wody 3,66‰, Rowu A 6,32‰, Rowu B 4,32 ‰,
- współczynnik szorstkości Manninga zadaje się dla poszczególnych cieków,
- warunek początkowy – napęlnienie i przepływ dla każdego ciekі,
- warunek brzegowy – napęlnienie i przepływ w źródle.

Strefę aeracji charakteryzują cztery profile glebowe dwuwarstwowe:

$P_1$  – obszar między Ciesielską Wodą a Rowem B,

$P_3$  – między Rowami A i B,

$P_2$  – między Ciesielską Wodą i granicą zlewni,

$P_4$  – między Ciesielską Wodą a Rowem A (rys. 6).

Tabela 1  
Table 1

Parametry fizyczne gleby w zlewni Ciesielskiej Wody  
Physical parameters of soil in Ciesielska Woda catchment

Oznaczenie Symbol	I warstwa I <sup>st</sup> layer	II warstwa II <sup>nd</sup> layer
Wilgotność przy $pF = 4,2$ Humidity for $pF=4,2$	0,131	0,218
Porowatość Porosity	0,396	0,52
Współczynnik infiltracji [cm/dobę] Infiltration coefficient [cm/day]	4,96	31,6
Parametr $\alpha$ Parameter $\alpha$	0,00423	0,0115
Parametr $n$ Parameter $n$	2,06	2,03

Krzywe przewodności hydraulicznej i ciśnienia ssącego przyjęto wg Van Genuchtena [za Czamara 1998]

Tabela 2  
Table 2

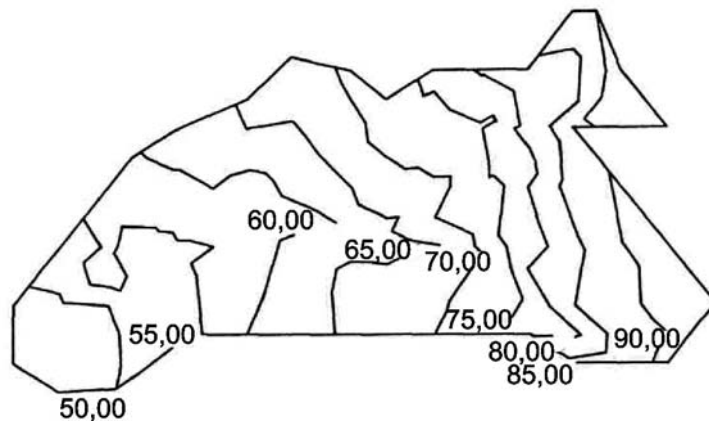
Mięższość strefy aeracji w zlewni Ciesielskiej Wody  
Thickness of aeration zone in Ciesielska Woda catchment

Profil Profile	Warstwa I I <sup>st</sup> Layer	Warstwa II II <sup>nd</sup> layer
$P_1$	3,8	3,8
$P_2$	5,6	3,3
$P_3$	5,0	5,0
$P_4$	6,0	11,4

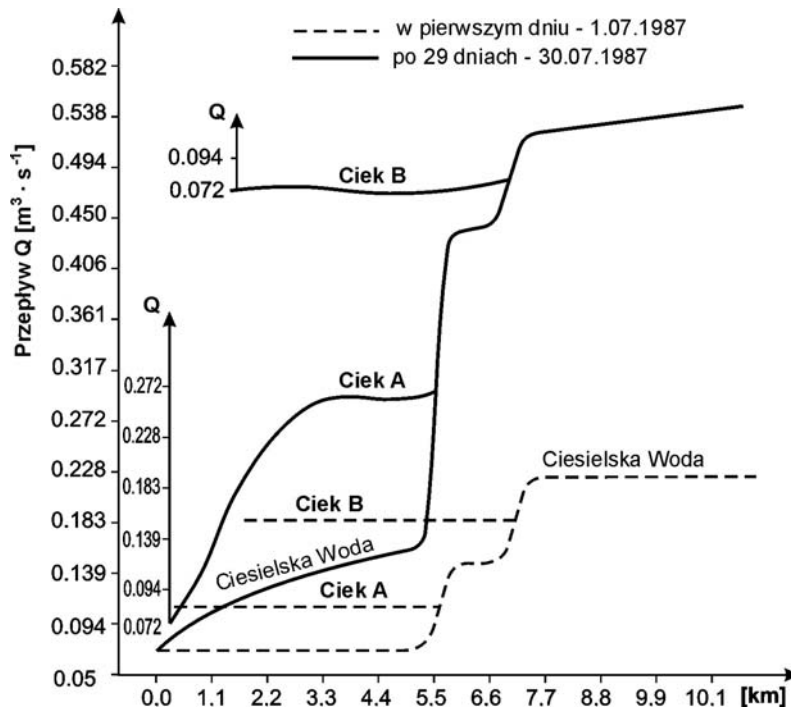
Dla roślinności (zboża i trawy) zadaje się parametry charakteryzujące potencjalne zdolności roślin do poboru wody oraz głębokość ryzosfery. Dane meteorologiczne stanowią: opady, temperatura powietrza, niedosyt wilgotności powietrza, prędkość wiatru i nasłonecznienie dla lipca 1987 r. Jako warunek początkowy przyjęto rozkład wilgotności w profilu glebowym. Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 9 i 10.

Ze względu na małą dokładność danych pochodzących z bezpośrednich pomiarów i badań obiektu rzeczywistego (zlewni) cały ciężar poprawności i wierności modelu w stosunku do modelowanego obiektu spoczywa na szczegółowym i żmudnym sprawdzaniu formalnej poprawności wyjściowego zbioru danych, korygowaniu modelu i jego parametrów, a następnie weryfikowaniu.

Przykład działania modelu na obiekcie rzeczywistym pozwalał sądzić, że dalsza jego rozbudowa, zgodna z przedstawioną koncepcją budowy **MSSH**, przyniesie wymierne korzyści, tak w jego zastosowaniach do racjonalnego wykorzystywania zasobów wodnych, jak i – po uzupełnieniu w przyszłości o modele migracji zanieczyszczeń – w ochronie środowiska.



Rys. 9. Mapa hydroizohips w dniu 30.07.1987 r.  
 Fig. 9. Hydroisohyps map for the 30.07.1987



Rys. 10. Natężenia przepływów w sieci rzecznej  
 Fig. 10. Flow discharge in river network

Badania te zostały przerwane na początku lat 90. Z uwagi na brak środków finansowych większość pomiarów nie jest kontynuowana.

## 5.4. Ocena prowadzonych badań

Dokonując oceny prowadzonych badań, ośmielam się stwierdzić, że trud Zespołu nie poszedł na marne. Zdobyte wówczas doświadczenie zaowocowało w postaci rozpraw habilitacyjnych i doktorskich oraz prac magisterskich. Poniżej przedstawiono najważniejsze wyniki tych prac.

W rozprawie pt. **Zlewnia rolnicza jako system dynamiczny** autorstwa **Laury Radczuk** [1986] została rozwinięta dotychczasowa teoria modelowania zlewni hydrologicznej w oparciu o równania stanu. W odniesieniu do hydrologii jako dyscypliny naukowej stanowi istotny krok naprzód od ogólnego zapisu systemowego do konkretnej analizy procesu odpływu ze zlewni (rys. 11).

Traktowanie zlewni jako systemu jest równoważne z wyodrębnieniem w niej elementów (obiektów materialnych), przez które przepływa woda, i procesów dynamicznych, decydujących o ruchu na drodze od opadu do odpływu (cykl hydrologiczny). W tworzeniu systemu hydrologicznego  $S$  wydzieliła się zbiór wewnętrznych elementów  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  oraz drugi zbiór  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ , którego składniki nie należą do zbioru  $Z$ , jednak oddziałują na ten system i zarazem ulegają zmianie pod wpływem jego działania. Każdy z elementów systemu  $S$  opisuje się za pomocą zbioru jego cech (właściwości), które mogą być wielkościami stałymi lub zmiennymi w czasie. Zależności między cechami poszczególnych elementów determinują następujące relacje:

$R^Z$  – między elementami zbioru  $Z$ . Zbiór tych relacji określa wewnętrzną strukturę systemu;

$R^{XZ}$  – między elementami zbiorów  $X$  i  $Z$ . Zbiór relacji  $R$  określa zewnętrzną strukturę oddziaływania otoczenia na system (wejście);

$R^{ZX}$  – między elementami zbiorów  $Z$  i  $X$ , których zbiór określa strukturę oddziaływania systemu na otoczenie (wyjście).

Dla tak określonych zbiorów systemem  $S$  nazywa się zbiór wewnętrznych elementów  $Z$ , sprzężonych strukturą wewnętrzną ( $R^Z$ ), powiązany z otoczeniem  $X$  relacjami prostego ( $R^{XZ}$ ) i odwrotnego ( $R^{ZX}$ ) oddziaływania, to jest:

$$S = S \{X, Z, R^Z, R^{XZ}, R^{ZX}\}$$

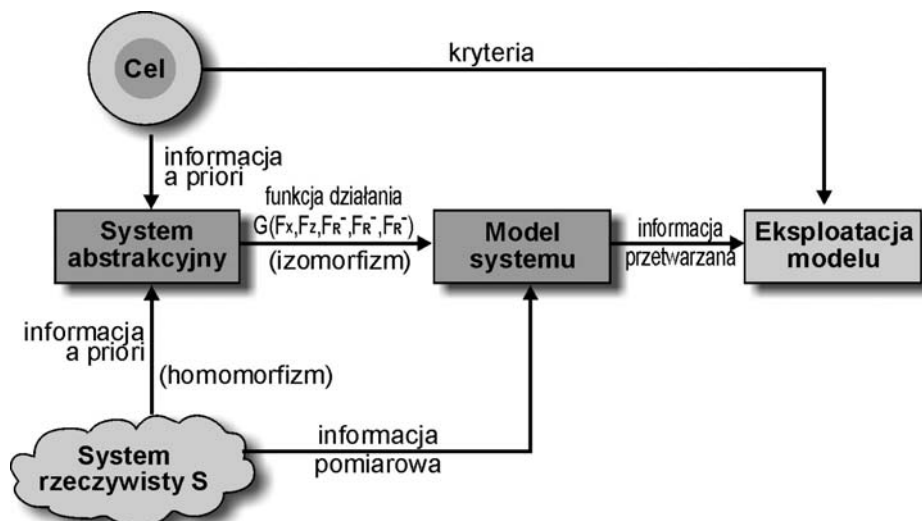
gdzie:  $X, Z, R^Z, R^{XZ}, R^{ZX}$  są atrybutami systemu.

Zwykle atrybuty i elementy systemu abstrakcyjnego otrzymują nazwy identyczne z nazwami elementów, procesów i parametrów wyrażonych w układzie fizycznym. Budując model zlewni typu opad-odpływ, Autorka wydzieliła elementy otoczenia oraz systemu (zlewni).

W zbiorze otoczenia  $X(t)$  wyróżniono następujące elementy:

- atmosfera  $X_1$ ,
- przekrój zamykający zlewnię  $X_2$ ,
- głębokie warstwy niebiorące udziału w cyklu hydrologicznym  $X_3$ ,

tj.  $X(t) = \{X_1(t), X_2(t), X_3(t)\}$



Rys. 11. Relacja pomiędzy systemem rzeczywistym, systemem abstrakcyjnym i modelem systemu  
Fig. 11. Relation between real, abstractive and model system

Zbiór wewnętrznych elementów systemu  $Z(t)$  tworzą różne rodzaje retencji (zbiorniki) reprezentujące zapasy wody w określonym środowisku:

- na powierzchni nieprzepuszczalnej  $Z_1$ ,
- na powierzchni szaty roślinnej  $Z_2$ ,
- na powierzchni przepuszczalnej  $Z_3$ ,
- w warstwie podpowierzchniowej  $Z_4$ ,
- w warstwie korzeniowej  $Z_5$ ,
- w warstwie przejściowej  $Z_6$ ,
- w strefie saturacji  $Z_7$ ,
- w sieci rzecznej  $Z_8$ ,

czyli  $Z(t) = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8\}$ .

Ruch wody w zlewni opisują liczne procesy fizyczne, które jako zbiór relacji  $R$  tworzą wewnętrzną strukturę systemu hydrologicznego. W tworzonym systemie abstrakcyjnym wydzielono następujące relacje:

$R_{81}^Z$  – odpływ z powierzchni nieprzepuszczalnych  $Z_1$  do sieci rzecznej  $Z_8$ ,

$R_{32}^Z$  – skapywanie wody z szaty roślinnej  $Z_2$  na powierzchnie przepuszczalne  $Z_3$ ,

$R_{43}^Z$  – infiltrację poziomą w powierzchni przepuszczalnej  $Z_3$  do warstwy podpowierzchniowej  $Z_4$ ,

$R_{53}^Z$  – infiltrację z powierzchni przepuszczalnej  $Z_3$  do warstwy korzeniowej  $Z_5$ ,

$R_{83}^Z$  – odpływ z powierzchni przepuszczalnej  $Z_3$  do sieci rzecznej  $Z_8$ ,

$R_{84}^Z$  – bezpośredni odpływ z warstwy podpowierzchniowej  $Z_4$  do sieci rzecznej  $Z_8$ ,

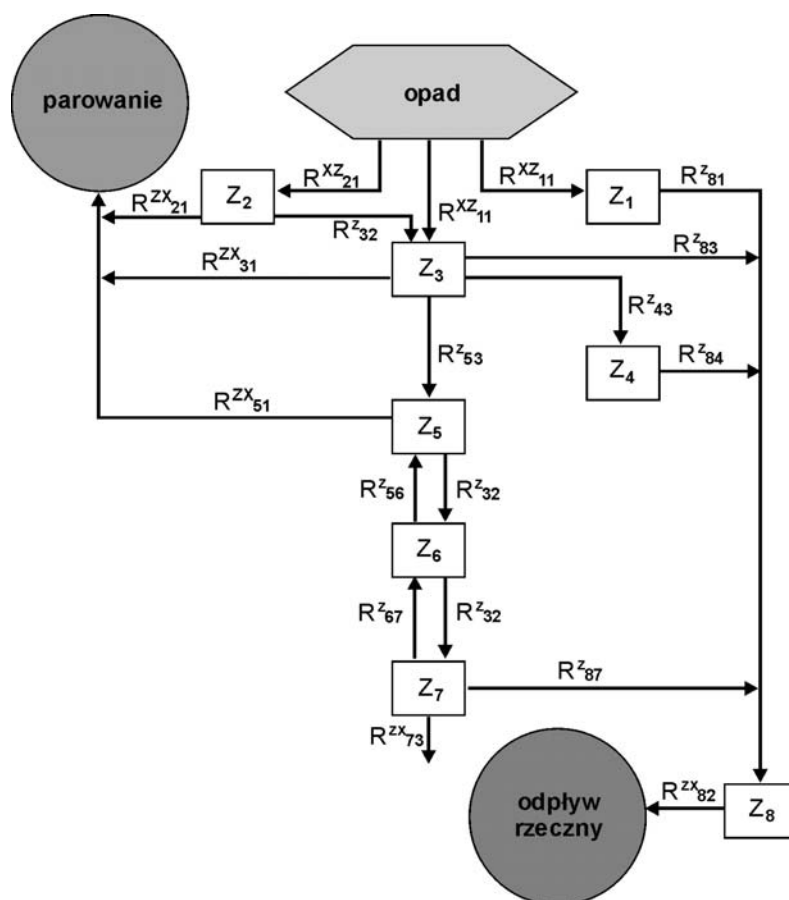
$R_{65}^Z$  – przesiąkanie z warstwy korzeniowej  $Z_5$  do warstwy przejściowej  $Z_6$ ,

$R_{56}^Z$  – eksfiltrację z warstwy przejściowej  $Z_6$  do warstwy korzeniowej  $Z_5$ ,

$R_{76}^Z$  – przesiąkanie z warstwy przejściowej  $Z_6$  do strefy saturacji  $Z_7$ ,

$R_{67}^Z$  – podsiąk kapilarny ze strefy saturacji  $Z_7$  do warstwy przejściowej  $Z_6$ ,

$R_{87}^Z$  – odpływ gruntowy ze strefy saturacji  $Z_7$  do-sieci rzecznej  $Z_8$ .  
 Zewnętrzną strukturę systemu (wejście) tworzy zbiór  $R^{XY}$  zawierający następujące relacje:  
 $R_{11}^{XZ}$  – dostarczenie wody na powierzchnie nieprzepuszczalne,  
 $R_{21}^{XZ}$  – dostarczenie wody na powierzchnie szaty roślinnej,  
 $R_{31}^{XZ}$  – dostarczenie wody na powierzchnie przepuszczalne.  
 Strukturę oddziaływania systemu na otoczenie (wejście) określa zbiór  $R^{XZ}$  zawierający relacje:  
 $R_{21}^{ZX}$  – parowanie z intercepcji,  
 $R_{31}^{ZX}$  – parowanie z powierzchni gruntu,  
 $R_{51}^{ZX}$  – transpirację roślin,  
 $R_{73}^{ZX}$  – odpływ wglębny,  
 $R_{82}^{ZX}$  – odpływ w zamykającym profilu cieku.  
 Wydzielone elementy i atrybuty przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Schemat przepływu wody w zlewni  
 Fig. 12. Schematic diagram of water flow in the catchment

Istotną cechą procesów związanych z przepływem wody w zlewni stanowi fakt, że istnieją zmienne procesowe, które w większości praktycznych przypadków mogą pełnić rolę zmiennych stanu. Są nimi stany retencji wydzielonych elementów systemu:

- $z_1$  – powierzchni nieprzepuszczalnych,
- $z_2$  – powierzchni szaty roślinnej,
- $z_3$  – powierzchni przepuszczalnych,
- $z_4$  – warstwy podpowierzchniowej,
- $z_5$  – warstwy korzeniowej,
- $z_6$  – warstwy przejściowej
- $z_7$  – strefy saturacji,
- $z_8$  – sieci rzecznej.

Strukturę analityczną modelu opisano równaniami stanu wprowadzonymi do hydrologii po raz pierwszy przez Ozgę-Zielińską [1975]. Ze względu na niejednakowy stopień rozpoznania i szczegółowość opisu poszczególnych procesów hydrologicznych zlewnię hydrologiczną traktuje się jako system:

- o parametrach skupionych,
- składający się z wydzielonych elementów stanowiących oddzielne akumulatory wody,
- *quasi*-liniowy,
- w którym relacje między poszczególnymi elementami wynikają z praw ruchu wody w przyrodzie.

Dla rozważanego systemu równania stanu stanowią układ ośmiu równań różniczkowych rzędu pierwszego oraz trzech równań wyjść, które w zapisie wektorowo-macierzowym mają postać:

$$\frac{dz(t)}{dt} = z(t) = A(t) \underline{z}(t) + B(t) \underline{x}(t), \quad \underline{z}(t_0) = z_0, \quad \underline{y}(t) = C(t) \underline{z}(t) \quad (14)$$

gdzie:

- $z(t)$  – wektor stanu,
- $x(t)$  – wektor sygnałów wejściowych,
- $A(t)$  – macierz stanu,
- $B(t)$  – macierz wejścia,
- $C(t)$  – macierz wyjścia.

Macierze te zawierają charakterystyki systemu:

- elementy macierzy A są funkcjami opisującymi przepływ wody między elementami systemu,
- elementy macierzy B pokazują oddziaływania otoczenia na system,
- elementy macierzy C określają oddziaływania systemu na otoczenie.

Równania stanu mogą być zapisywane oddzielnie dla każdego z wydzielonych elementów lub w jednym układzie. Na etapie specyfikacji najlepszym wydaje się być drugi sposób, ponieważ pozwala na skrótowy zapis całościowego modelu zlewni w jednym układzie:



$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \\ \dot{z}_6 \\ \dot{z}_7 \\ \dot{z}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & a_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & a_{77} & 0 \\ a_{81} & 0 & a_{83} & a_{84} & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times [P] \quad (15)$$

Przedkładaną macierz stanowią funkcje opisujące odpływ z poszczególnych elementów systemu, a niezerowe elementy opisują dopływ. Elementy zerowe macierzy wynikają z braku relacji między wydzielonymi elementami systemu. Układ równań wyjść z systemu zawiera równanie opisujące oddziaływanie systemu na otoczenie.

$$\begin{bmatrix} ET \\ Q \\ Q_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & c_{12} & c_{13} & 0 & c_{15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{28} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{37} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \\ z_6 \\ z_7 \\ z_8 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Równania (14) są równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu:

$$\dot{z}_i(t) = a_{i1}(t)z_1(t) + \dots + a_{in}(t)z_n(t) + b_{i1}(t)x_1(t) + \dots + b_{ik}(t)x_k(t),$$

którym odpowiadają równania całkowe:

$$z_i(t) = z_i(t_0) + \int_{t_0}^t a_{i1}(t)z_1(t) dt + \dots + \int_{t_0}^t a_{in}(t)z_n(t) dt + \dots + \int_{t_0}^t b_{i1}(t)x_1(t) dt + \dots + \int_{t_0}^t b_{ik}(t)x_k(t) dt$$

Są to równania typu bilansowego, co wynika z metody ich ustalania. Dla małej zmienności funkcji podcałkowej w zadanym kroku czasowym  $\Delta t = 1$  h stosuje się następujące przybliżenie całki:

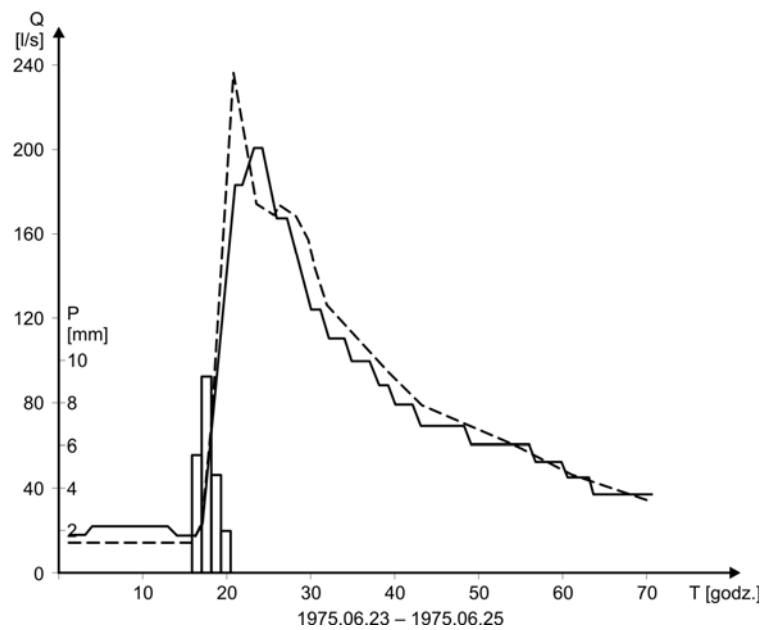
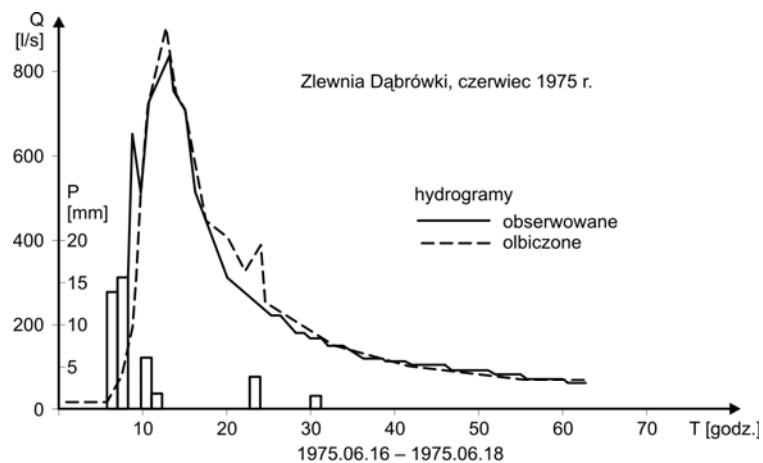
$$z_i(t_1) = z_i(t_0) + a_{i1}z_1(t_0)\Delta t + \dots + a_{in}z_n(t_0)\Delta t + b_{i1}x_1(t_0)\Delta t + \dots + b_{ik}x_k(t_0)\Delta t,$$

natomiast przy dużej zmienności funkcji podcałkowej stosuje się przybliżenie:

$$\begin{aligned} z_i(t_1) = & z_i(t_0) + [a_{i1}z_1(t_0) + a_{i1}z_1(t_1)]\frac{\Delta t}{2} + \dots + [a_{in}z_n(t_0) + a_{in}z_n(t_1)]\frac{\Delta t}{2} + \dots \\ & + [b_{i1}x_1(t_0) + b_{i1}x_1(t_1)]\frac{\Delta t}{2} + \dots + [b_{ik}x_k(t_0) + b_{ik}x_k(t_1)]\frac{\Delta t}{2}, \end{aligned}$$

Dla rozwiązania układu równań stanu opracowano program numeryczny MIZUR w języku Algol 1204, przetestowany na moc Odra 1204 podsystemem operacyjnym MTS.

Na rysunku poniżej pokazano przykładowo pomierzone i obliczone hydrogramy odpływu dla zlewni Dąbrówki, które wystąpiły w czerwcu 1975 r. (weryfikacja I).



Rys. 13. Obserwowane i obliczone hydrogramy odpływów ze zlewni Dąbrówki  
 Fig. 13. Observed and calculated outflow hydrographs from the catchment of Dąbrówka

**Alicja Czamara** w swojej rozprawie habilitacyjnej pt. **Oddziaływanie wybranych urządzeń melioracyjnych na zasoby wód gruntowych autorstwa** [1999] skupiła się na ocenie stosunków wodnych na terenie zlewni Ciesielskiej Wody ze szczególnym uwzględnieniem dynamiki wód gruntowych oraz dokonała oceny wpływu urządzeń odwadniających na zasoby wód gruntowych.

Praca zawiera:

1. Charakterystykę warunków meteorologicznych na terenie zlewni, opracowaną na podstawie wyników codziennych pomiarów takich czynników, jak: opady, temperatura powietrza, parowanie wg Wilda. Pomiary te wykonano na stacji Poniatowice Kolonia, założonej przez pracowników Katedry Meteorologii Akademii Rolniczej we Wrocławiu, oraz dodatkowo w dwóch punktach, gdzie wykonywano tylko pomiary opadów. Dane meteorologiczne ze zlewni doświadczalnej Autorka porównała z wynikami pomiarów na stacji meteorologicznej Akademii Rolniczej we Wrocławiu-Swojcu, odległej o około 30 km od zlewni rzeki Ciesielskiej Wody. Stacja ta posiada wyniki wieloletnich obserwacji, poczynając od 1960 roku.

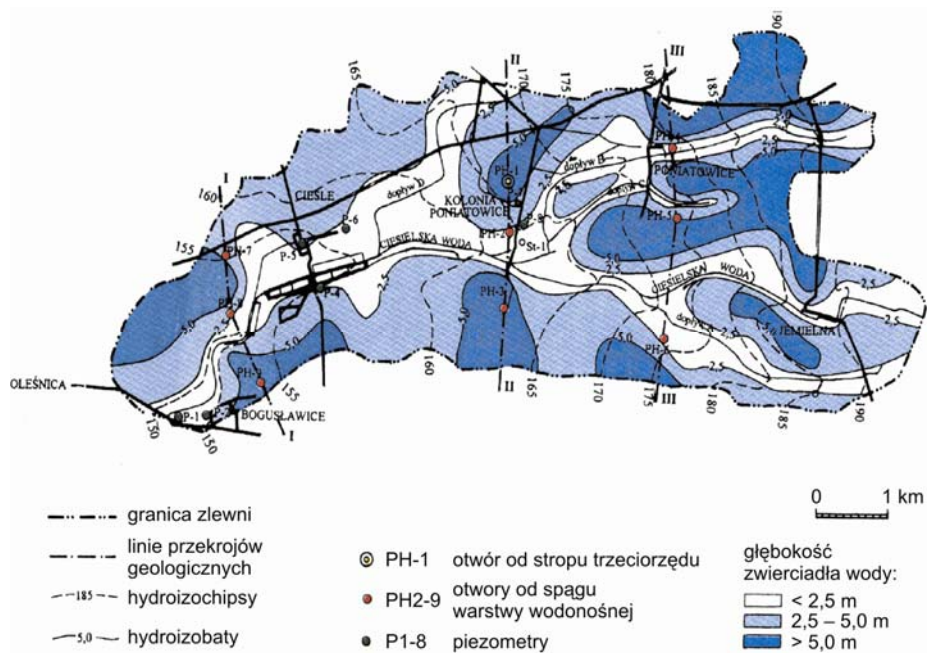
2. Charakterystykę warunków hydrologicznych opracowanych przez Autorkę na podstawie analizy wyników pomiarów w trzech przekrojach dotyczących codziennych pomiarów stanów i przepływów w przekroju zamykającym w Bogusławicach, okresowych pomiarów stanów i przepływów w przekrojach Cieśle i Poniatowice Kolonia.

3. Rozpoznanie geologiczne i hydrogeologiczne obszaru zlewni, które Autorka przeprowadziła na podstawie wyników pomiarów wykonanych pod jej nadzorem, przez Przedsiębiorstwo Hydrogeologiczne we Wrocławiu, w 169 płytkich otworach geologiczno-inżynierskich (do głębokości 2,0 m) oraz w 9 głębokich, do stropu trzeciorzędu, otworach, wykonanych w trzech przekrojach (rys. 6).

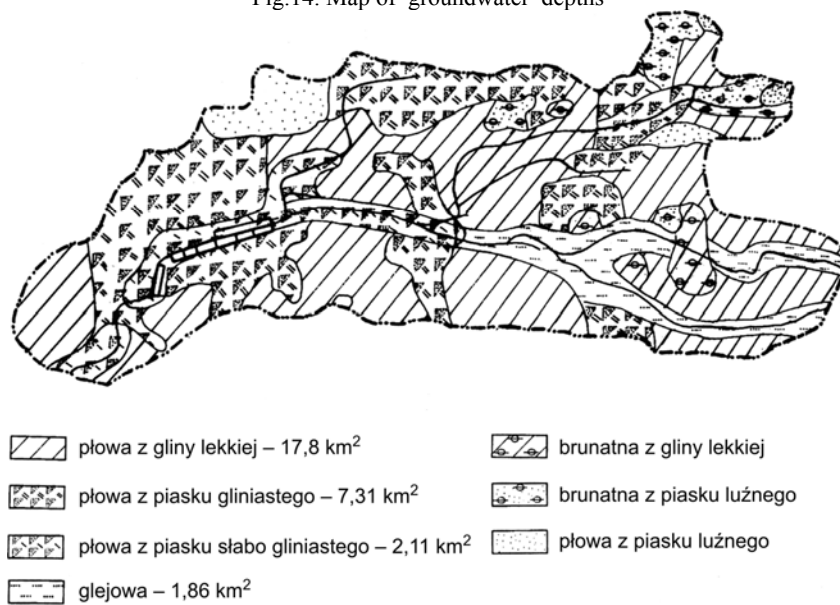
Pomiary stanów wód podziemnych wykonywano w 17 piezometrach, z częstotliwością 1 raz w miesiącu, począwszy od roku 1985 do 1992. Na podstawie otrzymanych wyników, dla średnich stanów z tego okresu, Czamara sporządziła mapę hydroizohips i hydroizobat (rys. 14).

Pomiar współczynnika filtracji warstwy wodonośnej wykonany został metodą polową PARAMEX przez pracowników Zakładu Pomiarów Elektronicznych Położenia Lustra Wody z Poznania [Marciniak 1988]. Autorka oznaczyła również współczynnik filtracji tej warstwy metodą laboratoryjną (w aparacie ITB-ZW-K2, dla próbek o strukturze naruszonej) oraz obliczyła jego wartość na podstawie wzorów empirycznych, korzystając z krzywych uziarnienia gruntów. Wartość współczynnika filtracji utworów powierzchniowych został oznaczony przez Autorkę metodą Nesterowa.

4. Charakterystykę gleb na obszarze zlewni oraz mapę glebową badanego obszaru, opracowaną przez zespół gleboznawców z Instytutu Gleboznawstwa i Ochrony Środowiska Rolniczego Akademii Rolniczej we Wrocławiu, na podstawie badań polowych i laboratoryjnych (rys. 15).



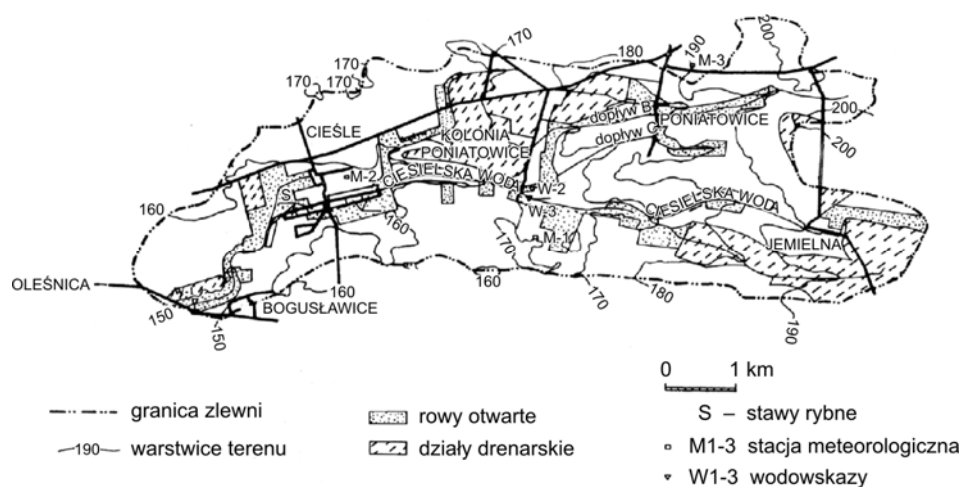
Rys. 14. Mapa zalegania zwierciadła wód gruntowych  
 Fig.14. Map of groundwater depths



Rys. 15. Mapa gleb na obszarze zlewni Ciesielska Woda  
 Fig. 15. Soil map on the area of Ciesielska Woda catchment

5. Informację o urządzeniach melioracyjnych na terenie zlewni, którą Autorka opracowała na podstawie materiałów archiwalnych zgromadzonych w Urzędzie Gminy Oleśnica oraz w Wojewódzkim Zarządzie Melioracji i Urządzeń Wodnych we Wrocławiu, a także inwentaryzacji systemu rowów otwartych w terenie, wykonanych przez Autorkę, (rys. 16).

6. Wyniki badań modelowych, w których Autorka przedstawiła ilościową ocenę wpływu oddziaływania urządzeń odwadniających (rowów i drenów) na zmianę zasobów wody gruntowej. Badania wykonała na modelu FIZ, opracowanym przez M. Chalfena z Katedry Matematyki Akademii Rolniczej we Wrocławiu [Chalfen 1990], wykorzystującym metodę elementów skończonych dla filtracji nieustalonej w strefie nasyconej. Do przygotowania modelu wykorzystwała wyniki pomiarów terenowych (pkt. 1–5), a w szczególności uwzględniła właściwości filtracyjne ośrodka gruntowego, różne wartości zasilania oraz parametry urządzeń odwadniających.



Rys. 16. Lokalizacja urządzeń melioracyjnych  
 Fig. 16. Location of drainage and irrigation appliance

Badaniami modelowymi objęła proces szczyptywania i odnawiania zasobów wód gruntowych na obszarach odwadnianych systemem rowów i rurowciągów drenarskich. Analizowała zmiany natężenia dopływu do urządzeń odwadniających oraz zmiany położenia krzywej depresji w funkcji czasu i rozstawy tych urządzeń.

Wykonane badania na modelu FIZ pozwoliły Autorce na określenie ilości wody gruntowej odprowadzanej ze zlewni urządzeniami odwadniającymi w okresie jej nadmiaru, po roztopach i długotrwałych opadach oraz na ocenę wielkości zasilania i czasu potrzebnego do odnowienia zasobów wód podziemnych po okresie niżówkowym, w zależności od rodzaju utworów występujących w podłożu.

Wyniki weryfikacji badań modelowych wykazały, że zastosowany w pracy model odwzorowuje w dobry sposób proces szczyptywania i odnawiania zasobów wodnych.

Na obszarach, gdzie występują wody wglębne, przykryte utworami słabo przepuszczalnymi o małej miąższości, przez które przesiąka woda do warstwy odwadniającej, ma miejsce zarówno szczypanie zasobów wód gruntowych, jak również odprowadzanie wód wglębnych. Wyniki obliczeń dowiodły, że wody wglębne mogą dominować w ogólnym dopływie do urządzeń odwadniających. Zasilanie warstwy odwadniającej wodami wglębnymi przez warstwę półprzepuszczalną zależy od współczynnika filtracji tej warstwy (półprzepuszczalnej) i od ciśnienia panującego w jej spągu.

Na podstawie badań wykonanych na terenie zlewni Ciesielskiej Wody było możliwe napisanie dwóch rozpraw doktorskich oraz siedmiu prac magisterskich.

Wyniki badań terenowych i modelowych natężenia przesiąków ze stawów oraz oddziaływania stawów na tereny przyległe w Ciesielskiej Wodzie przedstawiła **Iwona Lejcuś** w rozprawie doktorskiej pt. **Oddziaływanie stawów na stosunki wodne terenów przyległych** [2004], napisanej pod kierunkiem Alicji Czamary.

Porównując wartości natężenia przepływu w przekroju Bogusławice zamykającym zlewnię badawczą przed i po wybudowaniu stawów, Autorka stwierdziła, iż na terenie zlewni zakłócony został naturalny reżim przepływów wody w cieku. Czas trwania przepływów niskich wydłużył się, gdyż podczas niżówek cały przepływ Ciesielskiej Wody kierowany był na potrzeby stawów, w celu uzupełnienia strat wody.

Całkowite zapotrzebowanie wody przy napełnianiu stawów wynosi  $0,109 \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$  przy 30-dniowym okresie zalewu i  $0,068 \text{ dm}^3\text{s}^{-1}$  przy okresie 45-dniowym. Natomiast zapotrzebowanie na wodę do podtrzymania zalewu jest równe  $0,045 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

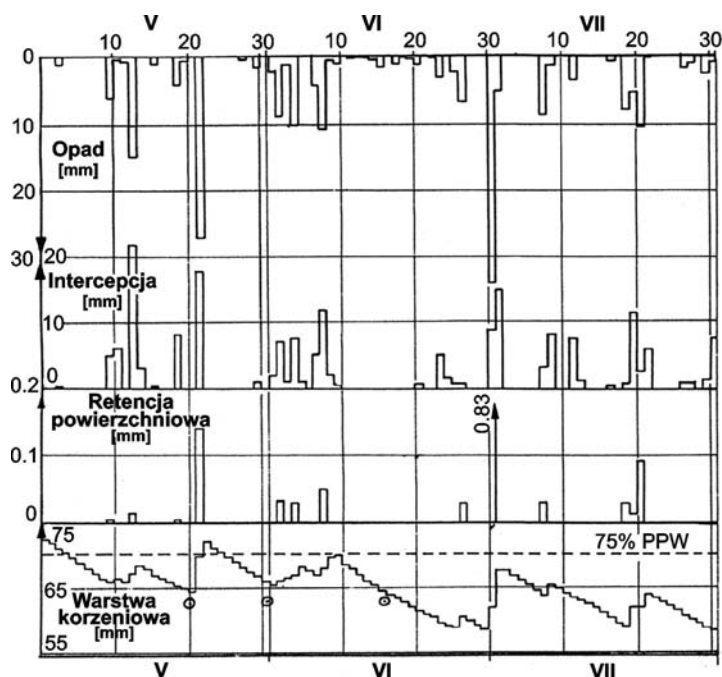
W pracy Autorka wykazała, że:

- a) Eksploatacja stawów rybnych wpływa na kształtowanie się poziomu zwierciadła wód gruntowych na terenach przyległych, znajdujących się w dolinie cieku. W zlewni Ciesielskiej Wody zasięg oddziaływania stawów zauważalny jest w odległości 150–200 m od grobli stawowych.
- b) Gospodarka stawowa w małej zlewni rzecznej oddziałuje znacząco na przepływy w cieku zasilającym. Mimo znacznego przyrostu zlewni i występowania przesiąków ze stawów przepływy w Ciesielskiej Wodzie w przekroju poniżej kompleksu stawowego są niższe od przepływów na wejściu do kompleksu. Największe niedobory wody w Ciesielskiej Wodzie obserwuje się na wiosnę, w okresie napełniania stawów. W okresie występowania letnich niżówek przepływy w Ciesielskiej Wodzie są niższe od przepływu biologicznego.
- c) W latach suchych, ze względu na małe zasoby Ciesielskiej Wody, w okresie wiosennym wydłuża się czas napełniania stawów, a w okresie letnim w cieku brakuje wody do podtrzymania zalewu [Czamara, Lejcuś 2004, Czamara i in. 2005].

Bezpośredni pomiar parowania jest trudny, stąd poszukiwania idą w kierunku znalezienia metod pośrednich pozwalających na obliczenia wielkości parowania terenowego na podstawie parametrów meteorologicznych [Musiał 2001, Partyka 1998]. Tym zagadnieniem poświęciła **Danuta Partyka** rozprawę doktorską pt. **Kształtowanie się parowania terenowego w zlewni rolniczej Ciesielska Woda w półroczu letnim** [1998], której promotorem była Laura Radczuk. Celem rozprawy było oszacowanie parowania terenowego dla zlewni rzeki Ciesielska Woda oraz próba ustalenia wpływu zmiany struktury użytkowania gruntu na kształtowanie się parowania terenowego na terenie

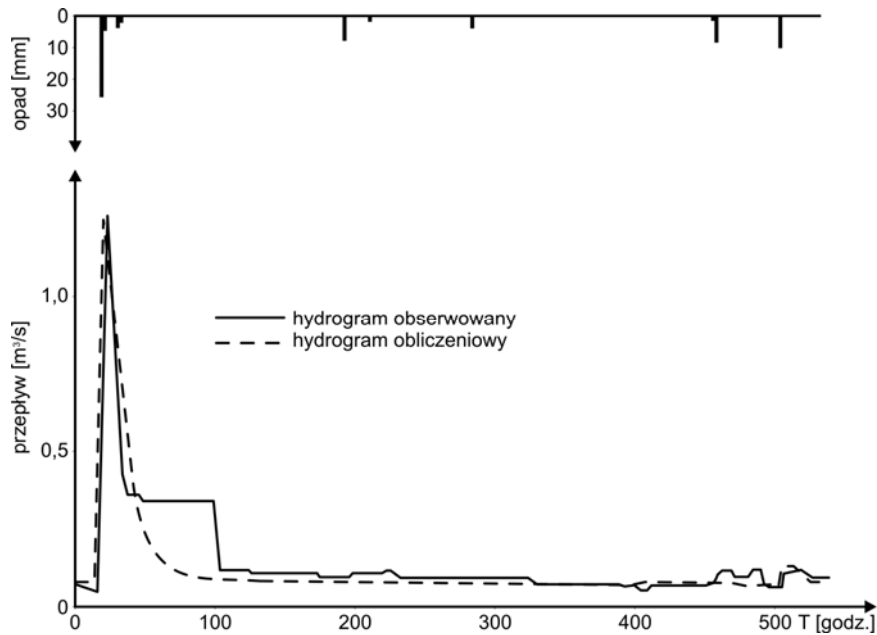
zlewni. Obliczenia przeprowadzone zostały na podstawie wybranych metod oraz szczegółowych danych hydrometeorologicznych ze zlewni badawczej. Wartości parowania terenowego ustalono dla okresów wegetacyjnych lat 1983–1992, w przedziałach dekadowych. Do weryfikacji otrzymanych wyników posłużono się danymi o bilansie wodnym zlewni Ciesielskiej Wody. Podstawą obliczeń i analiz przeprowadzonych w pracy były wyniki obserwacji meteorologicznych, hydrologicznych i hydrogeologicznych, prowadzonych w latach 1983–1992 oraz informacje na temat rolniczego użytkowania obszaru zlewni w półroczu letnim.

Opracowany model opad-odpływ (MIZUR) był pomyślany jako model regionalny, kompleksowo rozwiązujący problemy modelowania procesu odpływu w zlewniach niekontrolowanych. Udostępnione Joannie Downar-Zapolskiej [1989] godzinowe wartości opadu i przepływu oraz program MIZUR pozwoliły jej na wstępną identyfikację parametrów modelu i na ocenę zasobów wodnych w zlewni Ciesielska Woda. Wyniki obliczeń symulacyjnych przedstawiono na rysunkach 17 i 18 oraz w tabeli 3.



Rys. 17. Wyniki symulacji z modelu MIZUR dla zlewni Ciesielskiej Wody, wodowskaz Bogusławice, 1987 r.

Fig. 17. Simulation results after MIZUR model for Ciesielska Woda catchment, Bogusławice gauging station, 1987



Rys. 18. Obliczony i obserwowany hydrogram odpływu ze zlewni Ciesielskiej Wody w przekroju Bogusławic

Fig. 18. Calculated and observed outflow hydrograph for Ciesielska Woda catchment in Bogusławice cross-section

Prowadzone na terenie zlewni doświadczalnej badania znalazły odzwierciedlenie w dydaktyce w postaci 5 prac magisterskich wykonanych pod patronatem Alicji Czamary i 2 pod kierownictwem Laury Radczuk:

- 1) Badania modelowe ruchu w strefie saturacji na przykładzie zlewni Ciesielskiej Wody – autor Jarosław Jędrzejczak, 1992 r.;
- 2) Warunki lokalizacji składowisk odpadów komunalnych w rejonie zlewni Ciesielskiej Wody – autor Andrzej Zmysłowski, 2000 r.;
- 3) Analiza gospodarki wodnej na terenie zachodniej części zlewni Ciesielskiej Wody – autorka Katarzyna Suszek, 2002 r.;
- 4) Wpływ miąższości osadów dennych i utworów podłoża na przesiąki ze zbiorników wodnych – badania modelowe na przykładzie kompleksu stawowego Cieśle I (model SEEP-W) – autorka Katarzyna Andrzejewska, 2003 r.;
- 5) Wpływ gospodarki stawowej w zlewni na przepływy Ciesielskiej Wody – autorka Paulina Skotnicka, 2004 r.;
- 6) Studium do regulacji rzeki Ciesielskiej Wody wykonał w 1991 r. Marek Hrynczyszyn, pod opieką Laury Radczuk;
- 7) Ocena zasobów wodnych w zlewni Ciesielska Woda [1989] – autorka Joanna Downar-Zapolska, pod opieką Laury Radczuk.



Tabela 3  
Table 3

Szczegółowy bilans wodny dla okresu wegetacji V-IX 1987 r. w zlewni Ciesielskiej Wody  
Detailed water balance in the Ciesielska Woda catchment for the vegetation period between V and IX 1987

Oznaczenie Data Symbol Date	Opad Precipitation		Wilgotność warstwy powierzchniowej Surface layer humidity		Wilgotność warstwy przejściowej Transitional layer humidity		Retencja wód gruntowych Groundwater storage	Odpływ Outflow	Parowanie Evaporation	Bilans Balance	
	mm	mm	mm	mm	Mm	mm				mm	mm
1.05	0	61	61	144	144	79	0	0			
31.05 różnica/difference	62	64	64	139	139	91	11	42			+9
	62	3	3	-5	-5	2	11	42			
1.06	0	64	64	139	139	91	0	0			
30.06	60	64	64	140	140	90	14	40			-2
Różnica/ difference	60	0	0	1	1	-1	14	-48			
1.07	0	64	64	140	140	90	0	0			
31.07 różnica difference	82	62	62	141	141	92	18	61			+3
	82	-2	-2	1	1	2	18	61			
1.08	0	62	62	141	141	92	0	0			
31.00 różnica difference	71	62	62	144	144	04	12	71			-7
	71	0	0	3	3	-8	12	71			
1.09	0	62	62	144	144	84	0	0			
30.09 różnica difference	46 46	65	65	141	141	85	10	40			-5
		3	3	-3	-3	1	10	40			

Doskonalenie matematycznego opisu procesów hydrologicznych znalazło odzwierciedlenie w zbiorze programów numerycznych oprogramowanych przez współpracujących matematyków. Są to:

- programy opisujące spływ powierzchniowy i przepływy w sieci koryt rzecznych,
- programy rozwiązujące problem przepływu wody i zanieczyszczeń w strefie aeracji,
- programy modelujące wody podziemne w ujęciu ilościowym i jakościowym.

Do niewątpliwych osiągnięć uczestników programu badawczego należy wykazanie, że poziom realizacji pomiarów eksperymentalnych w hydrologicznych obiektach badawczych ma równie istotne znaczenie, jak i adekwatność opisu matematycznego procesów cyklu hydrologicznego.

## **6. MODELOWANIE ZJAWISK EKSTREMALNYCH**

Do zjawisk ekstremalnych, które były przedmiotem badań i rozwiązań praktycznych Zespołu, należą powodzie i susze. Udział wrocławskiego środowiska naukowego i inżynierskiego w rozwiązywaniu zagadnień ochrony przed powodzią w dorzeczu Odry datuje się od lat 50. XX w. Jest on wszechstronny, o czym świadczy załączone piśmiennictwo. Przedstawienie zjawiska suszy jako procesu hydrologiczno-meteorologicznego przechodzącego kolejne fazy ma uzasadnienie fizyczne. Bieżące zasoby retencyjne na danym obszarze kształtowane są głównie przez czynniki fizyczno-geograficzne i klimatyczne (głównie opady atmosferyczne i temperaturę powietrza). Nieklimatyczne parametry fizjograficzne, takie jak rzeźba terenu, gleby, budowa geologiczna, szata roślinna, wody powierzchniowe), wpływają na retencję w sposób modyfikujący, określając potencjalne zdolności retencyjne zlewni.

W definicji suszy podanej w Handbook of Hydrology [Maidment 1993] podkreśla się, że ze względu na warunki meteorologiczne i klimatyczne, problemy rolnicze, warunki hydrologiczne i skutki gospodarcze wyróżnia się:

- suszę meteorologiczną, określaną jako okres trwający na ogół od miesiąca do lat, w którym dopływ wilgoci do danego obszaru spada poniżej stanu normalnego w danych warunkach klimatycznych uwilgotnienia;
- suszę rolniczą, definiowaną jako okres, w którym wilgotność gleby jest niedostateczna do zaspokojenia potrzeb wodnych roślin. Innym przejawem suszy rolniczej jest deficyt wody dla utrzymania inwentarza i prowadzenia normalnej gospodarki w rolnictwie;
- suszę hydrologiczną, odnoszącą się do okresu, gdy przepływy w rzekach spadają poniżej przepływu średniego, a w przypadku przedłużającej się suszy meteorologicznej obserwuje się znaczne obniżenie poziomu zalegania wód podziemnych;
- suszę w sensie gospodarczym, będącą skutkiem wymienionych procesów fizycznych, odnoszącą się do zagadnień ekonomicznych w obszarze działalności człowieka dotkniętego suszą.

### **6.1. Modelowanie zjawisk powodziowych**

Powodzie są zjawiskiem naturalnym, związanym z obiegiem wody w przyrodzie, nie można ich zatem uniknąć. Wywołane przez nie szkody są w głównej mierze skutkiem zasiedlania przez człowieka zalewowych terenów dolin rzecznych. Ludzkość usiłuje sobie radzić z tą groźbą w dwojaki sposób.

Z jednej strony, nauka wypracowała metody przewidywania nadejścia fali powodziowej, wiążąc je ze zjawiskami meteorologicznymi, z drugiej zaś wypracowano systemy technicznej ochrony przeciwpowodziowej, do których należą sztuczne zbiorniki, wały przeciwpowodziowe, poldery, kanały i budowle hydrotechniczne. Mimo tych zabezpieczeń powódzie nadal występują, powodują śmierć setek ludzi oraz ogromne straty materialne. W Polsce pamiętamy dobrze powódzie z 1997 [Radczuk i in. 1998] i z 1998 r., a występujące co roku wezbrania oraz powódzie w różnych częściach świata przypominają o istniejącym zagrożeniu. Jeśli zatem techniczne systemy ochrony przeciwpowodziowej nie mogą dać pełnego zabezpieczenia, a zjawiska powodzi nie da się uniknąć, to rodzi się pytanie, w jaki sposób można zapobiegać wyrządzanym przez nie szkodom lub je ograniczać. Doświadczenia wielu krajów wskazują, że najbardziej skutecznym sposobem jest unikanie niewłaściwego zagospodarowania dolin rzecznych oraz możliwie najpełniejszy powrót do naturalnych warunków hydrograficznych. Nie wszędzie jest to jednak możliwe, dlatego działania przeciwpowodziowe powinny być podejmowane na wszystkich szczeblach i poziomach funkcjonowania społeczeństwa. Zerowy poziom ryzyka w ochronie przed powodzią nie istnieje. Ocenę jego przeprowadza się, uwzględniając losowy charakter wezbrań w połączeniu z wrażliwością terenów na zalewanie. Zarówno wezbranie, jak i wrażliwość terenu określane są w kategoriach rachunku prawdopodobieństwa, co umożliwia ich porównywanie. Wynikiem tego jest ocena ryzyka poszczególnych obiektów o określonym użytkowaniu, znajdujących się na terenach zalewowych.

Od wielu lat obserwuje się tendencję opracowywania gotowych pakietów programów komputerowych, rozwiązujących typowe problemy z zakresu gospodarki wodnej. Utworzył się szeroki rynek tego typu narzędzi. Programy te, opracowywane przez różne instytucje i laboratoria, są łatwo dostępne dla potencjalnych klientów. Oferta jest stosunkowo bogata. Najogólniejszym modelem stosowanym w hydraulice kanałów otwartych jest Saint Venanta. Równania Saint Venanta stanowią model o parametrach rozłożonych, uwzględniający przestrzenną zmienność parametrów i rozwiązania. Rozwiązaniem równania są funkcje  $h(x,t)$  oraz  $Q(x,t)$ , reprezentujące odpowiednio zmienne w czasie i przestrzeni stany wody oraz natężenia przepływu. W porównaniu z innymi modelami jest to bogata informacja wyjściowa. Wybierając z pakietu dostępnych modeli, należy wziąć pod uwagę:

- dokładność modelu,
- dokładność oszacowania parametrów przepływu w analizowanym zagadnieniu,
- typ i dostępność wymaganych danych wejściowych,
- dostępność sprzętu komputerowego i koszt obliczeń,
- znajomość danego modelu,
- istnienie dokładnej dokumentacji, oceny zakresu stosowalności i dostępności oprogramowania modelu.

Przy wyznaczaniu zasięgu zalewu przepływem o zadnym prawdopodobieństwie przewyższenia, który stanowi obwiednię przepływów maksymalnych o zbliżonym źródle pochodzenia, jednowymiarowy model przepływu ustalonego wydaje się być najbardziej odpowiednim do wyznaczania stref zagrożenia. Na dokładność odwzorowania jednowymiarowego ustalonego podejścia istotne znaczenie ma stosowanie ogólnie obowiązujących zasad hydrauliki koryt otwartych w zakresie:

- formułowania równań różniczkowych przepływu ustalonego i ich numerycznego rozwiązania,
- bezpośredniego formułowania równań różniczkowych,
- określania warunków brzegowych i zasad rozwiązywania równań różnicowych w zależności od reżimu przepływu.

Warunki te spełnia oprogramowanie HEC-RAS powszechnie stosowane w Europie. Merytorycznie jest ono oparte na najwyższym standardzie, a ponadto jest dostępne bez ograniczeń. HEC-RAS jest modelem opracowanym przez US Corps of Engineers-Hydraulic Engineering Center i przetestowany w bardzo szerokim zakresie.

Pakiet HEC-RAS odwzorowuje ustalony przepływ we wszystkich możliwych przypadkach:

- zabudowa koryt: wały przeciwpowodziowe, jazy i stopnie, mosty wysokie i niskie, przepusty;
- zmienny kształt doliny rzecznej i koryta głównego, opisany przekrojami poprzecznymi, które można dowolnie zagęszczać na życzenie użytkownika technikami interpolacyjnymi;
- zróżnicowanie długości drogi przepływu na terasach zalewowych i korycie głównym. Jest to istotne, ponieważ poruszamy się w obszarze o bardzo zróżnicowanym reżimie przepływu, poczynając od wysokich wartości głębokości i prędkości przepływu aż do granic zalewu, gdzie wartości te maleją do bliskich zeru. Obszary te występują na znaczących powierzchniach. Model HEC-RAS uwzględnia taki przypadek, wskazując obszary o zaniedbywaniu małych prędkościach jako obszary retencyjne. Ich pole przekroju bierze udział jedynie w bilansie masy, zaś jest pomijane w równaniu dynamiki.

Program ten jest opracowany w wersji symulacyjnej.

HEC-RAS jest zaawansowaną formą modelu z rodziny HEC (HEC1, HEC2, HEC-RAS) i jest dostosowany do systemu Windows, łatwy w obsłudze, a przede wszystkim w:

- przygotowaniu i wprowadzeniu danych wejściowych,
- obliczeniach testowych i weryfikujących,
- prezentacji graficznej i numerycznej,
- liczbie wprowadzonych do pakietu wynikowych charakterystyk przydatnych użytkownikowi.

Do wymiernych osiągnięć Zespołu w modelowaniu zjawisk powodziowych należy zaliczyć rozprawę habilitacyjną Włodzimierza Czamary oraz pięć prac doktorskich.

Rozprawa habilitacyjna **Włodzimierza Czamary** pt. **Charakterystyka hydrologiczna i modele wezbrań opadowych dorzecza górnej Odry** [1991] poświęcona jest modelowaniu powodzi typu opad-odpływ. Opracowany model „Odra” jest, ze względu na genezę, analitycznym rozwiązaniem równań różniczkowych zwyczajnych (równanie retencji + zależność wiążąca retencję z dopływem i odpływem) względem czasu.

Na potrzeby modelu górne dorzecze Odry podzielono na sześć zlewni cząstkowych. Przy podziale brano pod uwagę warunki formowania się odpływu na obszarze zlewni oraz dostępność archiwalnych materiałów obserwacyjnych i obserwacji przekazywanych

w trybie operacyjnym, które można wykorzystać przy opracowywaniu i eksploatacji modelu. Wydzielone zlewnie są kontrolowane przez wodowskazy:

- A – zlewnia Odry do przekroju wodowskazowego Svinov,  $A = 1615 \text{ km}^2$ ,
- B – zlewnia Opawy do przekroju Dehylov,  $A = 2039 \text{ km}^2$ ,
- C – zlewnia Ostravicy do przekroju Ostrava,  $A = 818 \text{ km}^2$ ,
- D – zlewnia Olzy do przekroju Vernovice,  $A = 1068 \text{ km}^2$ ,
- E – zlewnia Psiny do przekroju Bojanów,  $A = 520 \text{ km}^2$ ,
- F – zlewnie obejmujące ujściowe odcinki głównych dopływów oraz bezpośrednio zasilające Odrę poniżej Svinova,  $A = 684 \text{ km}^2$ .

Dla każdej z wymienionych zlewni, w przekroju zamykającym, przepływy obliczane są metodą SCS oraz formułą wykładniczą Dubanda.

Podstawowymi danymi wejścia do modelu są opady dobowe  $P$  notowane w 9 stacjach obserwacyjnych znajdujących się na terenie dorzecza – czterech na obszarze CSFR (Cervene, Lysa Hora, Praded i Ostrava) oraz pięciu po polskiej stronie (Istebna, Cieszyn, Racibórz, Głubczyce i Jarnoltówek). Poza tym, po uruchomieniu modelu, należy wprowadzić następujące dane:

- opady dobowe z 15 dni poprzedzających opad stanowiący wejście do modelu;
- przepływy w Odrze i w przekrojach zamykających główne dopływy (wodowskazy Svinov, Chałupki, Krzyżanowice, Miedonia, Dehylov, Ostrava, Vernovice i Bojanów);
- wymagane charakterystyki zlewni cząstkowych i koryt cieków określone na etapie identyfikacji modelu.

Po wprowadzeniu tych danych w modelu następuje obliczanie, metodą wielokątów, średnich dobowych opadów  $\overline{P}_{ij}$  w zlewniach cząstkowych. Następnie są określane opady efektywne  $Pe_{ij}$  oraz hydrogramy odpływu w przekrojach zamykających poszczególne zlewnie cząstkowe.

Do transformacji opadu w odpływ Autor zastosował model liniowy Nasha, który oparty jest na dwóch równaniach:

- równaniu ciągłości:

$$\frac{dV(t)}{dt} = P(t) - Q(t)$$

- równaniu retencji, wyrażającym liniową zależność między odpływem a objętością zbiornika:

$$V(t) = k Q(t)$$

gdzie:

- $V(t)$  – objętość zbiornika,
- $P(t)$  – dopływ do zbiornika,
- $Q(t)$  – odpływ ze zbiornika.

Model transformacji fali Muskingum łączy odpływ ze zlewni cząstkowych i transformuje je wzdłuż biegi rzeki, na odcinku od przekroju wodowskazowego Svinov (2 km powyżej ujścia Opawy) do przekroju Racibórz–Miedonia (55.5 km).

Zjawisko niestacjonarnego przepływu w modelowanych odcinkach rzeki opisane jest dwoma równaniami:

- równaniem ciągłości:

$$\frac{dR(t)}{dt} = I(t) - Q(t)$$

w którym hydrogram wejściowy zawiera odpływ z odcinka położonego wyżej  $I_d(t)$  i odpływ ze zlewni cząstkowej  $I_i(t)$ :

$$I(t) = I_d(t) + I_i(t)$$

- równaniem retencji odcinka rzeki:

$$R(t) = k[xI(t) + (1-x)Q(t)]$$

gdzie:

$I(t)$  – hydrogram dopływu, wejście,  
 $Q(t)$  – hydrogram odpływu, wyjście,  
 $x, k$  – parametry równania retencji.

Parametry  $x, k_1$  są określane za pomocą optymalizacji wersji modelu transformacji fali na podstawie zarejestrowanych fal powodziowych (materiałów archiwalnych). Program poszukuje optymalnych wartości  $x$  i  $k$  dla każdego wydzielonego odcinka.

Weryfikację modelu przeprowadzono na podstawie trzech fal wezbraniowych z lat 1960, 1972 i 1974.

Model wezbrań opadowych "Odra" jest przygotowany do zastosowania w pracy operacyjnej hydrologicznych służb prognostycznych. Jakość prognoz otrzymywanych za pomocą tego modelu zależy przede wszystkim od dokładności określania opadów na terenie modelowanych obszarów. Dzięki przyjętej przez Autora strukturze modelu reaguje on na nierównomierne rozłożenie opadu na obszarze dorzecza i na warunki odpływu ze zlewni cząstkowych. Przyjęte rozwiązanie stanowiło na danym etapie rozwoju hydrologii istotne osiągnięcie Autora.

Rozprawa doktorska **Jana Jelowickiego** pt. **Zintegrowany model przepływu nieustalonego w sieci koryt otwartych** [1997], napisana pod kierunkiem Laury Radczuk, stanowi swoistą monografię na temat modelowania przepływu w sieciach koryt rzecznych. Autor przedstawił w pracy szereg idei i rozwiązań dotyczących modeli hydrodynamicznych stosowanych do obliczania przepływów w sieciach koryt rzecznych. Omówił w szczególności samo sformułowanie równań hydrodynamiki, problem dyskretyzacji przestrzeni fizycznej i metody przybliżone rozwiązywania równań przepływu. Opracowany model typu objętości skończonych SiReN stanowi efektywne narzędzie do opisu przepływu wody w kanałach o złożonej geometrii.

Opracowany przez Autora program SiReN realizuje symulację numeryczną transformacji fali w sieci koryt rzecznych na podstawie rozwiązań równań bilansowych płytkiej wody. Podstawowy tryb obliczeń przepływów w korycie przebiega według scenariusza przepływu uśrednionego w przekroju poprzecznym, z rekonstrukcją pola wydatku jednostkowego na podstawie predefiniowanych rozkładów prędkości.

Tereny zalewowe można modelować bądź jako obszar bezpośrednio dołączony do koryta, bądź jako obszar o reprezentacji dwuwymiarowej, odpowiednio połączony z systemem koryt za pomocą wewnętrznych warunków brzegowych.

Przepływ uśredniony poprzecznie opisują równania bilansowe Saint Venanta:

$$\delta_t \frac{\partial JA}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial \xi} = q \quad (17)$$

$$\delta_k \delta_i \left( \delta_t \frac{\partial JQ}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \int_A v^2 \right) \right) + \frac{\partial P}{\partial \xi} + F + gJA\delta_k P_0 + J \left( gA + \frac{\partial Z}{\partial \xi} + \tau_b + \tau_s \right) = Jq(v_g - V), \quad (18)$$

gdzie:

A – czynny przekrój poprzeczny [m<sup>2</sup>],

B – szerokość zwierciadła wody [m],

F – siły inercyjne spowodowane krzywizną koryta,

g – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>],

H – rzędna lustra wody [m],

h – głębokość przepływu [m],

J – jacobian odwzorowania siatkowego,

P – parcie całkowite w przekroju [N],

Q – natężenie przepływu [m<sup>3</sup>/s],

q – natężenie dopływu bocznego [m<sup>2</sup>/s],

t – czas [s],

V – prędkość średnia [m/s],

v<sub>q</sub> – prędkość dopływu [m/s],

Z – rzędna dna [m],

δ<sub>i</sub> – przełącznik modelu fali dyfuzyjnej (δ<sub>i</sub> = 0) i dynamicznej (δ<sub>i</sub> = 1),

δ<sub>k</sub> – przełącznik modelu fali kinematycznej (δ<sub>k</sub> = 0),

δ<sub>t</sub> – przełącznik modelu ruchu ustalonego (δ<sub>t</sub> = 0) i nieustalonego (δ<sub>t</sub> = 1),

Równania przepływu sformułowano w krzywoliniowym ortogonalnym układzie współrzędnych (ξ, η), związanym z kształtem trasy koryta ciek. Zaniedbanie krzywizny jest możliwe poprzez wprowadzenie związku ξ(x, y) = x, co prowadzi do J = 1 i F = 0.

Naprężenia denne są obliczane na podstawie zmodyfikowanej formuły Chézy-Manninga:

$$\tau_b = g A \frac{V|V|}{K^2} \quad (19)$$

$$K_i = \frac{R_i^{2/3}}{K^2} \quad (20)$$

dopuszczającej zmienność współczynnika szorstkości wraz z napelnieniem:

n<sub>i</sub> = n<sub>0i</sub> n<sub>i</sub>(h). Naprężenia powierzchniowe wyrażają się przez:

$$\tau_s = -\alpha_w B \frac{\rho_p}{\rho_w} (v_w \cdot n_\xi) \quad (21)$$

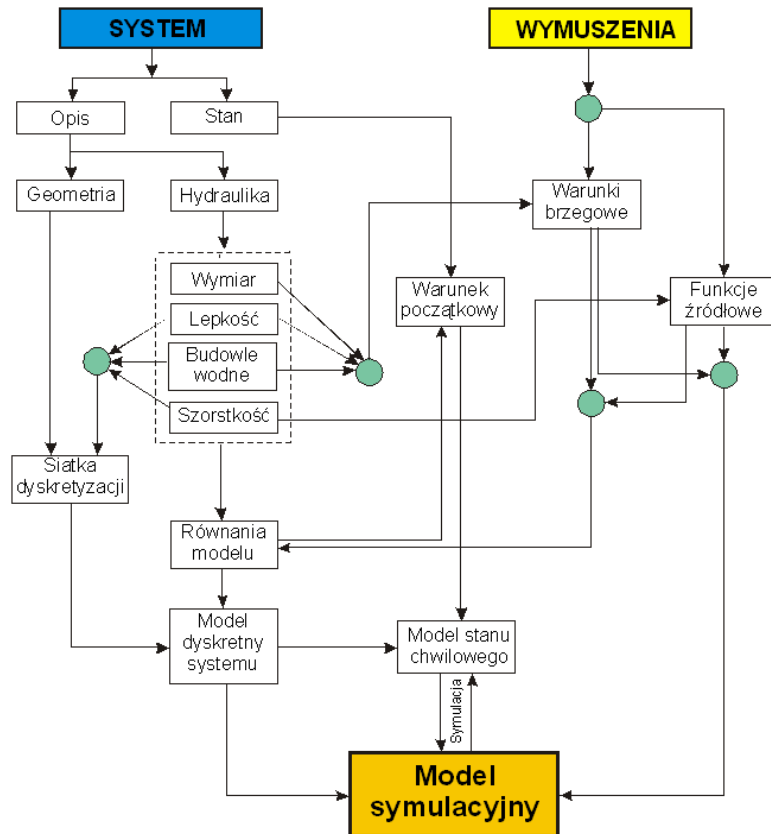
Zakłada się, że rozkład ciśnień w przekroju jest zbliżony do rozkładu hydrostatycznego:



$$P = g \int_0^h B(\xi)(h - \zeta)d\xi = \frac{1}{2} g \int_0^B h^2(\eta)d\eta \quad (22)$$

Przepływ w korytach jest aproksymowany metodą różnic skończonych z zastosowaniem schematu typu Preissmanna. W przypadku równań fali kinematycznej stosuje się dyskretyzację typu kaskady. Użytkownik może decydować o postaci stosowanych kwadratur: punktu środkowego, trapezów i dwupunktowej Gaussa przy obliczaniu całek przestrzennych. Przepływ w obszarach dwuwymiarowych aproksymowano metodą objętości skończonych w uogólnionym układzie współrzędnych, z zastosowaniem rozwarstwionej siatki węzłów obliczeniowych. Całkowanie względem czasu przeprowadza się metodą Cranka-Nicholsona z możliwością sterowania parametrem niejawności oraz długością kroku całkowania.

Przepływ informacji w modelu SiReN ilustruje schemat przedstawiony na rysunku 19.



Rys. 19. Schemat modelu SiReN  
Fig. 19. SiReN model diagram

Opracowany przez Autora model został zweryfikowany w czasie wezbrania w 1997 r. na podstawie pomiarów wykonanych w przekrojach Hydrowężła Wrocławskiego [Radczuk i in. 2000].

Celem rozprawy doktorskiej **Romualda Grockiego – Wielokryterialność podejmowania decyzji w zarządzaniu kryzysowym dla potrzeb ochrony przed powodzią** [2005], napisanej pod kierunkiem Laury Radczuk, było określenie kryteriów podejmowania decyzji dotyczących wyboru środków zarządzania kryzysowego na potrzeby ochrony przed powodzią. Zagadnienie to jest szczególnie ważne ze względu na rosnącą wrażliwość terenów zalewanych na straty powodziowe, jak i z uwagi na zwiększającą się kompleksowość akcji przeciwpowodziowych. Autor bardzo dobrze poradził sobie z tym złożonym tematem, wykorzystując zarówno swoją wiedzę, jak i bogate doświadczenie zawodowe w tym zakresie. Dokonane przez Autora specyfikacja i uporządkowanie działań oraz metod z zakresu zarządzania powodziowego i kryzysowego pozwala na efektywne wykorzystywanie wyników pracy na wszystkich poziomach ochrony przed powodzią. Podstawą opracowania rozprawy były pracochłonne analizy przeprowadzone dla danych z powodzi na Odrze z 1997 r. Prace te pozwoliły uwiarygodnić zaproponowaną metodykę.

Oryginalnymi osiągnięciami Autora są:

- zdefiniowanie istotnych elementów etapów czasowych akcji przeciwpowodziowej (czas zarządzania kryzysowego, czas reakcji, czas gotowości, współczynnik reakcji);
- opracowanie systematyki poszczególnych działań i metod ochrony od powodzi w postaci modułowej, wraz z określeniem wag dla poszczególnych modułów oraz ich współczynników rozproszenia;
- opracowanie wag, parametrów i punktacji dla przyjętych kryteriów podejmowania decyzji w ochronie od powodzi.

Analizując poszczególne wezbrania oraz gospodarkę wodną na kaskadzie zbiorników Otmuchów i Nysa, Ryszard Kosierb, autor rozprawy pt. Sterowanie pojemnością zbiorników retencyjnych położonych na Nysie Kłodzkiej w okresie przepływów wód wezbraniowych [2004], której promotorką była Laura Radczuk, sukcesywnie wprowadzał swe zalecenia (od 1977 r. prowadził gospodarkę wodną tych zbiorników retencyjnych) w opracowywanych instrukcjach gospodarowania wodą dla tych obiektów, z zamiarem dostosowania ich działania w czasie wezbrań do reżimu hydrologicznego zlewni Nysy Kłodzkiej oraz górnej części dorzecza Odry.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz Autor sformułował następujące wnioski:

- Gospodarka wodna na zbiornikach retencyjnych Otmuchów i Nysa w czasie wezbrań była realizowana do lat osiemdziesiątych według procedur konwencjonalnych. Przeprowadzona analiza przepływów maksymalnych, czasów przejścia i przebiegów wezbrań na Nysie Kłodzkiej i Odrze pozwoliła na opracowanie zasad sterowania na istniejących obiektach z uwzględnieniem powodziowości tych rzek.
- Prezentowana praca ma przede wszystkim charakter aplikacyjny, a zasady sterowania na kaskadzie zbiorników Otmuchów–Nysa zostały wdrożone w Regionalnym Zarządzie Gospodarki Wodnej we Wrocławiu.
- Opracowano szczegółowe zasady sterowania w zakresie wezbrań o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 1 - 10\%$  i  $p < 1\%$ , z uwzględnieniem redukcji wezbrania

na Odrze. Według autora zbiorniki Otmuchów i Nysa współpracują ściśle ze sobą, lecz transformację wezbrania na każdym zbiorniku należy przeprowadzać oddzielnie.

- Przy obecnych rozwiązaniach technicznych zbiorników Nysa i Otmuchów oraz przy znaczącym dopływie do zbiornika dolnego ze zlewni różnicowej zasadą powinno być maksymalne ograniczenie w pierwszej fazie wezbrania odpływu ze zbiornika górnego (odpływ w wysokości wydatku turbin), co pozwala na maksymalne wykorzystanie rezerwy forsowanej na zbiorniku Otmuchów.
- Zasada ta powinna dotyczyć nie tylko zespołu zbiorników Nysa i Otmuchów, ale każdego układu zbiorników ze znaczącym dopływem bocznym do dolnego zbiornika.
- Uwzględniając czasy przejścia i przebiegu fal na Nysie Kłodzkiej i Odrze, regułą wg Autora powinno być odprowadzenie wysokich odpływów (nie powodujących jednak strat) ze zbiornika Nysa w pierwszej fazie wezbrania. Wysokie odpływy powyżej 100 m<sup>3</sup>/s mogą nastąpić jednak dopiero po zamknięciu żeglugi i położeniu jazu kozłowo-iglicowego w Ujściu Nysy. Taki sposób postępowania pozwala na maksymalną redukcję fali na Nysie Kłodzkiej, a także na samej Odrze.
- Obliczenia symulacyjne wykazały, że stosując opracowane przez Autora zasady i zwiększając o 70 mln m<sup>3</sup> rezerwy stałe na zbiornikach w okresie od 15 czerwca do 15 września, katastrofalne wezbranie z 1997 r. o prawdopodobieństwie p~0,1% można zredukować do 600 m<sup>3</sup>/s bez ograniczenia odpływu ze zbiornika Nysa w okresie przemieszczania się kulminacji na Odrze lub do 800 m<sup>3</sup>/s ze znacznym ograniczeniem odpływu ze zbiornika Nysa, co będzie miało wpływ na redukcję wezbrania na samej Odrze.
- Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych należy zwiększyć przepustowość Nysy Kłodzkiej na odcinku zbiornik Nysa – ujście do Odry do wartości  $Q_{\text{dozw.}} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

W rozprawie zatytułowanej **Ocena zagrożenia powodziowego w zlewniach górskich na przykładzie zlewni Białej Łądeckiej** [2006], napisanej pod kierunkiem Laury Radczuk, **Marcin Urbański** przedstawił cele, z których dwa pierwsze mają charakter metodyczny, natomiast następne merytoryczny i poznawczy:

- adaptowano na warunki polskiej zlewni górskiej metodę *Inondabilité*, pozwalającą na ocenę relacji pomiędzy zagrożeniem powodziowym a podatnością terenu; opracowano algorytm dla wyznaczania hydrogramu fali hipotetycznej metodą PDF;
- opracowano numeryczny model terenu (NMT) dla doliny Białej Łądeckiej od miasta Łądek Zdrój do ujścia Nysy Kłodzkiej;
- przeprowadzono obliczenia symulacyjne hydrodynamicznym modelem przepływu MIKE 11;
- wyznaczono strefy zagrożenia powodziowego dla przepływów o prawdopodobieństwie przewyższenia 0.01, 0.5, 1, 5, 10, 20, 50%;
- wykonano mapę podatności terenu;
- opracowano syntetyczną mapę zagrożenia powodziowego.

Nawet ten krótki opis zrealizowanych przedsięwzięć pokazuje, jak szeroki jest obszar działań związanych z wyznaczeniem i wykorzystaniem wiedzy dotyczącej stref zagrożenia powodziowego – od ochrony przed powodzią, poprzez zagospodarowanie przestrzenne do zarządzania w sytuacjach nadzwyczajnych. Nie ulega wątpliwości, że realizacja zadań z tego obszaru wymaga w dalszej perspektywie opracowania, m.in. NMT dla wszystkich zlewni, określenia jednolitości stosowanych skal map (np. 1:10 000). Ze względu na szerokie zastosowanie wyników prac dotyczących stref zagrożenia powodziowego, konieczna jest dalsza i bardziej ścisła współpraca z jednostkami administracji rządowej i samorządowej. Już tylko z tych założeń wynika przydatność i celowość dalszego rozwoju Wydziałowego Centrum Komputerowego. Tym bardziej że na Akademii Rolniczej we Wrocławiu zostało utworzone Centrum Modelowania Procesów Hydrologicznych, skupiające pracowników ówczesnej Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Politechniki Wrocławskiej, Uniwersytetu Wrocławskiego, wrocławskiego Oddziału Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej i Hydroprojektu we Wrocławiu.

Analiza przepustowości doliny Widawy na odcinku miejskim Wrocławia to temat rozprawy doktorskiej pt. **Wpływ zagospodarowania doliny rzecznej na przejście wezbrań w dolnym odcinku rzeki Widawy** [2005] autorstwa **Izabeli Chmielewskiej**, której promotorem był Włodzimierz Czamara. Problematyka ta ma istotne znaczenie utrzymania rzek, a także dla ochrony zasobów przyrody. W praktyce jedynie obliczenia hydrauliczne umożliwiają wariantowy wybór rozwiązań z zakresu inżynierii rzecznej. Materiałem wyjściowym do badań był dla Autorki numeryczny model terenu doliny rzeki Widawy, opracowany na podstawie digitalizacji istniejących map topograficznych w skali 1:10 000, uzupełnionych bezpośrednimi pomiarami geodezyjnymi. Z numerycznego modelu terenu wygenerowano 209 dolinowych przekrojów poprzecznych, wykorzystanych do opisu koryta rzeki i doliny w trakcie prowadzonych obliczeń. Na potrzeby obliczeń zinventaryzowano 17 mostów i jazów oraz istniejące obwałowania. Dokonano także waloryzacji przyrodniczo-ekologicznej doliny. Wyniki inwentaryzacji i rozpoznania wykorzystano do oceny warunków przepływu i oszacowania współczynników szorstkości. Obliczenia rzędnych zwierciadła wielkich wód z uwzględnieniem istniejącego obwałowania bez i z zabudową hydrotechniczną rzeki Widawy wykonano jednowymiarowym modelem przepływu wolnozmiennego ustalonego HEC-RAS v. 3.1.1.

Wieloletnie prace wykonywane przez członków Zespołu pozwoliły na udział w opracowaniu siedmiu podręczników przekazujących podstawową wiedzę z zakresu hydrologii i systemów informacji geograficznej oraz prawne i praktyczne aspekty zapobiegania powodzi i jej skutkom. Są to:

- Wyznaczanie stref zagrożenia powodziowego, Radczuk L. i in. 2001;
- Metody ograniczania skutków powodzi, Grocki R., Czamara W. 2001;
- Zagospodarowanie i wdrożenie lokalnych systemów ostrzeżeń powodziowych, Grocki i in. 2001;
- Metody edukacji informowania i szkoleń, Aniszewska G. i in. 2001;
- Budowanie Public Relation, Gielnicka I. i in. 2001;
- Organizacja lokalnych koalicji, Kuncewicz A., Dobrowolski R. 2001.

Zasadniczym celem wymienionego na pierwszej pozycji podręcznika było przekazanie podstawowej wiedzy z zakresu formowania się wezbrań, matematycznego modelowania oraz zasad wyznaczania stref zagrożenia powodziowego i opracowanie map stref zagrożenia z zastosowaniem techniki GIS.

#### **6.1.1. Przykłady opracowań z zakresu ochrony przeciwpowodziowej w dorzeczu górnej i środkowej Odry**

Wdrożenie na górnej i środkowej Odrze modelu matematycznego SiReN wraz z weryfikacją pozwoliło na przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych na odcinku Odry od km 27,2 (ujście Olzy) do przekroju Połęcko, km 530,3 [Radczuk i in. 2002], realizowanych we współpracy z Instytutem Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej.

Informacje wejściowe o obiekcie będące podstawą do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych obejmowały:

- dane topograficzne (przekroje poprzeczne),
- dane hydrauliczne (współczynniki oporu, wydatków jazów, itp.),
- dane hydrologiczne (przepływy o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia, hydrogramy wezbrań).

Zgodnie z ogólnie przyjętymi standardami dokonano w pierwszej kolejności kalibracji modelu, wykorzystując do tego celu hydrogramy wezbrań z lat 1985 i 1977. Hydrogramy fal miarodajnych i kontrolnych stanowiły podstawę dla oceny zdolności redukcyjnych polderów.

Najlepszym sprawdzianem jakości modelu było porównanie pomierzonych i obliczonych wartości stanów wody lub przepływów, wykonanych w czasie powodzi w 1977 i 1997 r. przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddziału Wrocławskiego, jak również przez Instytut Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu. Duża zgodność przepływów obliczonych i pomierzonych (tab. 4) upoważnia do stwierdzenia, że opracowany program bardzo dobrze odwzorowuje proces przejścia wezbrania nawet przez Wrocławski Węzeł Wodny, który zaliczany jest do jednego z najbardziej skomplikowanych systemów wodnych w Polsce.

Po zadowalającym dopasowaniu struktury modelowej do struktury modelowanej przeprowadzono obliczenia symulacyjne, które polegały na wprowadzeniu rozwiązań zmniejszających ryzyko powodzi. Wprowadzono takie rozwiązania, które – zdaniem autorów – zagwarantują w miarę bezpieczne przeprowadzenie przepływu miarodajnego i kontrolnego lub zbliżonego do przepływu z 1997 roku.

Tabela 4  
Table 4

Pomierzone i obliczone programem SiReN wartości przepływów maksymalnych we Wrocławskim Węźle Wodnym w czasie wezbrania w 1977 i 1997 r.  
Maximal flows in Wrocław Water System during the floods in 1977 and 1997 measured and calculated using SiReN model

Przekrój pomiarowy Gauging section	Data pomiaru Measurement date	Przepływ pomierzony [m <sup>3</sup> /s] Measured flow	Przepływ obliczony z modelu [m <sup>3</sup> /s] Calculated flow
Kładka k. ZOO	Lipiec 1997 r.	1938	2084
Most Zwierzyniecki	Lipiec 1997 r.	920	858
Mosty Jagiellońskie	Lipiec 1997 r.	1450	1409
	Lipiec 1997 r.	1515	1409
Most Krzywoustego	Lipiec 1997 r.	185	160
	Lipiec 1997 r.	169	160
Oława most	6.08.1977 r., godz. 3 <sup>00</sup>	997	1180
Polder Oława – Lipki	6.08.1977 r., godz. 17 <sup>00</sup> – 19 <sup>30</sup>	83,8	54
Kanał Powodziowy	8.08.1977 r.	588,5	565
Stara Odra	8.08.1977 r.	174,8	188
Odra Miejska	8.08.1977 r.	418,9	510
Wodowskaz Oława most	25.08.1977 r., godz. 20 <sup>30</sup> – 21 <sup>00</sup>	1192	1195
Kanał Powodziowy	28.08.1977 r.	613	580
Stara Odra	28.08.1977 r., godz. 10 <sup>00</sup> – 14 <sup>00</sup>	170	199
Odra Miejska	28.08.1977 r.	413	528

W obliczeniach przyjęto następujące założenia wyjściowe:

- Przepływem miarodajnym dla II klasy obwałowań na odcinkach od ujścia Olzy do Brzegu most oraz Brzeg Dolny–Połęcko jest przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p = 1\%$ , natomiast przepływem kontrolnym jest przepływ o  $p = 0,3\%$ . Na odcinku Brzeg most–Brzeg Dolny przepływ miarodajny i kontrolny przyjęto jak dla I klasy obwałowań; wynosi on odpowiednio  $p_m = 0,5\%$ ,  $p_k = 0,1\%$ .
- Dla dopływów nie mających istotnego znaczenia dla Odry stosowano dopływ rozłożony na danym odcinku, wykorzystując związki wodowskazowe przepływów, które pozwoliły również na uwzględnienie retencji dolinowej.
- Generalnie, przejściu wielkich wód towarzyszy na ogół wolnozmienny charakter przepływu na długich odcinkach rzeki Odry. Takie przyjęcie znacznie ułatwia podejście do rozwiązywanego zagadnienia, ponieważ jedynie dla wyznaczenia zdolności redukcyjnej polderów przyjmowane są fale hipotetyczne miarodajna i kontrolna, natomiast na samej rzece Odrze obliczenia prowadzone są dla ustalonego przepływu – miarodajnego i kontrolnego.
- Z uwagi na to, że przyjmowanie stałego współczynnika szorstkości dla całej amplitudy zmienności napełnień prowadzi do niezgodności stanów wody obliczonych i pomierzonych, do modelu wprowadzono krzywe natężenia przepływu w przekrojach wodowskazowych jako wewnętrzne warunki brzegowe.

Obliczenia symulacyjne przeprowadzono na wydzielonych odcinkach Odry zamkniętych przekrojami wodowskazowymi:

- I. ujście Olzy – Krapkowice,
- II. Krapkowice – Brzeg Most,
- III. Brzeg Most – Brzeg Dolny,
- IV. Brzeg Dolny – Ścinawa,
- V. Ścinawa – Połęczko.

Scenariusz obliczeń, w zależności od aktualnego stanu na badanym odcinku, zawiera następujące warianty:

- A. Aktualny stan zagospodarowania koryta i użytkowania doliny. W wariantcie tym wprowadzono do modelu istniejące i wykonane w międzyczasie mosty oraz zmodernizowane kanały ulgi.
- B. Wycięcie krzewów i zadrzewienia w międzywałach celem zwiększenia przepustowości dla wód wielkich. Zakres wycinania drzew i krzewów powinien być określany w operatach dendrologicznych i uzgodniony z wojewódzkimi konserwatorami przyrody oraz Wydziałami Ochrony Środowiska i Rolnictwa Urzędów miast. Nowe prawo wodne wprowadza szereg konsekwentnych uregulowań prawnych dotyczących ochrony od powodzi, a w szczególności zmniejsza ochronę prawną dla drzew i krzewów rosnących na obszarze bezpośredniego zagrożenia w części przybrzeżnej koryta.
- C. Na podstawie wyników obliczeń przeprowadzonych dla poszczególnych wariantów wyznaczono rzędną korony wałów lub wysokość wału, spełniające warunki zawarte w Rozporządzeniu Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dn. 20.12.1996 r. Według powyższego Rozporządzenia wymagane jest podniesienie rzędnych korony wałów do wartości 1 m ponad przepływ miarodajny ( $Q_m$ ) i 0,3 m ponad przepływ kontrolny ( $Q_k$ ) dla II klasy obwałowania i odpowiednio dla klasy I wałów o 1,3 m ponad  $Q_m$  i 0,5 m ponad  $Q_k$ .
- D. Wprowadzenie do modelu proponowanych w „Strategii modernizacji...” [Zaleski, Winter 2000] polderów, sterowanych i przepływowych.
- E. Wprowadzenie do modelu nowych, projektowanych i aktualnie modernizowanych kanałów ulgi.
- F. Uwzględnienie w modelu projektowanego zbiornika Racibórz.
- G. Rozważenie konieczności przerwania obwałowania w przypadku wystąpienia przepływu katastrofalnego.
- H. Korekta trasy obwałowań.

Proponowane rozwiązania lokalne na wydzielonych odcinkach, np. podwyższenie wałów, budowa polderów, oddziałują lokalnie, dlatego nie było potrzeby uwzględniania tego faktu na odcinkach niżej położonych. Natomiast w wariantcie ze zbiornikiem Racibórz, obliczenia symulacyjne wykonano na odcinku od tego zbiornika do Brzegu Dolnego. Wskazują one na znaczną zdolność redukcyjną zbiornika poniżej Brzegu Dolnego.

Tylko pierwsze dwa warianty (A, B) zostały przeliczone dla całej Odry od km 27,2 do Połęczka. Pozostałe warianty przeliczono w zależności od proponowanych rozwiązań na danym odcinku.

W wariantowych rozwiązaniach ochrony przeciwpowodziowej górnej i środkowej Odry wykorzystano przede wszystkim rozwiązania proponowane w następujących opracowaniach:

- Generalna strategia ochrony przed powodzią dorzecza górnej i środkowej Odry,
- Modernizacja Wrocławskiego Systemu ochrony przed powodzią – studium programowo przestrzenne dla miasta Wrocławia i powiatu wrocławskiego,
- Zaleski J., Winter J., Strategia modernizacji odrzańskiego systemu wodnego [2000],
- Studium wykonalności dla zbiornika przeciwpowodziowego Racibórz na Odrze.

Proponowane rozwiązania, zwiększające przepustowość koryta i doliny Odry, poddano szczegółowej analizie, każdorazowo sprawdzając ich skuteczność na modelu hydrodynamicznym SiReN.

Przyjęcie rozwiązań wytypowanych na danych odcinkach jest oczywiście sprawą dyskusyjną ze względu na problem ochrony środowiska. Istnieje jednak konieczność wskazania rozwiązań najlepiej realizujących określony cel, którym w tym przypadku jest ochrona przed powodzią.

Przeprowadzone obliczenia na modelu hydrodynamicznym SiReN wykazały, że najlepszym rozwiązaniem jest budowa zbiornika Racibórz. Warianty bez tej inwestycji wymagają, dla uzyskania podobnych efektów, uwzględnienia maksymalnego zakresu robót przy udrożnieniu trasy przejścia wielkich wód.

Ustalając listę rankingową rozwiązań, na pierwszym miejscu należy postawić budowę zbiornika Racibórz. Pozostałe rozwiązania techniczno-inwestycyjne wymagają określenia zbioru kryteriów charakteryzujących stopień realizacji poszczególnych zadań. Najbardziej naturalnymi kryteriami mogłyby być kryteria ekonomiczne, obliczane na podstawie zysków osiągniętych dzięki ochronie mienia i życia ludzi lub strat powodowanych powodzią zarówno w sferze materialnej, jak i w środowisku.

Takiej oceny można dokonać dzięki studium wykonalności. Proponowana kolejność rozważanych w opracowaniu rozwiązań na poszczególnych odcinkach została ustalona na podstawie hydraulicznej oceny zdolności przepustowej wody miarodajnej i kontrolnej w budowanym dla każdego wariantu systemie ochrony przed powodzią (tab. 5).

Budowa zbiornika Racibórz jest bezdyskusyjna, albowiem bez niego nie można w sposób istotny zwiększyć stopnia zabezpieczenia przed powodzią aglomeracji nadodrzańskich. Jest to szczególnie widoczne przy analizie Wrocławskiego Węzła Wodnego i kwestii bezpieczeństwa samego Wrocławia, ale również Raciborza, Kędzierzyna-Koźła czy Opola. Jedynie sterowanie falą na górnej Odrze zmniejszy ryzyko powodziowe w dolinie Odry. Jest to możliwe tylko przez budowę zbiornika Racibórz oraz na kaskadzie Nysy Kłodzkiej, czyli w miejscach, gdzie generuje się fala powodziowa dla Odry.



Tabela 5  
Table 5

Proponowane rozwiązania w kolejności realizacji rozważanych wariantów  
Suggested solutions in order of considered variant implementation

Lp.	Odcinek Section	Warianty Variants								Proponowane rozwiązania w kolejności realizacji Suggested solutions in order of implementation		
		A	B	C	D	E	F	G	H	1	2	3
1	Ujście Olzy – wodowskaz Krapkowice Wodowskaz Krapkowice – wodowskaz Brzeg Most	x	x	x	x	-	x	-	-	F	C	D
2	Wodowskaz Brzeg Most – wodowskaz Brzeg Dolny	-	x	x	x	-	x	-	-	F	D, C	B
3	Wodowskaz Brzeg Dolny – wodowskaz Ścinawa	x	x	x	-	-	v	-	x	F	H	C
4	Wodowskaz Ścinawa – wodowskaz. Połęczko	x	x	x	x	x	v	x	x	F	B	C

Z inicjatywy Wrocławskiej Agencji Rozwoju Regionalnego utworzono zespół składający się z pracowników zatrudnionych w różnych jednostkach organizacyjnych:

- Instytutu Inżynierii Środowiska: Laura Rączuk, Dorota Olearczyk, Ignacy Urbański, Ryszard Eliasiewicz, Marian Mokwa, Włodzimierz Parzonka;
- Wydziałowego Centrum Komputerowego: Jacek Markowski, Izabela Chmielewska;
- Politechniki Wrocławskiej: Ryszard Rogala, Stanisław Kostecki, Jerzy Machajski;
- Hydroprojektu Wrocław: Michał Putowski.

Dotychczasowe osiągnięcia wymienionej wyżej grupy są wypadkową doświadczeń i wiedzy jego członków. Warto podkreślić, że wykonywane przez zespół opracowania znalazły zastosowanie w praktyce i osiągnięciach merytorycznych w nauce. Sprzęt Wydziałowego Centrum Komputerowego pozwolił na przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych pakietem HEC-RAS, dzięki któremu uzyskiwano wyniki dla zmiennych wartości wejścia i zmiennego zagospodarowania doliny oraz rzeki. Możliwa więc była analiza scenariuszy, na podstawie których opracowywane są wariantowe koncepcje zwiększenia stopnia zabezpieczenia przed powodzią dolin rzecznych. Zastosowanie tego oprogramowania sprowadza się więc do poprawnego przygotowania danych wejściowych, do których zaliczamy:

- dane topograficzne,
- dane hydrologiczne,
- dane hydrauliczne.

Zgodnie z przygotowaną przez RZGW we Wrocławiu specyfikacją opracowane studia ochrony przed powodzią dla trzech zlewni Nysy Kłodzkiej, Kaczawy i Kwisy obejmowały:

- Hydrologię wielkich wód – przepływy o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia, miarodajne i kontrolne, wyznaczano w przekrojach wodowskazowych IMGW Oddział Wrocław, natomiast dla pozostałych ważniejszych dopływów, mających wpływ na formowanie się wezbrania w zlewni, przepływy o zadanym prawdopodobieństwie wyznaczano na podstawie zależności regionalnych (wzór Wołoszyna). Ponieważ dorzecze Odry posiada znaczącą zabudowę hydrotechniczną, należało rozwiązać problem wyznaczenia fal hipotetycznych miarodajnych i kontrolnych dla obiektów (zbiorników).
- Inwentaryzację i ocenę aktualnego stanu zabudowy oraz ocenę efektywności redukcji rzeczyswistych i hipotetycznych fal na istniejących zbiornikach.

Koncepcje zwiększenia stopnia zabezpieczenia przed powodzią dolin rzecznych były opracowywane wariantowo:

Wariant I – ochrona bierna (regulacja, obwałowania, zagospodarowanie przestrzenne, gospodarka leśna, inne czynniki);

Wariant II – ochrona bierna i czynna (regulacja, obwałowania, zbiorniki, inne czynniki).

W wariantcie II:

- rozpatrzono możliwości potencjalnych lokalizacji zbiorników przeciwpowodziowych o istotnym znaczeniu dla redukcji fal powodziowych w miastach i terenach o gęstej zwartej zabudowie;

- przeanalizowano efekty redukcji rzeczywistych i hipotetycznych fal powodziowych ( $Q_m$ ,  $Q_k$ ,  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{10\%}$ ,  $Q_{5\%}$ ) na istniejących zbiornikach, przy różnych wariantach podziału pojemności zbiorników;
- oceniono efekty redukcyjne hipotetycznych fal powodziowych miarodajnych i kontrolnych oraz przepływów  $Q_{50\%}$ ,  $Q_{10\%}$ , i  $Q_{5\%}$  w przekroju poniżej zbiorników w charakterystycznych przekrojach rzek (np. w przekrojach ujściowych);
- w rejonach przewidywanych dużych przedsięwzięć modernizacyjno-inwestycyjnych (zbiorniki, wały, inne) dokonywano ogólnego rozpoznania walorów przyrodniczych;
- koncepcje projektowe przedstawiono graficznie na mapach sytuacyjno-wysokościowych w skali 1:10 000 i 1: 50 000.

W analizie porównawczej obu wariantów uwzględniono:

- efekty hydrauliczne i ekonomiczne,
- przedmiar podstawowych robót,
- orientacyjne koszty,
- program przedsięwzięć z uwzględnieniem hierarchii ważności.

Studium kończyły wnioski i zalecenia istotne dla planowania przestrzennego w zakresie zagospodarowania zlewni Nysy Kłodzkiej, Kwisy i Kaczawy, ze szczególnym uwzględnieniem:

- zasad zrównoważonego rozwoju społeczno-gospodarczego, respektującego ochronę środowiska,
- gospodarki leśnej,
- gospodarki rolnej,
- zabudowy biologicznej cieków,
- terenów chronionych, narażonych na niebezpieczeństwo powodzi,
- ochrony przeciwpowodziowej w połączeniu z ochroną środowiska przyrodniczego.

## 6.2. Modelowanie suszy

Spośród różnych zjawisk hydrologicznych, których szczegółowe poznanie jest niezbędne dla gospodarki wodnej, największe trudności sprawia określenie przepływów niskich. Główną przyczyną zróżnicowanego podejścia do zagadnienia odpływów niskich jest zmiana dominanty w zjawisku odpływu powierzchniowego na przejściu od przepływów w strefie wysokiej do niskiej, tj. przepływy niskie i okresy niżówkowe. Przepływy te uwarunkowane są długością okresów bezopadowych lub występowaniem opadów anomalii ujemnej, a także zdolnością retencyjną zlewni i warunkami geologicznymi [Dubicki i in. 1997].

Problemem recesji przepływów w okresach bezopadowych lub z opadami mniejszymi niż przeciętne zajmowali się **Julian Wołoszyn i Laura Radczuk** [1972]. Podjęli oni próbę statystycznego wyznaczenia krzywej opadania przepływów na podstawie hydrogramu naturalnego. Zmodyfikowali metodę konstruowania krzywych opadania i wysychania (dolną gałąź krzywej recesji), opartą na gradiencie opadania. Można ją stosować dla dowolnego przekroju wodowskazowego bez ograniczenia wielkości zlewni,

Jest prosta ze względu na zastosowanie terminowych obserwacji wodowskazowych i umożliwia określenie zasobów dyspozycyjnych wód rzecznych i gruntowych. Autorzy wprowadzili *novum* polegające na wprowadzeniu dwóch charakterystycznych krzywych opadania reprezentujących opadanie przeciętne oraz wysychanie. Ponadto do aproksymacji krzywych opadania wprowadzono funkcję w postaci:

$$Q = (Q_0 - g) e^{-\alpha t^n} + g, \quad (23)$$

gdzie:

$Q$  – przepływ w czasie  $t$ ,

$Q_0$  – przepływ początkowy,

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego,

$g, n$  – parametry wyznaczone na podstawie obserwacji wodowskazowych,

$\alpha$  – współczynnik recesji obliczony z równania (23).

Dalsze badania skupiały się na ocenie odpływu z czynnych zasobów wód gruntowych w zlewni. Radczuk i Szarska [1986] odpływ ten przedstawiły w postaci uproszczonego modelu przy założeniu, że odpływ z warstwy wodonośnej jest proporcjonalny do iloczynu powierzchni przekroju zasilania i zmiennego spadku linii energii. O wielkości zasilania gruntowego decyduje nie tylko profil, w którym określa się to zasilanie, lecz cała zlewnia leżąca powyżej tego profilu.

Odpływ gruntowy przedstawiły one w postaci:

$$Q(t) = h(t) \cdot L \cdot v \quad (24)$$

gdzie:

$v$  – prędkość filtracji,

$h$  – wysokość zwierciadła wody gruntowej,

$L$  – długość ciek (długość sieci rzecznej w zlewni).

Autorki założyły, że zasilanie odbywa się z określonej powierzchni zlewni (przy zgodności granic topograficznej i geologicznej), na której, w zależności od podstawy erozyjnej cieków, występuje zasilanie z różnych poziomów wodonośnych oraz odnawialność stałej retencji podstawowej ( $Q_B$ ). Otrzymały równanie ciągłości postaci:

$$F \cdot \mu \cdot \frac{dh(t)}{dt} = -Q(t) + Q_B \quad (25)$$

Różniczkując równanie (24) i podstawiając wyznaczoną z równania (25) pochodną, otrzymały:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{v \cdot L}{F \cdot \mu} [Q_B - Q(t)] \quad (26)$$

gdzie:

$Q(t)$  – zasilanie gruntowe [ $m^3/s$ ],

$Q_B$  – przepływ podstawowy [ $m^3/s$ ],

$\mu$  – porowatość efektywna,

$F$  – powierzchnia zlewni [ $km^2$ ].

Wprowadzając do równania (26) oznaczenia, równanie różniczkowe przyjmuje postać:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = -\alpha Q(t) + \alpha Q_B \quad (27)$$

z warunkiem początkowym:

$$Q(0) = Q_0 \quad (28)$$

Ogólnym rozwiązaniem równania (27) jest wyrażenie:

$$Q(t) = c_1 \cdot e^{-\alpha t} + Q_B,$$

w którym z warunku początkowego (28) otrzymuje się:

$$c_1 = Q_0 - Q_B$$

Ostateczną postać równania opisującego zasilanie rzeki wodami podziemnymi według modelu Radczuk i Szarskiej można zapisać:

$$Q(t) = (Q_0 - Q_B) \cdot e^{-\alpha t} + Q_B \quad (29)$$

Równanie to, w nieco innej postaci, w literaturze określane jest jako „krzywa opadania” lub prawo Mailleta. Z powyższego rozumowania wynika, że współczynnik recesji  $\alpha$  jest uzależniany od warunków fizjograficznych zlewni, podstawy erozyjnej sieci rzecznej, a w szczególności od drogi zasilania liczonej jako suma długości cieków w zlewni, powierzchni zlewni, średniej efektywnej porowatości oraz prędkości filtracji  $\left( \alpha = \frac{v \cdot L}{F \cdot \mu} \right)$ .

Problemem okresów bezopadowych i prognozą opadów w przedziałach dwutygodniowych zajmował się **Wojciech Jakubowski** [1988]. W swojej rozprawie doktorskiej przyjął opad atmosferyczny jako dwufazowy proces dyskretny o kroku czasowym równym jednej dobie przy następujących założeniach:

1 – dzień (doba) z  $\alpha$ -opadem wtedy, gdy sumaryczny pomierzony dobowy opad jest nie mniejszy niż  $\alpha$  mm słupa wody,

0 – dzień (doba) z  $\alpha$ -opadem wtedy, gdy opad w ogóle nie wystąpił, albo gdy sumaryczny pomierzony dobowy opad jest mniejszy niż  $\alpha$  mm słupa wody.

Proces ten nazwał procesem występowania  $\alpha$ -opadów atmosferycznych [proces WOA( $\alpha$ )]. Sekwencję dni z  $\alpha$ -opadem nazwał ciągiem kolejnych dni z  $\alpha$ -opadem poprzedzony i zakończony przez dzień bez  $\alpha$ -opadu. Sekwencję dni bez  $\alpha$ -opadu określił podobnie. Do opisu długości sekwencji rozkładu sekwencji dni z  $\alpha$ -opadem zastosował rozkład prawdopodobieństwa  $F(p_1, \dots, p_n)$ , długości sekwencji dni bez  $\alpha$ -opadu  $G(q_1, \dots, q_n)$ , natomiast  $N_1$  – rozkład liczby dni z  $\alpha$ -opadem w przedziale o długości 1 dnia. Parametrami rozkładów są liczby  $p_1, \dots, p_n, q_1, \dots, q_n$ . Rozkłady  $F, G$  i  $N$  są zależne od czasu, ponieważ WOA( $\alpha$ ) jest periodyczny. Autor opracował dane opadowe z Wrocławia z lat 1919–1938 oraz 1946–1975 w trzech wariantach:

$P_1$  – dobowy suma pomierzonego opadu  $\alpha \geq 0,01$  mm słupa wody (umownie przyjęto, że opad o wysokości 0,01 mm słupa wody jest opadem śladowym),

$P_2$  – dobową sumę pomierzonego opadu  $\alpha \geq 0,1$  mm słupa wody,

$P_3$  – dobową sumę pomierzonego opadu  $\alpha \geq 1,0$  mm słupa wody.

Kolejno Autor dokonał oszacowania liczby dni z  $\alpha$  –opadem w przedziałach dwutygodniowych. Proces  $N_1(k)$  oznaczający liczbę dni z  $\alpha$  –opadem w  $k$ -tym 1-dobowym okresie jest funkcją rozkładów  $F(p_1, \dots, p_n)$  i  $G(q_1, \dots, q_m)$  przy założeniu stacjonarności procesu  $WOA(\alpha)$ , z której wynika również niezależność tego procesu od czasu. Ze względu na założenie rocznej periodyczności procesu  $WOA(\alpha)$ , Autor zaproponował jego opracowywanie przedziałami.

Zmiennosc rozkładów  $F$  i  $G$  w czasie wyraził poprzez zmienność parametrów  $p_1 = p_1(t), \dots, p_n = p_n(t)$  oraz  $q_1 = q_1(t), \dots, q_m(t)$  w czasie. Korzystając z metod aproksymacyjnych dla danego momentu  $t$ , wyznaczył pewne przybliżenie rozkładu  $N_1(k)$ , gdzie  $t_0$  jest środkiem  $k$ -tego 1-dobowego przedziału czasowego. Natomiast rozkład  $K(k)$  wyznaczono zgodnie z następującym algorytmem:

- 1) podzielono rok kalendarzowy na  $r$  okresów w taki sposób, aby możliwe było przyjęcie założenia o niezmienności warunków hydrometeorologicznych w każdym z nich;
- 2) wyznaczono estymatory  $\hat{p}_1(t), \dots, \hat{p}_n(t)$  i  $\hat{q}_1(t), \dots, \hat{q}_m(t)$ ,  $t = 1, \dots, r$ ;
- 3) zastosowano trygonometryczne wielomiany aproksymacyjne do obliczenia przybliżonych wartości  $p_1(t_0), \dots, p_n(t_0)$  i  $q_1(t_0), \dots, q_m(t_0)$  dla opracowywanego  $k$ -tego okresu;
- 4) wyznaczono rozkład liczby dni z  $\alpha$ –opadem w  $k$ -tym okresie o długości 1 dnia.

Algorytm ten został zastosowany do opracowania danych opadowych dla miasta Wrocławia w wariantach  $P_1$ ,  $P_2$ , i  $P_3$ .

Oszacowanie najbardziej prawdopodobnej liczby dni z  $\alpha$ –opadem dla każdego z okresów dobrano tak, aby suma:

$$\sum_{i=k_1}^{k_2} P(N_{14}(k) = i) = P(k_1, k_2) \geq 1 - \gamma \quad (30)$$

była maksymalna, większa od  $1 - \gamma$  przy minimalnej różnicy  $k_2 - (k_1 - 1)$ . Oszacowanie to stanowi jednocześnie prognozę przebiegu zjawiska występowania  $\alpha$  – opadu atmosferycznego w ciągu roku.

Badane szeregi czasowe, opisujące liczbę dni z  $\alpha$  –opadem w okresach dwutygodniowych we Wrocławiu, nie wykazały istnienia istotnych trendów okresowych i wielomianowych. Charakteryzuje je:

- a) brak istnienia istotnych trendów poza rocznym trendem okresowym,
- b) słaba zależność pomiędzy obserwacjami,
- c) oszacowanie najbardziej prawdopodobne można traktować jako prognozę liczby z  $\alpha$ –opadem w kolejnych okresach dwutygodniowych.

Od 1990 r. pracownicy Zakładu Hydrologii i Gospodarki Wodnej Instytutu Inżynierii Środowiska uczestniczą w projekcie FRIEND (obecna nazwa Low Flow & Drought), którego głównym celem było między innymi:

- a) opracowanie przestrzennej i czasowej zmienności niskich przepływów na terenie Polski,
- b) badania wpływu antropopresji na przepływy niżówkowe,
- c) opracowanie nowych i przetestowanie istniejących metod do prognozowania niżówek oraz określenia zasobów wodnych w zlewniach rzecznych, na podstawie standardowych obserwacji meteorologicznych i hydrologicznych.

Program FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data) jest międzynarodowym programem badawczym hydrologii regionalnej, któremu patronuje UNESCO. Obejmuje on trzy główne zagadnienia:

- a) badania ekstremalnych zdarzeń (opadów, odpływu) występujących na terenie zlewni hydrologicznych,
- b) opracowanie regionalnych metod badawczych i metod analizy danych obserwacyjnych, uzyskiwanych przede wszystkim na podstawie obserwacji pochodzących ze zlewni badawczych,
- c) badania wpływu antropopresji na reżim hydrologiczny cieków.

Program tworzono w latach 1986–1989. Powstał wtedy komitet organizacyjny, w skład którego weszło pięciu hydrologów z Instytutu Hydrologii w Wallingford (Anglia) oraz po jednym z Niemiec, Holandii, Francji i Belgii. Na początku 1990 r. w programie uczestniczyli przedstawiciele 13 krajów zachodniej i północnej Europy, przy czym hydrodrolodzy polscy pozostawali na prawach obserwatorów.

Polska aktualnie uczestniczy jako pełnoprawny członek programu. Koordynatorem programu w Polsce początkowo była prof. Urszula Soczyńska z Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Obecnie funkcję tę sprawuje prof. Artur Magnuszewski, również z Uniwersytetu Warszawskiego.

W ramach programu FRIEND Instytut Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu współpracuje z uczestnikami programu:

- a) na terenie kraju badania niskich przepływów prowadzone są wspólnie z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddziałem we Wrocławiu oraz Instytutem Geografii Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego w Kielcach;
- b) z Uniwersytetem Rolniczym w Wageningen (Holandia), na podstawie danych ze zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda testowano model numeryczny MODFLOW, umożliwiający badanie dopływu wód podziemnych do cieków przy uwzględnieniu różnych warunków zasilania;
- c) z hydrologami czeskimi testowano model BILAN. Na podstawie danych meteorologicznych i hydrologicznych dla trzech zlewni z dorzecza Wisły (Dunajca, Czarnej Hańczy i Świśliny) sprawdzano poprawność reakcji modelu na zasilanie oraz jego przydatność do prognozowania odpływu ze zlewni.

W ramach tego programu zespół badaczy w składzie: L. Radczuk, E. Kupczyk, W. Jakubowski opracował model NIŻÓWKA do określenia prawdopodobieństwa nieprzekroczenia deficytu niżówki ekstremalnej i czasu jej trwania. Model ten jest szeroko stosowany w Polsce i na świecie. Został wdrożony w IMGW we wszystkich oddziałach w Polsce. Ponadto jest ciągle modyfikowany i dostosowywany do wymagań użytkownika [Czamara, Jakubowski, Radczuk 1997; Kupczyk, Kasprzyk, Radczuk 1998].

Wieloletnie doświadczenia z zakresu przepływów niżówkowych przyczyniły się do powstania rozprawy doktorskiej **Tamary Tokarczyk**, której promotorem był Włodzimierz Czamara. W pracy pt. **Dynamika zmian zasobów wód powierzchniowych i gruntowych na obszarze Kotliny Kłodzkiej** [1999] Autorka, na podstawie uzasadnionych obliczeń i analiz, wszechstronnie interpretowanych i korelowanych z cechami fizyczno-geograficznymi obszaru, wykazała dobre przygotowanie do stosowania metod matematyczno-statystycznych w badaniach środowiska przyrodniczego. W pracy wykorzystano program NIZÓWKA. Do wyznaczenia niżówek zastosowano kryterium hydrologiczne, ustalając wartość progową przepływu i czas trwania. Program NIZÓWKA opiera się na metodzie zaproponowanej przez Zelenhasica i Salvai [1987]. Zakłada się w nim, że przepływ w chwili  $t$  ( $Q_t$ ) jest mniejszy od granicznego przepływu ( $Q_g$ ) wyznaczonego metodą odcięcia [Czamara, Jakubowski, Radczuk 1997]. Poziom odcięcia  $Q_g$  jest szacowany z krzywej sum czasów trwania codziennych przepływów. Przy wydzielaniu niezależnych niżówek następujących po sobie przyjęto, że jeśli są one rozdzielone przepływami większymi od  $Q_g$  trwającymi 1 lub 2 dni, to traktuje się je jako pojedyncze, a ich objętość przepływu i czas trwania są sumowane. Przyjęty do modelu przedział czasowy  $(0, t)$  nie powinien przekraczać 365 (366) dni.

Parametry opisujące niżówki, tj. ilość niżówek w danym okresie, objętość niżówki oraz czas trwania, mają charakter losowy. Ilość niżówek jest funkcją nieciągłą, w przedziale czasowym  $(0, t)$ , opisuje je rozkład Pascala lub Poissona, natomiast czas trwania i objętość niżówki są funkcjami ciągłymi i opisano je rozkładami: Pearson III typu, Weibull, Logarytmiczno-normalny, Reyleigha lub Beta. Parametry rozkładów estymowane są metodą największej wiarygodności. Do wyznaczenia rozkładu niżówki wybierane są tylko te rozkłady, które uzyskały najlepsze dopasowanie ze względu na wartość  $\chi^2$ .

Charakterystyczne parametry niżówek zostały określone dla dwóch przyjętych przepływów progowych ( $Q_{g,n}$ ) niżówki. Jedna wartość przepływu granicznego ( $Q_{g,n}$ ) niżówki została wyznaczona z krzywej sum czasów trwania wraz z niższymi i równa jest przepływowi  $Q_p$ , dla  $p=10\%$ . Wartość ta zalecana jest w opracowaniach projektu hydrologicznego FRIEND. Druga zaś na podstawie analizy hydrogramu jest równa wartości przepływu, przy którym następuje zmiana zasilania z powierzchniowego na podziemny ( $Q_0$ ). Do tego celu wykorzystano program RCA (Recession Curve Analyses) opracowany przez Strzałkowskiego i Szechmana z Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach [Kupczyk i in. 1998]. Wydzielone fazy opadania odpowiadające odpływowi powierzchniowemu ( $S_1$ ), podpowierzchniowemu ( $S_2$ ), podziemnemu ( $S_3$ ) opisano odcinkami prostych. Poza tym odcinek krzywej opadania charakteryzujący przebieg procesu w czasie trwania fazy odpływu podziemnego ( $S_3$ ) nazywany w literaturze krzywą wysychania opisano równaniem eksponentialnym w postaci:

$$Q(t) = (Q_0 - Q_B) \exp^{-\alpha(t-t_0)} + Q_B \quad (31)$$

gdzie:

$Q(t)$  – przepływ w chwili  $t$  [ $m^3/s$ ],

$Q_0$  – przepływ w momencie  $t_0$  [ $m^3/s$ ],

$Q_B$  – przepływ bazowy [ $m^3/s$ ],

$t_0$  – punkt przejścia funkcji liniowej w eksponentialną.



Krzywa wysychania opisana jest równaniem eksponentialnym, lepiej odzwierciedlającym recesję przepływu z zasilania podziemnego, która następuje coraz wolniej do osiągnięcia stabilizacji na określonym, wyższym od zera poziomie, zwanym w literaturze przepływem bazowym.

Współczynniki kierunkowe  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  obrazują: szybkość zmniejszania się odpływu powierzchniowego ( $S_1$ ), tempo szczyptywania płytkiej retencji zlewni ( $S_2$ ) oraz spadek intensywności zasilania podziemnego ( $S_3$ ). O wielkości wydzielonych retencji świadczą długości odcinków, tj. czas trwania poszczególnych faz  $T_{S1}$  oraz  $T_{S2}$ , który jest różnicą między  $T_{S1}$  a  $T_{S2}$  liczoną w dniach.

Dokonana w pracy ocena warunków kształtowania się odpływów niskich z naturalnej części dorzecza wykazała, że:

- Na przeważającym obszarze Ziemi Kłodzkiej występują najczęściej niżówki w okresie letnim (od sierpnia do października) i są wtedy najgłębsze. Wyjątkiem jest zlewnia Białej Łądeckiej, charakteryzująca się typem mieszanym niżówek, z nieznaczną przewagą letnich.
- Na terenie zlewni do obszarów najbardziej zasobnych w wodę należy masyw Śnieżnika i Gór Białskich, na zboczach których biorą początek Biała Łądecka, Wilczka i Nysa Kłodzka (górnny bieg). Odpływ jednostkowy ( $q_{SQI}$ ) z tych obszarów wynosi od 12 do 275 l/s, km<sup>2</sup>. W okresach suchych najzasobniejszą w wodę jest Biała Łądecka, gdzie  $q_{SQI}$  w tym obszarze wynosi 4.35 l/s, km<sup>2</sup>, natomiast w pozostałych ciekach od 0.3 do 1.85 l/s, km<sup>2</sup>.
- Przy wyznaczaniu parametrów niżówek ważnym problemem jest przyjęcie granicznego przepływu niżówki  $Q_{g,n}$ . Jego wartość warunkuje wielkość deficytu i czasu trwania niżówek. Przy założeniu przepływu granicznego  $Q_{g,n} = Q_0$  stwierdzono, że w okresach długotrwałych susz o czasie trwania  $T$  dni występują niedobory wody  $D_v$ , które charakteryzują warunki ekstremalne i wynoszą:
  - rzeka Nysa Kłodzka, przekrój Bystrzyca –  $T = 260$  dni,  $D_v = 13.6$  mln m<sup>3</sup>,
  - rzeka Biała Łądecka, przekrój Łądek Zdrój –  $T = 235$  dni,  $D_v = 15.3$  mln m<sup>3</sup>,
  - rzeka Nysa Kłodzka, przekrój Bardo –  $T = 163$  dni,  $D_v = 49.9$  mln m<sup>3</sup>.Wyniki te uzyskała Autorka dla najgłębszej niżówki, która wystąpiła w latach 1992-1993 na przestrzeni wielolecia 1960–1995.
- Tempo wyczerpywania się zasobów wód podziemnych zlewni wyrażają współczynniki  $S_2$  oraz  $S_3$ . Ich zmienność charakteryzuje również stabilność retencyjną zlewni.
- Głębokość recesji w okresach niżówkowych wyraża przepływ bazowy  $Q_B$ . Wartości tego przepływu na terenie zlewni cząstkowych wynosiły od 0,14 m<sup>3</sup>/s w Ścinawce w przekroju Tłumaczów do 11 m<sup>3</sup>/s w Białej Łądeckiej w przekroju Żelazno. Natomiast w przekroju zamykającym badany obszar, na Nysie Kłodzkiej w Bardzie zmieniały się od 5,4 m<sup>3</sup>/s do 23 m<sup>3</sup>/s.

Ciekawie zostało przeprowadzone w pracy porównanie wartości przepływu początkowego  $Q_0$ , od którego zaczyna się zasilanie podpowierzchniowe, oraz przepływu bazowego  $Q_B$  z przepływami charakterystycznymi. Umożliwia to bowiem ocenę zgodności stosowanych dotąd metod w Polsce ustalania przepływu granicznego niżówki [Ozga-Zielińska, Brzeziński 1997] z propozycjami kryteriów przepływu granicznego przyjętymi w projekcie FRIEND.

### 6.2.1. Przykłady opracowań z zakresu modelowania suszy hydrologicznej

Występujące w ostatnich latach zjawiska niedoborów wody, wzrastająca częstotliwość i nasilenie posuch spowodowało zainteresowanie problemem retencji. W 1993 r. na zlecenie RZGW we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Środowiska AR opracował „Regionalny program realizacji małej retencji w dorzeczu górnej i środkowej Odry” obejmujący kompleks prac programowo-studialnych, w ramach których podjęto próbę ustalenia listy rankingowej retencji zbiornikowej. W 2005 r. na zlecenie Dolnośląskiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych we Wrocławiu Zespół autorski (Laura Radczuk, Andrzej Drabiński, Marian Mokwa, Joanna Markowska, Dorota Olearczyk, Ozana Gromada, Katarzyna Pikul, Beata Malczewska, Bartosz Jawecki) w ramach Centrum Modelowania Procesów Hydrologicznych opracował program małej retencji dla województwa dolnośląskiego [Drabiński i in. 2008].

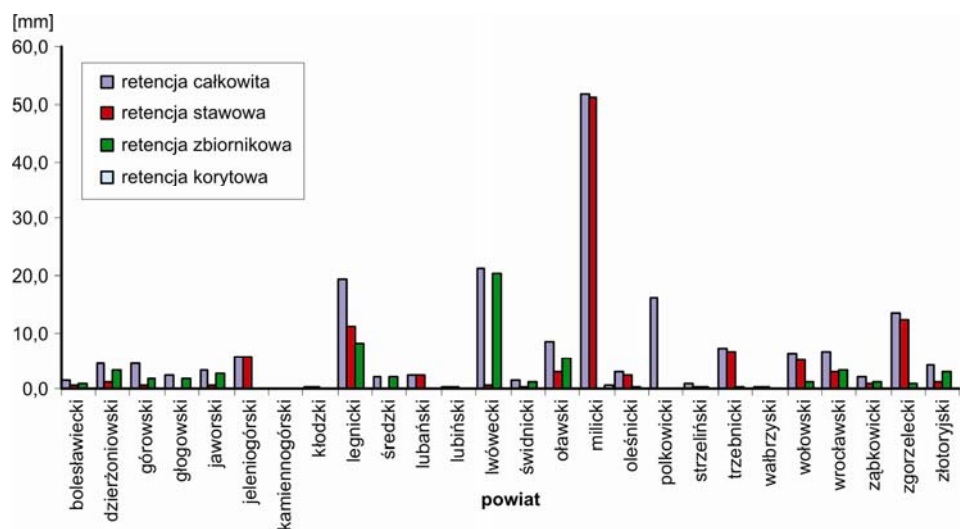
Zainteresowanie małą retencją jako elementem poprawy bilansu wodnego w rolnictwie trwa od ponad 40 lat. Poczujemy się w obowiązku wymienić tu takie nazwiska, jak: profesorowie – Zbigniew Dziewoński, Stanisław Bac senior, Stanisław Marcilonek, Julian Wołoszyn, Jan Szymański oraz Adam Szpindor. Pierwszej kompleksowej genezy problemu badawczego tego zagadnienia należy upatrywać w inicjatywie Katedry Budownictwa Wodnego Akademii Rolniczej we Wrocławiu z roku 1969. Problem małej retencji został podjęty także w ramach programów rządowych i resortowych, m.in. w regionalnych perspektywicznych planach rozwoju gospodarki wodnej. Zgodnie z przyjętymi ówczesnie podstawowymi założeniami metodycznymi plany regionalne w części dotyczącej zaopatrzenia w wodę ludności i gospodarki wodnej miały charakter studium planistycznego, w którym sformułowano koncepcję zabudowy hydrotechnicznej w zależności od kształtowania się potrzeb wodnych na danym obszarze. Zagadnienia dotyczące zaspokajania potrzeb wodnych osiedli wiejskich oraz ochrony przed powodzią ujęte zostały w planach regionalnych w ograniczonym zakresie, a celem ich sporządzania było stworzenie podstaw planistycznych dla racjonalnego gospodarowania zasobami wodnymi w zlewni przez terenowe organa administracji państwowej.

Zdolność retencyjna zlewni rzecznych zależy od czynników naturalnych i antropogenicznych. Zlewnia o dużych spadkach terenu, zbudowana z gleb bardzo zwięzłych, ma mniejszą zdolność retencyjną niż zlewnia z przewagą utworów piaszczystych, porośnięta lasami, zbudowana naturalnymi lub sztucznymi zbiornikami wodnymi oraz urządzeniami piętrzącymi. Tak zróżnicowany charakter zlewni występuje na obszarze Dolnego Śląska.

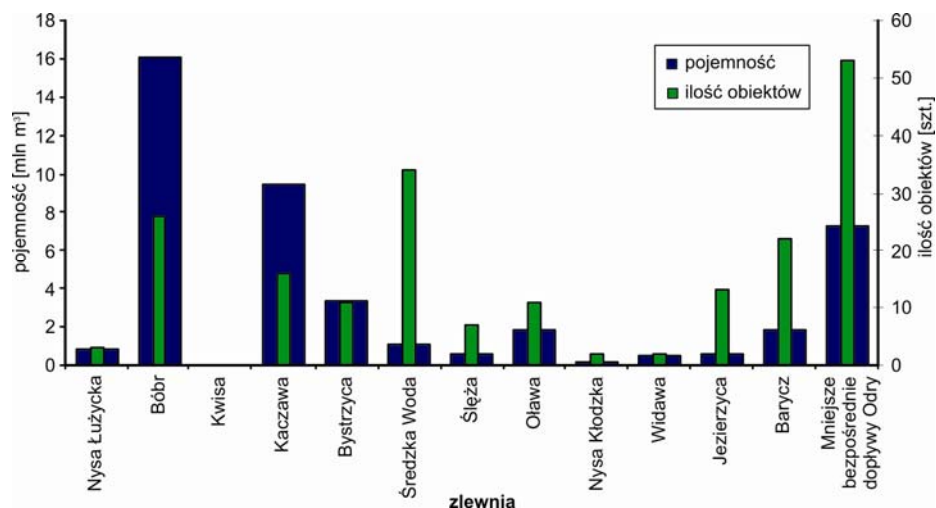
Opracowany „Program małej retencji dla województwa dolnośląskiego” uwzględniał:

- układ zlewniowy – dla poszczególnych większych dopływów rzeki Odry, tj.: Nysy Łużyckiej, Bobru, Kwisy, Kaczawy, Bystrzycy, Średzkiej Wody, Ślęzy, Oławy, Nysy Kłodzkiej, Widawy, Jezierzycy, Baryczy oraz bezpośrednich mniejszych dopływów Odry: Przychowskiej Strugi, Cichej Wody i Krzyckiego Rowu;
- układ administracyjny, według powiatów i gmin.

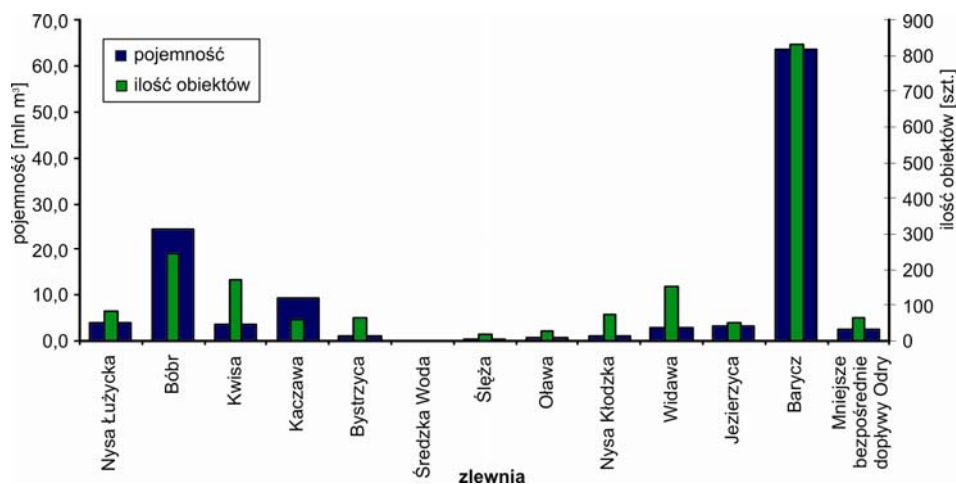
Aktualna ewidencja obiektów małej retencji wodnej według stanu na dzień 31 grudnia 2004 r. (na podstawie materiałów opracowanych przez Oddziały i Inspektoraty DZMiUW) i uaktualniona po przeprowadzonych konsultacjach społecznych została przedstawiona w postaci graficznej na rysunkach: 20, 21, 22, 23.



Rys. 20. Wskaźnik retencji R w powiatach woj. dolnośląskiego na dzień 31 XII 2004 r.  
 Fig. 20. Storage index R for administrative units in Dolnośląskie Voivodship for 31 XII 2004

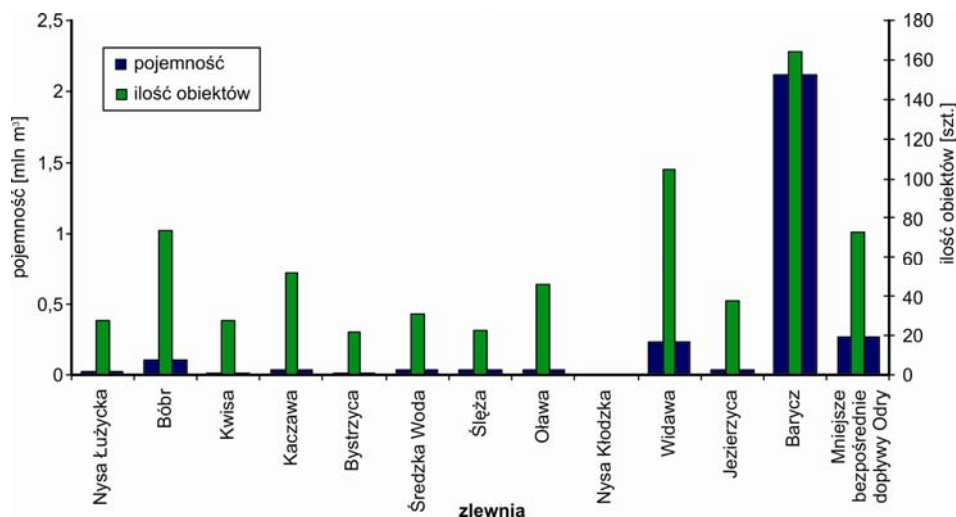


Rys. 21. Retencja jezior i małych zbiorników wodnych o powierzchni >1 ha, w zlewniach rzek województwa dolnośląskiego  
 Fig. 21. Lake and small water reservoir storage for areas > 1 ha, in the catchments of Dolnośląskie Voivodship



Rys. 22. Retencja stawów rybnych (kompleksy o powierzchni >1 ha) w zlewniach rzek województwa dolnośląskiego

Fig. 22. Fishponds storage ((complexes of area >1 ha) in the catchments of Dolnośląskie Voivodship

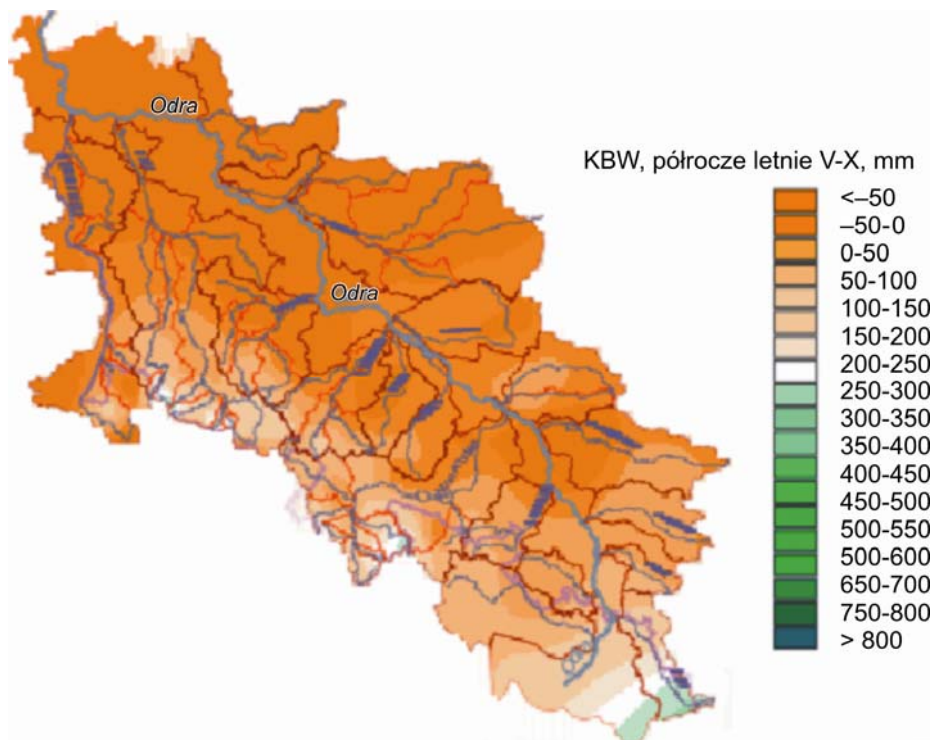


Rys. 23. Retencja korytowa w zlewniach rzek województwa dolnośląskiego

Fig. 23. Channel retention in the river catchments of Dolnośląskie Voivodship

Dla oceny małej retencji na obszarach zagrożonych suszą na terenie województwa dolnośląskiego Autorzy wykorzystali Klimatyczny Bilans Wodny (KBW) oraz Wskaźnik Deficytu Dynamicznych Zasobów Wodnych (WDDZ), wyznaczony na podstawie maksymalnej niżówki.

Przestrzenny rozkład KBW dla półrocza letniego (rys. 23a) stanowi tło rejonizacji zasobów wodnych. Obszar województwa dolnośląskiego o ujemnych wartościach KBW powierzchniowo obejmuje około 1/3 obszaru. Znaczące niedobory opadów występują w zlewniach rzek Ślęzy (-35 mm), Widawy (-49 mm), Szprotawy (-69 mm), Bobru (-28 mm), Nysy Łużyckiej (-25), Skorej (-50 mm), Baryczy (-79 mm).



Rys. 23a Klimatyczny bilans wodny dla okresu V– X  
Fig. 23a. Climate water balance for period V– X

WDDZ definiowany jest jako objętość maksymalnej niżówki wyrażonej w mm. Wskaźnik ten wyznaczono dla 49 przekrojów wodowskazowych na podstawie analizy niżówek z lat 1966–2003 (tab. 6). Wartości WDDZ przekraczające 12 mm są charakterystyczne dla zlewni górskich i tu należy preferować budowę zbiorników zaporowych. Małe wartości WDDZ odpowiadają zlewniom nizinnym, na których zgodnie z Ramową Dyrektywą Wodną najważniejszym celem jest „osiągnięcie i utrzymanie dobrego stanu wód, a w szczególności ekosystemów wodnych i od wód zależnych” (bardzo małe zbiorniczki retencyjne, śródpolne, śródleśne, oczka wodne, starorzecza, glinianki, stawy rybne itp.).

Tabela 6  
Table 6

Proponowane wskaźniki na potrzeby programowania obiektów małej retencji  
Suggested indexes for programming of small storage objects

Lp.	Rzeka River	Wodowskaz Gauging station	Zasoby Resources	KBWr	KBW	WDDZ	Typ obiektu Object type
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Nysa Kłodzka	Międzyzlesie	430,6	193	424	28,0	Z
2.		Bystrzyca Kłodzka	520,4	155	344	24,0	Z
3.		Kłodzko	387,2	175	360	29,0	Z
4.		Bardo	346,9	148	307	13,8	Z
6.	Bystrzyca	Bystrzyca Kłodzka	316,1	116	264	21,9	z
7.	Biała Łądecka	Łądek	653,7	243	419	33,8	z
8.		Żelazno	503,0	206	349	47,6	z
9.	Bystrzyca	Szalejów	301,6	182	402	18,3	z
10.	Ścinawka	Tłumaczów	304,2	70	156	20,9	z
11.		Gorzuchów	273,8	71	169	8,2	MR
12.	Barycz	Odolanów	291,9	-50	32	4,1	MR
13.		Osetno	111,6	-79	-13	5,2	MR
14.	Orla	Korzeńsko	121,3			0,7	MR
15.	Ślęza	Białobrzezie	101,2	-36	-10	4,8	MR
16.		Wrocław – Żerniki	46,1	-35	-8	3,5	MR
17.	Bystrzyca	Krasków	222,6	99	134	6,8	MR
18.		Jarnołtów	169,0	62	151	6,8	MR
19.	Pilawa	Mościsko	165,7	43	114	5,4	MR
20.	Strzegomka	Łażany	186,0	35	61	5,2	MR
21.	Widawa	Michalice	106,4	-49	15	6,2	MR
22.		Zbytowa	144,4	-A1	20	4,4	MR
23.		Wrocław – Sołtysowice	131,5	-42	40	9,0	MR
24.	Oława	Oława	112,9	9	71	8,0	MR
25.	Kaczawa	Świerzawa	275,4	73	189	9,8	MR
26.		Rzymówka	227,1	-38	148	12,5	Z
27.		Dunino	178,8	-27	132	1,5	MR
28.		Piątnica	137,2	-7	101	2,0	MR
29.	Nysa Szalona	Winnica	184,7	19	117	5,5	MR
30.	Skora	Chojnów	197,8	-23	53	8,4	MR
19.	Pilawa	Mościsko	165,7	43	114	5,4	MR
20.	Strzegomka	Łażany	186,0	35	61	5,2	MR
21.	Widawa	Michalice	106,4	-49	15	6,2	MR
22.		Zbytowa	144,4	-A1	20	4,4	MR
23.		Wrocław – Sołtysowice	131,5	-42	40	9,0	MR
24.	Oława	Oława	112,9	9	71	8,0	MR
25.	Kaczawa	Świerzawa	275,4	73	189	9,8	MR
26.		Rzymówka	227,1	-38	148	12,5	Z
27.		Dunino	178,8	-27	132	1,5	MR

Tabela 6 cd.  
Table 6 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8
28.		Piątnica	137,2	-7	101	2,0	MR
29.	Nysa Szalona	Winnica	184,7	19	117	5,5	MR
30.	Skora	Chojnów	197,8	-23	53	8,4	MR
31.	Bóbr	Bukówka	506,0	138	358	22,4	Z
32.		Kamienna Góra	446,3	138	358	20,2	Z
33.		Wojanów	351,2	138	358	21,5	Z
34.		Jelenia Góra	438,0	133	279	23,9	Z
35.		Pilchowice	405,9	181	421	3,7	MR
36.		Dąbrowa Bolesławiecka	334,0	159	422	21,0	Z
37.	Kwisa	Nowogrodzic	312,5	83	231	6,2	MR
38.	Łomnica	Łomnica	600,0	136	243	85,8	Z
39.	Kamienna	Piechowice	1091,8	316	814	75,9	Z
40.		Jelenia Góra	713,2	258	678	19,1	Z
41.	Kamienica	Barcinek	536,1	308	804 j	22,2	Z
42.	Szprotawa	Szprotawa	73,2	-69	-23	3,7	MR
43.	Czarny Potok	Mirsk	618,2	194	459	73,6	Z
44.	Czerna	Żagań	180,7	-28	117	9,0	MR
45.	Nysa Łużycka	Porajów	503,9	-25	43	3,8	MR
46.		Sieniawka	415,5	-25	43	19,3	Z
47.		Zgorzelec	315,9	12	98	10,8	MR
48.	Witka	Ostrożno	545,8	36	143	30,4	Z
49.	Czerwona	Zgorzelec – Ujazd	157,7	-8	98	6,9	MR
50.	Skroda	Przewoźniki	141,6			4,2	MR

WDDZ – wskaźnik deficytu dynamicznych zasobów zlewni, KBW<sub>r</sub> – klimatyczny bilans wodny dla roku, KBWi – klimatyczny bilans wodny dla półrocza letniego, Z – zbiorniki zaporowe, MR – mała retencja.

Lista planowanych zbiorników obejmowała propozycje zarówno Dolnośląskiego Zarządu Melioracji i Urzędzeń Wodnych (DZMiUW), Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej (RZGW), Dyrekcji Lasów Państwowych (LP), jak i samorządów lokalnych.

Dolnośląski Zarząd Melioracji i Urzędzeń Wodnych (DZMiUW) przewiduje zwiększenie retencji zbiornikowej w latach 2006–2015, o 26,14 mln m<sup>3</sup>. Natomiast po 2015 r. planuje się budowę zbiorników o pojemności 11,88 mln m<sup>3</sup>, co w sumie da przyrost o 38,02 mln m<sup>3</sup> wody.

RZGW we Wrocławiu, w ramach realizowanych studiów ochrony przed powodzią zlewni rzek Nysy Kłodzkiej, Bystrzycy, Kaczawy, górnego Bobru i Kwisy, planuje budowę suchych zbiorników na terenie wymienionych zlewni rzek. W opracowaniach tych przyjęto założenie, że dla ochrony przed powodzią terenów leżących poniżej należy budować „suche zbiorniki przeciwpowodziowe”. Zbiorniki retencyjne wielofunkcyjne można oczywiście budować, jeżeli pojawi się zapotrzebowanie na magazynowanie wody i wyrównywanie przepływów dla zaopatrzenia potencjalnych odbiorców (rolnictwo, rekreacja, agroturystyka). W przypadku wystąpienia z takimi inicjatywami samorządów lub organizacji gospodarczych można rozważyć w cytowanych studiach przeznaczenie części pojemności na stałe piętrzenie (przeznaczając np. 10% pojemności zbiornika).

Dyrekcja Lasów Państwowych w Narodowym Programie Leśnym, jako jeden ze wskaźników kierunkowych, założyła zwiększenie do 2010 r. nakładów finansowych na ochronę i denaturalizację siedlisk wilgotnych, zalewowych i bagiennych. Spełniając te postulaty, w programie małej retencji zgłoszono propozycję lokalizacji 43 zbiorników o ogólnej pojemności 2,03 mln m<sup>3</sup>. W czasie przeprowadzonych konsultacji społecznych poszczególne gminy wskazywały potrzebę zwiększenia obiektów małej retencji w swoich miejscowościach. Większość projektów nie posiada jeszcze opracowań dokumentacyjnych, często nie zostały konkretnie sprecyzowane. Terminy realizacji tych zbiorników wynikać będą z możliwości finansowych poszczególnych gmin.

Dla dokładnej lokalizacji wyżej wymienionych obiektów przeprowadzono wstępną analizę ich lokalizacji względem terenów objętych różnymi formami ochrony przyrody, ponieważ istnieje możliwość wprowadzenia na tych obszarach szeregu zakazów, dotyczących realizacji przedsięwzięć mogących negatywnie oddziaływać na środowisko, w tym na zmiany stosunków wodnych.

Opracowanie spełnia również cel popularyzowania małej retencji wodnej, w formie przygotowanej prezentacji multimedialnej „Programu małej retencji wodnej w województwie dolnośląskim” dla celów informacyjnych i propagujących program.

Ocenę potencjalnego zagrożenia suszą w zlewni górnej i środkowej Odry przeprowadzono w monografii [Tokarczyk i in. 2005].

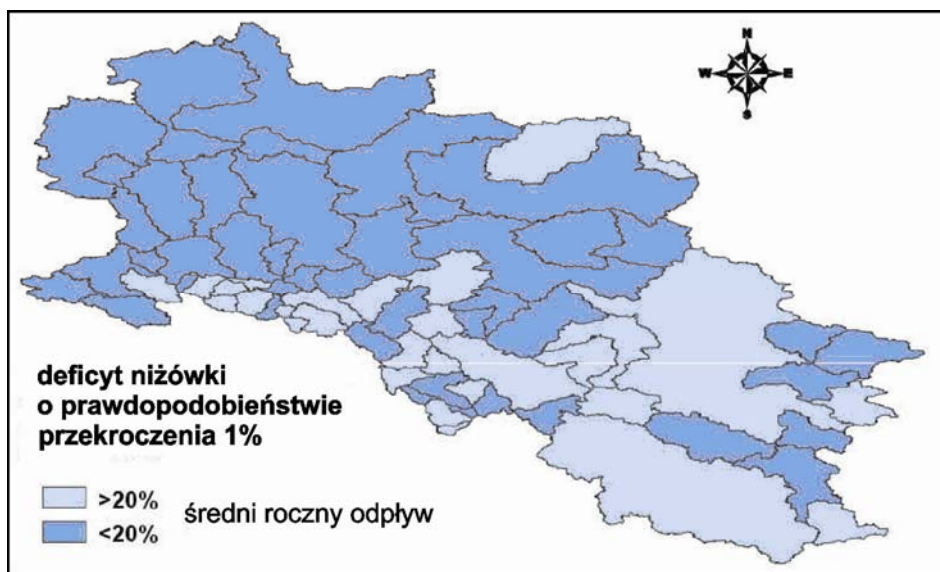
Ryzyko suszy oceniono na podstawie:

- 1) wskaźnika suszy hydrologicznej – objętość deficytu o pp nieosiągnięcia 99% (rys. 24),
- 2) wskaźnika suszy atmosferycznej – procent normy największej suszy (V–IX 1992) (rys. 25),
- 3) wskaźnika suszy wód podziemnych – najmniejsza wartość z wielolecia  $Q_B$  z krzywej opadania (rys. 26).

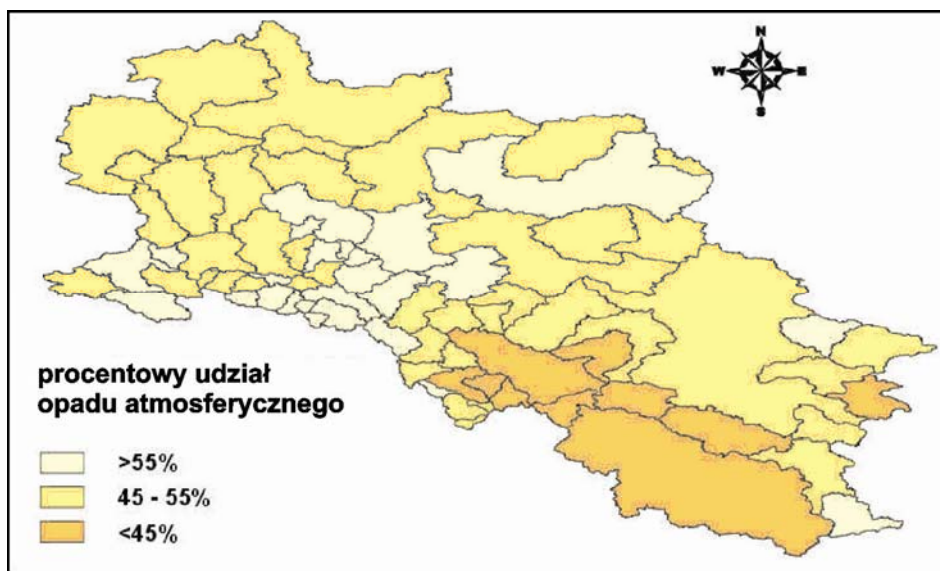
Aby ocenić potencjalne zagrożenie, wykorzystano narzędzia GIS. Wszystkie wskaźniki przedstawiono w postaci warstwy GIS z podziałem na klasy. Podstawową jednostką były zlewnie III rzędu, dla których zostały określone wszystkie wskaźniki.

Następnie warstwy nałożono na siebie i wykorzystując narzędzia GIS utworzono nową warstwę z podziałem na 3 klasy potencjalnego zagrożenia suszą (rys. 27).



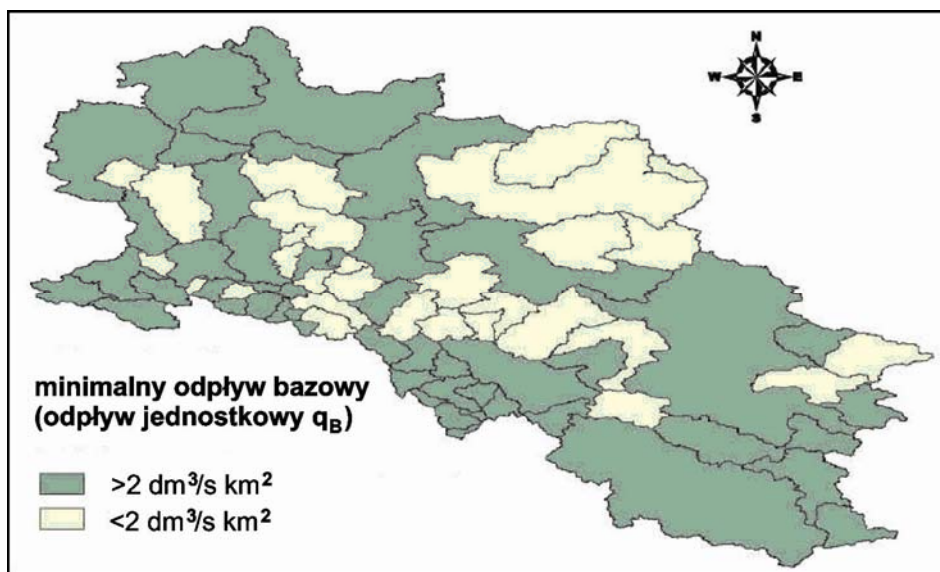


Rys. 24. Wskaźnik suszy hydrologicznej  
Fig. 24. Hydrological drought index



Rys. 25. Rozkład przestrzenny deficytu opadu największej suszy atmosferycznej (V-IX 1992) wyrażonej w % do normy wieloletniej

Fig. 25. Spatial distribution of rainfall deficit for the largest atmospheric drought (V-IX 1992) in percentage of normal rainfall



Rys. 26. Wskaźnik suszy wód podziemnych  
Fig. 26. Groundwater drought index



Rys. 27. Potencjalne zagrożenia suszą w zlewni górnej i środkowej Odry  
Fig. 27. Potential drought risk in the basin of upper and middle Odra River

## 7. CHARAKTERYSTYKI HYDROLOGICZNE W ZLEWNIACH NIEKONTROLOWANYCH

Jednym z najważniejszych zagadnień w badaniach hydrologicznych jest prawidłowe wyznaczenie przepływów charakterystycznych, w tym przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w zlewniach niekontrolowanych. Przepływy te stanowią podstawę poprawnego projektowania obiektów hydrotechnicznych i urządzeń gospodarki wodnej. W praktyce inżynierskiej niezbędne jest, chociażby nawet tylko w sposób przybliżony, określenie przepływów w przekroju projektowanego obiektu bądź urządzenia, lub na odcinku rzeki objętym regulacją. Ich ustalenie nie należy do zadań prostych – pozyskiwanie bowiem informacji hydrologicznej na obszarach niekontrolowanych lub tam, gdzie jest ona niewystarczająca, jest ciągle zagadnieniem problematycznym, choć od dziesięcioleci znane są różne metody obliczenia przepływów charakterystycznych, hydrogramów fal wezbraniowych itp. danych hydrologicznych, niezbędnych dla projektowania obiektów gospodarki wodnej. Określane one są na podstawie informacji hydrologicznej w miejscach kontrolowanych (przekrojach wodowskazowych), stosując jedną z dwóch metod:

- metod przenoszenia informacji, tj. interpolacji i ekstrapolacji, transformacji przepływu w korycie oraz metod podobieństwa reżimu hydrologicznego;
- metod pośrednich, wykorzystujących związki pomiędzy zjawiskami hydrologicznymi a fizycznymi, mierzalnymi charakterystykami zlewni oraz charakterystykami warunków meteorologicznych, do których należą: równanie bilansu wodnego zlewni, zależności regionalne oraz modele matematyczne zlewni i procesów hydrologicznych.

Istnieje pewne ograniczenie w stosowaniu powyższych metod, które wynika z faktu, że dla efektywnego zastosowania każdej z nich muszą być spełnione ściśle określone warunki. Świadczy to tylko o istniejących niedoskonałościach tych metod.

Metody empiryczne pośrednie wykorzystywane są najczęściej w praktyce projektowej, z uwagi na łatwość posługiwania się nimi oraz na niewielką pracochłonność obliczeń. Światowa literatura przedmiotu jest bardzo obszerna, a różnego rodzaju formuły na obliczanie odpływów minimalnych, średnich i maksymalnych podawane są we wszystkich podręcznikach hydrologii.

W miarę postępu badań hydrologicznych, wykorzystujących współczesne metody statystyki matematycznej i rachunku prawdopodobieństwa oraz gromadzenia wiarygodnych materiałów pomiarowych z sieci wodowskazowej, w ostatnich latach ustala się często nowe zależności regionalne. Techniki komputerowe zapewniają łatwość i szybkość obliczeń, jednakże często dla tak wyprowadzonych zależności pojawiają się

wątpliwości od strony ich formalnej i merytorycznej poprawności. Należy pamiętać, że przy ich określaniu powinno być spełnionych kilka warunków, przedstawionych w literaturze dotyczącej tematu [Ozga-Zielińska, Brzeziński 1997].

Pracownicy Instytutu Inżynierii Środowiska AR podejmowali badania zmierzające do opracowania metod obliczania przepływów w zlewniach niekontrolowanych, związanych zazwyczaj, z uwagi na dostępność danych, z obszarem górnej i środkowej Odry.

Na początku lat 60. ubiegłego wieku prof. Julian Wołoszyn opracował metodę obliczania przepływów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w małych zlewniach niekontrolowanych pod względem hydrologicznym, o powierzchni mniejszej od 100 km<sup>2</sup>, dla opadów burzowych. Opracowane przez Autora wzory empiryczne wiążą ze sobą natężenie deszczu w funkcji czasu trwania i prawdopodobieństwa pojawiania się z tzw. wskaźnikiem burzowości (iloczyn temperatury powietrza i opadu dla miesiący od V–IX [Wołoszyn 1964].

Podstawą metody było założenie, że deszcze nie różnią się natężeniem, tylko czasem trwania. Metoda polega na przeniesieniu krzywej natężenia deszczu oraz związków charakterystyk opadów ustalonych dla miasta Wrocławia na dowolną zlewnię położoną w dorzeczu Odry. Na podstawie 42-letniego zbioru pasków pluwiograficznych Autor opracował trzy zależności regresyjne:

$$I_{p\%} = \frac{4.326(5-p) + 28.056}{p^{0.6051} t_i + 4} + (0.0427 - 0.00025p) \quad (32)$$

$$I_k = \left( \frac{(t^\circ P + 400)^{0.51}}{245,5} \lg \frac{1}{\eta} + 0.405 \right)^6 \quad (33)$$

$$I_{sr} = 0.00000 t^\circ P + 0.00815 \quad (34)$$

gdzie:

$I_p$  – natężenie deszczu o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p\%$  w mm/min,

$I_k$  – natężenie deszczu zsumowanych opadów miesięcznych dla miesiący od V–IX w mm/min,

$I_{sr}$  – średnie miesięczne natężenie deszczu [mm/min],

$p$  – prawdopodobieństwo przewyższenia [%],

$T_m$  – czas trwania deszczu miarodajnego [min],

$\frac{1}{\eta} = \frac{T_s}{t_i}$  – odwrotność częstości, gdzie  $T_s$  – czas trwania zsumowanych opadów miesięcznych [min],

$t_i$  – czas trwania pojedynczego deszczu o natężeniu  $I_{p\%}$  i wyższym [min],

$t^\circ$  – średnia z wielolecia temperatura powietrza dla miesiący od V–IX [°C],

$P$  – średnia z wielolecia suma opadów dla miesiący od V–IX [mm],

$P \cdot t^\circ$  – wskaźnik burzowości.

Założenia wyjściowe dla przenoszenia związków opracowanych dla miasta Wrocławia na zlewnię niekontrolowaną położoną w regionie są następujące:

- 1) w dowolnej zlewni występuje takie samo natężenie deszczu jak we Wrocławiu, tylko inny jest czas jego trwania;
- 2) krzywej prawdopodobieństwa przewyższenia natężeń deszczu według równania (32) odpowiada krzywa sum czasów trwania natężeń deszczu wraz z wyższymi według równania (33).

Wzór zalecany jest do stosowania w dorzeczu górnej i środkowej Odry, z uwagi na wyprowadzone związki na podstawie danych z Wrocławia.

Wielkie wody prawdopodobne oblicza się za pomocą wzoru:

$$Q_{p\%} = \frac{0,278 \cdot I \cdot T \cdot \alpha}{t_k} \cdot \frac{1}{m + n \cdot m} \cdot \sqrt[12]{\frac{1}{F}} \cdot F \quad (35)$$

gdzie:

$Q_{p\%}$  – przepływ maksymalny o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$t_k$  – czas koncentracji spływu [godz.],

$T$  – czas trwania deszczu [min],

$I$  – natężenie deszczu [mm/min],

wartość 0,278 jest przelicznikiem jednostkowym

$\alpha$  – współczynnik odpływu wielkiej wody, charakterystyczny dla regionu geograficznego [Czamara, Krężel 1975],

$\frac{1}{m + n \cdot m}$  – współczynnik kształtu fali

gdzie:

$m$  – współczynnik smukłości fali,

$n$  – wielokrotność czasu koncentracji w czasie opadania,

współczynnik kształtu fali przyjmuje wartości poniżej 0,1 (dla zlewni o powierzchni  $F < 50 \text{ km}^2$  współczynnik kształtu fali  $\alpha$  wynosi średnio 0,6).

Efektywność metody Wołoszyna została wielokrotnie oceniona i sprawdzona przez współpracowników i uczniów Profesora, którzy powszechnie ją stosują. Dla zlewni w regionie dolnośląskim sprawdza się ona znacznie lepiej w porównaniu z innymi wzorami wyprowadzonymi dla warunków ogólnopolskich.

Poszukiwaniem zależności regionalnych zajęła się w swojej rozprawie doktorskiej **Dorota Olearczyk** [2000] (promotor Laura Radczuk). Praca dotyczy zagadnień regionalizacji w dorzeczu górnej i środkowej Odry. Regionalizacja rozumiana jest w dwojaki sposób: jako wydzielenie regionów hydrologicznych oraz określenie regionalnych zależności przepływów maksymalnych w wyróżnionych regionach. Podziału na regiony hydrologiczne dokonano na podstawie zmienności przepływów maksymalnych oraz biorąc pod uwagę zmienne warunki środowiska geograficznego, kształtujące w znacznym stopniu odpływ z badanego dorzecza. Zastosowanie taksonomicznej metody klasyfikacyjnej Warda pozwoliło na wyróżnienie trzech regionów hydrologicznych (klas typologicznych): zlewnie górskie A, zlewnie nizinne B oraz zlewnie o reżimie rzek podgórskich i wyżynnych C. Są to regiony *quasi*-jednorodne pod kątem struktury

probabilistycznej formowania się przepływów maksymalnych. W tak wyróżnionych klasach, wykorzystując cały dostępny materiał pomiarowy, opracowano dwa rodzaje zależności regionalnych:

- zależności wiążące podstawowe parametry rozkładu prawdopodobieństwa maksymalnych przepływów rocznych z warunkującymi je czynnikami geograficznymi,
- bezwymiarowe krzywe regionalne.

Do badań wybrano 45 zlewni źródłowych bądź różnicowych położonych na 36 rzekach w dorzeczu górnej i środkowej Odry, na których prowadzone są obserwacje i pomiary hydrometryczne. Wytypowano zlewnie spełniające podstawowe założenia, wymagane przy ustalaniu zależności regionalnych [Ozga-Zielińska, Brzeziński 1997]:

- zlewnie o małej powierzchni, do 700 km<sup>2</sup>,
- zachowana długość ciągów nie mniejsza niż 30 lat,
- zachowana synchroniczność ciągów pomiarowych, tj. pokrywanie się w czasie wszystkich ciągów użytych przy ustalaniu zależności regionalnych,
- zlewnie obszarowo niezależne, tj. niepokrywanie się obszarów przyporządkowanych poszczególnym stacjom wodowskazowym.

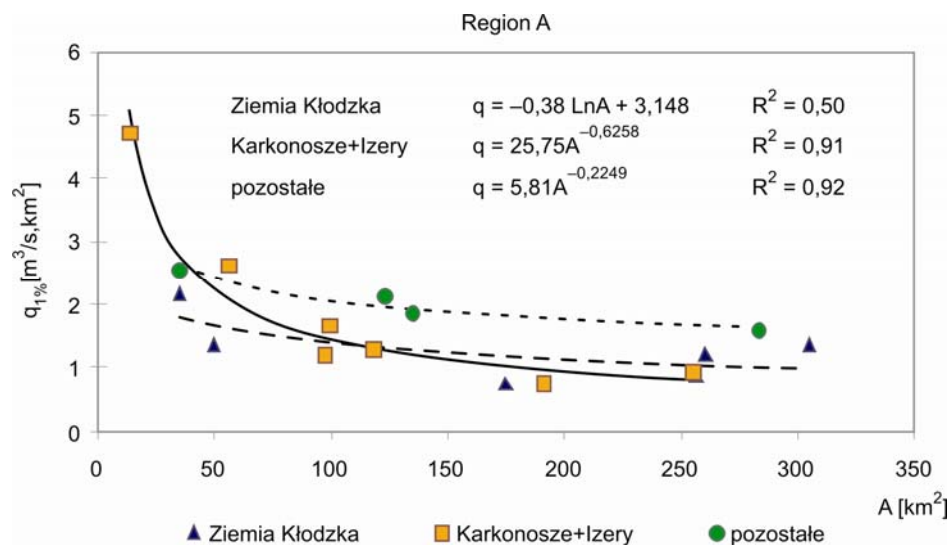
Podstawowym założeniem przyjętym w opracowaniu jest założenie o jednorodności hydrologicznej zlewni oznaczającej, że nie następuje zatarcie przestrzennego zróżnicowania zarówno warunków hydrologicznych, jak i fizyczno-geograficznych w obrębie zlewni o małej powierzchni.

Analizę przeprowadzono na podstawie ciągów maksymalnych przepływów zimowych, letnich oraz rocznych z 45 stacji wodowskazowych z dwóch okresów: 1956–1997 oraz 1966–1997.

Statystyczne zależności regionalne były poszukiwane dla związków pomiędzy podstawowymi parametrami rozkładu prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych, tj. maksymalnego przepływu rocznego o prawdopodobieństwie  $p = 1\%$  ( $Q_{1\%}$ ), spływu jednostkowego  $q_{1\%}$ , współczynnika zmienności  $c_v$  i bezwymiarowej charakterystyki  $k = Q_{1\%}/Q_{50\%}$  z warunkującymi je czynnikami geograficznymi. Przyjęto następujące parametry fizyczno-geograficzne: powierzchnię zlewni, wysokość zlewni n.p.m. najniższą, średnią oraz maksymalną, spadek średni zlewni, spadek podłużny cieką, długość cieką, kształt zlewni wyrażony poprzez wskaźniki formy i wydłużenia oraz zalesienie. Pominięto ustalenie wpływu jezior, z uwagi na to, że na badanym obszarze dorzecza ich udział jest znikomy.

W rozwiązaniach zastosowano analizę regresji i korelacji, badając zależność prostoliniową między dwoma zmiennymi w szeregu dwucechowym. Miara ścisłości związków pomiędzy parametrami rozkładu prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych a wpływem działających łącznie wybranych parametrów fizyczno-geograficznych zlewni określana była za pomocą współczynnika determinacji wielokrotnej  $R^2$ .

Na rysunku 28 pokazano przykładowo zależności regionalne w wydzielonym regionie hydrologicznym określanym jako zlewnie górskie.



Rys. 28. Zależności spływu powierzchniowego  $q_{1\%}$  od powierzchni zlewni w regionie hydrologicznym zlewnie górskie

Fig. 28. Relationships between surface runoff  $q_{1\%}$  and catchment area in the region of mountain catchments

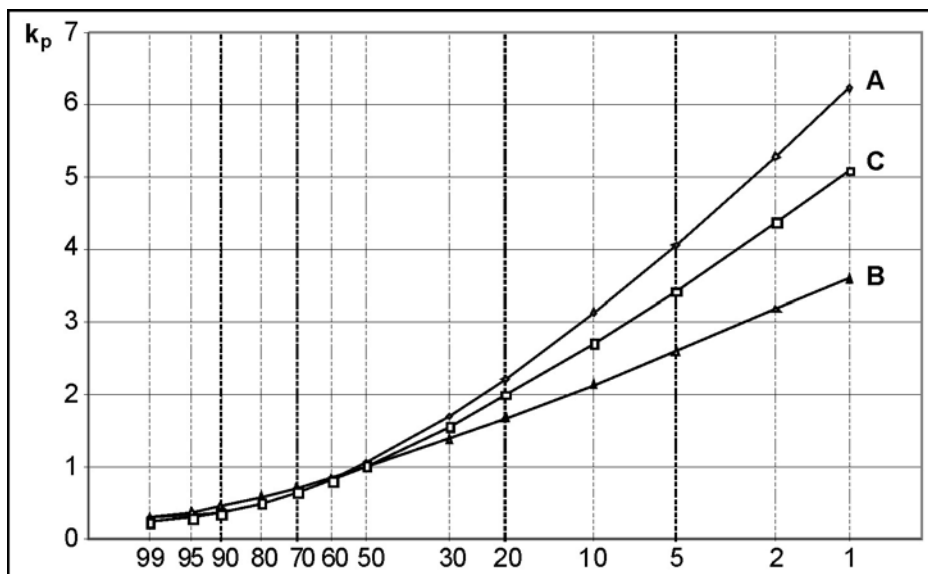
Dalsze badania polegały na opracowaniu bezwymiarowych regionalnych krzywych rozkładu prawdopodobieństwa maksymalnych rocznych przepływów na podstawie przeciętnych regionalnych charakterystyk  $k_p = Q_p/Q_{50}$ , wyznaczonych dla każdej z trzech wydzielonych klas typologicznych. Dla każdego przekroju wodowskazowego obliczono rzędne bezwymiarowych krzywych rozkładu prawdopodobieństwa  $Q_p/Q_{50}$ . Kwantyle  $k_p$  regionalnych bezwymiarowych krzywych rozkładu prawdopodobieństwa obliczono jako średnie z wartości  $Q_p/Q_{50}$  ze wszystkich  $n_i$  wodowskazów tworzących region hydrologiczny:

$$k_p = \frac{1}{n_i} \sum \frac{Q_p}{Q_{50}} \quad (36)$$

Następnie kwantyle  $k_p$  obliczone według wzoru (36) wyrównano rozkładem prawdopodobieństwa Pearsona III typu.

Dzięki tak wyznaczonym charakterystykom możliwe było określenie maksymalnych przepływów rocznych w zlewniach częściowo kontrolowanych, tj. takich, dla których w zamykających przekrojach wodowskazowych dostępne są krótkie ciągi obserwacyjno-pomiarowe. Wyznaczając wartość przepływu o prawdopodobieństwie  $p = 50\%$  na podstawie krótkich serii statystycznych ( $Q_{50,o}$ ), można dokonać oszacowania przepływu o dowolnym prawdopodobieństwie przewyższenia  $p\%$ , stosując przekształconą formułę:

$$Q_p = Q_{50,o} \cdot k_p \quad (37)$$



Rys. 29. Krzywe regionalne rozkładu prawdopodobieństwa przepływów maksymalnych w poszczególnych regionach hydrologicznych

Fig. 29. Regional functions of maximum flow frequency distribution in particular hydrological regions

Na rysunku 29 pokazano bezwymiarowe krzywe regionalne dla wymienionych regionów hydrologicznych: A – zlewnie górskie, B – zlewnie nizinne oraz C – zlewnie o reżimie rzek górskich i podgórskich.

Weryfikację bezwymiarowych krzywych regionalnych przeprowadzono dla 5 przekrojów wodowskazowych, stanowiących materiał niezależny, dla których istnieją dostatecznie długie ciągi przepływów maksymalnych, pozwalające na dobór dowolnego rozkładu prawdopodobieństwa. Weryfikacja polegała na sprawdzeniu zgodności wartości przepływów, obliczonych za pomocą krzywych regionalnych, z wartościami przepływów otrzymanymi z rozkładów prawdopodobieństwa. Ocena jakości modelu przeprowadzono przy użyciu najczęściej stosowanych w praktyce miar: współczynnika korelacji  $R$ , specjalnego współczynnika korelacji  $RS$  oraz całkowitego błędu kwadratowego  $CBK$ .

Wyniki weryfikacji przedstawiono w tabeli 7. Wskazują one na bardzo wysoki stopień dopasowania wartości przepływów otrzymanych za pomocą krzywych regionalnych do wartości obliczonych rozkładem prawdopodobieństwa. Według klasyfikacji jakości modelu na podstawie zakresu zmienności miar statystycznych podanej w pracy Soczyńskiej [1997], bezwymiarowe krzywe regionalne wykazują znakomitą jakość ze względu na badany współczynnik korelacji ( $0,99 \leq R < 1,00$ ) i całkowity błąd kwadratowy ( $0 < CBK \leq 3$ ). Wartość  $RS$  mieszczącego się granicach ( $0,95 \leq RS < 0,99$ ) i ( $0,99 \leq RS < 1,00$ ) pozwala zaliczyć krzywe regionalne do grupy modeli bardzo dobrych i znakomych.



Wyniki weryfikacji bezwymiarowych krzywych regionalnych  
Verification results of dimensionless regional curves

Wodowskaz Gauging station	R	RS	CBK
Kamionka	0,999	0,999	0,023
Gniechowice	0,999	0,990	0,167
Pątnów	0,995	0,996	0,090
Borów	0,999	0,987	0,158
Dobromierz	0,999	0,956	0,294

Bezwymiarowe krzywe regionalne oraz przeciętne regionalne charakterystyki  $k_p$  powinny znaleźć zastosowanie do określania przepływów maksymalnych rocznych o prawdopodobieństwie przewyższenia  $p \geq 1\%$  w małych zlewniach, o powierzchni do  $700 \text{ km}^2$ , posiadających częściową informację hydrologiczną. Dzięki nim można doraźnie oszacować maksymalne przepływy roczne w zlewniach z krótkimi ciągami pomiarowymi. Natomiast szacowanie wysokich przepływów o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia nie może być obciążone dużym błędem, ze względu na poważne konsekwencje społeczne, ekonomiczne i gospodarcze. Zarządzanie kryzysowe podczas powodzi, skomplikowana logistyka i ewentualne konsekwencje w przypadku podjęcia niewłaściwych decyzji zależą w znacznym stopniu od trafności prognoz wysokości przepływów maksymalnych. Jak ważny i brzemienisty w skutkach jest to problem, świadczy chociażby katastrofalna powódź w dorzeczu Odry w lipcu 1997 roku.

**Ozana Gromada** w opracowaniu **Maksymalne opady prawdopodobne a maksymalne przepływy prawdopodobne w wybranych zlewniach rolniczych** (promotor L. Radezka) wykorzystała do oceny przepływów maksymalnych o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia ciągu opadów maksymalnych. Informacje te, w porównaniu z danymi o stanach wody i przepływach, są o wiele bardziej dostępne, gdyż duża część zlewni niekontrolowanych posiada dostatecznie długie ciągi obserwacyjne opadów atmosferycznych. Do tej grupy metod należy metoda Gradex, w Polsce zbyt rzadko stosowana. Wymienić tu można tylko dwie prace [Czamara, Wołoszyn 1986, Ozga-Zieliński 2002].

Autorka podjęła w pracy próbę weryfikacji dwóch wersji metody Gradex w wybranych zlewniach dorzecza górnej i środkowej Odry. Materiał źródłowy stanowiły ciągi opadów maksymalnych dobowych i miesięcznych z półrocza letniego dla 105 stacji z lat 1890–2001 oraz 24 stacji z lat 1954–2001.

Metoda Gradex umożliwia obliczenie maksymalnych przepływów prawdopodobnych na podstawie obszernej informacji o opadach maksymalnych dobowych i niewystarczającej ilości danych o pomiarach hydrometrycznych – Gradex-KC lub ich braku – Gradex-ZN. Głównym założeniem metody jest przyjęcie hipotezy, że maksymalny opad o zadanym prawdopodobieństwie przewyższenia wywołuje przepływ o tym samym prawdopodobieństwie. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wariantów, o innej informacji i jakości danych wejściowych, co pozwoliło na ocenę wpływu danych

na dokładność uzyskiwanych metod. Weryfikację przeprowadzono na materiale zależnym i niezależnym. Stwierdzono, że adaptacja metody Gradex -KC dała zadowalające wyniki, natomiast metoda Gradex-ZN nie może być stosowana w zlewniach dorzecza Odry.

Praca wnosi nowe i oryginalne wartości poznawcze w zakresie naszej wiedzy o wyznaczaniu prawdopodobnych przepływów maksymalnych w niekontrolowanych zlewniach rzecznych.

## 8. PRZYKŁADY OPRACOWAŃ Z ZAKRESU INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Problematyka procesów związanych z ruchem rumowiska oraz transportem fluwialnym w ciekach dorzecza Odry zajmuje istotne miejsce w badaniach naukowych Instytutu Inżynierii Środowiska, a także Instytutu Kształtowania i Ochrony Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Dowodem na to są badania w zakresie współczesnych procesów fluwialnych oraz procesów transportu i sedymentacji rumowiska, prowadzonych na wybranych zlewniach rzecznych i ciekach. Znaną i docenianą zarówno w Polsce, jak i za granicą jest wrocławska szkoła profesora Włodzimierza Parzonki [Parzonka 1991, 1995, 1996, 1997, 1998, 2000, Głowski i in. 2000, Banasiak 1999, Kasperek 1999] oraz prace prowadzone w Instytucie Kształtowania i Ochrony Środowiska dotyczące erozji wodnej i powierzchniowej w zlewniach rolniczych [Żmuda 2005, 2006, 2008; Licznar 2002, Szewrański 2002, 2003, 2008].

Badań nad wpływem rumowiska na opory przepływu w rzece o dnie aluwialnym, a w szczególności oceny zmienności globalnego współczynnika Stricklera  $k_s$ , podjął się **Maciej Zdralewicz** w rozprawie doktorskiej **Ocena zmienności oporów ruchu w korycie rzeki Bóbr na odcinku Pilchowice – Żagań** [2003], której promotorem była Laura Radczuk. Autor skupił się głównie na :

- ocenie zmienności współczynnika  $k_s$  wraz z napełnieniem,
- ocenie wpływu frakcji ziarnowych na współczynnik szorstkości dla dna nieruchomego  $k_r$ ,
- ocenie wpływu konfiguracji dna rzeki na opory przepływu w porównaniu do dna płaskiego  $k_s/k_r$ .

Ocenę przeprowadził na przykładzie rzeki Bóbr na odcinku od przekroju wodowskazowego w Pilchowicach (na którego dnie dominowały kamienie i otoczaki) do przekroju wodowskazowego w Żaganiu (gdzie na dnie zarejestrowano przewagę frakcji piaskowej).

Przepływ w korytach otwartych odbywa się głównie pod wpływem siły ciężkości, a hamowany jest przez siły tarcia wewnętrznego i zewnętrznego. Składowa siły grawitacji jest stosunkowo łatwo identyfikowana. Natomiast siły oporu przepływu można odnieść z jednej strony do szorstkości ziarn materiału (z których zbudowane jest dno), a z drugiej zaś do: form dennych związanych z ruchem rumowiska, nieregularności i zmienności kształtu koryta rzecznoego w planie i przekroju poprzecznym, krzywizny trasy, odspajania i transportu rumowiska rzecznoego, zarastania koryta, przeszkód lokalnych (naturalnych i antropogenicznych) oraz zjawisk lodowych. Szczególnie ważnym parametrem przepływu w rzekach jest współczynnik określający opory ruchu. Problem określenia tychże oporów nie znalazł dotychczas jednoznacznego rozwiązania. Pomimo dość pełnego ich rozeznania empiryczne sprawdzenie i odwzorowanie matematyczne

tych czynników sprowadza się do wyrażenia wielkości treści zawartej w oporach jedynie w postaci wyrażenia, w którym pierwsze cztery człony odnoszą się do dna sztywnego, natomiast ostatni opisuje opory przepływu dla dna ruchomego:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{v}{v_*} = \frac{t_s^{1/6}}{n \sqrt{g}} = \sqrt{\frac{\rho v^2}{\tau}} \quad (38)$$

gdzie:

- $\lambda$  – współczynnik oporów [-],
- $C$  – współczynnik prędkości [-],
- $g$  – przyspieszenie ziemskie [ $\text{m/s}^2$ ],
- $v$  – prędkość średnia [ $\text{m/s}$ ],
- $v_*$  – prędkość dynamiczna [ $\text{m/s}$ ],
- $t_s$  – głębokość średnia [ $\text{m}$ ],
- $n$  – współczynnik szorstkości [ $\text{m/s}^{1/3}$ ],
- $\tau$  – naprężenie styczne [ $\text{Pa}$ ].

Dostępność pomiarów hydrometrycznych oraz składu granulometrycznego rumowiska w przekrojach wodowskazowych skłoniła autora rozprawy do wyznaczenia współczynnika oporów poprzez globalny współczynnik Stricklera  $k_s$ . Poprawne określenie współczynnika  $k_s$  oraz uzależnionych od niego prędkości wody w przekroju jest zagadnieniem istotnym w zakresie praktyki inżynierskiej. Jego dobór na podstawie tak chętnie stosowanych tablic Ven Te Chowa, ze względu na subiektywną i niedokładną ocenę czynników zjawisk, prowadzi do znacznych błędów, które przenoszą się na obliczoną wartość prędkości średniej, a więc i na natężenie przepływu wody.

W celu sprawdzenia przyjętej hipotezy badawczej Autor wyznaczył w pierwszej kolejności (w przeprowadzonej analizie materiału źródłowego), przepływ brzegowy, który w opinii wielu badaczy odpowiedzialny jest za zmiany morfologiczne koryta rzecznego [Lambor 1971]. Na kolejnym etapie określił globalny współczynnik Stricklera  $k_s$  na podstawie pomiarów hydrometrycznych zawierających spadek zwierciadła wody, następnie, wykorzystując krzywe uziarnienia, obliczył współczynnik szorstkości dla dna nieruchomego  $k_r$ .

Do określenia przepływu brzegowego posłużył się metodą zaproponowaną przez Wołoszyna, uzupełnioną metodą Woodyer'a, przy wykorzystaniu danych hydrometrycznych oraz przekrojów poprzecznych posterunków wodowskazowych. Informację uzupełnił o materiał fotograficzny, na podstawie którego możliwe było określenie poszczególnych elewacji roślinnych (metoda Woodyer'a). Wyniki przeprowadzonej analizy zestawil w poniższej tabeli.

Tabela 8  
Table 8

Przepływy w przekrojach wodowskazowych w Żaganiu, Szprotawie, Dąbrowie Bolesławieckiej i Pilchowicach  
Flows in cross-sections in Żagań, Szprotawa, Dąbrowa Bolesławiecka and Pilchowice

Nazwa wodowskazu Gauging station	Stan wody brzegowej SWB [cm] Water level for bank flow	Głębokość średnia dla wody brzegowej $t_{\text{brzeg}}$ [m] Mean depth for bank flow	Przepływ dla wody brzegowej $Q_{\text{brzeg}}$ [m <sup>3</sup> /s] Flow discharge for bank flow
Żagań	637	2,44	435
Szprotawa	297	1,46	155
Dąbrowa Bolesławiecka	269	2,00	84
Pilchowice	92	0,88	51

Globalny współczynnik Stricklera  $k_s$  jest wielkością praktycznie niemierzalną, ponieważ reprezentuje on szereg czynników wyrażonych jedną wartością średnią. W celu wyznaczenia poszukiwanych współczynników  $k_s$  wykorzystano przekształcony wzór do postaci:

$$k_s = \frac{V}{R_h^{2/3} I^{1/2}} \quad (39)$$

gdzie:  $R_h$  – promień hydrauliczny.

W ciekach, których szerokość koryta jest większa niż 10–15 głębokości  $R_h$ , może zostać zastąpiony przez głębokość średnią  $t_s$ . Za podstawową bazę danych posłużyły wyniki pomiarów hydrometrycznych z lat 1956 – 2001, a granicę analizowanej zmienności przyjęto do poziomu wody brzegowej, eliminując tym samym ewentualny wpływ roślinności.

Wartości globalnego współczynnika Stricklera otrzymał Zdralewicz na podstawie interpretacji parametrów przepływów wykonanych w latach 1955–2001. Do wyliczenia tego parametru wykorzystał również spadki zwierciadła wody, określone dzięki analizie spadku dna i doliny (dla przypadków, w których spadek zwierciadła wody nie był pomierzony). Autorowi udało się wykazać, że:

- Tylko w przekroju wodowskazowym Pilchowice występuje zarówno dno ruchome, jak i nieruchome, dla którego wraz z napełnieniem do granicy 0,5 m opory ruchu maleją.
- W pozostałych przekrojach wodowskazowych wszystkie punkty pomiarowe dotyczą dna ruchomego. Wynika to z tego, że głębokości, przy których przeprowadzono pomiary były większe od głębokości granicznych dla poszczególnych frakcji ziarnowych budujących dno koryta oraz dla nominalnej wielkości ziarna  $d_{50}$  dla całej próby rumowiska dennego. Znajomość tych wartości pozwoliła na stwierdzenie, że w 3 przekrojach wodowskazowych, tj. Dąbrowa Bolesławiecka, Szprotawa i Żagań występuje ciągły transport rumowiska. Najpierw do ruchu wchodzi piasek, następnie żwir, a na końcu drobne kamienie. Tylko w przekroju wodowskazowym w Pilchowicach występuje brak transportu rumowiska na głębokości <50 cm.

- Globalny współczynnik Stricklera  $k_s$  przy  $t_s > t_{sgr}$  (koryto z dnem ruchomym) maleje wyraźnie wraz z napełnieniem dla wodowskazu Żagań i wynosi od 57 do 23.
- W przekroju Pilchowice występują dwie klasy przepływu, tj. z dnem ruchomym i nieruchomym. W takim przypadku otrzymano klasyczny „wieszak” dla zależności  $k_s(h_{sr})$  bez matematycznego opisu.
- Autor określił stosunek  $k_s/k_r$  dla nominalnej średnicy ziarna  $d_{50}$  charakteryzującą całą próbę. Porównanie wykazało, że w większości przypadków  $k_s < k_r$ , co potwierdza tezę, że transport rumowiska zależy od form dennych.
- W badanym przekroju wodowskazowym w Pilchowicach  $k_s/k_r=1$  tylko do głębokości 0,5 m. Przy wyższych głębokościach zmniejszenie obliczeniowego transportu rumowiska może osiągnąć nawet wartość 10-krotnie niższą.

Problemem oceny zanieczyszczenia obszarowego w dorzeczu Odry zajmowała się grupa badaczy skupiona w polsko-niemieckim projekcie badawczym, sponsorowanym przez Agencję Ochrony Środowiska i nadzorowanym przez Stowarzyszenie Zasobów Wodnych i Kształtowania Środowiska (DVWK) oraz Komitet Melioracji i Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk. Ekspertem w tej dziedzinie dla zespołu w składzie: Laura Radczuk, Dorota Olearczyk oraz Ireneusz Kajewski był prof. Jerzy Kowalski. Głównym celem projektu była ocena zawartości azotu i fosforu, wynoszonego ze zlewni użytkowanych rolniczo [Mioduszeowski i in. 2002].

Rolnictwo jest jednym z działów gospodarki narodowej, który stwarza zagrożenie dla jakości wód powierzchniowych i gruntowych. Nawozy mineralne i organiczne stosowane w rolnictwie są wymywane z gleby i przenoszone do warstw wodonośnych lub bezpośrednio do wód powierzchniowych. Pomimo wybudowania wielu oczyszczalni ścieków (komunalnych i przemysłowych) nie zaobserwowano istotnej poprawy jakości wód w rzekach, szczególnie jeżeli chodzi o zawartość azotu i fosforu. Szacuje się, że ok. 350 tys. ton azotu i co najmniej 5 tys. ton fosforu wprowadzanego do Morza Bałtyckiego z terenu Polski jest wynikiem gospodarki rolnej [Bogacka, Taylor 1997]. Stanowi to około 50% całkowitego ładunku tych związków.

Nadwyżka azotu i fosforu generuje ilość tych pierwiastków przedostającą się do wód gruntowych, a następnie do rzek systemu rzecznej. Nadwyżkę azotu lub fosforu  $\Delta R$ , wynoszoną ze zlewni użytkowanej rolniczo, obliczono w skali rocznej z równania:

$$\Delta R = R_{wn} - R_{wyn}, \text{ (kg/ha rok)} \quad (40)$$

gdzie:

$R_{wn}$  – składniki wnoszone do gleby,

$R_{wyn}$  – składniki wynoszone z gleby wraz z plonem.

Składniki wnoszone do gleby stanowią sumę nawożenia mineralnego ( $R_{min}$ ) i organicznego ( $R_{org}$ ):

$$R_{wn} = R_{min} + R_{org} \quad (41)$$

Wielkość nawożenia mineralnego oceniono według Roczników Statystycznych, natomiast organicznego – na podstawie liczby głównych zwierząt gospodarskich wyrażonej w Przeliczeniowych Sztukach Dużych (PSD). Przeliczniki przyjęto za *HELCOM RECOMMENDATION 13/7*, a ich wartości ukazuje tabela 9.

Tabela 9  
Table 9

Wartości PSD dla głównych zwierząt gospodarskich  
PSD values for farm animals

Zwierzęta – Animals	PSD
Bydło – Cattle	0.80
Świnie – Pigs	0,15
Owce – Sheeps	0,08
Konie – Horses	1,00

Przy obliczaniu  $R_{org}$  przyjęto również za *HELCOM RECOMMENDATION 13/9*, że sztuka duża dostarcza 85 kg N i 42,5 kg  $P_2O_5$  rocznie. Wynoszenie składników  $R_{wyn}$  w latach 1949–1996 zostało obliczone na podstawie zawartości azotu i fosforu w czterech głównych uprawach: w zbożu, rzepaku, ziemniakach i burakach cukrowych. Powierzchnie poszczególnych upraw oraz średni plon były podstawą obliczenia  $R_{wyn}$  dla każdego roku i województwa.

Średnia wartość wnoszonych składników ( $R_{wn}$ ) została obliczona na podstawie danych zawartych w „Rocznikach Statystycznych”, dotyczących średniej wartości nawożenia mineralnego w województwach i średniej liczby zwierząt domowych (bydło, świnie, owce oraz konie) w tym samym okresie na poziomie województwa.

Z uwagi na niejednorodność informacji zawartej w tych rocznikach obliczone składniki na szczeblu województw należy traktować jako szacunek tych wartości. W celu uszczegółowienia otrzymanych danych dokonano obliczenia składników dla wszystkich gmin w roku 1989/1990 (przyjętego jako bazowy), na podstawie informacji uzyskanych z Głównego Urzędu Statystycznego. Średnie wartości nadwyżek azotu i fosforu dla województw w poszczególnych gminach, dla dowolnego roku, obliczono, zakładając ich proporcjonalny rozkład w postaci:

$$\frac{\Delta RG_x}{\Delta RG_{90}} = \frac{\Delta RW_x}{\Delta RW_{90}} \quad (42)$$

stąd

$$\Delta RG_x = \Delta RG_{90} \frac{\Delta RW_x}{\Delta RW_{90}}$$

gdzie:

$\Delta RG_x$  – nadwyżka składników w danej gminie dla dowolnego roku x,

$\Delta RG_{90}$  – nadwyżka składników w tej gminie dla roku 1989/1990,

$\Delta RW_x$  – średnia nadwyżka składników w województwie dla roku x,

$\Delta RW_{90}$  – średnia nadwyżka składników w tym samym województwie dla roku 1989/1990.

Wymienione nadwyżki zostały wyrażone w kilogramach azotu lub fosforu na hektar. W analizowanym wieloleciu 1949–1996 zmienność nadwyżek składników pokarmowych wynikała:

- ze zmienności stosowanych ilości nawozów mineralnych (azotu i fosforu) w dorzeczu Odry,
- liczby inwentarza w poszczególnych latach w Polsce,
- powierzchni zasiewów roślin uprawnych,
- uzyskiwanych plonów podstawowych upraw w jednostkach zbożowych.
- opracowaniem objęto obszar o powierzchni 114 049 km<sup>2</sup>, czyli 83% całej powierzchni dorzecza; część dorzecza leżąca w Czechach, jak i tereny górskie nie zostały uwzględnione.

Ilość azotu wynoszonego ze zlewni określono na podstawie analizy procesu wypłukiwania azotu z gleby i transportu jego związków do rzek. Wynikająca z bilansu nadwyżka azotu  $\Delta R$  została użyta do zidentyfikowania głównych źródeł zanieczyszczenia obszarowego. Nadwyżkę tę obliczono jako różnicę pomiędzy ilością azotu wprowadzonego do gleby wraz z mineralnym i organicznym nawożeniem a ilością azotu zebranego wraz z plonem (Kleinhans 1994). Obliczenia wykonano w granicach najmniejszej jednostki administracyjnej, tj. gminy, wykorzystując dane statystyczne z roku 1989, w którym stosowano najwięcej nawozów mineralnych w historii polskiego rolnictwa.

Transport oraz migracja zgromadzonej nadwyżki azotu ( $\Delta R$ ) do cieków odbywa się różnymi drogami, m.in.:

- Przy odpływie powierzchniowym, w czasie którego nawozy są wypłukiwane z gleby w wyniku procesu erozji powierzchniowej. Proces ten zachodzi tylko podczas opadów o dużym natężeniu.
- Przy zasilaniu rzek wodami gruntowymi. Systemy drenarskie na gruntach rolnych mogą w znaczny sposób przyspieszyć odpływ azotu ze zlewni.

Dla oceny ilości transportowanego azotu wykorzystano system informacji geograficznej (GIS), na bazie którego utworzono następujące warstwy tematyczne w *Arclnfo*:

- warunki klimatyczne jako średnie z wielolecia roczne sumy opadów atmosferycznych oraz ewapotranspiracji;
- przestrzenne rozmieszczenie nadwyżki azotu na terenach użytkowanych rolniczo;
- głębokość zalegania zwierciadła wód gruntowych;
- współczynnik przewodności pierwszej wodonośnej warstwy gleby oraz jej miąższość;
- użytkowanie terenu z wydzieleniem lasów, gruntów ornych, terenów zabudowanych, mokradeł oraz wód powierzchniowych;
- siatka zlewni cząstkowych cieków do trzeciego rzędu;
- gleby podzielone na klasy na podstawie ich pojemności wodnej oraz przepuszczalności.

Zasilanie wód gruntowych obliczono jako różnicę między średnimi z wielolecia rocznymi wartościami opadów atmosferycznych a ewapotranspiracją, wykorzystując model *ABIMO* (Glügla, Furtig 1997), który uwzględnia rodzaj gleby oraz głębokość zalegania zwierciadła wody gruntowej.



Ilość azotu wnoszonego do wód gruntowych obliczono przy użyciu modelu denitryfikacji (Köhnne, Wendland 1992), przyjmując wartość potencjału denitryfikacji ( $D_{max}$ ) w granicach od 20 do 50 mg/kgN, przy stałej reakcji gleby Michaelis-Menten od 2,5 do 6,7 mg/kg N w zależności od rodzaju gleby. Migrując poprzez strefę aeracji, azot przechodzi dalszą redukcję w wyniku procesów biochemicznych. W obliczeniach przyjęto, że 50% azotu wychodzącego ze strefy saturacji ulega transformacji (*Diffuse...* 1999).

Kolejnym etapem było oszacowanie ilości azotu oraz czasu jego migracji do rzek wraz z przyływem wód gruntowych. Wielkości te zależą od współczynnika filtracji, stopnia nachylenia zwierciadła wód gruntowych oraz odległości źródła zanieczyszczenia od sieci rzecznej. Obliczenie transportu horyzontalnego związków azotu wykonano modelem *WEKU* (Kunkel, Wendland 1997), opartym na teorii filtracji Darcy i Dupuit. Z terenów bardziej odległych od rzeki czas przejścia do wód powierzchniowych może przekroczyć 100 lat. Ponieważ w Polsce znacznie zmniejszyło się zużycie nawozów (dwu- lub trzykrotnie), nadwyżka azotu (*AR*) również zmalała.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że średnia nadwyżka azotu dla całego dorzecza Odry wynosi 58,5 kg/ha-rokN. W wyniku procesów denitryfikacji, zachodzących w górnych warstwach gleby, nadwyżka ta zredukowana jest do 45,9 kg/ha-rokN. Zakładając, że azot migrujący przez strefę aeracji zredukowany jest o 50%, oszacowano, że całkowita ilość azotu wnoszonego do strefy saturacji wynosi ok. 23 kg/ha-rokN, natomiast do rzek i strumieni 13 kg/ha-rokN. W poszczególnych zlewniach cząstkowych ilość wnoszonego azotu zmienia się od 6,2 do 27,2 kg/ha-rok.

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że nadwyżka azotu jest stała i nie zmienia się z czasem, a czas przejścia azotu od źródła do rzeki wynosi 40 lat od przyjętego roku zerowego. Obliczenia wykazały również dużą zmienność czasu potrzebnego na to, aby „cząsteczka” azotu dotarła do rzeki.

Przedstawione wyniki obliczeń powinny być traktowane jako średnie wartości charakterystyczne dla terenu o większej powierzchni. Analiza tak dużego obszaru wymagała wielu uproszczeń, a dostępne dane statystyczne uniemożliwiły badanie mniejszych jednostek niż teren gminy. Pomimo tego otrzymane wyniki jasno wykazują zróżnicowanie przestrzennego ilości azotu pochodzącego z zanieczyszczeń obszarowych, wnoszonego do wód powierzchniowych i gruntowych.

Doświadczenia Zespołu zdobyte na Ciesielskiej Wodzie zaowocowały na drugim obiekcie badawczym, w zlewni rzeki Wierzbak. Teren zlewni zbiornika Mściwojów leży na obszarze gmin Mściwojów i Strzegom w województwie dolnośląskim.

Wierzbak bierze swój początek w pobliżu Strzegomia na wysokości 217,5 m n.p.m. i uchodzi do Kaczawy w km 17+750. Całkowita powierzchnia zlewni Wierzbiaka wynosi 280 km<sup>2</sup>, natomiast do przekroju zbiornika w Mściwojowie – 47 km<sup>2</sup>, w tym powierzchnia cząstkowa Zimnika 14,3 km<sup>2</sup> (ok. 30% całkowitej zlewni zbiornika).

Charakterystyczne parametry fizyczno-geograficzne zlewni do przekroju zbiornika Mściwojów przedstawiają się następująco:

długość zlewni (*L*) – 10,7 km,

średnia szerokość zlewni – 4,4 km,

współczynnik szerokości zlewni  $\delta = F/L^2 = 0,41$ ,

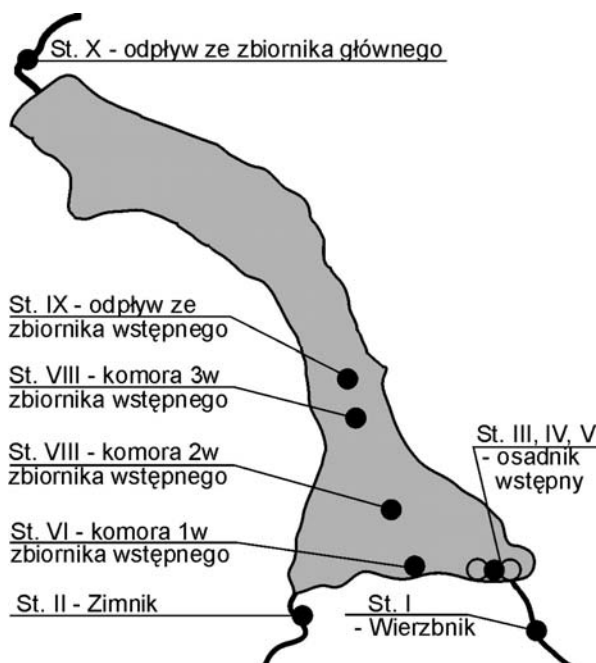
wskaznik rozwinięcia działu wodnego – 1,35,

średnia wysokość zlewni – 265,07 m n.p.m.,  
średni spadek zlewni – 2,26 %,   
spadek podłużny zwierciadła wody w rzece Wierzbak – 0,3%.

Zlewnia Wierzbiaka ma charakter rolniczy, jest słabo zalesiona, zwłaszcza w dolinach dopływów. Na terenach przyległych do zbiornika uprawiane są zboże, ziemniaki, kukurydza itp., które wymagają intensywnych zabiegów agrotechnicznych. Nawożenie i stosowanie chemicznych środków ochrony roślin oraz obecność ferm hodowlanych i składowanie kiszonki stanowią główne zagrożenie dla wód powierzchniowych i podziemnych rejonu zbiornika.

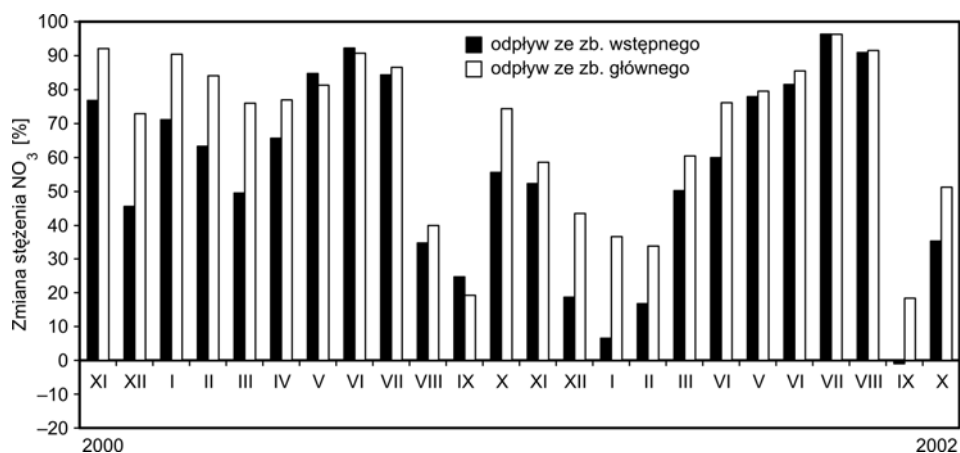
Zbiornik Mściwojów na cieku Wierzbak powstał przy aktywnym udziale pracowników Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Osobiste zaangażowanie Zbigniewa Janiaka i Ignacego Urbańskiego doprowadziło do utworzenia tu zlewni doświadczalnej „Wierzbak” z zapleczem gospodarczym. Prowadzone przez **Mirosława Wiatkowskiego** [2003] badania terenowe i laboratoryjne (pod kierunkiem Włodzimierza Czamary) pozwoliły na określenie metod zmniejszenia zanieczyszczeń w wodzie zasilającej zbiornik główny. Zasadnicze badania dotyczyły pomiarów jakości wód na dopływach oraz na odpływie ze zbiornika wstępnego i głównego Mściwojów [Wiatkowski, Czamara, Kuczewski 2006] (rys. 30).

Wyniki oceny przedstawione zostały na rysunkach 31 i 32.

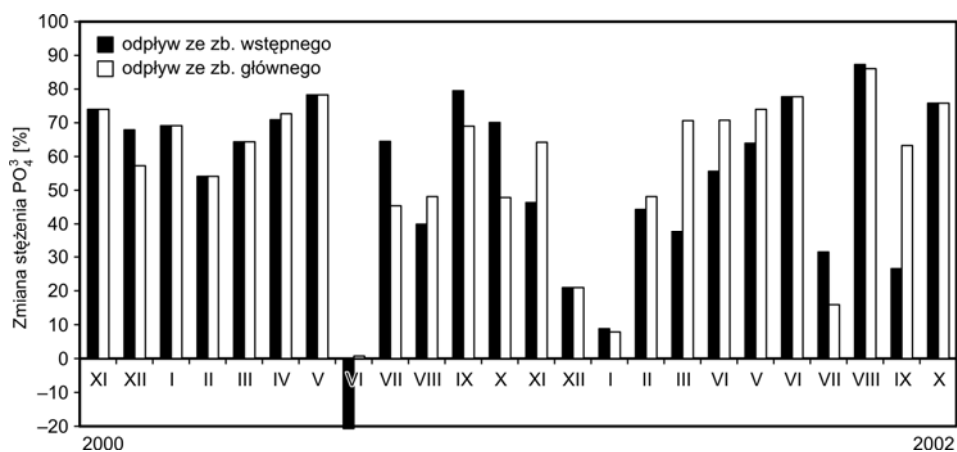


Rys. 30. Lokalizacja stanowisk badawczych poboru prób wody do analiz hydrochemicznych i osadów na dopływach i odpływach ze zbiornika Mściwojów

Fig. 30. Location of investigation stands for water sampling for hydrochemical and sediment analyses of the inflow and outflow Mściwojów reservoir.



Rys. 31. Zmniejszenie stężeń azotu azotanowego w wodzie przepływającej przez zbiornik Mściwojów w okresie 2000–2002, liczone w stosunku do wody dopływającej do zbiornika  
 Fig. 31. Decrease of nitrate nitrogen concentration in water flowing through Mściwojów reservoir during 2000–2002 in relation to total water inflow



Rys. 32. Zmniejszenie stężeń fosforanów w wodzie przepływającej przez zbiornik Mściwojów w okresie 2000–2002, liczone w stosunku do wody dopływającej do zbiornika  
 Fig. 32. Decrease of phosphate concentration in water flowing through Mściwojów reservoir during 2000–2002 in relation to total water inflow

Z przeprowadzonych przez Autora badań wynika, że:

- Wody cieków Wierzbak i Zimnik, zasilających zbiornik Mściwojów, charakteryzują się wysokim stopniem żyzności, w tym: i) zawartości fosforu odpowiednio dla Wierzbaka i Zimnika ( $0,43 \text{ mg P/dm}^3$ ,  $0,48 \text{ mg P/dm}^3$ ), fosforanów ( $0,54 \text{ mg PO}_4/\text{dm}^3$ ,  $0,51 \text{ mg PO}_4/\text{dm}^3$ ); ii) zawartości azotanów ( $22,40 \text{ mg NO}_3/\text{dm}^3$ ,  $28,69 \text{ mg NO}_3/\text{dm}^3$ ), azotynów ( $0,21 \text{ mg NO}_2/\text{dm}^3$ ,  $0,31 \text{ mg NO}_2/\text{dm}^3$ ), amoniaku ( $0,29 \text{ mg NH}_4/\text{dm}^3$ ,  $0,50 \text{ mg NH}_4/\text{dm}^3$ ) i azotu ogólnego ( $6,77 \text{ mg N/dm}^3$ ,  $6,80 \text{ mg N/dm}^3$ ).

- Na jakość wód cieków zasilających zbiornik Mściwojów zasadniczy wpływ ma nieuporządkowana gospodarka wodno-ściekowa w zlewni. Brak kanalizacji we wsiach położonych na terenie zlewni powoduje stałe zanieczyszczenie wód Wierzbiaka i Zimnika. Duża liczba zbiorników ścieków, tzw. szamb i niezabezpieczonych składowisk obornika sprawia, że zanieczyszczenia przedostają się łatwo do wód powierzchniowych i podziemnych.
- Dużą rolę w procesie poprawy jakości wody w zbiorniku głównym wywiera zbiornik wstępny. Wyniki przeprowadzonych pomiarów w latach 2000–2002 wykazały, że w zbiorniku wstępnym, zbudowanym z osadnika i przegród biologicznych, ma miejsce obniżanie się podstawowych wskaźników fizyczno-chemicznych. Eliminacja azotanów w wodzie przepływającej przez zbiornik wstępny Mściwojów wynosiła 66,5%, natomiast fosforanów – 52,8% (rys. 31, 32).
- Mimo dużej skuteczności zbiornik wstępny nie jest w stanie całkowicie wyeliminować dopływu zanieczyszczeń do zbiornika głównego, dlatego należy kontynuować porządkowanie gospodarki ściekowej i odpadowej w zlewni oraz skanalizować obszary zabudowane. Na obszarze zlewni należy prowadzić gospodarkę rolniczą zgodnie z zasadami dobrej praktyki rolniczej.
- Dla zapewnienia skuteczniejszej pracy zbiornika wstępnego w Mściwojowie należy: i) wybudować kanał obiegowy do odprowadzenia wód powodziowych; ii) wykaszac sezonowo roślinność z czaszy zbiornika oraz okresowo usuwać osady denne; iii) utworzyć pas buforowy wokół zbiornika o szerokości co najmniej 20 m, zagospodarowując go jako użytki zielone lub nasadzenia leśne.
- Wysoka sprawność zbiornika wstępnego w zakresie zmniejszania zanieczyszczeń w wodzie zasilającej zbiornik główny w Mściwojowie wskazuje na celowość budowy tego typu obiektów na obszarze kraju.

W latach 1990–2000 Instytut Inżynierii Środowiska był współpartnerem w europejskim programie TEMPUS. Program TEMPUS-PHARE uruchomiony został na podstawie decyzji Rady Ministrów Wspólnoty Europejskiej z dnia 7 maja 1990 roku. Głównym celem programu było wsparcie reformy systemów szkolnictwa wyższego w krajach Europy Środkowo-Wschodniej i republik byłego Związku Radzieckiego, poprzez wymianę nauczycieli akademickich, pracowników administracyjnych uczelni i studentów oraz szeroką współpracę ośrodków akademickich.

Projekt ten był realizowany między innymi przez Uniwersytet w Hanowerze, Uniwersytet Rolniczy w Wageningen i ówczesną Akademię Rolniczą we Wrocławiu. Ze strony naszej Uczelni koordynatorem był prof. Jerzy Kowalski.

## 9. ZAMIAST PODSUMOWANIA

Potrzeba i chęć krótkiego przedstawienia problematyki modelowania procesów hydrologicznych w okresie mojej pracy na Akademii Rolniczej we Wrocławiu (obecnie Uniwersytecie Przyrodniczym) automatycznie zmusiła mnie do znacznych uproszczeń i skrótów. Niemożliwe też było przedstawienie wszystkich publikacji Zespołu, znajdzie je Czytelnik w zamieszczonym wykazie piśmiennictwa.

Badania reakcji środowiska przyrodniczego, w tym zasobów wodnych, na różnorodne formy działalności człowieka jest jednym z ważniejszych zadań współczesnej hydrologii. W raporcie UNESCO (World Science Report UNESCO, Paris 1998) wśród priorytetowych celów nauki wskazano na wspomaganie działań na rzecz ochrony przyrody i podtrzymania zasobów czystej wody wobec wzrastającego zanieczyszczenia środowiska.

Należy oczekiwać, że w związku z sygnalizowaniem i prognozowaniem możliwych globalnych zmian klimatycznych mogą ujawnić się zmiany reakcji między składnikami bilansu wodnego. Aby odpowiedzieć na pytanie, jakie są możliwe kierunki zmian, należy przede wszystkim dostarczyć naukowych, uzasadnionych podstaw do planowania i zarządzania środowiskiem, wykorzystując wszelkie dotychczasowe metody i osiągnięcia hydrologii.

Jak wiadomo, cechą wspólną empirycznych, statystycznych i genetycznych zależności hydrologicznych jest niestacjonarność. Wynika ona ze zmieniających się w czasie i przestrzeni własności fizycznych zlewni i obiektów znajdujących się w niej. Przyczyną zmian jest głównie ingerencja człowieka.

Należy jednak pamiętać przy rozwiązywaniu tych problemów, że „myślenie bez doświadczenia jest puste, a doświadczenie bez myślenia jest ślepe” (J. Tischner).

## 10. PIŚMIENNICTWO

- Aniszewski G., Dobrowolski R., Wiśniewski P.: 2001. Sposoby edukacji informowania i szkoleń, SAFEGE, Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, Wrocław, Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Antoncev C.N., Jepichov G.P., Kosevarov A.A.: 1986. Sistemnoe matematiceskoe modelirovanie procesov vodoobmena. Nauka, Nowosybirsk.
- Bac. S.: 1968. Studia nad parowaniem z wolnej powierzchni wodnej, parowaniem terenowym i ewapotranspiracją potencjalną. Zesz. Nauk. WSR we Wrocławiu, nr 80, Wyd. WSR we Wrocławiu, Wrocław.
- Bac S., Rojek M.: 1999. Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska. Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Banasiak R.: 1999. Badanie transportu rumowiska unoszonego w korytach otwartych, (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Barbacki T.: 1965. Zmiany przepływu i retencji gruntowej w okresach bezopadowych. (Rozprawa doktorska – maszynopis), WSR we Wrocławiu, Wrocław.
- Bartnik W., Parzonka W.: 1998. Degradation of Middle Odra caused by regulation works. International Conference on European River Development ICERD. Budapest, Hungary, Vituki.
- Bauman K., Czamara W.: 1979. The changes in flow conditions, In water – courses effected by surface mining (with Bełchatow Lignite Mine as example). Monografia IAEG, Warszawa.
- Boćko J., Matusiewicz H., Radczuk L.: 1975. Wielkość retencji dla wyrównania odpływów niskich w zlewniach Sudetów w związku przerzutem ścieków. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 115, Mel. XXI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Bogacka T., Taylor R.: 1997. Emisja azotu i fosforu z obszaru Polski do wód powierzchniowych. Wiadomości IMGW, z. 3, Warszawa.
- Chalfen M., Czamara A.: 1988. Matematyczne modelowanie przepływów w strefie saturacji na przykładzie zlewni Ciesielska Woda. Materiały konferencyjne. XVIII Seminarium Zastosowań Matematyki, Kobyla Góra.
- Chalfen M.: 1990. Matematyczny model nieustalonego ruchu wód podziemnych z uwzględnieniem obiektów melioracyjnych. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 192, XXXVI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Chmielewska I.: 2005. Wpływ zagospodarowania doliny rzecznej na przejście wezbrań w dolnym odcinku rzeki Widawy. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Choiński A.: 1988, Zróżnicowanie i uwarunkowania zmienności przepływów rzek polskich, Uniw., im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Seria Geografia, Poznań.

- Chomicz J.: 1989. Prognozowanie wpływu głębokich odwodnień na stosunki wodne przyległych terenów. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 181, Mel. XXXIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Chomicz J., Eliasiewicz R., Majchrowska E.: 1989. Badania eksperymentalne w zlewni Ciesielska Woda. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 181, Mel. XXXIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czaban S., Czamara W., Krężel J., Sobota J., Urbański I.: 1998. Przepływy we wrocławskim węźle wodnym podczas wezbrania w lipcu 1997. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 339, XXI, t. 1, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Czamara W., Kowalski J.: 1985. Wpływ rzeki Odry na stosunki wodne Doliny Kargowskiej. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Mel. XXVIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A.: 1989. Charakterystyka geologiczna i hydrologiczna zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 181, Mel. XXXIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Czamara W.: 1991. The characteristics of the Upper Odra River basin. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Osterreich, 65/66.
- Czamara A., Czamara W.: 1993. Wpływ czynników antropogenicznych na niejednorodność hydrologicznych i hydrogeologicznych ciągów pomiarowych w dorzeczu górnej Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Inż. Środ. III, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Czamara W., Radezuk L., Szarska O.: 1996. Udział Instytutu Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu w Międzynarodowym Programie FRIEND. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 244, Inż. Środ. VIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Chalfen M.: 1997. Przebieg procesu odnawiania zasobów wód podziemnych na obszarach zdrenowanych. Roczniki AR w Poznaniu CCXCIV, Melior. Inż. Środ. 19, Poznań.
- Czamara A.: 1997. Badania modelowe procesu odnawiania zasobów wód podziemnych na obszarach odwadnianych systemem rowów. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Monografie, Seria: „Współczesne Problemy Hydrogeologii”, t. VIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A.: 1998. Oddziaływanie wybranych urządzeń melioracyjnych na zasoby wód gruntowych. (Rozprawa habilitacyjna), Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 340. Rozprawy CLVII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A.: 1999. Wpływ warunków geologicznych i morfologicznych na formowanie wezbrań w dorzeczu górnej Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 339, Konferencje XXI, t. 2, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Czamara W.: 2000. Wpływ warunków fizjograficznych na formowanie wezbrań w zlewni Białej Łądeckiej, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 385, Inż. Środ. XI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A.: 2001. Charakterystyka warunków fizjograficznych zlewni górnej Strzegomki. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 413, Inż. Środ. XII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.

- Czamara A., Janda I.: 2002 a. Wpływ gospodarki stawowej na obieg wody w małej zlewni rolniczej, Prace Inst. Geografii Akademii Świętokrzyskiej w Kielcach, nr 7.
- Czamara A., Czamara W.: 2002 b. Wpływ działalności ZG Polkowice na środowisko przyrodnicze Jędrzychowa i okolic. Przegląd Geologiczny, tom 50, nr 10/2.
- Czamara A., Lejcuś K., Łomotowski J.: 2002 c. Long-term water quality research of Dobromierz reservoir catchment", Long-Term Ecological Research in Poland, In the framework of ILTER, Unesco IHP-V.
- Czamara A., Lejcuś I.: 2004. Wpływ retencji stawowej na wody powierzchniowe i podziemne zlewni Ciesielskiej Wody, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 502, Inż. Środ. XIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A.: 2004. Użytkowanie zasobów wód podziemnych zlewni Widawy. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 482, Monogr. XXXV, ser.: Współcz. Probl. Inż. Środ., t. I, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Lejcuś I., Chalfen M.: 2005. Badania modelowe oddziaływania stawów na tereny przyległe, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 520, Inż. Środ. XIV, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Kowalski J., Molski T.: 2005. Przewodnik do ćwiczeń z hydrogeologii inżynierskiej, Skrypty AR we Wrocławiu, wyd. II uzupeł., Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W.: 1970. Charakterystyka rumowiska dennego rzeki Bóbr, Zesz. Nauk. WSR we Wrocławiu, Melior. XVI, Wyd. WSR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Krężel J.: 1975. Przewodnik do ćwiczeń z hydrologii, wyd. I, Wyd. WSR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W.: 1977. Zmienność współczynnika spływu powierzchniowego na terenach kopalń odkrywkowych węgla brunatnego, Górnictwo Odkrywkowe, nr 3.
- Czamara W., Wołoszyn J.: 1986. Obliczanie maksymalnych przepływów o niskiej częstotliwości pojawiania się metodą „Gradex”. Wiad. Melior. i Łąk., nr 4.
- Czamara W.: 1991 a. Charakterystyka hydrologiczna i model wezbrań opadowych dorzecza górnej Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 93, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W.: 1991 b. Wpływ działalności gospodarczej w zlewni górnej Odry na środkowe Nadodrze, Gospodarka Wodna nr 8.
- Czamara W.: 1992. Prognoza erozji powierzchniowej w zlewniach zbiorników wodnych zlokalizowanych na Przedgórzu Sudeckim. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 271, z. 35, Kraków.
- Czamara W., Eliasiewicz R., Radczuk L., Rojek M.: 1992. Modelowanie procesów hydrologicznych w zlewni użytkowanej rolniczo. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 211, Melior. XL, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J.: 1993 a. Wpływ przebudowy wału rozdzielczego śluzy w Januszkowicach na stabilność dna rzeki Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Inż. Środ. V, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Mokwa M.: 1993 b. Charakterystyka warunków ruchu rumowiska wleczzonego w środkowym biegu Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Inż. Środ. IV, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.



- Czamara W., Radczuk L., Urbański I.: 1993 c. Mała retencja w dorzeczu górnej i środkowej Odry., Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Inż. Środ. IV, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Radczuk L.: 1994 a. Zasoby wód podziemnych i prognoza niskich przepływów w przekrojach bilansowych. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 248, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Krężel J., Łomotowski J.: 1994 b. Wpływ retencji zbiornikowej na jakość wody powierzchniowej w zlewni Nysy Szalonej. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 246, Konf. III, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Tokarczyk T.: 1996 a. Charakterystyka cieków powierzchniowych obszaru Parku Narodowego Gór Stołowych. Zesz. Nauk AR we Wrocławiu, VIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara A., Czamara W., Radczuk L., Szarska O.: 1996 b. Udział Instytutu Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej we Wrocławiu w międzynarodowym programie hydrologicznym FRIEND. Zesz. Nauk AR we Wrocławiu, VIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Krasoń M.: 1997 a. Zbiornik wodny Cieszanowice na Luciaży – charakterystyka obiektu, problemy realizacyjne. Gospodarka Wodna nr 7.
- Czamara W.: 1997 b. Ocena oddziaływania zbiorników wodnych na środowisko. Gospodarka Wodna nr 3.
- Czamara W., Jakubowski W., Radczuk L.: 1997 c. Probabilistic analysis of extreme low flows in selected catchments in Poland, Friend' 97, Conference, Slovenia.
- Czamara W., Wojarnik K., Wiatkowski M., Tokarczyk T.: 1997 d. Możliwości poprawy jakości wody retencjonowanej w zbiornikach zaporowych górnej i środkowej Odry. Zesz. Nauk AR we Wrocławiu, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Wojarnik K.: 1998. Ocena wpływu retencji zbiornikowej na fale powodziowe górnej i środkowej Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 339, Konf. XXI, t. 1, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Wiatkowski M.: 2002 a. Wpływ gospodarki stawowej na obieg wody w małej zlewni rolniczej. Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej, nr 7.
- Czamara W., Wiatkowski M.: 2002 b. Ochrona zbiorników wodnych małej retencji przed zanieczyszczeniami. Prace Instytutu Geografii Akademii Świętokrzyskiej, nr 7.
- Czamara W., Wiatkowski M.: 2002 c. Zastosowanie zbiornika wstępnego w Mściwojowie do ochrony retencjonowanej wody. Roczniki AR w Poznaniu. CCCXLII, Poznań.
- Czamara W., Wiatkowski M.: 2004. Dopływ głównych substancji biogennych do zbiornika wodnego w Mściwojowie. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 502, Inż. Środ. XIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Czamara W., Gałka B., Wiatkowski M.: 2005. Metale ciężkie w osadach dennych zbiornika małej retencji „Mściwojów”, t. III, Warszawa.
- Czamara W., Czamara A., Wiatkowski M.: 2007. The use of pre-dam reservoirs to improve water quality in storage reservoirs. Archives of environmental protection, Polish Academy of Sciences, vol. 33, no 4.

- Ćwikłowski M.: 1989. Metoda wyznaczania parametrów sieci drenarskich przy założeniu ustalonego charakteru filtracji. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXXIV, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Dąbrowski R.: 1990. Modelowanie przepływu w systemie cieków. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXXIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Diffuse entries in rivers of the Odra basin.; 1999. PAN DVWK, Materialien, 9.
- Downar-Zapolska J.: 1989. Ocena zasobów wodnych w zlewni Ciesielska Woda. (Praca magisterska), Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Dubicki A.: 1993. Tendencje zmian intensywności opadów w dorzeczu Odry, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 233, Wrocław.
- Dubicki A., Tomczyński K.: 1997. Deficyt opadów atmosferycznych w górach Izerkich oraz Karkonoszach i ich przedpolu. Mat. Konf. X, Przesieka.
- Dziewoński Z.: 1974. Rolnicze zbiorniki retencyjne. PWN, Warszawa.
- Eliasiewicz R., Czamara W.: 1989. Program badawczy zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 181, Melior. XXXIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Eliasiewicz R., Piasecki J., Radczuk L.: 1993. Wpływ zabudowy hydrotechnicznej Odry na kształtowanie się niskich i średnich stanów wody na odcinku Wrocławska Śluza Mieszcząńska – Ścinawa, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 233, Inż. Środ., Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- FRIEND.: 1995. Low Flow Group Meeting, Slovakia.
- Gałoński B.: 1965. Charakter i rozkład opadów na obszarze zlewni Bystrzyca w okresie powodzi w sierpniu 1964., Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 61, Melior. X., Wyd. WSR we Wrocławiu, Wrocław.
- Gielnicka I., Warchola k., Dobrowolski R.: 2001. Budowanie Public Relation. Safege, Biuro Koordynacji Banku Światowego, Wrocław, Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Glugla G., Fürtig G.: 1997. Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts für Lockergesteinsbereich. Dokumentation zur andwendung des Rechen programs ABIMO. Bundesanstalt fürGewässerkunde, Berlin.
- Głowski R.: 2000. Charakterystyka hydrauliczna i reologiczna procesu sedymentacji, zagęszczania i erozji osadów drobnoziarnistych. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Grocki R.: 2000. Zarządzanie kryzysowe, FRLD, Warszawa.
- Grocki R.: 2001 a. System ostrzeżeń powodziowych jako element efektywnej i skutecznej ochrony. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 413, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Grocki R., Czamara W.: 2001 b. Metody ograniczania skutków powodzi. Biuro Koordynacji Banku Światowego, Wrocław. Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Grocki R., Eliasiewicz R.: 2001 c. Zagospodarowanie terenów zalewowych. Biuro Koordynacji Banku Światowego, Wrocław. Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Grocki R., Mokwa M., Radczuk L.: 2001 d. Zagospodarowanie i wdrożenie lokalnych systemów ostrzeżeń powodziowych. Biuro Koordynacji Banku Światowego, Wrocław. Oficyna Wydawnicza README, Łódź.

- Grocki R.: 2002. Ochrona przed powodzią jako element systemu zarządzania kryzysowego. Polska Akademia Nauk – Komitet Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Grocki R.: 2005. Wielokryterialność podejmowania decyzji w zarządzaniu kryzysowym dla potrzeb ochrony przed powodzią. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR Wrocław.
- Grocki R.: 2003 a. Zarządzanie kryzysowe w ochronie przed powodzią, Problemy Hydrotechniki, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Grocki R.: 2003 b. Vademecum zagrożeń, Bellona, Warszawa.
- Gromada O.: 2007. Maksymalne opady prawdopodobne a przepływy prawdopodobne w wybranych zlewniach rolniczych. (Rozprawa doktorska – maszynopis), UP Wrocław.
- Jakubowski W.: 1988. Prognoza dni z opadem w przedziałach dwutygodniowych na przykładzie Wrocławia. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 174, Melior. XXX, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Jakubowski W.: 1997. Rozkłady Nizówki – program komputerowy.
- Jakubowski W., Rączuk L.: 2004. Nizowka 2003 software in Tallaksen L. M. & van Lanen, H. A. J. eds. Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, Developments in Water Science, 48, Amsterdam, Elsevier Science B. V.
- Jakubowski W.: 2005. Rozkłady prawdopodobieństwa nizówek ekstremalnych. Przeg. Geof., L (3-4).
- Jakubowski W.: 2006. An application of the bivariate generalized pareto distribution for the probabilities of low flow extremes estimation. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3.
- Jakubowski W., Tokarczyk T.: 2007. The maximum low flow parameters depending on assumed threshold level. Poster, XXIV Conference *General Assembly Earth, Our Changing planet*, Perugia.
- Jelowicki J.: 1994. Zastosowanie dwuwymiarowego równania fali kinematycznej do modelowania odpływu powierzchniowego ze zlewni. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 243, Inż. Środ. VI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Jelowicki J.: 1997. Zintegrowany model przepływu nieustalonego w sieci koryt otwartych. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu.
- Kasperek R.: 1999. Ocena tworzenia się obrukowania dna rzeki na przykładzie środkowej Odry. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu.
- Kasprzyk A.: 1998. Fizyczno-geograficzne uwarunkowania susz hydrologicznych w Polsce, (Rozprawa doktorska – maszynopis), UW, Kielce.
- Kiciński T.: 1963. Udział wód gruntowych w odpływie całkowitym rzek, Gospodarka Wodna, Warszawa.
- Kleinhans W.: 1994. Assessment balance At regional and farm level: the balance approach (Fal), Braunschweig, Germany.
- Kasprzyk, A.: 2005. Rola czynników fizycznogeograficznych w kształtowaniu susz hydrologicznych w Europie Środkowej. (The role of physico- geographical factors in hydrological droughts creation in the Middle Europe [in:] Extreme hydrological and meteorological phenomena. Wyd. IMGW, Warszawa.

- Kosierb R., Bartosiewicz S.: 1989. Rola obiektów hydrotechnicznych w ochronie przeciwpowodziowej. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Konf. XXI, t. 2, nr 339, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Kosierb R.: 2004. Sterowanie pojemnością zbiorników retencyjnych położonych na Nysie Kłodzkiej w okresie przepływu wód wezbraniowych. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Könhe C., Wendland F.: 1992. Modellgestützte Berechnung des mikrobiellen Nitratabbaus im Boden. Int. Ber. RFA-STE-IB-I/92 FZ Jülich GmbH.
- Kuncewicz A., Dobrowolski R.: 2001. Organizacja lokalnej koalicji. Safege, Biuro Koordynacji Banku Światowego, Wrocław. Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Kundzewicz Z.W.: 1985. Modele hydrologiczne ruchu fal powodziowych. Komitet Gospodarki Wodnej, PAN, Warszawa.
- Kundzewicz Z.W.: 2000. Gdyby wody miarka..., PWN, Warszawa.
- Kurnatowski S., Tobolski K.: 1999. Badania interdyscyplinarne w świetle dotychczasowych doświadczeń na Niziu Polskim. Inst. Geogr. UJ. Kraków.
- Kupczyk E., Kasprzyk A., Radczuk L., Czamara W.: 1993: A study on the flow regimes of Polish rivers. Flow Regimes from International Experimental and Network Data. IAHS Publication No. 221.
- Kupczyk E., Kasprzyk A., Radczuk L.: 1998. Seasonal and spatial variability of drought occurrence in Poland. Low Flow export Meeting, Jugosławia.
- Kupczyk E., Kasprzyk A., Pokojski W.: 2004. Contribution to chapter 3. Flow generating processes and chapter 9. Human influences. In: Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Ed. L.M. Tallaksen, H. A. J. Van Lanen, Elsevier.
- Lambor J.: 1960. Hydrologia inżynierska, Arkady, Warszawa.
- Licznar P., Sasik J., Żmuda R.: 2002 a. Prognozowanie erozji wodnej w małych zlewniach rolniczych Wzgórz Trzebnickich. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 487, Warszawa.
- Licznar P., Żmuda R., Sasik J.: 2002 b. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu dla badań nad erozją wodną w małych zlewniach rolniczych Wzgórz Trzebnickich. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 487, Warszawa.
- Łomotowski J., Czamara A., Lejcuś K.: 2001. Analiza zmian wybranych wskaźników jakości wody obserwowanych w zbiorniku Dobromierz w latach 1992–2000, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., PAN, nr 475, Warszawa.
- Maidment D.R.: 1993. Handbook of hydrology, Mc. Graw-Hill, Inc., New York.
- Marciniak M.: 1988. Oznaczanie parametrów hydrologicznych warstwy wodonosnej metodą PARAMEX na terenie zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda w rejonie Cieśle – Poniatowice. Sprawozdanie z pomiarów, Pleszew–Poznań.
- Marczuk G.I.: 1985. Modelowanie matematyczne problemów środowiska naturalnego, PWN, Warszawa.
- Markowska J., Nowak L.: 1997. Modelowanie procesów gleba-roślina-atmosfera. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 313, Konf. XV, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.

- Markowska J.: 1999. Wpływ czynników meteorologicznych na plonowanie ziemniaków w zlewni Górnej i Środkowej Odry. (Rozprawa doktorska), AR Wrocław.
- Markowska J.: 2000. Zastosowanie rozkładu prawdopodobieństwa Johnsona SB w agrometeorologii, Wiadomości IMGW, t. XXII (XLIV), 2000, z. 4.
- Markowska J., Markowski J. 2003, Tereny zalewowe – element strefy brzegowej cieków; Kamienny Potok i Złotnowski Potok. Zesz. Nauk. Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej. z. 9, nr ser. 4, Bielsko-Biała.
- Markowska J., Mordalska H.: 2004. Struktura użytkowania zasobów wodnych rzek Nysy Łużyckiej i Odry Granicznej. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 502, Inż. Środ. XIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Markowska J.: 2006. Korzyści i zagrożenia dla środowiska przyrodniczego wynikające z realizacji programów ochrony od powodzi i małej retencji w zlewni rzeki Kwisy. Problemy Hydrotechniki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
- Markowski J.: 2001. Modelowanie matematyczne przewodów kroplujących. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 413, Inż. Środ. XII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Markowski J.: 2006. Modelowanie hydrodynamiczne przejścia fali powodziowej przez kaskadę zbiorników. Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochrony środowiska. Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Markowski J.: 2008. Proste zastosowania modułu hydrodynamicznego modelu HEC-RAS. Wyd. IMGW, Warszawa.
- Mioduszewski W., Radczuk L., Quast J., Zdanowicz A., Kajewski I., Olearczyk D., Dannowski R., Steidl J.: Badania dopływu zanieczyszczeń obszarowych do rzek zlewni Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 339, Konf. XXI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Mioduszewski W., Dannowski R., Deumlich D., Radczuk L., Olearczyk D., Kajewski I.: 2002. Ocena zanieczyszczenia obszarowego w dorzeczu Odry. Obieg wody w zmieniającym się środowisku, Prace Inst. Geograf. AŚ, Kielce.
- Mokwa M., Radczuk L.: 2005. Analiza stanów minimalnych dla wstępnej oceny przebiegu suszy hydrologicznej. Przegl. Nauk., R. XIV z. 1131 SGGW, Warszawa.
- Musiał E.: 2001. Modelowanie procesu ewapotranspiracji rzeczywistej i prognozowanie jego tendencji. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 412, Rozpr. CLXXXII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Olearczyk D.: 2000. Zależności regionalne przepływów maksymalnych w dorzeczu górnej i środkowej Odry. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR Wrocław.
- Olearczyk D.: 2001. Regionalne zależności przepływów maksymalnych w dorzeczu górnej i środkowej Odry, Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 413, Inż. Środ. XIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Ozga-Zielińska M.: 1975. Struktura i funkcje operatorów modeli systemów hydrologicznych. Wyd. Meteorologii i Gospodarki Wodnej, t. II (XXIII) z. 1, Warszawa.
- Ozga-Zielińska M.: 1976. Metody opisu i analizy systemów hydrologicznych. Pr. Nauk., Politechnika Warszawska, Warszawa.
- Ozga-Zielińska M.: 1990. Nizówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie, Przegląd Geofizyczny, Rocznik XXXV, z. 1–2, Warszawa.

- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J.: 1997. Hydrologia stosowana. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Ozga-Zieliński B.: 2002. Metody Gradex – KC i Gradex – ZN obliczenia największych przepływów pory letniej o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w sytuacji niepełnych danych pomiarowych przepływów. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, z. 21, Warszawa.
- Partyka D.: 1998. Metody pośrednie określania parowania terenowego. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 349, Inż. Środ., Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Partyka D.: 1999. Kształtowanie się parowania terenowego w zlewni rolniczej Ciesielska Woda w półroczu letnim. Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
- Parzonka W., Radczuk L., Eliasiewicz R., Mokwa M.: 2000. Modeling of the Flood Passage Through Wrocław Hydrotechnic system. Kessel Reports of Hydraulic Engineering, nr 9 / 2000.
- Parzonka W., Mokwa M., Pływaczyk L., Serafin S.: 1991. Geodezyjne i hydrauliczne badania procesu erozji rzeki Odry poniżej stopnia w Brzegu Dolnym. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXIX, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Parzonka W.: 1994. Koncepcja zagospodarowania Górnej i Środkowej Odry z uwzględnieniem wymogów ochrony środowiska i sztucznego zasilania rzeki w rumowisko wlezione poniżej ostatniego stopnia. Międzyregionalna Agencja Doradztwa Odry. Biuletyn 11.
- Parzonka W.: 1995. Gospodarka wodna w dolinach rzek zdegradowanych na przykładzie środkowej Odry. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Konf. X, Inż. Środ., t. 1, nr 270, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Parzonka W., Mokwa M., Banasiak R., Kasperek R.: 1997. Sediment transport in Middle Odra below the channalized river sector. 9<sup>th</sup> International conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Kraków, Polska.
- Parzonka W., Mokwa M., Banasiak R., Kasperek R.: 1999. Preliminary estimation of the influence of the 1997 – flood on the Middle odra river bed. 7<sup>th</sup> Conference „Problems of Hydroengineering” Wrocław – Łądek – Zdrój.
- Parzonka W., Radczuk L., Banasik R., Głowski R., Kasperek R., Krasicki J.: 2000. Wstępna ocena przepustowości doliny rzeki Widawy w obrębie międzywala letniego. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Inż. Środ. XI, nr 385, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Parzonka W.: 2004. Flow resistance and transport ratek In alluvial rivers. 12<sup>th</sup> Conference *Transport and Sedimentation of Solid Particles*. Prague, Scientific Papers of the Agricultural University of Wrocław, nr 481.
- Radczuk L.: 1965. Ustalenie miarodajnego przepływu do regulacji Nysy Kłodzkiej od źródeł do zbiornika wodnego w Otmuchowie. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 61, Melior. X, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczuk L.: 1972. Statystyczne krzywe opadania jako charakterystyka przepływów niskich w potokach i rzekach górskich, Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
- Radczuk L.: 1975. Nomogram do transponowania natężenia przepływu i czasu trwania deszczu ze stacji Wrocław do zlewni niekontrolowanych na Dolnym Śląsku. Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, nr 115, Melior. XXI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.

- Radczyk L.: 1978. Transformacja fali powodziowej na nieskanalizowanym odcinku rzeki Odry metodą Muskingum. Wyd. Komisji Nauk o Ziemi PAN, Wrocław.
- Radczyk L., Wołoszyn J., Gałoński B., Szczegielniak Cz.: 1981 a. Przepływy maksymalne Odry. *Gospodarka Wodna*, z. 9–10.
- Radczyk L., Soczyńska U., Ostrowski J.: 1981 b. Opracowanie regionalnego modelu zlewni na podstawie modelu Stanford IV. *Wiadomości IMGW*, z. 1–2.
- Radczyk L., Chomicz J., Eliasiewicz R.: 1984. Model transformacji fali powodziowej na Odrze. *Archiwum Hydrotechniki*, z. 4.
- Radczyk L., Chomicz J.: 1985. Zastosowanie rozkładu Johnsons – typ  $S_B$  do opisu przepływów średnich w rzekach. *Przegląd Geof.*, z. 3.
- Radczyk L., Chomicz J.: 1985. Transformacja fali powodziowej metodą Muskingum. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 154, Melior. XXVII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L., Chomicz J.: 1985. Zastosowanie złożonego łańcucha Markowa do modelowania hydrologicznych szeregów czasowych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 154, Melior. XXVII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L.: 1986 a. Zlewnia rolnicza jako system dynamiczny. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 57, Rozpr., Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L., Szarska O.: 1986 b. Ocena warunków zasilania Odry środkowej wodami gruntowymi, *Przegląd Geofizyczny, Rocznik XXXI*, z. 2, PWN, Warszawa.
- Radczyk L.: 1991. Niektóre zagadnienia adaptacji modeli hydrologicznych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 209, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L.: 1994. Krzywe opadania jako charakterystyka przepływów niskich górskiej zlewni rzeki Bobru, *Problemy Hydrologii Regionalnej, Materiały Ogólnopolskiej Konferencji Hydrograficznej, Karpacz*.
- Radczyk L., Jakubowski W., Szulczewski W., Czamara A.: 1994. Model integralny zlewni rolniczej. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej, PAN, Warszawa*.
- Radczyk L.: 1996 a. Doświadczenia szkoły „Współczesne zagadnienia hydrologii”. *Materiały Komitetu Gospodarki Wodnej, PAN, Warszawa*.
- Radczyk L., Eliasiewicz R., Mokwa M.: 1996 b. Określenie warunków przepływu wielkich wód w korytach i dolinach rzecznych. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 301, Inż. Środ. VIII, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L., Szczegielniak Cz., Olearczyk D.: 1997 a. Propozycja jednolitego schematu inwentaryzacji małej retencji. *Gospodarka Wodna*, z. 3.
- Radczyk L.: 1997 b. Informacja hydrologiczna dla celów projektowania małych zbiorników retencyjnych. *Konferencja Mała retencja wodna, Sielphia*.
- Radczyk L., Dubicki A., Olearczyk D.: 1998 a. System for Flood Protection in Odra River Basin – its efficiency during flood of 1997. *Int. Agrophysics*, 12.
- Radczyk L., Eliasiewicz R., Grünewald U., Dąbrowski R.: 1998 b. Przyczyny, przebieg i skutki powodzi z lipca 1997 w dorzeczu Odry, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 339, Konf. XXI, t 2, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczyk L., Tokarczyk T.: 1998 c. Ochrona przeciwpowodziowa Ziemi Kłodzkiej. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 339, Konf. XXI, t. 2, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.

- Radczuk L., Eliasiewicz R., Mokwa M., Czamara W.: 1998 d. Studium hydrologiczno-ekologiczne rzeki Sinicy i Sufragańca. Problemy ochrony przestrzeni dolin rzecznych Sinicy i Sufraganca. Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce.
- Radczuk L.: 2000 a. Rola zlewni eksperymentalnych w badaniach interdyscyplinarnych. Zesz. Nauk. AR we Wroc., nr 385, Inż. Środ. XI, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Radczuk L., Eliasiewicz R., Jełowicki J., Mokwa M., Winter J.: 2000 b. Symulacja przepływu w korytach otwartych Wrocławskiego Węzła Wodnego. XX Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki, Kraków–Ustroń.
- Radczuk L., Szymkiewicz R., Jełowicki J., Żyszkowska W., Brun J.-F.: 2001. Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego. Oficyna Wydawnicza README, Łódź.
- Radczuk L., Eliasiewicz R., Jełowicki J., Olearczyk D.: 2002. Wariantowe rozwiązania ochrony przeciwpowodziowej górnej i środkowej Odry. Program zrównoważonego rozwoju i wykorzystania Odry. Politechnika Wrocławska, Wrocław.
- Radczuk L., Czamara A., Czamara W.: 2003 a. Ochrona od powodzi w Sudetach, Zesz. Nauk. Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, z. 9, nr ser. 4, Bielsko Biała.
- Radczuk L., Tiukalo A., Eliasiewicz R., Kostecki S., Machajski J., Markowski J., Olearczyk D.: 2003 b. Studium ochrony przed powodzią Kotliny Kłodzkiej ze szczególnym uwzględnieniem miasta Kłodzka. WARR, Wrocław.
- Radczuk L., Jakubowski W.: 2005. Udział dopływów Odry w formowaniu się wezbrań powodziowych. Wyd. Kom. Ochr. Przyr., PAN, Warszawa.
- Radczuk L., Markowska J.: 2006 a. Podstawy ekologiczne i hydrologiczne projektowania zbiorników. Problemy Hydrotechniki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław.
- Radczuk L., Drabinski A., Mokwa M., Markowska J., Olearczyk D., Gromada O., Pikul K., Malczewska B.: 2006. Program małej retencji wodnej w województwie dolnośląskim – doświadczenia i perspektywy. Wydawnictwo AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Soczyńska U.: 1997. Hydrologia dynamiczna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Stachy J., Biernat B., Dobrzyńska I.: 1977. Odływ rzek polskich w latach 1951–1970, Gospodarka Wodna, nr 3/77.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R.: 2002 a. The water erosion process on the background of outflow conditions changes in upland catchment. Geografický Časopis 54 4/2002.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R.: 2002 b. Ocena zamulania małych zbiorników wodnych zlokalizowanych w silnie erodowanej zlewni rolniczej. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., z. 487, Warszawa.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R.: 2003 a. Land degradation in Poland [w:] Land Degradation in Central and Eastern Europe. R.J.A Jones and L. Montanarella (eds.), European Soil Bureau Research Report No. 10, EUR 20688 EN, (2003), 324 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Szewrański S., Sasik J., Żmuda R.: 2003 b. Impact of small reservoirs on the stream sediment yield evaluation. ICWSS, Brno–Úbislav.



- Szewrański S., Sasik J., Wawer R., Żmuda R.: 2008. Propozycje rolnośrodowiskowego zagospodarowania przestrzennego zlewni w aspekcie ochrony gruntów rolnych przed erozją wodną. *Przegląd Naukowy. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, z. 2 (40).
- Szulczewski W.: 1988. sterowanie stopniem wilgotności gleby w obszarze ukorzenia gleby. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXX*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Szulczewski W.: 1989. Matematyczny model określania stref wody z gleby porośniętej trawnikami. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXXIII*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Szulczewski W.: 1990. Metoda matematyczna wyznaczania parametrów fizycznych gleby. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu, Melior. XXXIV*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Ślusarz A.: 1988. Model dynamiczny spływu powierzchniowego. (Rozprawa doktorska – maszynopis), AR Wrocław.
- Tokarczyk T.: 1999. Dynamika zasobów wód powierzchniowych i gruntowych na obszarze Kotliny Kłodzkiej. Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
- Tokarczyk T.: 2001 a. Zmienność przepływów niskich na obszarze Kotliny Kłodzkiej, *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 413, *Inż. Środ. XII*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Tokarczyk T.: 2001 b. Występowanie niżówek na obszarze Ziemi Kłodzkiej. *Wiad. IMGW*, t. XXIV (XLV), z. 2.
- Tokarczyk T., Jakubowski W.: 2006. Temporal and spatial changeability of drought in mountain catchments of Nysa Kłodzka basin. *IAHSH Publ.*, 308.
- Tokarczyk T., Adynkiewicz-Piragas M.: 2003 Susze w górskich zlewniach Sudetów. *Zesz. Nauk. Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej*. z. 9, nr s. 4, Bielsko Biała.
- Tokarczyk T., Dubicki A., Kupczyk E., Suligowski R.: 2005. Assessment of drought potential risk for Upper and Middle Odra Watershed. EGU, Vienna, Austria.
- Wiatkowski M., Czamara W., Kuczewski K.: 2006. Wpływ zbiorników wstępnych na zmiany jakości wód retencjonowanych w zbiornikach głównych, Monografia, IPIŚ PAN, Zabrze.
- Urbański I.: 1989. Kryterium hydrologiczne do określania pojemności użytkowej zbiornika o sezonowym wyrównaniu odpływu na przykładzie Odry w Raciborzu. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 180, *Melior. XXXII*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Urbański M.: 2006 Ocena zagrożenia powodziowego w zlewniach górskich na przykładzie zlewni Białej Łądeckiej. Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
- Winter G., Winter J., Radczuk L.: 2002. Powódź a infrastruktura komunalna. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, nr 437, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Wołoszyn J.: 1964 Probabilistyczna metoda obliczania natężenia deszczów na przykładzie Wrocławia. *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, z. 58.

- Wołoszyn J., Radczuk L.: 1972. Próba statystycznego wyznaczenia krzywej opadania przepływów w potokach i rzekach górskich na podstawie hydrogramu naturalnego. *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, z.10, Wydawnictwo PAN, Warszawa.
- Wołoszyn J., Czamara W.: 1975. Próby ustalenia metodyki określania współczynnika spływu powierzchniowego dla celów górnictwa odkrywkowego. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu. Melior. XXI*, Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Wołoszyn J., Czamara W.: 1980. Metodyka badań spływu powierzchniowego na terenach objętych działalnością górnictwa odkrywkowego węgla brunatnego. *Acta Universitatis Lodziensis. Seria I*, z. 28, Łódź.
- Wołoszyn J., Czamara W., Eliasiewicz R., Krężel J.: 1994. Regulacja rzek i potoków. Wyd. AR we Wrocławiu, Wrocław.
- Zdanowicz A., Krauze K., Wagner-Łotkowska I., Markowska J., Markowski J. 2004. Chapter 5, Land–water interaction: How to assess their effectiveness. w *Integrated Watershed Management–Ecohydrology & Phytotechnology–Manual*. UNESCO.
- Zaleski J., Winter J.: 2000. Strategia modernizacji odrzańskiego systemu wodnego. PWN, Wrocław–Warszawa.
- Zalewski M., Janauer G. red.: 1997. Ecohydrology. JHPV, Technical Documents in Hydrology, 7, UNESCO, Paris.
- Zdralewicz M.: 2003. Ocena zmienności oporów ruchu w korycie rzeki Bóbr na odcinku Pilchowice–Żagań. Rozprawa doktorska, AR Wrocław.
- Zelenhasic A.: 1985, Analiza malih recnih voda, Posebna izdanje Sveska 3, Novi Sad.
- Zelenhasic A., Salvai A.: 1987. A method of streamflow drought analysis, *Water Resources Research* 23 (1).
- Żmuda R., Sasik J., Szewrański Sz.: 2005. Analiza potrzeb zmian zagospodarowania przestrzennego regionu Wzgórz Trzebnickich w aspekcie przeciwozyjnego sposobu użytkowania terenu. *Acta Agrophysica* 5(1).
- Żmuda R., Szewrański S., Sasik J., Wawer R.: 2006. Erozja wodna gleb na przykładzie geosystemu zlewni Mielnicy. *Roczniki AR w Poznaniu CCCLXXV, Rolnictwo* 65, Poznań.
- Żmuda R., Szewrański S., Sasik J.: 2008. Kształtowanie się wilgotności gleby na erodowanym stoku Wzgórz Trzebnickich. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, z. 526, Warszawa.

## HYDROLOGICAL PROCESS MODELLING IN UPPER AND MIDDLE Odra RIVER BASIN

### S u m m a r y

The monograph contains the review of the most important studies which have been carried out within years 1965 -2007 by TEAM that has been formed by researchers from some units of Wrocław University of Life and Environmental Sciences (Environmental Engineering Institute, Chair of Mathematics, Chair of Agro and Hydrometeorology, Faculty Computers Laboratory) , the relevant units of Wrocław University of Technology, as well as from Institute of Meteorology and Water Management and from Bureau of Studies and Designs "Hydroprojekt".

The book presents the rainfall-runoff model of catchment with lumped parameters and integral model with distributed parameters. Hydraulic processes describing the water movement in river network and on the catchment surface as well as the filtration processes in the porous medium has been described using partial differential equations. In view of non-homogenous treatment of particular processes (degree of recognition and detailed description of particular processes), the models are divided into two groups: basic – for endogenic variables and parametric – for exogenic ones. The initially – boundary conditions in the three-dimensional area are obtained using the decomposition method. An interactive connections among the respective equations are obtained by suitable application of the boundary conditions and source functions. The water mass balance in the all modeled area is maintained. The data from the experimental catchment of Ciesielska Woda are used for testing computations.

Author presents some problems related to the necessity of interdisciplinary studies on processes taking place in the natural environment.

The monographic book contains also an assessment of existing and designed flow capacity of Wrocław Water System and of river Widawa valley. The hydraulic calculations are made by the dynamic model SiReN for catastrophic discharge 3530 m<sup>3</sup>/s. The simulations have been performed for three different alternatives of discharge distributions in Bartoszowice knot. The discharge capacity of the Odra-Widawa channel and of river Widawa valley increases distinctly after modernization. The variability of the velocity characteristics  $K_V$  and of the flow module  $K_Q$  for Widawa river, concerning the design line of the winter flood banks are also estimated.

In the submitted monograph some other issues are also presented:

- Range of works and activities of Wrocław scientific and engineer's circle in the field of flood protection. The realized up to the present works are described, mainly concerning flood hazard zones determination. The suitable regulations concerning a

planning with regard to flood hazard zones in such domains as flood protection, spatial planning or planning in extreme threat situations.

- Experiences and perspectives relating to small water retention in Lower Silesia voivodship. An attention is paid to deep knowledge and tradition of Faculty of Environmental Engineering and Geodesy, which accompany and is used in water management problems solving, particularly in small water retention as an element of water balance improvement in agricultural catchments. Actual program of small retention with its main goal, assumptions and localization criterions is broadly described.
- Estimation of relationship between a flow resistance and bed load transport in the middle Odra river basin. Results of hydrometric and sediment transport measurements in free flowing Odra river at section downstream the last barrage in Brzeg Dolny have been analyzed. Hydraulic parameters of stream, flow resistance and characteristics related to bed material movement in the river Odra have been estimated. Real values of roughness coefficients with theoretical ones obtained using Yalin method modified by Ramez have been compared.

Dissertations made by members of TEAM as measurable property are presented.

**Key words:** rainfall-runoff model of catchment, flood hazard zones, flood protection, small water retention, low flow in river

## MODELOWANIE PROCESÓW HYDROLOGICZNYCH W DORZECZU GÓRNEJ I ŚRODKOWEJ ODRY

### Streszczenie

Monografia zawiera przegląd ważniejszych opracowań naukowych, wykonanych na przestrzeni lat 1965–2007, przez Zespół, który tworzyli pracownicy Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu z Instytutu Inżynierii Środowiska, Katedry Matematyki, Katedry Agro- i Hydrometeorologii, z Wydziałowego Laboratorium Komputerowego oraz odpowiednich Katedr Politechniki Wrocławskiej, z IMGW i z Hydroprojektu.

W opracowaniu przedstawiono model zlewni typu opad–odpływ o parametrach skupionych oraz integralny model o parametrach rozłożonych. Procesy hydrauliczne opisujące ruch wody w sieci rzecznej i na powierzchni zlewni oraz procesy filtracyjne, związane z przepływem wody w ośrodku porowatym, opisano równaniami cząsteczkowymi. Ze względu na niejednorodny stopień rozpoznania i szczegółowość opisu poszczególnych procesów wprowadzono podział modeli tworzących system na podstawowe – dla zmiennych endogenicznych i parametryczne – dla zmiennych egzogenicznych. Badając problemy początkowo-brzegowe w zadanym obszarze trójwymiarowym, zastosowano metodę dekompozycji. Jedno- i dwuwymiarowe rozwiązania zostały „zsyte” na wewnętrznych granicach przy użyciu warunków brzegowych funkcji źródłowych, przy czym w całym obszarze modelowanego obiektu zachowano bilans masy wody. Obliczenia testowe przeprowadzono, wykorzystując dane ze zlewni doświadczalnej Ciesielska Woda.

W pracy przedstawiono problemy związane z potrzebą i organizacją badań interdyscyplinarnych procesów zachodzących w środowisku naturalnym. Zawiera ona również ocenę aktualnej i planowanej przepustowości Wrocławskiego Węzła Wodnego oraz doliny Widawy. Obliczenia hydrauliczne wykonano za pomocą dynamicznego modelu SiReN dla przepływu katastrofalnego 3530 m<sup>3</sup>/s. Symulacje przeprowadzono dla trzech wariantów rozdziału wód w węźle Bartoszowickim. Przepustowość kanału Odra–Widawa i doliny Widawy wyraźnie rośnie po ich modernizacji. Oceniono również zmienność charakterystyki prędkości  $K_v$  i modułu przepływu  $K_Q$  rzeki Widawy dla projektowanej trasy wałów zimowych.

W przedkładanej monografii przedstawiono również:

- Zakres prac i działalności wrocławskiego środowiska naukowego i inżynierskiego w zakresie ochrony przed powodzią. Omówiono dotychczas zrealizowane przedsięwzięcia, w głównej mierze związane z wyznaczaniem stref zagrożenia powodziowego. Przedstawiono unormowania prawne dotyczące planowania z uwzględnieniem stref zalewowych w takich obszarach, jak ochrona przed powodzią, planowanie przestrzenne czy planowanie w sytuacjach nadzwyczajnych zagrożeń.

- Doświadczenia i perspektywy odnośnie do małej retencji w województwie dolnośląskim. Zwrócono uwagę na głęboką wiedzę i tradycję Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, która towarzyszy i jest wykorzystywana przy rozwiązywaniu zagadnień z zakresu gospodarki wodnej, a szczególności małej retencji jako elementu poprawy bilansu wodnego zlewni rolniczej. Szeroko omówiono aktualny program małej retencji dla województwa, przedstawiając jego główne cele, założenia i kryteria lokalizacji.
- Ocenę zależności pomiędzy oporami ruchu w dorzeczu Odry Środkowej a ruchem rumowiska wlezonego. Przeanalizowano wyniki pomiarów hydrometrycznych oraz transportu rumowiska w Odrze na odcinku wolno płynącym, poniżej ostatniego stopnia wodnego w Brzegu Dolnym. Ocenie poddano parametry hydrauliczne strumienia, opory przepływu oraz charakterystyki związane z ruchem materiału dennego w rzece. Porównano rzeczywiste wartości współczynników szorstkości z teoretycznymi wartościami otrzymanymi na podstawie metody Yalina zmodyfikowanej przez Ramsza.

Jako wymierny dorobek Zespołu zaprezentowano rozprawy habilitacyjne i doktorskie jego członków.

**Słowa kluczowe:** model opad-odpływ dla zlewni, strefy zagrożenia powodziowego, ochrona od powodzi, mała retencja, niskie przepływy w rzekach