

Opracowano w ramach projektu Baltic COMPASS -Solutions for Agriculture and Environment (działanie: WP5; zadanie: Task1)

Wariantowa ocena wpływu działań w zlewni rzeki Redy na wielkość ładunków azotu i fosforu dopływających do Zalewu Puckiego – na podstawie materiałów i opracowań, wykonanych w projekcie BALTIC COMPASS



Radzymin, listopad 2012



Zamawiający pracę: **Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Morski w Gdyni**

Praca wykonana w ramach projektu: **Baltic COMPASS – Solutions for Agriculture and Environment (działanie: WP5; zadanie: Task1)**

Opracowanie wykonane przez **BETTA Spółka z o.o.** i zespół w składzie:

dr hab. Tomasz Okruszko, prof. SGGW

dr Mikołaj Piniewski

dr Marek Giełczewski

dr inż. Ignacy Kardel

mgr inż. Paweł Marcinkowski

Konsultacje:

mgr inż. Katarzyna Jasińska, Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Gdańsku

mgr inż. Katarzyna Kotewicz, Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Gdańsku

Niniejsze opracowanie oraz zawartość znajdującą się na załączonej płycie DVD (w tym projekt modelu SWAT) zostały wykonane w ramach realizacji umowy nr DA/OGa/OC-SSO-43/2012 z dnia 8 listopada 2012 roku pt. *Wariantowa ocena wpływu działań w zlewni rzeki Redy na wielkość ładunków azotu i fosforu dopływających do Zalewu Puckiego – na podstawie materiałów i opracowań, wykonanych w projekcie Baltic COMPASS.*

Spis treści

1	Wprowadzenie	7
2	Charakterystyka stanu aktualnego – wariant „zerowy”	10
2.1	Struktura modelu SWAT zlewni Redy	10
2.2	Wyniki obliczeń modelu w stanie aktualnym – wariant „zerowy”	16
3	Opis założeń do wariantu „Horyzont 2050”	25
3.1	Zmiany klimatu	25
3.2	Zmiany demograficzne i rozwój osadnictwa	27
3.3	Zmiany w rolnictwie	30
3.4	Inne aspekty	32
4	Opis założeń do wariantu „Adaptacja 2050”	33
4.1	Perspektywy stosowania środków zaradczych w zlewni Redy	33
4.2	Środki zaradcze zastosowane w modelu	35
5	Wyniki analizy wariantów	38
5.1	Wyniki obliczeń modelu dla wariantu „Horyzont 2050”	38
5.2	Wyniki obliczeń modelu dla wariantu „Adaptacja 2050”	40
6	Podsumowanie	43
7	Literatura	44
	Załącznik 1. Parametry kalibracyjne modelu.	48
	Załącznik 2. Zestawienie priorytetowych środków zaradczych w aspekcie ich stosowania w zlewni Redy w stanie aktualnym i w przyszłości	50

Spis rysunków

Rys. 1 Położenie zlewni Redy na tle Zalewu Puckiego i Zatoki Puckiej.	8
Rys. 2 Średnioroczne ładunki jednostkowe azotu ogólnego (A) i fosforu ogólnego (B) odprowadzane do Bałtyku głównymi rzekami Polski w latach 1993-2001.	9
Rys. 3 Mapa użytkowania terenu zdefiniowana w modelu SWAT na tle podziału na podzlewnie (Opracowanie struktury modelu, 2011).	12
Rys. 4 Wyniki kalibracji modelu SWAT: Reda w Wejherowie (okres 1998-2002).	20
Rys. 5 Wyniki weryfikacji modelu SWAT: Reda w Wejherowie (okres 2003-2006).	21
Rys. 6 Miesięczny rozkład stężeń P-PO ₄ (A) i N-NO ₃ (B) w okresie kalibracji (1998-2002) i weryfikacji (2003-2006).	23
Rys. 7 Wartości miar niepewności w okresie kalibracji (A.) i okresie weryfikacji (B.) dla poszczególnych kalibrowanych zmiennych (kierunek strzałki wskazuje malejącą niepewność związaną ze wzrostem <i>p</i> -czynnika i spadkiem <i>r</i> -czynnika).	23
Rys. 8 Symulowane roczne ładunki N-NO ₃ i P-PO ₄ w ujściu Redy do Zalewu Puckiego w stanie aktualnym na tle wartości publikowanych przez IMGW.	25
Rys. 9 Sezonowa zmienność opadów atmosferycznych w zlewni Redy w stanie aktualnym oraz wg projekcji zmian dla roku 2050.	26
Rys. 10 Projekcje zmian temperatury powietrza w zlewni Redy pomiędzy rokiem 2050 a stanem aktualnym.	26
Rys. 11 Prognozowane zmiany liczby ludności w podziale na miasto i wieś w powiecie wejherowskim w latach 2011-2035 (GUS, 2011) oraz 2035-2050 (oszacowane na podstawie ekstrapolacji tempa wzrostu w latach 2011- 2035).	28
Rys. 12 Rozkład miesięcznych sum opadu i sum opadu śniegu w stanie aktualnym (A) i wariantcie „Horyzont 2050” (B).	39
Rys. 13 Rozkład miesięcznych sum odpływu całkowitego i powierzchniowego w stanie aktualnym (A) i wariantcie „Horyzont 2050” (B).	39
Rys. 14 Efektywność poszczególnych konfiguracji stosowania <i>poplonów</i> w redukcji ładunków N-NO ₃ i P-PO ₄ w roku 2050 (objaśnienia w Tab. 7).	42
Rys. 15 Efektywność wybranych środków zaradczych (A) oraz ich kombinacji (B) w ograniczaniu odpływu N-NO ₃ i P-PO ₄ ze zlewni Redy w roku 2050.	42

Spis tabel

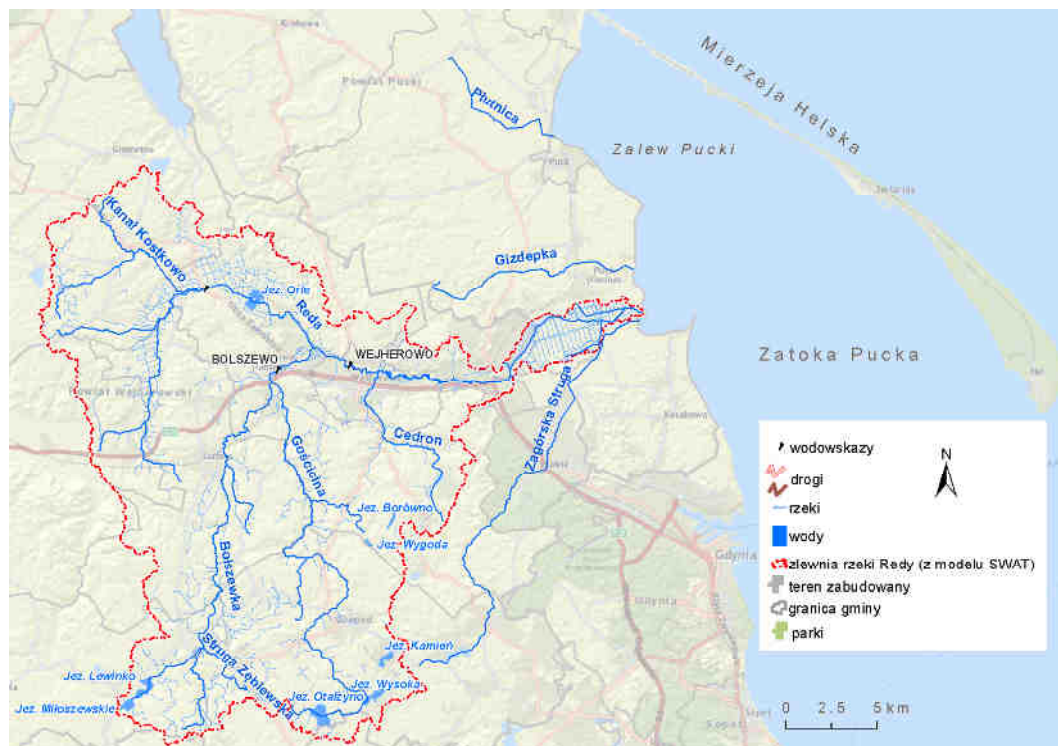
Tab. 1 Struktura użytkowania terenu w modelu SWAT (Opracowanie struktury modelu, 2011).	11
Tab. 2 Parametry opisujące depozyt suchy i mokry w zlewni Redy.	15
Tab. 3 Rośliny uprawne na gruntach ornych, które zostały uwzględnione w modelu SWAT.	16
Tab. 4 Uśrednione czasowo i przestrzennie wyniki symulowanych parametrów wyjściowych w stanie aktualnym (wartości z pliku <i>output.std</i>).	24
Tab. 5 Zmiany pokrycia terenu związanego z rozwojem osadnictwa w zabudowie rozproszonej w wariantcie „Horyzont 2050”.	30
Tab. 6 Założone przyrosty objętości retencjonowanej wody w wybranych inwestycjach z programu małej retencji (EKO-KONSULT, 2007).	33
Tab. 7 Zastosowane konfiguracje wariantu dotyczącego stosowania poplonów.	38

1 Wprowadzenie

Eutrofizacja wód, będąca rezultatem nadmiernej ilości substancji biogenych dopływających rzekami do wód morskich, stała się największym problemem środowiskowym Morza Bałtyckiego, który narastał niemal przez cały XX wiek w wyniku intensywnego rozwoju ekonomicznego regionu (Ostojski, 2012; Glasby i Szefer, 1998; Larsson i in., 1985). Rosnąca skala procesu eutrofizacji wymusiła opracowanie mechanizmów, w wyniku wdrożenia których zostałyby podjęte działania zmierzające do ograniczenia źródeł substancji biogenych na obszarze zlewiska Bałtyku, a tym samym zatrzymania dalszego pogarszania się jakości jego wód. Wśród zaproponowanych działań do najistotniejszych należy zaliczyć opracowanie Bałtyckiego Planu Działań (BSAP - ang. *Baltic Sea Action Plan*) (HELCOM, 2007), którego jednym z celów jest przeciwdziałanie eutrofizacji poprzez ograniczenie zrzutów substancji biogenych wodami rzek uchodzącymi do morza. Polska jako jeden z sygnatariuszy BSAP jest zobowiązana do prowadzenia właściwej polityki, która będzie stymulować działania pozwalające na osiągnięcie celów zapisanych w tym planie. Dodatkowym impulsem do wdrażania działań zmierzających do ograniczenia zrzutu substancji biogenych w zlewniach, była akcesja Polski do Unii Europejskiej (UE) i związane z tym przyjęcie w prawie krajowym zapisów wynikających z konieczności wdrożenia dyrektyw unijnych, takich jak Ramowa Dyrektywa Wodna (2000) i Dyrektywa Azotanowa (1991), mających na celu poprawę jakości wód.

Zaproponowane działania wydają się przynosić skutek, jeśli chodzi o ograniczenie całkowitych ładunków azotu i fosforu trafiających do Morza Bałtyckiego w skali całego zlewiska Bałtyku (HELCOM, 2011), w skali dorzecza Wisły i Odry (Kowalkowski i in., 2012), jak i w skali zlewiska Zalewu Puckiego (Bogdanowicz i in., 2007). W ostatnim przypadku ma to związek głównie z radykalną rozbudową istniejącej kanalizacji ściekowej i modernizacją oczyszczalni ścieków w latach 90-ych XX wieku. Jednak wciąż nie osiągnięty został poziom, który pozwoliłby na realizację głównego celu tj. zatrzymania eutrofizacji określonego w BSAP (HELCOM, 2011), a procentowy udział Polski w generowanym ładunku pozostaje wciąż największy (Kowalkowski i in., 2012). Co więcej, rozwój polskiego rolnictwa, jego intensywność i potencjał do generowania związków biogenych jest trudny do oszacowania. Zależy on bowiem nie tylko od zmian demograficznych w Polsce, ale także globalnego zapotrzebowania na żywność i biomasę (energetyka) oraz polityki UE w tym zakresie. Dlatego konieczna jest analiza możliwości wprowadzenia kolejnych działań, które mogą przyczynić się do zmniejszenia wielkości ładunków biogenów dopływających do Morza Bałtyckiego w perspektywie kilku nadchodzących dziesięcioleci. Taka perspektywa czasowa wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi w postaci modeli matematycznych, oraz uwzględnienia wpływu przewidywanych globalnych zmian klimatycznych (IPCC, 2007) na rozwój sytuacji w zlewniach. Celem niniejszego opracowania jest wykorzystanie modelu matematycznego SWAT (Neitsch i in., 2011) do analizy wpływu zmian klimatycznych, demograficznych, użytkowania terenu oraz zastosowania wybranych rolniczych środków zaradczych na wielkość ładunków azotu i fosforu odprowadzanych ze zlewni rzeki Redy do Zalewu Puckiego w perspektywie roku 2050. Zalew Pucki, tzw. Zatoka Pucka wewnętrzna (Rys. 1), jest bardzo płytkim akwenem (śr. głębokość 3,1 m.) o powierzchni 103 km², szczególnie narażonym na eutrofizację z uwagi na ograniczoną wymianę wód (poprzez wąskie połączenie) z zewnętrzną częścią Zatoki Puckiej (Krzymiński i in., 2005; Bogdanowicz i in., 2007). Podjęta tematyka wpisuje się w bardzo aktualny nurt badań obejmujący modelowanie matematyczne odpływu biogenów z obszaru Polski do Bałtyku w różnych skalach przestrzennych

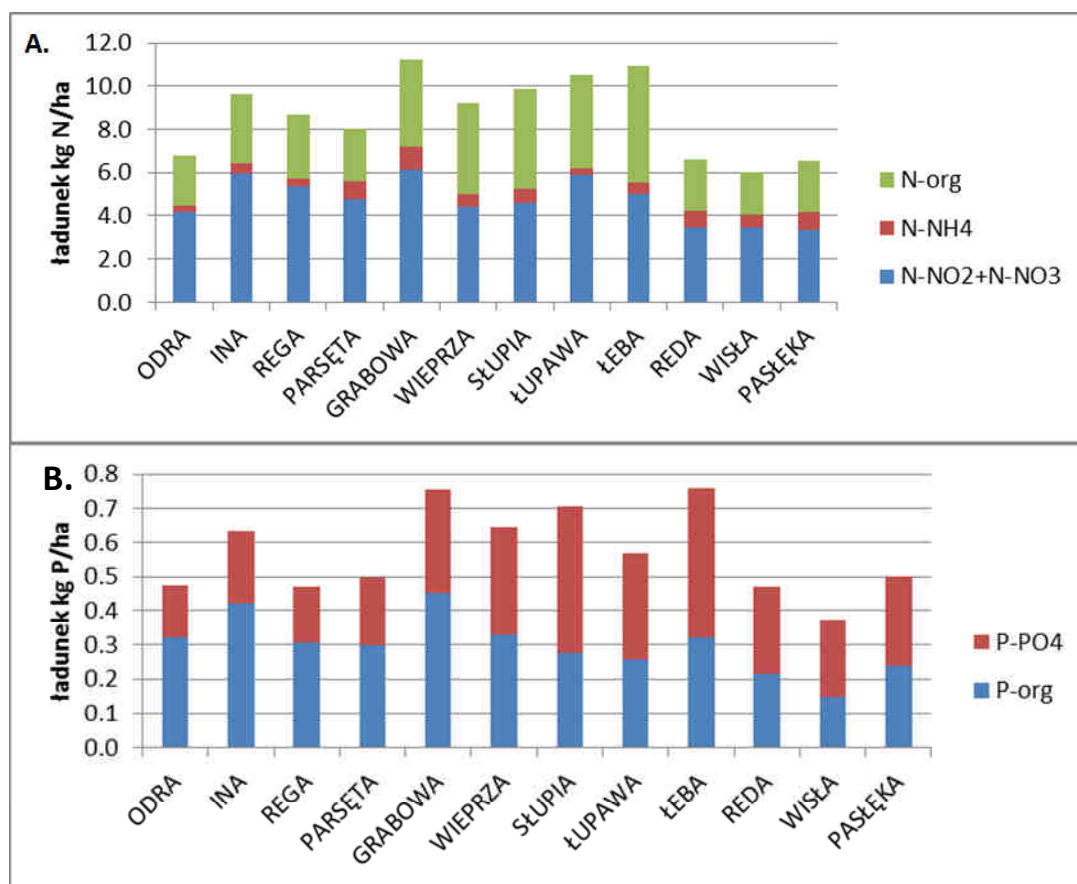
i z wykorzystaniem różnych narzędzi: m.in. w dorzeczu Wisły i Odry z wykorzystaniem modelu MONERIS (Kowalkowski i in., 2012) i w zlewni Regi z wykorzystaniem modelu SWAT (Ostojski, 2012).



Rys. 1 Położenie zlewni Redy na tle Zalewu Puckiego i Zatoki Puckiej.

Wody i osady Zalewu Puckiego cechuje ponadnormatywna ilość substancji biogennych, zwłaszcza fosforu, na przedpolu ujść głównych rzek do Zalewu (Rys. 1; Bogdanowicz i in. 2007). Na przestrzeni lat 60-ych i 70-ych XX wieku zaobserwowano ciągłe pogarszanie się stanu ekologicznego roślinności dennej, co wiązano z rosnącym dopływem ładunków azotu i fosforu do wód Zalewu (Bogdanowicz i in., 2007). Już na etapie opracowywania planu zagospodarowania przestrzennego województwa pomorskiego (PZPWP, 2009) stwierdzono, „że najważniejszym czynnikiem degradującym akweny przybrzeżne, zwłaszcza obszary zatokowe ze względu na trudniejszą wymianę wód (Zatoka Pucka, Gdańska), jest nadmierny spływ z lądu związków azotu i fosforu oraz substancji organicznych, bezpośrednio, czy poprzez rzeki”. Dlatego też dużego znaczenia nabiera podjęta w niniejszym opracowaniu próba zdefiniowania i analizy możliwych wariantów rozwoju zlewni Redy w perspektywie roku 2050. Zgodnie z metodyką zastosowaną w projekcie Baltic COMPASS (Blombäck i in., złożony) poszczególne warianty mogą dotyczyć zmian postrzeganych jako nieuniknione (np. zmiany klimatyczne, demograficzne) albo też fakultatywnych zmian wynikających z chęci redukcji ładunków poprzez stosowanie rolniczych środków zaradczych. W pierwszym przypadku interesującą kwestią jest reakcja zlewni na takie zmiany, natomiast w drugim ilościowe oszacowanie efektywności działań ochronnych. W niniejszym opracowaniu zdefiniowane i przeanalizowane zostały więc dwa warianty rozwoju zlewni Redy do roku 2050: pierwszy – wariant „Horyzont 2050”- zakładający wystąpienie jedynie zmian nieuniknionych, oraz drugi – wariant „Adaptacja 2050” – przyjmujący wprowadzenie dodatkowych działań mających na celu redukcję emisji substancji biogennych na obszarze zlewni Redy.

Reda jest największą rzeką odprowadzającą wody do Zalewu Puckiego. Jak wynika z jednoczesnych pomiarów objętości odpływu opublikowanych przez Szymczaka i Piekarek-Jankowską (2007), inne ciek – Kanał Łyski, Gizdepka i Płutnica – odprowadzają łącznie jedynie 24% objętości wody do Zalewu, pozostałe 76% przypada na Redę. Z kolei Bogdanowicz i in. (2007) oszacowali na podstawie podobnych badań prowadzonych w roku 2006, że Reda odprowadziła 72% ładunku azotu ogólnego i 65% ładunku fosforu ogólnego do wód Zalewu Puckiego. W porównaniu do Wisły, Odry i głównych rzek Przymorza zlewnia Redy cechuje się bardzo niskim odpływem jednostkowym azotu ogólnego, a zwłaszcza jego formy azotanowej, oraz niskim odpływem jednostkowym fosforu ogólnego (Rys. 2). Dominującymi formami azotu i fosforu w odpływie ładunków ze zlewni Redy są, odpowiednio, azot azotanowy $N-NO_3$ i azotynowy $N-NO_2$ (rozpatrywane łącznie, lecz faktyczny udział tego pierwszego jest zdecydowanie większy), oraz fosfor fosforanowy $P-PO_4$. Bogdanowicz i in. (2007) podkreślili, że procentowy udział $N-NO_3$ i $P-PO_4$, form znacznie przyczyniających się do eutrofizacji wód Zalewu, jest w zlewni Redy wyjątkowo wysoki. Fakt ten uzasadnia skupienie się w niniejszym opracowaniu tylko na tych dwóch formach azotu i fosforu.



Rys. 2 Średnioroczne ładunki jednostkowe azotu ogólnego (A) i fosforu ogólnego (B) odprowadzane do Bałtyku głównymi rzekami Polski w latach 1993-2001¹.

¹ Obliczenia własne na podstawie materiałów opublikowanych na stronie internetowej http://bałtyk.imgw.gdynia.pl/warunki/odplyw_zanieczyszczen.html

2 Charakterystyka stanu aktualnego – wariant „zerowy”

W niniejszym opracowaniu charakterystyka przeciętnego stanu, w jakim aktualnie znajduje się zlewnia Redy (stanu aktualnego) została określona jako tzw. wariant „zerowy”, w którym zestawiono wszystkie wykorzystywane do analizy i modelowania dane i wielkości opisujące sytuację w zlewni. Za okres referencyjny w sensie klimatycznym przyjęto wielolecie 1991-2010, natomiast w rzeczywistości wykorzystane w modelu dane odnoszą się do różnych lat, z reguły do okresu po roku 2000. Do wariantu „zerowego” odnoszone i porównywane były następnie kolejne warianty obliczeniowe zawierające opis charakterystyk odnoszących się do zmian przewidywanych w zlewni Redy. Wariant „zerowy” opierał się na danych zebranych w roku 2011 podczas realizacji fazy budowania struktury modelu. Szczegółowy opis zgromadzonych danych, obejmujący wykaz źródeł, charakterystykę jakościową oraz charakterystykę sposobu dopasowania do potrzeb modelu danych pochodzących z różnych źródeł obejmujących wielolecie 1991-2010 przedstawiony jest w pracy pt. „Opracowanie struktury modelu szacowania zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego, odpływających do Morza Bałtyckiego ze zlewni Redy” (2011) wykonanej przez zespół w podobnym składzie jak ten realizujący niniejsze opracowanie. W związku z powyższym w niniejszym rozdziale skoncentrowano się głównie na scharakteryzowaniu wybranych danych wejściowych, które są istotne z punktu widzenia opisu i analizy kolejnych wariantów obliczeniowych uwzględniających przyszłe zmiany w zlewni Redy. Podane w tym rozdziale wartości pochodzą bezpośrednio z zasobu danych wejściowych modelu i mogą odbiegać nieznacznie od wartości pochodzących z innych źródeł z uwagi na ww. proces adaptacji danych dla potrzeb modelowania. Przykładowo powierzchnia zlewni Redy wg Mapy Podziału Hydrograficznego Polski (MPHP) z roku 2007 wynosi 485 km², podczas gdy powierzchnia obliczona w modelu SWAT 483 km².

2.1 Struktura modelu SWAT zlewni Redy

Ukształtowanie terenu i hydrografia

Zlewnię Redy cechuje pagórkowaty charakter ukształtowania terenu. Na potrzeby zastosowania modelu SWAT charakterystyka ukształtowania terenu została opracowana na podstawie Numerycznego Modelu Terenu (NMT), w skali 1:26000, pozyskanego z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK). W strukturze modelu wyróżniono 30 zlewni cząstkowych (podzlewni) wydzielonych na podstawie NMT w procesie nazwanym w modelu jako *Watershed Delineation* (Rys. 3). Analiza statystyczna zastosowanego modelu wysokościowego pozwoliła na opisanie ukształtowania terenu zlewni Redy parametrami charakteryzującymi wysokość i spadki terenu, przyjmującymi następujące wartości:

- wysokość terenu: średnie wzniesienie = 107 m n.p.m., minimalne wzniesienie = 0 m n.p.m., maksymalne wzniesienie = 234 m n.p.m.; oraz odchylenie standardowe = 57 m;
- spadki terenu: obszary o nachyleniu 0-2% zajmujące 26.8% powierzchni całkowitej zlewni, o nachyleniu 2-10% zajmujące 55.8% powierzchni zlewni oraz o nachyleniu powyżej 10% zajmujące 17.4% powierzchni zlewni.

Spływ wód ze zlewni do ujścia do Zalewu Puckiego odbywa się ciekami naturalnymi o łącznej długości 143.8 km (wg modelu), których parametry charakteryzujące zróżnicowany kształt, spadki i szorstkość zostały wyznaczone częściowo w procesie *Watershed Delineation*, a częściowo na podstawie pomiarów własnych autorów oraz danych pomiarowych zaczerpniętych z literatury

(Wołoszyn, 2008). W strukturze modelu uwzględniono również występowanie terenów zmeliorowanych (za pomocą funkcji *Tile Drainage*), które zgodnie z danymi pochodzącymi z Wojewódzkiego Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych (WZMiUW) w Gdańsku mają z reguły charakter odwadniający. W wyniku analizy przestrzennej sieci rowów melioracyjnych, parametry funkcji *Tile Drainage* zdefiniowano na obszarze o łącznej powierzchni ok. 33 km² obejmującym wszystkie użytki zielone pod glebami hydrogenicznymi o spadkach terenu poniżej 2% zlokalizowane w pradolinie Redy-Łeby. W celu opisanie zdolności retencyjnych zlewni w strukturze modelu uwzględniono za pomocą funkcji *Pond* następujące jeziora zlokalizowane poza główną siecią cieków: Lewinko, Miłoszewskie, Kamień, Wysoka oraz Otałżyno (przedstawionych na Rys. 1). Całkowitą pojemność retencyjną uwzględnionych jezior oszacowano w modelu na 8878 tys. m³. Uwzględniono również jezioro Orle o pojemności 1103 tys. m³ zlokalizowane w podzlewni nr 5 jako jedyny obiekt typu *reservoir* (tj. zlokalizowany na sieci rzecznej zdefiniowanej w modelu).

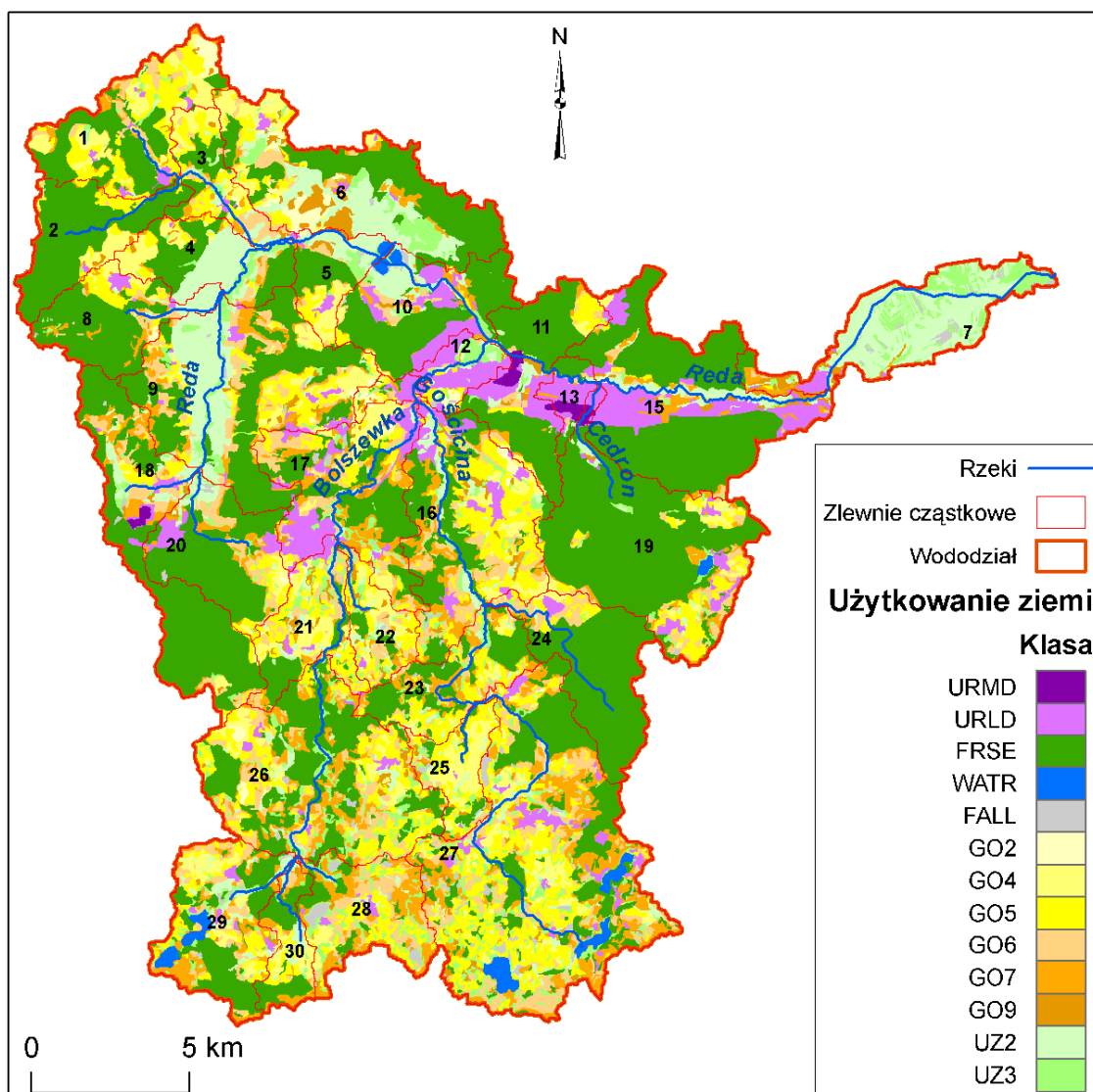
Użytkowanie terenu

Na obszarze zlewni Redy użytkowanie terenu określono na podstawie mapy Corine Land Cover (CLC) 2006 (EEA, 2007) uszczegółowionej, na terenach nieleśnych, danymi pochodzącymi z mapy kompleksów glebowo-rolniczych pozyskanej z Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach (IUNG). Rys. 3 przedstawia mapę użytkowania terenu stanowiącą dane wejściowe do modelu SWAT. W strukturze użytkowania zdefiniowanej w modelu dominowały użytki rolne oraz lasy, stanowiąc odpowiednio 51.2% i 41.6% powierzchni zlewni. Pozostałe typy użytkowania zajmowały znacząco mniejszą powierzchnię (Tab. 1), warto jednak podkreślić względnie duży udział obszarów zabudowanych zajmujących 6.6% powierzchni zlewni.

Tab. 1 Struktura użytkowania terenu w modelu SWAT (Opracowanie struktury modelu, 2011).

Kod SWAT	Nazwa	Powierzchnia [km ²]	Udział
FRSE	Lasy	200,8	41,6
GO2	Grunty orne pszenne db	1,8	0,4
GO4	Grunty orne żytnie bdb	31,9	6,6
GO5	Grunty orne żytnie db	60,3	12,5
GO6	Grunty orne żytnie sł.	41,5	8,6
GO7	Grunty orne żytnie bs	37,4	7,7
GO9	Grunty orne pastwne sł.	4,7	1,0
FALL	Nie użytki	2,5	0,5
UZ2	Użytki zielone śr.	42,2	8,7
UZ3	Użytki zielone sł.	25,0	5,2
URLD	Zabudowa rozproszona	30,2	6,3
URMD	Zabudowa zwarta	1,4	0,3
WATR	Wody	3,4	0,7

Ze względu na fakt, że przedmiotem zainteresowania w projekcie Baltic COMPASS są głównie tereny rolne, dokonano szczegółowego podziału użytków rolnych w oparciu o mapę kompleksów glebowo-rolniczych. Wynikiem przeprowadzonej analizy i generalizacji był podział gruntów ornych na dominujące kompleksy: 2, 4, 5, 6, 7, 9 oraz nieużytki, a użytków zielonych na kompleksy: 2z i 3z.



Rys. 3 Mapa użytkowania terenu zdefiniowana w modelu SWAT na tle podziału na podzlewnie (Opracowanie struktury modelu, 2011).

Gleby

W strukturze modelu wydzielono łącznie 18 różnych klas glebowych wyróżnionych na podstawie mapy glebowej IUNG na podstawie dominujących typów, podtypów i gatunków gleb w zlewni. Różne typy gleb o dominującym w składzie granulometrycznym piasku (głównie bardzo przepuszczalne gleby brunatne o składzie ps.pl) zajmują w zlewni Redy ponad połowę (51%) jej powierzchni. Z kolei 36% powierzchni zajmują różne typy gleb o składzie piaszczysto-gliniastym (najczęściej gleby brunatne o składzie pgl:gl). Natomiast 12% powierzchni zajmują różnego rodzaju gleby hydrogeniczne, najliczniej reprezentowane przez torfy niskie. Pozostały 1% powierzchni pokrywają wody powierzchniowe.

Podział na jednostki HRU

HRU – *Hydrologic Response Units* – to podstawowe jednostki obliczeniowe w modelu SWAT. Wyznaczono je poprzez nałożenie na siebie mapy pokrycia terenu, mapy glebowej oraz mapy spadków osobno w każdej ze zlewni cząstkowych i przyjęcie wartości progowych eliminujących najmniejsze jednostki:

- 50 ha dla klas użytkowania terenu w danej zlewni cząstkowej;
- 30 ha dla klas glebowych w danej klasie użytkowania terenu;
- 20 ha dla klas spadków w danej klasie glebowej.

W strukturze modelu wyznaczono 465 jednostek HRU, co daje średnią powierzchnię pojedynczej jednostki na poziomie 1,04 km².

Warunki klimatyczne

Dane klimatyczne, dotyczące następujących charakterystyk dobowych: temperatury powietrza, opadu atmosferycznego, wilgotność względnej, prędkość wiatru oraz promieniowania słonecznego, obejmujące okres 20 lat kalendarzowych 1991 – 2010, zostały udostępnione na potrzeby realizacji projektu przez IMGW Oddział Morski w Gdyni. W tym okresie monitoring opadów atmosferycznych był prowadzony jedynie w jednym posterunku na terenie zlewni (Wejherowo) oraz w 4 posterunkach zlokalizowanych w bliskim jej sąsiedztwie. Obserwacje temperatury powietrza, prędkości wiatru oraz wilgotności względnej były prowadzone w 4 posterunkach znajdujących się poza zlewnią. Promieniowanie słoneczne było monitorowane tylko w jednym posterunku (w Gdyni) znajdującym się poza zlewnią, jednak stosunkowo blisko jej granicy. Na podstawie opisanych danych obliczono między innymi główne parametry charakteryzujące warunki klimatyczne w zlewni Redy tj.: średnią roczną sumę opadów 794 mm oraz średnią temperaturę powietrza 8.4 °C².

Punktowe zrzuty ścieków

Podstawowym źródłem danych dotyczących punktowych zrzutów ścieków były materiały z katastru wodnego udostępnione przez Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej (RZGW) w Gdańsku. Wielkości wydatków zostały określone na podstawie danych o maksymalnym dopuszczonym zrzucie wg pozwoleń wodnoprawnych oraz danych o zrzutach rzeczywistych (dane z Urzędu Marszałkowskiego). Dodatkowymi źródłami danych były informacje otrzymane pracowników oczyszczalni uzyskane w czasie wyjazdu terenowego w zlewni Redy który miał miejsce w dniach 4-5.07.2011 oraz opracowanie Tyszewskiego i Pusłowskiej-Tyszewskiej (2006). W wyniku analizy przekazanych i zebranych materiałów wyróżniono w modelu 4 zrzuty ścieków oczyszczonych:

- oczyszczalnia ścieków w Luzinie,
- oczyszczalnia ścieków w Szemudzie (uruchomiona w 2007 roku),
- oczyszczalnia ścieków AWRSP w Pętkowicach,
- Gościńska Fabryka Mebli Kłose.

Ścieki bytowe z miasta Wejherowa odprowadzane są poza zlewnię do oczyszczalni w Gdyni. Szeroką analizę gospodarki wodno-ściekowej w zlewni Redy dla roku 2004 podaje również Tyszewski

² Ponieważ pierwsze trzy lata stanowią tzw. okres rozruchu, w którym parametry wejściowe ulegają stabilizacji, podane statystyki dotyczą okresu 1994-2010.

i Pusłowska-Tyszewska (2006), podkreślając ten nietypowy charakter zlewni w której większość ścieków odprowadzana jest poza jej obszar.

Sumaryczny wydatek zdefiniowanych w modelu zrzutów wyniósł 950 m³/dobę, natomiast sumaryczny ładunek zawiesin, azotu ogólnego i fosforu ogólnego wyniósł, odpowiednio: 125, 33 i 3.7 kg/dobę. Są to wartości znikomo małe w zestawieniu z ładunkami odprowadzanymi Redą do Zalewu Puckiego. Analiza danych z monitoringu prowadzonego przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska (WIOŚ) w latach 1998-2006 w Wejherowie w zestawieniu z dobowymi przepływami mierzonymi przez IMGW w tym samym profilu wykazała następujące wielkości ładunków zawiesin, azotu ogólnego i fosforu ogólnego: 5290, 682 i 92 kg/dobę. Oznacza to, że średni udział ładunków pochodzących ze zrzutów punktowych w latach 1998-2006 w profilu Wejherowo 2.3% dla zawiesin, 4.8% dla azotu ogólnego oraz 4% dla fosforu ogólnego.

Chemizm gleb

Z Krajowej Stacji Chemiczno-Rolniczej (KSChR) uzyskano dane dotyczące obserwacji chemizmu gleb i wód gruntowych użytkowanych rolniczo dla 19 stanowisk z okresu 2008-2010 (po dwa pomiary w roku wiosną i jesienią). Lokalizacja stanowisk była opisana z dokładnością do miejscowości i gminy. W danych wejściowych do modelu SWAT dotyczących chemizmu gleb należy określić początkowe stężenia azotu i fosforu osobno w każdej warstwie gleby. W modelu dane dotyczące chemizmu gleb wprowadzane są dla poszczególnych jednostek HRU. Z uwagi na dużą liczbę wydzielonych jednostek (482) oraz rzadką gęstość rozmieszczenie punktów pomiarowych gleb dane podlegały ekstrapolacji. Dostępne dane zawierały: typ użytkowania, skład granulometryczny gleby, zawartość azotu azotanowego, azotu amonowego oraz tlenu fosforu w trzech warstwach profilu glebowego (na głębokości 0-30 cm, 31-60 cm oraz 61-90 cm). Na tej podstawie obliczono statystyki grupowe parametrów chemizmu wg kryteriów: gatunek gleby, użytkowanie oraz głębokość.

Kolejnym etapem było przyporządkowanie obliczonych statystyk do odpowiadającym im klas glebowych zdefiniowanych w modelu SWAT. Największe stężenia azotu i fosforu zaobserwowano w czterech profilach gleb organicznych użytkowanych łąkowo: do 113 (śr. 62,4) mg P₂O₅/100g gleby, do 103 (śr. 33) mg NH₄/kg, do 81 (śr. 8) mg NO₃/kg. Podwyższoną zawartość fosforu dostępnego dla roślin potwierdziła również analiza wyników monitoringu gleb prowadzonych w zlewni Narwi (Blombäck i in., złożony). Ponieważ są to grunty nawożone przez rolników świadczyć to może o ich przenawożeniu lub/i ich naturalnej zasobności w fosfor. Z reguły największe stężenia składników występowały w wierzchniej warstwie. W roku 2010 wartości odbiegały znacznie od pozostałych lat prawdopodobnie ze względu na dużą sumę opadów (nastąpił kilkukrotny wzrost stężenia NO₃ i spadek NH₄).

Zanieczyszczenia atmosferyczne

Parametry modelu odnoszące się do suchej i mokrej depozycji atmosferycznej zestawiono w Tab. 2. Są to parametry globalne, tzn. przyjmują jedną wartość charakteryzującą całą zlewnię. Proces depozycji suchej zanieczyszczeń polega na grawitacyjnym opadaniu cząsteczek na powierzchnię ziemi. Dane dla azotanów obliczone zostały jako wartość średnia dla lat 1985-1993 na podstawie danych podawanych przez Instytut Ochrony Środowiska (IOŚ³), natomiast dla amoniaku jako wartość

³ http://www.ios.edu.pl/biodiversity/3/r3_3226.htm

średnia z lat 2002-2005 (Kryza i in., 2011). Proces depozycji mokrej polega na transporcie zanieczyszczeń na powierzchnię ziemi wraz z opadem atmosferycznym. Dane dotyczące stężeń parametrów pochodzą z bazy danych Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (GIOŚ⁴) dla stacji Gdańsk z lat 1994-2010. Jedną ze słabości modelu SWAT jest to, że nie pozwala on uwzględnić depozycji atmosferycznej fosforu. Tymczasem wg danych GIOŚ średni ładunek fosforu ogólnego wnoszonego z opadem atmosferycznym wyniósł na obszarze Polski w latach 1999-2010 0.34 kg P/ha/rok. W związku z tym należy mieć na uwadze, że modelowanie odpływu związków fosforu jest obciążone dodatkowym błędem nieobecnym w przypadku modelowania odpływu związków azotu.

Tab. 2 Parametry opisujące depozyt suchy i mokry w zlewni Redy.

Parametr	Opis	Wartość
DRYDEP_NH4	depozycja sucha amoniaku na powierzchnię ziemi (kg N/ha/rok)	0,4
DRYDEP_NO3	depozycja sucha azotu azotanowego na powierzchnię ziemi (kg N/ha/rok)	1,03
RCN_SUB	stężenie azotu azotanowego w wodzie opadowej (mg N/l)	0,66
RAMMO_SUB	stężenie amoniaku w wodzie opadowej (mg N/l)	0,36

Rolnictwo

Użytki rolne zajmują (łącznie z nieużytkami) 51.2% powierzchni całkowitej zlewni Redy. W roku 2010 47% tej powierzchni należało do gospodarstw o powierzchni 15ha i więcej (GUS, 2010). Podstawowym źródłem danych wykorzystanych na tym etapie były materiały i informacje ustne przekazane przez Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego (PODR) w Gdańsku oraz Biuro Powiatowe PODR w Wejherowie w roku 2011. Wszystkie dostępne dane dotyczące rolnictwa zostały opracowane z dokładnością do gmin. Do szczegółowych analiz dotyczących struktury upraw w poszczególnych gminach zdecydowano się wybrać tylko gminy, które w sposób znaczący tworzą całkowitą powierzchnię zlewni Redy są nimi: Gniewino, Luzino, Szemud i Wejherowo – gmina wiejska. Obszar wyznaczony przez te gminy pokrywa 82% powierzchni użytków rolnych w zlewni Redy, co uznano za wartość wystarczającą z punktu widzenia reprezentatywności danych dla całej zlewni. W wyniku przeprowadzonych analiz w modelu zdefiniowano siedem roślin uprawnych na gruntach ornych (Tab. 3). Strukturę zasiewu tych roślin rozplanowano w jednostkach HRU stanowiących grunty orne, dopasowując poszczególne rośliny do kompleksów glebowo-rolniczych oraz uwzględniając rzeczywistą strukturę zasiewów w analizowanych gminach. Kalendarz praktyk rolniczych dla każdej z wymienionych roślin uprawnych opracowano w oparciu o informacje przekazane z Biura Powiatowego PODR w Wejherowie (np. terminy stosowania poszczególnych praktyk rolniczych) oraz na podstawie wspomnianych wyżej materiałów udostępnionych przez PODR w Gdańsku (dawki nawozów dopasowane do potrzeb roślin uprawnych oraz charakteru uprawy). Przykładowo w czterech wybranych gminach średnioroczne zużycie nawozów mineralnych przez rolników indywidualnych w latach 1998-2006 wyniosło: 40 kg N/ha oraz 25 kg P/ha. W gminach Wejherowo, Luzino i Szemud było nieco poniżej średniej, natomiast w gminie Luzino stosowane dawki przekraczały średnie o 20% w przypadku azotu i 28% w przypadku fosforu, co zostało uwzględnione w modelu.

⁴ <http://www.gios.gov.pl/chemizm2010/index.html>

Tab. 3 Rośliny uprawne na gruntach ornych, które zostały uwzględnione w modelu SWAT.

Roślina uprawna	Odpowiednik SWAT – kod	Odpowiednik SWAT – nazwa	Powierzchnia [km ²]	Udział [%]
Żyto / Pszenżyto ozime	RYE	Rye	48,0	27,0
Owies	OATS	Oats	52,4	29,5
Pszenica jara	SWHT	Spring wheat	32,9	18,6
Ziemniaki	POTA	Potato	21,7	12,2
Mieszanki strączkowe	FPEA	Field peas	5,1	2,9
Motylkowe drobnonasienne	CLVR	Red clover	14,6	8,2
Rzepak	CANP	Spring canola - Polish	2,8	1,6
Suma			177,5	100

Nawożenie nawozami organicznymi (obornik, gnojowica i gnojówka) zdefiniowano natomiast dla użytków zielonych oraz upraw ziemniaków. Wielkości dawek zostały zweryfikowane na podstawie analizy dostępności nawozów naturalnych opracowanej na podstawie liczebności pogłowia zwierząt gospodarskich i przeciętnej produkcji azotu i fosforu przez poszczególne zwierzęta w analizowanych gminach w 2010 r. Łączna wielkość pogłowia została oszacowana na 16 963 DJP⁵, z czego ok. 62% przypada na trzodę chlewną. Obsadę zwierząt oszacowano na 0.56 DJP/ha UR⁶, co jest znacznie poniżej obsady ocenionej jako dopuszczalna ze względów środowiskowych (1.5 DJP/ha UR) w Kodeksie Dobrej Praktyki Rolniczej (KDPR; Duer i in., 2002). Średnia dostępność azotu w nawozach organicznych została oszacowana na 32.9 kg N/ha UR, przy czym najwyższą wartość zanotowano w gminie Luzino, a najniższą w gminie Gniewino (odpowiednio 45 i 15.3 kg N/ha UR).

2.2 Wyniki obliczeń modelu w stanie aktualnym – wariant „zerowy”

Przez wariant „zerowy” rozumiana jest symulacja modelu SWAT zlewni Redy uruchomiona w 20 - letnim okresie referencyjnym (kontrolnym) 1991-2010, określanym również jako stan aktualny. Wyniki symulacji w wariantcie „zerowym” będą stanowić punkt odniesienia dla wyników symulacji w wariantcie uwzględniającym zmiany klimatu (Rozdział 3) oraz w wariantach działań adaptacyjnych (Rozdział 4).

Kalibracja modelu – dane i narzędzia

SWAT jest modelem uzasadnionym fizycznie, w którym cykl hydrologiczny warunkuje obieg wody oraz procesy transportu zawiesiny i biogenów w skali zlewni. Ze względu na dużą liczbę parametrów niezbędnym elementem poprzedzającym analizy wariantowe jest kalibracja modelu czyli dopasowanie wartości symulowanych do obserwowanych poprzez manipulację wartościami parametrów w przyjętych zakresach. Kalibrację poprzedzać powinna analiza czułości definiowana jako reakcja wyników obliczeń modelu na zmianę parametrów wejściowych. Z kolei etapem następującym po kalibracji jest weryfikacja modelu (na niezależnym zbiorze danych, najczęściej na innym okresie). Cały proces analizy czułości, kalibracji i weryfikacji przeprowadzony został w czterech iteracjach związanych z różnymi zmiennymi symulowanymi przez model:

⁵ DJP – duża jednostka przeliczeniowa inwentarza (ang. *livestock unit*, LSU)

⁶ UR – powierzchni użytków rolnych

1. Przepływ
 - a. Analiza czułości parametrów mających potencjalnie wpływ na przepływ
 - b. Wybór parametrów do kalibracji
 - c. Kalibracja (okres 1998-2002)
 - d. Weryfikacja (okres 2003-2006)
 - e. Zapisanie wartości parametrów dających najlepsze wyniki symulacji w modelu
2. Zawiesina
 - a. Analiza czułości parametrów mających potencjalnie wpływ na zawiesinę (oprócz parametrów wybranych w punkcie 1b)
 - b. Wybór parametrów do kalibracji
 - c. Kalibracja (okres 1998-2002)
 - d. Weryfikacja (okres 2003-2006)
 - e. Zapisanie wartości parametrów dających najlepsze wyniki symulacji w modelu
3. Azot
 - a. Analiza czułości parametrów mających potencjalnie wpływ na odpływ związków azotu (oprócz parametrów wybranych w punktach 1b i 2b)
 - b. Wybór parametrów do kalibracji
 - c. Kalibracja (okres 1998-2002)
 - d. Weryfikacja (okres 2003-2006)
 - e. Zapisanie wartości parametrów dających najlepsze wyniki symulacji w modelu
4. Fosfor
 - a. Analiza czułości parametrów mających potencjalnie wpływ na odpływ związków fosforu (oprócz parametrów wybranych w punktach 1b, 2b i 3b)
 - b. Wybór parametrów do kalibracji
 - c. Kalibracja (okres 1998-2002)
 - d. Weryfikacja (okres 2003-2006)
 - e. Zapisanie wartości parametrów dających najlepsze wyniki symulacji w modelu.

Z punktu widzenia niniejszego opracowania kluczowe są wyniki uzyskane jako efekt przeprowadzenia czynności wymienionych w punktach 3 i 4. Symulacje odpływu substancji biogennych są jednak silnie uwarunkowane procesami obiegu wody w zlewni, które mogą być poprawnie symulowane po prawidłowo przeprowadzonej kalibracji modelu w sensie ilościowym. Celem takiej kalibracji jest uchwycenie przestrzennej i czasowej zmienności bilansu wodnego zlewni oraz jak najlepsze odwzorowanie zmienności hydrogramu przepływów dobowych rzeki.

W kalibracji i weryfikacji modelu w zakresie przepływu wykorzystano ciągi przepływów dobowych w trzech przekrojach sieci rzecznej Redy (wodowskazy IMGW Bolszewo na Bolszewce oraz Zamostne i Wejherowo na Redzie). W kolejnych trzech etapach przeprowadzono kalibrację ładunków zawiesin, azotu azotanowego oraz fosforu mineralnego, wykorzystując wykonywane z częstotliwością przeważnie dwutygodniową w okresie 1998-2006 pomiary WIOŚ w Gdańsku w profilu Wejherowo. SWAT symuluje odpływ czterech form azotu (azot azotanowy, azotynowy, amonowy i organiczny) oraz dwóch form fosforu (fosfor mineralny i organiczny). W niniejszej pracy skoncentrowano się na dwóch głównych formach tych pierwiastków: azocie azotanowym N-NO_3 oraz fosforze mineralnym P-PO_4 , wybierając je jako elementy do kalibracji modelu. Azotany i fosforany wymienione są w Załączniku VIII Ramowej Dyrektywy Wodnej UE (2000) jako główne substancje przyczyniające się do eutrofizacji. Ponadto z przeprowadzonych obliczeń na podstawie danych WIOŚ dla okresu 1998-2006 wynika, że spośród czterech form azotu symulowanych przez SWAT, udział N-NO_3 jest największy i stanowi 47% azotu ogólnego (rozumianego jako suma różnych form azotu organicznego,

NH₄, NO₃ i NO₂), co jest związane z dużą mobilnością tej formy azotu. W przypadku fosforu, udział form organicznych w rzece był co prawda nieznacznie większy w okresie monitoringu WIOŚ, ale już w latach 1993-2001 było na odwrót (por. Rys. 2). Uzyskane wyniki mają zatem charakter indykatorywny, lecz są wystarczające dla potrzeb analizy wariantowej stanowiącej główny cel niniejszego opracowania.

Średnie dobowe ładunki (kg/d) wybranych parametrów jakości wody zostały obliczone na podstawie dobowych objętości przepływu (m³/d) w przekroju wodowskazowym w Wejherowie. Okres kalibracji obejmował lata 1998-2002, natomiast okres weryfikacji lata 2003-2006. W procesie identyfikacji parametrów skorzystano z narzędzia dedykowanego do automatycznej kalibracji modelu SWAT, tj. z programu SWAT-CUP (SWAT – Calibration and Uncertainty Programs; Abbaspour, 2008) w wersji 4.3.7. Głównym zadaniem programu jest dopasowanie danych wyjściowych modelu do obserwacji poprzez iteracyjne zmiany wartości parametrów (wybranych w procesie analizy czułości) przy wykorzystaniu algorytmu optymalizacyjnego SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2)⁷. Proces kalibracji uważa się za zakończony w przypadku osiągnięcia satysfakcjonujących wartości zdefiniowanej uprzednio funkcji celu (na ogół współczynnik Nasha-Sutcliffe’a NSE; Moriasi i in., 2007) oraz miar niepewności oznaczanych jako *p*-czynniki i *r*-czynniki. *P*-czynniki określa procent danych pomierzonych mieszczących się w 95% przedziale niepewności (95PPU), natomiast *r*-czynniki określa średnią grubość „wstęgi” niepewności podzieloną przez odchylenie standardowe danych pomierzonych.

Nazwy, definicje, optymalne wartości i końcowe zakresy parametrów wykorzystanych w kalibracji przepływu, zawiesin, azotu i fosforu zawarte zostały w Załączniku 1.

Model uruchamiany był z okresem rozruchu (*warm-up period*) równym 3 lata tj. początkiem symulacji był każdorazowo dzień 1.01.1995. Wyniki symulacji w okresie trzech początkowych lat nie były brane pod uwagę, ze względu na fakt, że w okresie tym stabilizowały się wartości początkowe uwilgotnienia gleby oraz zawartości azotu i fosforu w glebie.

Wyniki kalibracji i weryfikacji

Rys. 4 i Rys. 5 przedstawiają wyniki kalibracji i weryfikacji modelu SWAT w przekroju Wejherowo w postaci wykresów symulowanych i obserwowanych wartości przepływu (A), zawiesin (B), azotu azotanowego (C) i fosforu mineralnego (D). Na rysunkach podano również wartości głównych miar jakości modelu (NSE oraz R²) oraz miar niepewności (*p*-czynniki oraz *r*-czynniki). Wykresy ilustrujące zmienność przepływów przedstawione zostały z krokiem dobowym, natomiast pozostałe wykresy mają krok równy odstępom czasowym między kolejnymi pomiarami prowadzonymi przez WIOŚ (na ogół 2 tygodnie). Różni autorzy podają różne kryteria oceny jakości modeli hydrologicznych. W przypadku modelu SWAT powszechnie stosuje się kryteria podane przez Moriasiego i in. (2007). Wg tych kryteriów wyniki kalibracji i weryfikacji przepływu należy uznać za co najmniej dobre. Zarówno w okresie kalibracji i weryfikacji wartości NSE i R² przekraczają 0.7, natomiast średnie odchylenie procentowe wynosi -9%. Niedoszacowanie odpływu ma miejsce głównie w miesiącach styczeń-marzec, kiedy to w reżimie przepływów Redy można zaobserwować wezbrania roztopowo-deszczowe. Na Rys. 4 i Rys. 5 przedstawiono hydrogramy przepływów tylko i wyłącznie dla Redy w Wejherowie, tymczasem w kalibracji wykorzystano również przepływy obserwowane na Redzie

⁷ W SWAT-CUP dostępne są też inne algorytmy optymalizacyjne, jednak zastosowano SUFI-2, gdyż jako jedyny umożliwia wszechstronną analizę niepewności.

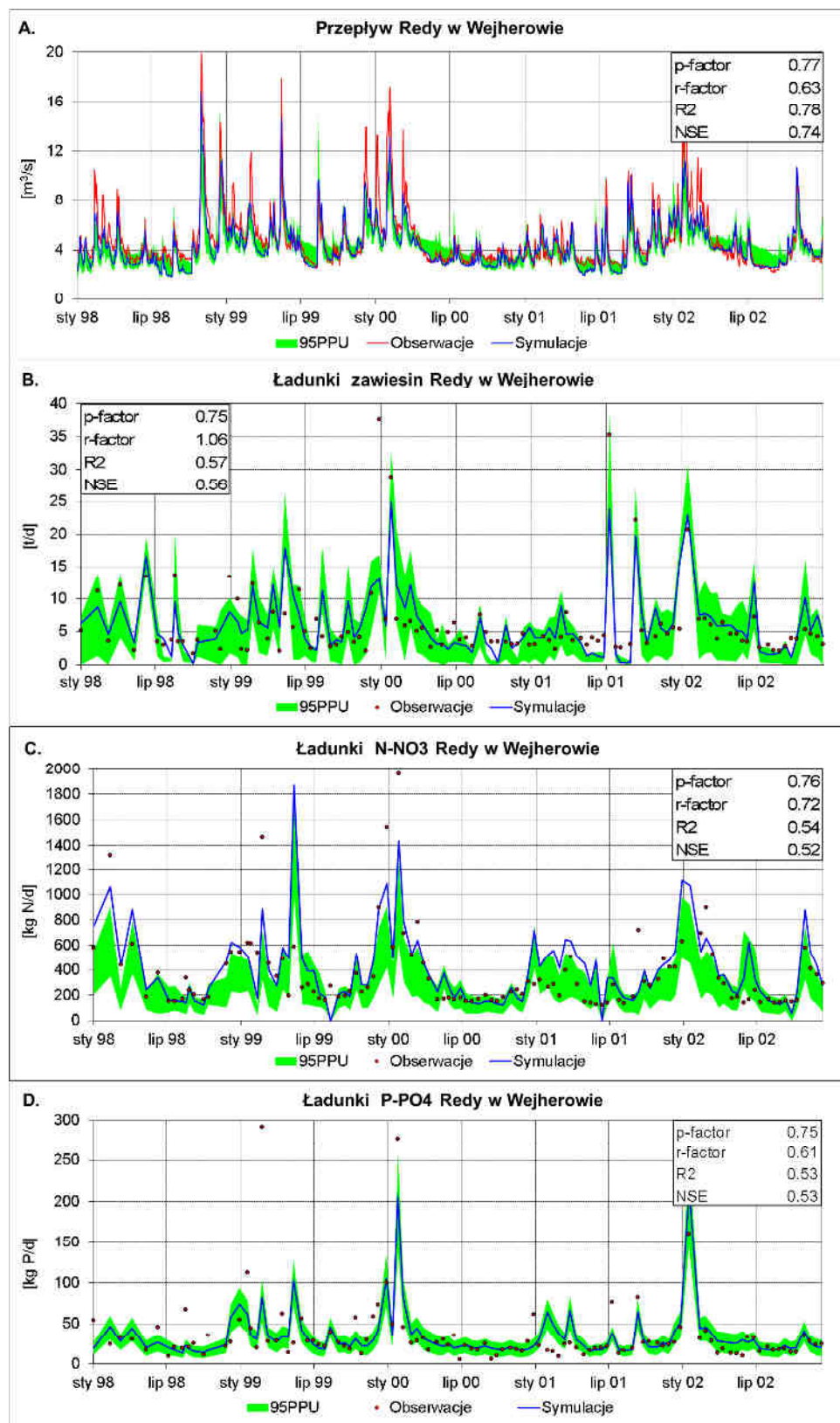
w Zamostnem i na Bolszewce w Bolszewie (Rys. 1). Uzyskane wartości NSE i R^2 były nieco niższe w obu tych posterunkach niż w Wejherowie, odpowiednio 0.58 i 0.65 w Zamostnem oraz 0.60 i 0.60 w Bolszewie.

Zlewnię Redy charakteryzuje wybitnie wysoki, najwyższy na Niżu Polskim średni odpływ jednostkowy SS_q, który wg Atlasu Hydrologicznego Polski wynosi ok. 10 l/s/km² (Stachý i Biernat, 1987; Bogdanowicz i in., 2007). Charakterystyczny jest przy tym wyraźny gradient od morza (wartości 5-6 l/s/km²) w kierunku lądu, z centrum w obszarze źródłowym Redy i Łeby (wartości 12-15 l/s/km²). Podobną skalę zróżnicowania SS_q na poziomie podzlewni uzyskano jako wynik modelowania w SWAT. Ponadto zlewnię Redy cechuje wysoki jak na Niż Polski udział odpływu podziemnego. Wg mapy udziału odpływu podziemnego w ogólnej masie odpływu, w zlewni Redy występują dwie klasy: od 60 do 75% i powyżej 75% (Orsztynowicz, 1988). Tymczasem jako wynik modelowania w SWAT uzyskano średnią wartość dla zlewni równą 69%, co świadczy o poprawnej strukturze masy odpływu symulowanej przez model. Równie ważnymi cechami charakteryzującymi hydrologię zlewni Redy są bardzo wysoki średni niski odpływ jednostkowy SN_q (w okresie 1998-2006 symulowany 5.4, obserwowany 6.2 l/s/km²) oraz niewielka zmienność przepływów. Taka charakterystyka hydrologiczna zlewni Redy wynika z wysokich i względnie równomiernych sezonowo sum opadu oraz budowy geologicznej (Szymczak i Piekarek-Jankowska, 2007). Symulowany współczynnik zmienności przepływów dobowych wyniósł w tym samym okresie jedynie 0.47 (obserwowany 0.48). Dla porównania, w północno-wschodniej Polsce tak niskie współczynniki zmienności przepływu charakterystyczne są dla rzek pojeziernych (obliczenia własne).

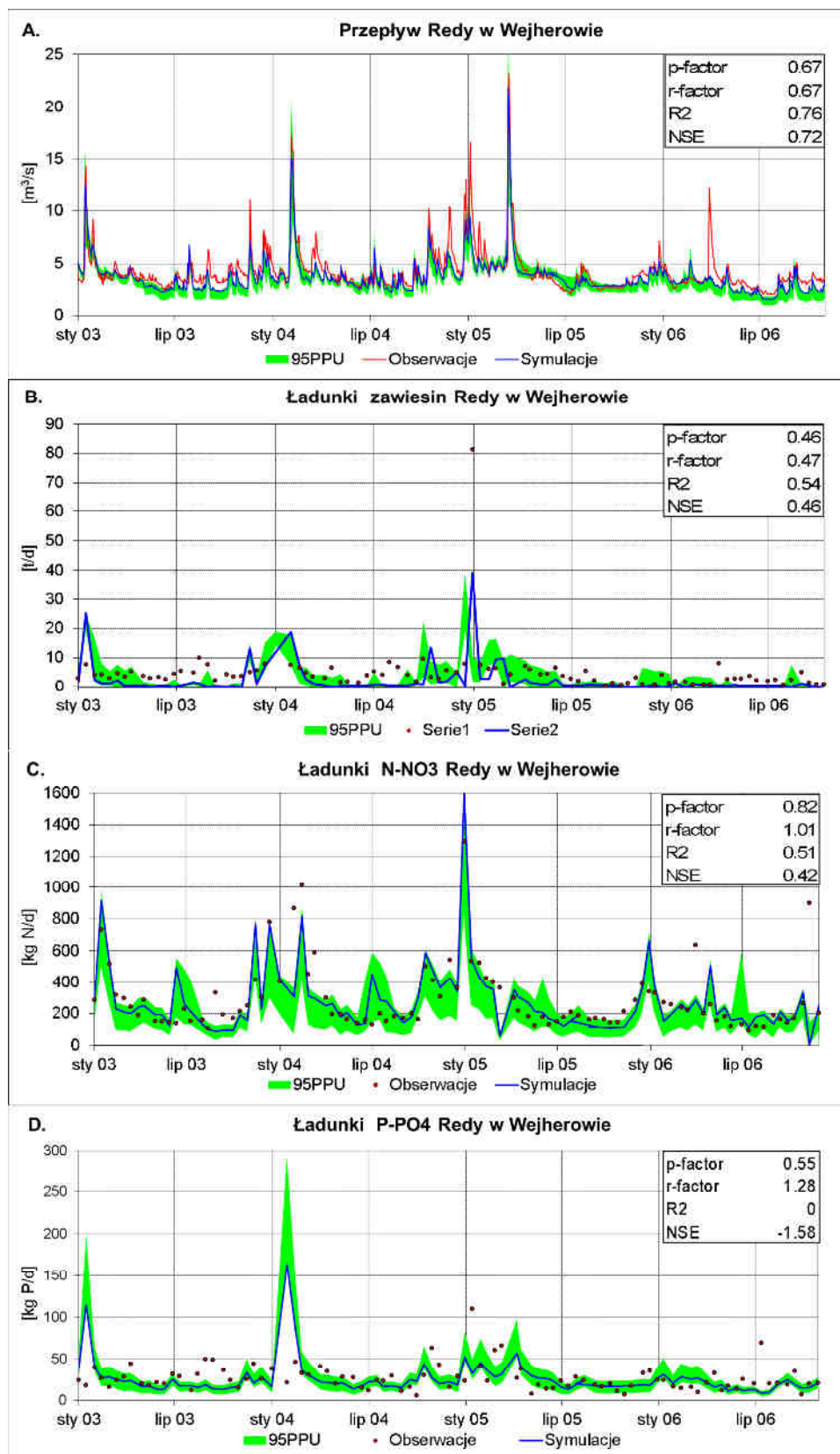
Biorąc powyższe pod uwagę, należy uznać, że model SWAT w satysfakcjonujący sposób symuluje zmienność czasowo-przestrzenną procesu odpływu, co jest warunkiem koniecznym (choć nie dostatecznym) wiarygodnej symulacji zmienności odpływu ładunków zawiesin i substancji biogennych ze zlewni.

Wyniki symulacji ładunków zawiesin są wyraźnie gorsze od wyników uzyskanych dla przepływu, można je jednak uznać za satysfakcjonujące (NSE w okresach kalibracji i weryfikacji odpowiednio 0.56 i 0.46). Należy przy tym zauważyć, że zmienność czasowa ładunków zawiesin transportowanych przez Redę w Wejherowie jest stosunkowo niska, co jest uwarunkowane zarówno niewielką zmiennością przepływów jak i stężeń zawiesiny ogólnej, których wartości przekroczyły 50 mg/l tylko dwukrotnie na 206 pomiarów wykonanych w latach 1998-2006 przez WIOŚ. Z wykresów przedstawionych na Rys. 4 i Rys. 5 wyraźnie widać, że symulacje w okresie weryfikacji są istotnie słabszej jakości od wyników w okresie kalibracji.

Ładunki N-NO₃ symulowane są w sposób zadowalający, o czym świadczą zarówno wartości statystyk (NSE równe 0.52 i 0.42 odpowiednio w okresie kalibracji i weryfikacji) jak i ocena wizualna wykresów na Rys. 4 i Rys. 5. Z oceny tej widać wyraźnie, że SWAT poprawnie modeluje sezonową zmienność odpływu N-NO₃: najwyższe wartości symulowane są zimą, a najniższe latem. Obserwowane stężenia N-NO₃ są dość silnie skorelowane z przepływem (R^2 równe 0.45 w okresie 1998-2006). Masa transportowanego ładunku N-NO₃ jest zachowana – odchylenia procentowe w okresach kalibracji i weryfikacji wyniosły odpowiednio -2% i 4%.



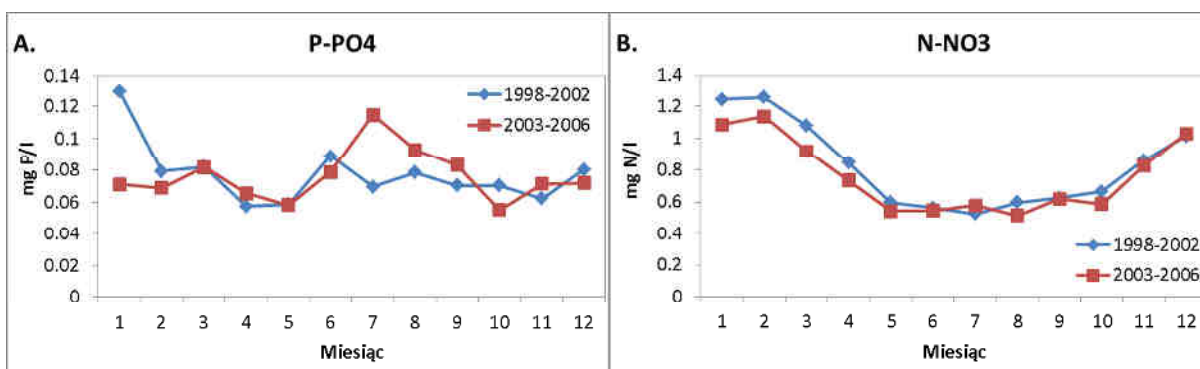
Rys. 4 Wyniki kalibracji modelu SWAT: Reda w Wejherowie (okres 1998-2002).



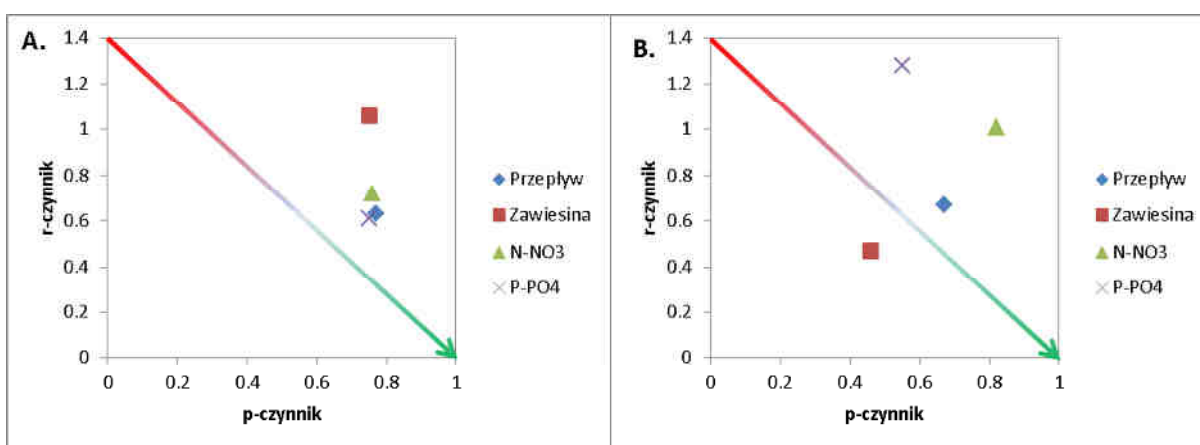
Rys. 5 Wyniki weryfikacji modelu SWAT: Reda w Wejherowie (okres 2003-2006).

Gorsze wyniki symulacji uzyskano dla fosforu niż dla azotu. O ile wartość NSE dla okresu kalibracji w przypadku P-PO₄ wyniosła 0.53, to w okresie weryfikacji już tylko -1.58. Przyczyn tak dużej różnicy pomiędzy statystykami uzyskanymi dla okresów kalibracji i weryfikacji można upatrywać w niejednorodności danych pomiarowych pomiędzy tymi okresami. Zarówno ładunki jak i stężenia P-PO₄ wykazują znacznie mniejszą zmienność sezonową niż odpowiednie ładunki i stężenia N-NO₃. W okresie kalibracji stężenia P-PO₄ były w pewnym stopniu skorelowane z przepływem, choć w znacznie mniejszym stopniu niż N-NO₃ (R^2 równe 0.15), natomiast analogiczna korelacja w okresie weryfikacji była zerowa. Rys. 6A ilustruje rozkład miesięczny obserwowanych średnich stężeń P-PO₄ w okresach kalibracji i weryfikacji. Z wykresu wyraźnie widać, że o ile w okresie 1998-2002 maksima stężeń P-PO₄ notowane były zimą, to w okresie weryfikacji maksima te notowane były w miesiącach letnich. Dla porównania na Rys. 6B zamieszczono analogiczny rozkład stężeń N-NO₃, który wykazał się znacznie większym podobieństwem między okresami kalibracji i weryfikacji (dzięki czemu wyniki weryfikacji są dobre w tym przypadku). Przyczyny różnic między rozkładem stężeń P-PO₄ w okresach kalibracji i weryfikacji są trudne do ustalenia, nie są nimi jednak najprawdopodobniej warunki hydrologiczne, które były zbliżone w obu analizowanych okresach. Z Rys. 5D widać, że model nie był w stanie symulować wiarygodnie maksimów ładunków P-PO₄ mających miejsce w miesiącach letnich, natomiast zimą 2003 i 2004 symulował spore maksima nieobecne w danych pomiarowych. Przy tych wszystkich ułomnościach modelu w zakresie symulacji odpływu ładunków P-PO₄, należy podkreślić bardzo dobrze zachowany bilans masy – odchylenia procentowe w okresach kalibracji i weryfikacji wyniosły odpowiednio -2% i 5%.

Wykresy przedstawione na Rys. 4 i Rys. 5, oprócz wyników najlepszej symulacji na tle obserwacji, przedstawiają również tzw. wstęgę niepewności 95PPU odpowiadającą końcowym zakresom wykorzystanych w kalibracji w SUFI-2 parametrów (Załącznik 1) oraz wartości miar niepewności. Te ostatnie zilustrowano również na Rys. 7. Procent obserwacji zawartych we wstędze niepewności (p -czynniki) osiągnął podobne wartości (75-77%) dla wszystkich zmiennych w okresie kalibracji. Wyniki różnicowała w tym okresie natomiast wartość r -czynnika, która była wyraźnie gorsza dla zawiesin (1.06) niż dla pozostałych zmiennych (0.61-0.72). Generalnie w procesie kalibracji w SUFI-2 dąży się do maksymalizacji p -czynnika tak długo, aż wartość r -czynnika spadnie poniżej 1 (Abbaspour, 2008). W okresie weryfikacji wartości miar niepewności były nieco gorsze niż w okresie kalibracji w przypadku przepływu i wyraźnie gorsze w przypadku P-PO₄. W przypadku zawiesin i N-NO₃ były inne jakościowo, np. wyższa wartość p -czynnika to poprawa, ale wyższa wartość r -czynnika to pogorszenie. Wysoka wartość r -czynnika w przypadku fosforu oznacza znacząco średnią grubość wstęgi niepewności w porównaniu do naturalnej zmienności pomierzonych ładunków P-PO₄ (która była wyjątkowo niska, por. Rys. 5 D.).



Rys. 6 Miesięczny rozkład stężeń P-PO₄ (A) i N-NO₃ (B) w okresie kalibracji (1998-2002) i weryfikacji (2003-2006).



Rys. 7 Wartości miar niepewności w okresie kalibracji (A.) i okresie weryfikacji (B.) dla poszczególnych kalibrowanych zmiennych (kierunek strzałki wskazuje malejącą niepewność związaną ze wzrostem p -czynnika i spadkiem r -czynnika).

Po wprowadzeniu do modelu wszystkich wartości kalibrowanych parametrów uruchomiono symulację dla okresu, o którym mowa we wstępie do niniejszego rozdziału (1991-2010, w tym 3-letni okres rozruchu). Wyniki tej symulacji, charakteryzujące stan aktualny, przedstawione są w Tab. 4. Parametry bilansu wodnego zlewni Redy warunkują obieg azotu i fosforu w zlewni. Niski udział odpływu powierzchniowego kształtuje stosunkowo niski udział spływu powierzchniowego N-NO₃. Z kolei wysoka wartość perkolacji związana z dużą sumą opadu i przepuszczalnymi glebami wpływa na stosunkowo wysokie wymywanie N-NO₃ do wód gruntowych. W Tab. 4 podano również średnie modelowane ładunki N-NO₃ i P-PO₄ w ujściu Redy do Zalewu Puckiego, a na Rys. 8 wykres rocznych ładunków tych form azotu i fosforu w ujściu w okresie zdefiniowanym jako stan aktualny. Dodatkowo zaprezentowano wielkości ładunków publikowanych przez IMGW Oddział Morski w Gdyni w opracowaniach dotyczących warunków środowiskowych polskiej strefy Bałtyku południowego publikowanych dla lat 1994-2001⁸. Ładunki N-NO₃ zmieniają się w zakresie 115-220 ton N/rok wg modelu i w zakresie 103-188 ton N/rok wg danych IMGW, a ładunki P-PO₄ w zakresie 9,7 – 24,5 ton P/rok wg modelu i w zakresie 7,7-13,9 ton P/rok wg danych IMGW. Ładunki modelowane zostały obliczone na podstawie ciągłej symulacji w okresie 1994-2010 w odróżnieniu od

⁸ http://bałtyk.imgw.gdynia.pl/warunki/odplyw_zanieczyszczen.html

ładunków pomierzonych obliczonych na podstawie nieciągłych pomiarów stężeń. Obie formy azotu i fosforu cechował niewielki trend rosnący w analizowanym okresie związany z podobnym trendem w wielkości odpływu rzecznoego.

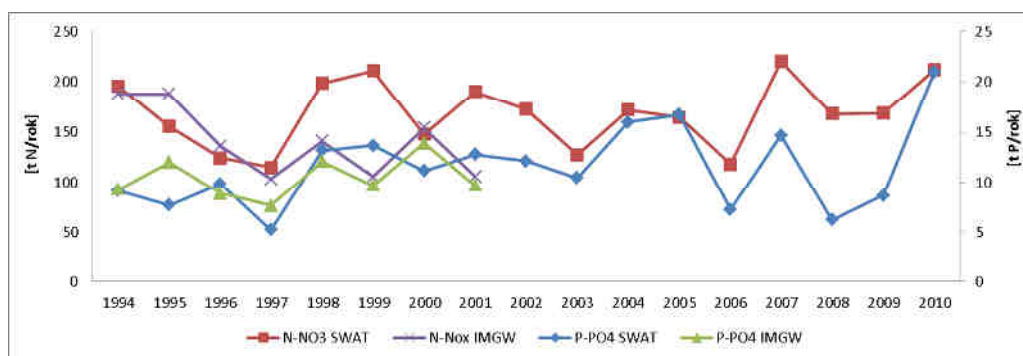
Średni ładunek zawiesin odprowadzany do Zalewu Puckiego oszacowany został na 2 241 ton/rok, co jest zbliżoną wartością do ładunku 2 618 ton/rok podawanego przez Szymczaka i Piekarek-Jankowską (2007) obliczonego na podstawie 26 jednoczesnych pomiarów przepływu i mętności w latach 2001-2004.

Tab. 4 Uśrednione czasowo i przestrzennie wyniki symulowanych parametrów wyjściowych w stanie aktualnym (wartości z pliku *output.std*).

Parametr	Wartość
Parametry bilansu wodnego [mm]	
Suma opadu	793
Topnienie śniegu	58
Odpływ powierzchniowy	25
Odpływ podpowierzchniowy	44
Odpływ rowami	14
Odpływ podziemny	206
Odpływ całkowity	299
Perkolacja do płytkiej warstwy wodonośnej	250
Ewapotranspiracja rzeczywista	455
Ewapotranspiracja wskaźnikowa	684
Ładunki jednostkowe [kg/ha/rok]	
Ładunek rumowiska (wskaźnik denudacji)	524
Ładunek azotu organicznego ¹ do cieków	1,41
Ładunek fosforu organicznego ¹ do cieków	0,28
Ładunek azotu azotanowego w spływie powierzchniowym	0,44
Ładunek azotu azotanowego w spływie podpowierzchniowym	2,29
Ładunek fosforu rozpuszczonego do cieków	0,03
Wymywanie azotu azotanowego do wód gruntowych	29,3
Ładunek azotu azotanowego w odpływie podziemnym	1,15
Ładunki całkowite w ujściu do Zalewu Puckiego [t/rok]	
Ładunek zawiesin ²	2 241
Ładunek azotu azotanowego	168
Ładunek fosforu fosforanowego	16,3

¹ formy organiczne azotu i fosforu nie podlegały kalibracji, w związku z czym ich wartości mają charakter orientacyjny (są zaniżone).

² ładunek zawiesin został obliczony na podstawie wyników modelu w przekroju IMGW w Wejherowie (z uwzględnieniem przyrostu powierzchni zlewni), w którym model był kalibrowany; wyniki w przekroju ujściowym Redy uznane zostały za mało wiarygodne.



Rys. 8 Symulowane roczne ładunki N-NO₃ i P-PO₄ w ujściu Redy do Zalewu Puckiego w stanie aktualnym na tle wartości publikowanych przez IMGW.

3 Opis założeń do wariantu „Horyzont 2050”

Wariant „Horyzont 2050” obejmuje te zmiany w zlewni, które mogą mieć potencjalny wpływ na wielkość odprowadzanych ładunków azotu i fosforu, a które można postrzegać jako nieuniknione w perspektywie roku 2050. Za zmiany nieuniknione, zgodnie z metodyką opracowaną w ramach projektu Baltic COMPASS (Blombäck i in., złożony), uważa się zmiany spowodowane przez czynniki egzogeniczne, które pozostają poza sferą bezpośredniego wpływu działań podejmowanych przez interesariuszy procesu gospodarowania w zlewni. W przypadku zlewni Redy pod uwagę zostały wzięte przede wszystkim zmiany klimatu i ich konsekwencje (np. wydłużenie okresu wegetacyjnego, zmiany struktury upraw), a także prognozowane zmiany demograficzne i ich konsekwencje (rozwój osadnictwa, szczególnie ważny w kontekście bliskości aglomeracji trójmiejskiej; PZPWP, 2009). Ponadto w wariantcie „Horyzont 2050” wzięto pod uwagę zmiany wynikające z planów wdrożenia programu małej retencji województwa pomorskiego do roku 2015 (EKO-KONSULT, 2007).

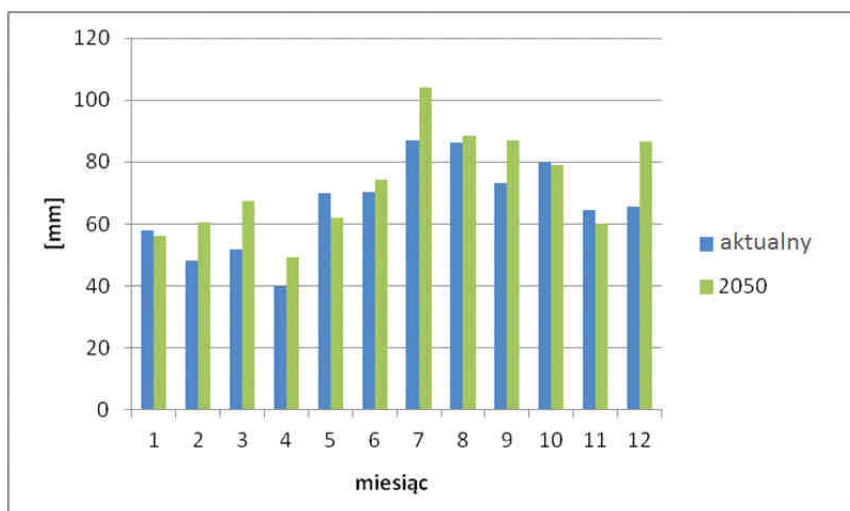
3.1 Zmiany klimatu

Projekcje przewidywanych zmian klimatu dla okresu skoncentrowanego wokół roku 2050 (2035-2064) pozyskane zostały ze Szwedzkiego Instytutu Meteorologiczno-Hydrologicznego (SMHI). Wybrano tę samą kombinację modeli GCM/RCM ze scenariuszem emisyjnym co w projekcie Baltic COMPASS (Blombäck i in., złożony): regionalny model klimatu Rossby Centre RCA3 (Kjellström i in., 2005), dla którego warunki brzegowe stanowił globalny model klimatu ECHAM5 uwzględniający scenariusz emisyjny SRES A1B⁹. Wyniki pochodzące z modelu RCA3 mają rozdzielczość 50 na 50 km. Z obszarem zlewni Redy przecinają się dwie komórki rastrowe modelu RCA3, z których pozyskano dane. W modelowaniu wpływu zmian klimatu przyjęto metodę relatywnej zmiany wartości miesięcznych parametrów klimatycznych, tzw. *delta change* (Fowler i in., 2007). Dane wyjściowe z modelu RCA3 pozyskane zostały dla dwóch okresów czasowych: okresu obecnego (1984-2013) oraz przyszłego (2035-2064). Przyjęto dwie metody zmiany parametrów: iloczynową (w przypadku miesięcznych sum opadu) oraz addytywną (w przypadku miesięcznych temperatur powietrza). Właściwe zastosowanie danych wyjściowych z modeli klimatycznych w modelu SWAT wymagało zmiany wartości parametrów RFINC (opad) oraz TMPINC (temperatura). Wartości tych parametrów

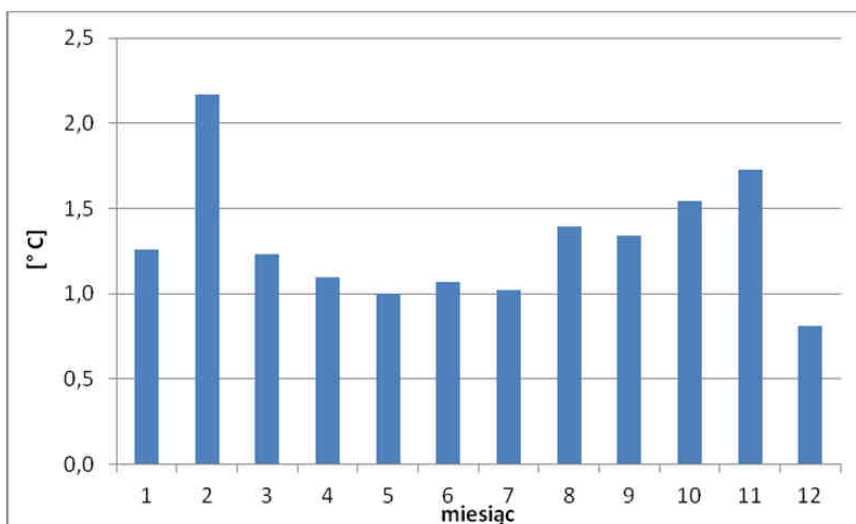
⁹ <http://www.smhi.se/en/2.575/Climate-scenarios/climate-scenarios-1.6402>

najpierw zostały określone dla dwóch komórek rastrowych modelu RCA3, a następnie przypisane do poszczególnych podzlewni na podstawie ich położenia względem obu komórek.

Na Rys. 9 przedstawiono średnie miesięczne sumy opadów w zlewni Redy dla stanu aktualnego (lata 1991-2010, dane IMGW) oraz przewidywanego dla roku 2050. Średnie miesięczne zmiany temperatury między stanem aktualnym a przyszłym zaprezentowane zostały na Rys. 10. Analizując wyniki projekcji klimatycznych, stwierdzono wzrost średniej rocznej temperatury w zlewni o 1,3 °C oraz wzrost sumy opadów o 81 mm (co stanowi przyrost o 10% w skali roku). Pomimo sumarycznego wzrostu sum opadów (najbardziej intensywnego w lipcu oraz grudniu) odnotowuje się miesiące, w których średnie wartości sumy opadów maleją (styczeń, maj, październik, listopad).



Rys. 9 Sezonowa zmienność opadów atmosferycznych w zlewni Redy w stanie aktualnym oraz wg projekcji zmian dla roku 2050.



Rys. 10 Projekcje zmian temperatury powietrza w zlewni Redy pomiędzy rokiem 2050 a stanem aktualnym.

W celu dokładnego odwzorowania warunków klimatycznych przewidywanych w przyszłości, niezależnie od zmian wprowadzonych na podstawie danych z modelu klimatycznego RCA3,

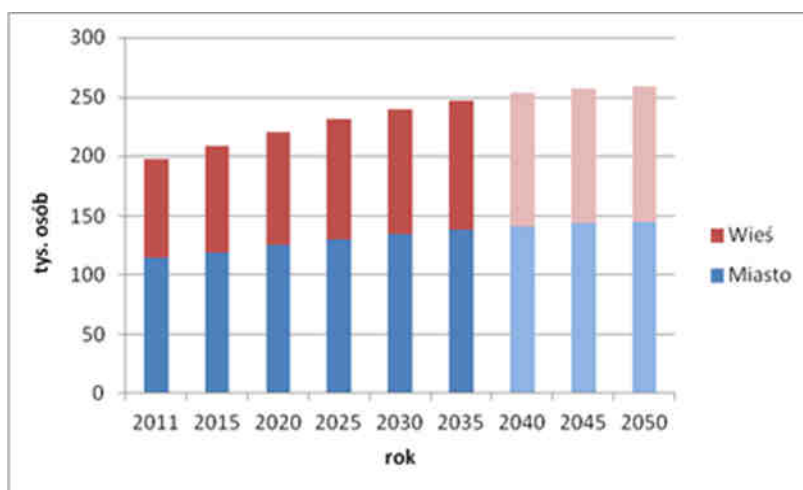
dokonano zmian trzech dodatkowych parametrów wynikających ze scenariusza emisyjnego SRES A1B. Po pierwsze, uwzględniono wzrost stężenia CO₂ w atmosferze o ok. 50% w stosunku do stanu aktualnego, co wynika bezpośrednio ze scenariusza A1B. Po drugie, ponieważ wzrost ten wpłynie również na zmiany parametrów fizjologicznych roślin reprezentowanych w modelu SWAT przez parametry: BLAI (współczynnik ulistowienia) oraz GSI (przewodnictwo szparkowe), zmieniono również wartości tych parametrów w podobny sposób jak zaproponował Piniewski (2012).

3.2 Zmiany demograficzne i rozwój osadnictwa

Zmiany pokrycia terenu, a w szczególności wzrost uszczelnienia zlewni, mogą mieć istotny wpływ na hydrologię i jakość wody w zlewni Redy. Z uwagi na zaobserwowany w ostatnich kilkunastu latach napływ ludności z sąsiadującego Trójmiasta, spodziewane przyszłe zmiany rozwoju sieci osadniczej w wariancie „Horyzont 2050” powiązano z prognozowanymi zmianami demograficznymi (GUS) w powiecie wejherowskim, który stanowi ponad 90% powierzchni zlewni.

Z punktu widzenia modelowania hydrologicznego istotniejsze od zmian liczby ludności są zmiany pokrycia terenu w zlewni. Można założyć, że prognozowany wzrost liczby ludności (bardziej dynamiczny na wsi niż w miastach) przełoży się w znacznie większym stopniu na wzrost udziału zabudowy rozproszonej (kod SWAT URLD) niż zwartej (kod URMD). W ostatnich latach obserwuje się wyraźny trend migracji ludności Trójmiasta do sąsiadujących powiatów, w tym do gmin wchodzących w skład zlewni Redy, która stanowi znaczącą część terenu określanego jako obszar funkcjonalny aglomeracji trójmiejskiej (PZPWP, 2009). Zgodnie ze sformułowanymi w tym planie prognozami będzie to jeden z obszarów nasilonej ekspansji Trójmiasta, a w szczególności rozwoju osadnictwa oraz funkcji turystyczno-rekreacyjnych. Będzie to miało miejsce przede wszystkim na terenie Wejherowa oraz gmin wiejskich Szemud i Wejherowo. Analizując przyrost liczby ludności w pięciu głównych gminach wchodzących w skład zlewni (Gniewino, Luzino, Szemud, Wejherowo – wieś, Wejherowo – miasto) w latach 2002-2011 (GUS, 2012), widać związek pomiędzy bliskością aglomeracji trójmiejskiej a tempem przyrostu liczby ludności. Największe średnioroczne tempo przyrostu wystąpiło w gminach Wejherowo – wieś oraz Szemud (odpowiednio 3,9 i 3,7%) położonych w bezpośrednim sąsiedztwie Trójmiasta. Z drugiej strony, w gminie Gniewino oddalanej od Trójmiasta o ok. 30 km tempo przyrostu wyniosło jedynie 1.1%. Prognozowane zmiany liczby ludności w podziale na miasto i wieś w powiecie wejherowskim w latach 2011-2035 (GUS, 2011) oraz 2035-2050 (oszacowane na podstawie ekstrapolacji tempa wzrostu w latach 2011- 2035) zostały przedstawione na Rys. 11.

Z informacji uzyskanych w wyniku konsultacji z pracownikami Pomorskiego Ośrodka Doradztwa Rolniczego (PODR) w Gdańsku wynika, że wzrost powierzchni zajmowanej przez zabudowę luźną w zlewni Redy w ostatnich latach odbywał się na dwa sposoby: (1) poprzez rozrastanie się miast (Wejherowa, Redy); (2) poprzez przekształcenia gruntów szóstej klasy bonitacyjnej (grunty orne najłabsze) w grunty budowlane. W wariancie „Horyzont 2050” założono, że oba procesy będą kontynuowane w przyszłości, przy czym większe znaczenie będzie miał proces drugi ze względu na charakter migracji wewnętrznych w województwie pomorskim (z miasta na wieś). Zgodnie z założeniami Planu przestrzennego zagospodarowania województwa pomorskiego (2009) rozwój osadnictwa na tym terenie powinien odbywać się zgodnie z zintegrowanymi i proekologicznymi zasadami gospodarki wodnej, których zachowanie pozwoli na poprawę stanu środowiska.



Rys. 11 Prognozowane zmiany liczby ludności w podziale na miasto i wieś w powiecie wejherowskim w latach 2011-2035 (GUS, 2011) oraz 2035-2050 (oszacowane na podstawie ekstrapolacji tempa wzrostu w latach 2011- 2035).

Wśród planowanych działań w tym sektorze znajdują się m.in. „budowa, rozbudowa i modernizacja oczyszczalni ścieków z podwyższonym usuwaniem biogenów w aglomeracji trójmiejskiej (do 2015 roku) i jednostkach osadniczych o równoważnej liczbie mieszkańców powyżej 10 000, systemów kanalizacyjnych i oczyszczalni ścieków we wszystkich jednostkach o równoważnej liczbie mieszkańców powyżej 2 000 i zabudowie skupionej, rozwiązanie w sposób systemowy sanitacji terenów zabudowy rozproszonej”, a także „budowa i modernizacja systemów odprowadzania wód opadowych, służących ochronie wód Zatoki Gdańskiej w miastach: Gdańsku, Gdyni, Sopocie, Redzie, Rumi i Wejherowie” (PZPWP, 2009). Część planowanych działań wchodzi już w chwili obecnej w fazę realizacji, jak na przykład budowa i modernizacja systemu odprowadzania wód opadowych Małego Trójmiasta Kaszubskiego (Rumia, Reda, Wejherowo) i gminy Wejherowo, obejmującego znaczą część zlewni Redy¹⁰. W związku z powyższym uprawnione staje się założenie, iż w perspektywie roku 2050 punktowe źródła zanieczyszczeń nie będą stanowić problemu dla jakości wód w zlewni Redy, pomimo rozwoju osadnictwa i wynikającego z niego wzrostu liczby ludności. Dlatego też w wariancie „Horyzont 2050” nie wprowadzano żadnych zmian dotyczących punktowych zrzutów zanieczyszczeń, które teoretycznie mogłyby wynikać z rozwoju osadnictwa. Wynika to również z faktu, że w świetle uzyskanych wyników modelowania punktowe źródła zanieczyszczeń stanowią znikomą część ładunków zanieczyszczeń odprowadzanych do Zalewu Puckiego (Rozdział 2).

Dynamika wzrostu powierzchni obszarów zabudowanych jest na ogół wyraźnie niższa od dynamiki wzrostu liczby ludności. Przykładowo, wg mapy zmian pokrycia terenu w latach 2000-2006 CORINE Land Cover (EEA, 2006), w latach tych powierzchnia obszarów zabudowanych w zlewni Redy w ogóle nie uległa zmianie. Wynika to częściowo z faktu, że w bazie *CLC_Change 2000-2006* zmiany pokrycia terenu, które zaszły na powierzchniach mniejszych niż 5 ha zostały pominięte. W obliczeniach dla wariantu „Horyzont 2050” założono, że wzrost powierzchni zajmowanej przez zabudowę luźną (URLD) jest proporcjonalny do prognozowanego wzrostu liczby ludności i można go obliczyć wg wzoru:

¹⁰ www.rumia.pl

$$\Delta A = \frac{N \cdot \alpha}{M} \cdot F \quad (1)$$

Gdzie ΔA oznacza przyrost powierzchni klasy URLD pomiędzy stanem aktualnym a rokiem 2050 [ha], N liczbę ludności zamieszkałej w typie zabudowy luźnej w stanie aktualnym [-], α prognozowany przyrost liczby ludności w latach 2011-2050, M przeciętną liczbę osób zamieszkujących w jednym gospodarstwie w zabudowie luźnej [-], a F przeciętną wielkość działki budowlanej zajętej przez jedno gospodarstwo.

Wartość N oszacowano na 97 000 osób na podstawie danych GUS dla gmin (GUS, 2012) oraz estymowanego udziału liczby ludności poszczególnych gmin w powierzchni zlewni Redy. Zabudowa rozproszona występuje nie tylko w gminach wiejskich, ale również w dużym stopniu w miastach tj. Wejherowie i Redzie. Wartość α oszacowano na 37% na podstawie powyżej omówionych danych GUS. Ponadto w obliczeniach przyjęto $M = 4$ oraz $F = 0,1$ ha (minimalna, a zarazem najczęściej sprzedawana powierzchnia działek wg informacji telefonicznej od pracowników gminy Szemud i Luzino). Obliczona na podstawie powyższego równania wartość ΔA wyniosła 909 ha, co stanowi ok. 30% powierzchni klasy URLD w stanie aktualnym.

W wariancie „Horyzont 2050” założono, że klasą użytkowania terenu, która będzie traciła na znaczeniu kosztem osadnictwa będą przede wszystkim użytki rolne najgorszej jakości, co zgodne jest z założeniami Planu zagospodarowania przestrzennego województwa pomorskiego (2009). W projekcie modelu SWAT zlewni Redy takimi klasami są: GO7 – grunty orne na kompleksie żytnim bardzo słabym oraz FALL - nieużytki, zajmujące odpowiednio 3740 i 250 ha (Rys. 3). Zmiany użytkowania ziemi zdefiniowano w modelu poprzez zmiany wartości parametru HRU_FR (udział powierzchni HRU w danej podzlewni) w tych podzlewniach, w których występują w stanie aktualnym klasy URLD oraz GO7 lub FALL. Przyjęto założenie, że wielkość obszaru zmian pokrycia terenu w danej podzlewni będzie proporcjonalna do łącznej powierzchni klas GO7 i FALL w tej podzlewni. Innymi słowy, osadnictwo w wariancie „Horyzont 2050” będzie się rozwijać przede wszystkim na obszarach spełniających dwa kryteria: (1) duży udział gruntów ornych najniższej jakości i nieużytków – potencjalnych terenów pod zabudowę; (2) istnienie obszarów zabudowanych w stanie aktualnym. Tab. 5 ilustruje wyniki obliczeń zmian pokrycia terenu w wariancie „Horyzont 2050”. Największe zmiany (944 ha) dotyczą podzlewni nr 27 wchodzącej w skład gminy Szemud, co wydaje się założeniem realistycznym ze względu na bliskość Trójmiasta i duży udział gruntów rolnych słabej jakości.

Przyrost powierzchni klasy URMD (zabudowy zwartej) będzie w wariancie „Horyzont 2050” odgrywać mniejszą rolę niż przyrost powierzchni zabudowy rozproszonej z uwagi na to, że należy spodziewać się jej występowania jedynie na niewielkim fragmencie zlewni obejmującym część doliny Redy. Według bazy CORINE Land Cover 2006 jedynym miastem zlewni Redy, w którym fragmentarycznie występuje zabudowa zwarta, jest w stanie aktualnym Wejherowo zamieszkałe przez ok. 50 000 osób (z czego tylko niewielka część zamieszkuje obszar zabudowy zwartej). Powierzchnia klasy URMD w projekcie modelu SWAT zlewni Redy wynosi 140 ha. Ze względu na brak oficjalnych danych przyjęto założenie, że wzrost powierzchni tego typu zabudowy w wariancie „Horyzont 2050” wyniesie 30% (42 ha, kosztem klasy zabudowy rozproszonej) i będzie miał miejsce tylko w podzlewniach obejmujących Wejherowo (nr 11 i 13).

Tab. 5 Zmiany pokrycia terenu związanego z rozwojem osadnictwa w zabudowie rozproszonej w wariancie „Horyzont 2050”.

Podzlewnia	Gmina	Powierzchnia URLD w stanie aktualnym [ha]	Powierzchnia GO7 i FALL w stanie aktualnym [ha]	Wielkość obszaru podlegającego zmianom [ha]
7	Reda	70	70	26
9	Luzino	87	258	96
10	Wejherowo - wieś	266	77	29
15	Reda / Wejherowo	543	105	39
16	Wejherowo - wieś	194	281	105
17	Luzino	369	315	118
18	Luzino	54	158	59
19	Wejherowo - wieś	138	121	45
20	Luzino	104	104	39
27	Szemud	218	944	353
Suma		2042	2434	909

URLD zabudowa rozproszona, GO7 – grunty orne na kompleksie żytнім bardzo słabym, FALL - nieużytki

3.3 Zmiany w rolnictwie

W wariancie „Horyzont 2050” przyjęto również założenia co do zmian struktury upraw w związku ze zmianami klimatu (poczynione w ramach konsultacji zewnętrznych z ekspertami z PODR), z uwzględnieniem aktualnych priorytetów polityki rolnej i energetycznej (rozwój biogazowni) państwa. Wzrost temperatury powietrza przyczyni się w przyszłości do wzrostu plonów roślin ciepłolubnych (m.in. kukurydzy; Stuczyński i in., 2000), co z kolei przełoży się na wzrost udziału tych roślin w strukturze upraw. W związku z tym przeanalizowano potrzeby i możliwości wprowadzenia uprawy kukurydzy oraz wykorzystania nawozów naturalnych w zlewni Redy. Wykorzystanie nawozów naturalnych do produkcji biogazu w małym stopniu ograniczy ich dostępność dla rolnictwa z uwagi na to, że po procesie fermentacji stanowią one nadal doskonały nawóz i są stosowane w rolnictwie. W technologii tej do produkcji wykorzystuje się ponadto biomasę z kukurydzy (Łucka i Kołodziej, 2011). Roślinę tę ze względu na odpowiednią wielkość opadów można uprawiać w zlewni Redy, jednak z uwagi na niskie temperatury i niskie prawdopodobieństwo jej dojrzewania, nieprzekraczające 40% wg Kozyry i Górskiego (2004), jest i najprawdopodobniej będzie ona produkowana głównie na zielonkę. Uprawa ta, szczególnie udaje się na glebach średnich z uwagi na ich zasobność w wodę, składniki pokarmowe i łatwość uprawy. Nie należy jej stosować na bardzo podmokłych glebach ciężkich o zbitej strukturze (KWS, 2011). Wzrost udziału tej uprawy w zlewni Redy będzie raczej umiarkowany z uwagi na przeciętny potencjał produkcji biogazu (15 mln m³/rok wg Tractebel Engineering, 2009) szacowany dla powiatu wejherowskiego. Na obszarze zlewni Redy nie działa aktualnie żadna biogazownia, a najbliższa z działających znajduje się przy oczyszczalni komunalnej w Lęborku¹¹. Wprawdzie Plan zagospodarowania przestrzennego województwa pomorskiego (2009) przewiduje tworzenie warunków przestrzennych i rozwój infrastruktury dla potrzeb przetwórstwa surowców energetycznych w oparciu o lokalne surowce pochodzenia rolniczego i leśnego, jednak zakładana jest niewielka skala tego typu działań. Według ekspertyzy przeprowadzonej przez Instytut Energetyki Odnawialnej udział biogazu wytwarzanego z odpadów

¹¹ <http://biogazownierolnicze.pl/>

i upraw rolnictwa energetycznego wyniesie w roku 2020 i w latach późniejszych ok. 20% energii pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych (Tractebel Engineering, 2009). Z uwagi na te czynniki oraz predyspozycje regionu do rozwoju energetyki wodnej i wiatrowej, w wariantcie „Horyzont 2050” założono umiarkowany wzrost produkcji kukurydzy z 70 ha w roku 2010 (pominiętej ze względu na mały areal w projekcie modelu SWAT zlewni Redy) do ok. 500 ha (ok. 2% powierzchni użytków rolnych). Nowe uprawy kukurydzy na zielonkę (kod CSIL) zdefiniowano na wybranych użytkach zielonych kompleksu 2z na glebach mineralnych, w których w stanie aktualnym występowała uprawa łąkowa. Jako nawóz w uprawie kukurydzy wykorzystano obornik (w ilości 20 t/ha jesienią) oraz gnojowicę (w ilości 10m³/ha 50 dni po zasiewie).

Dodanie kukurydzy jest jedyną zmianą w aktualnej strukturze upraw zlewni Redy w wariantcie „Horyzont 2050”. Innego rodzaju zmiany, choć możliwe, wydają się trudne do przewidzenia. Ocieplenie klimatu i związane z nim wydłużenie okresu wegetacyjnego wymusi natomiast zmiany w obecnym kalendarzu praktyk rolniczych. W wariantcie „Horyzont 2050” przyspieszono terminy stosowania praktyk na wiosnę o około tydzień w przypadku roślin jarych, natomiast w przypadku roślin ozimych opóźniono o około tydzień zabiegi stosowane jesienią.

Największa niepewność dotyczy kwestii, czy w 2050 roku stosowanie nawozów sztucznych i naturalnych będzie na podobnie niskim poziomie co obecnie, czy też się zasadniczo zmieni. Na wielkość dawek nawozowych stosowanych w 2050 roku wpływ mają rozmaite, trudne do przewidzenia czynniki oddziałujące zarówno w skali globalnej jak i lokalnej, takie jak: zapotrzebowanie na żywność, rozwój przemysłu chemicznego, ceny nawozów itp. Wg informacji uzyskanych od ekspertów z PODR w stanie aktualnym w zlewni Redy nie dostrzega się problemu przekraczania dawek wynikających z Kodeksu Dobrej Praktyki Rolniczej (Duer i in., 2002). Stosowane dawki świadczą o dominacji ekstensywnego typu rolnictwa, którego charakter z racji na przeważające w zlewni Redy słabe i średnie gleby, nie powinien ulec istotnej zmianie w przyszłości. Biorąc powyższe pod uwagę, w wariantcie Horyzont 2050 przyjęto dwie wersje założeń co do dawek nawozów:

- wersja A (podstawowa), w której wielkości dawek nawozowych pozostają bez zmian;
- wersja B (dodatkowa), w której wielkości dawek nawozowych wzrosną dwukrotnie.

Biorąc pod uwagę rozmaite uwarunkowania lokalne, wersja A wydaje się bardziej prawdopodobna, dlatego nazwano ją wersją podstawową. Z kolei wersja B jest uproszczoną realizacją scenariusza, którego nie można wykluczyć głównie ze względu na przewidywane zmiany globalne (wzrost zapotrzebowania na żywność), tj. wyraźnej intensyfikacji rolnictwa na wzór rolnictwa duńskiego. Przykładowo, wg danych FAOSTAT (za Schou i in., 2006) średnie dawki azotu w Danii przekraczały w roku 2004 średnie dawki stosowane w Polsce o 50%, natomiast pogłowie trzody chlewnej i bydła było odpowiednio ponad 4-krotnie i dwukrotnie wyższe w Danii niż w Polsce. Dwukrotne zwiększenie aktualnie stosowanych dawek w zlewni Redy jest założeniem radykalnym, lecz realistycznym. Wyniki symulacji dla tej wersji wariantu „Horyzont 2050” wskażą ponadto skalę wpływu nawożenia na wielkości ładunków odpływających ze zlewni Redy do Zalewu Puckiego.

W modelu SWAT biomasa wytwarzana przez rośliny jednoroczne (od momentu siewu do zbioru) oraz wielkość plonów symulowane są jako funkcja temperatury powietrza oraz dostępności wody i składników pokarmowych. Zmiany wielkości plonów w podstawowej wersji wariantu „Horyzont 2050” są więc konsekwencją zmian klimatu oraz praktyk rolniczych w zlewni. Wyniki symulacji dla

tego wariantu sugerują niewielkie (nieprzekraczające 4%) wzrosty plonów większości roślin uprawnych uwzględnianych w modelu. Większych wzrostów plonów można się spodziewać w przypadku wersji B wariantu, np. plony kukurydzy wzrosną o 35%, a plony żyta o 10%.

W zlewni Redy istotną gałęzią rolnictwa, obok produkcji roślinnej i hodowli zwierząt gospodarskich, jest obecnie hodowla pstrąga (PZPWP, 2009), który jest najliczniej i najczęściej spotykanym gatunkiem ryb w rzekach uchodzących do Zatoki Gdańskiej (Radtke i in., 2007). Badania monitoringowe przeprowadzone w lipcu 2011 w ciekach zlewni Redy przez autorów raportu nie wykazały wpływu obecności stawów pstrągowych na jakość wody w ciekach, wobec czego w wariantcie „Horyzont 2050” pominięto kwestię ewentualnego przyszłego rozwoju hodowli ryb w zlewni.

3.4 Inne aspekty

Obszary leśne

W chwili obecnej lesistość obszaru zlewni Redy jest stosunkowo wysoka i sięga 41.6%. Plan zagospodarowania przestrzennego województwa pomorskiego (2009) zakłada ogólny wzrost powierzchni zalesień na obszarze województwa, w tym również w gminach Szemud i Wejherowo znajdujących się na terenie zlewni Redy. W planie tym brak jest jednak wyraźnych wskazań co do kierunków zarówno przestrzennych jak i ilościowych zmian lesistości w zlewni Redy. Biorąc pod uwagę obecnie już wysoką lesistość na terenie zlewni, oraz jednoznaczne wskazanie, iż obszary marginalne i grunty rolnicze o niskiej jakości przeznaczane będą przede wszystkim pod rozwój terenów zabudowanych, co wynika z narastającej ekspansji aglomeracji trójmiejskiej, w wariantcie „Horyzont 2050” uprawnionym jest przyjęcie założenia braku zmian lesistości w perspektywie roku 2050.

Rozwój małej retencji

Na podstawie Programu małej retencji dla województwa pomorskiego do roku 2015 (EKO-KONSULT, 2007) wytypowano kilka planowanych w tym zakresie inwestycji w zlewni Redy. Z uwagi na bardzo ogólny charakter tego programu, dla potrzeb niniejszego opracowania planowane objętości retencyjne oszacowano we własnym zakresie na podstawie map topograficznych w skali 1:10 000. Wyniki obliczeń zestawiono w Tab.6.

Tab. 6 Założone przyrosty objętości retencjonowanej wody w wybranych inwestycjach z programu małej retencji (EKO-KONSULT, 2007).

Nazwa inwestycji	Założony przyrost objętości wody [tys. m ³]	Nr podzlewni
Podpiętrzenie Jeziora Kamień	2728	27
Podpiętrzenie Jeziora Wycztok (Wysoka)	1208	27
Podpiętrzenie Jeziora Otałżyno	2100	27
Podpiętrzenie Jeziora Wyspowego	80	19
Planowane dwa stawy, jeden zbiornik i dwie kaskady w zlewni rzeki Cedron	30	19

4 Opis założeń do wariantu „Adaptacja 2050”

Wariant „Adaptacja 2050” obejmuje w rzeczywistości kilka niezależnych wariantów, z których każdy dotyczy innego spośród priorytetowych środków zaradczych przewidywanych do stosowania w rolnictwie w zlewni Redy w przyszłości. Symulacje stosowania tych środków dotyczą perspektywy roku 2050, w związku z czym warianty te każdorazowo zawierają wszystkie założenia sformułowane w wariantcie „Horyzont 2050” (Rozdział 3) i dodatkowo nowe założenia sformułowane w niniejszym rozdziale. Efektywność poszczególnych środków można zatem rozpatrywać na dwa sposoby:

1. W kontekście roku 2050 (poprzez odniesienie wyników symulacji dla wariantu „Adaptacja 2050” do wyników symulacji dla wariantu „Horyzont 2050”) – jest to faktyczna efektywność stosowania danego środka zaradczego w przyszłości;
2. W kontekście stanu aktualnego (poprzez odniesienie wyników symulacji dla wariantu „Adaptacja 2050” do wyników symulacji dla wariantu „zerowego”) – jest to efektywność stosowania danego środka w przyszłości odniesiona do sytuacji obecnej.

4.1 Perspektywy stosowania środków zaradczych w zlewni Redy

Jednym z istotnych elementów wykorzystanych do opracowania założeń dotyczących wariantu „Adaptacja 2050” były wyniki analiz perspektywy stosowania priorytetowych środków zaradczych w zakresie ograniczania strat azotu i fosforu z rolnictwa w zlewni Redy. Do przedmiotowej analizy wybrano priorytetowe środki zaradcze zaproponowane dla obszaru zlewiska Morza Bałtyckiego w ramach realizacji zadań trzeciego pakietu roboczego (WP3) „Wykorzystanie i transfer najlepszych praktyk” projektu Baltic COMPASS¹². W wyżej wzmiankowanym opracowaniu zaproponowano 25 pojedynczych środków zaradczych zgrupowanych w 12 szerszych kategoriach. Szeroka charakterystyka wybranych środków zaradczych wraz z omówieniem sposobów i wymagań dotyczących ich wdrożenia oraz korzyści w kontekście ochrony jakości wody, wynikających z ich stosowania przedstawiona została przez Pietrzaka (2012). Lista zaproponowanych środków zaradczych (Załącznik 2) stanowiła podstawę do określenia stopnia stosowania poszczególnych środków zaradczych w zlewni Redy w stanie aktualnym oraz perspektywy ich stosowania w okresie do roku 2050, przyjętego jako rok odniesienia w wariantcie „Adaptacja 2050”. Analiza ta została wykonana przez autorów opracowania w drodze kilkuetapowych konsultacji z ekspertami z PODR w Gdańsku. W pierwszym etapie eksperci otrzymali listę przedmiotowych środków zaradczych w celu zorientowania się w zakresie stopnia ich wykorzystywania w zlewni Redy poprzez zebranie

¹² http://www.balticcompass.org/project_reports.html

odpowiednich danych i informacji z placówek terenowych znajdujących się w zlewni. W kolejnym etapie odbyło się seminarium udziałem ekspertów i autorów, w trakcie którego omówione zostały wszystkie środki zaradcze w kontekście sytuacji obecnej jak i spodziewanych zmian.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zarówno w chwili obecnej jak i w przyszłości największym zainteresowaniem cieszą i będą cieszyć się środki zaradcze z kategorii związanych ze stosowaniem nawożenia (*Zarządzanie nawożeniem i Ulepszone technologie stosowania nawozów naturalnych i mineralnych*). W chwili obecnej wszystkie 4 środki zaradcze z kategorii *Zarządzanie nawożeniem* są stosowane w zlewni Redy, przy czym w różnym zakresie, na przykład stosowanie środka *Obliczanie bilansu składników nawozowych w gospodarstwie i/lub na powierzchni pola* ograniczone są jedynie do dużych gospodarstw (powyżej 30ha). W przyszłości środek ten jak i *Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych w okresach wysokiego ryzyka* będą stosowane powszechnie w zlewni. W przypadku kategorii *Ulepszone technologie stosowania nawozów naturalnych i mineralnych* aktualnie tylko dwa środki zaradcze, *Stosowanie nawozów naturalnych i emisja NH₃ – zalecenia ogólne* i *Szybkie przykrycie glebą zastosowanych nawozów naturalnych i mineralnych za pomocą kultywatorów i bron talerzowych*, są stosowane w zlewni w większym zakresie. Pozostałe środki z tej kategorii nie są w zasadzie w ogóle wykorzystywane przez rolników. Dwa obecnie stosowane środki zaradcze będą również stosowane w przyszłości, a *Stosowanie nawozów naturalnych i emisja NH₃ – zalecenia ogólne* stanie się jednym z najpowszechniej wykorzystywanych środków. Dodatkowo dwa obecnie nie wykorzystywane środki zaradcze, *Dawka dostosowana do miejsca (precyzyjne nawożenie oparte o system GPS)* i *Jednoczesny wysiew nawozu i nasion tą samą maszyną*, znajdują zastosowanie na obszarze rzędu 20% powierzchni użytków rolnych. Ten ostatni środek zaradczy, w połączeniu ze środkiem *Zredukowanie uprawy płużnej w celu ograniczenia mineralizacji materii organicznej* (z kategorii *Zarządzanie uprawą gleby*), co do stosowania którego istnieje ogólna tendencja związana z redukcją kosztów, może dotyczyć nawet 80% powierzchni gruntów ornych. Pozostałe środki z kategorii *Ulepszone technologie stosowania nawozów naturalnych i mineralnych* jak i *Zarządzanie uprawą gleby* nie są stosowane obecnie i nie przewiduje się aby były stosowane w przyszłości.

Środki z kilku innych kategorii (*Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka*, *Środki mające na celu optymalizację pH gleby i poprawę struktury gleby – wapnowanie gleby* czy *Odpowiednie metody przechowywania nawozów naturalnych*) są, bądź powinny być stosowane w zlewni Redy w chwili obecnej, między innymi z uwagi na stosowanie Kodeksu Dobrych Praktyk Rolniczych (Duer i in., 2002). W praktyce sytuacja jest zróżnicowana dla poszczególnych środków zaradczych, od powszechnego zastosowania w przypadku *Odpowiednich metod przechowywania nawozów naturalnych*, do w różnym stopniu ograniczonego stosowania w przypadku pozostałych środków. Ograniczenie to wynika zarówno z kosztów zastosowania (*Środki mające na celu optymalizację pH gleby i poprawę struktury gleby – wapnowanie gleby*) jak i niechęci rolników do stosowania danego środka zaradczego (*Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka*). Wszystkie środki zaradcze z tych trzech kategorii powinny być powszechnie stosowane w zlewni Redy w przyszłości, również z uwagi na przepisy dotyczące gospodarowania na obszarach o niekorzystnych warunkach (ONW), które mają zastosowanie na przeważającej powierzchni zlewni.

Środki zaradcze z pozostałych kategorii są stosowane w chwili obecnej w zlewni Redy bądź w bardzo ograniczonym zakresie (*Propagowanie długoletniej uprawy traw na gruntach ornych* i *Pokrywa*

roślinna gruntów ornych jesienią i zimą; do 1% powierzchni gruntów ornych), bądź sporadycznie (Tworzenie sztucznych mokradeł dla przechwytywania składników nawozowych ze spływu powierzchniowego; stawy sedimentacyjne przy hodowli ryb), bądź nie są stosowane w ogóle (Żywnienie dostosowane do zapotrzebowania zwierząt, Ograniczenia strat amoniaku w budynkach inwentarskich, Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól). Sytuacja dotycząca przyszłego stosowania środków zaradczych należących do tych kategorii wydaje się być stosunkowo trudna do oceny. Najprawdopodobniej wykorzystanie obecnie stosowanych środków zaradczych pozostanie w przyszłości przynajmniej na tym samym poziomie co obecnie. Istnieje również potencjał na zwiększenie stosowania środków zaradczych związanych z poplonami (*Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą*), jednak poziom ich faktycznego zastosowania będzie zależeć od wielu, trudnych do oceny w chwili obecnej, czynników. Spośród niestosowanych aktualnie środków zaradczych dwa: *Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól* oraz *Sztuczne mokradła* (z kategorii *Tworzenie sztucznych mokradeł dla przechwytywania składników nawozowych ze spływu powierzchniowego*), powinny znaleźć zastosowanie w zlewni Redy. Pierwszy z uwagi na uregulowania prawne dotyczące ONW, a drugi w związku ze wzrostem produkcji roślin energetycznych i rozwojem biogazowni. Rozwój sytuacji, jeśli chodzi o zastosowanie środków zaradczych związanych z chowem zwierząt gospodarskich, wydaje się obarczony największą dawką niepewności. Jednak biorąc pod uwagę obecną sytuację i spodziewane tendencje można pokusić się o przyjęcie założenia, że nie znajdą one zastosowania w zlewni Redy.

4.2 Środki zaradcze zastosowane w modelu

Spośród zaproponowanych powyżej środków zaradczych pięć zostało uwzględnionych w modelu: *Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól*, *Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka*, *Unikanie stosowania nawozów fosforowych na glebach zasobnych w fosfor*, *Szybkie przykrycie glebą zastosowanych nawozów naturalnych i mineralnych za pomocą kultywatorów i bron talerzowych* oraz *Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą*. Z wyjątkiem *Unikania stosowania nawozów fosforowych na glebach zasobnych w fosfor*, wszystkie środki dotyczą ograniczenia strat obu pierwiastków, azotu i fosforu. Pozostałe środki zaradcze wymienione w Załączniku 2, których zasadność stosowania w przyszłości została potwierdzona, nie zostały uwzględnione w obliczeniach z powodu ograniczeń modelu. Poniżej opisano sposób działania poszczególnych środków zaradczych oraz sposób ich uwzględnienia w modelu SWAT.

Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól

Jednym z czynników zanieczyszczających wody powierzchniowe jest transport zawiesiny, biogenów (oraz innych wypłukiwanych pod wpływem erozji mikrocząsteczek) wraz ze spływem powierzchniowym. Skala tego zjawiska zależy od bardzo wielu czynników, spośród których można, jak najbardziej istotne, wymienić rzeźbę terenu, rodzaj pokrycia terenu, typy utworów glebowych, warunki hydrologiczne i meteorologiczne oraz wielkość stosowanych dawek nawożenia. Środek *Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól* jest jednym ze środków zaradczych ograniczających negatywny wpływ tego zjawiska na jakość wód. Analogiczny środek zaradczy zaproponowany jest również w ramach pakietów rolnośrodowiskowych wymienionych w Programie Rozwoju Obszarów Wiejskich (PROW) 2007-2013, Pakiet 9 – *Strefy*

*buforowe*¹³. Strefy takie mają postać ochronnych pasów roślinności trwałej, usytuowanych na styku pól uprawnych lub intensywnie użytkowanych łąk z wodami powierzchniowymi płynącymi lub stojącymi. Stanowią zatem naturalną barierę dla swobodnego transportu substancji zanieczyszczających bezpośrednio do wód powierzchniowych ograniczając tym samym stopień ich zanieczyszczenia. W modelu wprowadzono strefy buforowe we wszystkich jednostkach HRU na gruntach ornych i użytkach zielonych czyli tam, gdzie była zdefiniowana operacja nawożenia, poprzez zdefiniowanie operacji *Filter Strip* w tabeli .ops modelu. Obszar zastosowanych zmian obejmował więc 100% użytków rolnych.

Szybkie przykrycie glebą zastosowanych nawozów naturalnych i mineralnych za pomocą kultywatorów i bron talerzowych

Czas, który mija od zastosowania nawozów do ich przykrycia warstwą gleby, ma kluczowe znaczenie dla właściwego i efektywnego wykorzystania przez rośliny składników pokarmowych zawartych w nawozach. W zależności od pory roku i rodzaju nawozu straty azotu na skutek ulatniania się w formie amonowej do atmosfery, ale również na drodze wymywania przez wody opadowe mogą sięgać od 15 do nawet 40%, przy czym wartość ta może wzrastać wraz z upływem czasu¹⁴. Istotne zatem jest, aby skrócić czas od zastosowania operacji nawożenia do przykrycia glebą za pomocą kultywatorów i bron talerzowych do minimum. Ograniczy to w dużym stopniu straty azotu, przynosząc korzyści w większej dostępności składników pokarmowych dla roślin, ale przede wszystkim potencjalnie ograniczy zjawisko zanieczyszczania wód powierzchniowych przez wymywanie wraz ze spływem powierzchniowym. W modelu zastosowano tego typu środek zaradczy poprzez odpowiednią manipulację parametrem FRT_SURFACE kontrolującym podział zastosowanej dawki nawozu na dwie części: pierwszą trafiającą do górnej 10-cio milimetrowej warstwy gleby (podatnej na spływ powierzchniowy) oraz drugą trafiającą do głębszych warstw profilu glebowego. Ustalenie najniższej wartości parametru (0.01) dla wszystkich form nawożenia oznacza, że po zastosowanej operacji nawożenia cała dawka jest natychmiastowo przykryta glebą, co ogranicza straty i wymywanie azotu oraz fosforu. Obszar zastosowanych zmian obejmował 100% użytków rolnych.

Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka

Niektóre obszary w obrębie zlewni, ze względu na swój specyficzny charakter, mogą wymagać podjęcia odpowiednich kroków ograniczających dawki stosowanych nawozów ze względu na wyższe, w porównaniu z innymi obszarami, zagrożenie zanieczyszczenia wód powierzchniowych. W celu zastosowania tego środka w modelu opracowano kryteria klasyfikacji jednostek HRU jako potencjalne obszary wysokiego ryzyka. Przyjęto następujące trzy kryteria dla obszarów użytkowanych rolniczo:

- HRU w klasie spadków >10%;
- HRU w klasie gleb charakteryzujących się bardzo niską przepuszczalnością (gliny ciężkie piaszczyste);

¹³ http://www.mir.pl/files/2009/program_ROLNORODOWISKOWY_2007-2013.pdf

¹⁴ http://www.wodr.konskowola.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=120:jak-minimalizowac-straty-z-nawozow-naturalnych&catid=55:inne-&Itemid=126

- HRU, w których zdefiniowane były rowy melioracyjne za pomocą funkcji *Tile Drainage* (por. Rozdział 2.1).

We wszystkich jednostkach HRU spełniających co najmniej jedno z powyższych kryteriów zredukowano dawki stosowanych nawozów (parametr FRT_KG) o 50%. Obszar zastosowanych zmian obejmował 24.8% użytków rolnych.

Unikanie stosowania nawozów fosforowych na glebach zasobnych w fosfor

W wariantcie określającym jako stan aktualny zdefiniowane zostały konkretne, stałe dawki nawożenia fosforem dla poszczególnych roślin uprawnych w określonych terminach. Dawki te nie uwzględniają zróżnicowania zasobności gleb w fosfor, a co za tym idzie potrzeb nawozowych roślin uprawianych na różnych typach gleb. Na podstawie analizy wyników pomiarów chemizmu gleb (z KSChR opisanych w Rozdz.2.1) oraz dostępnej literatury (Kalembasa i Becher, 2010) wytypowano gleby torfowe jako gleby o wysokiej zawartości fosforu. Jednocześnie należy podkreślić, że cecha ta może dotyczyć również innych gleb lub mieć charakter lokalny z uwagi na to, że zależy ona od właściwości skały macierzystej, zawartości węgla (im większa tym lepiej) oraz odczynu (sprzyja obojętny). Są to cechy albo niemożliwe do uwzględnienia w modelu, albo trudne do uwzględnienia ze względu na brak danych w odpowiedniej skali i generalizację typów gleb. Zmiany dokonane w modelu dla uwzględnienia tego środka zaradczego polegały na usunięciu operacji nawożenia fosforem mineralnym w jednostkach HRU użytkowanych rolniczo, gdzie typem gleb były torfy niskie. Obszar zastosowanych zmian obejmował 8.9% użytków rolnych.

Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą

Okres jesienno-zimowy z punktu widzenia zagrożeń dla ekosystemów wodnych wynikających z rolniczego użytkowania terenu, jest okresem specyficznym. Na obszarach o intensywnej produkcji roślinnej po zebraniu plonów rozległe obszary gruntów pozostają bez naturalnej pokrywy roślinnej, co powoduje zwiększenie ich podatności na erozję wodną i wymywanie składników pokarmowych do wód podziemnych i powierzchniowych. W celu przeciwdziałania negatywnym skutkom tego zjawiska zaleca się stosowanie poplonów, obecnych, podobnie jak strefy buforowe, w pakietach rolnośrodowiskowych PROW 2007-2013, Pakiet 8 – Ochrona gleb i wód. Ich wprowadzenie ma za zadanie ograniczenie zanieczyszczenia wód pochodzenia rolniczego poprzez utrzymywanie roślinności na gruntach ornych w formie zasiewu jednogatunkowego lub mieszanki kilku gatunków roślin, w okresach między dwoma plonami głównymi. W modelu, w wariantcie reprezentującym stan aktualny, stosowanie poplonów nie zostało uwzględnione w kalendarzu praktyk rolniczych (nie licząc uprawy roślin ozimych stanowiących plon główny, gdyż jest to osobny przypadek) ze względu na brak danych co do skali tego zjawiska. W celu uwzględnienia tego środka zaradczego w modelu, wprowadzono modyfikacje w kalendarzu praktyk rolniczych wybranych roślin w uzgodnieniu z ekspertami z PODR w Gdańsku. Symulacje tego środka zaradczego wprowadzono w kilku wersjach w zależności od rodzaju roślin stanowiących plon główny i poplon (Tab. 7). Wersja 1 dotyczy stosowania jako poplonu roślin motylkowych (1A) lub strączkowych (1B) w jednostkach HRU, w których plon główny stanowią pszenica jara, owies lub kukurydza. Wersja 2 dotyczy natomiast stosowania jako poplonu rzepaku ozimego (2A) lub żyta (2B) w jednostkach HRU, w których plon główny stanowią ziemniaki. Po analizie wyników dotyczących efektywności stosowania poplonów w wersji 1 i 2, dodatkowo dokonano wyboru jednej z dwóch testowanych roślin (motylkowe lub strączkowe oraz rzepak ozimy lub żyto) oraz przeprowadzono wariant kombinowany (nr 3), w którym

poplony są stosowane zarówno po zbożach i kukurydzy jak i po ziemniakach. W wariancie kombinowanym stosowanie poplonów obejmowało 47,4% powierzchni użytków rolnych w zlewni Redy.

Tab. 7 Zastosowane konfiguracje wariantu dotyczącego stosowania poplonów.

Symbol	Plon główny	Poplon	Zasięg (% pow. użytków rolnych)
1A	Pszenica jara, owies, kukurydza	Motylkowe (koniczyna)	38,3
1B	Pszenica jara, owies, kukurydza	Strączkowe (soczewica)	38,3
2A	Ziemniaki	Rzepak ozimy	9,1
2B	Ziemniaki	Żyto	9,1
1-2	Pszenica jara, owies, kukurydza, ziemniaki	1A/1B i 2A/2B ¹	47,4

¹Bardziej efektywna (pod względem redukcji ładunków N i P) roślina spośród 1A/1B po zbożach i kukurydzy oraz bardziej efektywna spośród 2A/2B po ziemniakach.

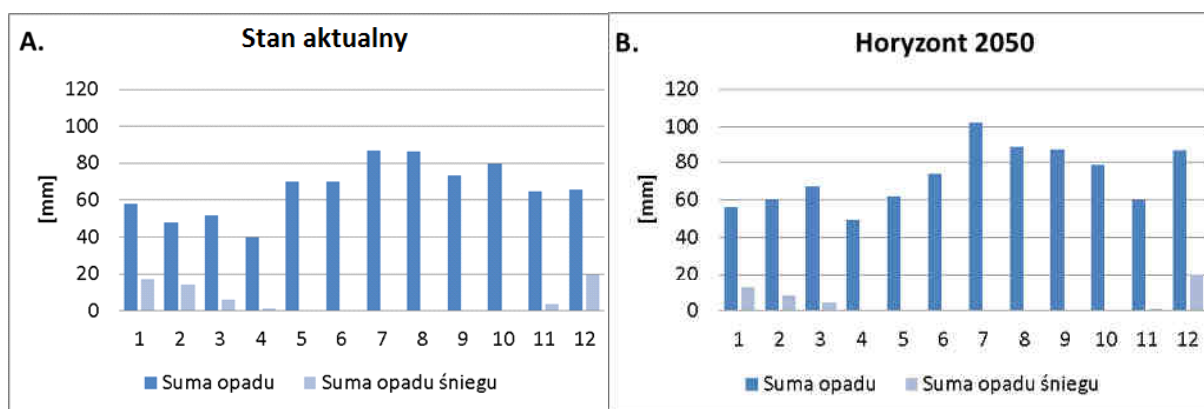
5 Wyniki analizy wariantów

Wszystkie wartości wskaźników opisujących zmiany w parametrach ilości i jakości wód zaprezentowanymi w tym rozdziale są wartościami średnimi dla całej zlewni Redy, chyba że wyraźnie napisano inaczej. Jest to szczególnie istotne w przypadku wariantu „Adaptacja 2050”, w którym poszczególne środki zaradcze dotyczą każdorazowo pewnej części użytków rolnych w zlewni.

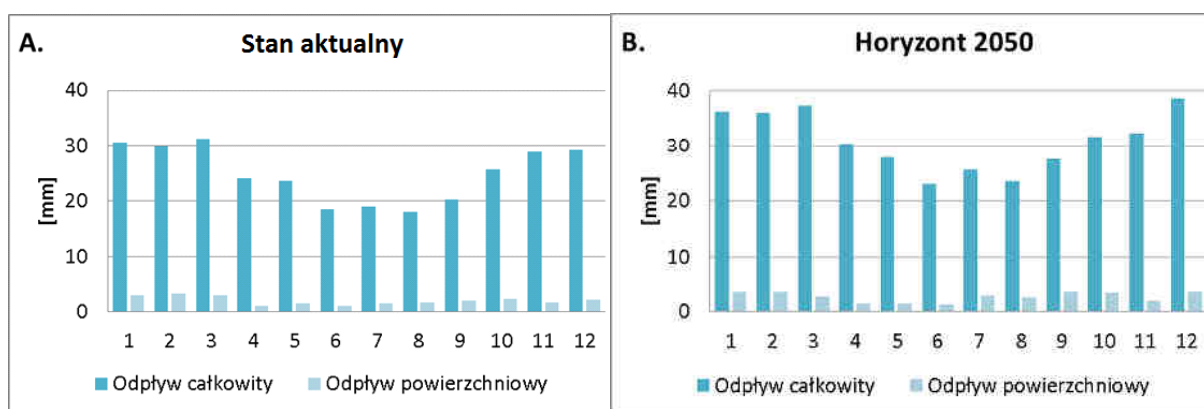
5.1 Wyniki obliczeń modelu dla wariantu „Horyzont 2050”

W wariancie „Horyzont 2050” dostrzec można znaczny udział wpływu zmian klimatu na warunki hydrologiczne w zlewni Redy. Udział opadu w postaci śniegu w całkowitej sumie opadu spadnie z 7,9% w stanie aktualnym do 5,2% w wariancie „Horyzont 2050” (Rys. 12), co wynika zarówno ze wzrostu temperatury powietrza, zwłaszcza w styczniu i lutym, jak i wzrostu całkowitej sumy opadów. Reżim odpływu Redy zmieni się w konsekwencji zmian klimatu na jeszcze bardziej deszczowy, a udział wezbrań roztopowych istotnie zmaleje. Wzrost dostępnej wody po stronie przychodów w bilansie wodnym przełoży się przede wszystkim na wzrost odpływu (+70mm/+23%), a w znacznie mniejszym stopniu na wzrost ewapotranspiracji rzeczywistej (+11mm/+2,4%). Największy w liczbach bezwzględnych wzrost odpływu nastąpi w grudniu (+9,1mm) i miesiąc ten stanie się miesiącem z najwyższym odpływem w ciągu roku (Rys. 13). Warto jednak zaznaczyć, że nadwyżka odpływu dotyczy wszystkich miesięcy w roku. Odpływ powierzchniowy również wzrośnie (o 6,4mm/26%), jednak jego udział w odpływie całkowitym będzie podobnie niski w wariancie „Horyzont 2050” jak w stanie aktualnym (nieco ponad 8%).

Analizując zmiany hydrologiczne przewidywane w wariancie „Horyzont 2050” w zlewni Redy i porównując je do analogicznych zmian przewidywanych w zlewni Narwi (Blombäck i in., złożony), można postawić hipotezę, że głównym czynnikiem je wywołującym są zmiany klimatu (głównie wzrost sumy opadów atmosferycznych), a w dużo mniejszym stopniu inne zakładane zmiany. Jedynym elementem hydrologicznym, który istotnie się zmienił w wyniku innych zmian niż zmiany klimatu, jest odpływ powierzchniowy, który wzrósł również pod wpływem wzrostu osadnictwa i udziału obszarów zabudowanych.



Rys. 12 Rozkład miesięcznych sum opadu i sum opadu śniegu w stanie aktualnym (A) i wariantcie „Horyzont 2050” (B).



Rys. 13 Rozkład miesięcznych sum odpływu całkowitego i powierzchniowego w stanie aktualnym (A) i wariantcie „Horyzont 2050” (B).

Znaczący wzrost opadów i odpływu w zlewni Redy znajdzie odzwierciedlenie w spływie związków azotu i fosforu z części lądowej zlewni do wód powierzchniowych i podziemnych oraz w ich transporcie do Zalewu Puckiego. W wyniku wzrostu sumy opadów nastąpi wzrost depozycji atmosferycznej N-NO_3 o $1,3 \text{ kg N/ha}$ (11,6%). Model SWAT nie uwzględnia depozycji atmosferycznej fosforu, wobec czego ten czynnik nie jest brany pod uwagę w analizach. Wzrost odpływu ładunków analizowanych form azotu i fosforu N-NO_3 i P-PO_4 będzie zbliżony i wyniesie 20,8% i 21,5%. Wartości te są nieco mniejsze od przewidywanego średniego wzrostu przepływu w przekroju ujściowym (+23,8%), co oznacza, że pomimo wzrostu ładunków, stężenia N-NO_3 i P-PO_4 pozostaną bez większych zmian (lub nieznacznie spadną). Wymywanie azotanów do wód gruntowych wzrośnie o $4,3 \text{ kg N/ha}$ (+14,6%) w stosunku do stanu aktualnego. Podobnie jak w przypadku zmian hydrologicznych, uważa się, że główną przyczyną zmian w bilansie i transporcie azotu i fosforu w zlewni są zmiany klimatu, a pozostałe wzięte pod uwagę zmiany tj. zmiany użytkowania terenu, wzrost osadnictwa, dodanie kukurydzy do struktury upraw, zmiany praktyk rolniczych oraz rozwój małej retencji, będą miały znaczenie drugorzędne. Wyjaśnieniem takiego stanu rzeczy jest m.in. kwestia skali – zmiany klimatu dotyczą cały obszar zlewni Redy, podczas gdy pozostałe zmiany mają zasięg lokalny.

Zgodnie z tym co napisano w Rozdziale 3.3 wariant „Horyzont 2050” został również przetestowany w wersji dodatkowej (B), w której oprócz wszystkich zmian występujących w wersji podstawowej tego wariantu, zawierał również podwojenie dawek nawożenia nawozami mineralnymi i naturalnymi. Wyniki otrzymane dla wersji B istotnie różnią się od wyżej opisanych wyników wersji A wariantu „Horyzont 2050” (w zakresie parametrów jakości wody, gdyż zmiany hydrologiczne pozostały bez zmian). W wersji z podwojeniem nawożenia mamy do czynienia ze wzrostem ładunków N-NO₃ i P-PO₄ odpowiednio o 41,9% i o 28,8% w stosunku do stanu aktualnego. Oznacza to zatem nie tylko wzrost ładunków, ale również przeciętnych stężeń obu parametrów. W przypadku azotu azotanowego nastąpi dwukrotnie większy wzrost ładunku niż w przypadku wersji podstawowej wariantu, co ma związek przede wszystkim ze zwiększonym o 61,3% (18 kg N/ha) wymywaniem tej formy do wód gruntowych. O ile część dodatkowo dostępnego azotu jest pobierana przez rośliny (wzrost o 16,2% w stosunku do stanu aktualnego), o tyle dodatkowo dostępny fosfor jest albo wmywany do wód powierzchniowych albo nadbudowywany w glebach (na koniec symulacji średnia zawartość fosforu mineralnego w glebach jest wyższa o 5,3% w porównaniu ze stanem aktualnym). Przedstawione wyniki świadczą po pierwsze o czułości modelu na wzrost dawek nawożenia, po drugie o znacznych stratach azotu i umiarkowanych stratach fosforu w wersji B wariantu „Horyzont 2050”.

5.2 Wyniki obliczeń modelu dla wariantu „Adaptacja 2050”

Jedynym środkiem zaradczym, który w świetle wyników symulacji skutkuje zmianami w bilansie wodnym zlewni jest *Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą*. Zabieg ten oznacza obecność dodatkowej formy wegetacji na gruntach ornych, co, szczególnie jesienią, sprzyja wzrostowi ewapotranspiracji (o 7mm rocznie w porównaniu do wariantu „Horyzont 2050”). Skutkuje to spadkiem średniego przepływu w przekroju ujściowym o 1.9%. Podane wartości dotyczą zmian o największej skali spośród testowanych konfiguracji tego środka zaradczego, a mianowicie konfiguracji z poplonami stosowanymi po zbożach, kukurydzy oraz ziemniakach.

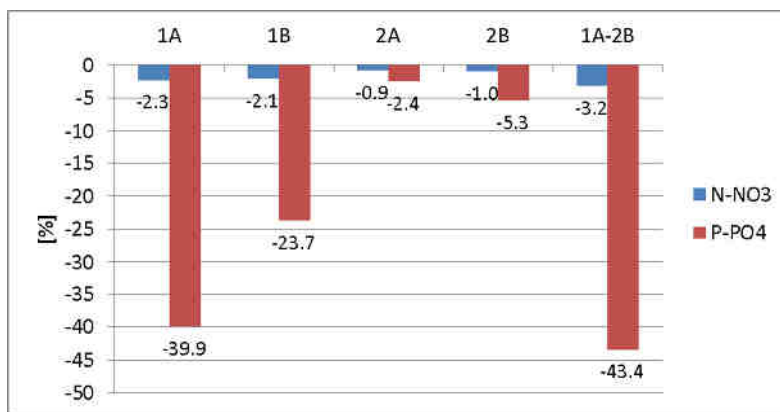
Wyniki obliczeń modelu dla wariantu „Adaptacja 2050” w pierwszej kolejności przeanalizowane będą w kontekście ich faktycznej efektywności w roku 2050, tj. poprzez odniesienie symulowanych wartości w tym wariantcie do podstawowej wersji (A) wariantu „Horyzont 2050”. Spośród pięciu analizowanych środków zaradczych, wyniki dla dwóch: *Szybkie przykrycie glebą...* oraz *Unikanie stosowania nawozów fosforowych...* demonstrują zerową efektywność w ograniczeniu odpływu ładunków N-NO₃ (dotyczy tylko pierwszego środka) i P-PO₄ ze zlewni Redy. W przypadku pierwszego zabiegu analizowanego w kontekście N-NO₃ można dostrzec niewielki (-2,3%) spadek ładunku w spływie powierzchniowym, co jest zgodne z intencją stosowania tego zabiegu. Spadek ten okupowany jest jednak wzrostem ładunku N-NO₃ w odpływie podpowierzchniowym (+0,3%) oraz w wymywaniu do wód gruntowych (+0,5%). Oznacza to, że nadwyżka azotu w glebie nie jest wykorzystywana przez rośliny, lecz jest tracona innymi drogami niż spływ powierzchniowy. Przyczyniają się do tego na pewno przeważające w zlewni Redy bardzo przepuszczalne gleby brunatne.

Fakt, że model nie wykazuje czułości na ograniczenie nawożenia fosforem na glebach zasobnych w fosfor (torfy niskie) może wynikać po pierwsze z niepewności konceptualnej modelu tj. z faktu, że równania opisujące procesy hydrologiczne i chemiczne zachodzące w glebie w modelu SWAT (por. Neitsch i in., 2011) są bardziej adekwatne dla gleb mineralnych niż organicznych; po drugie,

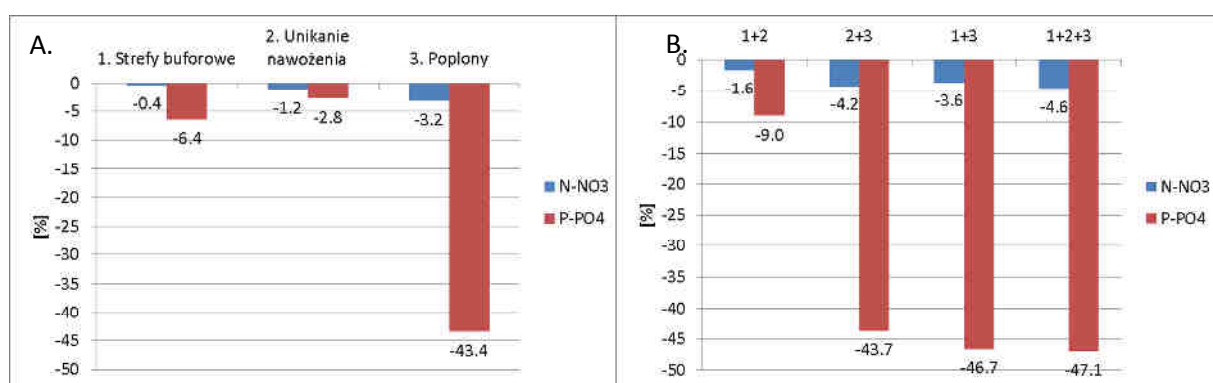
dawki stosowanego fosforu na tych glebach nie są wysokie, co może powodować, że pomimo dużej zasobności gleb w fosfor, ograniczenie nawożenia nie ma znaczenia dla ewentualnych strat fosforu w szczególności dla użytków zielonych, gdzie proces wymywania cząstek gleby jest znikomy.

Trzy pozostałe środki zaradcze: *Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka* (zwane dalej „Unikaniem nawożenia”), *Strefy buforowe wzdłuż zbiorników, cieków i podatnych na erozję pól* (zwany dalej „Strefami buforowymi”) oraz *Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą* (zwany dalej „Poplonami”) wykazały zróżnicowaną efektywność w ograniczaniu ładunków N-NO_3 i P-PO_4 dopływających do Zalewu Puckiego. Bardzo zróżnicowane efekty, zależne od zastosowanej konfiguracji, dało stosowanie *poplonów* (Rys. 14). Zarówno gatunek rośliny wybranej jako poplon, jak i rodzaj plonu głównego i zasięg stosowania zabiegu mają wpływ na efektywność w ograniczaniu odpływu ładunków azotu i fosforu ze zlewni Redy. Przetestowano łącznie pięć konfiguracji opisanych w Tab. 7. Generalnie, efektywność okazała się kilkukrotnie wyższa w przypadku fosforu niż w przypadku azotu oraz efektywność poplonów stosowanych po zbożach i kukurydzy była wyższa niż poplonów stosowanych po ziemniakach. To ostatnie można wyjaśnić ponad czterokrotnie większą powierzchnią na której zastosowano poplony po zbożach i kukurydzy. Z przedstawionych na Rys. 14 wyników widać, że po zbożach i kukurydzy stanowiących plon główny większą efektywność daje stosowanie roślin motylkowych (1A) niż strączkowych (1B), natomiast żyto (2B) daje większą efektywność od rzepaku jako poplon po ziemniakach. Bazując na tych wynikach przetestowano konfigurację, w której motylkowe stosowane są po zbożach, a żyto po ziemniakach (1A-2B). Jej efektywność stanowiła w przybliżeniu sumę efektywności środków stosowanych pojedynczo i wynosiła -43,4% dla P-PO_4 i 3,2% dla N-NO_3 . W dalszych rozważaniach wzięto pod uwagę tylko i wyłącznie tę konfigurację.

Zarówno w przypadku N-NO_3 i P-PO_4 stwierdzono, że efektywność stosowania *poplonów* w roku 2050 będzie wyższa niż *stref buforowych* i *unikania nawożenia* (Rys. 15A). Niemal zerowa (-0,4%) efektywność *stref buforowych* w redukcji odpływu ładunków N-NO_3 jest związana z bardzo niskim udziałem odpływu powierzchniowego w zlewni Redy i równie niskim udziałem spływu azotanów drogą powierzchniową (Tab. 4). Fakt ten tłumaczy też generalnie znacznie niższą efektywność stosowanych środków dla redukcji ładunków N-NO_3 niż P-PO_4 . Najmniejsza, choć wcale nie mała różnica między efektywnością N-NO_3 i P-PO_4 , ma miejsce w przypadku unikania nawożenia na obszarach wysokiego ryzyka. Przeprowadzono również symulacje różnych kombinacji środków zaradczych (Rys. 15B). Wyniki pokazują efekt kumulacji stosowania kilku środków zaradczych na raz: redukcja osiągnięta przy jednoczesnym stosowaniu środków X i Y za każdym razem przewyższa redukcje osiągnięte przy pojedynczym stosowaniu środków, chociaż niekoniecznie musi być sumą efektywności – z reguły jest od tej sumy nieco niższa. W najbardziej optymistycznym przypadku mamy do czynienia z redukcją P-PO_4 o 47,1% i N-NO_3 o 4,6%.



Rys. 14 Efektywność poszczególnych konfiguracji stosowania *poplonów* w redukcji ładunków N-NO₃ i P-PO₄ w roku 2050 (objaśnienia w Tab. 7).



Rys. 15 Efektywność wybranych środków zaradczych (A) oraz ich kombinacji (B) w ograniczaniu odpływu N-NO₃ i P-PO₄ ze zlewni Redy w roku 2050.

Niską efektywność analizowanych środków zaradczych i ich kombinacji w redukcji N-NO₃ wiązać można z faktem, że w modelu głównym źródłem N-NO₃ w ciekach są wody podziemne. W najbardziej efektywnej kombinacji środków zaradczych, w której osiągnięto redukcję ładunku dopływającego do Zalewu Puckiego o 4,6%, mamy do czynienia z redukcją wymywania N-NO₃ do wód gruntowych o 10,7% w skali zlewni. Wartość redukcji w ujściu Redy jest ponad dwukrotnie niższa ze względu na niską redukcję ładunku dopływającego ze spływem powierzchniowym i podpowierzchniowym oraz ze względu na retencję w korytach i zbiornikach wodnych.

Fosfor w odróżnieniu od azotu wymywany jest głównie wraz ze spływem powierzchniowym. Bogdanowicz i in. (2007) wykazali silny związek pomiędzy odpływem jednostkowym P-PO₄ a udziałem gleb o niskiej przepuszczalności w zlewniach należących do zlewiska Zalewu Puckiego – i tak zlewnia Redy charakteryzująca się małym udziałem gleb o niskiej przepuszczalności posiada niski odpływ jednostkowy fosforu. W tym kontekście zrozumiata wydaje się być bardzo wysoka efektywność stosowania pokrywy roślinnej na gruntach ornych falistych terenów morenowych jesienią i zimą, czyli w okresie kiedy grunt pozbawiony roślinności jest szczególnie narażony na erozję wodną.

W dotychczasowych analizach podane wskaźniki efektywności odnoszą się do roku 2050. Interesujące jest również to, jaka będzie ich efektywność względem sytuacji obecnej, którą opisuje

tzw. wariant „zerowy”. W przypadku stosowania najbardziej efektywnego z pojedynczych środków zaradczych czyli poplonów będziemy mieć w roku 2050 do czynienia ze wzrostem średniego odpływu o 21,4%, wzrostem odpływu ładunku N-NO₃ o 16,9% oraz spadkiem odpływu ładunku P-PO₄ o 31,3% (w stosunku do sytuacji obecnej). Oznacza to, że przeciętne stężenia analizowanych związków spadną, przy czym dla N-NO₃ spadek będzie minimalny, a dla P-PO₄ radykalny. Tak duża różnica wynika z nałożenia na siebie dwóch efektów: (1) podobnego wzrostu ładunków N-NO₃ niż P-PO₄ w wariancie „Horyzont 2050” (Rozdział 5.1); (2) większej efektywności środków zaradczych dla P-PO₄ niż dla N-NO₃ w wariancie „Adaptacja 2050” (Rys. 15).

Dodatkowo, przeprowadzono również symulacje efektywności środków zaradczych przy założeniu dwukrotnie zwiększonych dawek nawożenia w wersji B wariantu „Horyzont 2050” (por. Rozdział 3 i 5.1). Otrzymane wyniki sugerują, że nawet przy takim założeniu efektywność wyrażona procentowo pozostanie na podobnym poziomie jak przy aktualnych dawkach. W liczbach bezwzględnych (np. tonach na rok) efektywność będzie oczywiście wyższa, ze względu na wzrost ładunków spowodowany intensyfikacją rolnictwa.

6 Podsumowanie

Modelowanie matematyczne procesów hydrologicznych i chemicznych zachodzących w zlewni jest nieodłącznie związane z niepewnością, której źródła łatwo wymienić, lecz której skalę trudno oszacować. Do głównych jej źródeł należą: (1) niepewność danych wejściowych i pomiarów, na które model jest skalibrowany; (2) niepewność parametrów modelu; (3) niepewność założeń w rozpatrywanych wariantach; (4) niepewność opisu procesów w modelu. W przypadku modelowania efektywności rolniczych środków zaradczych dochodzi dodatkowe źródło niepewności w postaci sposobu reprezentacji danego środka zaradczego w modelu. Przykładowo, można przypuszczać, że faktyczna efektywność stosowania *poplonów* w roku 2050 będzie niższa niż wartości symulowane, ze względu na fakt, że w wariancie „zerowym” zignorowano – ze względu na brak wiarygodnych danych – fakt ograniczonego stosowania poplonów w zlewni Redy w stanie aktualnym. Podstawowe wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz przedstawiają się następująco:

1. *Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą* będzie w przyszłości najbardziej skutecznym środkiem zaradczym ograniczającym odpływ ładunków azotu i fosforu ze zlewni Redy do wód Zalewu Puckiego, przy czym tylko w przypadku P-PO₄ spodziewany efekt będzie znaczny i satysfakcjonujący (ładunki niższe niż obecnie, pomimo negatywnego wpływu zmian klimatu). W przypadku N-NO₃ żaden z analizowanych środków zaradczych nie zapobiegnie negatywnym zmianom związanym z wariantem „Horyzont 2050”.
2. Najbardziej efektywną kombinacją środków zaradczych będzie łączne stosowanie *poplonów*, *stref buforowych* oraz *unikanie nawożenia na obszarach wysokiego ryzyka*, przy czym dwa ostatnie środki w niewielkim stopniu poprawią sytuację w porównaniu do stosowania tylko i wyłącznie pierwszego środka.
3. Różne środki zaradcze związane z unikaniem/ograniczaniem nawożenia będą miały bardzo niską efektywność w przyszłości. Rozpatrywany w kategoriach założenia alternatywnego dwukrotny wzrost dawek nawożenia w całej zlewni, czyli intensyfikacja rolnictwa na wzór np. rolnictwa duńskiego, doprowadziłby jednak do istotnego wzrostu dopływającego do Zalewu Puckiego ładunku.

4. Różnica pomiędzy efektywnością środków zaradczych pomiędzy P-PO₄ i N-NO₃ może być związana z faktem, iż pierwsza z form jest wymywana głównie wraz ze spływem powierzchniowym, a druga wraz z odpływem podziemnym, podczas gdy zlewnię Redy charakteryzują wysokie sumy opadów rocznych, dominacja gleb przepuszczalnych oraz wysoki udział odpływu podziemnego w odpływie całkowitym.
5. W wariancie „Horyzont 2050” głównym czynnikiem kształtującym uzyskane wyniki jest symulowana zmiana warunków meteorologicznych wynikających ze zmiany klimatu. Należy w związku z tym pamiętać o dużej niepewności związanej z modelami GCM, scenariuszami emisyjnymi oraz technikami tzw. *downscaling'u* – zmiana któregokolwiek z tych trzech elementów mogłaby doprowadzić do istotnie innych wyników.

7 Literatura

ABBASPOUR K., 2008. SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 95pp.

BLOMBÄCK K., BØRGENSEN C.D., ECKERSTEN H., GIEŁCZEWSKI M., PINIEWSKI M., SUNDIN S., TATTARI S., VÄISÄNEN S. (red.). Productive agriculture adapted to reduced nutrient losses in future climate - Model and stakeholder based scenarios of Baltic Sea catchments. Złożone do Finnish Environment.

BOGDANOWICZ R., CIEŚLINSKI R., DRWAŁ J., CYSEWSKI A. 2007. Estimation of the local riverine pollution load to the lagoon on the southern Baltic coast (the Puck Lagoon). *Sowremiennyj naucznyj wiestnik*, No. 5, s. 28-36.

DUER J., FOTYMA M., MADEJ K., 2002. Kodeks dobrej praktyki rolniczej. Warszawa. MRiRW, MŚ ss. 96.

DYREKTYWA AZOTANOWA, 1991. Dyrektywa Rady z dnia 12 grudnia 1991 roku dotycząca ochrony wód przed zanieczyszczeniami powodowanymi przez azotany pochodzenia rolniczego. 91/676/EWG.

EEA, 2007. CLC2006 technical guidelines. EEA Technical report No 17/2007. Copenhagen, DOI 10.2800/12134.

EKO-KONSULT, 2007. Program małej retencji dla województwa pomorskiego do roku 2015. http://www.urzad.pomorskie.eu/pl/dokumenty_strategiczne/program_malej_retencji.

FOWLER H. J., BLENKINSOP S., TEBALDI C., 2007. Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27 (12), 1547–1578.

GLASBY G.P., SZEFER P. 1998. Marine pollution in Gdansk Bay, Puck Bay and the Vistula Lagoon, Poland: An overview. *Science of the Total Environment* 212, 49-57.

GUS, 2010. Powszechny Spis Rolny (PSR) - <http://www.stat.gov.pl>.

GUS, 2011. Prognoza dla powiatów i miast na prawie powiatu oraz podregionów na lata 2011 – 2035. http://www.stat.gov.pl/gus/5840_11752_PLK_HTML.htm.

GUS, 2012. Ludność w gminach według stanu w dniu 31.12.2011 r. Bilans opracowany w oparciu o wyniki NSP 2011. http://www.stat.gov.pl/gus/5840_13211_PLK_HTML.htm.

HELCOM, 2007. HELCOM Baltic Sea Action Plan. Adopted on 15 November 2007 in Krakow, Poland. http://www.helcom.fi/stc/files/BSAP/BSAP_Final.pdf. Dostęp – listopad 2012.

HELCOM, 2011. Fifth Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC-4). Baltic Sea Environment Proceedings No. 128.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

KALEMBASA D., BECHER M., 2010. Zasobność w fosfor gleb użytków zielonych Doliny Liwca na wysoczyźnie siedleckiej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. Falenty. T.10, s.107-117.

KJELLSTRÖM E., BÄRRING L., HANSSON U., JONES C., SAMUELSSON P., RUMMUKAINEN M., ULLERSTIG A., WILLÉN U., WYSER K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). SMHI Reports Meteorology and Climatology No. 108, SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.

KOWALKOWSKI T., PASTUSZAK M., IGRAS J., BUSZEWSKI B., 2012. Differences in emission of nitrogen and phosphorus into the Vistula and Oder basins in 1995 – 2008 – Natural and anthropogenic causes (MONERIS model). Journal of Marine Systems 89, 48-60.

KOZYRA J., GÓRSKI T., 2004. Wpływ zmian klimatu na uprawę roślin w Polsce. Klimat – Środowisko – Człowiek, 41-50.

KRYZA M., DORE A.J., BŁAŚ M., SOBIK M., 2011. Modelling deposition and air concentration of reduced nitrogen in Poland and sensitivity to variability in annual meteorology, [w:] Journal of Environmental Management 92 (4), 1225-1236.

KRZYMIŃSKI W., KAMIŃSKA M. 2005 Wkład wieloletnich badań oceanograficznych Oddziału Morskiego IMGW w Gdyni w opracowanie typologii polskich wód morskich. Gazeta Obserwatora IMGW nr 4, 2005, 11-15.

KWS, 2011. Uprawa kukurydzy – poradnik.
http://www.kws.pl/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaajkmfy.

LARSSON U., ELMGREN R., WULFF F., 1985. Eutrophication of the Baltic Sea - causes and consequences. Ambio 14, 9-14.

ŁUCKA I.A., KOŁODZIEJ A.U., 2011. Rolnicze wykorzystanie masy pofermentacyjnej z biogazowni rolniczej. Wykorzystanie biomasy w energetyce aspekty ekonomiczne i ekologiczne. [W:] Jasiulewicz, M. (red.) Wykorzystanie biomasy w energetyce aspekty ekonomiczne i ekologiczne. Politechnika Koszalińska. s.277-304 <http://bioenergypromotion.w.interia.pl/>

MORIASI D. N., ARNOLD J. G., VAN LIEW M. W., BINGNER R. L., HARMEL R. D., VEITH T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the Asabe 50 (3), 885–900.

NEITSCH S., ARNOLD J., KINIRY J., WILLIAMS J., 2011. Soil And Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Tech. Rep. TR-406, Texas A&M University.

OKRUSZKO T., PINIEWSKI M., KARDEL I., GIEŁCZEWSKI M., STELMASZCZYK M., 2011. Opracowanie struktury modelu szacowania zanieczyszczeń pochodzenia rolniczego, odpływających do Morza

Bałtyckiego ze zlewni rzeki Redy. Opracowanie w ramach projektu Baltic COMPASS na zlecenie IMGW-PIB Oddział Morski w Gdyni, Warszawa.

ORSZTYNOWICZ J., 1988 – Studium naukowo-badawcze do Atlasu hydrogeologicznego Polski. Średnie roczne i wieloletnie odpływy podziemne na obszarze Polski w okresie 1951–1980. IMiGW, Zakład Dynamiki Wód Podziemnych, Warszawa.

OSTOJSKI M.S., 2012. Modelowanie procesów odprowadzania do Bałtyku związków biogennych – na przykładzie azotu i fosforu ogólnego. Wydawnictwo PWN. Warszawa.

PIETRZAK S., 2012. Priorytetowe środki zaradcze w zakresie ograniczania strat azotu i fosforu z rolnictwa w aspekcie ochrony jakości wody. Wydawnictwo ITP. Falenty.

PINIEWSKI, M. 2012. Impacts of natural and anthropogenic conditions on the hydrological regime of rivers: A Narew River Basin case study. Rozprawa doktorska. IMGW-PIB.

PZPWP, 2009. Plan zagospodarowania przestrzennego województwa pomorskiego. Załącznik do uchwały nr 1004/XXXIX/09 Sejmiku Województwa Pomorskiego z dnia 26 października 2009 r.

RADTKE G., GROCHOWSKI A., DĘBOWSKI P., 2007. Ichtyofauna dorzecza Redy oraz pozostałych małych cieków wpadających do Zatoki Gdańskiej. Rocz. Nauk. PZW, 20, 83-112.

RAMOWA DYREKTYWA WODNA, 2000. Dyrektywa Parlamentu i Rady Europejskiej z dnia 23 października 2000 roku ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, 2000/60/WE.

SCHOU J.S., NEYE S.T., LUNDHEDE T., MARTINSEN L., HASLER B. 2006. Modelling Cost-efficient Reductions of Nutrient Loads to the Baltic Sea - Concept, Data and Cost Functions for the Cost Minimisation Model. NERI Technical Report No. 592, Ministry of the Environment, Denmark, 67 pp.

STACHÝ J., BIERNAT B., 1987. Odpływ rzeczny. Średni odpływ jednostkowy [w:] J. Stachý (red.). Atlas Hydrologiczny Polski, IMGW, Wyd. Geol., Warszawa, s. 56.

STUCZYŃSKI T., DEMIDOWICZ G., DEPUTAT T., GÓRSKI T., KRASOWICZ S., KUŚ J., 2000. Adaptation Scenarios of Agriculture in Poland to Future Climate Changes. Environmental Monitoring and Assessment. 61(1), 133-144.

SZYMCZAK E., PIEKAREK-JANKOWSKA H., 2007. The transport and distribution of the river load from the Reda River into the Puck Lagoon (southern Baltic Sea, Poland). Oceanological and Hydrobiological Studies. XXXVI (1), 103-124.

TRACTABEL ENGINEERING, 2009. Projekt aktualizacji regionalnej strategii energetyki z uwzględnieniem źródeł odnawialnych w Województwie Pomorskim do roku 2025 w zakresie elektroenergetyki wraz z prognozą oddziaływania na środowisko.

TYSZEWSKI S., PUSŁOWSKA-TYSZEWSKA D., 2006. Analiza możliwości poprawy stanu jakościowego oraz ilościowego wód w zlewni rzeki Redy; opracowanie na zlecenie RZGW w Gdańsku, Warszawa

WOŁOSZYN E., SZYDŁOWSKI M., SZPAKOWSKI W., ZIMA P., 2008. Zasięg stref zagrożenia powodziowego dla przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% i 10% na odcinku rzeki Redy od jeziora Orle do wodowskazu Wejherowo oraz rzeki Bolszewki na odcinku od wodowskazu Bolszewo do ujścia do Kanału Redy. Opracowanie na zlecenie Urzędu Gminy Wejherowo, Gdańsk.

Źródła internetowe

http://bałtyk.imgw.gdynia.pl/warunki/odplyw_zanieczyszczen.html - Warunki środowiskowe polskiej strefy południowego Bałtyku. Rozdział „Odpyw zanieczyszczeń do morza”. Ośrodek Oceanografii i Monitoringu Bałtyku. Dostęp listopad 2012.

<http://biogazownierolnicze.pl> - Informacje na temat lokalizacji i danych dotyczących biogazowni rolniczych w województwie pomorskim. Dostęp listopad 2012.

http://www.mir.pl/files/2009/program_ROLNOŚRODOWISKOWY_2007-2013.pdf - Informacje dotyczące pakietów rolnośrodowiskowych Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich 2007-2013. Dostęp listopad 2012.

http://www.balticcompass.org/project_reports.html – Informacje w języku angielskim dotyczące listy i omówienie wybranych priorytetowych środków zaradczych zaproponowanych w projekcie Baltic COMPASS. Dostęp listopad 2012.

<http://www.gios.gov.pl/chemizm2010/index.html> - Dane dotyczące mokrej depozycji azotu i fosforu. Dostęp listopad 2012.

http://www.ios.edu.pl/biodiversity/3/r3_3226.htm - Dane dotyczące suchej depozycji azotu. Dostęp listopad 2012.

<http://www.rumia.pl> – Informacje dotyczące realizacji projektu pt. „Ochrona wód Zatoki Gdańskiej – budowa i modernizacja systemu odprowadzania wód opadowych Małego Trójmiasta Kaszubskiego (Rumia, Reda, Wejherowo) i Gminy Wejherowo”. Dostęp listopad 2012.

<http://www.smhi.se/en/2.575/Climate-scenarios/climate-scenarios-1.6402> - Informacje dotyczące wyników projekcji zmian klimatu w zlewni Redy oraz dane pozyskane ze strony dzięki uprzejmości Henrika Eckerstena z SLU w Uppsali. Dostęp wrzesień 2011.

http://www.wodr.konskowola.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=120:jak-minimalizowa-straty-z-nawozow-naturalnych&catid=55:inne-&Itemid=126. – Informacje na temat ulatniania się azotu amonowego podczas nawożenia nawozami naturalnymi. Dostęp listopad 2012.

Załącznik 1. Parametry kalibracyjne modelu.

A. Parametry wykorzystane w procesie kalibracji modelu w zakresie przepływów (Neitsch i in., 2011) wraz z końcowymi zakresami zmienności i wartościami związanymi z najlepszą symulacją.

Nazwa	Definicja (ang.) ¹⁵	Optimum	Granica dolna	Granica górna
r_CN2.mgt	Initial SCS runoff curve number for moisture condition II (-)	-0.038	-0.10	0.01
v_GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	397	250	500
r_GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H2O)	-0.14	-0.8	0.5
r_REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap or percolation to the deep aquifer to occur (mm H2O)	-0.32	-0.5	1
r_SOL_Z.sol	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	0.06	-0.35	0.2
r_SOL_BD().sol	Moist bulk density (g/cm ³)	0.36	-0.1	0.4
r_GW_REVAP.gw	Groundwater "revap" coefficient (-)	0.46	-0.6	0.6
v_ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor (-)	0.85	0.82	1
v_TIMP.bsn	Snow pack temperature lag factor (-)	0.36	0.2	0.8
r_SOL_K().sol	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	-0.38	-0.8	0
r_HRU_SLP.hru	Average slope steepness (m/m)	-0.02	-0.45	0.1
v_EPCO.hru	Plant uptake compensation factor (-)	0.02	0	0.5
v_SURLAG.bsn	Surface runoff lag coefficient (-)	0.1	0.05	0.45
r_RCHRG_DP.gw	Deep aquifer percolation fraction (-)	-0.05	-0.8	0.8
r_SLSUBBSN.hru	Average slope length (m)	0.02	-0.05	0.4

Uwagi: ¹ "r__" – względna zmiana wartości parametru; "v__" – zastąpienie parametru nową wartością;

² przyrostki ".gw", ".swq" – rozszerzenia plików/tabel wejściowych modelu SWAT.

B. Parametry wykorzystane w procesie kalibracji modelu w zakresie zawiesin (Neitsch i in., 2011) wraz z końcowymi zakresami zmienności i wartościami związanymi z najlepszą symulacją.

Nazwa	Definicja (ang.)	Optimum	Granica dolna	Granica górna
r_USLE_K.sol	USLE equation soil erodibility (K) factor (-)	0.52	0.3	0.7
v_CH_COV2.rte	The channel cover factor (-)	1.92	1.9	3
r_CH_N2.rte	Manning's "n" value for the main channel (-)	0.62	0.42	0.62
v_RES_D50.res	Median particle diameter of sediment in reservoir (μm)	7.76	2	8

¹⁵ Ze względu na specyficzny charakter wielu parametrów modelu w tej i w kolejnych tabelach zamieszczono definicje w języku angielskim tak jak w dokumentacji teoretycznej modelu (Neitsch i in., 2011).

C. Parametry wykorzystane w procesie kalibracji modelu w zakresie N-NO₃ (Neitsch i in., 2011) wraz z końcowymi zakresami zmienności i wartościami związanymi z najlepszą symulacją.

Nazwa	Definicja (ang.)	Optimum	Granica dolna	Granica górna
v__CDN.bsn	Denitrification exponential rate coefficient (-)	0.004	0	0.3
v__RCN.bsn	Concentration of nitrogen in rainfall (mg/l)	1.73	1.5	1.75
v__CMN.bsn	Rate factor for humus mineralization of active organic nutrients (-)	0.0021	0.002	0.0024
v__SDNCO.bsn	Denitrification threshold water content (-)	0.941	0.94	0.96
v__NPERCO.bsn	Nitrate percolation coefficient (-)	0.71	0.7	0.87
v__RSDCO.bsn	Residue decomposition coefficient (-)	0.058	0.05	0.07
r__SOL_NO3.chm	Initial NO ₃ concentration in the soil layer (mg N/kg soil, dry weight)	-0.01	-0.1	0.05
v__SOL_ORGN.chm	Initial organic N concentration in the soil layer (mg N/kg soil, dry weight)	578.9	570	640
v__BC3.swq	Rate constant for hydrolysis of organic N to NH ₄ in the reach at 20°C (1/day)	0.34	0.32	0.35
v__AI1.wwq	Fraction of algal biomass that is nitrogen (-)	0.0754	0.075	0.081
v__HLIFE_NGW.gw	Half-life of nitrate in the shallow aquifer (days)	1.73	1	4
v__BIOMIX.mgt	Biological mixing efficiency (-)	0.34	0.3	0.44

D. Parametry wykorzystane w procesie kalibracji modelu w zakresie P-PO₄ (Neitsch i in., 2011) wraz z końcowymi zakresami zmienności i wartościami związanymi z najlepszą symulacją.

Nazwa	Definicja (ang.)	Optimum	Granica dolna	Granica górna
v__RSDIN.hru	Initial residue cover (kg/ha)	5676	3894	6039
v__PPERCO.bsn	Phosphorus percolation coefficient (m ³ /Mg)	12.52	11.78	13.49
v__PSP.bsn	Phosphorus availability index (-)	0.189	0.13	0.26
v__RSDCO.bsn	Residue decomposition coefficient (-)	0.074	0.047	0.088
v__BC4.swq	Rate constant for mineralization of organic P to dissolved P in the reach at 20° C (1/day)	0.345	0.26	0.41
r__SOL_SOLP().chm	Initial soluble P concentration in soil layer (mg P/kg soil, dry weight)	-0.137	-0.15	0.05
v__SOL_ORGP().chm	Initial humic organic phosphorus in soil layer (mg P/kg soil, dry weight)	343	275	358
v__ERORGP.hru	Phosphorus enrichment ratio for loading with sediment (-)	1.70	1.29	2.22
v__GWSOLP.gw	Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin (mg P/l)	0.070	0.03	0.116
v__AI2.wwq		0.013	0.011	0.0132
v__CH_OPCO.rte	Organic phosphorus concentration in the channel (mg/l)	38.8	23	41
v__MUMAX.wwq	Maximum specific algal growth rate at 20°C (1/day)	1.73	1.61	2.07
v__RHOQ.wwq	Algal respiration rate at 20°C (1/day)	0.350	0.29	0.382

Załącznik 2. Zestawienie priorytetowych środków zaradczych w aspekcie ich stosowania w zlewni Redy w stanie aktualnym i w przyszłości

Nr	Opis środka zaradczego (Best Available Practice) ¹⁶	Jak jest obecnie	Jak prawdopodobnie będzie wg. wywiadu w PODR w Gdyni i analiz GUS	Spodziewany wpływ na N-azot, P-fosfor
1	Propagowanie długoletniej uprawy traw na gruntach ornych	do 1% pow. gr. ornych	bez zmian	
2	Pokrywa roślinna gruntów ornych jesienią i zimą	Niewielkie zainteresowanie poplonami oranymi na jesieni. Brak zainteresowania oranymi na wiosnę ze względu na ich wpływ na przesuszanie gleby	bez zmian	N
3	Zarządzanie uprawą gleby			
3.1	Zredukowanie uprawy płużnej (w celu ograniczenia mineralizacji materii organicznej)	Stosowana jedynie na glebach organicznych	Jest tendencja ogólna do stosowania ze względu na koszty. Przy połączeniu z 5.2 może dojść do 80% gruntów ornych	N
3.2	Odroczone uprawy gleby z jesieni na wiosnę	Nie stosowane ze względu na trudności w doprowadzeniu gleby do właściwej struktury (zbrylenie orki) występujące po zimie		N
4	Zarządzanie nawożeniem			
4.1	Dostosowanie stosowanych dawek łącznie z nawozów sztucznych i nawozów naturalnych	Ze względu na koszty rolnicy nie przenawożą upraw	Bez zmian	P,N
4.2	Obliczanie bilansu składników nawozowych w gospodarstwie - i/lub na powierzchni pola	Jest stosowane w dużych gospodarstwach > 30ha	Będzie stosowane powszechnie	
4.3	Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych w okresach wysokiego ryzyka	Jest w KDPR, faktycznie weszło w życie po roku 2005.	Będzie stosowane powszechnie	N
4.4	Nie stosowanie lub ograniczenie stosowania nawozów fosforowych na pola lub ich części charakteryzujące się glebami o wysokiej zasobności w fosfor	Jest stosowane	Bez zmian	P
5	Ulepszone technologie stosowania nawozów naturalnych i mineralnych			
5.1	Dawka dostosowana do miejsca (precyzyjne nawożenie oparte o system GPS)	Opłaca się tylko dla gospodarstw powyżej 86 ha. Aktualnie nie stosowna	20% użytków rolnych	N

¹⁶ http://www.balticcompass.org/project_reports.html

Nr	Opis środka zaradczego (Best Available Practice)¹⁶	Jak jest obecnie	Jak prawdopodobnie będzie wg. wywiadu w PODR w Gdyni i analiz GUS	Spodziewany wpływ na N-azot, P-fosfor
5.2	Jednoczesny wysiew nawozu i nasion tą samą maszyną	Nie stosowane	20% użytków ornych	
5.3	Szybkie przykrycie glebą zastosowanych nawozów naturalnych i mineralnych za pomocą kultywatorów i bron talerzowych	Jest stosowane od 2004 - nawozy organiczne muszą być przykryte w ciągu 24 godz.	Jeżeli prawo lub dofinansowanie się nie zmieni bez zmian.	P,N
5.4	Pasmowe i dogłębne wprowadzanie płynnych nawozów naturalnych	Nie	Nie	
5.5	Roztrzaskacze obornika z systemem rozdrabniania rozrzucania obornika w kierunku wzdłużnym	Nie	Nie	
5.6	Stosowanie nawozów naturalnych i emisja NH ₃ – ogólne zalecenia	Jest powszechna tendencja po przełomowym dla nawożenia (spadek nawożenia) roku 1995-96 dla rolnictwa.	Będzie stosowane powszechnie	
6	Unikanie stosowania nawozów mineralnych i naturalnych na obszarach wysokiego ryzyka (np. na użytkach rolnych o znacznym nachyleniu, w pobliżu cieków wodnych itp.)	Jest stosowane (wg KDPR) po roku 2004 dotyczy głównie nawozów naturalnych. Niestety rolnicy rzadko stosują się do wytycznych określających sposób uprawy na stokach o dużym nachyleniu.	Od 2010 – wg Dz.U Nr39. Poz.211 (aktualizacja Dz.U Poz.749 2012) który podaje ograniczenia nawożenia gnojowica - 10m, a mineralne - 5m od brzegu wód. 20m ochrona zbiorników o szczególnym znaczeniu dla bilansu wodnego. Ponadto 40% gruntów rolnych w gospodarstwie w okresie 1.XII-15.II musi mieć pokrywą roślinną. Konieczność ściółkowania międzyrzędzi lub stosowania upraw tarasowych. Nie można stosować redlin wzdłuż stoku o nachyleniu 20%. Zlewnia Redy w całości (bez gminy Reda) leży na ONW i jest wymieniona w rozporządzeniu jako zagrożona erozją co rolników starających się o dopłaty zobowiązuje do stosowania w/w przepisów.	P,N
7	Środki mające na celu optymalizację pH gleby i poprawę struktury gleby (wapnowanie gleby)	Jest stosowane nie wystarczająco do potrzeb ze względu na koszty	Będzie stosowane	
8	Żywienie dostosowane do zapotrzebowania zwierząt			
8.1	Żywienie fazowe	Nie	Raczej nie ale trudno przewidzieć	

Nr	Opis środka zaradczego (Best Available Practice)¹⁶	Jak jest obecnie	Jak prawdopodobnie będzie wg. wywiadu w PODR w Gdyni i analiz GUS	Spodziewany wpływ na N-azot, P-fosfor
8.2	Zmniejszenie pobierania azotu i fosforu w paszy	Nie	Raczej nie ale trudno przewidzieć	P
8.3	Dodawanie fitazy do paszy	Nie	Raczej nie ale trudno przewidzieć	P
8.4	Żywienie na mokro i kontrolowana fermentacja pasz	Nie	Raczej nie ale trudno przewidzieć	
9	Ograniczenia strat amoniaku w budynkach inwentarskich	Nie	Trudno przewidzieć	
10	Odpowiednie metody przechowywanie nawozów naturalnych	Jest stosowane i kontrolowane	Będzie stosowane	
11	Tworzenie sztucznych mokradeł dla przechwytywania składników nawozowych ze spływu powierzchniowego			
11.1	Stawy sedimentacyjne (osadniki)	Tylko w stawach rybnych	Bez zmian	P,N
11.2	Sztuczne mokradła	Nie	Możliwe w powiązaniu z produkcją roślin energetycznych i rozwojem biogazowni	P,N
12	Strefy buforowe wzdłuż zbiorników i cieków wodnych i podatnych na erozję pól	Nie (brak OSN)	Do 2013 (ONW) tak, później zależnie od dopłat.	P,N