

Mariusz Kistowski

**WPLYW STRUKTURY ŚRODOWISKA
PRZYRODNICZEGO ZLEWNI NA STAN CZYSTOŚCI
JEZIOR (NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH
ZLEWNI I JEZIOR POJEZIERZA SUWAŁSKIEGO
I RÓWNINY AUGUSTOWSKIEJ)¹**

The relations between landscape structure of catchments
and physico-chemical & biological state of lakes
(case study area: Suwałki Lake District & Augustów Plain)

Wprowadzenie

Jednym z najostrzejszych przejawów degradacji środowiska przyrodniczego, będącej skutkiem antropopresji, jest zanieczyszczenie wód powierzchniowych, w tym jezior. Powszechnie znane są podstawowe przyczyny pogarszania się stanu czystości jezior, do których należą:

- odprowadzanie nieoczyszczonych ścieków komunalnych i przemysłowych do wód i gleby;
- nadmierna chemizacja środowiska, przejawiająca się w stosowaniu dużych ilości nawozów mineralnych i środków chemicznych w gospodarce rolnej i leśnej;
- masowy ruch turystyczny, przekraczający granicę pojemności środowiska przyrodniczego, naruszający strukturę ekologiczną zbiorników wodnych;
- zmiany w strukturze środowiska przyrodniczego zlewni jeziornych, przejawiające się przede wszystkim w zmianach struktury użytkowania gruntów, a w pewnym stopniu także gleb i przypowierzchniowej warstwy litosfery oraz związanych z nimi zmianach rzeźby terenu.

1. Opracowanie wykonano w ramach projektu badań własnych Uniwersytetu Gdańskiego nr BW-1220-5-0241-6

Artykuł niniejszy zajmuje się rozpoznaniem wpływu ostatniego z wymienionych czynników na zmiany czystości jezior. Badania wpływu struktury krajobrazu na stan jezior (termin „krajobraz” stosowany jest w artykule jako synonim terminu „środowisko przyrodnicze”) podejmowane były w ostatnich kilkunastu latach przez wielu autorów, jednak prowadzono je z reguły na gruncie ekologii lub limnologii fizycznej oraz biologicznej, koncentrując się na ujęciach hydrobiologicznych lub hydrograficznych (Kajak 1979; Bajkiewicz-Grabowska 1985, 1987; Giercuskiewicz-Bajtlik 1987; Hilbricht-Ilkowska (red.) 1989; Kudelska, Cydzik, Soszka 1992; Zdanowski (red.) 1992; Hilbricht-Ilkowska, Wiśniewski (red.) 1994). Prace te dotyczyły w większości zmienności składu chemicznego wód jeziornych w zależności od parametrów hydrograficznych jezior i ich zlewni lub też wybranych zmiennych struktury krajobrazu zlewni, koncentrując się najczęściej na charakterze szaty roślinnej, a rzadziej na innych parametrach tej struktury.

Potrzeba kompleksowego ujęcia wpływu struktury środowiska przyrodniczego zlewni na stan jezior wynika z roli tych zbiorników w krajobrazie. Oprócz funkcji podstawowej, jaką jest regulowanie równowagi środowiska przyrodniczego, tak w aspekcie ekologicznym (w odniesieniu do przyrody żywej), jak i hydrologicznym oraz topoklimatycznym, stan czystości jezior wpływa w istotny sposób na realizację wielu działań człowieka, takich jak:

- rekreacja;
- gospodarka rybacka;
- gospodarka wodna.

Rozpoznanie współzależności pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni a czystością jezior może ułatwić formułowanie zaleceń co do kształtowania tej struktury, co w konsekwencji może prowadzić do poprawy stanu czystości jezior.

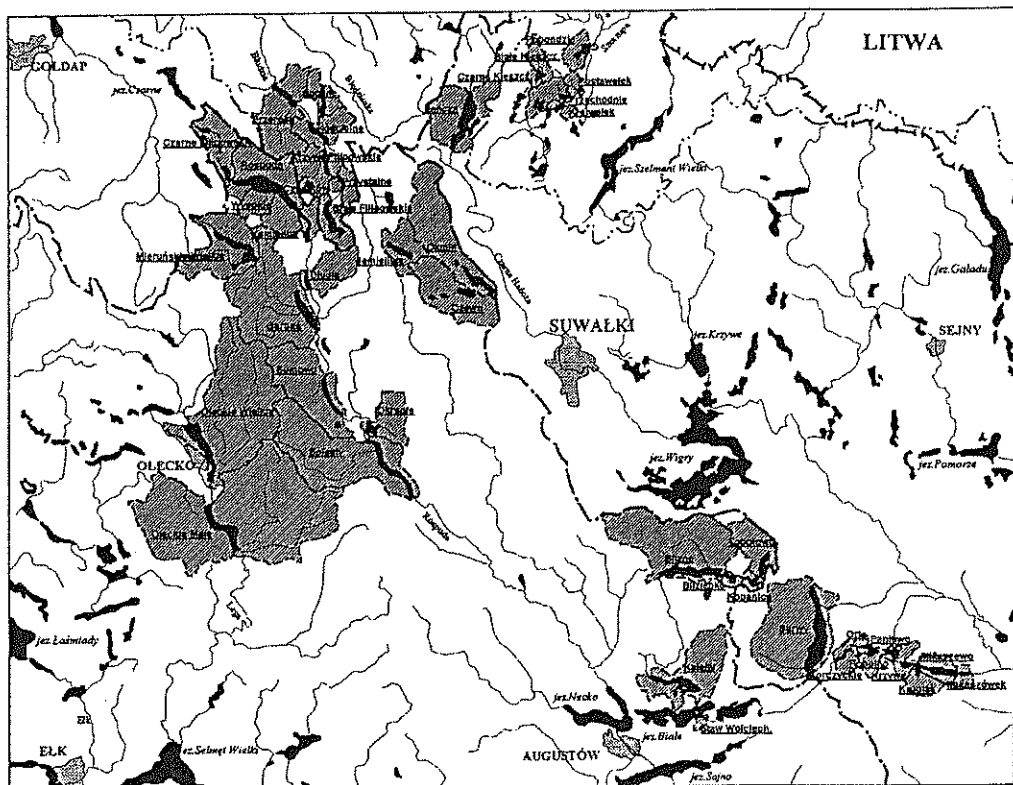
Cel badań

Celem opracowania jest wykazanie, czy istnieją i jaki mają charakter związki pomiędzy strukturą środowiska przyrodniczego zlewni a stanem czystości jezior. Cel ten wynika z podstawowej hipotezy zakładającej, że istnieje, dający się wykazać metodami statystycznymi związek pomiędzy niektórymi elementami krajobrazu i istniejącymi pomiędzy nimi powiązaniem (strukturą materialną i funkcjonalną) a stanem czystości jezior, wyrażonym parametrami chemicznymi i biologicznymi wód.

Ten cel nadrzędny wymaga realizacji kilku celów pośrednich, a mianowicie:

- charakterystyki struktury przestrzennej krajobrazu zlewni, poprzez określenie jej parametrów z wykorzystaniem metod kompleksowej geografii fizycznej;
- oceny stanu czystości jezior (z wykorzystaniem materiałów archiwalnych WIOŚ w Suwałkach);
- rozpoznania uwarunkowań hydrologicznych koncentracji zanieczyszczeń w jeziorach.

Dla weryfikacji hipotezy wybrano 44 obiekty (jeziora i zlewnie) położone w województwie suwalskim (ryc.1), na obszarze Pojezierza Suwalskiego i Równiny Augustowskiej w dorzeczach: Niemna (zlewnie Bludzi, Szeszupy i Czarnej Hańczy) oraz Wisły (zlewnie Rospudy i Legi). Przy wyborze obszarów badań kierowano się jak największym zróżnicowaniem struktury środowiska przyrodniczego zlewni oraz cech ustroju hydrologicznego jezior, a także dostępnością wyników badań fizykochemicznych i biologicznych wód w tych zbiornikach.



Ryc. 1. Położenie badanych zlewni i jezior
Fig. 1. Situation of study catchment areas & lakes

Źródła danych

Do realizacji opracowania niezbędne było wykorzystanie wielu materiałów kartograficznych i archiwalnych. Do delimitacji geokompleksów, czyli podstawowych, względnie homogenicznych jednostek krajobrazu, które stanowiły podstawę do analizy i oceny struktury środowiska przyrodniczego, wykorzystano:

- mapy topograficzne w skali 1:25.000 w układzie GUGiK 1965 (do wyznaczenia krajobrazów elementarnych-funkcjonalnych typów rzeźby terenu oraz typów użytkowania terenu);
- mapy glebowo-rolnicze gmin województwa suwalskiego w skali 1:25.000 uzyskane z Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Suwałkach (do określenia litologii płytkiego podłoża geologicznego na terenach nieleśnych);
- operaty urządzania lasu i mapy leśne w skali 1:20.000 nadleśnictw północno-wschodniej części województwa suwalskiego uzyskane z Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Białymstoku (do określenia charakteru podłoża geologicznego na terenie lasów państwowych).

Ponadto dokonano aktualizacji informacji o użytkowaniu terenu w oparciu o własne kartowanie terenowe.

Dane o parametrach morfometrycznych zbiorników (powierzchnia, głębokość maksymalna i średnia, objętość) zaczerpnięto z planów batymetrycznych i kart jezior opracowanych przez Instytut Rybactwa Śródlądowego w Olsztynie, natomiast dane o stanie czystości wód jezior pochodzą z pomiarów wykonanych w latach 1986-92 przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Suwałkach.

Ponadto, w trakcie prac terenowych, wykonano dokumentację fotograficzną badanych jezior i ich zlewni bezpośrednich w celu ukazania różnic w fizjonomii krajobrazu (przede wszystkim w rzeźbie i użytkowaniu terenu) badanych obiektów.

Przyrodnicze uwarunkowania wpływu struktury krajobrazu zlewni na stan czystości jezior

Podstawowymi czynnikami warunkującymi tempo dostawy i wielkość ładunku materii dostarczanej ze zlewni do jezior są:

- stopień nachylenia stoków oraz ich długość;
- przepuszczalność powierzchniowych utworów geologicznych;
- charakter pokrywy roślinnej;
- warunki klimatyczne, a przede wszystkim rozkład w czasie opadów atmosferycznych i tempo topnienia pokrywy śnieżnej.

O ile istniejąca sieć stacji i posterunków meteorologicznych nie pozwala na dostatecznie wiarygodne określenie zmienności warunków meteorologicznych w przestrzeni, to trzy pierwsze z wymienionych czynników uwzględniono w charakterystyce struktury krajobrazu badanych zlewni.

Podstawowy proces wzmagający transport materii do jezior to wodna erozja powierzchniowa. Zasadniczy wpływ na jej intensywność ma spadek terenu, w związku z czym:

- krajobrazy depozycji domknięte i względnie domknięte są zagrożone erozją w stopniu minimalnym;
- krajobrazy zasilania i złożone zagrożone są erozją słabą;
- krajobrazom tranzytowym o mniejszej intensywności procesów zagraża erozja średnia;
- krajobrazom tranzytowym o większej intensywności procesów zagraża erozja silna.

Przykładowo Z. Kajak (1979) podaje, że przy spadkach 10^0 z pola ornego w ciągu roku eroduje średnio 1mm warstwy glebowej, odpowiadający 10-12 tonom z hektara, co daje (przy zawartości w glebie 0,1% fosforu i 0,1-0,2% azotu) 10 kg fosforu i 10-20 kg azotu z hektara w jednym roku.

W odniesieniu do powierzchniowych utworów geologicznych, większa infiltracja sprzyja wzrostowi zagrożenia dostawą związków biogennych do jezior. Według badań w/w autora, straty azotu z pola uprawnego przy przesiąkaniu 250mm warstwy wody w ciągu roku wynoszą około $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ w glebach piaszczystych, 18 — przy glebach piaszczysto-gliniastych i 6 — przy gliniastych. Tu jednak, należy brać pod uwagę, że do wód powierzchniowych nie dociera całość wymywanych związków biogennych, ponieważ część z nich jest zatrzymywana w wodach gruntowych i powierzchniowych utworach geologicznych. Zdarzają się więc sytuacje, że długa droga biogenów infiltrujących przez podłoże geologiczne jest korzystniejsza z punktu widzenia stanu czystości jezior, niż występowanie utworów nieprzepuszczalnych, zwłaszcza w lokalizacjach bliskich zbiornikom na silnie nachylonych stokach (np. w przypadku jezior rynnowych).

Istotny udział szaty roślinnej w regulowaniu ilości materii migrującej ze zlewni do jezior przejawia się w retencyjnej roli roślin i ekosystemów. Najkorzystniejszą rolę pełnią tu lasy

zatrzymujące największe ilości biogenów oraz tereny bagienne, a największym źródłem nutrientów, poza terenami poddanymi silnej antropopresji, są ugorowane pola uprawne (tab.1, tab.2, za Kajakiem 1979).

Analizując w dalszej części opracowania wpływ struktury krajobrazu na stan czystości jezior trzeba mieć na uwadze synergiczne działanie wyżej wymienionych czynników. Aspekt ten można uwzględnić dzięki syntetycznemu ujęciu struktury środowiska przyrodniczego, polegającemu na wydzieleniu jednostek strukturalnych — geokompleksów oraz analizie tych jednostek przy zastosowaniu metod kompleksowej geografii fizycznej.

Tabela 1. Migracja nutrientów do wód ($\text{kg ha}^{-1} \text{rok}^{-1}$) ze zlewni o różnym charakterze użytkowania

Table 1. Nutrients flow to fresh water ($\text{kg ha}^{-1} \text{year}^{-1}$) from catchments with different patterns of land use

Typ użytkowania terenu w zlewni	Azot	Fosfor
leśny	0,0–0,6	0,05
łąkowy i pastwiskowy	2,0–22,0	0,08–4,6
uprawy z roślinnością	2,0–24,0	0,4
uprawy ugorowane	33,0–185,0	0,56–2,5
miejski	1,1–9,3	0,97–5,3

źródło: Kajak (1979)

Tabela 2. Koncentracja nutrientów w jeziorach ($\text{mg dm}^{-3} \text{rok}^{-1}$) według źródeł pochodzenia

Table 2. Nutrients concentration in lakes ($\text{mg dm}^{-3} \text{year}^{-1}$) according to their sources

źródło pochodzenia nutrientów	Azot	Fosfor
opady atmosferyczne	1,2–1,3	0,02–0,04
las	0,3–1,8	0,01–0,11
łąki	–	0,09
pola uprawne	9	0,02–1,7
tereny miejskie (spływ wód deszczowych)	3	0,2–1,1
ścieki komunalne	25–35	5–20
ścieki przemysłowe m.in. z młeczarni, gorzelni	ok. 150	ok. 50
przeziaki ze składowisk odpadów	1800–2350	190–280
gnojowica	1000–9000	50–3000

źródło: Kajak (1979)

Metody zastosowane w opracowaniu

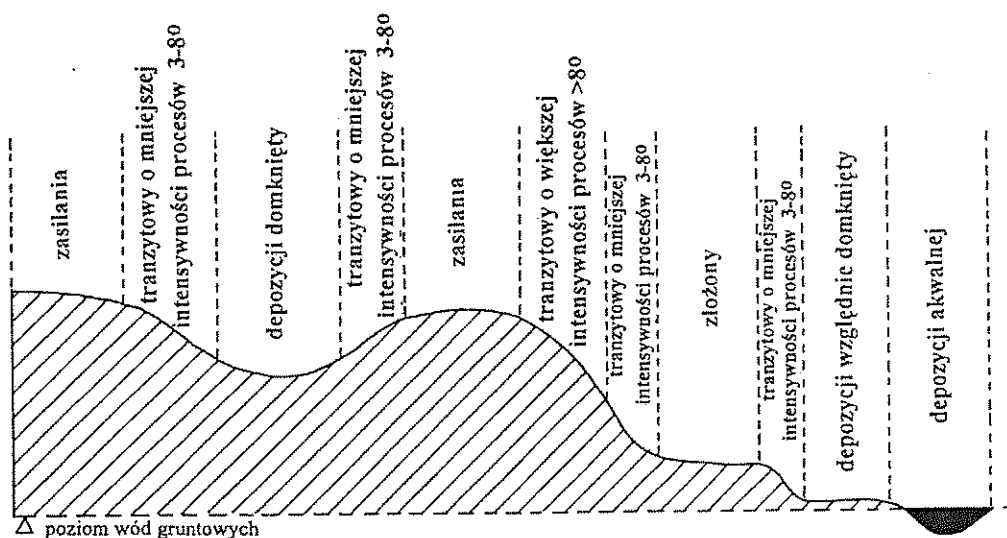
Ze względu na trój etapowość pracy, także charakteryzowane poniżej metody zostały podzielone na trzy grupy:

- metody badania struktury przestrzennej środowiska przyrodniczego zlewni jeziornych;
- metody oceny cech hydrologicznych oraz wskaźników fizykochemicznych i biologicznych stanu wód;
- metody badania związków pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni a stanem czystości jezior.

Istotne dla toku realizacji pracy jest założenie, że odmiennie kształtują się związki pomiędzy stanem czystości jezior a strukturą krajobrazu zlewni bezpośrednich i zlewni całkowitych jezior. Za zlewnię bezpośrednią jeziora uznano tą część zlewni całkowitej, z której materia doprowadzana jest do zbiornika powierzchniowo (obszarowo), bez pośrednictwa cieków stałych. Zlewnia całkowita to suma zlewni bezpośredniej i zlewni cieków dopływających do danego jeziora, przy czym, jeśli jeziora zlokalizowane są kaskadowo w biegu jednego cieku (jest tak często na badanym obszarze, np. na Rospudzie lub Czarnej Hańczy) zlewnia całkowita domykana jest na wypływie cieku z jeziora położonego bezpośrednio powyżej zbiornika, dla którego delimitowana jest zlewnia. Takie postępowanie jest efektem założenia (m.in. Lange 1989), że w jeziorach jest deponowana większość materii stałej dostarczanej przez cieki i obszarowo z wyższych partii zlewni. W dalszej części opracowania wszystkie parametry struktury krajobrazu, a także ich związki ze stanem czystości jezior, określane są odrębnie dla zlewni bezpośrednich i całkowitych.

Dla wszystkich 44 jezior, na podstawie rysunku poziomicowego i sieci hydrograficznej zamieszczonych na mapie topograficznej w skali 1:25.000 oraz „Podziału hydrograficznego Polski 1:200.000” zdelimitowano topograficzne działy wodne zlewni bezpośrednich i całkowitych. Następnie w obrębie zlewni wydzielono geokompleksy, czyli jednostki krajobrazowe względnie homogeniczne z punktu widzenia składu materialnego środowiska przyrodniczego. Jako kryteria delimitacji geokompleksów wybrano dwa komponenty środowiska uznawane powszechnie za wiodące: rzeźbę terenu i powierzchniowe utwory geologiczne oraz, jako trzeci — komponent wskaźnikowy — roślinność, tu wyrażoną charakterem użytkowania (pokrycia) terenu.

Kryterium rzeźby terenu zostało wyrażone przez typy krajobrazów elementarnych, wydzielone na gruncie koncepcji geochemii krajobrazu (Perelman 1971), które można nazwać funkcjonalnymi typami rzeźby terenu. Wydzielono następujące typy krajobrazów elementarnych (ryc.2), wykorzystując terminologię wcześniej już stosowaną przez autora opracowania (Kistowski 1995):



Ryc. 2. Położenie typów krajobrazów elementarnych w stosunku do form rzeźby terenu
Fig. 2. Situation of elementary geochemical landscapes in relation to the forms of relief

1. Zasilania (autonomiczne) — wierzchowiny wzgórz i wyniesienia terenu w strefach wododziałowych, o niewielkich spadkach (0-2°), do których materia dostarczana jest tylko z atmosfery, a jej utrata następuje poprzez infiltrację i zmyw powierzchniowy;
2. Tranzytowe o większej intensywności procesów — stoki o nachyleniach powyżej 8°, najczęściej górne partie stoków, rozcięcia erozyjne i wzniesienia bez wyraźnej wierzchowiny; materia jest tu dostarczana z atmosfery oraz z obszarów zasilania i transportowana prawie w 100% ku terenom położonym niżej;
3. Tranzytowe o mniejszej intensywności procesów — obejmujące stoki o nachyleniu 3-8°, najczęściej dolne partie silnie nachylonych stoków, z dopływem materii z atmosfery i terenów wyżej położonych z dominującym transportem materii ku terenom położonym niżej oraz niewielką jej akumulacją;
4. Złożone (depozycji, transportu i zasilania) — tereny o spadkach z reguły 0-2°, ale w położeniach nieautonomicznych (podporządkowanych), najczęściej z głębokim zaleganiem wód gruntowych; zalicza się do nich dna suchych dolin i połogie podnóża stoków, a przede wszystkim wyższe terasy rzeczne, powierzchnie stożków napływowych i równin sandrowych; procesy dostawy, deponowania i transportu materii występują tu we względnej równowadze;
5. Depozycji względnie domknięte — słabo nachylone (0-2°) dna dolin, delty, równiny akumulacji organogenicznej i zastoiskowej, często będące pod wpływem wód gruntowych, z dominacją depozycji materii auto- i allochtonicznej, ale powiązane także z terenami sąsiednimi poprzez częściową migrację, głównie obiegiem wód gruntowych;
6. Depozycji domknięte — dna obszarów bezodpływowych domkniętych topograficznie i hydrologicznie ze zdecydowaną dominacją procesów depozycji materii;
7. Depozycji akwalnej — misy naturalnych i sztucznych zbiorników wodnych.

Drugie kryterium, powierzchniowe utwory geologiczne, analizowano dla 1,5-metrowego profilu pod kątem podatności na erozję (przypowierzchniowa warstwa półmetrowa) i przepuszczalności (warstwa od 0,5 do 1,5 m p.p.t.). W oparciu o te dwie cechy powierzchniowych utworów geologicznych wydzielono 21 klas, które zaprezentowano w tabeli 3.

Tabela 3. Klasyfikacja powierzchniowych utworów geologicznych dla delimitacji geokompleksów
Table 3. Classification of surficial deposits for delimitation of geocomplexes

Przepuszczalność utworów geologicznych	Podatność utworów geologicznych na erozję wodną powierzchniową				
	b. duża i duża (ż, żp, pl, pl)	średnia (ps, pli)	umiarkowana (pgl, pgm, gl, żg)	mała (gs, gc, i)	brak (t, mt, tm, g)
łatwa (ż, żg, żp)	1	6	10	X	17
średnia (pl, ps)	2	7	11	14	18
słaba (pgl, pgm, plz, gl, gs)	3	8	12	15	19
zmienna (t, mt, tm)	4	X	X	X	20
brak (gc, i- ip, ic)	5	9	13	16	21

W dalszej części pracy, w analizie związków struktury krajobrazu ze stanem czystości jezior, dla uproszczenia obliczeń, klasy wymienione w tabeli 21 połączone w 4 grupy, kierując się podziałem zawartym w „Instrukcji Opracowania Mapy Hydrograficznej Polski w skali 1:50.000”:

- utwory łatwoprzepuszczalne (klasy 1, 2, 6, 7, 10, 11, 17, 18);
- utwory średnioprzepuszczalne (klasy 3, 8, 12, 14, 19);

- utwory o zmiennej przepuszczalności — organogeniczne (4,20);
- utwory nieprzepuszczalne (5, 9, 13, 15, 16, 21).

Ostatnie kryterium delimitacji geokompleksów, użytkowanie terenu, obejmuje sześć klas:

1. Grunty orne;
2. Użytki zielone;
3. Lasy;
4. Nieużytki hydrogeniczne;
5. Tereny zabudowane;
6. Nieużytki antropogeniczne.

Po wydzieleniu geokompleksów, charakteryzowanych trzycyfrowym kodem odnoszącym się do cech opisanych kryteriów, przystąpiono do obliczania parametrów struktury krajobrazu zlewni jeziornych. Obejmują one analizę:

- liczebności i powierzchni geokompleksów według typów (oraz udziału cech poszczególnych komponentów w budowie krajobrazu);
- mozaikowatości krajobrazu określonej średnią powierzchnią geokompleksu w zlewni;
- kontrastowości krajobrazu określonej współczynnikiem kontrastowości;
- trwałości krajobrazu, wyrażonej wskaźnikiem wewnętrznej spójności krajobrazu;
- niejednorodności krajobrazu, określonej wskaźnikiem entropii względnej krajobrazu zlewni.

O ile dwa pierwsze z wymienionych parametrów, ze względu na swoją prostotę nie wymagają omówienia, a wskaźnik wewnętrznej spójności krajobrazu (Richling 1972, 1992) oraz wskaźnik entropii względnej (Bierlant 1978) są powszechnie stosowane i znane w kompleksowej geografii fizycznej, o tyle szerszego omówienia wymaga zastosowana tu przez autora metoda oceny kontrastowości krajobrazowej. Bazując na metodycznych propozycjach H. Neumeistera (1979), sporządzono dla każdej zlewni matryce sąsiedztw (ryc. 3) będące punktem wyjścia do badania częstości sąsiedztw geokompleksów indywidualnych według typów oraz ilości cech, którymi różnią się sąsiadujące geokompleksy. W nagłówkach matrycy wpisano kody typów geokompleksów występujących w danej zlewni, a w polach liczbę sąsiedztw pomiędzy tymi typami. Sąsiedztwa obliczono na liniach profilowych (transektach), wrysowanych na mapę geokompleksów co 0,5 cm równoległych liniach, traktując jako jedno sąsiedztwo każde przecięcie się linii profilowej z granicą dwóch geokompleksów określonych typów. Następnie liczby sąsiedztw pomnożono przez ilość cech, którymi różnią się sąsiadujące pola (tu: ze względu na wybór trzech kryteriów delimitacji geokompleksów wynosi ona jeden, dwa lub trzy).

	1	.	.	.	i
i	s_{ij}				X
.				X	
.			X		
.		X			
1	X				

Ryc.3. Schemat matrycy do obliczania współczynnika kontrastowości krajobrazowej zlewni
Fig.3. Scheme of matrix for index of landscape contrast calculation

Suma wszystkich liczb z pól danej macierzy została zważona powierzchnią zlewni według formuły:

$$Wsp_{kz} = \frac{\sum_{i=1, j=i+1}^n (s_{ij} \times q_{ij})}{P_z}$$

Wsp_{kz} — współczynnik kontrastowości krajobrazu zlewni z ;

s_{ij} — liczba sąsiedztw pomiędzy i -tym a j -tym typem geokompleksu w zlewni z ;

q_{ij} — ilość cech, którymi różnią się geokompleksy należące do typu i od geokompleksów typu j ;

n — liczba typów geokompleksów w zlewni z ;

P_z — powierzchnia zlewni z .

Współczynnik kontrastowości krajobrazu przyjmuje wartości niemianowane ≥ 0 , z reguły zawierające się w przedziale $(0; 2)$.

W celu kompleksowej oceny stopnia „agresywności” zlewni w stosunku do jezior, zaproponowano wskaźnik zdolności zlewni do odprowadzania biogenów. Przy obliczaniu wskaźnika uwzględniono dominujące powierzchniowo typy geokompleksów danej zlewni, tzn. wszystkie typy których powierzchnia zajmuje co najmniej 10% obszaru zlewni lub, jeśli żaden typ nie osiąga takiego udziału powierzchniowego, trzy pierwsze typy geokompleksów pod względem zajmowanej powierzchni. Dla każdego typu oceniane były cechy komponentów uwzględnionych przy delimitacji geokompleksów. Zastosowano skalę 4-stopniową, od 0 do 3. Typy krajobrazów elementarnych oceniono następująco: krajobrazy depozycji domknięte i względnie domknięte — 0, krajobrazy zasilania i złożone — 1, krajobrazy tranzytowe o mniejszej intensywności procesów — 2, krajobrazy tranzytowe o większej intensywności procesów — 3. Dla powierzchniowych utworów geologicznych zastosowano następujące oceny: utwory nieprzepuszczalne — 0, utwory o zmiennej przepuszczalności — 1, utwory średnioprzepuszczalne — 2, utwory łatwo przepuszczalne — 3, a dla użytkowania terenu: lasy, nieużytki hydrogeniczne — 0, użytki zielone — 1, grunty orne — 2, tereny zabudowane, nieużytki antropogeniczne — 3. Następnie oceny te zsumowano i podzielono przez ilość uwzględnionych typów geokompleksów. Ocena końcowa zawiera się w przedziale $(0; 9)$. Im jest ona wyższa tym potencjalna dostawa biogenów ze zlewni do jezior jest większa.

W dalszych analizach związków struktury krajobrazu ze stanem czystości jezior, oprócz wymienionych wyżej parametrów i wskaźników struktury krajobrazu zlewni, wykorzystano informacje o procentowym udziale w poszczególnych zlewniach:

- krajobrazów tranzytowych;
- krajobrazów zasilania i złożonych;
- krajobrazów depozycyjnych;
- utworów przepuszczalnych;
- gruntów omych;
- użytków zielonych;
- lasów;
- krajobrazów tranzytowych na utworach przepuszczalnych z gruntami ornymi;
- krajobrazów tranzytowych na utworach przepuszczalnych z użytkami zielonymi.

Dla charakterystyki zbioru badanych jezior użyto następujących parametrów określających ich morfometrię:

- powierzchnia jeziora;
- głębokość maksymalna;
- głębokość średnia;
- objętość jeziora;

oraz cech ustroju hydrologicznego jezior:

- współczynnik Schindlera;
- współczynnik Ohlego;
- typ bilansowy (zbiorniki przepływowe, odpływowe, bezodpływowe).

Współczynnik Schindlera jest miarą stosunku powierzchni, z której dostarczana jest materia do jeziora do objętości rozcieńczającej ją wody, wyrażoną ilorazem powierzchni zlewni całkowitej wraz z jeziorem do objętości zbiornika. Współczynnik Ohlego charakteryzuje stopień oddziaływania zlewni całkowitej na jezioro. Jest to iloraz całkowitej powierzchni zlewni jeziora (łącznie z jeziorem), rozumianej nie jak w niniejszym opracowaniu (patrz początek rozdziału), ale jako cała zlewnia powyżej danego jeziora, do powierzchni jeziora. Jest to więc odwrotność stosowanego w hydrologii współczynnika jeziorności.

Istotne jest także rozpoznanie punktowych źródeł zanieczyszczeń wód powierzchniowych pochodzenia antropogenicznego. W przypadku badanych obiektów, poza jeziorami Oleckim Małym i Wielkim, źródła te mają niewielki wpływ na stan czystości jezior.

Dane o stanie fizykochemicznym i biologicznym badanych jezior uzyskano z Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Suwałkach. Ze względu na zmianę metodyki prowadzenia badań stanu czystości wód dokonaną w 1986 roku, wyniki badań realizowanych wcześniej nie zostały uwzględnione. W analizie wzięto pod uwagę badania prowadzone w latach 1986-92 zgodnie z Systemem Oceny Jakości Jezior (SOJJ) Państwowej Inspekcji Ochrony Środowiska (Kudelska, Cydzik, Soszka 1992). Uwzględniono następujące parametry fizykochemiczne i biologiczne, określone dla wszystkich badanych obiektów:

- chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT) ($\text{mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$);
- biochemiczne pięciodobowe zapotrzebowanie tlenu (BZT₅) ($\text{mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$);
- fosforany (mgP dm^{-3});
- fosfor całkowity (mgP dm^{-3});
- azot mineralny (mgN dm^{-3});
- azot całkowity (mgN dm^{-3});
- chlorofil (mg dm^{-3});
- seston (mg dm^{-3}).

Ostatni etap pracy obejmował analizę związków pomiędzy stanem czystości jezior a parametrami struktury środowiska przyrodniczego. Przeprowadzono ją dla wszystkich badanych jezior w odniesieniu do struktury krajobrazu zlewni całkowitych i bezpośrednich oraz dla poszczególnych grup jezior, wydzielonych ze względu na typ bilansowy oraz współczynniki Schindlera i Ohlego. Zastosowano podział na cztery grupy wartości tych współczynników zaproponowany w „Systemie Oceny Jakości Jezior”. Dla współczynnika Schindlera wartościami progowymi dla

poszczególnych klas są: 5, 30 i 100, a dla współczynnika Ohlego — 10, 50 i 150. Przy analizie związków zastosowano współczynnik korelacji liniowej:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{mb_x b_y}$$

x_0, y_0 — wartości średnich arytmetycznych wielkości x i y ;

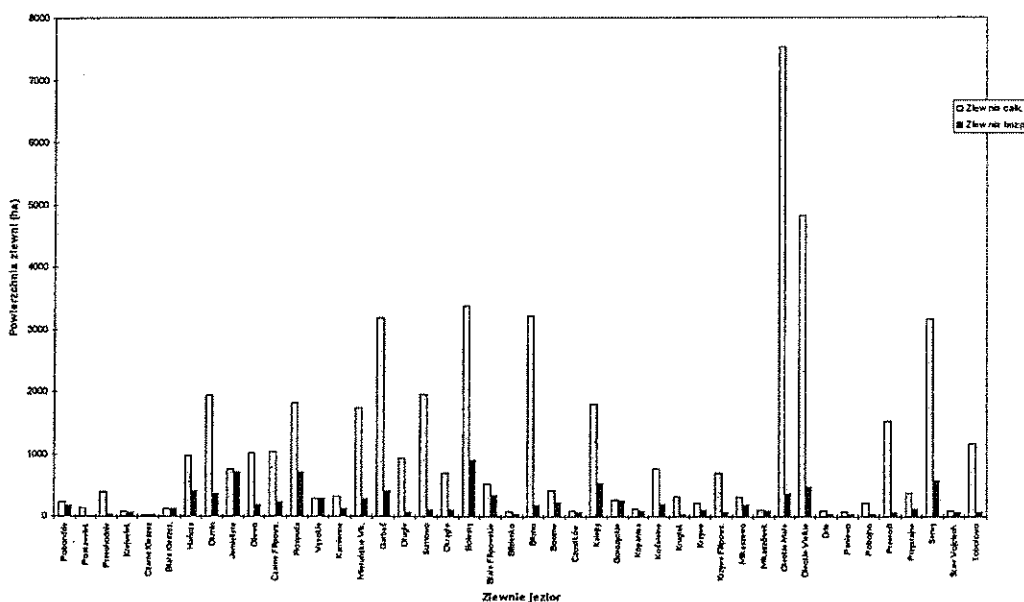
b_x, b_y — odchylenie standardowe x i y od x_0 i y_0 ;

m — ilość analizowanych par wartości x i y .

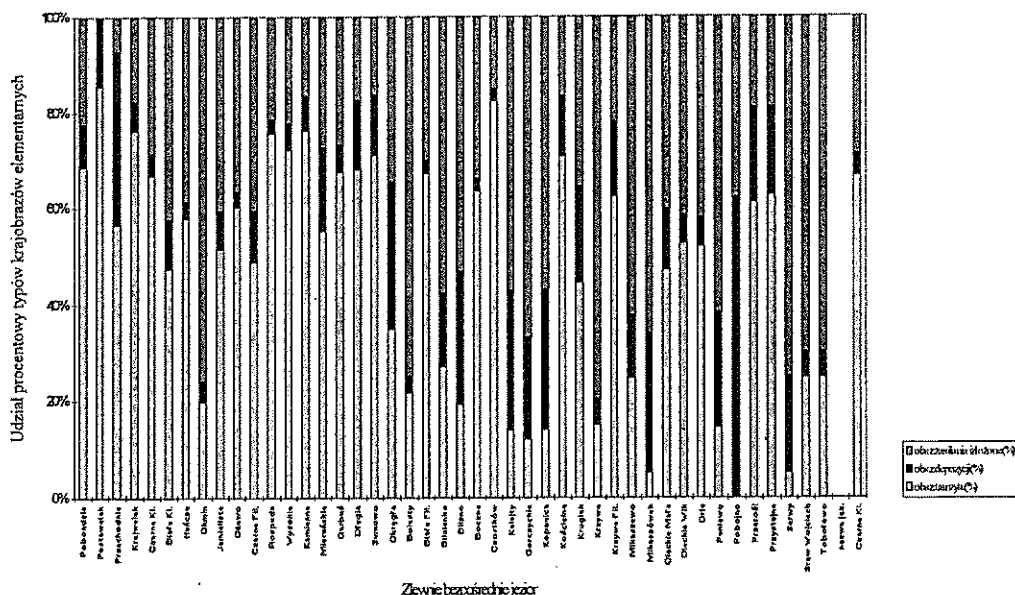
Charakterystyka struktury środowiska przyrodniczego badanych zlewni

Zlewnie bezpośrednie

Zakres powierzchni 44 badanych zlewni bezpośrednich wynosi od 10,7 ha (zlewnia jeziora Postawełek) do 908,98 ha (Bolesty). Średnia powierzchnia tych zlewni wynosi 222,7 ha. Generalnie, małymi powierzchniami charakteryzują się zlewnie jezior położonych na Pojezierzu Wschodniosuwalskim w dorzeczu Szeszupy (ryc. 4) oraz w biegu Czarnej Hańczy na Równinie Augustowskiej (np. Orle, Paniewo, Pobjojo), a duże zlewnie bezpośrednie mają jeziora położone w zlewni Rospudy i Legi na Pojezierzu Zachodniosuwalskim (np. Rospuda, Jemieliste, Oleckie Wielkie) oraz w północno-zachodniej części Równiny Augustowskiej (Serwy, Kalejty).



Ryc. 4. Powierzchnia badanych zlewni jeziornych całkowitych i bezpośrednich
Fig. 4. Areas of the study direct (aerial) and whole catchments of lakes

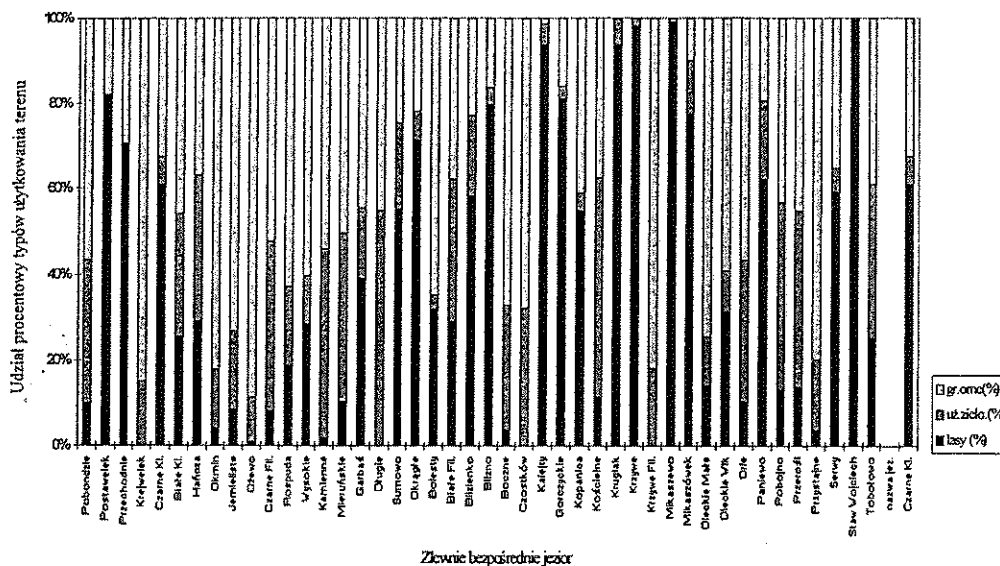


Ryc. 5. Udział powierzchniowy krajobrazów elementarnych w badanych zlewniach bezpośrednich
 Fig. 5. Percentage of elementary landscape area in the study direct catchment of lakes

Analizując udział funkcjonalnych typów rzeźby terenu (krajobrazów elementarnych) w powierzchni zlewni (ryc. 5) zaznacza się przewaga krajobrazów tranzytowych (o większej i mniejszej intensywności procesów) zajmujących średnio 46,6% powierzchni zlewni (zakres od 0% dla zlewni jeziora Pobojno do 85,5% dla zlewni jeziora Postawielek). Krajobrazy te dominują w zlewniach wysoczyznowych, a ich udział spada znacznie dla zlewni na terenach sandrowych (Równiny Augustowskiej). Znaczne tereny zajmują też krajobrazy zasilania i złożone (średnio 39,44% — od 0% dla zlewni jez. Postawielek do 79,6% dla jez. Krzywego koło jeziora Mikaszówek).

Udział obszarów depozycyjnych (domkniętych i względnie domkniętych) wynosi średnio 14% powierzchni zlewni i waha się od 2,6% dla zlewni jeziora Bocznego do 62% dla zlewni Pobojna.

Wśród powierzchniowych utworów geologicznych przeważają utwory łatwo- i średnioprzepuszczalne, zajmujące łącznie średnio 80,9% powierzchni wszystkich badanych zlewni w zakresie od 24,2% dla zlewni jeziora Mieruskiego Wielkiego do 100% dla zlewni jezior: Okmin, Długie (Bakałarzewskie), Blizienko, Czostków, Kalejty, Paniewo i Staw Wojciechowski. Ogólnie zlewnie Równiny Augustowskiej wykazują większy udział utworów przepuszczalnych niż zlewnie Pojezierza Suwalskiego. Pod względem użytkowania terenu (ryc. 6) zaznacza się dominacja gruntów ornich (średnio 42,3% w zlewni) nad terenami leśnymi (37,34%). Najwięcej gruntów ornich znajduje się w zlewniach okolic Suwałk (Ożewo, Krolewski, Okmin, Krzywe k/Przerośli), a najmniej w zlewniach Równiny Augustowskiej (Kruglak, Krzywe, Mikaszówek, Staw Wojciechowski, Kalejty, Mikaszówek, Gorczyckie, Blizno). Odwrotnie sytuacja przedstawia się w przypadku lasów, najwięcej jest ich w zlewniach sandrowych, a najmniej na wysoczyznach morenowych. Użytki zielone (łąki i pastwiska) zajmują średnio 19,2% powierzchni zlewni bezpośredniej, przy czym dla poszczególnych zlewni waha się ona od 0% (Staw Wojciechowski, Postawielek, Przechodnie) do 50% (zlewnia jez. Kościelnego) i 55% (Długie Bakałarzewskie).



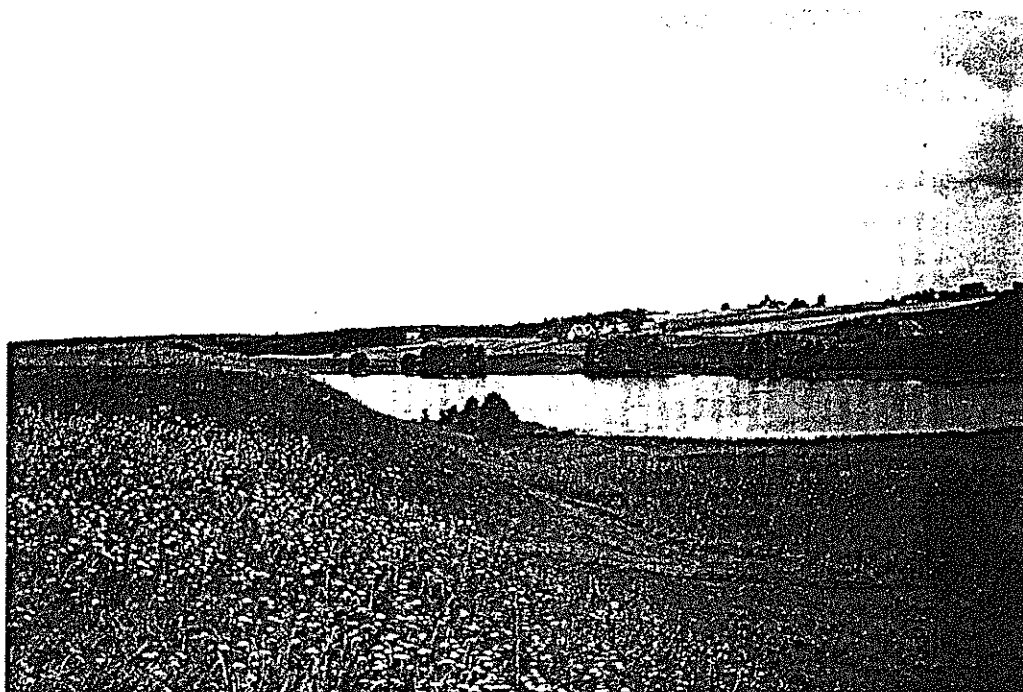
Ryc. 6. Udział powierzchniowy typów użytkowania terenu w badanych zlewniach bezpośrednich
Fig. 6. Percentage of land use patterns area in the study direct catchments of lakes

Strukturę krajobrazu wybranych zlewni bezpośrednich w ujęciu fizjonomycznym prezentują fotografie (ryciny 7–11). Przedstawiono na nich pięć jezior (rynnowych) i ich zlewni bezpośrednich, koncentrując się na charakterze użytkowania i rzeźby terenu w zlewni. Zaprezentowano przykłady zlewni rolniczej (ryc. 7), rolniczo-osadniczej (ryc. 8), leśno-rolniczej (ryc. 9) i leśnej (ryc. 10, 11).

Wśród wydzielonych geokompleksów zaznacza się przewaga obszarów tranzytowych, zasiania oraz złożonych (na sandrach) z piaskami lekkimi lub słabogliniastymi w podłożu, użytkowanych jako grunty orne lub lasy, rzadziej jako łąki i pastwiska. Stosunkowo powszechnie są także geokompleksy krajobrazów depozycji względnie domkniętych z podłożem organogenicznym (torfy) z lasami, niekiedy z użytkami zielonymi.

Średnia powierzchnia geokompleksu dla wszystkich badanych zlewni bezpośrednich wynosi 3,72 ha (co wskazuje na znaczne rozdrobnienie krajobrazu) i waha się od 1,71 ha dla zlewni jeziora Kamiennego do 7,3 ha dla zlewni jeziora Okmin (ryc.12). Generalnie, zlewnie sandrowe wykazują nieco większą średnią powierzchnię geokompleksu niż zlewnie na wysoczyznach pojeziernych. Kontrastowość krajobrazowa (ryc.13) wynosi średnio 0,8 i waha się od 0,23 dla jez. Okmin do 1,79 dla zlewni jez. Kopanica. Wartość wskaźnika wewnętrznej spójności krajobrazu (średnio 0,71) waha się w zakresie od 0,41 dla zlewni jez. Hańcza do 0,93 dla zlewni jez. Postawelek. Znamienna jest tu szczególnie niska wartość wskaźnika dla zlewni Hańczy, gdyż jest ona uznawana za teren o stosunkowo wysokiej stabilności (trwałości) krajobrazu, czemu zaprzeczają uzyskane wyniki. Wskaźnik entropii względnej krajobrazu, wynoszący średnio dla zlewni 0,82, wskazuje na dużą niejednorodność struktury środowiska przyrodniczego badanych zlewni. Występuje on w zakresie wartości od 0,62 dla zlewni jeziora Ożewo do 0,97 dla zlewni jeziora Kopanica (ryc.14)

Oceniono także buforowanie przez elementy struktury krajobrazu zlewni powierzchniowego dopływu biogenów do jezior. Dobre buforowanie jezior, wyrażające się najczęściej, zgodnie z powszechnie obowiązującymi poglądami, występowaniem krajobrazów depozycyjnych



Ryc. 7. Zlewnia jeziora Długiego o charakterze rolniczym z enklawami zadrzewień i zabudowy
 Fig. 7. Agriculturally use of Długie Lake catchments with enclaves of plantings and settlements

z utworami organogenicznymi w podłożu, porośniętych lasami, łąkami lub roślinnością bagienną, reprezentowane jest przez 13 zlewni (jezior: Pobondzie, Postawelek, Przechodnie, Mieruńskie, Okrągłe, Blizno, Kalejty, Kruglak, Krzywe, Mikaszewo, Mikaszówek, Orle, Paniewo). Przeciętnie buforowanych jest 26 zbiorników, a zdecydowanie zle buforowanie jezior przez strukturę krajobrazów nadjeziornych (głównie grunty orne w krajobrazach tranzytowych na podłożu piaszczystym) ma pięć zlewni: Okmina, Krzywego Filipowskiego, Oleckiego Wielkiego, Pobjna i Przechodniego).

Wartość syntetycznego wskaźnika zdolności zlewni bezpośrednich do odprowadzania biogenów ze względu na strukturę krajobrazu zlewni wskazuje na stosunkowo duże oddziaływanie zlewni na badane jeziora. W skali od 0 do 9 aż 21 zlewni osiągnęło 6-8 punktów. Kolejne 17 zlewni wykazuje średnią presję na jezioro, w przedziale 4-6, natomiast tylko 6 zlewni (jezior: Przechodnie, Kalejty, Krzywe, Mikaszewo, Orle, Pobjno) ma wartości wskaźnika mniejsze od 4, czyli stosunkowo małą presję na jezioro. Ogólnie, większą presję na jezioro mają zlewnie wysoczyznowe, a mniejszą — sandrowe.

Zlewnie całkowite

Większość zależności pomiędzy typem krajobrazu (pojezierny — sandrowy) a jego strukturą, scharakteryzowanych dla zlewni bezpośrednich, odnosi się także do zlewni całkowitych badanych jezior. Średnia powierzchnia tych ostatnich (ryc.4) wynosi 1324,4 ha, przy czym zlewnie najmniejsze (80-100 ha) mają jeziora: Blizienko, Paniewo, Krejwelek, Staw Wojciechowski, Orle, Czostków, a największe (3000-11000 ha) jeziora: Okmin, Oleckie Małe, Oleckie Wielkie, Bolesty, Blizno, Garbaś.



Ryc. 8. Zlewnia jeziora Kamiennego o charakterze rolniczo-osadniczym z zadrzewieniami i zalesieniami
Fig. 8. Agriculturally and settlement use of Kamienne Lake catchment with planting and little forests



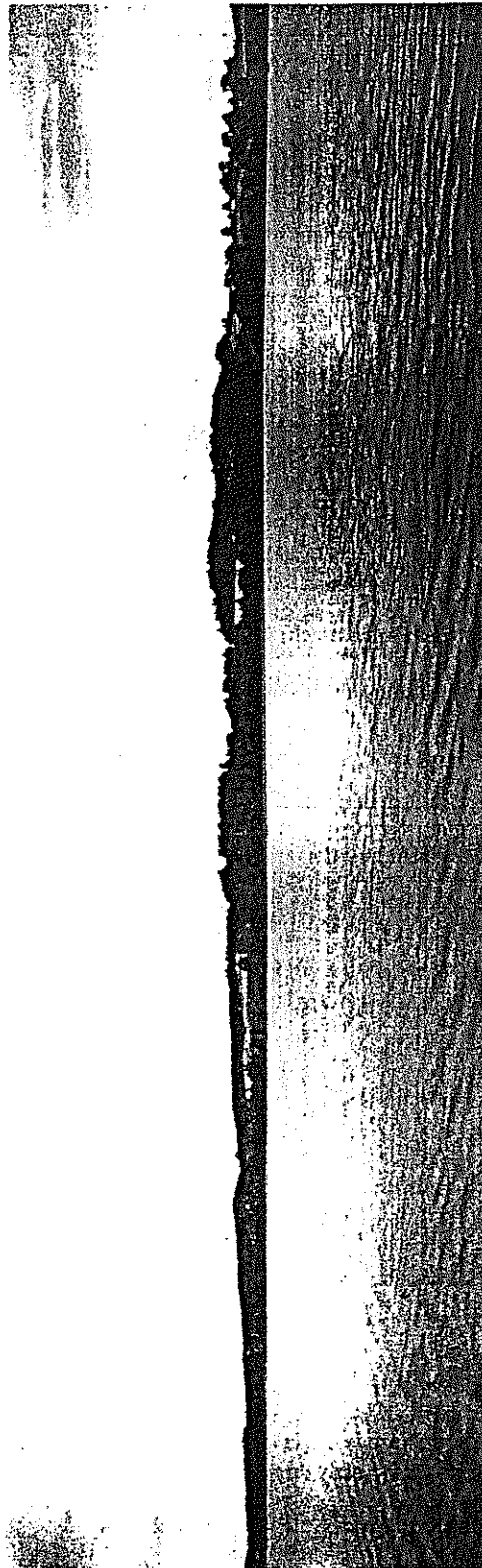
Ryc. 9. Zlewnia jeziora Boczego o charakterze leśno-rolniczym
Fig. 9. Sylvo-agriculturally use of Boczne Lake catchment



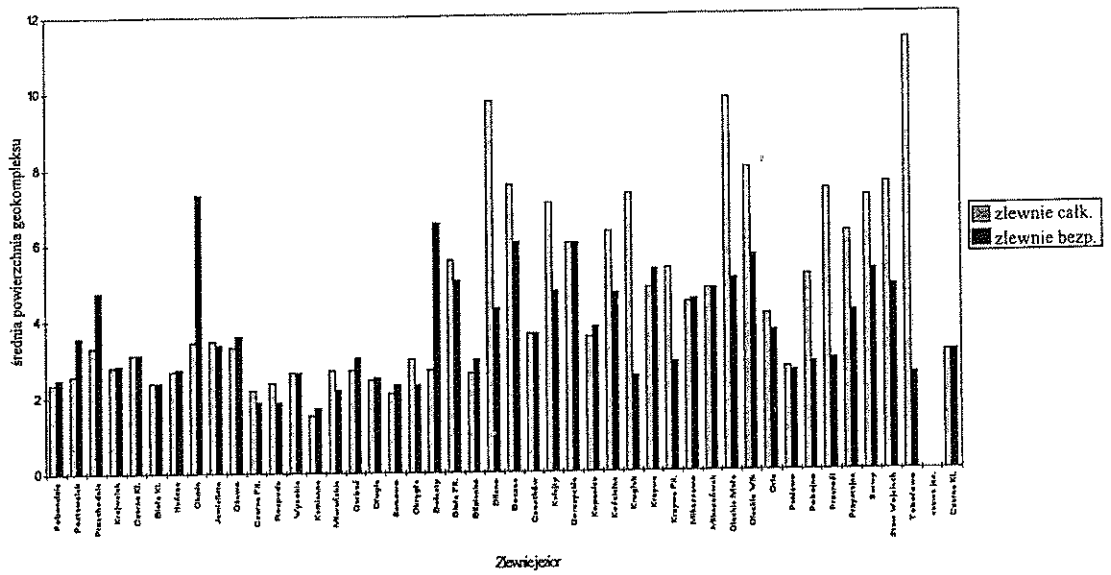
Ryc. 10. Zlewnia leśna jeziora Przystajne z niewielkim udziałem terenów rolniczych (uprawowych)
 Fig. 10. Forested Przystajne Lake catchment with enclaves of arable lands

W zlewniach całkowitych (ryc.15) zaznacza się niewielka przewaga krajobrazów zasilania i złożonych (łącznie średnio dla zlewni 44%) nad krajobrazami tranzytowymi (średnio 39,6%). Najmniej krajobrazów zasilania i złożonych jest w zlewni jez. Przechodnie, a najwięcej jezior Blizno i Serwy (ponad 70%). Krajobrazy tranzytowe nie występują w ogóle w zlewni jez. Orle i są mało rozpowszechnione (do 10% powierzchni) w zlewniach równiny sandrowej (Blizno, Kalejty, Pobjno, Serwy, Tobołowo) i bardzo częste w zlewniach wysoczyzn morenowych (Czostków, Kamienne, Pobondzie — powyżej 65%). Krajobrazy depozycyjne zajmują średnio 15,4% powierzchni zlewni (a więc więcej o 1,4% niż w zlewniach bezpośrednich), zajmując małe obszary (2-3%) w zlewniach jezior: Boczno, Czostków, Białego Filipowskiego) a duże (25-30%) w zlewniach: Mikaszówka, Pobjna, Kopanicy, Postawelka, Oleckiego Wielkiego, Serw oraz 36,2% w zlewni jeziora Orle.

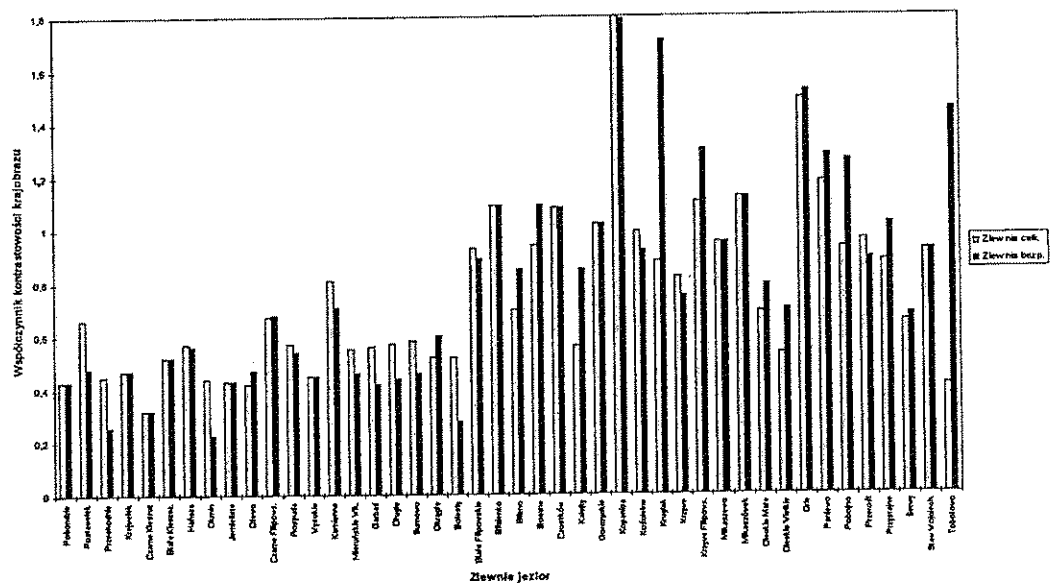
Utwory łatwo i średnioprzepuszczalne zajmują przeciętnie 71,75% powierzchni zlewni całkowitej. Jest ich nieco mniej w zlewniach wysoczyznowo-morenowych (średnio 50-60%), a dominują w zlewniach sandrowych (z reguły 90-100%). Najmniejsza ich powierzchnia charakteryzuje zlewnie jezior Sumowo, Kamienne, Okrągłe i Czarne (29-31%), a w całości pokryte są tymi utworami zlewnie jezior: Blizienko, Boczno, Paniewo i Staw Wojciechowski. W strukturze użytkowania terenu (ryc.16) zaznacza się dominacja gruntów ornych (średnio 40,9% w zlewni) i lasów (średnio 35,8%). Gruntów ornych brak całkowicie w zlewniach jezior: Kruglak, Krzywe, Mikaszewo i Staw Wojciechowski, a dominują one (65-80%) w strukturze użytkowania gruntów zlewni jezior: Krejwelek, Jemieliste, Przystajne, Boczno i Czostków. Lasów całkowicie brak w zlewni jeziora Czostków, a minimalne powierzchnie (0,1 -5%) zajmują one w zlewniach jezior: Kamienne, Przystajne, Krejwelek, Ożewo. Natomiast prawie całkowicie zalesione (>90%) są zlewnie: Mikaszewa, Kalejt, Kruglaka, Krzywego i Stawu Wojciechowskiego.



Ryc. 11. Panorama zlewni leśnej jeziora Rospuda z enklawami rolniczymi i osadniczymi
Fig. 11. Scene of forested Rospuda Lake catchment with enclaves of meadows and settlements

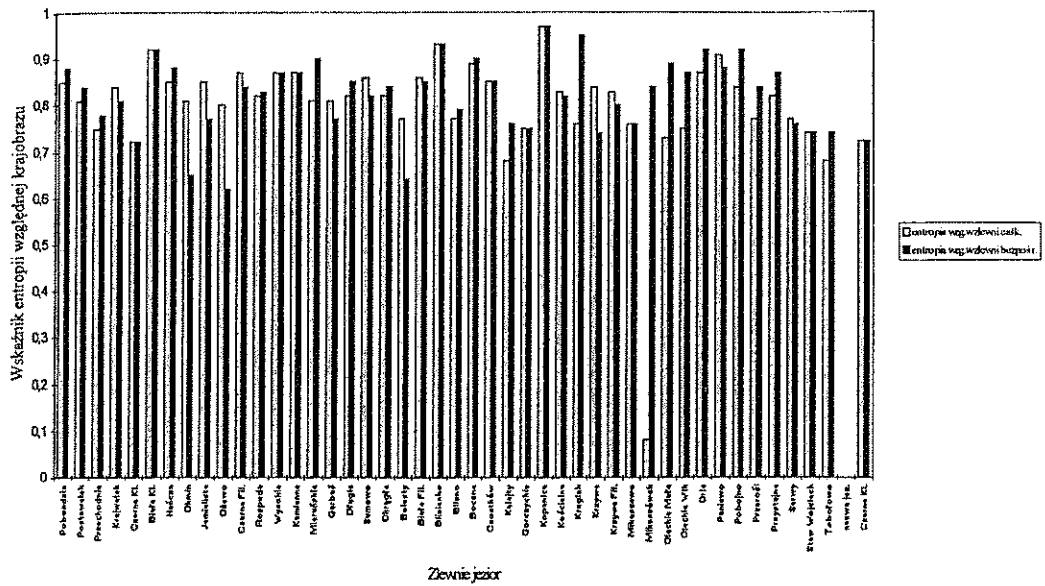


Ryc. 12. Średnia powierzchnia geokompleksu (w hektarach) w badanych zlewniach bezpośrednich i całkowitych
 Fig. 12. Average area of geocomplex (ha) for study direct and whole catchments of lakes

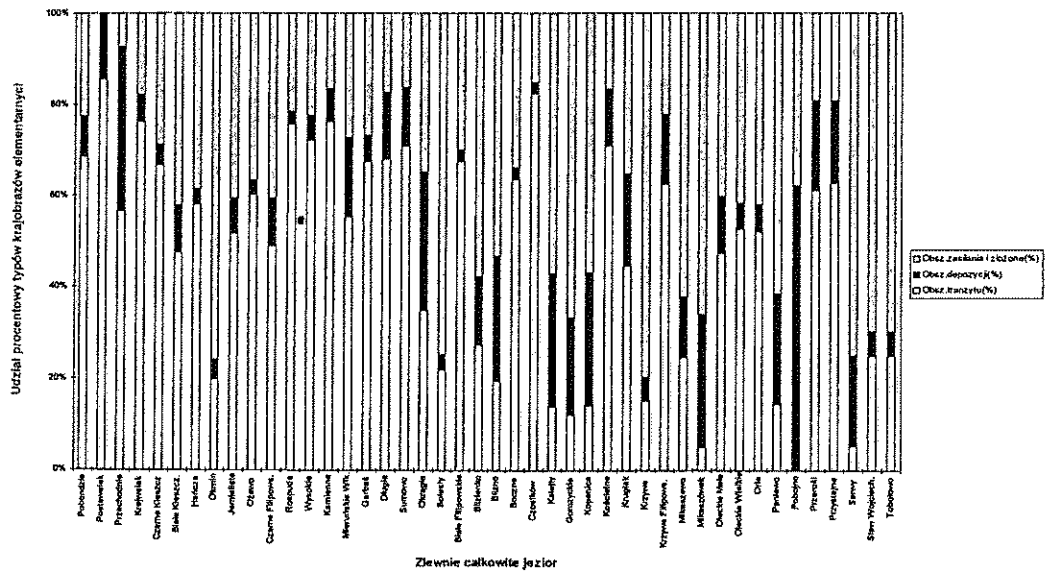


Ryc. 13. Współczynnik kontrastowości krajobrazowej badanych zlewni bezpośrednich i całkowitych
 Fig. 13. Index of landscape contrast values for the study direct and whole catchments of lakes

WPLYW STRUKTURY ŚRODOWISKA PRZYRODNICZEGO ZLEWNI NA STAN CZYSTOŚCI JEZIOR (NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH ZLEWNI I JEZIOR POJEZIERZA SUWALSKIEGO I RÓWNINY AUGUSTOWSKIEJ)

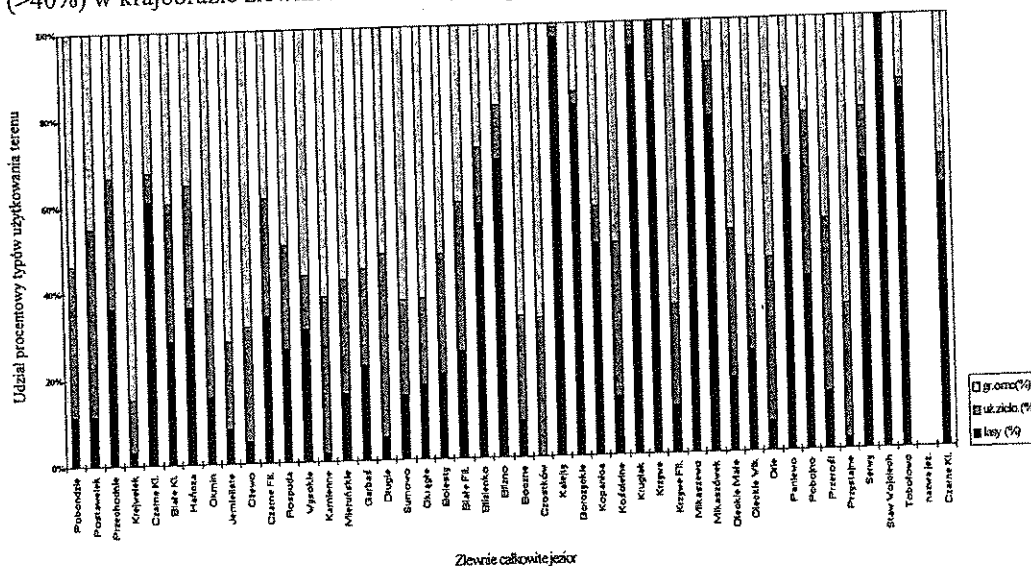


Ryc. 14. Wskaźnik entropii względnej krajobrazu badanych zlewni bezpośrednich i całkowitych
 Fig. 14. Index of relative landscape entropy values for the study direct and whole catchments



Ryc. 15. Udział powierzchni krajobrazów elementarnych w badanych zlewniach całkowitych
 Fig. 15. Percentage of elementary landscapes area in the study whole catchments of lakes

Użytki zielone, zajmując średnio około 21% powierzchni zlewni całkowitych, nie występują w zlewni Stawu Wojciechowskiego, a bardzo mały jest ich udział powierzchniowy (<5%) w zlewniach: Mikaszewa, Tobołowa, Kalejty i jeziora Górczyckiego. Łąki i pastwiska dominują (>40%) w krajobrazie zlewni: Postawelka, Długiego i Przerośli.



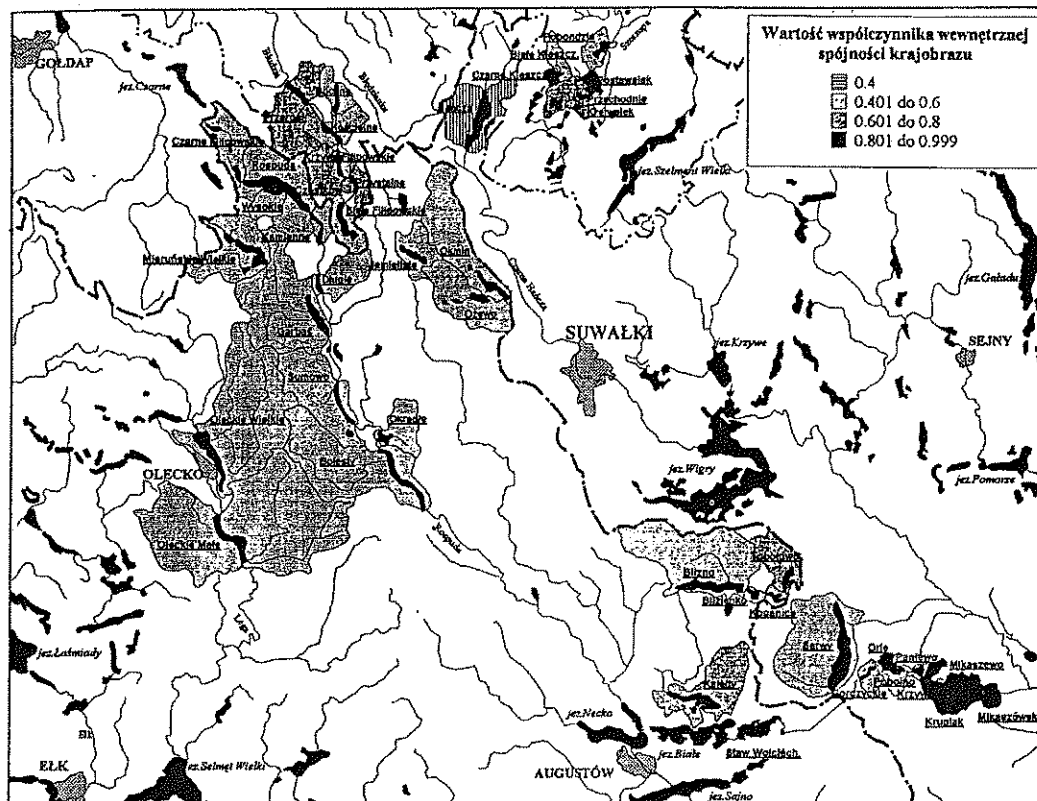
Ryc. 16. Udział powierzchniowy typów użytkowania terenu w badanych zlewniach całkowitych
Fig. 16. Percentage of land use patterns area in the study whole catchments of lakes

Dominujące typy geokompleksów w badanych zlewniach całkowitych wykazują bardzo zbliżone cechy do typów w zlewniach bezpośrednich. Nieco większy jest udział geokompleksów w krajobrazach złożonych, a nie spada wśród typów dominujących udział krajobrazów zasilania i depozycji względnie domkniętych. Geokompleksy tych typów charakteryzują się z reguły podłożem piaszczystym lub piaszczysto-gliniastym i zajęte są przez grunty orne lub lasy. Średnia powierzchnia geokompleksu (ryc.12) w zlewni całkowitej wynosi 4,58 ha, a więc jest blisko 0,9 ha większa niż w zlewniach bezpośrednich, co wskazuje na mniejsze rozdrobnienie krajobrazu. Ze średnią powierzchnią geokompleksu wiąże się także kontrastowość krajobrazowa (ryc.13), która dla zlewni całkowitych jest nieco mniejsza niż dla zlewni bezpośrednich i wynosi średnio 0,75. Jej wartości wahają się w zakresie od 0,32 (zlewnia jez. Czarne Kleszczowickiego) do 1,8 (zlewnia jez. Kopanica).

Wskaźnik wewnętrznej spójności krajobrazu zlewni całkowitych (ryc.17) jest niższy niż dla zlewni bezpośrednich i wynosi 0,63, co wskazuje na mniejszą „trwałość” krajobrazu tych pierwszych. Podobnie jak dla zlewni bezpośrednich, tak i tu najniższą wewnętrzną spójność ma zlewnia jez. Hańcza (0,4), najwyższą zaś zlewnia jez. Krzywego (0,93) na Równinie Augustowskiej. Niejednorodność krajobrazu zlewni całkowitych, wyrażona wskaźnikiem entropii względnej (ryc.14) o średniej wartości 0,8, jest bardzo zbliżona do wartości dla zlewni bezpośrednich. Zakres jej wynosi od 0,68 (zlewnie jezior Kalejty i Tobołowo) do 0,97 (jeziorno Kopanica).

Wartości syntetycznego wskaźnika zdolności zlewni do odprowadzania biogenów wykazują bardzo zbliżone prawidłowości jak dla zlewni bezpośrednich. Dla zlewni całkowitych także ogólna presja zlewni na jeziora jest stosunkowo wysoka. 22 zlewnie charakteryzują się wartością

wskaźnika 6 lub większą, 16 wartością od 4 do 6, a tylko sześć zlewni (te same co w przypadku zlewni bezpośrednich, z wyjątkiem jeziora Przechodnie, które zostało „zastąpione” przez zlewnię jeziora Kruglak) posiada wartość wskaźnika mniejszą od 4.



Ryc. 17. Rozkład przestrzenny wskaźnika wewnętrznej spójności krajobrazu badanych zlewni całkowitych
Fig. 17. Distribution of average index of landscape internal compactness for the study whole catchments

Ogólna charakterystyka hydrologiczna i chemiczno-limnologiczna badanych jezior

Wśród 44 badanych zbiorników 25 ma genezę rynnową, a 19 można uznać za wytopiskowe. Tylko dziewięć z nich to jeziora bezodpływowe (tab.4). Pozostałe z nich są odpływowe (6) lub przepływowe (29). Średnia powierzchnia jeziora wynosi 84,83 ha, a zakres powierzchni od 2,2 ha (Postawełek) do 460,3 ha (Serwy). Średnia głębokość maksymalna jezior wynosi 21,35 m, a zakres głębokości maksymalnych od 3,1 m (Staw Wojciechowski) do 108,5 m (Hańcza), natomiast przeciętna głębokość średnia jezior to 8,33 m w zakresie od 1 m (jez. Gorczyckie) do 38,7 m (Hańcza). Średnia objętość badanych jezior wynosi 117.63 tys m³, a waha się ona od 36,6 tys m³ (jez. Postawełek) do 67.182 tys m³ dla jeziora Serwy i 120.364,1 tys m³ dla jeziora Hańcza.

Dla badanych jezior obliczono także współczynniki Schindlera i Ohłego, wyrażające proporcje zlewni do jeziora, a tym samym potencjalną presję zlewni na jezioro wynikającą tylko

z czynników morfometrycznych. Wartości współczynnika Schindlera zawierają się w przedziale od 0,05 (jez. Boczne) i 0,09 (jez. Serwy) do 142,7 (jez. Krejwelek) i 490,6 (jez. Postawełek), przy czym aż 25 jezior ma wartości w przedziale (0; 5), czyli korzystne (mała presja na jezioro) i 11 jezior w przedziale od 5 do 30. Tylko sześć jezior ma wartości większe od 30 (Pobondzie, Przechodnie, Kruglak, Mikaszówek, Krejwelek, Postawełek). Wartości współczynnika Ohlego wynoszą od 4,0 (Staw Wojciechowski) i 4,6 (Czostków) do 700,4 (Mikaszówek) i 1254,6 (Kruglak). Wartości tego współczynnika wskazują na większe narażenie jezior na dostawę materii ze zlewni. Najniższe wartości (0-10) wykazuje dziewięć zbiorników, stosunkowo małe (10-50) kolejne 14. Natomiast aż dla 21 jezior współczynnik Ohlego wynosi więcej niż 50, a szczególnie narażone są jeziora: Sunowo, Bolesty, Blizienko, Gorczyckie, Kruglak, Krzywe Augustowskie, Krzywe Filipowskie i Mikaszówek.

Wskaźniki chemizmu badanych jezior wskazują, że wody większości z nich zaliczyć można do II klasy czystości (tab.5). ChZT, wskazujące na zapotrzebowanie zawartej w wodzie trudno-rozpuszczalnej substancji organicznej na tlen, wynosi średnio w badanych jeziorach $27,3 \text{ mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$, a więc mieści się w II klasie czystości. Dwanaście zbiorników posiada ChZT w zakresie I klasy czystości, 14 — II klasy i 17 — III klasy. Wody jeziora Oleckiego Małego są w zakresie tego wskaźnika pozaklasowe ($59,6 \text{ mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$). Najlepsze wskaźniki posiadają jeziora Hańcza i Przystajne. BZT₅ określające zawartość w wodzie substancji organicznej podlegającej rozkładowi wynosi średnio $3,44 \text{ mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$ (klasa II). Jedenaście zbiorników ma wartość tego wskaźnika równą lub mniejszą od 2 (I klasa), 24 kwalifikują się do II klasy, osiem do III klasy, a najgorszą, pozaklasową jakość wód ze względu na BZT₅ ma jezioro Długie ($15,8 \text{ mgO}_2 \text{ dm}^{-3}$).

Wskaźniki wynikające z zawartości w wodach jezior podstawowego związku eutrofizującego — fosforu, przedstawiają się nieco gorzej. Zawartość fosforanów kwalifikuje do I klasy 13 jezior (najlepiej sytuacja przedstawia się w jeziorach: Hańcza, Czostków i Kościelnym), do II klasy — 15 jezior, do III klasy — 14 zbiorników, a dwa jeziora (Okmin i Oleckie Małe) zaliczono do pozaklasowych. Ze względu na zawartość fosforu całkowitego 10 jezior zaliczono do klasy I (najlepszy stan wykazują: Boczne, Przystajne i Okrągłe), 14 do II klasy, 10 do klasy III, a także aż 10 jezior ma wody pozaklasowe (najgorszy stan wód mają jeziora Kruglak, Oleckie Małe i Mikaszówek). Średnia zawartość fosforanów w badanych jeziorach wynosi $0,03775 \text{ mgP dm}^{-3}$, a fosforu całkowitego — $0,19 \text{ mgP dm}^{-3}$, co pozwala zakwalifikować je do II klasy, jednak blisko granicy III klasy czystości. Zawartość azotu, drugiego z podstawowych związków biogennych, wskazuje na jeszcze gorszy stan czystości badanych jezior. Średnia zawartość azotu mineralnego wynosi dla 44 jezior $0,69 \text{ mgN dm}^{-3}$, a azotu całkowitego $1,77 \text{ mgN dm}^{-3}$, co pozwala na zakwalifikowanie wód do III klasy czystości. Zawartość azotu mineralnego kwalifikuje do I klasy tylko jezioro Serwy, a zawartość azotu całkowitego — Staw Wojciechowski oraz jeziora: Kruglak, Krzywe, Wysokie i Kamienne. Natomiast aż 8 jezior ma wody pozaklasowe ze względu na azot mineralny (najbardziej zanieczyszczone są jeziora Bolesty i Pobjno), a 14 jezior ze względu na azot całkowity (najgorszy stan mają jeziora Pobjno i Kopanica). Zawartość chlorofilu i suchej masy sestonu wskazują natomiast na stosunkowo dobry stan biologiczny jezior — średnio wynosi ona odpowiednio $9,46 \text{ mg dm}^{-3}$ i $3,97 \text{ mg dm}^{-3}$ co stawia badane jeziora na pograniczu I i II klasy czystości wód. Najgorszy stan (wody pozaklasowe) wykazują tu jedynie jeziora: Bolesty, Długie, Czostków, Kościelne i Oleckie Małe.

Tabela 4. Podstawowe parametry morfometryczne i hydrologiczne badanych jezior
Table 4. Basic parameters (morphometrical and hydrological) of the study lakes

Jezioro	Powierzchnia (ha)	Objętość (tys m ³)	Głęb. max. (m)	Głęb. śrd. (m)	Typ bilansowy	Wsp. Schindlera	Wsp. Ohlego
Pobondzie	50	1917,7	10	3,6	przepływowe	44,32	60,38
Postawełek	2,2	36,6	5	2,6	przepływowe	490,6	66,65
Przechodnie	21	350	5	3,3	przepływowe	54,4	19,83
Krejwełek	15	250	5	3,3	przepływowe	142,7	6,92
Czarne Kleszcz.	7,5	125	5	-	bezodpływowe	3,32	5,54
Białe Kleszcz.	9	150	5	-	bezodpływowe	9,15	15,25
Hańcza	291,5	120364,1	108,5	38,7	przepływowe	0,33	12,77
Okmin	104	15295	39,9	13,4	bezodpływowe	0,59	7,89
Jemieliste	56	4402,4	23,2	7,5	przepływowe	0,23	16,95
Ożewo	49,5	143,3	55,5	18,3	bezodpływowe	1,19	21,83
Czarne Filip.	38,5	3663	28,1	9,0	bezodpływowe	2,91	27,69
Rospuda	323,5	49731,8	38,9	14,5	odpływowe	0,72	10,44
Wysokie	23,5	3710	24,1	14	bezodpływowe	0,85	13,49
Kamienne	38,5	2809	20	6,4	przepływowe	1,28	9,34
Mieruńskie wk.	192	12717,9	25,5	6,7	bezodpływowe	1,53	10,26
Garbaś	137,5	31809,7	48	20,9	przepływowe	13,86	109,14
Długie	15	690	5	3,0	przepływowe	5,22	63,77
Sumowo	81	7056	13,6	8,0	przepływowe	23,04	173,18
Okragłe	37,5	1311	4,7	3	przepływowe	5,68	19,86
Bolesty	116,5	9716,4	16,2	7,0	przepływowe	27,8	194,24
Białe Filip.	132,4	22667	53	17,1	odpływowe	0,11	19,4
Blizienko	38,8	2446	16,8	6,3	przepływowe	6,95	437,2
Blizno	238,5	24191	28,8	10	przepływowe	1,04	105
Boczne	58,3	8892	33,5	15,3	odpływowe	0,05	7,4
Czostków	20,1	940	9,4	4,7	odpływowe	0,1	4,6
Kalejty	159,7	7493	12	4,7	odpływowe	0,24	11,3
Gorczyckie	22,1	228	3,5	1,0	przepływowe	28,75	296,9
Kopanica	20,2	-	-	-	przepływowe	-	91,4
Kościelne	50,8	1685	6,6	3,3	przepływowe	2,45	81,1
Kruglak	8,3	144	4,2	1,7	bezodpływowe	72,2	1254,6
Krzywe	21,6	499	6	2,3	przepływowe	20,2	466,9
Krzywe Filip.	47,4	-	-	-	przepływowe	6,52	150,5
Mikaszewo	126	7088	15	5,6	przepływowe	1,51	85,2
Mikaszówek	17,3	331	4,7	1,9	przepływowe	36,3	700,4
Oleckie Małe	220,8	22737	38,3	10,3	przepływowe	0,88	90,7
Oleckie Wlk.	227,3	37913	45,2	16,7	przepływowe	0,33	54,9
Orle	25,2	476	4,7	1,9	przepływowe	0,33	6,2
Paniewo	39,8	1960	12,5	4,9	przepływowe	5,04	248
Pobojno	23,6	716	6,2	3,0	bezodpływowe	0,31	9,5
Przerośl	70,7	6006	28,2	8,6	przepływowe	0,96	81,9
Przystajne	31,5	2147	15,9	6,8	przepływowe	1,37	93,5
Serwy	460,3	67182	41,5	14,1	przepływowe	0,09	12,9
Staw Wojciech.	22,6	300	3,1	1,3	przepływowe	0,3	4
Tobołowo	40	-	-	-	odpływowe	-	43

Tabela 5. Parametry fizykochemiczne i biologiczne oraz klasy czystości badanych jezior
 Table 5. Physico-chemical and biological parameters and quality class of the studied lakes

Jezioro	ChZT (mgO ₂ dm ⁻³)		BZT ₅ (mgO ₂ dm ⁻³)		Fosforany (mgP ₂ dm ⁻³)		Fosfor calc. (mgP ₂ dm ⁻³)		Azot miner. (mgN ₂ dm ⁻³)		Azot calc. (mgN ₂ dm ⁻³)		Chlorofil (mg m ⁻³)		Seston (mg dm ⁻³)		Pkt	Kl
Pobondzie	31,2	3	3,35	2	0,04	3	0,288	4	0,8	3	1,78	3	10,39	2	2,3	1	2,6	3
Postawelek	19,4	1	2,4	2	0,041	3	0,176	3	0,8	3	1,62	3	7,46	1	1,85	1	2,1	2
Przechodnie	14,5	1	3,0	2	0,052	3	0,139	3	0,47	3	1,5	2	18,97	3	4,7	2	2,4	2
Krejwelek	19,0	1	3,8	2	0,03	2	0,162	3	0,57	3	1,69	3	8,91	2	3,55	1	2,1	2
Czarne Kleszcz.	33,8	3	3,4	2	0,041	3	0,485	4	0,81	4	2,02	4	9,92	2	2,9	1	2,9	3
Białe Kleszcz.	35,3	3	3,0	2	0,06	3	0,265	4	0,52	3	1,9	3	8,04	3	2,7	1	2,6	3
Hańcza	7,5	1	1,3	1	0,003	1	0,045	1	0,53	3	1,67	3	2,08	1	1,83	1	1,5	1
Oknin	14,4	1	2,7	2	0,082	4	0,072	2	0,51	3	1,21	2	4,65	1	2,06	1	2,0	2
Jemieliste	16,0	1	2,3	2	0,052	3	0,061	2	0,51	3	1,22	2	4,23	1	2,91	1	1,9	2
Ożewo	16,9	1	2,9	2	0,033	2	0,072	2	0,61	3	1,55	3	4,08	1	2,04	1	1,9	2
Czarne	41,4	3	3,7	2	0,007	1	0,049	1	0,57	3	1,4	2	4,5	1	2,4	1	1,7	2
Rospuda	36,7	3	3,0	2	0,022	2	0,069	2	0,27	2	1,11	2	3,4	1	8,7	3	2,1	2
Wysokie	34,0	3	3,6	2	0,033	2	0,073	2	0,21	2	0,67	1	4,8	1	1,9	1	1,7	2
Kamienne	14,0	1	2,7	2	0,006	1	0,071	2	0,25	2	0,69	1	4,2	1	7,2	2	1,5	1
Mieruńskie Wlk.	35,4	3	3,6	2	0,061	3	0,087	2	1,47	4	2,01	4	11,8	2	6,5	2	2,7	3
Garbaś	39,0	3	2,4	2	0,033	2	0,109	3	0,32	2	1,04	2	18,8	3	7,7	2	2,8	2
Długie	22,8	2	15,8	4	0,029	2	0,095	2	0,24	2	1,16	2	27,1	4	13,6	4	2,7	3
Sumowo	16,9	1	5,3	3	0,023	2	0,044	1	1,34	4	2,25	4	8,6	2	5,9	2	2,4	2
Okragłe	22,7	2	3,6	2	0,036	2	0,037	1	1,38	4	3,14	4	28,3	4	8,75	3	2,7	3
Bolesty	21,8	2	4,5	3	0,019	1	0,042	1	1,65	4	2,76	4	28,3	4	8,75	3	2,7	3
Białe Filip.	36,5	3	1,7	1	0,04	2	0,09	2	0,32	2	2,16	4	0,93	1	1,74	1	2,0	2
Blizienko	35,4	3	1,3	1	0,01	1	0,12	1	0,56	3	1,96	3	2,07	1	1,07	1	1,8	2
Blizno	36,2	3	0,8	1	0,18	1	0,04	1	0,62	3	1,7	3	3,3	1	1,03	1	2,1	2
Boczne	25,0	2	0,1	1	0,01	1	0,05	1	0,32	2	1,59	3	3,84	1	2,25	1	1,5	1
Czostków	35,8	3	2,6	2	0,00	1	0,06	2	0,22	2	2,13	4	28,5	4	4,3	2	2,5	2
Kalejty	45,1	3	3,2	2	0,03	2	0,06	2	0,46	3	2,16	4	19,31	3	4,6	2	2,6	3
Gorczyckie	22,0	2	2,2	2	0,03	2	0,43	4	0,36	2	1,25	2	2,25	1	1,55	1	2,0	2
Kopanica	45,9	3	0,6	1	0,03	2	0,11	3	1,48	4	4,05	4	5,4	1	4,3	2	2,5	2
Kościelne	25,0	2	7,0	3	0,00	1	0,04	1	0,64	3	1,65	3	26,6	4	4,7	2	2,4	2
Kruglak	27,3	2	2,9	2	0,02	1	0,6	4	0,45	3	0,97	1	2,2	1	1,65	1	1,9	2
Krzywe	24,1	2	2,7	2	0,05	3	0,16	3	0,58	3	0,81	1	3,85	1	2,1	1	2,0	2
Krzywe Filip.	9,5	1	0,8	1	0,02	1	0,09	2	0,6	3	1,72	3	5,42	1	2,38	1	1,6	2
Mikaszewo	22,1	2	2,6	2	0,02	2	0,46	4	0,41	3	1,36	2	3,02	1	1,55	1	2,1	2
Mikaszówek	13,5	1	2,2	2	0,03	2	1,27	4	0,41	3	1,12	2	1,45	1	0,85	1	2,0	2
Olecko Małe	59,6	3	4,6	3	0,26	4	0,73	4	1,22	4	3,23	4	50,1	4	13,6	4	3,8	4
Olecko Wlk.	31,3	3	4,1	3	0,07	3	0,19	3	0,75	3	2,55	4	11,6	2	6,7	2	2,9	3
Orle	24,7	2	4,0	2	0,04	3	0,13	3	0,41	3	1,44	2	6,05	1	2,65	1	2,1	2
Paniewo	20,1	2	2,0	1	0,05	3	0,25	4	0,73	3	1,31	2	1,7	1	1,4	1	2,1	2
Pobojno	48,2	3	6,7	3	0,05	3	0,19	3	3,28	4	3,28	4	13,7	2	8,9	3	3,1	3
Przerośl	22,2	2	8,3	3	0,06	3	0,04	1	0,65	3	1,45	2	5,0	1	2,59	1	2,0	2
Przystajne	7,5	1	1,1	1	0,04	3	0,05	2	0,68	3	2,05	4	4,35	1	1,51	1	2,0	2
Serwy	22,9	2	1,4	1	0,04	2	0,54	4	0,19	1	1,94	3	2,77	1	1,75	1	1,9	2
Staw Wojciech.	22,4	2	1,9	1	0,02	1	0,18	1	0,36	2	0,87	3	0,85	1	0,65	1	1,5	1
Tobolowo	47,0	3	2,4	3	0,02	1	0,08	2	0,78	3	2,68	4	5,2	1	3,37	1	2,3	2

Podsumowując, wody czterech spośród badanych jezior (Hańcza, Kamienne, Boczne, Staw Wojciechowski) zaliczono do I klasy czystości (tab.5), przy czym są one bardzo bliskie klasie II, 29 jezior należy do klasy II, kolejne 10 do klasy III (Pobondzie, Czarne i Białe Kleszczowickie, Mieruńskie Wielkie, Długie, Sumowo, Bolesty, Kalejty, Oleckie Wielkie i Pobjono), a jedno, Oleckie Małe, ma wody pozaklasowe.

Próba określenia związków pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni a stanem czystości jezior

Zgodnie z zaprezentowaną wcześniej metodyką, w celu rozpoznania związków pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni a stanem czystości jezior, przy zastosowaniu oprogramowania Excel i MapInfo for Windows obliczono ponad 2000 współczynników korelacji liniowej. Generalnie, uzyskane wyniki uznano za mało zadowalające w kontekście potwierdzenia hipotezy postawionej na wstępie pracy. Tylko 14 z obliczonych współczynników korelacji miało wartości w granicach $+0,8-0,95$, a więc takie, które można uznać za istotne statystycznie. Kolejne 48 wartości współczynnika należy do przedziału $+(0,6-0,8)$, co wskazuje na słabszy związek statystyczny, warty jednak uwzględnienia w szerokiej analizie.

Pierwszy wniosek wynika z faktu, iż częściej istotne związki statystyczne (35 spośród 62 uwzględnionych wartości współczynnika) występują pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni całkowitych a stanem czystości wód jeziornych niż strukturą krajobrazu zlewni bezpośrednich (27 wartości) a tym stanem. Spodziewano się tu uzyskać wyniki odwrotne, gdyż wydaje się, że oddziaływanie zlewni bezpośredniej, poprzez obszarową dostawę materii do jezior, powinno być silniejsze niż zlewni całkowitej. Z drugiej jednak strony, wpływ zlewni całkowitych, jako najczęściej znacznie większych od zlewni bezpośrednich, może być bardziej zrównoważonym i stabilnym wskaźnikiem, ponieważ tu wszelkie przypadkowe czynniki oddziałujące na stan jezior, rozpraszane są na większej powierzchni i mają mniejsze znaczenie, niż w zlewniach bezpośrednich. Wydaje się, że ten drugi czynnik, w przypadku badanych zlewni, posiada decydujące znaczenie.

Drugi wniosek, jeszcze bardziej odmienny od powszechnie uznawanych poglądów, dotyczy charakteru związków pomiędzy strukturą krajobrazu zlewni a stanem chemiczno-biologicznym jezior. Okazało się mianowicie, że udział określonych typów użytkowania terenu, typów rzeźby lub powierzchniowych utworów geologicznych nie zawsze związany jest z zawartością określonych związków w wodach jezior istotną korelacją o takim znaku, na jaki wskazywałyby zwykle stwierdzone w środowisku przyrodniczym zależności. Jako przykłady tego typu zależności można podać dodatnią korelację (0,899) udziału powierzchni leśnej w całkowitych zlewniach jezior bezodpływowych (9 spośród 44 badanych obiektów) z zawartością fosforu całkowitego w wodach jezior lub ujemną korelację (-0,852) udziału gruntów ornych w bezpośrednich zlewniach jezior bezodpływowych z zawartością fosforu całkowitego. Wystąpienie takich nieoczekiwanych związków może mieć kilka przyczyn, które także mogły mieć wpływ na ogólny brak zadowalających wyników opracowania:

- po pierwsze, w zasadzie nie stwierdzono żadnych istotnych korelacji ($+0,6-1,0$) dla wszystkich badanych zlewni i jezior jednocześnie. Stwierdzono je tylko dla grup wydzielonych spośród wszystkich obiektów, ze względu na typ bilansowy oraz wartości współczynników Schindlera i Ohlego; grupy te liczą od kilku (9) do kilkunastu obiektów, w związku z czym mogło być ich zbyt mało, aby nawet wysokie wartości współczynnika

korelacji uznać można było za wystarczający dowód na istnienie realnych związków w krajobrazie; wykazane związki mogą być więc niekiedy przypadkowe; pomimo to wyników tych nie należy bagatelizować i zostaną one dalej omówione;

- po drugie, wyniki badań stanu biologiczno-chemicznego jezior są praktycznie oparte na jednorocznych (dwukrotnych) analizach, które mogą w pewnym stopniu być także przypadkowe, pomimo tego, że prowadzi się je w sezonach z dwoma odmiennymi typami stratyfikacji wód jeziornych. Na wyniki mogą też mieć wpływ różne czynniki lokalne i sezonowe. Zadowalające efekty mogłoby dać wykorzystanie prowadzonych regularnie przez kilka lat badań monitoringowych (np. raz w miesiącu).
- po trzecie, pomimo braku bardzo dużych punktowych źródeł zanieczyszczeń wód w zlewniach badanych zbiorników, istnieją tu stosunkowo liczne małe źródła ścieków (osadnictwo, zabudowa rekreacyjna, fermy, drobny przemysł i rzemiosło), które mogą w istotny sposób modyfikować stan czystości wód jeziornych. Są one najczęściej podstawowym źródłem związków fosforu w jeziorach lub przyczyną wzrostu zawartości chlorofilu; w takim przypadku związek struktury krajobrazu ze stanem jezior nie istnieje lub jest słaby, a jeśli została stwierdzona wysoka wartość współczynnika korelacji, może ona być przypadkowa.

Te czynniki ryzyka oceny trzeba mieć na uwadze przy odbiorze przedstawianych poniżej wyników.

Zlewnie bezpośrednie

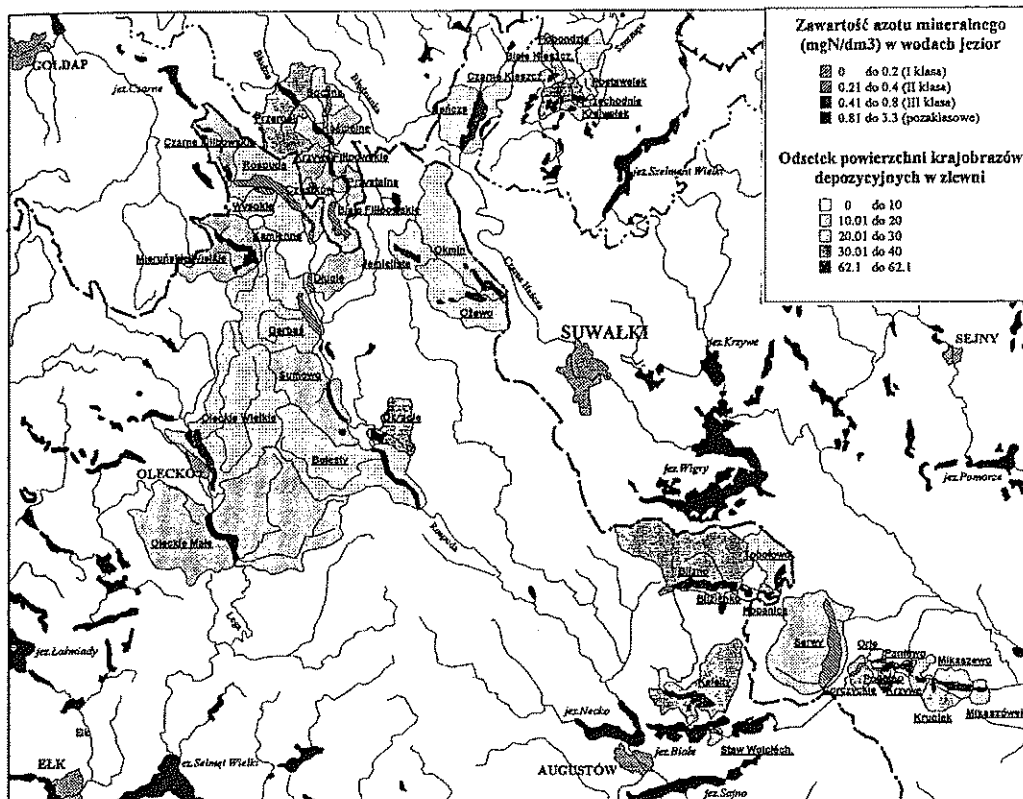
Podstawowe parametry struktury krajobrazu zlewni bezpośrednich, które mają wpływ na stan wód jeziornych to: występowanie krajobrazów depozycyjnych (depozycji względnie

Tabela 6. Współczynniki korelacji struktury krajobrazu zlewni bezpośrednich i stanu czystości jezior
Table 6. The correlations coefficients of landscape structure of direct catchments versus lake purity state

Parametry struktury krajobrazu	Parametry stanu czystości jezior							
	BZT ₅	ChZT	Fosfor cal.	Azot min.	Azot cal.	Chlorofil	Seston	Klasa czyst.
średnia pow. geok.		-0,713*						
kontrastowość krajob.			0,692****			-0,744****		-0,733****
wewn. spójność krajo.		-0,625*						
entropia wzgl. krajob.		0,713*						
odsetek lasów			0,935*					-0,604****
odsetek uż. zielonych		0,709*		0,646*			0,736*	0,716*****
odsetek grunt. ornym			-0,852*					
odsetek obsz. tranzytu				-0,685*				
odsetek obszarów depozycji	0,914* 0,626*****			0,923* 0,69*** 0,777*****	0,752* 0,647*****		0,845*	
tranzyt/utw. przep./UZ							0,855*****	
tranzyt/utw. przep./GO			-0,6*					
wskaźnik syntetyczny	-0,6*			-0,681*			-0,62*	

* — zlewnie jezior bezodpływowych; *** — zlewnie jezior o współczynniku Schindlera <10;
 **** — zlewnie jezior o współczynniku Schindlera >10. ***** — zlewnie jezior o współczynniku Ohlego <20;
 ***** — zlewnie jezior o współczynniku Ohlego 20-200.

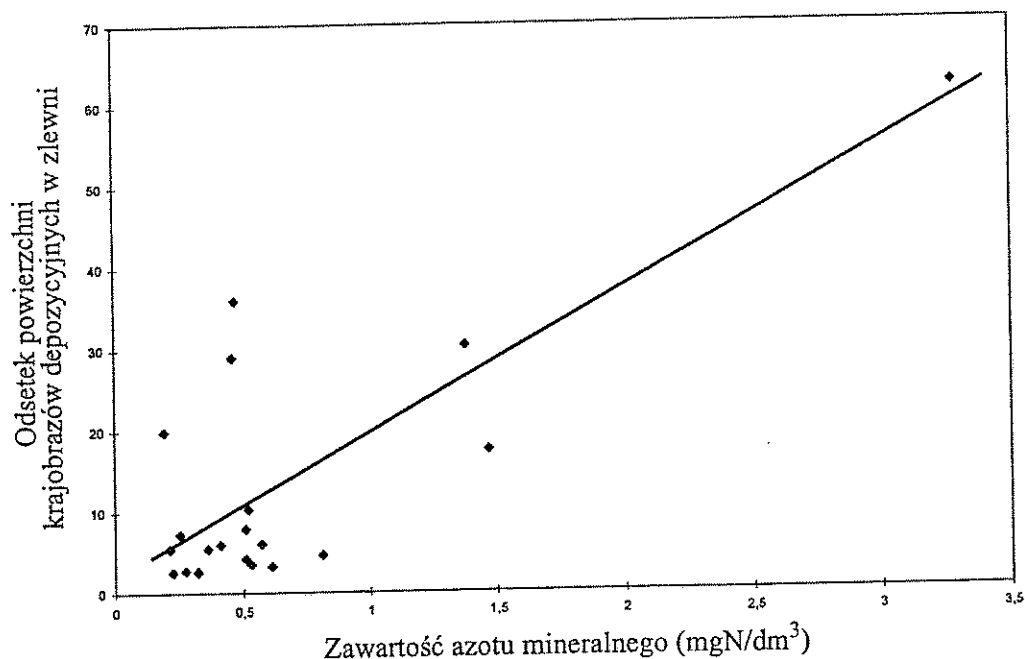
domkniętych i domkniętych), występowanie użytków zielonych oraz, w nieco mniejszym stopniu, kontrastowość krajobrazowa (tab. 6). Stwierdzone zależności dotyczą w większości (17 na 27 uwzględnionych wartości) tylko zlewni jezior bezodpływowych lub też jezior o wartości współczynnika Schindlera większej od 10 lub współczynnika Ohlego mniejszej od 20.



Ryc. 18. Rozkład odsetka powierzchni krajobrazów depozycyjnych w zlewniach bezpośrednich obszaru badań a zawartość azotu mineralnego w wodach jezior

Fig. 18. Distribution of percentage of the deposition elementary landscapes area in direct catchments of lakes according to mineral nitrogen content in lake water

Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie tezy, że w bezpośrednich zlewniach jezior bezodpływowych, im większy jest udział krajobrazów depozycyjnych (dna dolin i zagłębień bezodpływowych), tym większe jest zanieczyszczenie jezior, szczególnie związkami azotu (ryc. 18 i 19), przejawiające się także we wzroście BZT₅ i zawartości sestonu. Zależność tę można rozszerzyć na jeziora o małej presji ze strony zlewni określonej na podstawie wskaźników morfometrycznych (współczynnik Schindlera <10 i współczynnik Ohlego <20). Stwierdzony związek przeczy hipotezie o buforowej roli krajobrazów depozycyjnych. Tłumaczyć go można faktem, że obszary depozycyjne są w badanych zlewniach dość często użytkowane rolniczo (użytki zielone, rzadziej grunty orne) lub leśnie, co może się przyczynić do zwiększenia dostawy azotu do jezior. Takie przypuszczenie może potwierdzać występowanie dodatnich korelacji udziału użytków zielonych w zlewniach bezpośrednich jezior bezodpływowych z zawartością sestonu (0,736), ChZT (0,709) i azotu mineralnego (0,646), oraz wartością BZT₅

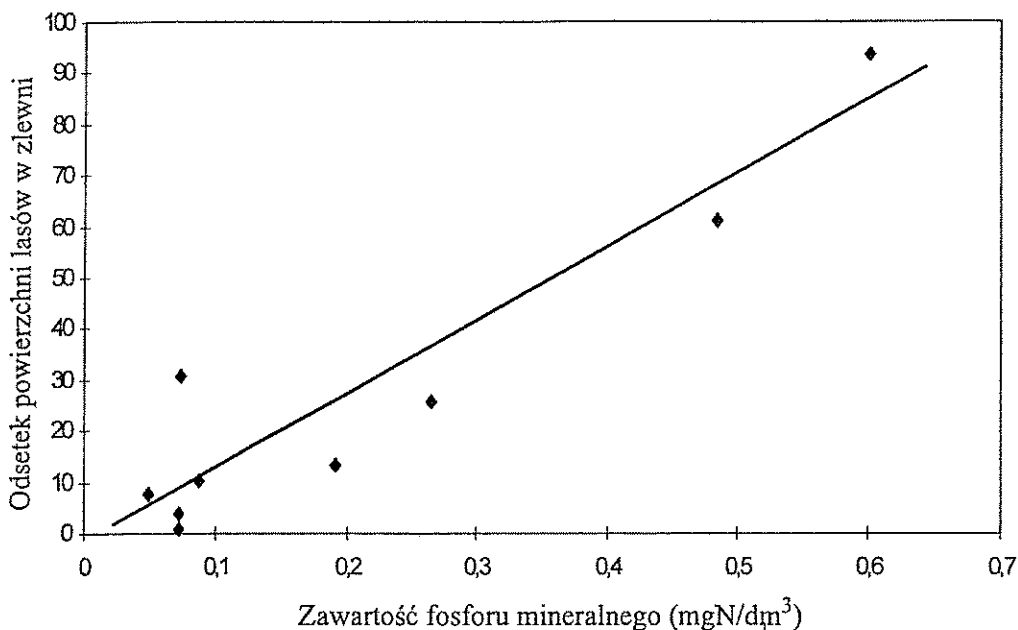


Ryc. 19. Rozkład odsetka powierzchni krajobrazów depozycyjnych w zlewniach bezpośrednich o wartościach współczynnika Ohlego poniżej 20 a zawartość azotu mineralnego w wodach jezior
 Fig. 19. Diagram of the mineral nitrogen content in the lake water versus percentage of the deposition elementary landscapes area of the direct catchments with Ohle index below 20

w grupie jezior o współczynniku Ohlego od 20 do 200 (0,716). Tu, z kolei, podważona zostaje buforowa rola użytków zielonych. Jednak przy ich intensywnej chemizacji (która na obszarze opracowania raczej nie powinna mieć miejsca) i wypasaniu, użytki zielone mogą stanowić istotne źródło spływających do jezior biogenów.

Przedstawiony obraz komplikuje jeszcze dodatkowo bardzo wysoka korelacja dodatnia udziału lasów w powierzchni bezpośrednich zlewni bezodpływowych z zawartością fosforu całkowitego w wodach jezior (0,935) (ryc. 20) i wysoka ujemna korelacja udziału gruntów ornych z tym samym parametrem czystości wód (-0,852). Zaburza to całkowicie utarte poglądy, gdyż sugeruje, że im więcej lasów lub im mniej gruntów ornych w zlewni bezpośredniej tym większa jest zawartość fosforu całkowitego w jeziorach. Określenie natury tych związków wymaga prowadzenia dalszych badań. Na tym etapie pracy można jedynie stwierdzić, że uzyskane wyniki mogą być przypadkowe, gdyż głównym źródłem związków fosforu w jeziorach są ścieki, natomiast ich dostawa z obszarów rolniczych i leśnych stanowi tylko źródło uzupełniające.

Pewne związki ze stanem czystości wód, także niejednoznaczne, wykazuje kontrastowość krajobrazowa. Stwierdzono je tylko dla jezior średnio i silnie narażonych na presję ze strony zlewni o współczynniku Schindlera większym od 10. Wykazano mianowicie, że wraz ze wzrostem kontrastowości krajobrazowej maleje zawartość chlorofilu w wodach jezior (-0,744), a także polepsza się ogólna klasa czystości jezior (-0,733), co można uznać za zależności stosunkowo oczywiste (im bardziej kontrastowy jest krajobraz tym bardziej chroni on jeziora przed zanieczyszczeniami). Obraz ten zaburza dodatnia korelacja współczynnika kontrastowości



Ryc. 20. Rozkład odsetka powierzchni leśnej w zlewniach bezpośrednich jezior bezodpływowych a zawartość fosforu całkowitego w wodach jezior

Fig. 20. Diagram of the total phosphorus content in the lake water versus percentage of forested areas of the direct catchments of outflowless lakes

krajobrazu z zawartością fosforu całkowitego w jeziorach (0,692), co można tłumaczyć podobnie jak wcześniej przy związkach tego parametru stanu czystości wód jezior z użytkowaniem terenu.

W bezpośrednich zlewniach jezior bezodpływowych stwierdzono także pewne związki syntetycznego wskaźnika zdolności zlewni do odprowadzania biogenów ze stanem fizykochemicznym jezior. Niestety, wszystkie te korelacje mają znak ujemny, co mogłoby świadczyć, że im większy jest spływ biogenów ze zlewni bezodpływowej tym mniejsze jest zanieczyszczenie jezior. Wniosek ten można oczywiście uznać za błędny. Należałoby go raczej sformułować, iż zaproponowany wskaźnik nie nadaje się do określania narażenia jezior na spływy biogenów ze zlewni bezpośrednich zbiorników bezodpływowych. Powyższe ustalenia skłaniają także do wniosku, iż należałoby zmodyfikować, po wcześniejszych dokładnych badaniach wpływu struktury krajobrazu zlewni na stan wód większej liczby jezior, metodę oceny presji zlewni na jeziora proponowaną w „Systemie Oceny Jakości Jezior”.

Zlewnie całkowite

W zlewniach całkowitych najsilniejszy wpływ na stan jezior (tab.7) wykazują takie parametry struktury krajobrazu jak: niejednorodność krajobrazu (wyrażona wskaźnikiem entropii względnej), wewnętrzna spójność krajobrazu, średnia powierzchnia geokompleksu, udział użytków (gruntów ornych, lasów, użytków zielonych) oraz utworów przepuszczalnych.

Najsilniejsze zależności pozwalają na sformułowanie tezy, że im większa jest niejednorodność krajobrazu zlewni (wskaźnik entropii względnej) tym mniejsza jest zawartość fosforu całkowitego w wodach jezior. Zależności te stwierdzono zarówno dla wszystkich 44 badanych

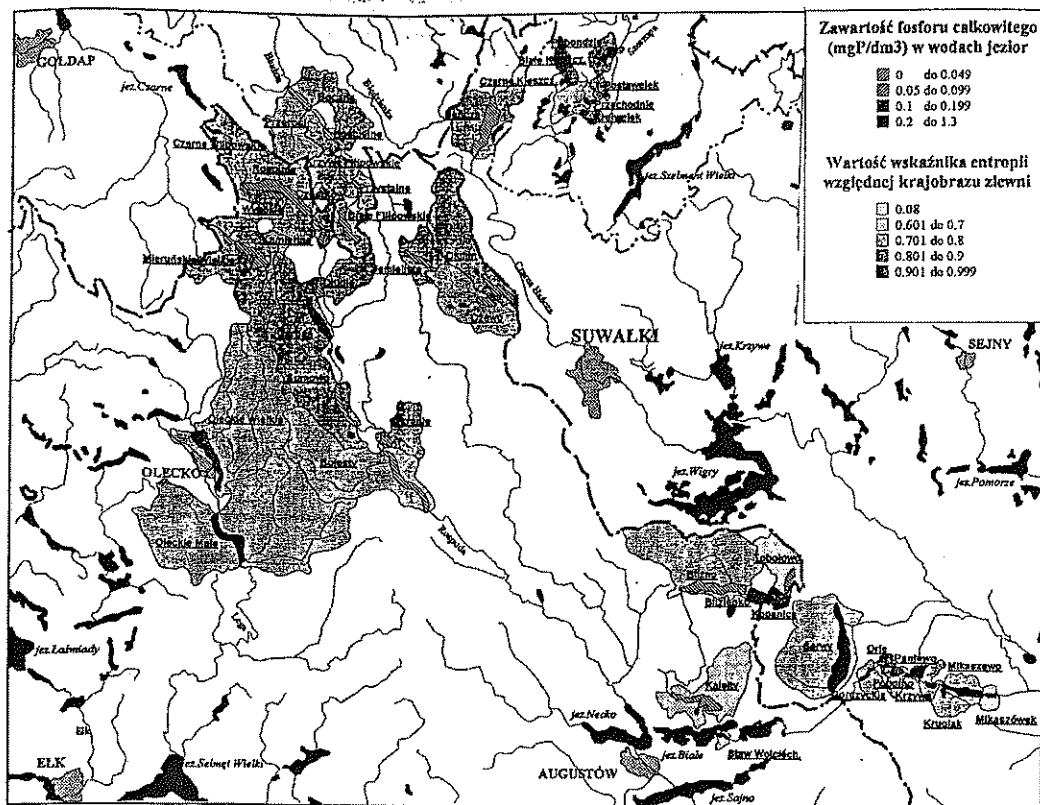
zlewni (-0,729) (ryc.21 i 22), tylko dla zlewni jezior przepływowych (-0,807), jak i dla zlewni wykazujących średnią i silną presję na jeziora o wartościach współczynnika Schindlera większych od 10 (-0,905). Na obecnym etapie badań trudno jest stwierdzić na ile otrzymane wyniki są przypadkowe, a na ile obrazują rzeczywiste zależności występujące w krajobrazie. Podobnie jest ze wskaźnikiem wewnętrznej spójności krajobrazu, który w całkowitych zlewniach jezior bezodpływowych jest silniej skorelowany dodatnio (0,896) z zawartością fosforu całkowitego, a w zlewniach o współczynniku Schindlera większym od 10 — z ogólną klasą czystości wód (0,869), a także ujemnie skorelowany z zawartością azotu całkowitego (-0,657).

Tabela 7. Współczynniki korelacji struktury krajobrazu zlewni całkowitych i stanu czystości jezior
Table 7. The correlations coefficients of landscape structure of whole catchments versus lake purity state

Parametry struktury krajobrazu	Parametry stanu czystości jezior							
	BZT ₅	Fosforany	Fosfor cał.	Azot min.	Azot cał.	Chlorofil	Seston	Klasa czyst.
średnia pow. geok.			0,655*		-0,636****	-0,672****		-0,761****
kontrastowość krajob.			0,777****			-0,729****		-0,725****
wewn. spójność krajo..			0,896*		-0,657****			0,869****
entropia względna krajobrazu			-0,807** -0,905**** -0,729 ^{sum}					
odsetek lasów			0,899*		-0,681****	-0,635****		-0,7****
odsetek uż. zielonych			-0,614*	0,627*	0,647*	0,642*		
odsetek grunt. ornych			-0,807*		0,656****	0,604****		0,65****
odsetek obszarów depozycji	0,637* -0,69****							
odsetek utw. przepusz.			0,823*		-0,635****	-0,756****		-0,819****
tranzyt/utw. przep./UZ		0,619****						
tranzyt/utw. przep./GO			-0,635*					
wskaźnik syntetyczny					0,685****			0,746****
sum — wszystkie badane zlewnie; * — zlewnie jezior bezodpływowych; ** — zlewnie jezior przepływowych; *** — zlewnie jezior o współczynniku Schindlera <10; **** — zlewnie jezior o współczynniku Schindlera >10.								

Związki kontrastowości krajobrazu zlewni całkowitych ze stanem chemiczno-biologicznym jezior kształtują się podobnie jak w zlewniach bezpośrednich. W zlewniach ze znaczną presją na jeziora (wsp. Schindlera >10) zaznaczają się odwrotnieproporcjonalne zależności między średnią powierzchnią geokompleksu, a zawartością w wodzie chlorofilu, azotu całkowitego i ogólną klasą czystości oraz wprostproporcjonalna zależność z zawartością fosforu całkowitego, co może być kwestią przypadku, jak już udowodniano wcześniej.

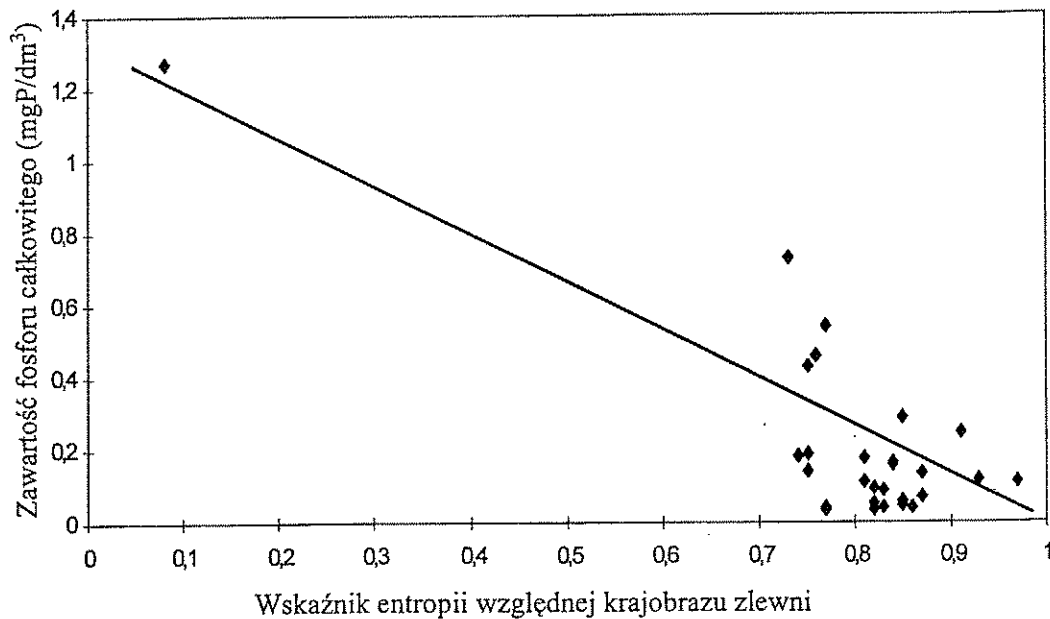
Bardziej jednoznaczna niż przy zlewniach bezpośrednich wydaje się zależność stanu czystości wód od użytkowania terenu. Co prawda związek udziału lasów w całkowitych zlewniach bezodpływowych z zawartością fosforu całkowitego znów jest wprostproporcjonalny (współczynnik korelacji 0,891), lecz w grupie zlewni o współczynniku Schindlera większym od 10, im więcej lasów tym mniejsza jest zawartość w jeziorach azotu całkowitego, chlorofilu oraz lepsza jest ogólna jakość wód. Natomiast parametry te, a także seston, pogarszają się wraz ze wzrostem udziału powierzchni gruntów ornych w tych zlewniach. Z kolei, wzrost powierzchni użytków zielonych w całkowitych zlewniach odpływowych powoduje w jeziorach wzrost zawartości azotu całkowitego i mineralnego oraz sestonu.



Ryc. 21. Rozkład wskaźnika entropii względnej w zlewniach całkowitych obszaru badań a zawartość fosforu całkowitego w wodach jezior

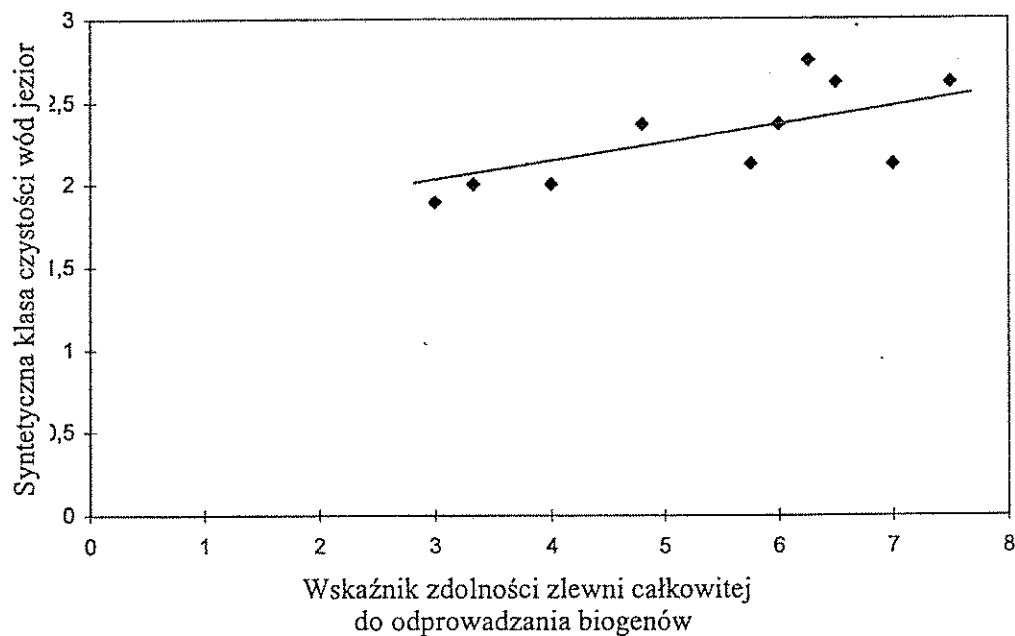
Fig. 21. Distribution of the values of relative entropy index for the whole catchments of lakes according to total phosphorus content in lake waters

Zaskakujące są natomiast wyniki badań związków z udziałem utworów przepuszczalnych w analizowanych zlewniach całkowitych o dużej presji na jeziora (współczynnik Schindlera powyżej 10). Wzrost udziału tych utworów powoduje spadek zanieczyszczeń azotem całkowitym i zawartości chlorofilu, a także polepszenie ogólnej klasy czystości jezior. Wyniki te skłaniają do zastanowienia się nad potrzebą modyfikacji metod ogólnej oceny presji zlewni na jeziora wynikającej ze struktury krajobrazu, tak w odniesieniu do metod zaproponowanych w niniejszym opracowaniu, jak i w „Systemie Oceny Jakości Jezior” (Kudelska, Cydzik, Soszka 1983, 1992). Można jednak stwierdzić, że zaproponowany przez autora syntetyczny wskaźnik zdolności zlewni do odprowadzania biogenów znacznie bardziej nadaje się do stosowania dla zlewni całkowitych niż dla zlewni bezpośrednich, szczególnie jeśli zlewnie wykazują średnie lub wysokie (>10) wartości współczynnika Schindlera. Świadczy o tym korelacja pomiędzy syntetycznym wskaźnikiem presji zlewni całkowitej a klasą czystości wód jezior (ryc.23) wynosząca 0,746.



Ryc. 22. Rozkład wskaźnika entropii względnej krajobrazu całkowitych zlewni jezior przepływowych a zawartość fosforu całkowitego w wodach jezior

Fig. 22. Diagram of the total phosphorus content in the lake water versus the value of relative entropy index of the whole catchments of outflow lakes



Ryc. 23. Rozkład wartości wskaźnika zdolności do odprowadzania biogenów całkowitych zlewni jezior o współczynniku Schindlera większym od 10 a wartość ogólnej klasy czystości jezior

Fig. 23. Diagram of the general lake quality class versus the value of synthetic index of the whole catchments ability to biogenic draining (for lakes with Schindler index >10)

Wnioski

Zastosowanie zaproponowanej w opracowaniu metody badania związków struktury środowiska przyrodniczego ze stanem chemiczno-biologicznym jezior przyniosło częściowo pozytywne rezultaty. Ze stosunkowo dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że wzrost powierzchni krajobrazów depozycyjnych w bezpośrednich zlewniach jezior bezodpływowych lub zlewniach o niewielkiej presji na jeziora wynikającej z ich morfometrii, powoduje wzrost zanieczyszczeń jezior wyrażonych takimi parametrami jak: azot całkowity i mineralny, BZT₅ i seston. Wyraźny jest także związek niejednorodności krajobrazu zlewni, wyrażony wskaźnikiem entropii względnej, z zawartością fosforu całkowitego w wodach jezior. Im większa niejednorodność krajobrazu (czyli im mniej dana jednostka przestrzenna dominuje w krajobrazie zlewni) tym mniejsza jest zawartość fosforu w jeziorach.

Wiele zależności stwierdzonych pomiędzy strukturą użytkowania gruntów, a stanem czystości jezior wskazało na niejednoznaczność przebiegu procesów dostawy zanieczyszczeń ze zlewni do jezior. Niektóre z nich udokumentowały zależności odmienne od powszechnie uznawanych. W związku z tym, za konieczne uznaje się podjęcie próby modyfikacji dotychczas stosowanych metod oceny presji zlewni na jeziora, szczególnie w kontekście wpływu na te procesy powierzchniowych utworów geologicznych oraz pokrywy roślinnej.

Stwierdzenie opisanych zależności opierało się na badaniu stosunkowo niewielkiej liczby jezior i ich zlewni, co często mogło wpłynąć na przypadkowość wyników lub ich zniekształcenie. W związku z tym sugeruje się przeprowadzenie dalszych badań, w których zostałyby uwzględnione co najmniej 100 obiektów, położonych w różnych częściach polskich pojezierzy i regularnie monitorowanych. Należy także w szerszym stopniu uwzględnić zróżnicowanie jezior pod względem punktowej dostawy zanieczyszczeń do wód. Pozwoli to na wzmocnienie postawionych w niniejszym opracowaniu tez i zaproponowanie pełniej uzasadnionych zmian w dotychczas stosowanych metodach.

Literatura

- Bajkiewicz-Grabowska E., 1985, Struktura fizycznogeograficzna zlewni jako podstawa oceny dostawy materii biogennej do jezior, *Prace i Studia Geogr. UW*, t.7.
- Bajkiewicz-Grabowska E., 1987, Ocena naturalnej podatności jezior na degradację i rola zlewni w tym procesie, *Wiad. Ekolog.*, T. XXXIII, z.3.
- Bierlant A. M., 1978, *Kartograficeskij mietod issliedowanij*, Izd. Moskw. Uniw., Moskwa.
- Giercuskiewicz-Bajtlik M., 1987, *Degradacja jezior Ewingi, Żnińskie Duże i Tuczo*, IKŚ, PWN, Warszawa.
- Hillbricht-Ilkowska A. (red.), 1989, *Jeziora Mazurskiego Parku Krajobrazowego. Stan eutrofizacji, kierunki ochrony*, Komitet Naukowy „Człowiek i Środowisko” PAN, Zeszyty Naukowe 1, Ossolineum.
- Hillbricht-Ilkowska A., Wiśniewski R. J. (red.), 1994, *Jeziora Suwałskiego Parku Krajobrazowego. Związki z krajobrazem, stan eutrofizacji, kierunki ochrony*, Komitet Naukowy „Człowiek i Środowisko” PAN, Zeszyty Naukowe 7, Ossolineum.
- Instrukcja opracowania Mapy Hydrograficznej Polski 1:50.000, 1964, Dokument. Geogr. nr 3, Inst. Geografii PAN, Warszawa
- Kajak Z., 1979, *Eutrofizacja jezior*, PWN, Warszawa.
- Kistowski M., 1995, Propozycja metody oceny przyrodniczych uwarunkowań ekorozwoju w skali makroregionalnej (na przykładzie Polski północno-wschodniej), *Przegl. Geogr.*, T. LXVII, z.1-2.

- Kudelska D., Cydzik D., Soszka H., 1983, System oceny jakości jezior, IKŚ, Warszawa.
- Kudelska D., Cydzik D., Soszka H., 1992, Wytyczne monitoringu podstawowego jezior, PIOŚ, Warszawa.
- Lange W., 1986, Fizyczno-limnologiczne uwarunkowania tolerancji systemów jeziornych Pomorza, Zesz. Nauk. UG, Rozprawy i Monografie, 79, Wyd. Uniw. Gdańskiego, Gdańsk.
- Neumeister H., 1979, Struktura mikrochor i pedochor, Przegl. Zagr. Lit. Geogr, z.2.
- Perelman A. J., 1991, Geochemia krajobrazu, PWN, Warszawa.
- Richling A., 1972, Struktura krajobrazowa Krainy Wielkich Jezior Mazurskich, Prace i Studia Inst. Geogr. Uniw. Warszawskiego, z.10, Geografia Fizyczna, z.4.
- Richling A., 1992, Kompleksowa geografia fizyczna, PWN, Warszawa.
- Zdanowski B. (red.), 1992, Jeziora Wigierskiego Parku Narodowego. Stan eutrofizacji i kierunki ochrony, Komitet Naukowy „Człowiek i Środowisko” PAN, Zeszyty Naukowe 3, Ossolineum.

Summary

Generally, in investigations on reason of lake water contamination majority of scientists have concentrated on physical (morphometrical) and biological features of lakes & their catchments. The attempts of investigation on relation between landscape structure of catchment and state of lakes concentrated on analyze of 10-20 lakes and took into consideration very general informations about relief, lithology and land cover in catchments.

I decided to more particular investigations on connenctions between landscape structure and state of lakes resulted not only from frequency of landscape components' features and state of lakes but from mutual localization of geocomponents & geocomplexes in catchment areas, too.

44 lakes and their catchment basins in North-Eastern part of Poland (Suwałki Voivodeship) were the object of investigations. Lake were differentiated in their area, hydrological regime and values of Ohle and Schindler indexes (tab.4) The influence of landscape structure on chemical and biological state of lakes was analyzed separately for direct (areal) catchments and for whole catchment basins of lakes. Geocomplexes—the spatial units of landscape structure were delimited in every catchment area. For delimitation of geocomplexes I used 3 criteria: relief features (6 classes—fig.2), surface lithology (21 classes—tab.3) and land use—cover (6 classes). Delimitation of geocomplexes was presented on 1:25.000 topographical maps, as a result of different maps' compilation and field researches. On a base of geocomplex maps I calculated the values of landscape structure limits (average area of geocomplex in catchment, index of landscape contrast, index of average internal compactness, index of relative landscape entrophy) and frequency of landscape components' features or their sequences in every catchment area.

The next step was the analyze of lake water chemical & biological state (tab.5). I used the results of analysis rewaliaed in Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection in Suwałki. The analysis concerned on: ChOD, BOD₅, phosphates, total phosphorus, mineral nitrogen, total nitrogen, chlorophyll and seston. I have calculated the correlation coefficients between parameters of landscape structure and parameters of lake water state. Correlation coefficients were calculated for all lakes & their catchments and separately for groups of lakes depended on balance type of lakes and other physical & limnological features of lakes.

Calculations of correlations between landscape structure and state of lakes were realized separately for direct (tab.6) and whole (tab.7) catchments of lakes. Generally, it was found that for 44 investigated lakes and their catchments exist the correlations:

- between values of index of relative landscape entrophy for whole catchment basins and contents of total phosphorus in lake water (fig. 21, 22);

- between frequency of deposition elementary landscapes (bottom of valleys and hollows) of direct catchments areas and contents of mineral & total nitrogen, BOD₅ & seston in lake water (fig. 18, 19)
- between values of synthetic index of the whole catchments ability to biogenous draining and general lake quality class (fig. 23).

Recenzent: dr hab. Daniela Sołowiej, Instytut Geografii Fizycznej Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu