

Wpłynęło 24.08.2017 r.
Zrecenzowano 8.12.2017 r.
Zaakceptowano 11.01.2018 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ANALIZA POTENCJAŁU HYDROENERGETYCZNEGO ORAZ MOŻLIWOŚCI JEGO WYKORZYSTANIA W WOJEWÓDZTWIE POMORSKIM

Krzysztof KOWALCZYK^{ABCDE}, **Roman CIEŚLIŃSKI**^{ADEF}

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Katedra Hydrologii

Streszczenie

Jednym ze źródeł energii elektrycznej wykorzystywanej przez człowieka jest woda. Obecnie idea wykorzystania elektrowni wodnych jest coraz bardziej doceniana przez samorządy terytorialne i coraz częściej można je dostrzec w Polsce i województwie pomorskim. Idea zrównoważonego rozwoju oraz dyrektywy unijne wymogły budowę elektrowni wykorzystujących odnawialne źródła energii. W artykule nakreślono sytuację energetyczną województwa pomorskiego. W efekcie ustalono, że ponad połowa energii zużywanej w województwie jest produkowana poza jego obszarem. Biorąc pod uwagę straty przesyłowe, jest to sytuacja niekorzystna. W województwie coraz więcej pojawia się instalacji hydroenergetycznych, ale wciąż jest ich zbyt mało. Przeanalizowano uwarunkowania przyrodnicze i antropogeniczne ponad 300 potencjalnych lokalizacji hydroelektrowni. Na podstawie przeprowadzonych analiz oszacowano potencjał hydroenergetyczny województwa i wskazano najlepsze lokalizacje dla elektrowni wodnych.

Słowa kluczowe: hydroenergetyka, hydrologia, ekologia, elektrownie wodne, województwo pomorskie

WSTĘP

Polska dysponuje stosunkowo niedużym technicznym potencjałem hydroenergetycznym, który szacuje się na 12–14 TWh·rok⁻¹ w zależności od źródła [MATUSZEK 2005; BEDNARSKA 2010]. Dla porównania elektrownia trzech przełomów w Chinach jest w stanie wyprodukować ponad 80 TWh·rok⁻¹. Na tle innych państw Europy i świata potencjał Polski w tym zakresie jest mały [BERKUN 2010; CYR

Do cytowania For citation: Kowalczyk K., Cieśliński R. 2018. Analiza potencjału hydroenergetycznego oraz możliwości jego wykorzystania w województwie pomorskim. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 18. Z. 1 (61) s. 69–86.

i in. 2011; KJAERLAND 2007; PEREIRA i in. 2012]. Dotyczy to również porównania z krajami członkowskimi Unii Europejskiej [PACESILA i in. 2016]. W Polsce popularna jest tzw. mała hydroenergetyka, która ma długą tradycję związaną m.in. z działalnością młynów i małych zakładów przemysłowych [KOWALEWSKI 2005]. Pomimo niewielkiej wartości potencjału, jest on w stanie zaspokoić dużą część polskiego zapotrzebowania na energię elektryczną. Wykorzystywane zasoby hydroenergetyczne stanowią jedynie 7,3% mocy zainstalowanej w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym [PAVLOVA-MARCINIAK 2014]. Wykorzystanie wody umożliwiłoby zaspokojenie potrzeb okolicznych mieszkańców oraz obniżenie kosztów energii w regionie. Ponadto do owej wartości nie wlicza się elektrowni szczytowo-pompowych, które nie są zaliczane do odnawialnych źródeł energii, a które mogą wyprodukować rocznie ok. 1,5 TWh energii. Istniejący potencjał hydroenergetyczny Polski jest aktualnie wykorzystywany w dużo mniejszym stopniu niż w przeszłości. Może to ulec zmianie w sytuacji konieczności prowadzenia gospodarki niskoemisyjnej, do czego obligują Polskę zobowiązania międzynarodowe, zwłaszcza unijne [ŚWIĄTEK 2016]. Dotyczy to nie tylko dużych miast, lecz także obszarów wiejskich na poziomie lokalnym [WIŚNIEWSKI 2015], gdzie dodatkowo musi dojść do licznych modernizacji poszczególnych gospodarstw rolnych [WÓJCICKI 2013]. Co ciekawe, w przypadku gospodarstw rolnych nieefektywnie energetycznie staje się przetwarzanie surowców żywnościowych na biogaz i inne biopaliwa, mimo że produkty rolne są odnawialnymi nośnikami energii [WÓJCICKI, RUDENSKA 2014]. Dlatego też trzeba będzie poszukiwać innych rozwiązań energetycznych w tym sektorze. Należy pamiętać także o różnoskalowych zmianach klimatycznych [PINGALE i in. 2015], które spowodują potrzebę wprowadzania nowych rozwiązań energetycznych.

W Polsce istnieje ponad 700 elektrowni wodnych o łącznej mocy wynoszącej ok. 990 MW. Wykorzystanie technicznego potencjału hydroenergetycznego w Polsce szacuje się na ok. 12%. Prawie połowa potencjału skupia się na Wiśle, zaś ok. 18% na Odrze [KUŁAGOWSKI 2001]. Według MATUSZKA [2005] 68% potencjału energetycznego przypada na dorzecze Wisły, natomiast 17,6% na dorzecze Odry, zaś według KOSIŃSKIEGO i ZDULSKIEGO [2013] w dorzeczu Wisły znajduje się aż 80% potencjału hydroenergetycznego, z czego 65% przypada na Wisłę [SZYDŁOWSKI i in. 2015]. Przed rokiem 1991 istniały projekty budowy serii kaskad progów wodnych, co poprawiłoby spławność Wisły i umożliwiłoby wyprodukowanie dwukrotnie większej ilości energii elektrycznej niż obecnie wytwarza hydroenergetyka w całej Polsce.

W planowaniu wodnych inwestycji energetycznych dominuje aspekt środowiskowy. Elektrownie wodne produkują energię „czystą”, przyjazną dla środowiska, a jednak w wielu miejscach zabrania się ich budować, właśnie ze względu na środowisko. Pewnym problemem w ich budowie jest także brak informacji na temat warunków hydrologicznych poszczególnych rzek, co dotyczy szczególnie małych i średnich zlewni niekontrolowanych [WAŁĘGA 2013].

Województwo pomorskie na tle Polski, ze względu na swoje nadmorskie położenie, posiada ogromny potencjał gospodarczy. Jego dziedziny powiązane są z wodą oraz elementem polityki energetycznej jednostek samorządu terytorialnego [BAJKOWSKI, GÓRNIKOWSKA 2013]. Ważnymi sektorami gospodarki analizowanego obszaru jest przemysł stoczniowy, usługi portowe i handel. W obrębie województwa zlokalizowane są duże, energochłonne przedsiębiorstwa. Jednocześnie województwo jest znacznie oddalone od złóż głównego surowca energetycznego Polski – węgla.

Celem pracy jest określenie poziomu wykorzystania potencjału hydroenergetycznego w województwie pomorskim oraz wskazanie najlepszych lokalizacji dla elektrowni wodnych poprzez analizę wybranych uwarunkowań przyrodniczych i antropogenicznych.

METODY BADAŃ

Stopień wykorzystania potencjału hydroenergetycznego województwa określono poprzez wyznaczenie dogodnych lokalizacji dla nowych hydroelektrowni oraz oszacowanie mocy urządzeń na podstawie wartości natężenia przepływu. Dane zostały zebrane podczas inwentaryzacji istniejących instalacji oraz po sporządzeniu prognozy rozlokowania nowych urządzeń.

Na każdej z analizowanych rzek umiejscowiono punkty co 10 km, symbolizujące potencjalne lokalizacje elektrowni wodnych na mapach. Każdemu obiektowi przypisane zostały wagi dla poszczególnych czynników, według indywidualnych uwarunkowań. Przeanalizowano 376 potencjalnych lokalizacji.

Do każdego punktu przypisano wagi, wyznaczone ze względu na indywidualne cechy (tab. 1). Wzięto pod uwagę wartość natężenia przepływu przy ujściu, którą ekstrapolowano na każdy punkt [KOWALCZYK 2015], formy ochrony przyrody lub ich brak na danym obszarze, odległość od sieci przesyłowych, odległość od istniejących elektrowni wodnych, a także wielkość rynku zbytu. Wagi z poszczególnych punktów zostały zsumowane i na tej podstawie wybrano najbardziej optymalne lokalizacje nowych elektrowni wodnych.

Najważniejszym elementem analizy jest wyznaczenie wartości natężenia przepływu dla poszczególnych odcinków rzek. Wartości przepływów zamykających zostały ekstrapolowane dla poszczególnych odcinków. Wykorzystany został następujący wzór:

$$Q_0 = Q_w (A_0 \cdot A_w^{-1})^n \quad (1)$$

gdzie:

Q_0 = natężenie przepływu szukanego, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

Q_w = przepływ zamykający, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

Tabela 1. Wagi przypisane ze względu na wielkość natężenia przepływu, obecność form ochrony przyrody, odległość od sieci przesyłowych, odległość od istniejących elektrowni wodnych i ze względu na liczbę mieszkańców

Table 1. Weight assigned due to flow rate, the presence of forms of nature protection, the distance from transmission network, the distance from existing hydroelectric power plants, the size of market – the number of residents

Parametr	Parameter	Waga	Weight
Natężenie przepływu, m³·s⁻¹		Flow rate, m³·s⁻¹	
<1,0			0
1,1–4,0			1
4,1–7,0			3
7,1–10,0			5
>10,0			6
Formy ochrony przyrody		Forms of nature protection	
– parki narodowe	National Parks	wykluczenie	exclusion
– inne formy	other forms of protection		1
– brak	no forms of protection		2
Odległość od sieci, km		The distance from transmission network, km	
>7,0			1
3,1–7,0			2
1,0–3,0			3
<1,0			4
Odległość od elektrowni wodnych, km		The distance from existing hydroelectric power plants, km	
<1,0			1
1,1–3,0			2
>3,0			4
Liczba mieszkańców, tys.		The number of residents, thous.	
>3,0			1
3,1–10,0			3
>10,0			4

Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

A_0 = powierzchnia zlewni odpowiadająca danej lokalizacji, km²;

A_w = powierzchnia całej zlewni, km²;

n = parametr równania ekstrapolacyjnego; współczynnik n dla obszarów młodoglacjalnych przyjmuje wartość 1 [SHP 2009].

Na niektórych rzekach można by wyznaczyć kilka lokalizacji, w których wskazana byłaby budowa elektrowni wodnej. W takich miejscach budowa jednej elektrowni może wpłynąć znacznie na uwarunkowania i wykluczyć budowę instalacji w najbliższych analizowanych punktach – tym samym sprawiając, że odległość między nimi powinna być większa niż 10 km. Są też lokalizacje o bardzo dobrych

warunkach, gdzie budowa dwóch elektrowni będzie wskazana w odległości bliższej niż wspomniana lub będzie wymagać większych nakładów finansowych. Po przeprowadzeniu tego typu inwestycji należy każdorazowo zaktualizować uwarunkowania zarówno przyrodnicze, jak i antropogeniczne, aby kolejne inwestycje były zasadne.

Dane przedstawione w artykule mają charakter szacunkowy i tyczą się wielu potencjalnych lokalizacji, dlatego wzięte zostały tylko niektóre uwarunkowania lokalizacyjne. Oprócz powyżej przedstawionych czynników, na lokalizację elektrowni wodnych wpływa m.in. spad oraz wiele innych elementów, takich jak warunki posadowienia czy wysokość piętrzenia. W trakcie wyboru lokalizacji inwestycji również one powinny zostać wzięte pod uwagę.

ENERGETYKA W WOJEWÓDZTWIE POMORSKIM

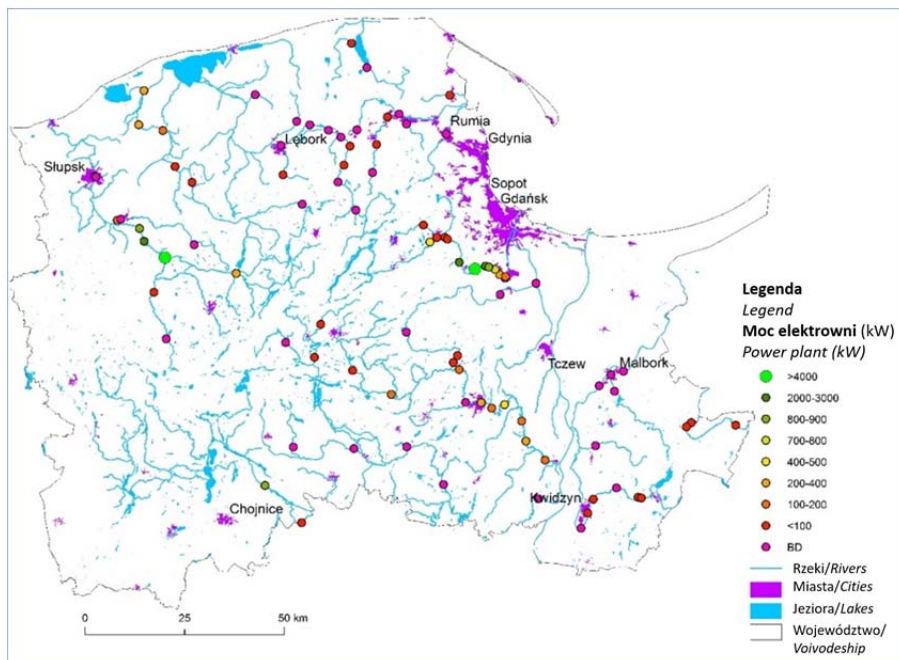
Roczne zużycie energii elektrycznej w województwie pomorskim w 2016 r. wyniosło 7 890 GWh [GUS 2017]. Największy udział w zużyciu energii ma sektor przemysłowy. Prawie 60% energii dostarczane jest z krajowego systemu elektroenergetycznego ze źródeł pochodzących spoza województwa. Pierwszym powodem braku samodzielności energetycznej województwa jest mały potencjał wytwórczy w stosunku do zapotrzebowania. Na terenie województwa nie wydobywa się kopaliny energetycznych, nie ma spławnych dużych rzek, umożliwiających transport węgla, co tym samym stworzyłoby możliwość budowy elektrowni węglowej, jak w przypadku elektrowni Dolna Odra. Jednakże występują tu dogodne warunki lokalizacji elektrowni bazującej na odnawialnych źródłach energii. Drugim powodem jest krótki czas wykorzystania mocy zainstalowanej. Wiatraki produkują energię, kiedy wystarczająco mocno wieje wiatr – ok. 26% czasu w skali roku, ogniwa fotowoltaiczne – ok. 10% czasu w skali roku, natomiast elektrownie wodne pracują średnio 46% roku [HAJDROWSKI 2012]. Najdłuższy czas wykorzystania mocy mają elektrownie jądrowe – 91%. Mogą pracować praktycznie bez przerwy, z wyłączeniem 1 miesiąca w roku na wymianę paliwa. Elektrownie węglowe, na gaz ziemny oraz biomasę mają czas wykorzystania mocy równy prawie 80% [NCBJ 2013; Urząd Marszałkowski Gdańsk 2009]. Są to podobne wartości do podawanych przez MALACZEWSKIEGO [2017], który stwierdza, że obecnie na świecie ok. 81,4% energii elektrycznej wytwarzane jest z wykorzystaniem nieodnawialnych zasobów naturalnych. Koszt produkcji jednej megawatogodziny w elektrowni węglowej wynosi 282 zł i jest najtańszy w Polsce (tab. 2). W związku z dużą emisją CO₂ i polityką unijną elektrownie ciepłe mają coraz mniejszy udział w produkcji energii elektrycznej, chociaż wciąż znaczny. Elektrownie jądrowe produkują mniejszą ilość odpadów i są w stanie produkować energię praktycznie cały rok, a średni koszt produkcji 1 MWh wynosi ok. 313 zł. Koszt energii pozyskanej z farm wiatrowych wynosi 466 zł za MWh, a z elektrowni wodnych – ok.

484 zł za MWh. Różnica w obu ostatnich przypadkach jest stosunkowo niewielka. Najdroższą energią w naszej strefie klimatycznej jest energia pozyskana z fotowoltaicznych paneli słonecznych.

Największy udział w produkcji energii elektrycznej w województwie pomorskim mają elektrociepłownie zlokalizowane przy dużych ośrodkach przemysłowych. Największe z nich znajdują się w: Gdańsku, Gdyni, Kwidzynie – na terenie International Papers, Starogardzie Gdańskim – Polfarma oraz w Rafinerii Gdańskiej. W 2009 r. łączna produkcja w tych pięciu elektrociepłowniach wynosiła 2 300 GWh, co pokrywa 32% zapotrzebowania na energię elektryczną województwa [Urząd Marszałkowski Gdańsk 2009]. Instalacje te wykorzystują odpady produkcyjne. W papierni w Kwidzynie wykorzystane są resztki drewna, w Rafinerii Gdańskiej – ropa naftowa. W granicach województwa pomorskiego funkcjonują liczne elektrownie wiatrowe. Ich moc w 2014 r. szacowano na 441 MW, a roczną produkcję energii na 990 GWh – na ok. 12,5% zapotrzebowania województwa. Zlokalizowane są one głównie w pasie nadmorskim, gdzie panują bardzo dobre i dobre warunki wietrzne – klasy I i II. Na terenie województwa pomorskiego zlokalizowano także ok. 60 małych elektrowni wodnych, w tym 31 zawodowych, dostarczających prąd do sieci centralnej. Wyprodukowaną przez nie w 2014 r. energię szacuje się na 72 GWh [Pomorskie Biuro Planowania Regionalnego 2015]. W województwie do produkcji energii elektrycznej wykorzystywany jest również gaz ziemny. Najbardziej znaną miejscowością pod względem wykorzystania gazu ziemnego jest Władysławowo, które w 100% jest zaopatrywane w energię elektryczną z gazu ziemnego. Jest to możliwe dzięki nadmorskiemu usytuowaniu w pobliżu platformy wiertniczej, z której na dnie Bałtyku jest poprowadzony rurociąg dostarczający gaz.

HYDROENERGETYKA W WOJEWÓDZTWIE POMORSKIM

Różnice wysokości terenu w województwie są niewielkie, co skutkuje małymi spadkami terenu [MARCINKOWSKA i in. 2013]. Wpływa to na kształtowanie się natężenia przepływu rzek, które są kluczowe dla lokalizacji elektrowni wodnych. W województwie dominują małe elektrownie wodne o mocy mniejszej niż 5 MW. Moc jedynie dwóch elektrowni przekracza 4 MW (rys. 1). Jedna, o mocy 4 160 kW, znajduje się na rzece Słupi, a druga o mocy 7 200 kW – na Raduni. Według niepublikowanych danych RZGW Gdańsk w województwie pomorskim funkcjonuje łącznie 89 elektrowni wodnych. Jest to dużo na tle innych województw, np. w województwie opolskim zlokalizowane są 43 elektrownie wodne [WIATKOWSKI, ROSIK-DULEWSKA 2012]. Ze względu na charakter rzek analizowanego obszaru duża część obiektów wykorzystuje jazy lub zapory do produkcji energii. Największą łączną moc mają elektrownie na rzece Raduni. Znajduje się tam 9 elektrowni wodnych. Znaczącą produkcję energii elektrycznej notuje się również na rzece Słupi.



Rys. 1. Istniejące elektrownie wodne w województwie pomorskim;
źródło: opracowanie własne na podstawie danych RZGW Gdańsk

Fig. 1. Hydroelectric power plants existing in Pomeranian Voivodeship; source: own elaboration on the basis of the data of the Regional Water Management Board in Gdańsk

Rzeką wykorzystaną w dużym stopniu do produkcji energii jest też Wierzyca. Moc zlokalizowanych tam instalacji wynosi prawie 2 000 kW.

Produkcja energii elektrycznej na pozostałych rzekach jest niewielka, a wytworzony prąd wykorzystywany jest w skali lokalnej. Liczne instalacje zlokalizowane są na Redzie, Liwie, Łupawie i Nogacie. Na Łupawie znajduje się 5 elektrowni o łącznej mocy wynoszącej prawie 900 kW. Aż 8 energetycznych instalacji wodnych zlokalizowanych jest na Łebie. Przeważają tam urządzenia o małej, trudnej do określenia, mocy, jedynie 2 elektrownie dysponują takimi danymi. Moc 4 instalacji położonych na Liwie przekracza 200 kW.

LOKALIZACJA ELEKTROWNI WODNYCH

Wybór lokalizacji elektrowni wodnych jest skomplikowanym procesem. Najważniejszymi uwarunkowaniami przyrodniczymi lokalizacji elektrowni wodnych są spadki rzek i wartości natężenia przepływu. Teren województwa pomorskiego charakteryzuje się niewielkimi spadkami, a rzeki małymi przepływami [JANKOWSKA 1985]. Obecne turbiny instalowane w elektrowniach wodnych umożliwiają

„ominięcie” tych utrudnień. Turbiny VHL (fot. 1a) mogą pracować, gdy spadek wynosi 1,5 m, a wartość przepływu – $10,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Turbiny ślimakowe (fot. 1b) pracują efektywnie w warunkach spadku 1,0–8,0 m i natężenia przepływu $0,1\text{--}10,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przedstawione turbiny są przyjazne w stosunku do ichtiofauny z powodu wolnych obrotów. Ich moc wynosi do 500 kW. Jedna turbina wyprodukowałaby rocznie prawie 4380 tys. kWh. Wartość wyprodukowanej energii elektrycznej wyniosłaby prawie 2,6 mln zł·rok⁻¹, gdy średnia cena $0,60 \text{ zł} \cdot \text{kWh}^{-1}$ [Eurostat 2017]. Energia z pojedynczej instalacji wystarczyłaby na zaopatrzenie ok. 1200 gospodarstw domowych – w warunkach średniego zużycia w gospodarstwie $3600 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$ [Energiadirect niedatowane].

a)



b)

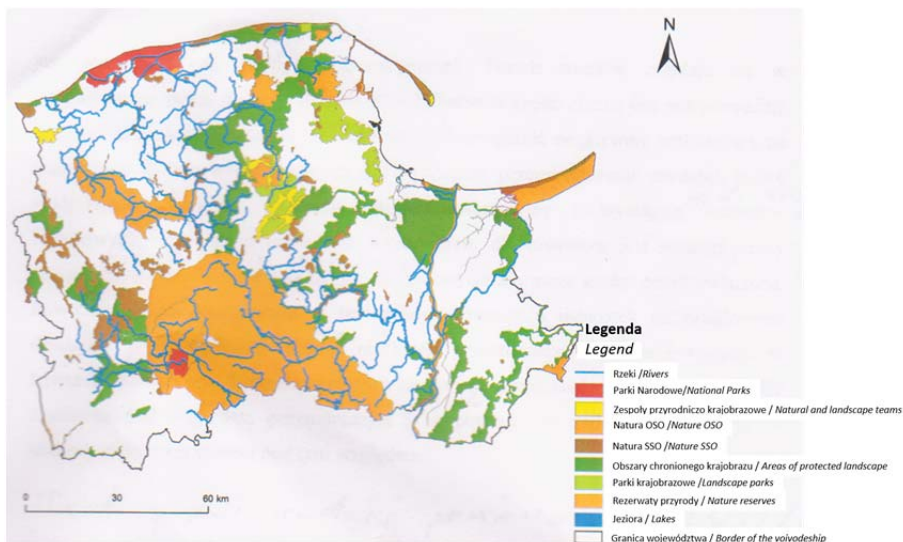


Fot. 1. Turbiny stosowane w małych elektrowniach wodnych: a) VHL, b) ślimakowa; źródło: VLA [niedatowane], Dobra Energia [niedatowane]

Photo 1. Turbines used in small hydropower plants: a) VHL turbine, b) screw turbine; source: VLA [niedatowane], Dobra Energia [niedatowane]

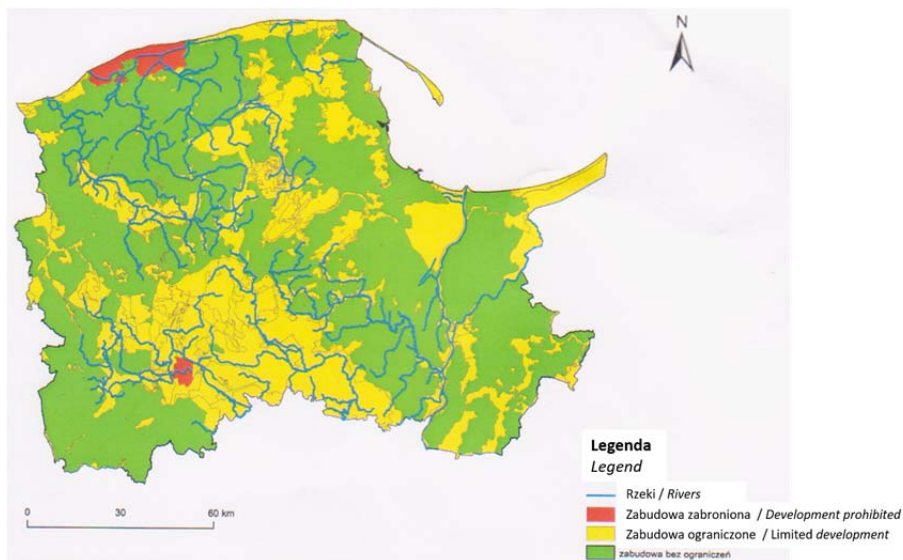
Drugim czynnikiem przyrodniczym jest natężenie przepływu. Od niego uzależniona jest możliwa moc instalacji, a co za tym idzie – opłacalność budowy. Elektrownie wodne mogą pracować w warunkach przepływu większego niż $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Jest to wartość wystarczająca do instalacji turbin ślimakowych. Wartość natężenia przepływu do $4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ umożliwia budowę elektrowni nawet o mocy 1000 kW. W warunkach, kiedy natężenie przepływu nie przekracza $7,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, można zlokalizować urządzenia o mocy przekraczającej 7 000 kW – elektrownia Bielkowo na Raduni. Gdy natężenie przepływu przekracza $10,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, należy zastosować inne typy turbin wodnych, takie które wytrzymają wyższe ciśnienie, np. turbinę Kaplana [WARAĆ i in. 2010].

Kolejnym czynnikiem mogącym wpłynąć na lokalizację elektrowni jest forma ochrony przyrody. Na terenie województwa pomorskiego znajduje się 321 powierzchniowych form ochrony przyrody. Najwięcej jest rezerwatów przyrody, aż 131. Istnieją 2 parki narodowe (rys. 2), których obszary zostały wykluczone z analizy (rys. 3).



Rys. 2. Formy ochrony przyrody w województwie pomorskim;
źródło: opracowanie własne na podstawie danych GDOŚ

Fig. 2. Forms of nature protection in Pomeranian Voivodeship;
source: own elaboration on the basis of General Directorate for Environmental Protection

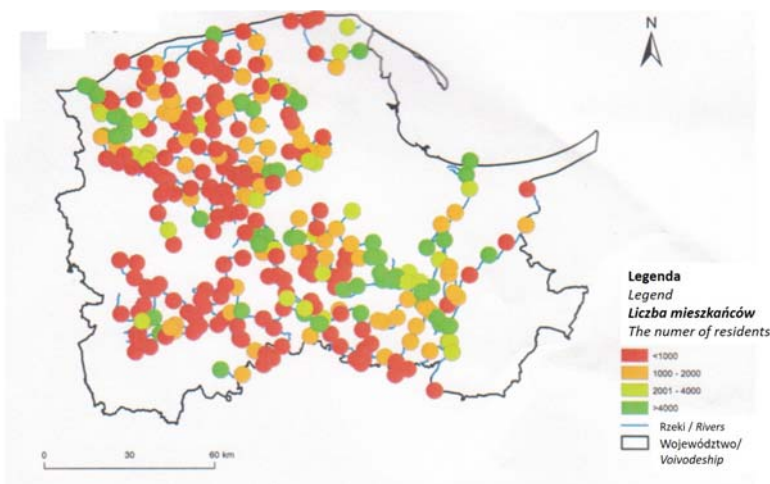


Rys. 3. Ograniczenia zabudowy hydrotechnicznej wynikające z występowania obszarów chronionych na terenie woj. pomorskiego; źródło: opracowanie własne na podstawie rysunku 2

Fig. 3. Hydrotechnical construction restrictions resulting from existing protected areas in Pomeranian Voivodeship; source: own elaboration on the basis of Fig. 2

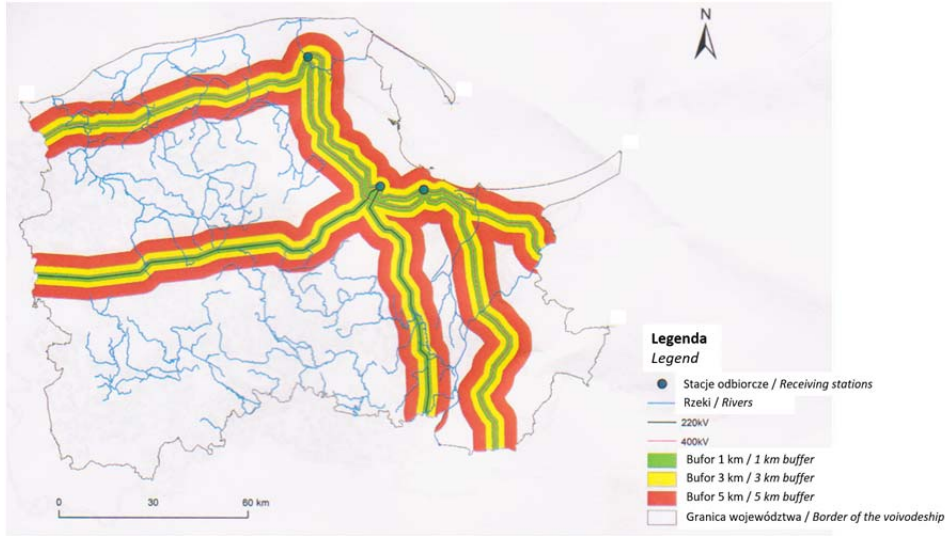
Do czynników antropogenicznych zaliczono: wielkość rynku zbytu (liczbę mieszkańców w okolicy), odległość do sieci przesyłowych i rzek. Wielkość rynku zbytu jest szczególnie ważna w lokalizacji małych elektrowni, o małej mocy. Nieopłacalna byłaby budowa długiej linii energetycznej ze względu na koszty budowy i straty energii. Tereny o największym rynku zbytu znajdują się w okolicy większych miast, takich jak: Starogard Gdański, Kwidzyn, Malbork, Lębork, Słupsk, Wejherowo. Najbardziej opłacalne miejsca budowy elektrowni wodnych to takie, gdzie znajduje się ponad 1400 gospodarstw domowych, a więc liczba mieszkańców przekracza 4000 osób. Na terenie województwa pomorskiego dominują miejscowości, gdzie liczba ta nie przekracza 1000 (rys. 4). W województwie znajdują się tylko cztery linie wysokiego napięcia 400 kV (rys. 5). Z tego powodu liczba potencjalnych lokalizacji elektrowni zawodowych jest ograniczona. Odległość potencjalnej elektrowni od już istniejących instalacji może wpływać na bezpośrednią konkurencję w walce o rynek zbytu i na wykorzystanie potencjału hydroenergetycznego. Większość obszaru województwa oddalona jest o więcej niż 3 km od istniejących elektrowni wodnych. Tereny o większym zagęszczeniu instalacji hydroenergetycznych znajdują się w okolicach: Redy, Łeby, Kościerzyny, Kwidzyna i Starogardu Gdańskiego.

Gdy miejscowości znajdują się blisko rzek, oszczędza się na budowie nowych sieci przesyłowych. Najlepszą z tego względu jest lokalizacja elektrowni w odległości do 0,5 km. Nieco droższa jest inwestycja w odległości 1,5 km lub 5,0 km od miejscowości (rys. 6). Powyżej tej ostatniej wartości inwestycja jest nieopłacalna z ekonomicznego punktu widzenia.



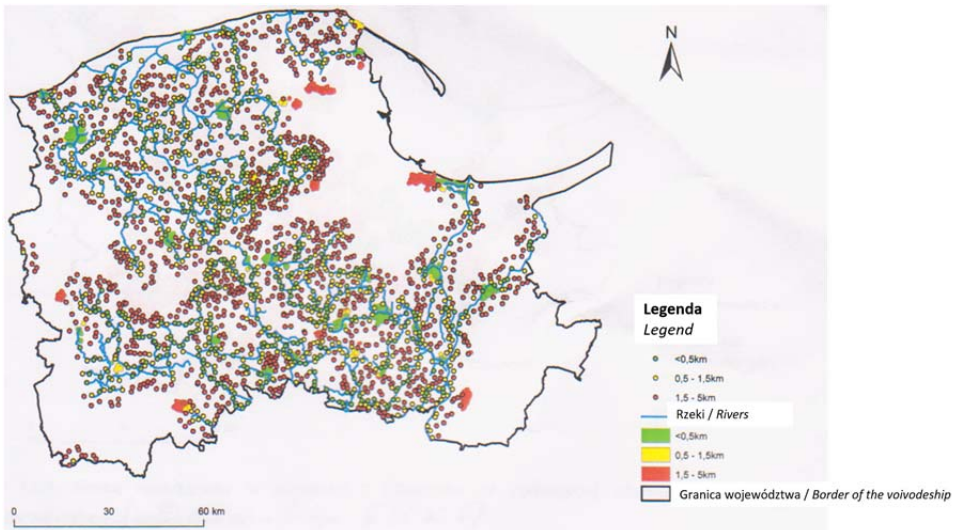
Rys. 4. Liczba mieszkańców w odległości 3 km od potencjalnej lokalizacji elektrowni na terenie woj. pomorskiego; źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS

Fig. 4. The number of inhabitants 3 km away from the potential location of the power plant in Pomeranian Voivodeship; source: own elaboration on the basis of Central Statistical Office



Rys. 5. Lokalizacja linii wysokiego napięcia i strefy budowy hydroelektrowni na terenie woj. pomorskiego; źródło: opracowanie własne na podstawie: Bastian [2012]

Fig. 5. The location of high voltage energy lines and sites predisposed to build utility power stations in Pomeranian Voivodeship; source: own elaboration on the basis of Bastian [2012]



Rys. 6. Odległość miejscowości od rzek na terenie woj. pomorskiego; źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS i RZGW

Fig. 6. The distance between towns and rivers in Pomeranian Voivodeship; source: own elaboration on the basis of Central Statistical Office and Regional Water Management Board

PROGNOZA ROZWOJU HYDROENERGETYKI W WOJEWÓDZTWIE

Analizowano 320 potencjalnych lokalizacji elektrowni wodnych, z których wyznaczono 107 dobrych lub bardzo dobrych lokalizacji. Wykluczono 4 lokalizacje ze względu na położenie na terenie parku narodowego. Zidentyfikowano 82 lokalizacje nadające się pod tego typu inwestycję. Lokalizacje o niewystarczających uwarunkowaniach przyrodniczych oraz antropogenicznych wskazano aż 127 (tab. 2).

Tabela 2. Liczba lokalizacji hydroelektrowni danej jakości na terenie woj. pomorskiego

Table 2. Number of locations of given quality in Pomeranian Voivodeship

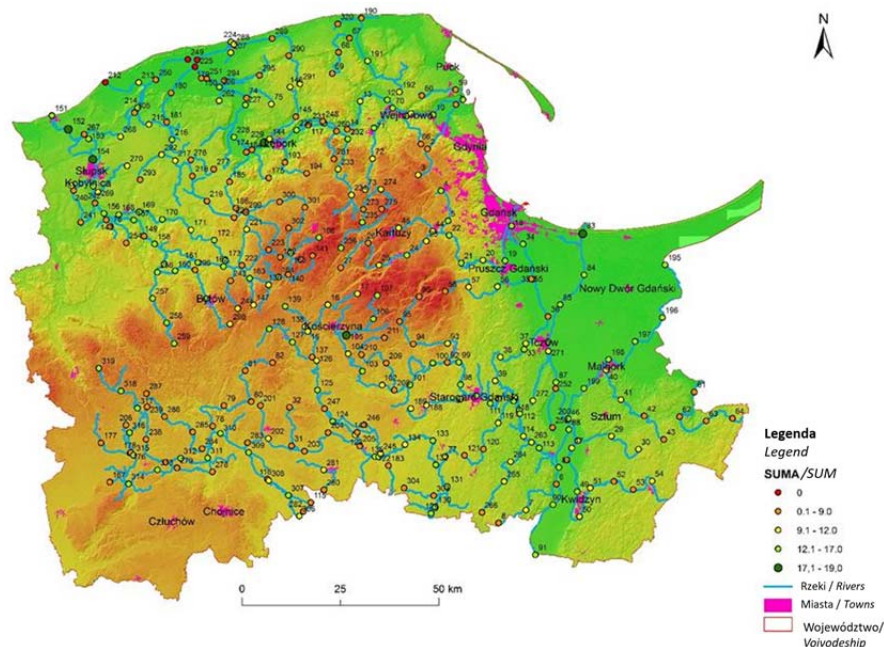
Jakość lokalizacji Location	Suma wag Sum of weights	Liczba lokalizacji Number of locations
Wykluczona Excluded	0	4
Niewystarczająca Not sufficient	<9	127
Wystarczająca Sufficient	10–12	82
Dobra Good	13–17	92
Bardzo dobra Very good	>17	15
Suma Sum		320

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Sumę wag obliczoną dla potencjalnych lokalizacji elektrowni wodnych przedstawiono na rysunku 7.

Lokalizacje urządzeń hydroenergetycznych o niewystarczającym potencjale stanowią 39,7% ogółu. Skupiają się one głównie na dopływach większych rzek. Jest to spowodowane przede wszystkim bardzo małą wartością natężenia przepływu oraz małą liczbą mieszkańców okolicznych terenów. Najśłabsze warunki występują w okolicach ujścia Kłodawy. Teren ten znajduje się na Żuławach Gdańskich i charakteryzuje się małą gęstością zabudowy, co w konsekwencji daje małą liczbę ludności. Lokalizacje o większej przydatności są rozproszone po całym województwie. Występują one na rzece Bolszewce, na rzekach w okolicach Kościerzyny, Sztumu i Starogardu Gdańskiego.

Zidentyfikowano 92 lokalizacje o dobrej przydatności do budowy elektrowni wodnych. Skupiają się one na największych rzekach województwa i w pobliżu dużych miast. Pięć lokalizacji znajduje się w okolicy Wejherowa na rzekach Reda i Bolszewka. Bardzo dobre warunki są na Motławie oraz już wykorzystywanej do celów energetycznych Raduni. Na południu województwa najlepsze uwarunkowania występują na Brdzie, Nogacie i Wdzie. We wschodniej części potencjał hydroenergetyczny skupiony jest na Wiśle, Nogacie i Liwie, w pobliżu Kwidzyna. Duża część potencjału hydroenergetycznego skupia się w północno-zachodniej części województwa na Łebie, Słupi i Skotawie (rys. 7).



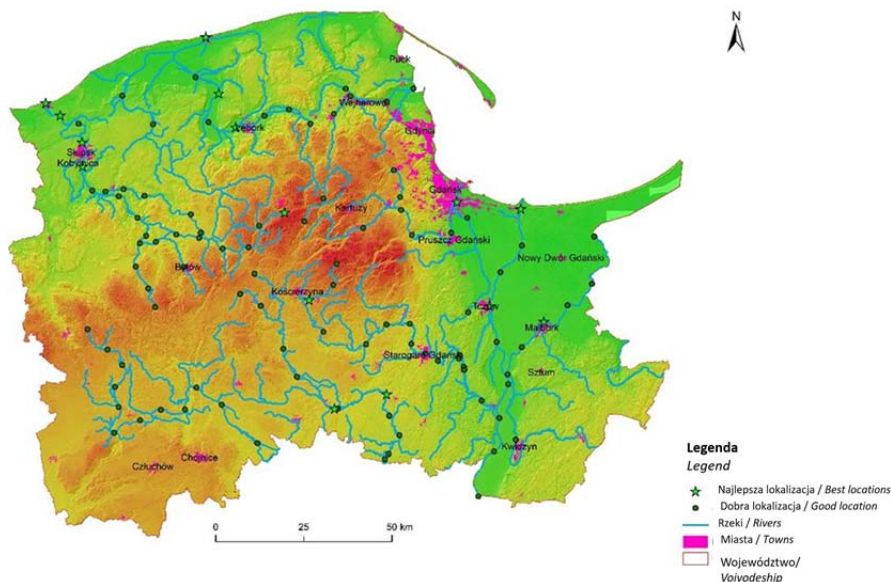
Rys. 7. Suma wag dla potencjalnych lokalizacji elektrowni wodnej na terenie woj. pomorskiego; źródło: wyniki własne

Fig. 7. Sum of weights for potential locations for hydroelectric power plants in Pomeranian Voivodeship; source: own study

Najlepsze warunki lokalizacyjne elektrowni wodnych występują głównie w pobliżu większych ośrodków miejskich. Najwięcej takich miejsc znajduje się w okolicach Słupska i Kobylnicy – aż 4. Pojedyncze wskazania występują w pobliżu Łeby, Gdańska, Malborka, Kościerzyny, Lęborka i Tczewa. Na południu województwa dwie dogodnie lokalizacje znajdują się na rzece Wdzie, jedna w pobliżu miejscowości Czarna Woda, druga na zachód od Lubiechowa. Dogodne uwarunkowania występują w delcie Wisły i między Lęborkiem a Łebą (rys. 9). Są to lokalizacje, które powinny być wykorzystane w pierwszej kolejności podczas wyboru miejsc inwestycyjnych pod elektrownie wodne.

W województwie pomorskim elektrownie wodne odgrywają znaczącą rolę w produkcji energii elektrycznej. Na podstawie danych RZGW Gdańsk [2015] łączna moc elektrowni wodnych funkcjonujących w obrębie województwa wynosi ponad 30 MW.

Do oceny potencjału hydroenergetycznego w pracy została wykorzystana metoda porównawcza, wiążąca średnią moc elektrowni z natężeniem przepływu. Przeanalizowano stosunek mocy istniejących elektrowni wodnych do natężenia przepływu. Z analizy wynikało, że w warunkach średniego przepływu $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ można uzyskać 50–100 kW. W województwie istnieją elektrownie, które produkują



Rys. 8. Najlepsze potencjalne lokalizacje hydroenergetyczne na terenie woj. pomorskiego;
źródło: wyniki własne

Fig. 8. Best potential locations for hydroelectric power plants in Pomeranian Voivodeship;
source: own study

w warunkach danego przepływu mniej energii niż ustalony wskaźnik. Jest to spowodowane różnicą użytych technologii. Duża część elektrowni, szczególnie prywatnych, została przekształcona w elektrownie ze starych młynów; ich moc nie przekracza zazwyczaj 50 kW. Pomimo niewielkiej mocy, są w stanie zasilić nawet 60 gospodarstw domowych. Elektrownia Bielkowo na Raduni, w warunkach średniego przepływu wynoszącego ok. $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ osiąga moc 7 200 kW, czyli ponad 1 300 kW na $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ przepływu. Wykorzystanie instalacji o tak dużej mocy było możliwe dzięki bardzo dużemu spadowi – przekraczającemu 50 m, nie występującemu praktycznie nigdzie indziej na terenie województwa. Tak duży spad był możliwy dzięki sztucznej przepłowi Raduni oraz ogromnym nakładom finansowym. Osiągalny potencjał hydroenergetyczny obliczano jako iloczyn natężenia przepływu (w $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) i wskaźnika 50 kW. Osiągnięcie takiej mocy jest możliwe w warunkach ograniczonego przepływu i stosunkowo niskiego spadku z wykorzystaniem np. turbiny ślimakowej. Wynikiem tych obliczeń jest wartość mocy urządzeń, których instalacja byłaby uzasadniona w danej lokalizacji. Obliczono również potencjał maksymalny. Przyjęto, że w warunkach przepływu $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ można uzyskać 100 kW mocy. Zwiększenie osiągalnej mocy możliwe jest wyłącznie w niektórych miejscach, charakteryzujących się najlepszymi uwarunkowaniami przyrodniczymi oraz przy dodatkowym nakładzie finansowym. Wymaga to wykonania budowli hydrotechnicznych, takich jak jazy lub zapory.

Łączny potencjał osiągalny najlepszych lokalizacji (rys. 9) wyniósł 113 MW, czyli 37 GWh energii elektrycznej w skali miesiąca. Z kolei sumaryczny potencjał maksymalny przekroczył 204 MW, co przełożyłoby się na 67,5 GWh miesięcznie. Analizując istniejące elektrownie, wzięto pod uwagę wahania przepływów. W miesiącach charakteryzujących się wyższym stanem wód i większymi przepływami, ilość produkowanej miesięcznie energii może być większa niż założona średnia. Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 4., można zauważyć, że największy potencjał, pomijając Dolną Wisłę, skupia się na Słupia i Łeba.

Tabela 4. Potencjał hydroenergetyczny najlepszych lokalizacji elektrowni w woj. pomorskim

Table 4. Hydroelectric potential of the best locations in Pomeranian Voivodeship

Numer lokalizacji Number of location	Rzeka River	Przepływ Flow rate $m^3 \cdot s^{-1}$	Potencjał osiągalny Reachable potential kW	Potencjał maksymalny Maximum potential kW
367	Radunia	6,00	300,00	540
302	Dolna Wisła	1 046,00	52 300,00	94 140
299	Dolna Wisła	1 045,07	52 253,40	94 056
280	Wierzyca	7,25	362,56	653
263	Wda	11,67	583,50	1 050
252	Wda	10,79	539,51	971
234	Słupia	17,55	877,50	1 579
233	Słupia	17,40	870,00	1 566
231	Słupia	16,30	814,92	1 467
230	Słupia	15,40	769,91	1 386
219	Słupia	11,68	583,82	1 051
187	Nogat	28,05	1 402,71	2 525
161	Łeba	11,70	585,00	1 053
158	Łeba	11,33	566,62	1 020
156	Łeba	10,64	532,11	958
Suma Sum			113 341,56	204 015

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Wykorzystanie wszystkich dobrych lokalizacji umożliwiłoby osiągnięcie mocy przekraczającej 413 MW. W warunkach maksymalnego wskaźnika łączna moc wyniosłaby 743,6 MW, a energia elektryczna wyprodukowana średnio w miesiącu przez te elektrownie wyniosłaby prawie 250 GWh.

WNIOSKI

Biorąc pod uwagę wszystkie 376 analizowanych w pracy lokalizacji, można oszacować że osiągalny potencjał hydroenergetyczny województwa pomorskiego

wynosi prawie 232 MW, co przełożyłoby się na 920 GWh w skali roku. Natomiast potencjał maksymalny wynosi ok. 422 MW – 1600 GWh w skali roku. Województwo jest zaopatrywane w energię w 60% ze źródeł zewnętrznych. Wykorzystanie osiągalnego potencjału hydroenergetycznego umożliwiłoby zmniejszenie tej wartości o ok. 11% w skali roku. Ponadto wzrosłby stopień dywersyfikacji źródeł energii oraz bezpieczeństwo energetyczne.

Wybór lokalizacji pod budowę elektrowni wodnych jest trudny i wymaga analizy wielu czynników. Zmiana polityki energetycznej i szukanie nowych rozwiązań pozytywnie wpłynie na rozwój energetyki wodnej. Wdrożenie dotychczasowych programów zwiększyło wykorzystanie potencjału hydroenergetycznego w niewielkim stopniu – w województwie pomorskim o 4%. Należy przy tym pamiętać, że wzrost zapotrzebowania na energię z odnawialnych źródeł może mieć także negatywne konsekwencje społeczne. W związku z tym lokalizacja nowych elektrowni powinna być realizowana według zasady zrównoważonego rozwoju.

BIBLIOGRAFIA

- BAJKOWSKI S., GÓRNIKOWSKA B. 2013. Hydroenergetyka na tle innych źródeł energii odnawialnych [Hydroenergetics against other sources of renewable energy]. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. Nr 59 s. 77–87.
- BEDNARSKA A. 2010. Hydroenergetyka w Polsce – obecna sytuacja i perspektywy na przyszłość [Hydroenergetics in Poland – the current situation and prospects for the future]. Wrocław. PWR.
- BERKUN M. 2010. Hydroelectric potential and environmental effects of multistage hydropower projects in Turkey. *Energy for Sustainable Development*. Vol. 14 (4) s. 320–329.
- CYR J.F., LANDRY M., GAGNON Y. 2011. Methodology for the large-scale assessment of small hydroelectric potential: Application to the Province of New Brunswick (Canada). *Renewable Energy*. Vol. 36 (11) s. 2940–2950.
- Dobra Energia niedatowane. Pierwsza turbina ślimakowa w Polsce [The first screw turbine in Poland] [online]. Dobra Energia. Pompy i turbiny Archimedes. [Dostęp 20.01.2018]. Dostępny w Internecie: www.dobraenergia.info
- Energiadirect niedatowane. Porównanie cen energii [Comparison of energy prices] [online]. [Dostęp 20.01.2018]. Dostępny w Internecie: energiadirect.pl
- Eurostat 2017. Electricity price statistics [online]. [Dostęp 20.01.2018]. Dostępny w Internecie: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Electricity_price_statistics
- GDOS niedatowane. Mapa obszarów chronionych [Map of protected areas] [online]. [Dostęp 03.02.2018]. [online]. Warszawa. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska. [Dostęp 15.12.2017]. Dostępny w Internecie: geoserwis.gdos.gov.pl/mapy/
- GUS 2017. Zużycie paliw i nośników energii w 2016 r. [Consumption of fuels and energy carriers in 2016] [online]. Warszawa. Główny Urząd Statystyczny. [Dostęp 20.01.2018]. Dostępny w Internecie: <http://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/zuzycie-paliw-i-nosnikow-energii-w-2016-roku,6,11.html>
- HAJDROWSKI K. 2012. Magazynowanie energii elektrycznej [Storage of electricity]. *Energia Elektryczna*. Nr 11 s. 28–38.
- JANKOWSKA E. 2017. Przestrzenno-czasowa analiza zróżnicowania poziomu rozwoju odnawialnych źródeł energii [Measures of development of renewable energy sources]. *Studia Ekonomiczne*. Nr 324 s. 33–44.

- JANKOWSKA H. 1985. Znaczenie jezior w kształtowaniu się odpływu podziemnego w dorzeczu górnej Raduni [The importance of lakes in the formation of an underground outflow in the upper Radunia basin]. *Zeszyty Naukowe Wydz. BGiO. Geografia*. Nr 14 s. 57–67.
- KJAERLAND F. 2007. A real option analysis of investments in hydropower – The case of Norway. *Energy Policy*. Vol. 35 (11) s. 5901–5908.
- KOSIŃSKI J., ZDULSKI W. 2013. Hydropower potential of the Vistula. *Acta Energetica*. Vol. 2 (15) s. 38–47.
- KOWALCZYK K. 2015. Ekstrapolacja wartości przepływów rzek [Extrapolation of river flow values]. *Maszynopis*. Gdańsk. RZGW s. 1.
- KOWALEWSKI Z. 2005. Wykorzystanie energii wodnej jako elementu rozwoju energetyki odnawialnej [Utilization of water energy as part of the development of renewable energy]. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie*. Nr 2 s. 87–91.
- KUŁAGOWSKI W. 2001. Hydroenergetyka w Polsce – stan obecny, perspektywy rozwoju [Hydroenergetics in Poland – current state, development prospects]. *Gospodarka Wodna*. Nr 3 s. 119–123.
- MALACZEWSKI M. 2017. Warunki przejścia gospodarki na odnawialne źródła energii [Conditions for transition to renewable energy]. *Gospodarka Narodowa*. Nr 1 (287) s. 33–51.
- MARCINKOWSKA A., OCHYTRA A., OŁĘDZKI R., WOŁK-MUSIAŁ E., ZAGAJEWSKI E. 2013. Mapa geomorfologiczna województwa pomorskiego i warmińsko-mazurskiego z wykorzystaniem metod geoinformatycznych [Geomorphological map of Pomorskie and Warmińsko-Mazurskie voivodeship using geo-informatics methods]. *Teledetekcja Środowiska*. Nr 49 s. 43–79.
- MATUSZEK W. 2005. Odnawialne źródła energii [Renewable energy sources]. *Elektroenergetyka*. Nr 1 (52) s. 22–44.
- NCBJ 2013. Niezależna ocena kosztów produkcji energii elektrycznej [Independent assessment of electricity production costs] [online]. *Narodowe Centrum Badań Jądrowych*. [Dostęp 24.03.2015]. Dostępny w Internecie: <http://ncbj.edu.pl/niezalezna-ocena-kosztow-produkcji-energii-elektrycznej>
- Pomorskie Biuro Planowania Regionalnego 2015. Założenia przestrzenne rozwoju odnawialnych źródeł energii w województwie pomorskim [Spatial assumptions for the development of renewable Energy sources in Pomorskie Voivodeship]. *Słupsk* s. 11–14.
- PACESILA M., BURCEA S.G., COLESCA S.E. 2016. Analysis of renewable energies in European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 58 s. 156–170.
- PAVLOVA-MARCINIAK I. 2014. Światowe i unijne normatywne dokumenty a rozwój OZE w Polsce. *Przegląd Elektrotechniczny*. R. 90. Nr 7 s. 115–118.
- PEREIRA M.G., CAMACHO C.F., FREITAS M.A.V., DA SILVA N.F. 2012. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16 (6) s. 3786–3802.
- PINGALE S., ADAMOWSKI J., JAT M., KHARE D. 2015. Implications of spatial scale on climate change assessments. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 26 s. 37–55.
- RZGW Gdańsk niepublikowane. Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Gdańsku, niepublikowane dane wektorowe – fragment katastru wodnego.
- SHP 2009. Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. Etap I. Określenie jednolitych metod obliczenia przepływów maksymalnych rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia w zlewniach kontrolowanych [Methodology for calculating flows and maximum rainfall with a certain probability of exceedance for controlled and uncontrolled catchments and identification of models of transformation of precipitation into outflow. Stage 1. Determination of uniform methods for calculating the maximum annual flows with a certain probability of exceedance in controlled catchments]. *Warszawa. Stowarzyszenie Hydrologów Polskich* ss. 146.

- SZYDŁOWSKI M., GAŚSIOROWSKI D., SZYMKIEWICZ R., ZIMA P., HAKIEL J. 2015. Hydropower potential of the lower Vistula. *Acta Energetica*. Vol. 1 (22) s. 18–25.
- ŚWIĄTEK M. 2016. Mała energetyka wodna na Pomorzu Zachodnim – historia i współczesność [Small hydro power plant in Western Pomerania – history and modern times]. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Geographica*. Nr 10 s. 166–178.
- Urząd Marszałkowski Gdańsk 2009. Plan zagospodarowania województwa Pomorskiego [Spatial plan of Pomorskie Voivodeship]. *Maszynopis* ss. 329.
- VLH niedatowane. VLH Product [online]. [Dostęp 03.02.2018]. Dostępny w Internecie: <http://www.vlh-turbine.com/turbine>
- WAŁĘGA A. 2013. Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncontrolled basin. *Journal of Water and Land Development*. Vol. 18 s. 13–20.
- WARAĆ K., WÓJCIK R., KOŁACKI M. 2010. Elektrownie wodne – ich funkcjonowanie i oddziaływanie na najbliższe środowisko [Hydropower plants – their functioning and their impact on the immediate environment]. Słupsk. ISBN 675-98-5692-943-2 ss. 63.
- WIATKOWSKI M., ROSIK-DULEWSKA C. 2012. Stan obecny i możliwości rozwoju energetyki wodnej w województwie opolskim [Present state and possibilities of hydropower development in the Opole Voivodeship]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2 (38) s. 313–327.
- WIŚNIEWSKI P. 2015. Rolnictwo i obszary wiejskie w lokalnym planowaniu gospodarki niskoemisyjnej na przykładzie powiatu starogardzkiego [Agriculture and rural areas in local low-emission economy planning on the example of the Starogard poviat]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 15. Z. 4 (52) s. 69–81.
- WÓJCICKI Z. 2013. Optymalizacyjne projektowanie modernizacji gospodarstw rolnych [Optimization projecting of the family farm modernization]. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 1 (79) s. 5–11.
- WÓJCICKI Z., RUDEŃSKA B. 2014. Efektywność nakładów materiałowo-energetycznych w gospodarstwie rolnym [Efficiency of material and energy inputs in farm]. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 4 (86) s. 57–70.

Krzysztof KOWALCZYK, Roman CIEŚLIŃSKI

ANALYSIS OF THE HYDROELECTRIC POTENTIAL AND THE POSSIBILITIES OF ITS USE IN THE POMERANIAN VOIVODESHIP

Key words: *ecology, hydroelectricity, hydrology, hydropower, Pomeranian Voivodeship*

S u m m a r y

One of the sources of electricity used by man is water. Currently the idea of hydroelectric power plants is increasingly appreciated by local governments. Sustainable development and EU directives have required the construction of green power plants. The article outlines the energy situation of the Pomeranian Voivodeship. As a result, it was found that more than half of the energy consumed in the region is produced outside its area. Considering the transmission losses, this is a disadvantage. Hydropower installations are increasingly appearing in the province, but they are still too few. The natural and anthropogenic conditions of more than 300 potential hydropower plants have been analyzed. Based on the conducted research, the hydroelectric potential of the voivodeship was estimated and the best locations for hydropower were identified.

Adres do korespondencji: dr hab. Roman Cieśliński, prof. UG, Uniwersytet Gdański, Katedra Hydrologii, ul. Bażyńskiego 4, 80-952 Gdańsk; e-mail: georc@univ.gda.pl