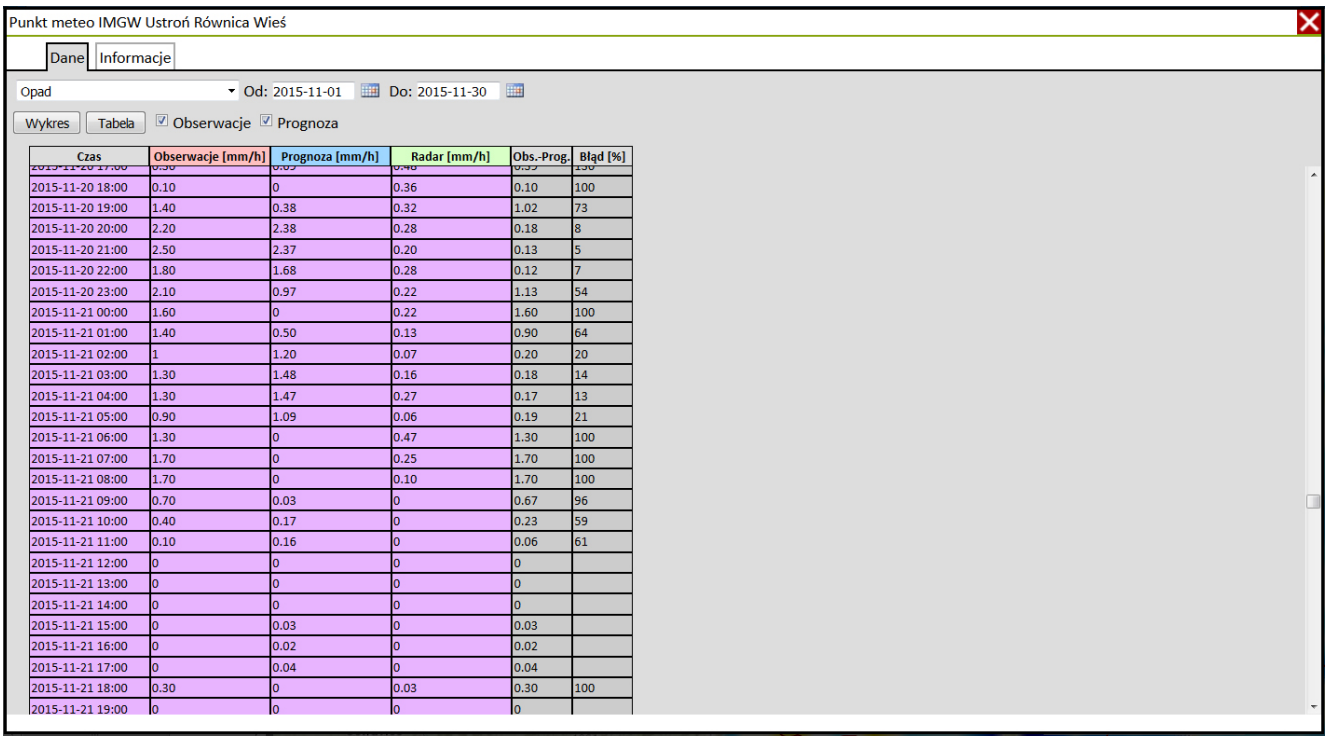
Narzędzia informatyczne w zarządzaniu zlewnią na przykładzie Małej Wisły

W latach 2013-16 w Instytucie Ekologii Terenów Uprzemysłowionych (IETU) był realizowany projekt *Zintegrowana strategia zrównoważonego zarządzania wodami w zlewni* – **CRIS**, finansowany z funduszy norweskich, mający na celu stworzenie demonstracyjnego Zintegrowanego Systemu Informacji o Zlewni. Współwykonawcami projektu byli: Instytut Ochrony Środowiska Państwowy Instytut Badawczy (IOŚPIB) oraz Norweski Instytut Badań Wody – NIVA.

Projekt dostarczył narzędzia informatyczne, które mogą wspierać decydentów zajmujących się gospodarką wodną, planowaniem przestrzennym, rolnictwem czy ochroną środowiska na terenie zlewni. System stanowi propozycję rozwiązania umożliwiającego skuteczne wieloaspektowe zarządzanie zlewnią, a zadanie to jest obowiązkiem wynikającym z wdrażanej w Polsce Ramowej Dyrektywy Wodnej.

Zdaniem zespołu badawczego system wspomagający zarządzanie zlewnią powinien nie tylko gromadzić i udostępniać dane pochodzące z obserwacji i pomiarów, lecz pozwalać również na przestrzenne odwzorowanie i wizualizację stanu podstawowych parametrów opisujących procesy zachodzące w środowisku, kształtujących obieg wody i substancji chemicznych w zlewni.

System demonstracyjny został wdrożony na obszarze obejmującym zlewnię Małej Wisły od jej źródeł po punkt wodowskazowy w Jawiszowicach. Na obszarze tym położony jest zaporowy Zbiornik Goczałkowicki stanowiący podstawowy rezerwuar wody dla konurbacji górnośląskiej oraz istotny obiekt hydrotechniczny chroniący tereny leżące poniżej przed zalaniem w trakcie powodzi (m.in. Kraków).



Punkt meteo IMGW Ustroń Równica Wieś

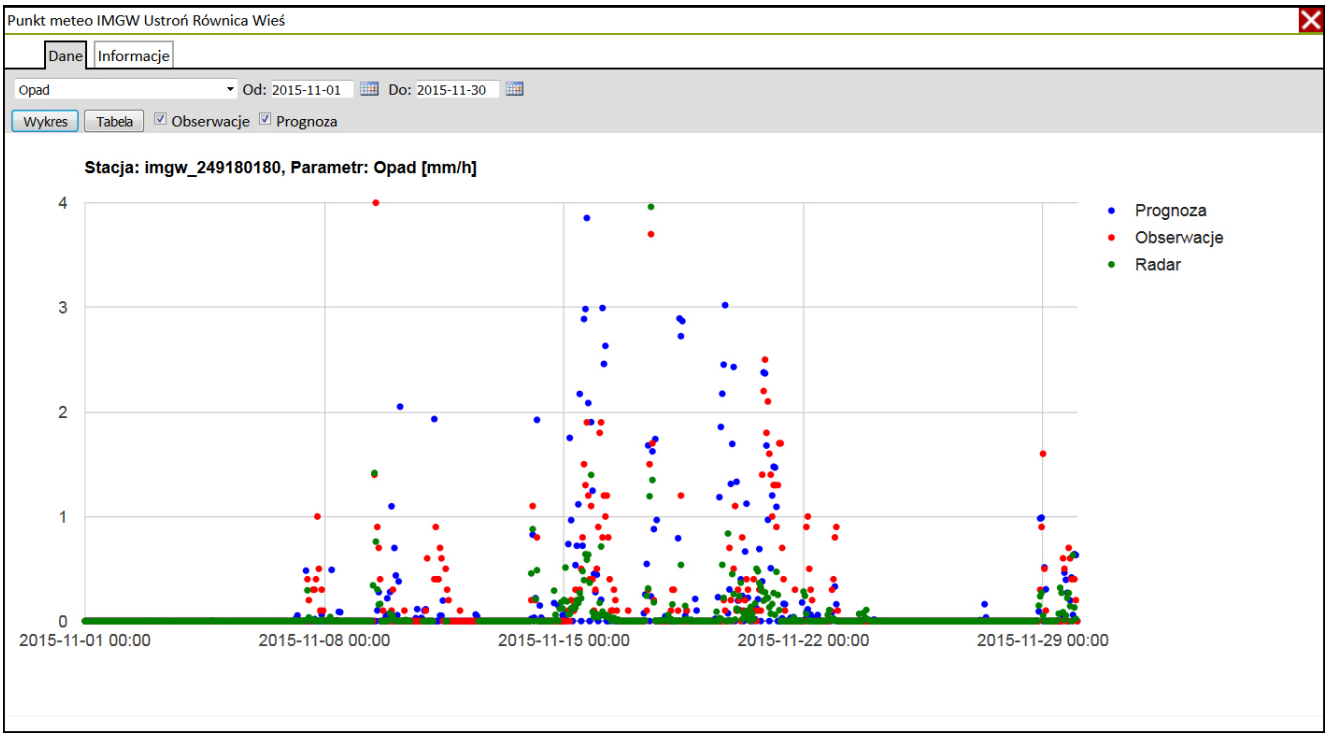
Dane | Informacje

Opad | Od: 2015-11-01 | Do: 2015-11-30

Wykres | Tabela | Obserwacje | Prognoza

Czas	Obserwacje [mm/h]	Prognoza [mm/h]	Radar [mm/h]	Obs.-Prog.	Błąd [%]
2015-11-20 18:00	0.10	0	0.36	0.10	100
2015-11-20 19:00	1.40	0.38	0.32	1.02	73
2015-11-20 20:00	2.20	2.38	0.28	0.18	8
2015-11-20 21:00	2.50	2.37	0.20	0.13	5
2015-11-20 22:00	1.80	1.68	0.28	0.12	7
2015-11-20 23:00	2.10	0.97	0.22	1.13	54
2015-11-21 00:00	1.60	0	0.22	1.60	100
2015-11-21 01:00	1.40	0.50	0.13	0.90	64
2015-11-21 02:00	1	1.20	0.07	0.20	20
2015-11-21 03:00	1.30	1.48	0.16	0.18	14
2015-11-21 04:00	1.30	1.47	0.27	0.17	13
2015-11-21 05:00	0.90	1.09	0.06	0.19	21
2015-11-21 06:00	1.30	0	0.47	1.30	100
2015-11-21 07:00	1.70	0	0.25	1.70	100
2015-11-21 08:00	1.70	0	0.10	1.70	100
2015-11-21 09:00	0.70	0.03	0	0.67	96
2015-11-21 10:00	0.40	0.17	0	0.23	59
2015-11-21 11:00	0.10	0.16	0	0.06	61
2015-11-21 12:00	0	0	0	0	
2015-11-21 13:00	0	0	0	0	
2015-11-21 14:00	0	0	0	0	
2015-11-21 15:00	0	0.03	0	0.03	
2015-11-21 16:00	0	0.02	0	0.02	
2015-11-21 17:00	0	0.04	0	0.04	
2015-11-21 18:00	0.30	0	0.03	0.30	100
2015-11-21 19:00	0	0	0	0	

Rys. 1. Zestawienie tabelaryczne danych o opadach (obserwacje, dane radarowe oraz prognoza WRF) dla posterunku IMGW Ustroń Równica Wieś.



Rys. 2. Wykres przedstawiający porównanie obserwacji, danych radarowych oraz prognozy WRF dla posterunku IMGW Ustroń Równica Wieś w listopadzie 2015 roku.

Modele wykorzystywane w systemie

Modelowanie jest konieczne w celu otrzymania lepszego, szerszego i bardziej dogłębnego obrazu na stan środowiska. Dane pomiarowe niejednokrotnie nie posiadają wystarczającej rozdzielczości czasowej i przestrzennej, a także zakresu tematycznego. Często zdarza się, że modele wymagają danych wejściowych, które w Polsce nie są mierzone w sposób rutynowy. Ich uzupełnienie możliwe jest wyłącznie na drodze modelowania.

Głównym komponentem systemu jest model **SWAT** (Soil Water Assessment Tool). Model ten bazując na charakterystyce gleb, formie pokrycia i użytkowania terenu, ukształtowaniu terenu oraz warunkach meteorologicznych opisuje najważniejsze procesy zachodzące w zlewni. Do procesów tych należą między innymi: przepływ wody korytami cieków, spływ powierzchniowy, infiltracja, parowanie, transpiracja, transport osadów, substancji pokarmowych i zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych i w glebie. Ze względu na ograniczone możliwości modelu SWAT w zakresie opisu przepływu wód, transportu zawiesin i substancji pokarmowych w dużym zbiorniku wodnym, jakim jest Zbiornik Goczałkowicki, w tym zakresie zastąpiono go w systemie CRIS modelem **GEMSS** (Generalized Environmental Modelling System for Surface waters). Model ten działa w oparciu o charakterystykę dopływów dostarczaną przez SWAT. Dodatkowe uzupełnienie modelu SWAT stanowi model **HEC-RAS** (Hydrologic Engineering Centers – River Analysis System) pozwalający na szacowanie poziomu wód w ciekach. Parametr ten jest bardzo istotny z punktu widzenia zarządzania kryzysowego w przypadku występowania sytuacji powodziowych, a nie jest wyznaczany przez SWAT.

Przepływ wód w zlewni to nie tylko spływ powierzchniowy, ale również przepływ wód podziemnych obejmujący co najmniej pierwszy poziom wodonośny. W Systemie CRIS wykorzystano model przepływu wód podziemnych **MODFLOW** (MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model) oraz model

transportu zanieczyszczeń w wodach podziemnych **MT3DMS** (Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model).

W bilansowaniu wód w zlewni, jedną z najważniejszych informacji jest zmienność w czasie przestrzennego rozkładu opadów atmosferycznych. W Systemie CRIS informacja ta powstaje w oparciu o dane pochodzące z posterunków opadowych IMGW, stacji meteorologicznej IETU oraz z radaru meteorologicznego IMGW w Ramży (Rys.1, Rys.2). Luki w danych uzupełniane są prognozami meteorologicznymi wykonywanymi za pomocą modelu **WRF** (Weather Research & Forecasting). Wielkość opadu w istotny sposób wpływa na depozycję azotu z powietrza wyznaczaną w systemie w oparciu o model dyspersji zanieczyszczeń CALPUFF. Depozycja azotu z powietrza wpływa na bilans substancji pokarmowych w wodach zlewni.

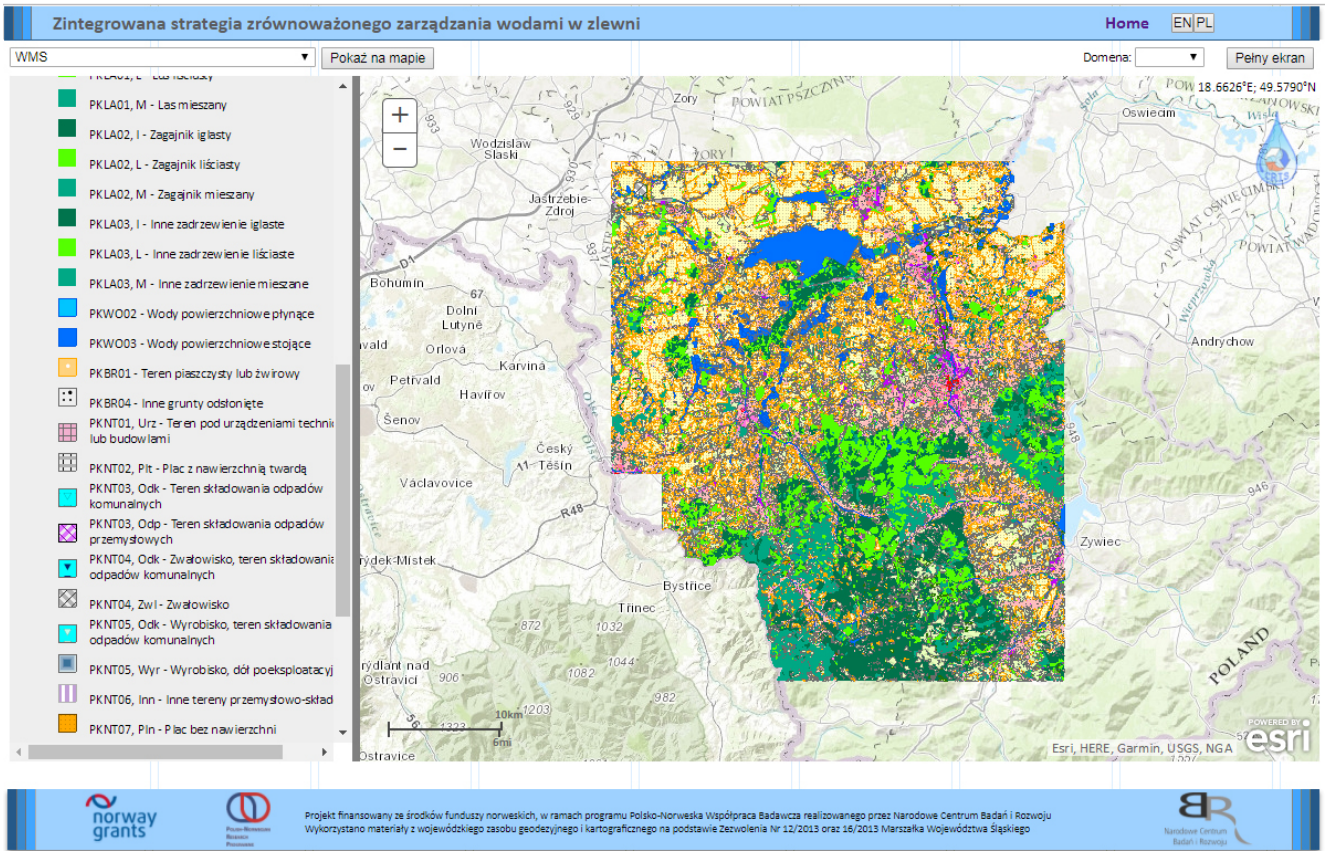
Dane zgromadzone w systemie

Żaden model nie będzie poprawnie pracował i dostarczał wiarygodnych informacji bez odpowiednich danych. Podobnie jest w przypadku systemu CRIS. Dlatego pozyskanie danych, ich odpowiednia organizacja oraz zapewnienie komunikacji systemu z poszczególnymi modelami stanowiły istotny element projektu.

Podział zlewni na zlewnie cząstkowe przeprowadzono bazując na Mapie Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP) w skali 1:50 000 opracowanej przez Zakład Hydrografii i Morfologii Koryt Rzecznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW PIB), a udostępnionej przez Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej. Informacje na temat użytkowania ziemi pochodzą z Banku Danych Obiektów Topograficznych w skali 1:10 000 pozyskanego z Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (WODGiK) w Katowicach. Z tego samego źródła pochodzą wektorowe dane o rzeźbie terenu (NMT) w skali 1:10 000 cechujące się średnim błędem na poziomie od 0,8 m do 2,0 m.

Niestety w Polsce nie istnieje jedno źródło danych opisujących

charakterystykę gleb dla całego kraju. Dlatego wykonawcy musieli zintegrować dane pochodzące z mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000 opracowanej przez Instytut Upraw Nawożenia i Gleboznawstwa (IUNG) oraz z mapy leśnej uzyskanej z Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Katowicach (RDLP). Luki uzupełniono danymi pochodzącymi ze Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:5 000 opracowanej przez Państwowy Instytut Geologiczny. Ponadto do analizy zlewni wykorzystano dane o użytkowaniu gruntów zebrane w zasobach WODGiK w Katowicach (Rys. 3).



Rys. 3. Informacja o użytkowaniu gruntów dla analizowanego obszaru dostępna w usłudze WMS.

Charakterystyka jakości wody pochodzi z Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska w Katowicach, a stan wody (poziom piętrzenia i przepływ) z punktów wodowskazowych IMGW PIB. Z IMGW pozyskano również dane pochodzące z posterunków opadowych, a także z **radaru meteorologicznego** w Ramży.

Zestaw danych wzbogacono o dane pochodzące od operatora

zbiornika, którym jest Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów S.A. Dane te opisują charakterystykę fizyko-chemiczną w Strumieniu przed ujściem Wisły do Zbiornika Goczałkowickiego oraz bilans wody w Zbiorniku uwzględniający pracę zapory i pobór wody przez Zakład Uzdatniania Wody w Goczałkowicach.

Dodatkowo gromadzone są dane meteorologiczne pochodzące początkowo z firmy Ecoclima, a obecnie z własnej stacji meteorologicznej.

Usługi systemu CRIS

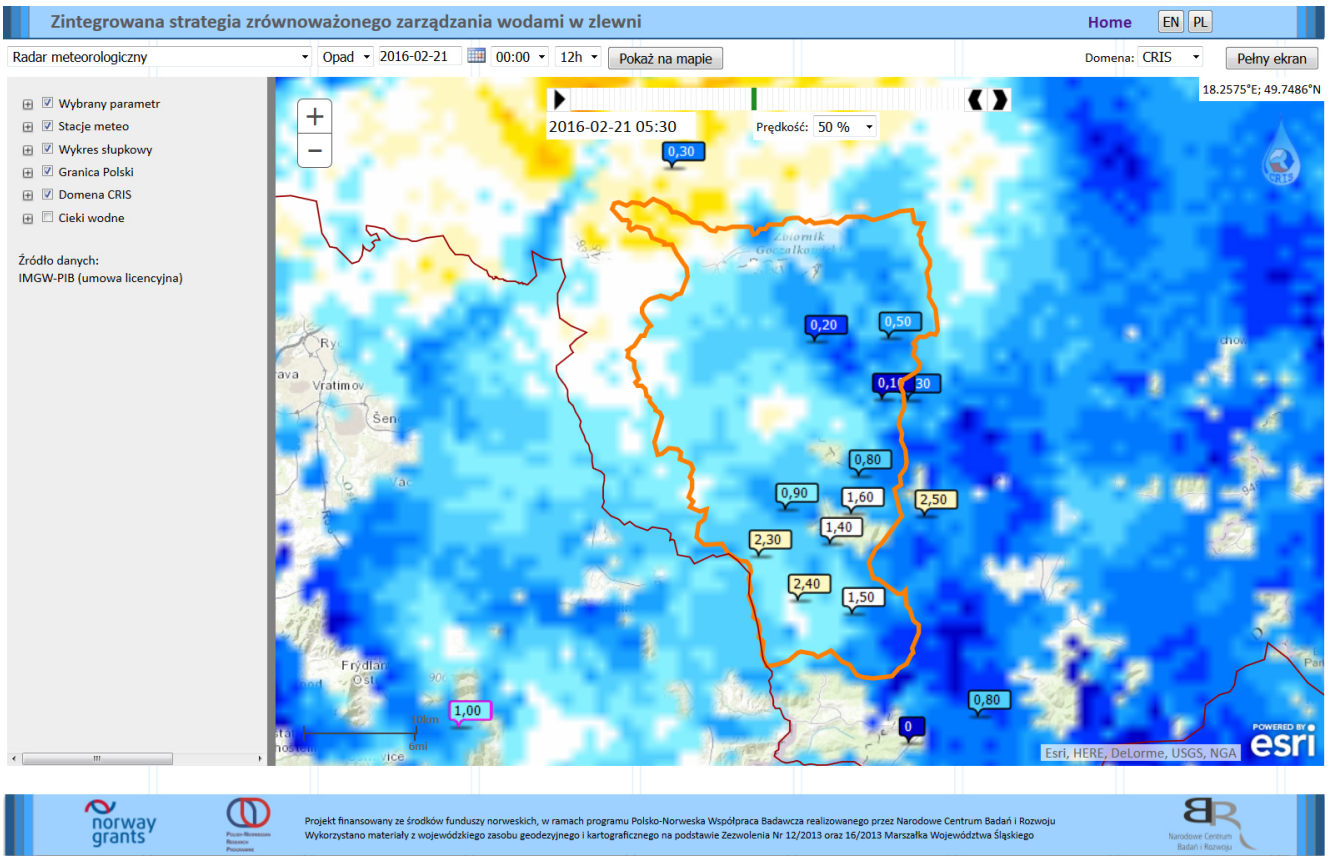
Wszystkie dane zarówno statyczne – opisujące zlewnię – jak i dynamiczne – monitoringowe oraz symulacje modelowania – zgromadzono w relacyjnej bazie danych *SQL Server* zintegrowanej z *ArcGIS for Server*. Do zadań bazy oprócz gromadzenia danych należy obsługa modeli oraz automatyczny import danych ze źródeł zewnętrznych. Dane są konsumowane przez dedykowaną aplikację mapową działającą w oknie przeglądarki internetowej. Można z niej skorzystać na stronie projektu www.cris.ietu.katowice.pl. Aplikacja udostępnia szereg usług stanowiących zestawienie różnych, dobranych przez twórców systemu, warstw informacyjnych.

Obejmują one:

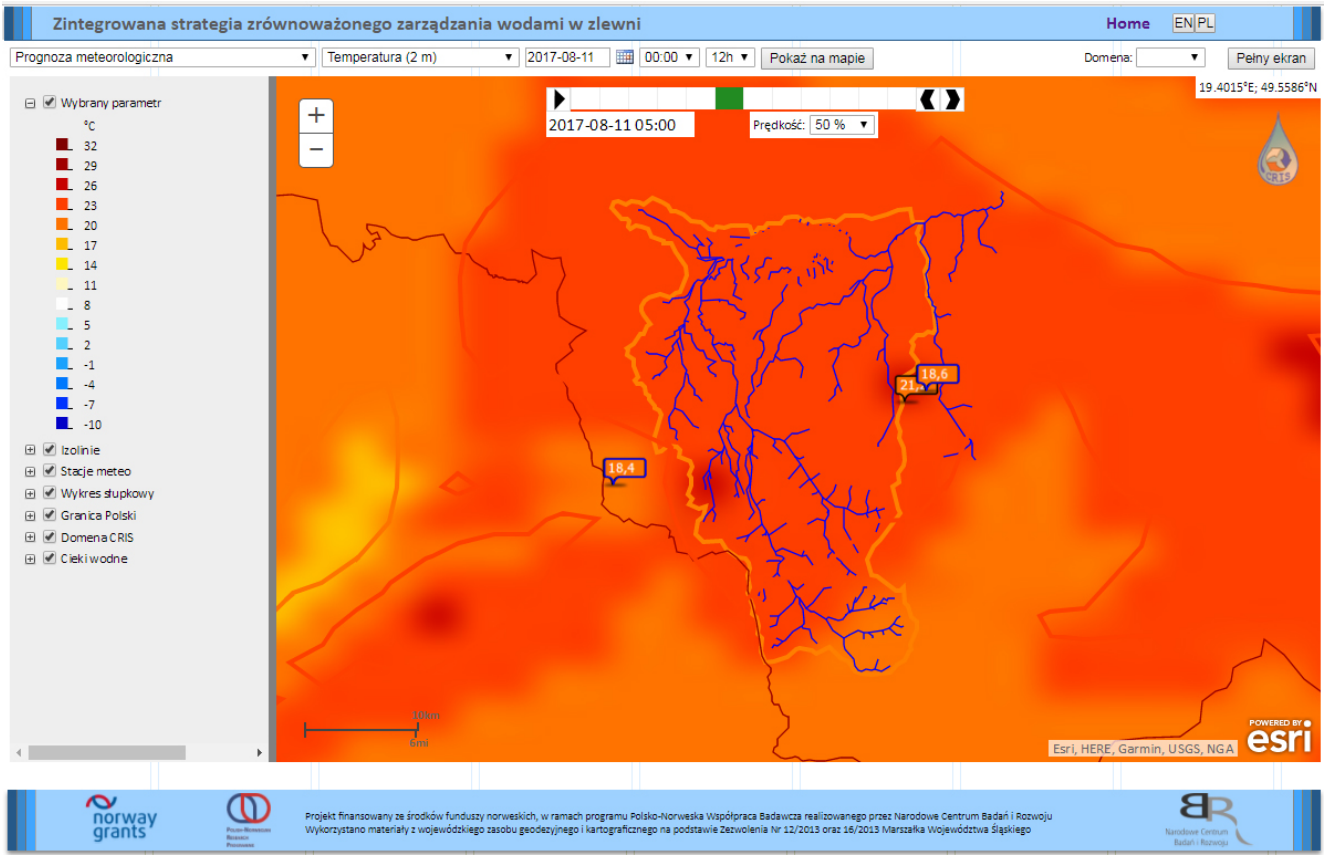
- opad atmosferyczny na podstawie analizy odbiciowości wyznaczanej przez radar meteorologiczny (Rys. 4);
- 48-godzinną prognozę meteorologiczną opracowaną przy pomocy modelu WRF (Rys. 5);
- parametry meteorologiczne użyte do obliczania bilansu wodnego w systemie CRIS;
- dobowy bilans wodny i transport substancji w zlewniach cząstkowych wyznaczany przy pomocy modelu SWAT (Rys. 6);
- dobowy bilans wodny i transport substancji w ciekach wyznaczany przy pomocy modelu SWAT (Rys. 7);
- natężenie przepływu w ciekach wyznaczane przy pomocy

modelu SWAT;

- stan wód w Wiśle w przekrojach wodowskazowych na podstawie modelu HEC-RAS;
- dobowy poziom wód podziemnych oraz stężenie azotu azotanowego w wodach podziemnych obliczone za pomocą modeli MODFLOW i MT3DMS;
- dobową depozycję azotu z atmosfery w zlewniach cząstkowych na podstawie modelu CALPUFF;
- hydrodynamikę, temperaturę i jakość wody Zbiornika Goczałkowickiego wyznaczona za pomocą modelu GEMSS;
- zestaw warstw WMS (Rys. 3);
- obserwacje satelitarne dotyczące parametrów jakości wód powierzchniowych.

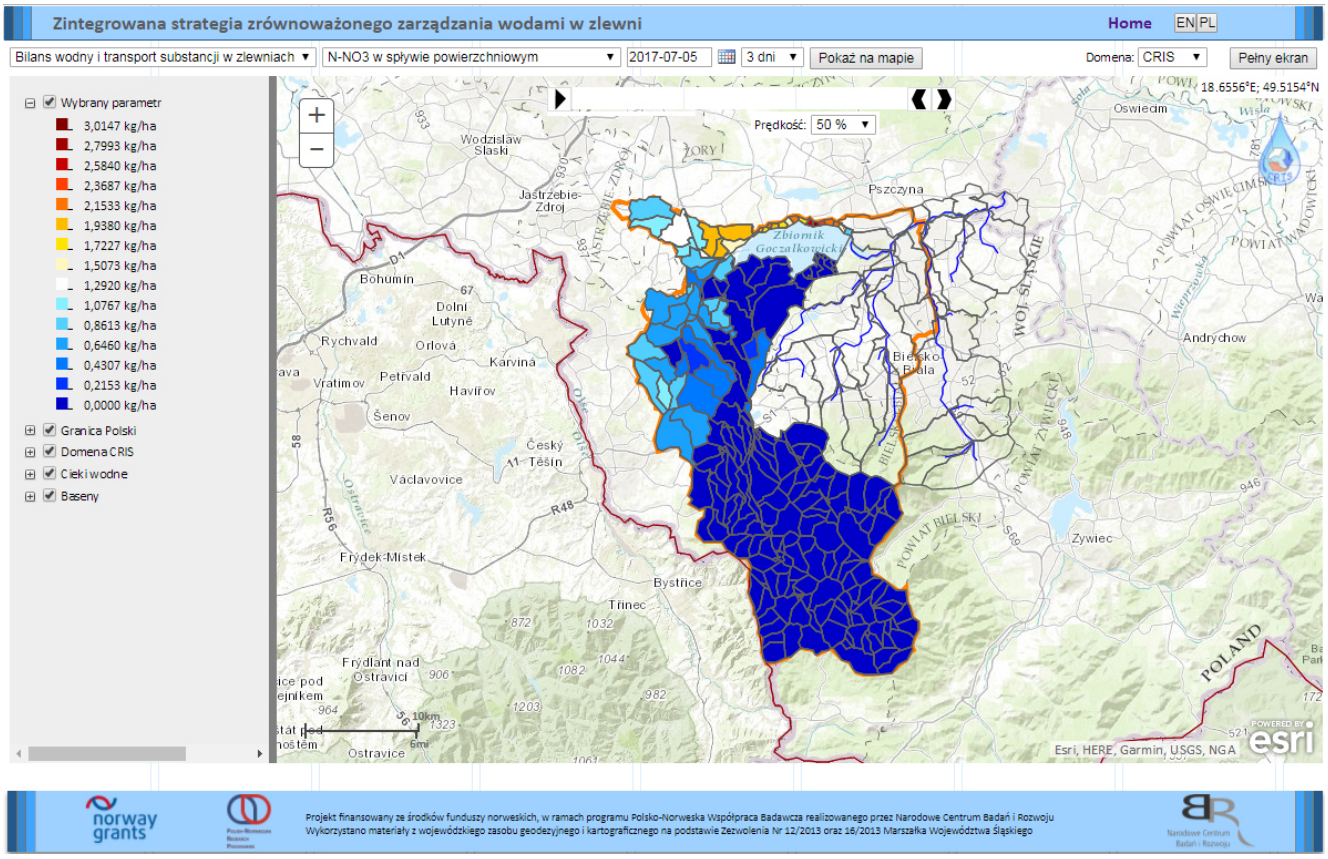


Rys. 4. Usługa obrazująca opad atmosferyczny w oparciu o dane pochodzące z radaru w Ramży.

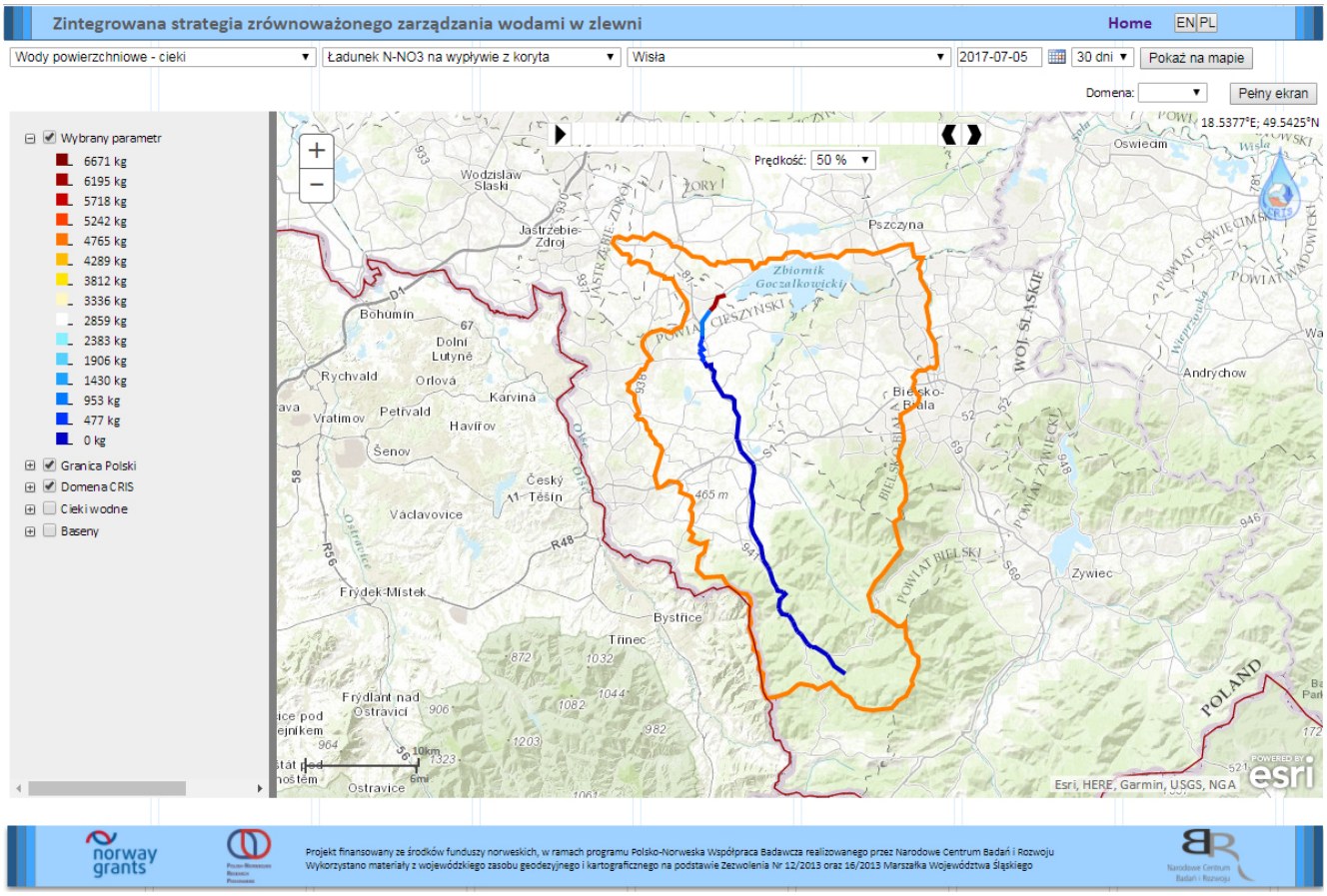


Rys. 5. Prognoza temperatury dla otoczenia zlewni analizowanej w projekcie CRIS uzyskana z wykorzystaniem modelu WRF.

Dane prezentowane są w postaci zestawów przestrzennych warstw informacyjnych. Możliwy jest dostęp do danych dla dowolnej chwili czasowej począwszy od 1 stycznia 2015r. z rozdzielczością dobową, godzinową lub 10-minutową w zależności od źródła danych. System umożliwia również porównywanie danych modelowych z pomiarowymi, a także odtwarzanie animacji obrazujących zmienność stanu danego parametru. Całość rozwiązania zbudowana została z wykorzystaniem ArcGIS API for JavaScript i osadzona w przeglądarce.



Rys. 6. Wartości ładunku azotu azotanowego w spływie powierzchniowym uzyskane dla analizowanej zlewni za pomocą modelu SWAT.



Rys. 7. Ładunek azotu azotanowego w korycie Wisły uzyskany dla analizowanej zlewni za pomocą modelu SWAT.

Modele numeryczne zaimplementowali w projekcie Rafał Ulańczyk (IOŚ PIB), dr John Rune Selvik (NIVA) oraz dr Czesław Kliś (IETU). Ten ostatni pełnił także funkcję koordynatora projektu CRIS, a za zadania związane z gromadzeniem, przetwarzaniem i prezentacją danych odpowiadali Jacek Długosz (IETU) i Piotr Cofałka (IETU).

W okresie demonstracyjnym system CRIS był wykorzystywany przez Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągowe S.A., operatora Zbiornika Goczałkowickiego, odpowiedzialnego za stan wód zarówno w zakresie stanu chemicznego jak i ekologicznego. Funkcjonalność systemu jest kompromisem pomiędzy propozycjami naukowców, a potrzebami zgłaszanymi przez operatora, a samo wdrożenie stanowi przykład partnerstwa świata nauki i przedsiębiorców.