



Zasoby dyspozycyjne obszaru bilansowego zlewni Dziwny

Zenon Wiśniowski¹, Ryszard Hoc¹, Magdalena Dobies¹, Paulina Szcześniak¹

Z. Wiśniowski



R. Hoc



M. Dobies



P. Szcześniak

Available resources of the Dziwna groundwater balance catchment area. Prz. Geol., 73: 567–576; doi: 10.7306/2025.62

A b s t r a c t. The Dziwna groundwater balance catchment area (S-XI) is located in the West Pomeranian Voivodeship, north-western Poland. The main drainage base for groundwater in this area is the Dziwna channel, a sea strait separating Wolin Island from the mainland, often called a river due to its clear current towards the sea, and the Baltic Sea. For the groundwater balance of the Dziwna catchment (S-XI), a numerical model has been prepared in the Quaternary, Paleogene-Neogene, Cretaceous and Jurassic usable aquifers. The groundwater flow was modelled in the zone of active exchange by five layers. Three of the layers (I, III and V) contained aquifers. In total, the available resources for all aquifers in the Dziwna catchment area amount to $QD = 4,700 \text{ m}^3/\text{h}$, i.e. $112,800 \text{ m}^3/\text{d}$, with modules (qD) ranging from 73.5 to $144.2 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$. They constitute 25.2% of renewable resources in the Dziwna river balance catchment area. The available groundwater resources in the Dziwna river catchment are $88,903 \text{ m}^3/\text{d}$, which is 78.8% of the available resources.

merical model has been prepared in the Quaternary, Paleogene-Neogene, Cretaceous and Jurassic usable aquifers. The groundwater flow was modelled in the zone of active exchange by five layers. Three of the layers (I, III and V) contained aquifers. In total, the available resources for all aquifers in the Dziwna catchment area amount to $QD = 4,700 \text{ m}^3/\text{h}$, i.e. $112,800 \text{ m}^3/\text{d}$, with modules (qD) ranging from 73.5 to $144.2 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$. They constitute 25.2% of renewable resources in the Dziwna river balance catchment area. The available groundwater resources in the Dziwna river catchment are $88,903 \text{ m}^3/\text{d}$, which is 78.8% of the available resources.

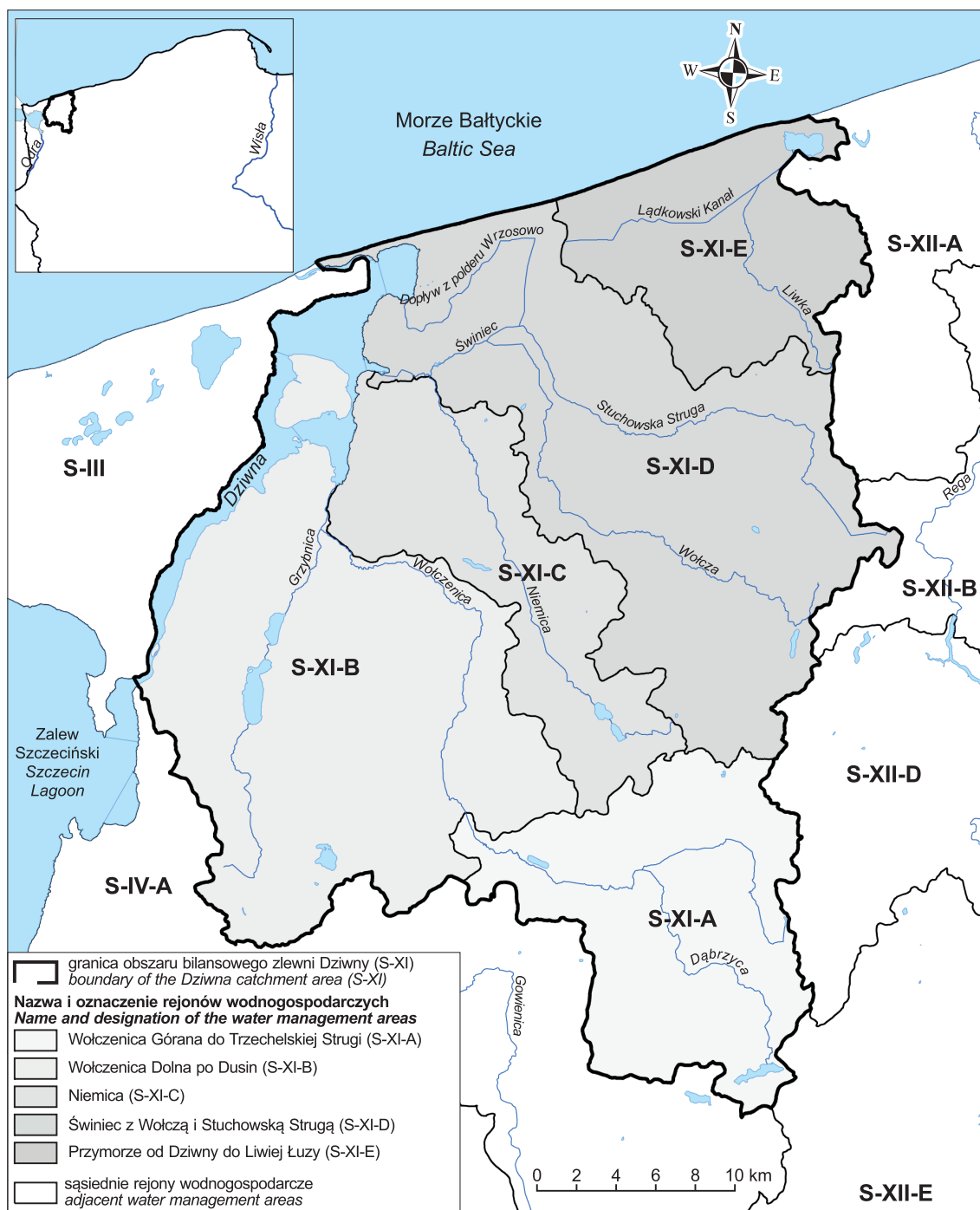
Keywords: groundwater resources, Dziwna catchment, MODIS Data

Obszar zlewni Dziwny jest zlokalizowany w północno-zachodniej części Polski, w całości na obszarze województwa zachodniopomorskiego. Ustalone zasoby dyspozycyjne opracowano dla prawobrzeżnej części zlewni Dziwny. Jest to zlewnia pokrywająca się ze zlewnią II rzędu wód powierzchniowych. Powierzchnia obszaru bilansowego wynosi $1190,67 \text{ km}^2$ (ryc. 1).

Na podstawie podziału wód słodkich wg Kleczkowskiego (1990), dokumentowany obszar znajduje się w paśmie nadmorskich zbiorników czwartorzędowych (Pn) i subzbiornika pomorskiego (SZP). W 1995 r. zespół pod kierunkiem Paczyńskiego (1995) opracował regionalizację hydrogeologiczną słodkich wód podziemnych, wg której obszar zlewni Dziwny znajduje się w makroregionie północno-zachodnim, w regionie pomorskim (V), subregionie nadmorskim (V1) i rejonie gryficko-drawskim (VI1B). Propozycję regionalizacji hydrogeologicznej Polski wynikającą z Ramowej Dyrektywy Wodnej UE (Dyrektywa, 2000) przedstawiono w *Hydrogeologii regionalnej Polski* (Paczyński, Sadurski, 2007). W podziale tym opisywany obszar jest zlokalizowany na obszarze prowincji wybrzeża i pobraża Bałtyku, w regionie zachodniopomorskim (RZP). W granicy obszaru bilansowego zlewni Dziwny nie wyznaczono głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP). Na omawianym obszarze zlewni Dziwny wyodrębniono jedną jednolitą część wód podziemnych JCWPd nr 6, wg podziału na 172 JCWPd, która w całości pokrywa się z obszarem bilansowym.

Obszar bilansowy zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zlewni Dziwny leży na obszarze północno-zachodniej części segmentu pomorskiego antyklinorium śródpolskiego (Żelaźniewicz i in., 2011), nazywanego też środkowopolskim (Dadlez, Dembowska, 1963), które jest jednostką tektoniczną wydzieloną w osadach permo-mezozoicznych (Żelaźniewicz i in., 2011). Południowe, niewielkie fragmenty obszaru bilansowego Dziwny są zaliczane do obszaru synklinorium szczecińskiego. Cechą charakterystyczną powierzchni podczwartorzędowej jest występowanie dolin kopalnych, wypełnionych różnowiekowymi osadami czwartorzędowymi, pomiędzy którymi powierzchnia osadów jury, kredy i lokalnie paleogenu oraz neogenu ma charakter wysoczyzny falistej. Osady czwartorzędowe pokrywają obszar badań prawie ciągłą warstwą. Utwory starsze odsłaniają się na powierzchni jedynie w postaci niewielkich obszarowo wychodni. Profil osadów czwartorzędowych rozpoczyna się osadami glacialnymi zlodowaceń południowopolskich, na których występują osady zlodowaceń środkowopolskich. Okres zlodowacenia północnopolskiego (wisły) wywarł ostateczny wpływ na ukształtowanie obecnej rzeźby omawianej zlewni. Osady tego zlodowacenia tworzą powierzchniową warstwę plejstocenijskiej pokrywy osadowej, a w ich profilu litostratigraficznym wyróżnia się utwory zastoiskowe, wodnolodowcowe i glinę zwałową.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Pomorski ul. Wieniawskiego 20, 71-130 Szczecin; zenon.wisniowski@pgi.gov.pl; ryszard.hoc@pgi.gov.pl; magdalena.dobies@pgi.gov.pl; paulina.szczeniak@pgi.gov.pl; ORCID ID: Z. Wiśniowski – 0000-0001-5617-3259, R. Hoc – 0000-0001-6938-9358, M. Dobies 0000-0002-7071-1997, P. Szcześniak – 0009-0000-1162-2700



Ryc. 1. Położenie obszaru zlewni Dziwny (S-XI)
 Fig. 1. Location of the Dziwna catchment area (S-XI)

WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Słódki wody podziemne związane z płytkim krążeniem wód występują w osadach czwartorzędowych, paleogeńsko-neogeńskich, kredowych i jurajskich. W północno-wschodniej części zlewni bilansowej pod osadami czwartorzędowymi występują margle i wapienie okresu kredowego (kreda górna). Skały te występują w obszarze synkliny Trzebiatowa. Poziomy wodonośne występujące w osadach kredowych są poziomami o podwójnej wodonośności – szczelinowej i porowej. W środkowej i północno-wschodniej części zlewni z poziomami wodonośnym czwartorzędowymi współwystępują poziomy wodonośne

w skałach jurajskich. W części środkowej zlewni skałami wodonośnymi są górnourajskie wapienie i margle, a w północnej i północno-wschodniej, na obszarze antykliny Gryfic i Kamienia Pomorskiego, skałami wodonośnymi są piaski i piaskowce jury środkowej i dolnej. Poziomy wodonośne kredowe i jurajskie lateralnie często kontaktują się ze sobą wzdłuż linii uskokuwch strefy uskokuwej Kamienia Pomorskiego oraz z poziomami czwartorzędowymi w dolinach kopalnych. W południowo-zachodniej części zlewni bilansowej, na skłonie antyklinorium pomorskiego, w podłożu osadów czwartorzędowych występują poziomy wodonośne w marglach kredowych oraz w piaskach paleogenu i neogenu.

Poziomy wodonośne piętra czwartorzędowego w zależności od głębokości występowania i reżimu hydraulicznego zwykle dzieli się na:

- poziomy wód gruntowych (o swobodnym lustrze wody), w tym poziomy wodonośne w osadach sandrów, w osadach rzecznych występujących w południowej części zlewni, powstałych u schyłku zlodowacenia wisły (faza pomorska) i w holocenie (Dobracka, 2013); do poziomu tego można zaliczyć również poziomy wodonośne w plejstocenijskich osadach piaszczystych pradolin;
- poziomy wodonośne międzyglinowe, zwane też międzymorenowymi, w tym: 1) poziom międzyglinowy górny związany z osadami fluwioglacjalnymi zlodowacenia wisły (faza pomorska), występujący na obszarze wysoczyzn morenowych na głębokości od kilku do 10 m (lokalnie do 20 m) jako nieciągły poziom wodonośny o napiętym lustrze wody (Dobracka, Dobracki, 1975a, b; Ruszała, Fuszara, 1999; Dobracka, 2009), 2) poziom międzyglinowy dolny, związany z osadami fluwioglacjalnymi zlodowacenia warty w południowej części omawianego obszaru oraz fazy leszczyńskiej zlodowacenia wisły w części środkowej i północnej, oraz poziom wodonośny w dolinach kopalnych we wschodniej i północno-zachodniej części zlewni Dziwny, który jest związany z piaszczystymi osadami zlodowacenia środkowopolskich i interglacjalu wielkiego (Kopczyńska-Lamparska, 1978).

METODYKA BADAŃ

Ustalanie wielkości zasobów wód podziemnych w zlewniowych systemach wodonośnych opiera się w pierwszej kolejności na ilościowej ocenie zasobów odnawialnych, traktowanych jako suma infiltracji efektywnej opadów atmosferycznych oraz zmiany stanu retencji wód podziemnych, kształtowanych zmiennym w czasie zasilaniem i dre-

nażem tych wód. Ocenę odnawialności wód podziemnych dokonano w zlewniach zamkniętych wodowskazami z wykorzystaniem metod hydrologicznych, oceniając wydatek stref drenażowych na podstawie przepływów niżówkowych, ewapotranspirację z wód gruntowych oraz sumę poboru wód na ujęciach wód podziemnych.

Definicja zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych znajduje się w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej (Rozporządzenie, 2016). Na podstawie tej definicji, z uwagi na małą wielkość dopływów spoza granic bocznych jednostki bilansowej i odpływów bocznych poza granice tej jednostki, w stosunku do wartości infiltracji efektywnej (IE), jak również małą w stosunku do IE wielkość zmian stanu retencji, przyjęto, że zasoby dyspozycyjne są zbliżone do wartości zasilania infiltracyjnego IE pomniejszonego o przepływy nienaruszalne w rzekach. Wyniki obliczeń zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych metodą hydrologiczną, za *Dokumentacją hydrogeologiczną ustalającą zasoby dyspozycyjne wód podziemnych obszaru bilansowego zlewni Dziwny* (Hoc i in., 2021) przedstawiono w tabeli 1.

Do ustalenia zasobów dyspozycyjnych zlewni Dziwny zastosowano również badania modelowe (Hoc i in., 2021). Wykonany model numeryczny, symulujący przepływ wód podziemnych w użytkowych poziomach wodonośnych pięter czwartorzędowego, paleogeńsko-neogeńskiego oraz kredowego i jurajskiego, umożliwił np. wykonanie badania dla różnych wariantów eksploatacji wód podziemnych. W rezultacie tych analiz obliczono m.in. zasoby dyspozycyjne obszaru bilansowego zlewni Dziwny. W wyznaczonym do badań modelowych obszarze przeprowadzono schematyzację warunków hydrogeologicznych, sprawdzając istniejący układ hydrostrukturalny do trzech warstw wodonośnych, rozdzielonych warstwami słabo przepuszczalnymi. Model numeryczny uwzględnia przestrzenny przebieg warstw wodonośnych, wartości parametrów hydro-

Tab. 1. Porównanie wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych zlewni bilansowej Dziwny (S-XI) wg różnych metod obliczeniowych

Table 1. Comparison of renewable and available resources of the Dziwna balance catchment (S-XI) acc. to various calculation methods

Oznaczenie i nazwa rejonów wodnogospodarczych (RWG) <i>Designation and name of water management areas (RWG)</i>	Powierzchnia RWG <i>RWG area F [km²]</i>	Wyniki obliczeń na modelu numerycznym <i>Calculation results on the numerical model</i>		Wyniki obliczeń metodą hydrologiczną <i>Calculation results using the hydrological method</i>	
		zasoby odnawialne <i>renewable resources</i>	zasoby dyspozycyjne <i>available resources</i>	zasoby odnawialne <i>renewable resources</i>	zasoby dyspozycyjne <i>available resources</i>
		Q_0	Q_D	Q_0	Q_D
[m ³ /d]					
S-XI-A Wołczenica Górna do Trzechelskiej Strugi	188,62	59 167	13 872	69 019	21 736
S-XI-B Wołczenica Dolna po Dusin	375,67 (332,17*)	92 372	25 452	138 414	30 414
S-XI-C Niemica	152,21	62 200	13 795	51 806	13 197
S-XI-D Świniec z Wołczą i Stuchowską Strugą	343,70	175 364,5	40 865	184 363	44 077
S-XI-E Przymorze od Dziwny do Liwiej Łuży	130,47	59 148	18 816	75 810	17 351
S-XI Zlewnia Dziwny i Przymorza do Liwiej Łuży	1190,67 (1147,17*)	448 252	112 800	519 411	126 775

* – bez powierzchni Dziwny i Zalewu Kamińskiego / *excluding the area of the Dziwna and the Kamiński Lagoon.*

geologicznych oraz kierunku przepływu wód podziemnych. Warstwę pierwszą (I) na modelu tworzy poziom wód gruntowych związany z czwartorzędowymi utworami fluwiogłacjalnymi i rzecznyymi. W strefie wysoczyzn poziom wód gruntowych występuje w osadach sandrywnych oraz jako poziom o swobodnym lustrze wody lub o lustrze napiętym w osadach fluwiogłacjalnych tworzących poziom międzyglinowy górny. Drugą warstwę wodonośną (III warstwa modelowa) tworzy głównie czwartorzędowy poziom międzyglinowy dolny, reprezentowany przez osady zlodowaceń środkowopolskich, a w części północnej również przez osady zlodowacenia wisły. Do trzeciej warstwy wodonośnej (V warstwy modelowej) zaliczono wodonośne skały kredy, jury, paleogenu i neogenu oraz warstwy piasków i żwirów czwartorzędowych w dolinach kopalnych (zlodowacenia południowopolskie, interglacjał wielki), które często pozostają w bezpośrednim kontakcie hydraulicznym z osadami kredy i jury, tworząc z nimi wspólny poziom wodonośny.

W ramach prac przygotowujących warstwę infiltracji efektywnej niezbędnej do budowy modelu numerycznego parametr ten obliczono stosując dwie niezależne metody, wykorzystujące różne dane wejściowe. Jedną z nich jest metoda bilansowa (Bagrov-Glugła), druga zaś wykorzystuje parowanie, którego detekcja odbywa się na podstawie wielospektralnego zdjęcia satelitarne (MODIS).

Infiltracja efektywna obliczona z wykorzystaniem danych z metody Bagrov-Glugła

Ustalenie infiltracji efektywnej z wykorzystaniem danych z metody Bagrov-Glugła polegało w pierwszej kolejności na wydzieleniu obszarów o zbliżonych parametrach infiltracji efektywnej. Dla obszarów tych, nazywanych

hydrotopami, przyjęto wskaźniki infiltracji efektywnej (w $\text{mm/r} \cdot \text{m}^2$) obliczone metodą Bagrov-Glugła (Buckow i in., 2006; Messer, 2008). W metodyce tej długoletnią wartość średniej ewapotranspiracji rzeczywistej (ETR) oblicza się z wielkości klimatycznych – z opadu oraz ewapotranspiracji porównawczej trawy (ETref) w zależności od rodzaju gleby, aktualnego użytkowania terenu oraz głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych pod powierzchnią terenu (tab. 2).

Zastosowanie danych Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) do obliczenia infiltracji efektywnej

Ewapotranspiracja jednostkowa wyrażana w $\text{kg/r} \cdot \text{1 m}^2$ jest wartością pozyskiwaną w obserwacjach satelitarnych Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) Stanów Zjednoczonych. Wielospektralny skaner optyczno-mechaniczny na pokładzie satelitów Terra i Aqua obrazuje zakresy spektralne obejmujące zarówno promieniowanie krótkofalowe, jak i podczerwone o bardzo wysokiej rozdzielczości, co pozwala na realizację badań z zakresu pokrycia terenu, klimatologii i oceanografii. Dane z produktu MOD16 (MOD16A2GF/A3GF) odnoszą się tylko do ewapotranspiracji (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>). Do ich uzyskania stosuje się algorytm oparty na równaniu Penmana-Monteitha, który wykorzystuje naziemne obserwacje meteorologiczne i dane teledetekcyjne pozyskane przez MODIS (Running i in., 2019). Na potrzeby niniejszych badań pozyskano dane dotyczące ewapotranspiracji (qET) o rozdzielczości przestrzennej 500 m z interwałów 8-dniowych (MOD16A2GF) oraz sum rocznych (MOD16A3GF) dla lat 2019 i 2020

Tab. 2. Jednostkowa infiltracja efektywna obliczona dla różnych warunków infiltracji
Table 2. Specific effective infiltration calculated for various infiltration conditions

Hydrotopy Hydrotopes	Jenostkowa infiltracja efektywna qIE [$\text{mm/r} \cdot \text{1 m}^2$] Specific effective infiltration qIE [$\text{mm/r} \cdot \text{1 m}^2$]		
	przy opadzie* średnim dla lat 1981–2010 – 724 mm with an average precipitation* of 724 mm in 1981–2010	przy opadzie* średnim dla roku suchego – 579 mm with an average precipitation* of 579 mm in a dry year	przy opadach* dla okresu 05.2020–04.2021 – 653 mm with precipitation* of 653 mm in the period 05.2020–04.2021
Bagno Swamp	–77	–77	–77
Akwen Reservoir	–18	–18	–18
Poldery na torfie Peat polders	0	0	0
Użytki zielone na torfie Grassland on peat	40	32	36
Las iglasty na piasku Coniferous forest on sand	110	88	99
Grunt orny na piasku gliniastym Arable soil on clay sand	240	192	216
Las mieszany na ppy**, glinie Mixed forest on ppy**, clay	150	120	135
Las liściasty na ppy**, glinie Deciduous forest on ppy**, clay	180	144	162
Użytki zielone na piasku Grassland on sand	206	165	185
Wieś, zabudowa luźna Village, sparse buildings	285	228	257
Miasto, tereny przemysłowe City, industrial areas	338	270	304

* – opad hydrologiczny / actual precipitation; ** – piaski pylaste / silty sands

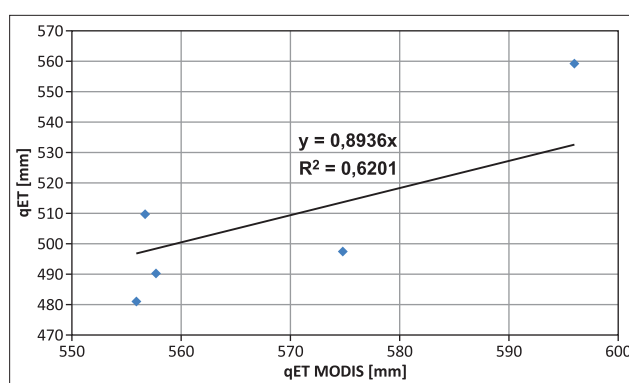
Tab. 3. Porównanie średniej ewapotranspiracji jednostkowej obliczonej z opadów i odpływu rzecznej oraz ewapotranspiracji MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) dla okresu prowadzonych obserwacji (04.2020–05.2021)**Table 3.** Comparison of mean specific evapotranspiration calculated from precipitation, river runoff, and MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) evapotranspiration for the period of observations (04.2020–05.2021)

Przekrój badawczy: rzeka/miejscowość <i>Research cross-section: river/locality</i>	Powierzchnia zlewni pomiarowej <i>Area of the measuring catchment F [km²]</i>	Odpływ całkowity <i>Total outflow Q [m³]</i>	Opad hydrologiczny <i>Actual precipitation P [m³]</i>	Ewapotranspiracja <i>evapotranspiration (ET = P-Q) ET [m³]</i>	Ewapotranspiracja jednostkowa <i>Specific evapotranspiration qET [mm/r · m²]</i>	Ewapotranspiracja jednostkowa MODIS <i>Specific evapotran- spiration MODIS qET MODIS [mm/r · m²]</i>
Wołczenica/ Stawnik	271,00	33 427 503	166 279 820	132 852 317	490,2	557,7
Wołczenica/ Świętoszewko	182,92	22 596 365	110 584 583	87 988 218	481,0	555,9
Stuchowska Struga/Swierzo	81,27	14 760 053	60 203 926,2	45 443 873	559,2	596,0
Wołcza/Jatki	150,09	29 530 656	104 186 632	74 655 976	497,4	574,8
Niemica/Szumiąca	97,73	13 914 901	63 730 173	49 815 272	509,7	556,7

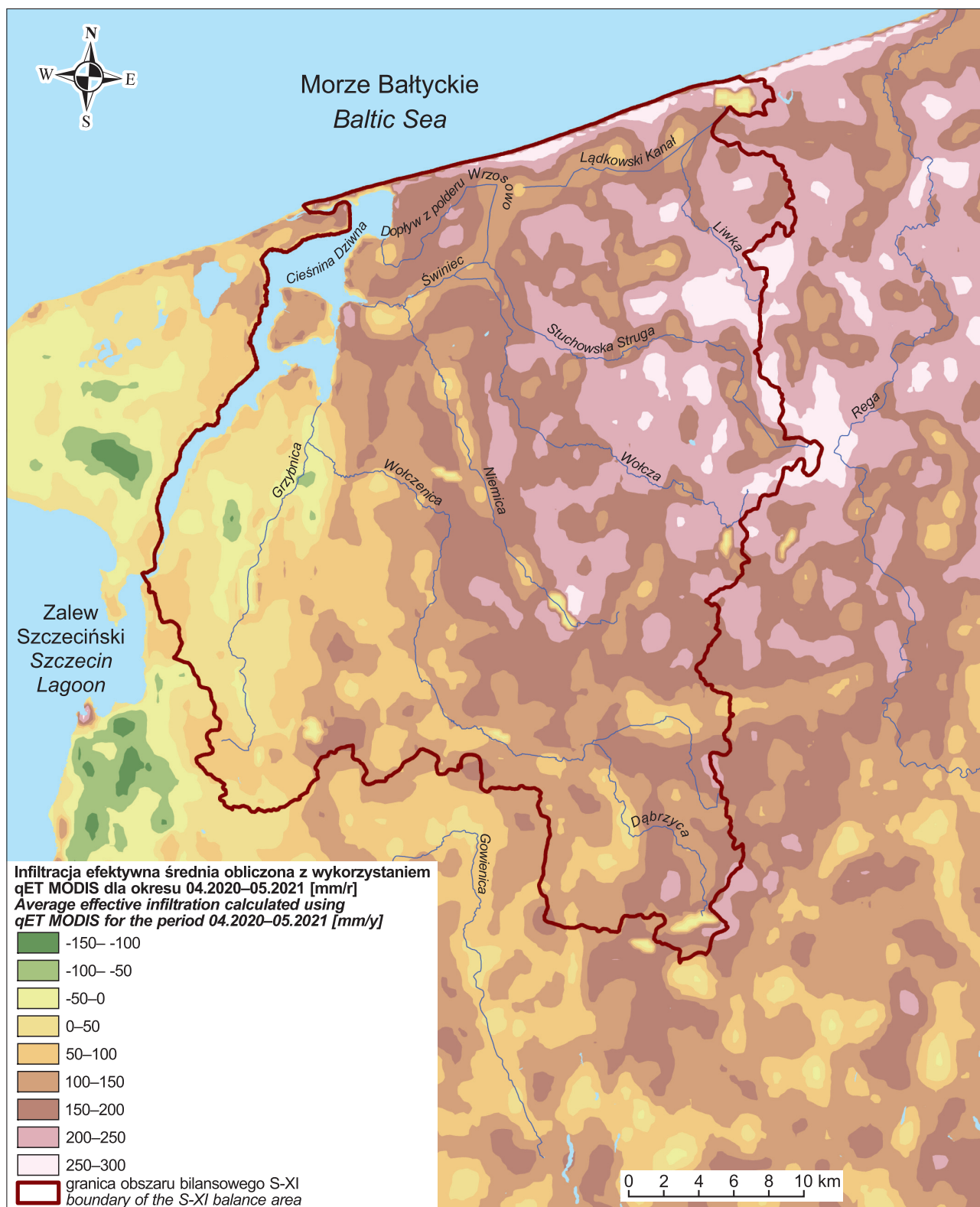
z aplikacji AppEARS (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>). Wykorzystanie danych MODIS w bilansach hydrologicznych zostało opisane przez Chabudzińskiego i in. (2015). Ewapotranspiracja jednostkowa qET MODIS została zweryfikowana na podstawie pomiarów hydrologicznych w zlewniach cząstkowych zamkniętych przekrojami pomiarowymi. Pomiar przepływu wód w ciekach były wykonywane co 1 godzinę rejestratorami typu Diver. Na ich podstawie oraz na podstawie przetworzonych danych opadowych pozyskanych z 5 stacji opadowych IMGW-PIB (https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_meteorologiczne/miesieczne/opad/) zlokalizowanych na obszarze badanej zlewni i w jej sąsiedztwie dla każdej zlewni cząstkowej zamkniętej przekrojem pomiarowym obliczono ewapotranspirację jednostkową (qET).

Zestawione w tabeli 3 dane dotyczące ewapotranspiracji jednostkowej, obliczone na podstawie rzeczywistych przepływów w ciekach oraz opadów, są od 9 do 16% niższe niż dane pozyskane z bazy MOD16A3GF (umownie nazywane dalej danymi MODIS). Różnica wynika z faktu istnienia przepływów bocznych wód podziemnych w zlewniach cząstkowych, co znalazło potwierdzenie w bilansach wykonanych na modelu numerycznym oraz z losowego charakteru opadów, które mierzone w rzadkiej sieci obserwacyjnej mogą nie odzwierciedlać rzeczywistego ich rozkładu przestrzennego. Ewapotranspiracja rzeczywista jest uzależniona głównie od temperatury i stanu szaty roślinnej, dlatego nie ulega istotnym zmianom sezonowym i wieloletnim. Według Chabudzińskiego i in. (2015) uśrednione wartości ewapotranspiracji rzeczywistej (MODIS) w dłuższym okresie czasu stosunkowo mało różnią się od wielkości uzyskiwanych z różnicy opadu i odpływu.

W oparciu o obliczone wartości qET, zestawione w tabeli 3 dla okresu prowadzonych obserwacji hydrologicznych (04.2020–05.2021), ustalono równanie prostej regresji dla wartości qET i qET MODIS, które ma postać $qET = 0,8936qET \text{ MODIS}$ (ryc. 2), przy granicach ufności od 0,852 do 0,935. Na podstawie obliczonej zależności wprowadzono korektę danych MODIS w oparciu o dane hydrologiczne, stosując współczynnik zmniejszający dane MODIS o 11%. Skorygowane dane MODIS przekształcono w rastrowy model infiltracji efektywnej o wysokiej rozdzielczości wykorzystany w modelu numerycznym (ryc. 3).

**Ryc. 2.** Korelacja liniowa ewapotranspiracji jednostkowej qET obliczonej dla każdej zlewni badawczej ze średnią wartością qET MODIS dla każdej z tych zlewni dla okresu prowadzonych obserwacji (04.2020–05.2021)**Fig. 2.** Linear correlation of the specific evapotranspiration qET calculated for each study catchment with the average MODIS qET value for each of these catchments for the period of observations (04.2020–05.2021)

Infiltracja efektywna (IE) obliczona z wykorzystaniem danych satelitarnych ewapotranspiracji (MODIS) dla okresu 05.2020–04.2021 w zlewni bilansowej S-XI wynosi $452\,291 \text{ m}^3/\text{d}$, obliczona na podstawie wskaźników dla wydzielonych hydrotopów – $467\,565 \text{ m}^3/\text{d}$, a obliczona metodą hydrologiczną – $440\,984 \text{ m}^3/\text{d}$. Uzyskane wartości IE są zbliżone, chociaż w metodzie hydrologicznej nie otrzymujemy rozkładu przestrzennego, tylko wartości średnie dla całych zlewni cząstkowych, natomiast w metodzie opartej na obliczeniach metodą Bagrow-Glugla rozkład wartości wskaźnika infiltracji efektywnej jest skokowy, związany głównie ze zmianami zagospodarowania terenu. Dyskretny rozkład wartości IE uzyskać można w obliczeniach wykorzystujących dane satelitarne MODIS. Obliczenie trzema metodami infiltracji efektywnej pokazało, że otrzymane wyniki są zbliżone, chociaż każda z metod opiera się na zupełnie innych podstawach. Ze względu na możliwość uzyskania dyskretnego rozkładu wartości infiltracji efektywnej, po zastosowaniu danych MODIS w modelu numerycznym zlewni bilansowej Dziwny, uzyskano istotną poprawę w dopasowaniu modelu do warunków rzeczywistych. Stwierdzono, że infiltracja efektywna obliczona z danych MODIS jest bliższa infiltracji efektywnej obli-



Ryc. 3. Rozkład wskaźnika infiltracji efektywnej dla okresu obserwacyjnego, obliczonego z wykorzystaniem danych satelitarnych MODIS

Fig. 3. Distribution of the effective infiltration rate for the observation period, calculated using MODIS satellite data

czonej na podstawie odpływu podziemnego z wykorzystaniem metody Kille’go, niż z wykorzystaniem metody Wundta. W metodzie Wundta średni odpływ podziemny ze zlewni jest obliczany jako średnia z minimalnych przepływów miesięcznych z wielolecia – SNQ_m , natomiast w metodzie Kille’go średni odpływ podziemny jest medianą z tych przepływów – $MeNQ_m$ (Herbich i in., 2013)

ZASOBY DYSPOZYCYJNE

Dla omawianego obszaru zlewni Dziwny zasoby dyspozycyjne ustalone łącznie dla wszystkich pięter wodonośnych wynoszą $Q_d = 4700 \text{ m}^3/\text{h}$, tj. $112\,800 \text{ m}^3/\text{d}$, przy modułach (q_d) od 73,5 do $144,2 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$. Stanowią one 25,2% zasobów odnawialnych w zlewni bilansowej Dziw-

Tab. 4. Zasoby odnawialne i dyspozycyjne wód podziemnych oraz drenaż wód w rejonach wodnogospodarczych (RWG) zlewni Dziwny wg badań modelowych
 Table 4. Renewable and available groundwater resources and water drainage in the water management areas (RWG) of the Dziwna catchment according to model tests

Numer RWG RWG No.	Pow. RWG RWG area [km ²]	Wiek poziomów wodonosnych Age of aquifers	Przepływy nienaruszalne Ecological flow [m ³ /d]	Zasoby odnawialne wód podziemnych Renewable resources of groundwater Q _o		Drenaż cieków (Q _p ** w okresie 2018–2019 r.) Drainage of streams (Q _p ** in 2018–2019)		Zasoby odnawialne wód podziemnych Renewable resources of groundwater Q _o		Drenaż cieków przy poborach wód w wysokości Q _d ** Drainage of streams with water intakes at the level of Q _d **		Zasoby dyspozycyjne Available resources Q _a		Q _d /Q _o
				2020 r.		2020 r.		dla lat 1981–2010 / for years 1981–2010		dla lat 1981–2010 / for years 1981–2010		dla lat 1981–2010 / for years 1981–2010		
				m ³ /d	m ³ /d · km ²	m ³ /d	m ³ /d · km ²	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d	m ³ /d · km ²	
S-XI-A	188,62	Q, Cr, J	46 944,0	49 333	261,5	46 351,5	245,7	59 167	313,7	44 295	224,2	13 872	73,5	23,4
S-XI-B	375,67 (332,17***)	Q, Cr, J, Ng.-Pg	108 893,0 – – 46 944,0 = = 61 949,0	74 264	266,6	64 940,1	195,5	92 372	278,1	59 051	177,8	25 452	76,6	27,6
S-XI-C	152,21	Q, J	38 725,7	52 378	344,1	49 312,1	324,0	62 200	408,6	48 385	317,2	13 795	90,6	22,2
S-XI-D	343,70	Q, J	140 512,8	149 368	434,6	146 178,3	425,3	175 365	510,24	134 037	390,0	40 865	118,9	23,3
S-XI-E	130,47	Q, Cr, J	35 596,6	49 730	381,2	42 525,1	325,9	59 148	453,3	40 331	309,1	18 816	144,2	31,8

* – bez powierzchni Dziwny i Zalewu Kamińskiego / excluding the area of the Dziwna and the Kamiński Lagoon, Q_p** – pobory wód podziemnych / groundwater abstraction, Q_d** – zasoby dyspozycyjne / available resources.

ny. Głównym piętrzem użytkowym w obszarze badanych zlewni jest piętro czwartorzędowe.

Średni pobór wód podziemnych w latach 2018–2019 w zlewni Dziwny wynosił 13 337,9 m³/d, z czego 10 128 m³/d, tj. 75,9% stanowił pobór wód podziemnych z piętra czwartorzędowego (tab. 4, 5, ryc. 4).

PORÓWNANIE WIELKOŚCI ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH OBLICZONYCH RÓŻNYMI METODAMI

Analiza przedstawionych wyników wykazuje różnice między wynikami otrzymanymi w modelowaniu numerycznym i w obliczeniach wykonanych na podstawie obserwacji hydrologicznych w zlewni. Zasoby odnawialne i dyspozycyjne obliczone metodą hydrologiczną dla zlewni Dziwny wynoszą odpowiednio 519 410,9 m³/d i 126 775,3 m³/d oraz 448 252,0 m³/d i 112 800,0 m³/d – obliczane metodą modelowania numerycznego. Porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami potwierdza, że zasoby dyspozycyjne zlewni i jej rejonów bilansowych są wyższe przy ustaleniach metodą hydrologiczną z uwzględnieniem parowania ze stref dolinnych. Wynika to stąd, że odpływ podziemnych do rzek, mierzony w kontrolowanych przepływach rzecznych, uwzględnia zasilanie pochodzące z warstw wodonosnych o niskiej przewodności, które nie są uwzględniane przy symulacji poborów wód w procesie ustalania zasobów dyspozycyjnych na modelu numerycznym. Znaczenie mają tu również dodatkowe ograniczenia, które nie znajdują odzwierciedlenia w metodzie hydrologicznej np. niedopuszczenie do znaczącego obniżenia zwierciadła wód podziemnych w ekosystemach chronionych, zależnych od wód podziemnych.

W metodzie hydrologicznej jest analizowany całkowity odpływ podziemny ze wszystkich struktur wodonosnych zlewni zamkniętej przekrojem badawczym. Uwzględnia również odpływy z wód zmagazynowanych w wodach powierzchniowych, które przy niskich stanach wód zasilają wody podziemne. Różnice metodyczne powodują, że zasoby dyspozycyjne w zlewniach z dużą ilością cieków oraz w strukturach związanych z sedymentacją lodowcową (systemy wielowarstwowe) obliczone metodą hydrologiczną są z reguły wyższe niż obliczone w modelowaniu numerycznym. W przypadku zlewni Dziwny dodatkowym ograniczeniem, które wpływa na wielkość zasobów dyspozycyjnych liczonych w modelowaniu numerycznym, jest zasolenie wód w V warstwie modelowej obejmującej poziomy wodonosne starsze od czwartorzędu, głównie jury i kredy, szczególnie w strefach nieciągłości tektonicznych i na większych głębokościach.

Zauważalna jest największa wartość zasobów odnawialnych w rejonie wodnogospodarczym S-XI-D. Po przeliczeniu na jednostkowe zasoby odnawialne moduł tych zasobów wynosi ok. 536,4 m³/d · km² wg obliczeń metodą hydrologiczną oraz 510,22 m³/d · km² wg obliczeń na modelu numerycznym. Dla zlewni Niemicy, leżącej bezpośrednio na zachód od zlewni Dziwny (S-XI-C), moduły te wynoszą odpowiednio: 340,4 i 408,6 m³/d · km². Wpływ na wielkość zasobów odnawialnych w rejonie S-XI-D ma wysoka wartość infiltracji efektywnej związana m.in. z tym, że jest to obszar najzasobniejszy w opady. W ujęciu średnim dla wielolecia różnica w opadach pomiędzy zachodnią i wschodnią częścią zlewni (rejon D) dochodzi do 100 mm, natomiast w 2020 r. różnicowanie to przekraczało 200 mm.

Tab. 4. Bilans wodnogospodarczy wód podziemnych zlewni Dziwny
Table 4. Water balance of groundwater in the Dziwna catchment area

Oznaczenie i nazwa rejonów wodnogospodarczych (RWG) Designation and name of water management areas (RWG)	Powierzchnia RWG F [km ²]	Wiek poziomów wodonosnych Age of aquifer	Zasoby odnawialne Renewable resources	Zasoby dyspozycyjne Available resources	Q _d /Q ₀	Zasoby eksploatacyjne Operating resources	Q _e /Q ₀	Pobór wód podziemnych Groundwater abstraction (2018 r.)	Q _R /Q _d	Pozwolenia wodnoprawne Water permits	Q _{pw} /Q _d	Rezerwa zasobów wód podziemnych Groundwater resources reserve R = Q _d - Q _{pw}	R/Q _d
			Q ₀ [m ³ /d]	Q _a [m ³ /d]	[%]	Q _e [m ³ /d]	[%]	Q _R [m ³ /d]	[%]	Q _{pw} [m ³ /d]	[%]	R [m ³ /d]	[%]
S-XI-A Wołcznica Góma do Trzecheńskiej Strugi	188,62	Q, Cr, J	59 167	13 872	23,4	13 284	95,8	3697,0	26,6	4220	30,4	9652	69,6
S-XI-B Wołcznica Dolna po Dusin	375,67 (332,17*)	Q, Ng-Pg, Cr, J	92 372	25 452	27,6	10 908	42,8	1260,6	5,0	1750	6,9	23 702	93,1
S-XI-C Niemica	152,21	Q, J	62 200	13 795	22,2	16 353	118,5	2792,8	20,2	5700	41,3	8095	58,7
S-XI-D Świniec z Wołczą i Stuchowską Strugą	343,70	Q, J	175 365	40 865	23,3	24 713	60,5	2445,5	6,0	5798	14,2	35 067	85,8
S-XI-E Przymorze od Dziwny do Liwiej Łuży	130,47	Q, Cr, J	59 148	18 816	31,8	17 040	90,6	4429,2	23,5	6428	34,2	12 388	65,8
S-XI Zlewnia Dziwny i Przymorza do Liwiej Łuży	1190,67 (1147,17*)	Q, Cr, J, Ng-Pg	448 252	112 800	25,2	82 298	73,0	14 625,1	13,0	23 896	21,2	88 904	78,8

* – bez powierzchni Dziwny i Zalewu Kamińskiego / excluding the area of the Dziwna and the Kamiński Lagoon.

Większa infiltracja ma wpływ na odpływ podziemny – jednostkowa wielkość odpływu podziemnego w zlewniach Wołczy i Stuchowskiej Strugi (rejon D), potwierdzona obserwacjami bezpośrednimi, jest wyższa niż w innych zlewniach. Wielkość zasobów odnawialnych określona metodą hydrologiczną w obszarze S-XI-D jest zbliżona do wielkości tych zasobów, jaka została określona w modelowaniu numerycznym.

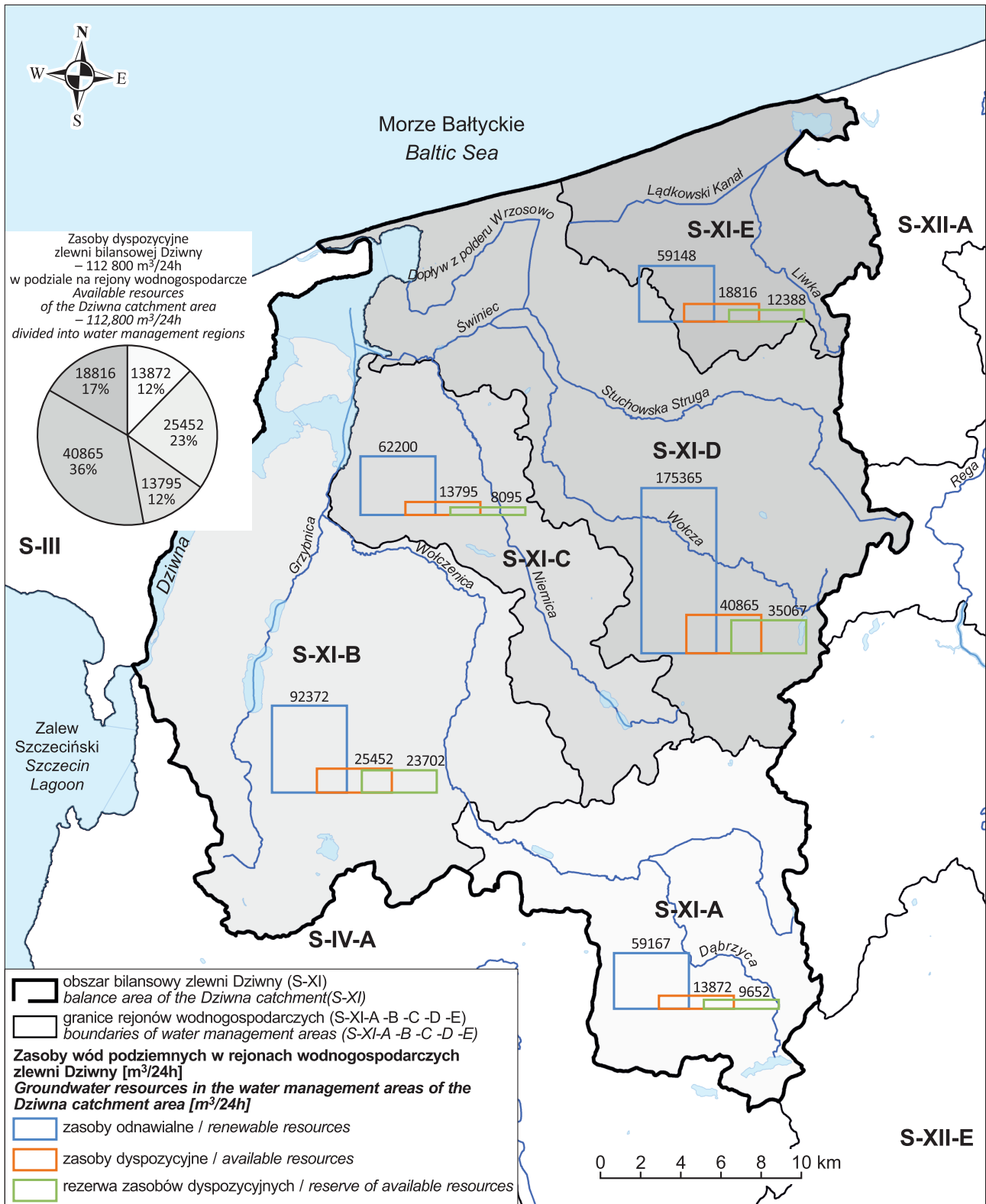
Na podstawie bilansów przepływów wód w obrębie zlewni cząstkowych zlewni bilansowej S-XI, można stwierdzić, że układ hydrograficzny małych zlewni wewnętrznych nie pokrywa się z granicami zlewni hydrogeologicznych. Istnieją znaczące przepływy boczne pomiędzy rejonami wodnogospodarczymi, jednak na zewnętrznych granicach zlewni bilansowej udział dopływów i odpływów bocznych stanowi zaledwie 3,6% zasobów odnawialnych zlewni.

System wodonośny objęty modelem zlewni Dziwny w piętrze czwartorzędowym odpowiada systemowi częściowo zamkniętemu, w którym przeważa naturalny drenaż rzeczny. W piętrze kredowym i jurajskim drenaże niewielkich cieków w obrębie zlewni nie zaznaczają się. Dominuje odpływ regionalny z kierunku SE na NW do stref drenażu w obrębie Bałtyku i w dolinie Dziwny. Jest to system częściowo otwarty. W obrębie piętra kredowego i jurajskiego odpływ wód jest często utrudniony z uwagi na zmienność litologiczną skał w profilu pionowym (kompleksy przepuszczalne i nieprzepuszczalne), na którą nakładają się deformacje ciągłe (fałdowe) oraz nieciągłe (uskoki).

W wyniku badań modelowych możliwa jest dokładniejsza ocena wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych, uwzględniająca ich przestrzenny rozkład. Badania modelowe umożliwiają przeprowadzenie bardziej szczegółowej analizy uwzględniającej wszystkie ograniczenia środowiskowe. Dlatego też jako ostateczne wyniki zasobów odnawialnych i zasobów dyspozycyjnych oraz wartość wnioskowanych zasobów dyspozycyjnych w niniejszej dokumentacji przyjęto zasoby obliczone metodą modelową.

WNIOSKI

- Obszar całego prawobrzeżnego systemu wodnego Dziwny, w tym również jej rozszerzenia i zatoki: Zalew Kamiński, Zatoka Cicha i Zatoka Wrzosowska, wraz ze zlewniami przymorskimi do jeziora Liwia Łuża, stanowią obszar bilansowy S-XI (zlewnia Dziwny). Główną bazą drenażu wód podziemnych na obszarze analizowanej zlewni jest Dziwna oraz Morze Bałtyckie.
- Dla obszaru bilansowego zlewni Dziwny (S-XI) wykonano model numeryczny ustalonego w cza-



Ryc. 4. Zasoby wód podziemnych zlewni Dziwny
 Fig. 4. Groundwater resources in the Dziwna catchment area

się przepływu wód podziemnych w użytkowych poziomach wodonośnych piętra czwartorzędowego, paleogeńsko-neogeńskiego, kredowego i jurajskiego. Badaniami modelowymi objęto obszar badań o powierzchni 1588,96 km². Modelowano przepływ w strefie aktywnej wymiany wód podziemnych obejmującej 5 warstw modelowych, z których trzy: I, III

i V, były warstwami obejmującymi poziomy wodonośny (I – poziom gruntowy i międzyglinowy górny, III – poziom międzyglinowy dolny i podglinowy, V – poziom czwartorzędowy w głębokich dolinach kopalnych, poziomy kredowe, jurajskie oraz negeńsko-paleogeński.

3. Łącznie zasoby dyspozycyjne dla wszystkich pięter wodonośnych wynoszą w zlewni bilansowej Dziwny $Q_D = 4700 \text{ m}^3/\text{h}$, tj. $112\,800 \text{ m}^3/\text{d}$, przy modułach (q_D) od 73,5 do $144,2 \text{ m}^3/\text{d} \cdot \text{km}^2$. Stanowią one 25,2% zasobów odnawialnych w zlewni bilansowej Dziwny.
4. Rezerwa zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych obszaru bilansowego zlewni Dziwny, będąca różnicą zasobów dyspozycyjnych i wielkości poboru wód podziemnych na poziomie pozwoleń wodnoprawnych, wynosi $88\,903 \text{ m}^3/\text{d}$, stanowiąc 78,8% wielkości zasobów dyspozycyjnych.

Autorzy składają serdeczne podziękowania Panu prof. dr. hab. Andrzejowi Sadurskiemu za wnikliwą recenzję artykułu, która pozwoliła uniknąć błędów i została wykorzystana do wprowadzenia niezbędnych uzupełnień.

LITERATURA

- BUCKOW E., HENNING H., NOWACKI F., SERAFIN R. 2006 – Polsko-Niemiecki Projekt Przygraniczna gospodarka wodami podziemnymi w zlewni obszaru zaopatrzenia Uznam Wschodni/Świnoujście. Część: Budowa polsko-niemieckiego systemu zarządzania wodami podziemnymi na podstawie dynamicznego modelu geohydraulicznego. Sprawozdanie końcowe. HGN Hydrogeologie sp. z o. o., PROXIMA S. A. Gryfia, Neubrandenburg, Wrocław.
- CHABUDZIŃSKI Ł., MICHALCZYK Z., SIŁUCH M., BARTOSZEK K. 2015 – Opad i odpływ z małej zlewni – porównawcza analiza danych pomiarowych oraz ogólnodostępnych danych przestrzennych. [W:] Absalon D., Matysik M., Rumani M. (red.), Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce wodnej. Komisja Hydrologiczna Polskiego Towarzystwa Geograficznego. PTG Oddział Katowice, Sosnowiec: 75–93.
- DADLEZ R., DEMBOWSKA J. 1963 – Geological Map of Pomeranian Paranticlinorium without Tertiary and Quaternary Deposits, 1 : 200 000. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- DOBRAKKA E. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Gryfice (116) wraz z objaśnieniami. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DOBRAKKA E. 2013 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Gryfice (116). Państwowy Instytut Geologiczny Warszawa.
- DOBRAKKA E., DOBRACKI R. 1975a – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Dziwnów (76) wraz z objaśnieniami. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DOBRAKKA E., DOBRACKI R. 1975b – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000. ark. Kamień Pomorski (115). Instytut Geologiczny, Warszawa.
- DYREKTYWA 2000 – Dyrektywa 2000/60/UE z dn. 23.10.2000 r. w sprawie ustanowienia ram dla działalności wspólnoty w dziedzinie polityki wodnej. Dz. U. UE. L.2000.327.1 z dn. 22.12.2000 r. (Ramowa Dyrektywa Wodna). Bruksela.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., RODZIOCH A. 2013 – Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych i sporządzania jednolitych bilansów wodno-gospodarczych. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- HOC R., WIŚNIEWSKI Z., BĄCIK A., DOBIES M., FUSZARA P., SZCZEŚNIAK P. 2021 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych obszaru bilansowego zlewni Dziwny. Centralne Archiwum Geologiczne Państwowego Instytutu Geologicznego, Warszawa. Nr inw. 3782/2023. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_meteorologiczne/miesieczne/opad/ (stan aktualności 15.10.2021).
- <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php> (stan aktualności 01.11.2021)
- <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod16.php>
- KOPCZYŃSKA-LAMPARSKA K. 1978 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Niechorze wraz z objaśnieniami. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1990 – Mapa obszarów Głównych Zbiorników Wód Podziemnych w Polsce (GZWP) wymagających szczególnej ochrony, 1 : 500 000. Instytut Hydrologii i Geologii Inżynierskiej Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków.
- MESSER J. 2008 – Ein vereinfachtes Verfahren zur Berechnung der flächendifferenzierten Grundwasserneubildung in Mitteleuropa. Wassertechnik.
- PACZYŃSKI B. (red.) 1995 – Atlas hydrogeologiczny Polski 1 : 500 000, cz. II – Zasoby jakości i ochrona zwykłych wód podziemnych. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- PACZYŃSKI B., SADURSKI A. (red.) 2007 – Hydrogeologia regionalna Polski, t. I. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- ROZPORZĄDZENIE 2016 – Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2016 r. w sprawie dokumentacji hydrogeologicznej i dokumentacji geologiczno-inżynierskiej. Dz.U. z 2016 r. poz. 2033.
- RUNNING S.W., MU Q., ZHAO M., MORENO A. 2019 – Users Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (MOD16As/A3 and Year-end Gap-filled MOD16A2GF/A3GF) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm. Version 2.2. 2019.
- RUSZAŁA M., FUSZARA P. 1999 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Nowogard (154) wraz z objaśnieniami. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- ŻELAŻNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARKOWSKI P.H., KONONON A., OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A., ŻABA J., ŻYTKO K. 2011 – Regionalizacja tektoniczna Polski. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Wrocław.

Praca wpłynęła do redakcji 27.02.2025 r.
Akceptowano do druku 8.04.2025 r.