

UNIwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut
Geografii

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Zmiany powierzchni jezior w zlewniach Raduni, Wierzycy i Wdy od końca XIX wieku

mgr Katarzyna Czaja

Promotor:

prof. nadzw. dr hab. Joanna Fac-Beneda

Gdańsk 2019

1. Zarys problematyki

Obszar młodoglacjalny na terenie Polski ze względu na dużą liczebność jezior jest dobrym terenem badawczym. W polskiej literaturze tematyka zmian powierzchni jezior była podejmowana przez wielu naukowców. Analizowali oni zmiany powierzchni jezior w obrębie danych jednostek, tj. dorzeczy czy pojezierzy, jak również pojedynczych obiektów. Jednak do tej pory zlewnie Raduni, Wdy i Wierzycy, gdzie średnia jeziorności wynosi 2,5%, a miejscami nawet 10%, nie doczekały się szczegółowego opracowania w tym zakresie. Dlatego też zdecydowałam się na podjęcie pracy w obrębie tego obszaru badawczego.

Tematyce zmian powierzchni jezior w ostatnim czasie poświęca się sporo miejsca, również w literaturze światowej. Wzrost zainteresowania tą tematyką obserwujemy od lat 80-tych XX wieku. Wcześniej brak wynika z niedostępności jednolitego materiału kartograficznego edytowanego w dłuższych odstępach czasu oraz trudności w jego uzyskaniu. Jeszcze do niedawna materiały te były rozproszone i trudno dostępne. Obecnie do oceny zmian wykorzystywane są nie tylko mapy dawne czy współczesne, ale coraz częściej również zdjęcia lotnicze i satelitarne. Daje to możliwość bieżącej rejestracji i oceny zmian powierzchni zasobów wodnych. Temat jest bardzo aktualny, gdyż zmiany powierzchni jezior w XX wieku, a zwłaszcza ich zmniejszenie, stały się problemem ogólnoswiatowym. Woda znika w jeziorach szybciej niż kiedykolwiek. Drastycznie spada powierzchnia jezior na wszystkich kontynentach i na wszystkich szerokościach geograficznych, choć zdarzają się wyjątki. Należy uznać, że problem badawczy podjęty w pracy jest zagadnieniem istotnym dla środowiska akademickiego. Pozwala porównać tempo zmian z innymi obszarami Polski i świata. W pracy podjęto próbę nie tylko inwentaryzacji powierzchni i liczebności jezior, ale również za pomocą metod statystycznych ustalenia czynników, które decydują o zmianach powierzchni jezior.

2. Cel i hipoteza

W niniejszej pracy podjęto zagadnienie zmian powierzchni jezior. Jednak na przestrzeni wieków, nie zmieniała się jedynie powierzchnia zbiorników. Przemianom podlegało całe środowisko, w tym struktura użytkowania zlewni całkowitej. Dlatego jezioro, jako obiekt nierozdzielnie związany ze zlewnią, powinien być rozpatrywany w tej jednostce.

Postawiono główną hipotezę pracy: **użytkowanie zlewni całkowitej jeziora wyrażone poprzez udział poszczególnych komponentów (lasów, terenów rolnych, łąk, podmokłości, terenów antropogenicznych) w jej strukturze, a także ich zmiany w okresie od przełomu XIX i XX wieku do 2010 roku nie wpłynęły na zmiany powierzchni jezior w zlewni Raduni, zlewni Wierzycy oraz zlewni Wdy w okresie od końca XIX wieku do początku XXI wieku.**

Założono, że weryfikację postawionej hipotezy można osiągnąć poprzez określenie kierunku i tempa zmian powierzchni jezior oraz poszczególnych komponentów. Praca miała również na celu określenie tendencji zmian powierzchni jezior i ustalenie zróżnicowania ich liczebności. Podjęto również próbę określenia przy pomocy statystycznych metod badawczych, jakie cechy decydują o odporności zbiorników na zmiany powierzchni.

Ponadto celem pracy było stworzenie szerszego opracowania obrazującego zmiany powierzchni badanych zbiorników wraz z charakterystyką morfometryczną i strukturą użytkowania terenu zlewni całkowitej.

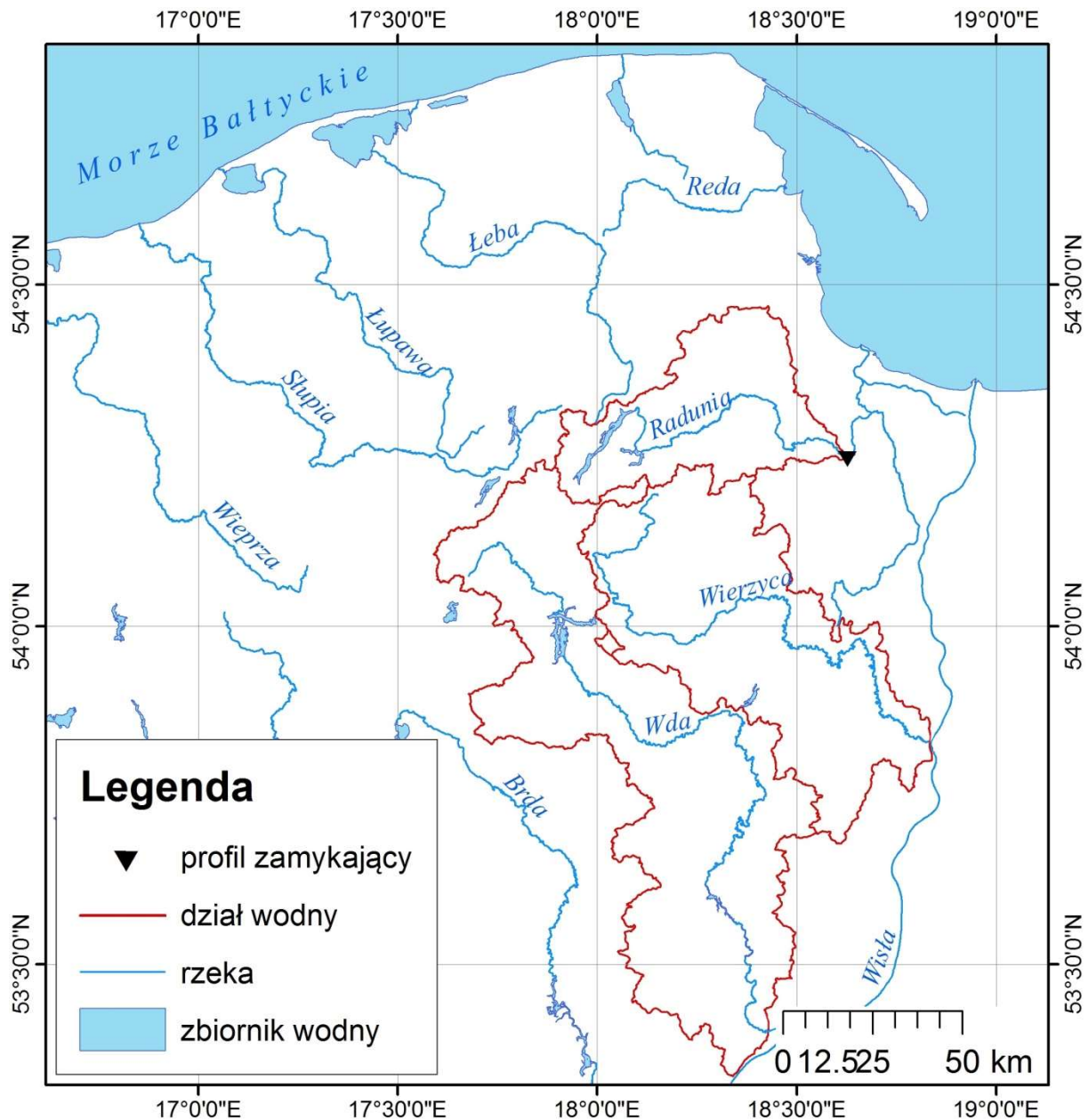
3. Postępowanie i metody badawcze

Obszar badań obejmuje trzy zlewnie: Raduni, Wierzycy i Wdy. Położony jest w północnej Polsce. Są one częścią kaszubskiego systemu hydrograficznego – ksh (Ryc. 1). Analiza zmian powierzchni jezior wymagała rozpatrywania zagadnienia przynajmniej w dwóch różnych okresach. Badanie zmian powierzchni jezior objęło okres od końca XIX wieku do początku XXI wieku, z okresem pośrednim przypadający na lata 1975/85. Natomiast zakres czasowy analizy zmian struktury użytkowania nie uwzględniał okresu pośredniego.

Pierwszym krokiem była kwerenda literatury z zakresu zmian powierzchni jezior oraz wiedzy o poligonie badawczym. Następnie pracę podzielono na dwa główne etapy: interpretację materiału kartograficznego oraz analizę statystyczną (Ryc. 2).

Pomiary zmian powierzchni jezior oparto na analizie porównawczej materiału kartograficznego pochodzącego z różnych okresów badawczych. Podstawę stanowiły mapy w skali 1:25000. Działania na tym etapie polegały na wygenerowaniu z zapisu treści poszczególnych arkuszy map powierzchni jezior, wykreśleniu zlewni całkowitej jezior oraz struktury użytkowania tych zlewni. Pomiary kartometryczne wykonano przy użyciu narzędzi GIS. Przyjęta metoda umożliwiła ocenę wielkości zmian powierzchni oraz oszacowanie ich tempa. Była również podstawą do podziału jezior na niezależne zbiorowości, tj. jeziora,

których powierzchnia nie wykazała wyraźnych zmian powierzchni (SP), wzrosła (WP) oraz zmniejszyła się (ZP) (Tab. 1).



Ryc. 1. Położenie obszaru badań

Wszystkie materiały kartograficzne charakteryzują się dobrą dokładnością. Dodatkowo jednakowa skala map sprawia, że błąd oraz generalizacja zostały ograniczone do minimum. Podstawą opracowania pokrycia terenu w pierwszym okresie badawczym posłużyły Topographische Karte, w drugim zaś – baza danych Corine Land Cover 2006 (CLC2006). Kartowanie pokrycia terenu CLC 2006 odpowiada dokładności mapy w skali 1:100000. W związku z faktem, że materiały miały różną skalę, aby zminimalizować błędy, strukturę

użytkowania terenu dla początku XXI wieku zweryfikowano dodatkowo w oparciu o mapy sozologiczne w skali 1:50000. Mapy te z kolei sporządzone zostały na podstawie mapy zasadniczej w skali 1:10000.

Tab. 1. Wydzielenia

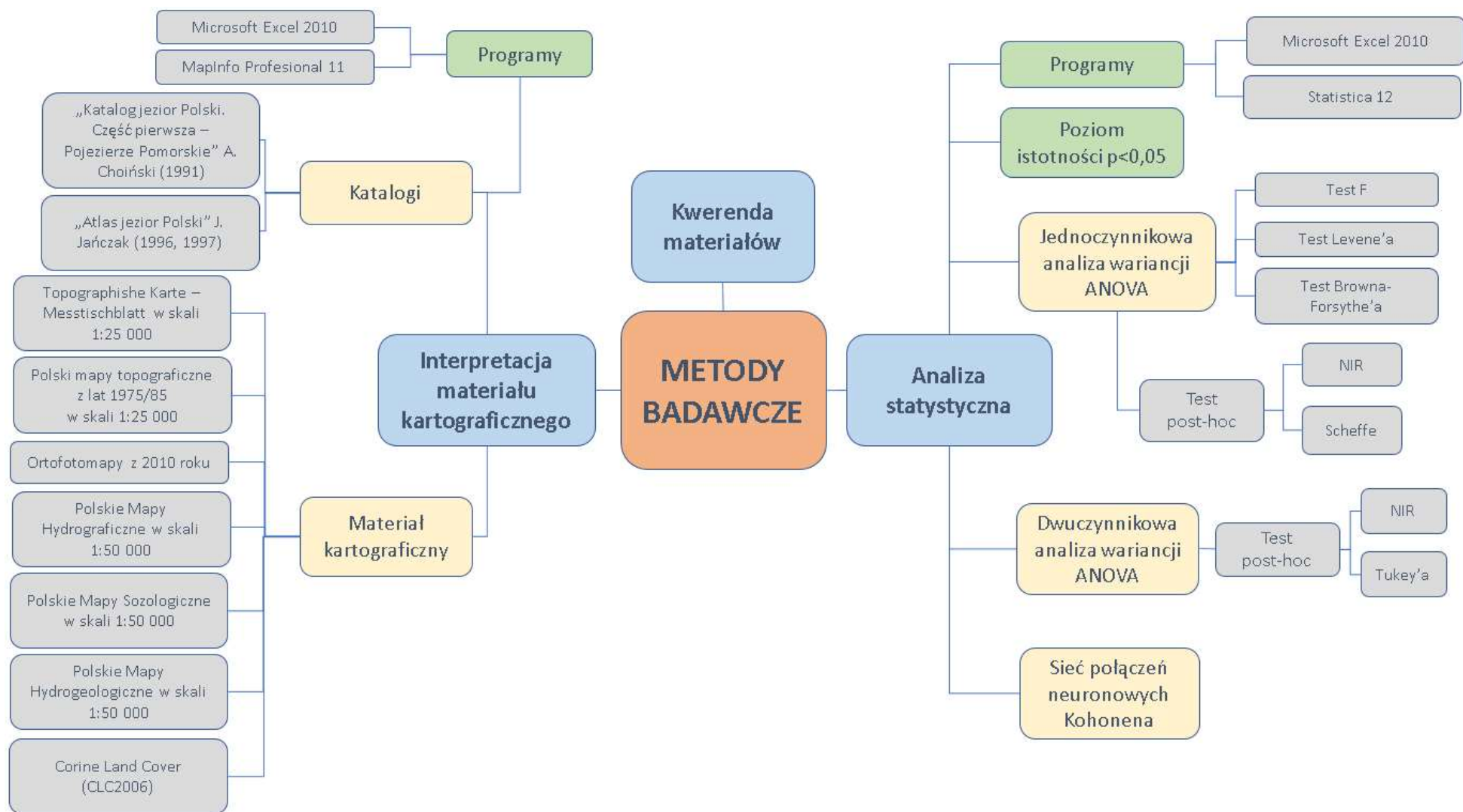
| Wydzielenia | | | |
|---------------------------|--|---------------|------------------------|
| SP | Jeziora bez wyraźnych zmian powierzchni (0-5,0%) | | |
| WP | Jeziora, których powierzchnia wzrosła (>5,1%) | | |
| ZP | Jeziora, których powierzchnia zmniejszyła się | | |
| ZP1 | Spadek powierzchni 5,1-10,0% | | |
| ZP2 | Spadek powierzchni 10,1-20,0% | | |
| ZP3 | Spadek powierzchni 20,1-30,0% | | |
| ZP4 | Spadek powierzchni >30,1% | | |
| Typ zasilania bilansowego | | | |
| Odływowe | | | |
| Przepływowe | | | |
| Bezodływowe | | | |
| Typ morfogenetyczny | Powierzchnia jezior | | |
| K | Jeziora kotłowe | 0-1,0 ha | |
| R | Jeziora rynnowe | 1,1-5,0 ha | |
| KR | Jeziora kotłowo-rynowe | 5,1-10,0 ha | |
| N | Jeziora nieckowate | 10,1-20,0 ha | |
| D | Jeziora depresyjne | 20,1-50,0 ha | |
| DR | Jeziora depresyjno-rynowe | 50,1-100,0 ha | |
| W | Jeziora włożone | >100,1 ha | |
| Skupienia jezior | | | |
| Cechy morfometryczne | Struktura użytkowania zlewni całkowitej | | |
| C1 | Powierzchnia jeziora | U1 | Lasy |
| C2 | Powierzchnia zlewni całkowitej | U2 | Tereny rolne |
| C3 | Objętość | U3 | Tereny antropogeniczne |
| C4 | cechy Głębokość maksymalna | U4 | cechy Łąki |
| C5 | Głębokość średnia | U5 | Podmokłości |
| C6 | Położenie zwierciadła wody n.p.m | U6 | |

Aby określić cechy decydujące o odporności jezior na zmiany, posegregowano wszystkie 499 zbiorników ze względu na obszar występowania, typ morfometryczny, typ zasilania bilansowego, czy też związek obu ostatnich. Ze względu na fakt, że nie dla

wszystkich jezior dysponowano danymi jak głębokość, objętość, wyodrębniono próbę liczącą 202 przypadki. Jeziora do niej należące podzielono na sześć grup pod względem podobieństwa jednocześnie na kilka cech morfometrycznych. Na tej próbie analizowano również wpływ użytkowania zlewni na zmiany powierzchni zbiorników.

Następnie przystąpiono do analizy wyników. Zastosowano nowatorskie podejście. Badania oparto o nowoczesne i niestosowane prawie w ogóle w badaniach nad zmianami powierzchni jezior w Polsce testy statystyczne, tj. jedno- i dwuczynnikową analizę wariancji ANOVA. Dla wszystkich przeprowadzonych analiz założono poziom istotności $p < 0,05$. W przypadku wykazania istotnych różnic statystycznych stosowano testy post-hoc. Dla jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA był to test NIR i Scheffe, zaś w przypadku dwuczynnikowej analizy wariancji ANOVA test NIR oraz test Tukey'a.

Do „Katalogu zmiany powierzchni wybranych jezior w zlewniach Raduni, Wierzycy i Wdy od końca XIX wieku” wytypowano jeziora, w których zmiana powierzchni w ciągu 110 lat wynosiła ponad 30% lub nastąpił ich rozpad na mniejsze akweny. Obejmuje on zestawienie danych dla 130 jezior. Jego celem była nie tylko wizualizację zmian powierzchni jezior, ale również zmian w strukturze użytkowania zlewni na przestrzeni wieku i parametrów morfometrycznych jak: długość i szerokość jeziora, wskaźnika wydłużenia, długości linii brzegowej. Wszystkie pomiary wykonane zostały przez autorkę. Aby w czytelny i jasny sposób zaprezentować dane, stworzono kartę katalogową. Zawierała ona numer jeziora nadany przez autorkę a także numer z Atlasu jezior Polski (AJP) i Katalogu jezior Polski (KJP) oraz zdjęcie zbiornika. Dane takie jak głębokość maksymalna, czy objętość zaczerpnięto z „Katalogu jezior Polski” (Choiński, 1991) oraz „Atlasu jezior Polski” (Jańczak, 1997) – jeżeli były dostępne (Ryc. 3).

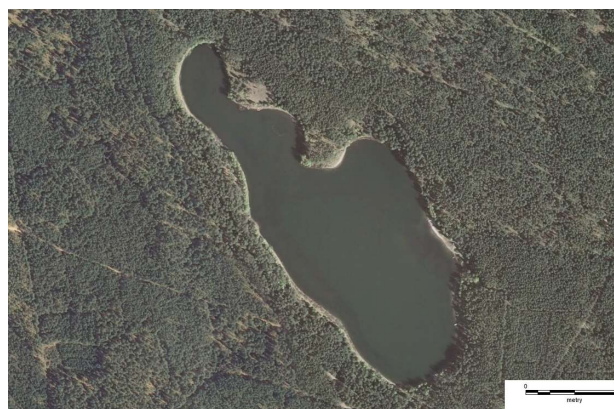


Ryc. 2. Postępowanie badawcze

JEZIORO PRUSIONKI WIELKIE

Numer

| | |
|-----------------|-----------------------------|
| Wg ryc. 1.1.2.: | 174 |
| Wg KJP: | Część I, arkusz 28, poz. 98 |
| Wg AJP: | Tom II, poz. 656 |

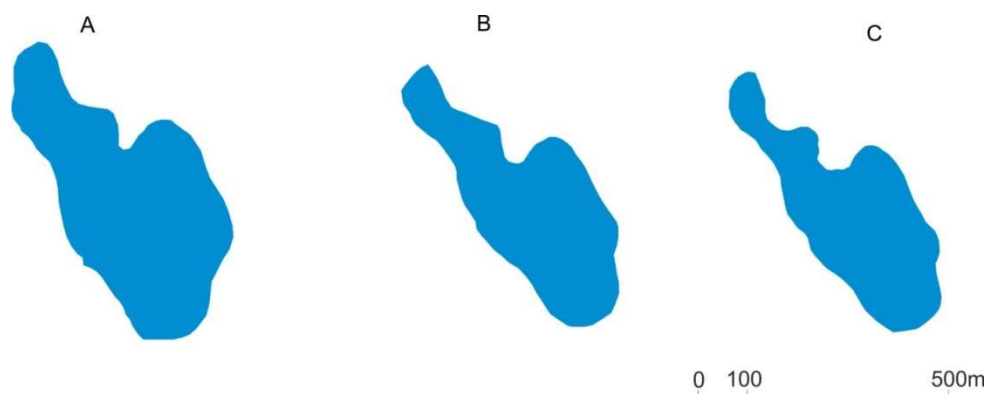


Charakterystyka morfometryczna

| | Przełom XIX | | Lata | Rok 2010 | Dane |
|---------------------------|-------------|--------|---------|----------------------------------|-------|
| | i XX w. | | 1975/85 | | |
| | A | B | C | AJP | |
| Powierzchnia (ha): | 13,3 | 9,6 | 9,0 | Objętość (tys. m ³): | 181,8 |
| Długość jeziora (m): | 658,4 | 617,1 | 616,8 | Głębokość maksymalna (m): | 4,5 |
| Szerokość średnia (m): | 202,0 | 155,6 | 145,9 | Głębokość średnia (m): | 1,8 |
| Wskaźnik wydłużenia: | 2,1 | 2,5 | 2,6 | Wysokość w m. n.p.m.: | 131,9 |
| Dł. linii brzegowej (km): | 1734,0 | 1564,0 | 1577,0 | | |

Charakterystyka zlewni

| | | |
|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| Powierzchnia (ha): | 84,7 | |
| Struktura użytkowania (%): | Przełom XIX i XX wieku | Początek XXI wieku |
| Lasy | 8,7 | 89,4 |
| Grunty orne i inne tereny rolne | 73,1 | 0,0 |
| Tereny antropogeniczne | 0,0 | 0,0 |
| Łąki | 0,0 | 0,0 |
| Tereny podmokłe | 2,5 | 0,0 |
| Wody | 15,7 | 10,6 |

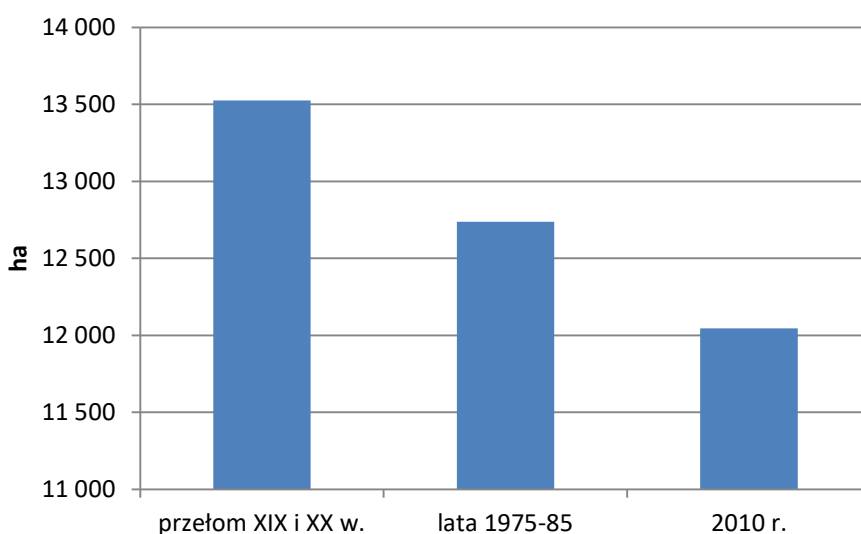


Ryc. 3. Przykładowa karta katalogowa

4. Wyniki badań

Powierzchnia zmian i udział poszczególnych jezior w obszarze badań

Od przełomu XIX i XX wieku do roku 2010 obserwujemy tendencję spadkową powierzchni jezior (Ryc. 4). Od przełomu XIX i XX wieku do drugiej połowy XX wieku zmniejszyła się ona o 5,8%. Średnie tempo zaniku wynosiło 9,8 ha na rok. W ciągu ponad 110 lat powierzchnia zbiorników wodnych uległa redukcji prawie o 11%. Średnie tempo zmniejszania powierzchni wyniosło ponad 13,4 ha rocznie. Z kolei w ostatnich 30 latach średnie tempo zmniejszania jezior wzrosło do 23,2 ha na rok.



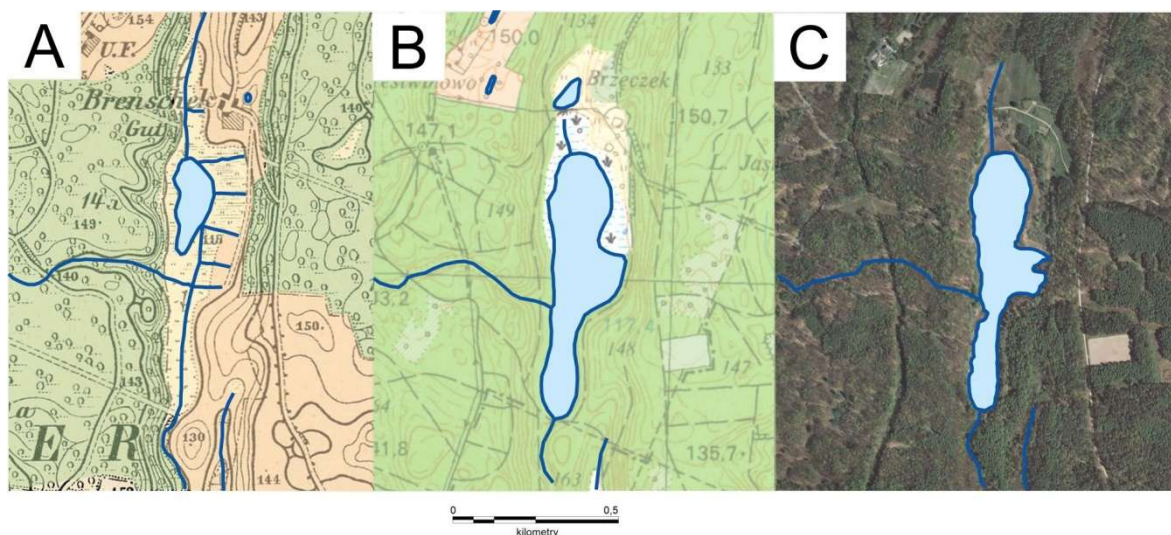
Ryc. 4. Łączna powierzchnia jezior zlewni Raduni, Wierzycy oraz Wdy w okresie od przełomie XIX i XX wieku do 2010 r.

Jeziora, których powierzchnia wzrosła

W okresie od XIX i XX wieku do roku 2010 powierzchnia jezior wzrosła o ponad 32%. Średnie tempo wzrostu powierzchni przez 110 lat wynosiło nieco ponad 1 ha rocznie. Przeprowadzone testy statystyczne dowiodły, że wzrost powierzchni jezior miał charakter skokowy. Powierzchnia jezior wzrastała do drugiej połowy XX wieku. W okresie od lat 1975/85 do początku XXI wieku obserwuje się stabilizację powierzchni tych zbiorników.

Analiza statystyczna wskazała również, że nie istnieją istotne różnice statystyczne pomiędzy poziomem zwiększenia powierzchni jezior między zlewnią Raduni, zlewnią Wierzycy czy zlewnią Wdy. Nie istnieje również statystyczna zależność między wzrostem powierzchni jezior, a ich typem morfogenetycznym czy typem zasilania bilansowego. W wielu przypadkach powstanie zbiorników czy zwiększenie ich powierzchni było rezultatem działalności człowieka. Do jednej z nich można zaliczyć wydobycie torfu. Jeszcze na początku XIX wieku w wielu regionach obszaru badań wykorzystywano go jako paliwo

opałowe. W rezultacie jego wydobywania powstawały sztuczne zagłębienia, które wypełniały się wodą. Jeziora powstawały również miejscach, w których jeszcze na przełomie XIX i XX wieku były mokradła, czy też podmokłe łąki. Jednak często czas ich istnienia był krótki i szybko zanikały. Zwiększenie powierzchni jezior było również spowodowane pracami melioracyjnymi lub ich zaniechaniem (Ryc. 5).



Ryc. 5. Zmiany powierzchni jeziora Brzeczek/ Jastrzębce (153) A- na przełomie XIX i XX wieku, B – w latach 1975/85, C – w 2010 roku

Jeziora, których powierzchnia zmniejszyła się

W okresie od przełomu XIX i XX wieku do lata 1975/85 jeziora zmniejszyły swoją powierzchnię razem o 11,7%. W przeciągu całego okresu badawczego ich powierzchnia uległa redukcji razem o 18,8 % powierzchni z przełomu XIX i XX wieku, z czego 8% powierzchni zanikło w ciągu ostatnich 30 lat. Średnie tempo zaniku z ciągu całego okresu badawczego wynosiło około 14 ha powierzchni wody rocznie.

Przeprowadzone testy statystyczne wykazały, że zmniejszenie powierzchni jezior było procesem ciągłym postępującym w czasie. W jeziorach, których powierzchnia jeszcze w pierwszym okresie badawczym była dość stabilna, odnotowano pogłębianie zmniejszenia powierzchni. Niejednokrotnie redukcja lustra wody przekroczyła 10%, a nawet 20% i 30%. Do lat 1975/85 w całym obszarze badawczym dominowały jeziora, których powierzchnia zmalała w granicach 10,1-20%. Te zbiorniki równocześnie stanowiły niemal jedną czwartą ogółu. 30 lat później najwięcej było jezior – prawie 36%, których powierzchnia zmniejszyła się o ponad 30,1%. W okresie od 1975/85 do 2010 roku nastąpiło niemal podwojenie liczby jezior, w których powierzchnia uległa redukcji o ponad 30%.

Nie wystąpiły statystyczne zależności pomiędzy zmniejszeniem powierzchni jezior, a ich położeniem ze względu na zlewnie. Zmniejszenie powierzchni jezior uzależnionej było natomiast od typu morfometrycznego oraz typu zasilania bilansowego. Wielkość jezior oraz typ morfogenetyczny były jedną z cech determinujących zmniejszenie ich powierzchni.

Wystąpiły istotne różnice statystyczne pomiędzy jeziorami rynnowymi a kotłowymi oraz rynnowymi i kotłowo-rynnowymi. Natomiast pomiędzy jeziorami nieckowatymi a rynnowymi oraz pomiędzy kotłowo-rynnowymi i kotłowymi nie odnotowano istotnych różnic statystycznych. Szybciej powierzchnię zmniejszają jeziora bezodpływowe i odpływowe niż przepływowe. Natomiast nie odnotowano istotnych różnic statystycznych pomiędzy jeziorami odpływowymi i bezodpływowymi. W przypadku typu zasilania bilansowego to jeziora rynnowe przepływowe charakteryzowały się statystycznie większym ubytkiem powierzchni niż zbiorniki odpływowe. Przyczyn takiego stanu może być kilka. Jedną z ważniejszych jest zasypywanie jeziora poprzez rumowisko dostarczane wraz z wodą płynącą. Drugą z kolei, naturalne bądź antropogeniczne, zmniejszenie przepływu. W jeziorach nieckowatych zaś, to w zbiornikach bezodpływowych a nie przepływowych, odnotowano statystycznie większy poziom redukcji powierzchni.

Klasyfikacja jezior w oparciu o wybrane parametry morfometryczne

Cechy jezior

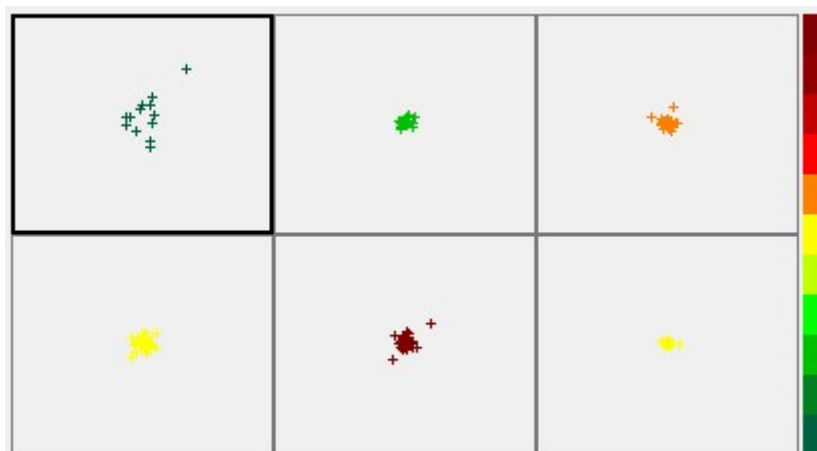
Jeziora położone w zlewni Raduni, zlewni Wierzycy i zlewni Wdy są bardzo różnorodne pod względem powierzchni, objętości, głębokości czy powierzchni zlewni (Tab. 2). Nie dla wszystkich jezior autorka dysponowała pełnymi danymi morfometrycznymi. Z tego powodu badania objęły próbę liczącą 202 jeziora.

Tab. 2. Statystyki opisowe cech diagnostycznych dla próby jezior

| Cecha | Wartość minimalna | Wartość maksymalna | Średnia | Wskaźnik zmienności (%) |
|---|-------------------|--------------------|---------|-------------------------|
| Powierzchnia jeziora (ha) | 1,6 | 1 455,6 | 56,1 | 219,9 |
| Powierzchnia zlewni (ha) | 28,2 | 20 714,7 | 1 520,3 | 206,4 |
| Objętość jeziora (tys. m ³) | 6,0 | 220 800,0 | 4 141,8 | 415,9 |
| Głębokość maksymalna (m) | 0,5 | 68,0 | 11,9 | 84,6 |
| Głębokość średnia (m) | 0,2 | 15,5 | 4,5 | 65,5 |
| Wysokość położenia zwierciadła n.p.m. | 43,0 | 204,0 | 135,2 | 23,9 |

Skupienia jezior ze względu na podobieństwo cech

W tak zróżnicowanej zbiorowości pod względem kilku cech przy pomocy sieci połączeń neuronowych Kohonena SOFT 6-6 wyodrębniono sześć skupień (Ryc. 6).



Ryc. 6. Mapa Kohonena – SOFT 6-6. Podział jezior na skupienia według danych morfometrycznych, wielkości zlewni i położenia zwierciadła wody n.p.m.

Natężenie kolorów obrazuje siłę podobieństwa pomiędzy skupieniami

Parametry jezior należących do **skupienia C1** znacznie odbiegają od pozostałych. Wyrażają się poprzez największą średnią powierzchnią jezior – ponad 300 ha, powierzchnią zlewni całkowitą – ponad 8000 ha. Średnia głębokość maksymalna i średnia liczby odpowiedni ponad 35 i 11 metrów. Dodatkowo jeziora należące do skupienia, leżą średnio ponad dziesięć metrów wyżej.

Skupienie C2 - średnie wartości parametrów dla jezior są znacznie niższe od średniej dla próby (Tab. 2). Wyjątek stanowi średnia głębokość zarówno maksymalna jak i średnia wynosząca około 11 i 5 metrów. Jeziora charakteryzuje też najniższa średnia powierzchnia zlewni – 470,9 ha oraz najniższa średnia wysokość położenia zwierciadła n.p.m. – 89,7 m.

Skupienie C3 – zwierciadła jezior leżą na najwyższych wysokościach nad poziomem morza, gdzie średnia wysokość to prawie 176 m.n.p.n, minimalna – niecałe 156 m.n.p.m, zaś maksymalna 204 m.n.p.m. Pozostałe średnie wartości cech jezior charakteryzują się wartościami niższymi od średniej dla próby. Ich średnia głębokość nie przekracza 9 metrów a minimalna 1 metra.

Skupienie C4 - cechą wyróżniającą jeziora jest średnia objętość oraz głębokość maksymalna i średnia. Poza skupieniem C1 - pierwszy parametr jest ponad dwa razy większy niż w innych skupieniach (ponad 3700 tys. m³). Średnia głębokość maksymalna wynosi - 21,6 metrów a średnia 7,6 metra.

Skupienie C5 - jeziora charakteryzują się najniższymi minimalnymi wartościami głębokości średniej i maksymalnej spośród wszystkich skupień. Pierwsza wartość nie przekracza 0,2 metra, druga wynosi jedynie 0,5 metra. Równocześnie ich zlewnie całkowite są ponad trzy razy większe niż w skupieniu C2, C3, C4 i C6. Jeziora cechuje również najniższa średnia objętość, wynosząca odpowiednio nieco ponad 1150 tys. m³.

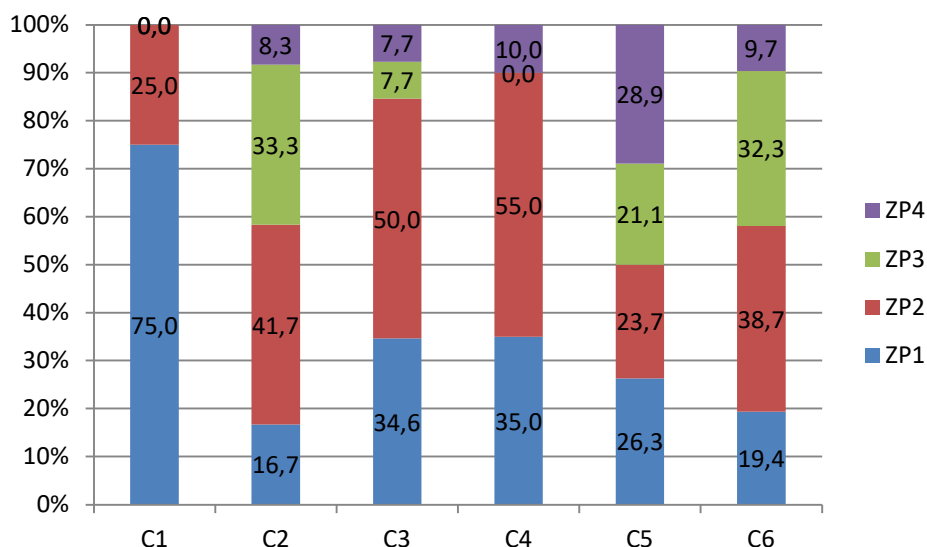
Skupienie C6 - średnia powierzchnia jezior jest najbardziej zbliżona do wartości średniej dla próby. Dodatkowo zbiorniki charakteryzują się najmniejszymi średnimi głębokościami. Średnia powierzchnia zlewni wynosi ponad 1100 ha i jest ponad dwa, a nawet trzy razy większa niż w innych skupieniach, poza skupieniem C1. Średnia wysokość położenia zwierciadła nie przekracza 100 m.n.p.m.

Zmniejszenie powierzchni jezior w skupieniach

W sześciu skupieniach procentowe wartości zmian w grupie jezior, w których odnotowano redukcje powierzchni, charakteryzowały się znaczną rozpiętością wyników. Najniższe zmniejszenie powierzchni odnotowano w C1 – 7,8%, najwyższe – ponad 20% w C2 i C5.

Przeprowadzony test ANOVA dowodzi, że istotne różnice statystyczne występują jedynie pomiędzy skupieniem C1 i C2, C1 i C3, C1 i C4, C1 i C5 oraz C1 i C6. Nie ma natomiast istotnych różnic statystycznych pomiędzy pozostałymi skupieniami. Wskazuje to na fakt, że **największą odporność na zmniejszenie powierzchni wykazały jeziora o największej powierzchni, głębokości zarówno maksymalnej jak i średniej, objętości, ale również takie, których zlewnia jest największa.** W okresie od przełomu XIX i XX wieku do początku XXI wieku maksymalny ubytek powierzchni w tym skupieniu wynosił 11,8%. W pozostałych przypadkach wartość ta nie przekroczyła 8%.

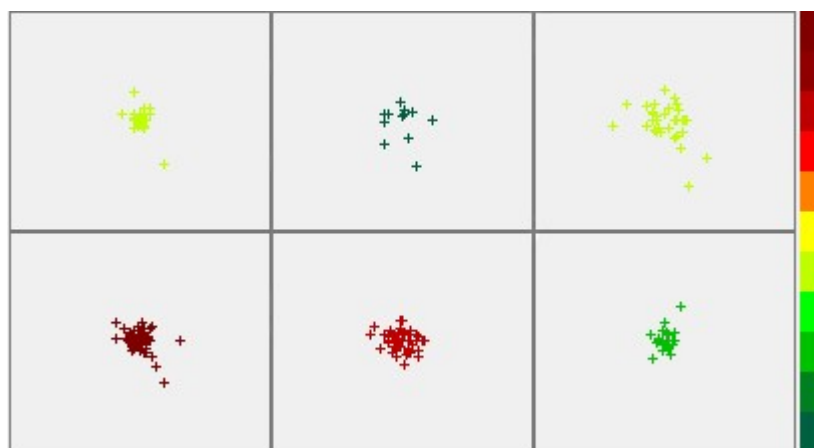
W skupieniach pomimo podobieństw jezior ze względu na cechy, występowały znaczne różnice pomiędzy procentowym spadkiem powierzchni (Ryc. 7). Największy odsetek jezior, w których spadek powierzchni mieścił się w przedziale ZP4 odnotowano w skupieniu C5, czyli w jeziorach o najniższych wartościach minimalnej głębokości zarówno średniej jak i maksymalnej. Ich zlewnie dwukrotnie a nawet czterokrotnie większe niż w skupieniu C2, C3, C4 i C6



Ryc. 17. Struktura liczby jezior w skupieniach C1, C2, C3, C4, C5, C6 ze względu na przedziały zmniejszenia powierzchni zbiorników w okresie od przełomu XIX i XX wieku do 2010 roku
Zmniejszenie powierzchni: ZP1 – od 5,1 do 10,0%, ZP2 – od 10,1 do 20%, ZP3 – od 20,1 do 30,0%, ZP4 – > 30,1%

Klasyfikacja zlewni całkowitych jezior na tle struktury użytkowania od przełomu XIX i XX wieku do początku XXI wieku

Zlewnie całkowite jezior były znacznie zróżnicowane pod względem struktury użytkowania, jak również pod względem zmian, które w nich zaszły na przestrzeni wieku. Przy pomocy sieci neuronowej Kohonena SOFT 10-6 wyodrębniono sześć skupień (Ryc. 8).



Ryc. 8. Mapa Kohonena – SOFT 10-6. Podział jezior na skupienia według struktury użytkowania zlewni na przełomie XIX i XX wieku oraz początku XXI wieku
Natężenie kolorów obrazuje siłę podobieństwa pomiędzy skupieniami

Zlewnie całkowite jezior skupione w U1 były **wybitnie rolnicze**. W całym okresie **badawczy średni udział terenów rolnych wynosił w nich ponad 80%**. Dodatkowo charakteryzowały się one **najmniejszym średnim udziałem lasu ze wszystkich skupień U, wynoszącym nieco ponad 2% na przełomie XIX i XX wieku i 6% na początku XXI w.**

Cechą charakterystyczną **skupienia U2** był **największy udział terenów podmokłych na przełomie XIX i XX wieku – około 15%**. Do początku XXI wieku podmokłości nie zachowały się, natomiast średni udział łąk wzrósł prawie dwukrotnie – do prawie 12% i był zarazem najwyższym spośród wszystkich skupień. Ponad dwukrotnie wzrósł średni udział lasów z 20,8% do ponad 50%. Zmniejszył się natomiast o ponad 40% średni udział terenów rolnych, które na początku XXI w. Zajmowały średnio jedną czwartą zlewni.

Skupienie U3 charakteryzowało się z kolei **największym średnim udziałem terenów antropogenicznych zarówno na przełomie XIX i XX wieku – 2,1% jak i na początku XXI wieku – 5,6%**. Dodatkowo skupienie wyróżniał **największy średni udział łąk na przełomie XIX i XX wieku i na początku XXI wieku**. W pierwszym okresie zajmowały średnio 11,4%, zaś 100 lat później 7,5%

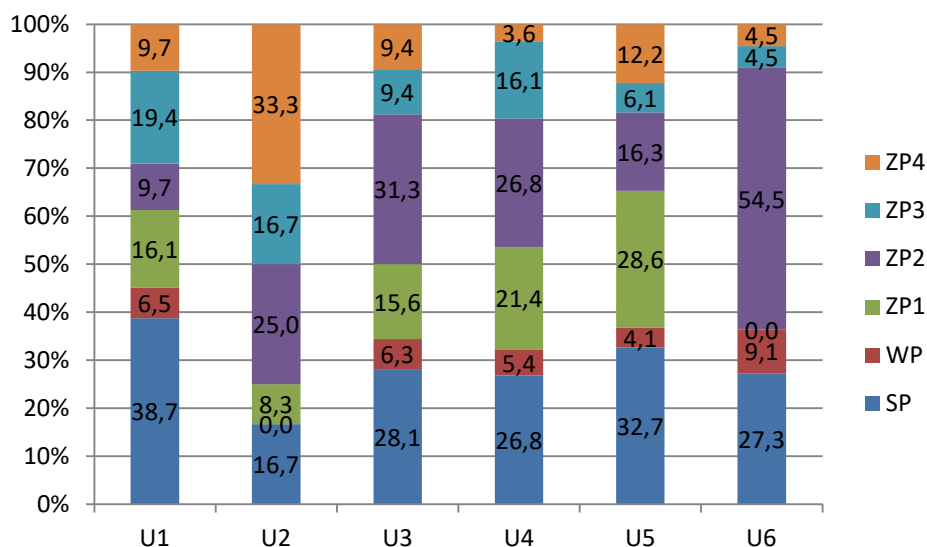
Zlewnie całkowite jezior w **skupieniu U4** były **drugimi, po U1, najbardziej rolniczymi zlewniami**, gdzie średni udział gruntów rolnych wynosił ponad 60% w dwóch cięciach czasowych. Drugą cechą charakterystyczną był **znaczny udział łąk na przełomie XIX i XX wieku – ponad 10%**. Ich średni udział na przestrzeni 100 lat spadł prawie o połowę. Zmniejszyła się również powierzchnia podmokłości. W tym przypadku można mówić o całkowitym zaniku tego komponentu.

W **skupieniu U5** na **przestrzeni XX wieku prawie czterokrotnie wzrósł udział lasów**. Na przełomie XIX i XX wieku stanowiły niecałe 15%, zaś w na początku XXI wieku – ponad 57%. Wzrósł też udział terenów antropogenicznych. Ponad pięciokrotnie spadł z kolei udział łąk z 6,5% do 1,2%. Spadł też odsetek gruntów wykorzystywanych rolniczo i podmokłości. Te pierwsze na przełomie XIX i XX wieku zajmowały ponad 60%, zaś wiek później nieco ponad jedną czwartą powierzchni zlewni.

Zlewnie jezior należące do **skupienia U6** charakteryzowały się **najwyższą wartością zalesienia**. Wynosiło ono na przełomie XIX i XX wieku ponad 70% powierzchni zlewni całkowitych, zaś na początku XXI wieku – ponad 80%. Dodatkowo zlewnie wyróżniała najniższa wartość średniego udziału podmokłości (1,1%) oraz łąk (4,8%) na przełomie XIX i XX wieku. Na przestrzeni wieku wartość jednego i drugiego komponentu spadła poniżej 1%.

Pomimo znacznych dysproporcji w strukturze użytkowania zlewni całkowitych jezior, a także zmian na przestrzeni XX wieku, we wszystkich skupieniach występowały zarówno jeziora, których powierzchnia zmniejszyła się (ZP), wzrosła (WP), a także te o powierzchni stabilnej (SP) (Ryc. 9).

W powyższej analizie nie można wysunąć żadnych jednoznacznych wniosków odnośnie wpływu struktury użytkowania zlewni całkowitej, jak również zmian w tej strukturze na zmiany powierzchni jezior. Jedynie w przypadku U2, można dopatrywać się wpływu zmian struktury użytkowania zlewni na powierzchnię jezior. Zmiany dotyczą udziału terenów podmokłych, które również stanowią obiekty hydrograficzne i ich zmiany (spadek) można bezpośrednio łączyć z zmianą stosunków wodnych w zlewniach całkowitych jezior.



Ryc. 9. Struktura liczby jezior w skupieniach U1, U2, U3, U4, U5, U6 ze względu na zmiany powierzchni zbiorników w okresie od przełomu XIX i XX wieku do 2010 roku

Zmiany komponentów w grupach zmiany powierzchni jezior w okresie od przełomu XIX i XX wieku do początku XXI wieku

Zlewnie dwustu dwóch badanych jezior charakteryzowały się różną strukturą użytkowania. Zaszły w nich jednak podobne zmiany. **Spadł udział łąk, podmokłości i terenów rolnych, zaś wzrósł udział terenów antropogenicznych i lasów.**

Lasy - Średni procentowy udział poszczególnych komponentów w grupach badawczych nie pozwolił na wyciągnięcie żadnych wniosków. Zlewnie grupy ZP4, w której jeziora zmniejszyły się powyżej 30%, były zalesiono średnio w ponad 30% (Tab. 3). Na takim samym poziomie jak zlewnie jezior, gdzie powierzchnia wzrosła (WP) oraz nie wykazała wyraźnych zmian powierzchni (SP). Na przestrzeni wieku lasów przybywało zarówno w zlewniach jezior o powierzchni stabilnej, jaki jezior, których powierzchnia wzrosła, czy też zmniejszyła się. Nie można, zatem twierdzić, że istnieje bezpośrednia zależność między

udziałem lasów w zlewni całkowitej jeziora oraz wzrostem ich powierzchni, a odpornością jezior na zmianę powierzchni, zwłaszcza jej zmniejszenie.

Tab. 3. Średnie nieważone udziały komponentów w strukturze użytkowania zlewni całkowitej jezior w ciągu XX wieku i na przełomie XIX i XX wieku oraz początku XXI wieku

| Okres | Parametr | SP | WP | ZP1 | ZP2 | ZP3 | ZP4 |
|------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| Las | Średnia z XX w. | 30,4 | 34,3 | 24,9 | 38,7 | 22,5 | 33,8 |
| | Przełom XIX i XX w. | 21,4 | 27,9 | 14,9 | 30,0 | 15,0 | 18,1 |
| | Początek XXI w. | 39,4 | 40,7 | 35,0 | 47,5 | 29,9 | 49,4 |
| Tereny rolne | Średnia z XX w. | 50,8 | 4,9 | 53,7 | 40,5 | 58,3 | 41,5 |
| | Przełom XIX i XX w. | 58,2 | 53,9 | 60,7 | 45,9 | 60,2 | 50,8 |
| | Początek XXI w. | 43,4 | 43,9 | 46,6 | 35,0 | 56,4 | 32,1 |
| Tereny antropogeniczne | Średnia z XX w. | 1,7 | 0,1 | 1,5 | 1,2 | 0,2 | 0,5 |
| | Przełom XIX i XX w. | 0,6 | 0,1 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,1 |
| | Początek XXI w. | 2,8 | 0,2 | 2,4 | 1,9 | 0,4 | 0,9 |
| Łąki | Średnia z XX w. | 4,7 | 5,3 | 6,3 | 6,4 | 6,6 | 8,2 |
| | Przełom XIX i XX w. | 6,3 | 6,8 | 8,3 | 8,5 | 9,8 | 10,3 |
| | Początek XXI w. | 3,1 | 3,9 | 4,2 | 4,4 | 3,3 | 6,1 |
| Podmokłości | Średnia z XX w. | 1,0 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 1,1 | 3,0 |
| | Przełom XIX i XX w. | 2,0 | 2,0 | 2,7 | 2,1 | 2,1 | 5,5 |
| | Początek XXI w. | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |

Tereny antropogeniczne - Największym średnim udziałem terenów antropogenicznych w całym okresie badawczych charakteryzowały się jeziora o powierzchni stabilnej. Średni procentowy udział terenów antropogenicznych spadał wraz ze wzrostem redukcji powierzchni jezior, choć różnice były statystycznie nieistotne na poziomie $p < 0,05$. W okresie 100 lat we wszystkich grupach badawczych odnotowano trend wzrost udziału terenów antropogenicznych w strukturze użytkowania terenu zlewni całkowitych badanych jezior, ale tylko w jeziorach niewykazujących wyraźnych zmian powierzchni (SP) był on statystycznie istotny. Pamiętać jednak trzeba, że jeziora o powierzchni stabilnej (SP) charakteryzowały się największą powierzchnią, objętością, głębokością, i że takie właśnie jeziora były najbardziej odporne na zmiany powierzchni.

Tereny rolne - Zmian powierzchni jezior nie można w bezpośredni sposób łączyć również ani ze średnim udziałem terenów rolnych w strukturze użytkowania zlewni całkowitej jezior, ani z wielkością udziału na przełomie XIX i XX wieku oraz na początku XXI wieku. Średni udział tych terenów w pierwszym cięciu czasowym oraz w przeciągu całego okresu badawczego w grupie SP, ZP1 oraz ZP3 był na podobnym poziomie (50%), a w jeziorach odnotowano bardzo odmienne zmiany powierzchni jezior. Co prawda

w zbiorowości ZP3 spadek użytków rolnych był statystycznie nieistotny, a na początku XXI wieku udział tego komponentu był najwyższy w porównaniu z innymi grupami badawczymi. Jednak to w grupie ZP4 zmiany powierzchni były największe, a średni udział terenów rolnych w całym okresie badawczym oraz na przełomie XIX i XX wieku jak i początku XXI wieku należał do jednego z najniższych.

Łąki i podmokłości - Jedynie w przypadku udziału łąk czy też podmokłości można dopatrywać się powiązania powierzchni zajmowanej przez te komponenty z procentowymi zmianami, zwłaszcza zmniejszeniem powierzchni jezior. Największym ich średnim udziałem w całym okresie charakteryzowały się jeziora grupy ZP4, czyli te, w których odnotowano spadek powierzchni o ponad 30%. W pozostałych zbiorowościach udział podmokłości był o ponad połowę a nawet trzykrotnie mniejszy. Różnice te były statystycznie istotne. Z kolei w przypadku łąk zaznaczył się jedynie trend statystycznie nieistotny - im mniejszy średni procentowy udział łąk w strukturze użytkowania, tym mniejsze procentowe zmiany powierzchni.

Statystycznie istotny spadek łąk i terenów podmokłych odnotowano we wszystkich grupach, za wyjątkiem jezior, których powierzchnia wzrosła (WP). Brak statystycznych różnic w udziale tych komponentów w grupie WP na przestrzeni 100 lat dowodzi, że na terenach tych poziom wody nie obniżył się tak bardzo jak w pozostałych zbiorowościach. W większości wypadków wzrost ten związany był z działaniami antropogenicznymi. Podmokłości i łąki bardzo często przekształcano w pastwiska czy też użytki rolnicze w wyniku zabiegów melioracyjnych. Podejmowane działania wiązały się ze zmianami obiegu wody oraz dostawą biogenów do zbiorników wodnych. Znaczny udział podmokłości i łąk w zlewniach jezior grupy ZP4 powodował, że zabiegi te były tam najszerzej zakrojone. One z kolei mogły spotęgować obniżenie poziomu wód w jeziorach. Dodatkowo należy pamiętać, że jeziora zgodnie z procesami naturalnym, ulegają przekształceniu w podmokłości. Duża część jezior, w których zmniejszenie powierzchni w przeciągu 100 lat przekroczyło 30% było na przełomie XIX i XX wieku otoczone przez obszary podmokłe. Mogły być one częścią zanikającego naturalnie jeziora.

Tereny podmokłe zniknęły prawie zupełnie w zlewniach jezior, których powierzchnia nie wykazała wyraźnych zmian (SP). Jednak trzeba zdać sobie sprawę, że przyczyna braku zmian powierzchni tych jezior również po części mogła wynikać z ich naturalnej odporności na zmiany, bądź być rezultatem podpiętrzenia zbiornika czy innych zabiegów hydrotechnicznych.

5. Wnioski

Prowadzone prace pozwoliły na wyciągnięcie następujących wniosków:

- Postawioną w pracy hipotezę: **użytkowanie zlewni całkowitej jeziora wyrażone poprzez udział poszczególnych komponentów (lasów, terenów rolnych, łąk, podmokłości, terenów antropogenicznych) w jej strukturze, a także ich zmiany w okresie od przełomu XIX i XX wieku do 2010 roku nie wpłynęły na zmiany powierzchni jezior w zlewni Raduni, zlewni Wierzycy oraz zlewni Wdy, należy przyjąć, jako udowodnioną.**
- Nie można zmian powierzchni jezior w jednoznaczny sposób łączyć z powierzchnią lasów, terenów rolnych oraz antropogenicznych w zlewni całkowitej jeziora. Zmiana powierzchni czy też udział komponentu nie rozstrzyga tego problemu. Przedstawia jedynie wiarygodną dokumentację zmian od przełomu XIX i XX wieku do początku XXI wieku. Jedynie udział powierzchni łąk oraz podmokłości oraz ich zmiany na przestrzeni 100 lat wykazuje związek ze zmniejszeniem powierzchni jezior, choć nie jest on statystycznie istotny. Ważniejsze od udziału poszczególnych komponentów w strukturze użytkowania bądź ich zmian, jest dynamika procesów hydrologicznych, które na tych terenach zachodziły.
- Zlewnia Raduni, zlewnia Wierzycy oraz zlewnia Wdy w znaczny sposób zostały przekształcone hydrograficznie. Prace przebiegały w różnym czasie i z różną intensywnością.
- Zlewnie, pomimo iż dzielą topograficzne działy wodne, połączone są ze sobą poprzez wody podziemne. Z tego powodu jeziora poprzez połączenia hydrauliczne mogą reagować na zmiany wywołane pracami hydrotechnicznymi w innych zlewniach.
- Każde jezioro trzeba by traktować, jako indywidualny przypadek, gdyż każdy ekosystem wodny reaguje na zmiany naturalne oraz presje antropogeniczne w odmienny, indywidualny sposób. Zależy on od wielkości, głębokości jeziora, jego objętości i wielkości zlewni, stopnia antropogenicznego przekształcenia, powiązań z otoczeniem, a nawet właściwości fizycznych i chemicznych wody.
- Proces zmniejszenia powierzchni jezior był procesem ciągłym, który przyspieszył w ciągu ostatnich 30 lat. Natomiast zwiększenie powierzchni zbiorników miało charakter skokowy. Jeziora zwiększały swoją powierzchnię do drugiej połowy XX wieku, po czym nastąpiła stabilizacja ich powierzchni.
- Zmiany powierzchni jezior na całym obszarze badań były na takim samym statystycznym poziomie, zarówno w przypadku jezior, których powierzchnia wzrosła jak i zmniejszyła się. Oznacza to, że zmiany nie są uzależnione od położenia jezior ze względu na zlewnie.

- Nie istniała statystyczna zależność pomiędzy zwiększeniem powierzchni jezior a typem morfogenetycznym czy też typem zasilania bilansowego. Wzrost powierzchni jezior był związany głównie z działaniami człowieka.
- Morfogeneza oraz typ zasilania bilansowego różnicuje natomiast tempo zmniejszenia powierzchni jezior. Statystycznie istotne różnice wystąpiły pomiędzy jeziorami rynnowymi i kotłowymi oraz rynnowymi i kotłowo-rynnowymi. Zarówno pierwszą jak i drugą parę różniły przez wszystkie rozmiary oraz głębokości. Szybciej powierzchnię zmniejszały jeziora bezodpływowe i odpływowe niż przepływowe. Natomiast nie odnotowano istotnych różnic statystycznych pomiędzy jeziorami odpływowymi i bezodpływowymi.
- Wystąpiły istotne różnice statystyczne pomiędzy typem morfogenetycznym, a typem zasilania bilansowego jedynie w przypadku jezior rynnowych oraz nieckowatych. W jeziorach nieckowatych były to jeziora bezodpływowe, zaś w jeziorach rynnowych – zbiorniki przepływowe.