# SPRAWOZDANIE KOŃCOWE Z REALIZACJI PROJEKTU BADAWCZEGO

# "MODELOWANIE ROZPŁYWU I BADANIE TRANSPORTU ZANIECZYSZCZEŃ W NATURALNYCH ODBIORNIKACH WODNYCH Z WYKORZYSTANIEM IZOTOPÓW STABILNYCH JAKO ZNACZNIKÓW"

PROJEKT NO 3T09D 08726

Wykonawca

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa Fax: (0-22) 811-15-32, Tel.: (0-22) 504-10-58

# SPIS TREŚCI

## 1. INFORMACJE OGÓLNE O PROJEKCIE.

- 1.1. Zespół badawczy.
- 1.2. Harmonogram wykonywanych prac w ramach projektu badawczego.

## 2. STRESZCZENIEPROJEKTU.

## 3. WPROWADZENIE.

## **4. ΜΕΤΟΟΥΚΑ ΒΑΟΑŃ.**

- 4.1. Oznaczenia stosunków izotopowych <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O i D/H próbek wody.
  - 4.1.1. Preparatyka wodoru.
  - 4.1.2. Preparatyka tlenu.
- 4.2. Metoda znacznikowa badania rozpływu zanieczyszczeń w rzekach.
  - 4.2.1. Wybór znacznika, dozowanie, aparatura pomiarowa.
  - 4.2.2. Technika pomiarowa.
- 4.3. Model adwekcyjno dyspersyjny rozpływu zanieczyszczeń w rzekach.

## 5. OPIS UZYSKANYCH WYNIKÓW.

- 5.1. Badania układu wodnego Narew-Bug-Zalew Zegrzyński
  - 5.1.1 Symulacje numeryczne przepływu wody w Zalewie Zegrzyńskim.
- 5.2. Badania układu wodnego BugoNarew-Wisła
  - 5.2.1. Badania znacznikowe akwenu wodnego BugoNarew Wisła.
    - 5.2.1.1. Pomiar rozpływu wód BugoNarwi w Wiśle

5.2.1.2. Pomiar rozpływu wód Wisły poniżej ujścia BugoNarwi.

5.2.2. Oszacowanie drogi pełnego wymieszania.

## 6. WNIOSKI.

## 7. LITERATURA CYTOWANA

## 8. WYDANE PUBLIKACJE I INNE FORMY UPOWSZECHNIANIA WYNIKÓW.

## 1. INFORMACJE OGÓLNE O PROJEKCIE

Tytuł projektu:

# "MODELOWANIE ROZPŁYWU I BADANIE TRANSPORTU ZANIECZYSZCZEŃ W NATURALNYCH ODBIORNIKACH WODNYCH Z WYKORZYSTANIEM IZOTOPÓW STABILNYCH JAKO ZNACZNIKÓW"

Numer projektu: 3T09D 08726 Numer umowy z Ministrem Nauki i Szkolnictwa Wyższego: PB 1327/T09/2004/26 Termin rozpoczęcia: 23-04-2004 Termin zakończenia: 22-02-2007

#### Dane kierownika projektu:

dr inż. Jacek Palige ul. Maklakiewicza 13 m 3, 02-642 Warszawa

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa

#### Nazwa jednostki realizującej:

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa

Słowa kluczowe: metody znacznikowe, izotopy stabilne, rzeki, zbiorniki wodne, ochrona środowiska

#### 1.1. Zespół badawczy

dr inż. Andrzej Owczarczyk

dr inż. Jacek Palige

dr inż. Andrzej Dobrowolski

mgr inż. Sylwia Ptaszek

mgr inż. Robert Zimnicki

Pracownik pomocniczy

## 1.2. Harmonogram prac w ramach projektu badawczego.

Lp.	Nazwa zadania badawczego	Termin realizacji (liczba miesięcy od terminu zawarcia umowy)	Koszty planowane poniesione (zł)
1	2	3	4
1	Zbadanie rozpływu wód w systemie Narew, Bug – Zalew Zegrzyński	15 miesięcy	100 000
	1.1. Opracowanie siatki poboru próbek wody w systemie.		
	<ol> <li>1.2. Badania terenowe i pomiary δ<sup>18</sup>O i δD w pobranych próbkach</li> </ol>		
2	Zbadanie rozpływu wód w systemie Bugo-Narew – Wisła	15 miesięcy	80 000
	2.2. Opracowanie siatki poboru próbek wody w systemie.		
	2.3. Badania terenowe i pomiary $\delta^{18}$ O i $\delta$ D w pobranych próbkach		
3	Weryfikacja proponowanych modeli	15 miesięcy	20 000
	matematycznych		
	Opracowanie raportu wykonawczego z		
	wykonania grantu		
		Razem	200 000

#### 2. STRESZCZENIE PROJEKTU

Celem pracy było wykorzystanie naturalnie istniejących różnic składu izotopowego wód <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O i D/H do badania procesów transportu i towarzyszących im procesów dyspersji i mieszania wód w układzie dopływ – odbiornik.

W ramach projektu opracowano i sprawdzono w warunkach terenowych metodologię łącznych badań znacznikowych (BZ) i badań stosunków izotopowych wody (BSI) do wyznaczania dynamiki procesów dyspersji zanieczyszczeń i mieszania się wód w układach wodnych takich jak rzeki i przepływowe zbiorniki wodne.

Skład izotopowy wody jest funkcją wielu czynników klimatycznych, geograficznych i geologicznych charakterystycznych dla zlewni danej rzeki. Przeprowadzone pomiary składu izotopowego wód zlewni Bugu, Narwi, BugoNarwi i Wisły wykazały występowanie znaczących różnic w ich składzie izotopowym w szczególności izotopów wodoru D/H. Występujące różnice w składzie izotopowym (SI) wykorzystano jako naturalne znaczniki wody.

Przeprowadzono dwie serie pomiarów terenowych. W serii I badano system hydrologiczny Narew – Bug – Zalew Zegrzyński jako układ rzeka – zbiornik przepływowy. W wybranych przekrojach poprzecznych porównano dane doświadczalne dotyczące stosunków izotopowych SI pobieranych próbek wody i wyliczonych współczynników mieszania wód z danymi uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego rozpływu wody i zanieczyszczeń w badanym akwenie. W pomiarach tych nie uzyskano zgody Sanepidu na przeprowadzenie eksperymentów znacznikowych na Zalewie Zegrzyńskim. Uzyskano dobrą zgodność wyników doświadczalnych z wynikami obliczeń modelowych.

W serii II badano system hydrologiczny BugoNarew – Wisła (w rejonie Modlina) jako układ dopływ – rzeka główna. W wybranych przekrojach poprzecznych Wisły porównywano dane doświadczalne dotyczące SI pobieranych próbek wody i wyliczonych stąd współczynników mieszania wód z danymi doświadczalnymi uzyskanymi w eksperymencie znacznikowym, w którym jako znacznik wody wykorzystano Rodaminę B. Z danych uzyskanych w badaniach znacznikowych BZ wyznaczono współczynniki dyspersji wzdłużnej i poprzecznej wód opisujących zdolności mieszania się wód w danym akwenie.

Do modelowania układu wykorzystano model dwuwymiarowy (2D) adwekcyjno – dyspersyjny opisujący przepływ wody w wybranym odcinku rzeki Wisły.

6

Stwierdzono zgodność danych doświadczalnych uzyskanych w badaniach składu izotopowego (SI) i znacznikowych z danymi uzyskanymi w wyniku modelowania numerycznego badanego akwenu.

#### **3. WPROWADZENIE.**

Wody powierzchniowe są w większości przypadków głównym odbiornikiem ciekłych zanieczyszczeń zrzucanych przez przemysł i aglomeracje miejskie. Równocześnie wody te są w Polsce podstawowym źródłem zaopatrywania ludności i gospodarki krajowej co powoduje konieczność ciągłego monitoringu procesów zachodzących w odbiornikach wodnych.

Zanieczyszczenia wprowadzane do układu wodnego w postaci ciekłej podlegają biodegradacji oraz dyspersji i rozcieńczaniu podczas ich transportu z wodami odbiornika. Wyrządzają one określone szkody ekologiczne, które w skrajnym przypadku mogą doprowadzić do zaniku procesów biologicznych samooczyszczania wód.

Aktualny stan wiedzy nie jest wystarczający do kompleksowego opisu tych zjawisk. Proponowane modele matematyczne opisujące te procesy – w postaci układów równań różniczkowych z odpowiednimi warunkami początkowymi i brzegowymi – zawierają szereg założeń upraszczających.

Rozwiązując numerycznie, w oparciu o istniejące procedury obliczeniowe, odpowiednie układy równań różniczkowych opisujących przyjęty model fizyczny charakteryzujący badany układ, otrzymuje się teoretycznie zależności opisujące rozpływ, w tym czasoprzestrzenne rozkłady zanieczyszczeń w rzece lub zbiorniku wodnym. Uzyskiwane drogą obliczeń numerycznych wyniki często wymagają jednakże weryfikacji doświadczalnej. Weryfikacja modelu polega na badaniu w terenie procesów towarzyszących transportowi znacznika (aktywnego lub pasywnego) będącego odpowiednikiem zanieczyszczenia.

Prace badawcze mające na celu opis procesów transportu w naturalnych wodach powierzchniowych prowadzono już w latach 60-tych. Powstały wtedy podwaliny metod znacznikowych, które wykorzystywano do pomiarów charakterystyk dynamicznych rzek, rozpływu w jeziorach, procesów transportu zanieczyszczeń [1]. Szybki rozwój tych prac w latach 70-tych i 80-tych, prowadzonych zarówno na modelach laboratoryjnych jak i w warunkach terenowych z wykorzystaniem znaczników promieniotwórczych, barwników oraz znaczników fluorescencyjnych doprowadził do znaczącego rozwoju metod modelowania matematycznego. Burzliwy rozwój dziedziny badań znacznikowych w hydrologii został ograniczony pod koniec lat 80-tych i praktycznie całkowicie zahamowany pod koniec lat 90-tych ze względu na brak zezwoleń na wprowadzanie do środowiska znaczników promieniotwórczych i poważne ograniczenia dla znaczników innego typu (np. znaczniki

8

fluorescencyjne) wprowadzanych z zewnątrz do ekosystemu. Hydrologia utraciła zatem podstawowe narzędzie (metody znacznikowe) niezbędne do weryfikacji i rozwoju teorii.

Równocześnie z w/w badaniami znacznikowymi rozwijała się i rozwija hydrologia izotopowa związana z badaniami obiegu wody w przyrodzie. Procesy naturalnego frakcjonowania (parowanie, kondensacja, absorpcja, desorpcja itp.) powodują różnicowanie składu izotopowego wód co daje możliwość prowadzenia różnego typu badań w dziedzinie klimatologii, hydrogeologii, hydrologii i ochrony środowiska. Dziedziny te rozwijają się burzliwie od chwili uzyskania znacznego postępu w budowie aparatury i automatyzacji pomiarów spektrometrii masowej stosunków izotopowych (IRMS – Isotope Ratio Mass Spectrometry).

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania pomiarów IRMS próbek wody pobieranych w wybranych punktach lub przekrojach akwenu wodnego do oceny procesów dyspersji i mieszania się wód pochodzących z różnych zlewni.

#### 4. METODYKA BADAŃ

## 4.1. Oznaczania stosunków izotopowych <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O i D/H próbek wody.

Cząstka wody zbudowana jest z dwu pierwiastków, wodoru i tlenu, a każdy z tych pierwiastków posiada kilka odmian izotopowych o różnej masie atomowej.

Wodór posiada dwie stabilne odmiany izotopowe: <sup>1</sup>H i <sup>2</sup>H (deuter) i jedną niestabilną, promieniotwórczą 3H (tryt). Tlen posiada trzy stabilne odmiany <sup>16</sup>O, <sup>17</sup>O i <sup>18</sup>O oraz kilka promieniotwórczych (4), ale o krótkim, sekundowym czasie półtrwania.

Ze względu na występowanie i łatwość ich pomiaru, w badaniach hydrologicznych wykorzystywane są do pomiarów izotopy najbardziej rozpowszechnione, których stężenia są wyrażone poprzez ich wzajemny stosunek ilościowy [2]. W celu pełnej unifikacji i pewnego zobiektywizowania wyników, ostateczną zawartość mierzonego izotopu wyraża się względem standardu międzynarodowego - dla tlenu i wodoru w wodzie tym standardem jest VSMOW (ang. Vienna Standard Mean Ocean Water).

Skład izotopowy wodoru w próbce wyrażony jest przez równanie:

9

$$\delta_{VSMOW}^{2} H \equiv \delta_{VSMOW}^{2} H / {}^{1} H = \left[\frac{R_{pr}}{R_{VSMOW}} - 1\right] * 1000$$
 [‰]

gdzie:

 $R_{pr}$  - stosunek izotopu wodoru <sup>2</sup>H do izotopu <sup>1</sup>H w zmierzonej próbce  $R_{VSMOW}$  - stosunek izotopu wodoru <sup>2</sup>H do izotopu <sup>1</sup>H w standardzie VSMOW = 0,0001558

Skład izotopowy tlenu jest wyrażony odpowiednio przez:

$$\delta_{VSMOW}^{18} O \equiv \delta_{VSMOW}^{18} O / {}^{16} O = \left[\frac{R_{pr}}{R_{VSMOW}} - 1\right] * 1000$$
 [%]

gdzie:

 $R_{pr}$ - stosunek izotopów tlenu <sup>18</sup>O do tlenu <sup>16</sup>O w zmierzonej próbce  $R_{VSMOW}$ - stosunek izotopów tlenu <sup>18</sup>O do tlenu <sup>16</sup>O w standardzie VSMOW = 0,0020052

Pomiar składu izotopowego wody oddzielnie dla tlenu i oddzielnie dla wodoru odbywa się dwoma różnymi metodami w oparciu o spektrometrię masową stosunków izotopowych (IRMS ang. Isotope Ratio Mass Spectrometry). W chwili obecnej obie te metody mogą być prowadzone w sposób automatyczny, on-line: na liniach preparatywnych połączonych ze spektrometrem masowym gdzie pobór prób odbywa się przez próbnik automatyczny, a gaz transportowany jest przez układ zaworów pneumatycznych sterowanych przez system komputerowy.

#### 4.1.1. Preparatyka wodoru.

Preparatykę wodoru [3] przeprowadza się w urządzeniu H/Device (Thermofinnigan, Niemcy), które połączone jest z spektrometrem masowym.

Próbka wody przeznaczona do analizy na skład izotopowy wodoru pobierana jest przez strzykawkę w sposób automatyczny i dozowana w ilości 0,5 μl do reaktora kwarcowego wypełnionego proszkiem metalicznego chromu o temperaturze ok. 850°C. Przed wprowadzeniem wody do reaktora w reaktorze panuje próżnia. Woda w reaktorze podlega reakcji z gorącym, metalicznym chromem:



 $3H_2O + 2Cr \rightarrow Cr_2O_3 + 3H_2$ 

Rys.1. Preparatyka wodoru z próbki wody przy użyciu metalicznego chromu.

Otrzymany w wyniku reakcji wodór transportowany jest przez system zaworów do spektrometru masowego gdzie po wprowadzeniu do jego źródła jonów i zjonizowaniu, poddawany jest analizie masowej w celu określenia stosunku izotopów wodoru o masie 2 do izotopu o masie 1. Naprzemiennie z wodorem pochodzącym z badanej próbki mierzony jest wodór standardu roboczego (jako gaz odniesienia) o znanym składzie izotopowym. Na podstawie pomierzonych stosunków izotopowych w próbce i w standardzie roboczym, zostaje wyznaczony ostateczny wynik pomiaru przedstawiany w postaci liczby  $\delta^2$ H. Posiadany zestaw pomiarowy umożliwia wykonywanie pomiarów z precyzją ok. 0.1 ‰.

#### 4.1.2. Preparatyka tlenu.

Pomiar składu izotopowego tlenu [4] odbywa się w ditlenku węgla, który doprowadza się do stanu równowagi izotopowej z tlenem w badanej próbce wody. Procedura preparatyki przedstawia się następująco. Fiolkę szklaną napełnia się mieszaniną helu z ditlenkiem węgla o koncentracji ok. 0.1% CO<sub>2</sub> i zakręca się szczelnie. Przez membranę w korku, za pomocą

strzykawki do fiolki wprowadzana jest próbka wody przeznaczonej do pomiaru w ilości 0.5 ml. Cała przygotowana partia naczynek przeznaczonych do oznaczeń umieszczana jest w termostatowanej tacy o temp. 30°C na okres powyżej 15 godzin (czas wymagany do ustalenia się równowagi). Po ustaleniu się równowagi, poprzez automatyczny próbnik, po kolei do każdego naczynia, wprowadzana jest igła dwudrożna zaopatrzona w dwie kapilary. Za pomocą jednej kapilary do naczynia wtłaczany jest hel, który miesza się z mieszaniną równowagową w fiolce, a następnie opuszcza ją poprzez drugą kapilarę i wędruje do urządzenia Gasbench II (Thermofinnigan, Niemcy), w którym transportowany gaz poddawany jest osuszaniu oraz separacji ditlenku węgla w kapilarnej kolumnie chromatograficznej (rys.2). Wydzielony pik CO<sub>2</sub> wprowadzany jest następnie do źródła jonów spektrometru masowego, gdzie analizowany jest skład izotopowy tlenu.



Rys. 2. Schemat oznaczania składu izotopowego tlenu w wodzie.

Jako gaz odniesienia stosowany jest ditlenek węgla z butli o znanym składzie izotopowym. Dla jednej mierzonej próbki wody pomiar składu izotopowego tlenu w próbce gazowej odbywa się 10-krotnie. Wyznaczana z pomiarów wartość składu izotopowego tlenu w CO<sub>2</sub> przeliczana jest następnie na skład izotopowy tlenu w wodzie (mierzonej próbki) będącej w równowadze izotopowej z mierzonym gazem. Obliczeń dokonuje się w oparciu o znajomość współczynnika  $\alpha$  równowagi izotopowej tlenu w obu fazach dla danej temperatury. Prowadzone tą metodą pomiary pozwalają na oznaczenie  $\delta^{18}$ O z dokładnością do 0.02 ‰. Porównując przebieg oznaczenia składu izotopowego wodoru oraz tlenu w wodzie tzn. czasochłonności przygotowania pojedynczej próbki oraz szybkość wykonania pomiaru stwierdzono, że dla dużej ilości prób wygodniejszym narzędziem badawczym będzie skład izotopowy wodoru w wodzie. Ostatecznym argumentem potwierdzającym trafność tego wyboru było to, że zgodnie z empiryczna formułą dla wód pochodzących z opadów meteorologicznych ( $\delta^2$ H=8  $\delta^{18}$ O + 10) zmianie wartości  $\delta^{18}$ O o 1 ‰ towarzyszy zmiana wartości  $\delta^2$ H o 8 ‰, co powoduje, że mimo 5 krotnej większej dokładności pomiarów tlenu mamy ostatecznie korzystniejszy stosunek przyrostu wartości mierzonej do dokładności pomiaru dla oznaczeń wodoru.

#### 4.2. Metoda znacznikowa badania rozpływu zanieczyszczeń w rzekach.

Zagadnienie rozpływu zanieczyszczeń w rzekach jest szczególnie istotnym z punktu widzenia ochrony środowiska wodnego. W ciekach wodnych mamy do czynienia z ciągłymi powolnymi zrzutami wód powierzchniowych (niosących z sobą określony ładunek zanieczyszczeń np. nawozów sztucznych) jak również z nagłymi zrzutami zanieczyszczeń np. w rezultacie wypadków. Znajomość parametrów cieku opisujących czas retencji, zdolność dyspersji zanieczyszczeń itp. konieczna jest dla prognozowania bezpieczeństwa ujęć wody oraz innych działań związanych z gospodarką wodną danego cieku. W/w sytuacja powoduje, że od dłuższego czasu prowadzone są teoretyczne i eksperymentalne prace – zarówno laboratoryjne jak i polowe – dotyczące rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń głównie w rzekach. W badaniach tych wykorzystywane są metody znacznikowe, w tym również radioznacznikowe.

Z punktu widzenia hydrologii badanej rzeki następujące parametry mogą wpływać na intensywność mieszania się wód: natężenie przepływu, głębokość cieku, nachylenie dna, kształt przekroju poprzecznego, geometria rzeki (odstępstwo od prostoliniowości przepływu), materiał rumowiska dennego (chropowatość) i in. [5]

Występowanie w rzece zakoli, krzywizny przepływu (siły odśrodkowe) oraz sił Coriolisa powodują powstawanie w rzece skomplikowanej makrostruktury poprzecznych prądów cyrkulacyjnych powodujących naturalne mieszanie się wód.

Geometria rzek oraz obserwowane w nich wartości średnich prędkości przepływu wody powodują, że w rzekach występuje praktycznie turbulentny ruch wody, co powoduje

dodatkowe znaczne mieszanie cieczy.

Wszystkie w/w czynniki powodują, że każda rzeka charakteryzuje się, na wybranym odcinku przepływu, specyficznymi dla niej wartościami współczynników dyspersji wzdłużnej, poprzecznej i po głębokości opisującymi proces mieszania się wód a tym samym proces mieszania zanieczyszczeń rozpuszczonych w wodzie.

W IChTJ od wielu lat prowadzono badania znacznikowe rozpływu zanieczyszczeń w rzekach w różnych warunkach hydrogeologicznych (rzeki nizinne, meandrujące itp.) oraz dla znacząco różniących się natężeń przepływu wód (Wisła, Narew, Wkra) [6-10]. Badania prowadzono zarówno z wykorzystaniem znaczników promieniotwórczych jak i fluorescencyjnych (Rodamina – B, Rodamina WC, Fluoresceina i in.).

Metodologia badań znacznikowych przedstawiona jest w wielu monografiach w szczególności dotyczących inżynierii procesowej np.[11]. Różne aspekty zastosowania tej metody do badania rozpływu zanieczyszczeń w rzekach szczegółowo omówiono w pracach [12-13]. W niniejszym sprawozdaniu przedstawione zostaną wybrane elementy metody znacznikowej, które zostały wykorzystane w realizacji badań terenowych.

4.2.1. Wybór znacznika, dozowanie, aparatura pomiarowa.

Praktyka stosowania technik znacznikowych w badaniach procesów zachodzących w przepływie cieczy polega na wprowadzeniu do przepływającego strumienia substancji zachowującej się identycznie ze znakowaną fazą, lecz posiadającą określoną cechę, wyróżniającą ją z otoczenia, umożliwiającą detekcję znacznika czyli rejestrację jego stężenia w funkcji czasu i położenia. Znacznik nie powinien podlegać sorpcji na osadach dennych i zawiesinach.

W badaniach procesów zachodzących w naturalnych odbiornikach wodnych stosowane są znaczniki promieniotwórcze (szczególnie dla wód mętnych, brudnych, z dużą ilością cząstek zawieszonych) i fluorescencyjne. Wybór tych znaczników podyktowany jest ich zadowalającą trwałością w środowisku wodnym i wysoką czułością detekcji.

Względy prawne nie pozwoliły na zastosowanie w badaniach znaczników promieniotwórczych (wodny roztwór KBr znakowany radioizotopem Br-82).

Zdecydowano się na zastosowanie znaczników fluorescencyjnych. Prowadzone wcześniej w IChTJ testy własne oraz doświadczenie innych autorów [14] wykazują, że straty

właściwości fluorescencyjnych pod wpływem światła oraz straty znacznika w wyniku adsorpcji na zawiesinach i osadach dennych, w przypadku rodaminy i uraniny jako znaczników, nie mają praktycznego znaczenia przy estymowaniu procesów mieszania w rzece, gdzie nie jest konieczne sporządzenie bilansu masy znacznika.

Uwzględniając powyższe w badaniach znacznikowych jako znacznika cieczy użyto Rodaminy B.

Znacznikowe badania transportu zanieczyszczeń w wodach powierzchniowych polegają na dozowaniu znacznika w określonym punkcie naturalnego odbiornika i rejestracji jego stężenia w funkcji czasu i współrzędnych przestrzennych. Spośród dwóch możliwych technik dozowania znacznika do fazy wodnej – metody ciągłej lub impulsowej – wybrano metodę impulsową jako prostszą i nie wymagającą znacznych ilości znacznika.

Badania terenowe wymagają rejestracji stężenia znacznika w wielu punktach naturalnego odbiornika w związku z czym w pracach terenowych stosuje się ruchome stanowiska pomiarowe instalowane na łodziach. Do detekcji znaczników fluorescencyjnych używano fluorymetru Turner Design wyposażonego w zestaw filtrów optycznych i przepływową kuwetę pomiarową. Fluorymetr prowadzi ciągły pomiar stężenia znacznika w wodzie pompowanej przez kuwetę za pomocą pompy zanurzeniowej. Schemat ruchomego stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Schemat ruchomego stanowiska pomiarowego do detekcji stężenia znaczników w rzekach.

Wskazania fluorymetru rejestrowane są na taśmie rejestratora lub w pamięci komputera. Równolegle do zapisów fluorymetru prowadzone są z wykorzystaniem systemu GPS-Garmin (Global Position System) pomiary położenia łodzi. Dokładność lokalizacji łodzi wynosi 5 metrów.

### 4.2.2. Technika pomiarowa.

Technika pomiarowa stosowana w pracach doświadczalnych prowadzonych na dużych rzekach wynika ze specyfiki transportu zanieczyszczeń i procesów mieszania zachodzących między punktem dozowania (zrzutu zanieczyszczeń) a punktem ujednorodnienia się stężenia zanieczyszczeń w przekroju poprzecznym rzeki. W związku z tym eksperyment znacznikowy polega na rejestrowaniu rozkładów stężenia znacznika wzdłuż szerokości rzeki w różnych odległościach od punktu dozowania. Podczas pomiarów wartości współczynników dyspersji punkt dozowania umieszcza się zwykle w nurcie rzeki (zazwyczaj w pobliżu jej środka).

Pomiary rozkładów stężeń znacznika po szerokości rzeki wykonywane są w profilach pomiarowych wyznaczonych przy pomocy dwu lub więcej pław w różnych odległościach poniżej punktu dozowania.

Przyjmuje się układ współrzędnych przestrzennych o osiach:

- o,x współrzędna długości (wzdłuż rzeki)
- o,y współrzędna szerokości (wzdłuż profilu pomiarowego)

o,z - współrzędna głębokości

oraz współrzędna czasowa o,t - czas od chwili dozowania.

Podczas przechodzenia przez dany profil plamy znacznika łódź porusza się po profilu. Podczas każdego przejścia łodzi rejestrowany jest rozkład stężenia znacznika wzdłuż szerokości rzeki, z jednoczesną rejestracją czasu od chwili dozowania i położenia łodzi.

Pomiar na danym profilu trwa do czasu opuszczenia profilu przez znacznik. Procedura ta jest powtarzana w każdym profilu pomiarowym. W zależności od szybkości przepływu wody oraz intensywności procesów mieszania udaje się obmierzyć jedną łodzią do 5 profili pomiarowych. Schemat pomiaru przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Schemat pomiaru znacznikowego. A – profile pomiarowe, B – kursy łodzi pomiarowej.

Pomierzone rozkłady stężenia znacznika po szerokości rzeki są następnie próbkowane

ze stałym krokiem  $\Delta y$ . Wynikiem pomiaru na określonym profilu jest macierz (1)

gdzie:

c- stężenie znacznika,

i = 1, ...N;

j = 1, ...K;

W macierzy (1) wiersze są dyskretnymi rozkładami stężenia znacznika wzdłuż szerokości rzeki. Kolumny macierzy są wybranymi punktami rozkładów stężenia znacznika w czasie w określonym punkcie y<sub>i</sub>.

Na podstawie elementów macierz (1) wyznaczane są współczynniki dyspersji wzdłużnej, poprzecznej oraz względem czasu.

#### 4.3. Model adwekcyjno-dyspersyjny rozpływu zanieczyszczeń w rzece.

W Polsce, od wielu lat, badaniami i modelowaniem rozpływów wód powierzchniowych w różnych warunkach hydrologicznych i geograficznych zajmują się głównie dwa ośrodki: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie oraz Instytut Geofizyki PAN. W trakcie realizacji niniejszego grantu współpracowano z IMGW w zakresie opisu charakterystyk hydrologicznych i hydraulicznych badanych obiektów. W latach wcześniejszych współpracowano z IG-PAN w zakresie testowania metodami znacznikowymi modeli rozpływu wód w rzekach [7, 10].

Opis stosowanych w badaniach rozpływów zanieczyszczeń w rzekach modeli wraz z uzasadnieniem stosowanych uproszczeń i założeń znaleźć można w szeregu monografiach np. [14-17].

Najogólniej równanie dyfuzji turbulentnej opisujące rozpływ znacznika pasywnego w rzece dla przypadku trójwymiarowego 3D przedstawić można w układzie współrzędnych kartezjańskich w postaci:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \left( u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$
(2)

gdzie:

c- stężenie znacznika,

t - czas,

D<sub>x</sub>, D<sub>y</sub>, D<sub>z</sub> – główne składowe tensora dyfuzji turbulentnej,

u, v, w – składowe wektora prędkości wody.

W praktyce, w trakcie modelowania matematycznego rozpływu wprowadza się szereg uproszczeń i założeń. Przyjmuje się [5], że jeśli szerokość rzeki B przekracza ponad 30-krotnie średnią głębokość  $T_m$  to promień hydrauliczny przekroju rzeki  $R \approx T_m$ : gdzie promień hydrauliczny R = F/P (F – pole przekroju czynnego rzeki, P – obwód zwilżany) a głębokość średnia  $T_m = F/B$ .

Ogólne rozważania dotyczące hydrologii rzek [15] wskazują, że odległość od punktu dozowania  $L_{mu}$  przekroju, w którym występuje pełne wymieszanie znacznika po głębokości rzeki wynosi  $L_{mn} \approx 50 \text{ T}_m$  tj dla głębokości rzeki ok. 4 m odległość ta wynosi ok.200 m.

W badaniach znacznikowych pierwszy mierzony profil poprzeczny rzeki znajduje się zazwyczaj znacznie dalej od punktu dozowania.

Dla rzek o regularnych przekrojach poprzecznych nieduże zmiany głębokości mogą zostać pominięte, jak również poprzeczne składowe prędkości v.

Uśrednienie przepływu po głębokości rzeki oraz przyjęcie v = 0 upraszcza równanie (2) do postaci dwuwymiarowej:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}$$
(3)

Z warunkiem początkowym dla stężenia

$$c(0,0,t) = \frac{M}{T_m} \partial(t)$$

Dla obszaru przepływu, w którym można zaniechać wpływ brzegów rzeki na rozpływ zanieczyszczeń, rozwiązanie równania (3) dla znacznika pasywnego ma postać:

$$c = \frac{M}{4\pi T_m t \sqrt{D_x D_y}} \exp\left\{-\frac{(x - ut)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t}\right\}$$
(4)

Analiza równania (4) pozwala na wyznaczenie związków zachodzących między współczynnikami dyspersji  $D_i$  i odpowiednimi zmianami czasowymi wariancji rozkładu stężeń  $\sigma_i^2$  (wyliczonymi z macierzy pomiarów doświadczalnych (1)). Zachodzi zależność:

$$\frac{d}{dt}\sigma_i^2 = 2D_i \tag{5}$$

Porównanie wyliczonych z badań znacznikowych i modelowania dyspersji wzdłużnej  $D_x$  i poprzecznej  $D_y$  znacznika w rzece z danymi uzyskanymi z pomiarów stosunków izotopowych próbek wody pobieranych w odpowiednich przekrojach rzeki pozwoli na ocenę komplementarności obu stosowanych technik pomiarowych.

### 5. OPIS UZYSKANYCH WYNIKÓW.

Celem projektu było porównanie kilku stosowanych dotychczas technik wyznaczania dyspersji zanieczyszczeń w rzekach takich jak:

- metoda radioznacznikowa;
- metoda znaczników fluorescencyjnych;
- metoda modelowania przepływu i numerycznej oceny współczynników dyspersji;

z proponowaną do zastosowania metodyką bazującą na określeniu parametrów mieszania się wód w oparciu o pomiary zmian stosunków izotopowych wody w badanym przepływie.

Metoda ta może być stosowana w układach wodnych, w których w sposób naturalny występują różnice w stosunkach izotopowych wód.

Dla przeprowadzenia badań terenowych wybrano dwa akweny wodne:

- I. Układ rzek Narew-Bug i Zalew Zegrzyński jako przykład mieszania się wód dwóch dużych rzek w zbiorniku wodnym;
- II. Układ rzek BugoNarew-Wisła jako przykład mieszania się wód w układzie rzeka główna (Wisła) dopływ (BugoNarew).

Wstępne badania prowadzone w 2003 r. wykazały, że różnice składu izotopowego wody w Narwi i Bugu, w przekrojach leżących powyżej miejsca połączenia, są wystarczające do badania procesów mieszania ich wód w rejonie Zalewu Zegrzyńskiego i wynoszą dla sezonu

pomiarowego (maj – październik)  $\Delta_{sr}\delta D \approx 5,0 \pm 0,5; \Delta_{sr}\delta^{18}O \approx 0,5 \pm 0,1$ . Ze względu na znacząco lepszy stosunek wartości  $\Delta\delta D$  do błędu pomiaru (w systemie pomiarowym IRMS – D/H Isotope Ratio Mass Spectrometry/H-Device) w dalszej realizacji projektu badano jedynie rozkłady  $\delta D$  traktując ten właśnie parametr jako znacznik procesów mieszania [18].

W latach 2004 – 2006 prowadzono systematycznie (raz w miesiącu) pomiary stosunku izotopowego wodoru w próbkach wody pobieranych w wybranych punktach Bugu (most w Wyszkowie), Narwi (most w Wierzbicy) i Wisły (most w Warszawie). Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Zmiany składu izotopowego wodoru w rzekach Narew, Bug, Wisła - lata 2004 - 2006

Uzyskane dane potwierdzają możliwość wykorzystania – w określonym okresie roku – parametru  $\delta D$  jako wewnętrznego naturalnego znacznika do badania procesów mieszania się wód.

### 5.1. Badania układu wodnego Narew-Bug-Zalew Zegrzyński

Badania terenowe akwenu wodnego Narew-Bug-Zalew Zegrzyński przeprowadzono w okresie czerwiec – październik 2004 r. oraz wyrywkowo w lipcu 2005 r. W ramach projektu zespół badawczy Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie pod kierownictwem dr Jerzego Szkutnickiego opracował charakterystykę hydrologiczną i hydrauliczną koryta rzecznego w wybranych przekrojach pomiarowych Narwi, Bugu i Zalewu Zegrzyńskiego. Wyniki pomiarów IMGW przedstawiono w Załączniku I.

Mapę badanego odcinka rzek i Zalewu z zaznaczeniem profili pomiarowych, na których prowadzono oznaczanie charakterystyk hydrologicznych oraz składu izotopowego pobieranych próbek wody przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Mapa akwenu wodnego Narew-Bug-Zalew Zegrzyński, 1, 2, 3, 4, 5 – profile pomiarowe.

W celu sprawdzenia stałości składu izotopowego wody w punktach pomiarowych na Narwi (most w Wierzbicy) i Bugu (most w Wyszkowie) pobrano, w przekroju poprzecznym oraz po głębokości rzeki po 10 próbek z powierzchni wody wzdłuż profilu (most)oraz w trzech profilach pionowych (po głębokości) zlokalizowanych w osi oraz ¼ i ¾ szerokości rzek. Dla próbek pobranych zarówno z Narwi jak i Bugu nie stwierdzono różnic δD przekraczających błąd pomiarowy tj. 0,5.

W trakcie każdej sesji pomiarowej pobierano próbki wody z Bugu i Narwi oraz próbki wody z profili pomiarowych I – V usytuowanych po szerokości Zalewu.

Dla każdej z próbek oznaczano wartości  $\delta D_i$  stosunku izotopowego deuteru do wodoru. Próbki pobierano z odstępem ok. 100 m na głębokości 1,5 m od powierzchni wody.

Dla każdego profilu pomiarowego obliczano współczynnik zmieszania wód M z zależności

$$M = 1 - \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(1 - \frac{c_i}{\overline{c}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(6)

1

gdzie:

M – współczynnik zmieszania (równy 1 przy pełnym wymieszaniu wód w danym profilu); i = 1,...N numery próbek;

- $c_i = \Delta \delta D_0$   $\Delta \delta D_i$
- *c* wartość średnia c<sub>i</sub> dla danego profilu.

$$\Delta \delta \mathbf{D}_0 = \left| \delta D_B - \delta D_N \right|$$

 $\delta D_B i \delta D_N$  oznaczają stosunki izotopowe deuteru i wodoru odpowiednio dla Bugu i Narwi.

$$\Delta \delta \mathbf{D}_{\mathrm{i}} = \left| \delta D_{N} - \delta D_{i} \right|$$

Wartość średnia c dla danej sesji pomiarowej może być wyznaczona z bilansu wody w układzie rzecznym z zależności:

$$\overline{c} = \frac{c_B \cdot Q_B + c_N \cdot Q_N}{Q_B + Q_N} \tag{7}$$

gdzie:

c<sub>B</sub> i c<sub>N</sub> wartości c dla Bugu i Narwi w danym eksperymencie,

Q<sub>B</sub> i Q<sub>N</sub> natężenia przepływu wody w Bugu i Narwi.

Natężenia przepływu rzek w trakcie sesji pomiarowych przedstawiono w Tablicy 1.

Data pomiaru	Narew m <sup>3</sup> /s	Bug m <sup>3</sup> /s
08.07.2004	81,3	63,8
07.09.2004	77,5	77,8
21.10.2004	93,7	71,5
13.09.2005	56	60

Tablica 1. Natężenie przepływu (w profilach powyżej połączenia rzek)

Zarejestrowane rozkłady stosunków deuteru do wodoru w profilach pomiarowych dla kolejnych sesji badawczych przedstawiono na rys.7.



Rys.7. Rozkłady stosunków izotopowych deuteru do wodoru w przekrojach pomiarowych dla rzek Narew, Bug i Zalewu Zegrzyńskiego.

Zbiorcze zestawienie obliczonych współczynników zmieszania wód w poszczególnych sesjach badawczych oraz profilach pomiarowych przedstawiono w Tablicy 2 oraz na rys.8.

Tablica 2. Zestawienie współczynników zmieszania wód w poszczególnych sesjach badawczych oraz profilach pomiarowych dla rzek Bug i Narew.

	Pomiar 08.07.2004	Pomiar 07.09.2004	Pomiar 21.10.2004	Pomiar 13.09.2005		
	Współczynnik mieszania M					
Profil I	0,15	0,25	0,54	0,35		
Profil II	0,56	0,27	0,67	0,42		
Profil III	0,79	0,71	0,77	0,56		
Profil IV	0,75	0,76	0,90	0,61		
Profil V	0,70	0,87	0,94	0,78		



Rys.8. Zmiany współczynnika zmieszania wód Bugu i Narwi w funkcji odległości od punktu dozowania znacznika.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje, że procesy mieszania poprzecznego wód obydwu rzek zachodzą głównie w wąskim odcinku Zalewu Zegrzyńskiego na długości ok. 8 km od miejsca połączenia rzek.

W przekroju (profilu) nr 3 (Białobrzegi – Zegrze) obserwuje się już niewielkie różnice wartości δD w całym przekroju pomiarowym a współczynniki wymieszania osiągają wartości 0,7 -0,8. Wyniki przeprowadzonych badań terenowych wraz z ich omówieniem przedstawiono w pracach [18, 19]

5.1.1 Symulacje numeryczne przepływu wody w Zalewie Zegrzyńskim.

Ze względu na fakt, że nie uzyskano zgody na przeprowadzanie eksperymentów znacznikowych w Zalewie Zegrzyńskim (z uwagi na ujęcie wody pitnej) przeprowadzono obliczenia struktury przepływu wody w wybranym fragmencie Zalewu z wykorzystaniem metod obliczeniowej mechaniki płynów – CFD (Computational Fluid Dynamics).

W oparciu o kody obliczeniowe oprogramowania FLUENT, dla akwenu wodnego zawartego między połączeniem rzek Bugu i Narwi a profilem pomiarowym nr 2 na Zalewie, przeprowadzono obliczenia przepływu płaskiego (dwuwymiarowego – 2D) dla realnych natężeń przepływu rzek. Rozwiązano stosowny układ równań Navier'a – Stokesa i równania ciągłości wykorzystując standardową procedurę k-ε dla domknięcia układu równań dla przepływu turbulentnego. Ilość komórek obliczeniowych dla wybranego akwenu wynosiła 36 415, wymiary komórek 5,5 – 19,6 m<sup>2.</sup> Brzegi akwenu modelowano wykorzystując oprogramowanie Gambit.

Dla uzyskanej struktury przepływu, wykorzystując metodykę Lagrange'a [20] badania trajektorii oraz czasów przebywania w danym akwenie bezmasowych cząstek cieczy, obliczono numeryczne rozkłady czasów przebywania wód Bugu i Narwi w badanym akwenie wodnym.

Wyznaczone rozkłady czasów przebywania (RCP) wód Bugu i Narwi przedstawiono na rys.9.



Bug



**BugoNarew** 

	Bug	Narew	BugoNarew
c <sub>śr</sub> [godz]	14,3	17.1	15,7
wbw [-]	0,0319	0,0041	0,0239

Rys.9. Rozkłady czasów przebywania dla rzeki Narew, Bug i BugoNarew oraz zestawienie tabelaryczne średniego czasu przebywania i wariancji bezwymiarowej wyznaczonej przy użyciu kodów obliczeniowej mechaniki płynów CFD.

Charakter uzyskanych rozkładów czasów przebywania (RTD) wody w wybranym odcinku Zalewu Zegrzyńskiego wskazuje na zbliżony do tłokowego ich przepływ z małą intensywnością procesów mieszania (małe wartości wariancji bezwymiarowych rozkładu czasów przebywania).

Przeprowadzono symulację numeryczną eksperymentu znacznikowego przypisując wodom Bugu i Narwi różne temperatury  $T_1$  i  $T_2$ . Wcześniejsze badania [7] pokazały, że różnica temperatur może być również z powodzeniem stosowana jako znacznik wewnętrzny opisujący intensywność procesów mieszania. Uzyskany numerycznie rozkład temperatur wody w profilu

## pomiarowym II przedstawiono na rys.10.



Rys.10. Numeryczne rozkłady temperatur wody w profilu pomiarowym II.

Obliczony zgodnie z procedurą dla danego rozkładu temperatur współczynnik zmieszania wód wynosi M = 0,56. Odpowiedni współczynnik zmieszania wód dla danego profilu pomiarowego wyznaczony na podstawie pomiaru stosunków izotopowych wodoru wyniósł M = 0,55.

## 5.2. Badania układu wodnego BugoNarew – Wisła.

Badania terenowe akwenu wodnego BugoNarew – Wisła przeprowadzono w okresie czerwiec – lipiec 2005 r. Mapę badanego odcinka rzek, z zaznaczeniem profili pomiarowych, na którym prowadzono oznaczenia składu izotopowego pobieranych próbek wody oraz poprzeczne rozkłady stężeń znacznika przedstawiono na rys.11.



Rys.11. Mapa akwenu wodnego BugoNarew-Wisła, I, II, III, IV - profile pomiarowe



Rys.11a. Przekroje poprzeczne Wisły w profilach pomiarowych.

Natężenia przepływów rzek Wisły i BugoNarwi w okresie pomiarów oraz szerokości profilów pomiarowych i średnie głębokości przedstawiono w Tablicy 3.

Tablica 3. Zbiorcze zestawienie danych – natężenie przepływu, szerokość profilu i średnia głębokość - dla rzek Wisły i BugoNarwi.

	Wisła			BugoNarew				
Data	Natężenie		Szerokość	Średnia	Natężenie		Szerokość	Średnia
Duta	przepływu	Profil	profilu	głębokość	przepływu	Profil	profilu	głębokość
	$[m^3/s]$		[m]	[m]	$[m^{3}/s]$		[m]	[m]
)5	682	Ι	250	4,7	399	Ι	250	4,7
.20(		II	210	3,1		Π	210	3,1
.06		III	210	3,1		III	210	3,1
14		IV	210	3,0		IV	210	3,1
)5	361 II III IV	Ι	250	2,7	106.2	Ι	250	2,7
.07.20(		II	210	3,1		II	210	3,3
		III	210	3,1	120,3	III	210	3,3
13		IV	210	3,0		IV	210	3,0

W trakcie pierwszej sesji pomiarowej w czerwcu 2005 r. nastąpiło znaczące zwiększenie natężenia przepływu oraz podniesienie poziomu wód, związane z nagłymi obfitymi opadami, w związku z czym uzyskane dane pomiarowe nie są w pełni reprezentowane dla badanego akwenu (niestabilność warunków przepływu). W drugiej sesji pomiarowej w lipcu 2005 r. warunki pomiarów były stabilne.

W trakcie sesji pomiarowej pobierano próbki wody z BugoNarwi i Wisły (powyżej punktu połączenia rzek) oraz próbki wody z wyznaczonych profili pomiarowych usytuowanych po szerokości Wisły.

Próbki pobierano z odstępem około 50 m na głębokości 0,5 m poniżej powierzchni rzeki. Dla każdej z próbek oznaczono wartości  $\delta D_i$  stosunku izotopowego deuteru do wodoru. Analogicznie jak w przypadku Zalewu Zegrzyńskiego dla każdego profilu pomiarowego wyznaczono zmiany po szerokości rzeki wielkości c<sub>i</sub> oraz obliczono odpowiednie współczynniki zmieszania wód. Zarejestrowane rozkłady stosunków deuteru do wodoru w profilach pomiarowych przedstawiono na rys.12.





Zbiorcze zestawienie obliczonych współczynników zmieszania wód w profilach pomiarowych w kolejnych sesjach badawczych przedstawiono w Tablicy 4 oraz na rys 13.

Tablica 4. Zestawienie współczynników zmieszania wód w poszczególnych sesjach badawczych oraz profilach pomiarowych dla rzek BugoNarew i Wisła.

Bugonarew – Wisła	14.06.2005 (Q	$Q = 1083 \text{ m}^3/\text{s}$	13.07.2005 (Q = 487,3 m <sup>3</sup> /s)		
Profile	Odległość od punktu dozowania [m]	М	Odległość od punktu dozowania [m]	М	
Profil I	497	0,1912	673	0,2604	
Profil II	1515	0,4983	1920	0,5370	
Profil III	2490	0,5204	3875	0,5566	
Profil IV	3930	0,7104	8765	0,7587	



Rys.13. Zmiany współczynnika zmieszania wód BugoNarwi i Wisły w funkcji odległości od punktu dozowania znacznika.

Wyniki przeprowadzonych badań terenowych przedstawiono w pracach [21, 22].

W warunkach stabilnego przepływu (Q  $\approx 490 \text{ m}^3/\text{s}$ ) umiarkowane wymieszanie wód – współczynnik zmieszania M = 0,76 – zostaje osiągnięte w odległości ok. 8 – 9 km od punktu

#### dozowania.

W warunkach intensywnego przepływu wody ( $Q \approx 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) odległość dobrego zmieszania wód zmniejsza się do 4 km.

5.2.1. Badania znacznikowe akwenu wodnego BugoNarew – Wisła.

Badania znacznikowe akwenu wodnego BugoNarew-Wisła w rejonie Modlina przeprowadzono w lipcu 2005 r. W trakcie pomiarów przeprowadzono dwa eksperymenty znacznikowe, w trakcie których znacznik – Rodamina B – dozowana była kolejno do BugoNarwi (powyżej ujścia do Wisły) oraz do Wisły, powyżej punktu dopływu BugoNarwi – rys.11. Znaczniki dozowano impulsowo w głównym nurcie rzek.

5.2.1.1. Pomiar rozpływu wód BugoNarwi w Wiśle

Po zadozowaniu znacznika do głównego nurtu BugoNarwi rozpoczynano pomiary rozkładu czasowo-przestrzennego znacznika w wybranych profilach pomiarowych I, II, III, IV. Ze względów technicznych zarejestrowano plamy przepływu znacznika w przekrojach I, III i IV.

W tablicach 5, 6, 7 przedstawiono zarejestrowane macierze rozkładu stężenia znacznika w poszczególnych trawersach łodzi pomiarowej w danym przekroju poprzecznym rzeki. Dla każdego przelotu łodzi wyznaczono położenie i czas od momentu dozowania, średnie stężenia znacznika y<sub>śr</sub> oraz obliczono wariancję rozkładu poprzecznego stężenia znacznika  $\sigma_y^2$  [m<sup>2</sup>].

W oparciu o wyznaczone rozkłady przestrzenne stężenie znacznika, określono kształt plamy przepływającego znacznika w danym profilu pomiarowym z zaznaczeniem linii izostężenia. Wyniki dla profili pomiarowych I, III, IV przedstawiono na rys.14.



**PROFIL I** 



**PROFIL III** 



## **PROFIL IV**

Rys.14. Wyznaczony kształt plamy przepływającego znacznika w danym profilu pomiarowym z zaznaczeniem linii izostężenia dla dozowania na BugoNarwi.

Dla każdego profilu pomiarowego wyznaczono przelot łodzi, w którym obserwowano maksymalne stężenie znacznika dla danej plamy oraz określono odpowiadającą mu wariancję rozkładu przestrzennego znacznika  $\sigma_y^2$  i czas od momentu dozowania. Odpowiednie wartości przedstawiono w Tablicy 8.

Tablica 8. Wartości maksymalne stężenia znacznika dla danej plamy oraz określone odpowiadające mu wariancje rozkładu przestrzennego znacznika  $\sigma_y^2$  i czas od momentu dozowania dla każdego profilu pomiarowego.

	Profil I	Profil III	Profil IV
c <sub>max</sub>	578	129	55
$\sigma_y^2 [m^2]$	640,3	846,93	2608,8
t <sub>max</sub> [s]	2234	7156	14358

Dla każdego profilu pomiarowego wyznaczono krzywe zmienności maksimum stężenia znacznika w funkcji czasu

$$c_{imax} = f(t)$$

Wyniki przedstawiono na rys.15.



Rys.15. Krzywe zmienności maksimum stężenia znacznika w funkcji czasu dla poszczególnych profili pomiarowych

Dla każdej z krzywych obliczono wariancję rozkładu czasów przepływu znacznika przez dany profil pomiarowy  $\sigma_t^2$  [s<sup>2</sup>] (po długości rzeki). Obliczone wartości wynoszą odpowiednio:

dla profilu I - 
$$\sigma_t^2 = 97\ 297\ [s^2]$$
  
III -  $\sigma_t^2 = 347\ 422\ [s^2]$   
IV -  $\sigma_t^2 = 1\ 918\ 834\ [s^2]$ 

W oparciu o wyznaczone dla poszczególnych profili wartości  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_t^2$  oraz  $t_{max}$  obliczono współczynniki dyspersji znacznika dozowanego do BugoNarwi w badanym odcinku Wisły.

Wartości współczynników dyspersji obliczono z zależności:

dla dyspersji poprzecznej

$$D_{y} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_{y}^{2}}{dt} \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma_{y,j}^{2} - \sigma_{y,i}^{2}}{t_{j} - t_{i}} \quad \text{i, j-numery profili pomiarowych}$$

t<sub>i</sub>, czasy przejścia maksimum stężenia znacznika przez i – ty profil.

Uwzględniając zależność między odległością między profilami a czasem x = t  $\cdot$  u, gdzie

u – prędkość średnia przepływu wody, otrzymujemy dla dyspersji podłużnej.

$$D_{x} = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_{x}^{2}}{dt} \approx \frac{1}{2} \frac{u^{2}(\sigma_{t2}^{2} - \sigma_{t1}^{2})}{t_{2} - t_{1}} = \frac{u^{3}}{2} \frac{\sigma_{t2}^{2} - \sigma_{t1}^{2}}{x_{2} - x_{1}}$$

gdzie xi - odległości profili pomiarowych od punktu dozowania.

W Tabeli 9 przedstawiono obliczone wartości współczynników dyspersji: wzdłużnej i poprzecznej

		głość od Średni czas unktu transportu [s]	,	Współczynniki dyspersji		
Nr. przekroju	Odległość od punktu dozowania [m]		Srednia prędkość	Podłużnej [m <sup>2</sup> /s]	Poprzecznej [m <sup>2</sup> /s]	
Ι	673	2234	0,70	24,8	0,15	
III	3875	7156	0,70	13,2	0,02	
IV	8765	14358	0,77	54,6	0,12	

Tabela 9. Obliczone wartości współczynników dyspersji: wzdłużnej i poprzecznej.

Do profilu pomiarowego I wody BugoNarwi płyną wąską rozciągniętą strugą przy prawym brzegu Wisły. Fakt ten znajduje potwierdzenie w rozkładzie stosunków izotopowych wodoru przedstawionych na rys.12. (profil I). Na profilu IV plama znacznika osiąga brzegi rzeki w związku z czym, dalsze stosowanie przyjętego modelu rozpływu plamy staje się nieuzasadnionym. Dla badanego akwenu wodnego cechą charakterystyczną jest duża zmienność współczynników dyspersji w funkcji długości rzeki. Zjawisko to może być częściowo tłumaczone zmiennym kształtem i geometrią rzeki na badanym odcinku.

5.2.1.2. Pomiar rozpływu wód Wisły poniżej ujścia BugoNarwi.

Po zadozowaniu znacznika do głównego nurtu Wisły przeprowadzono pomiary rozkładu czasoprzestrzennego znacznika w profilach pomiarowych I, II, III, IV. Plamy przepływu znacznika zarejestrowano w przekrojach poprzecznych I, II i IV (rys.16.)

W Tablicach 10, 11, 12 przedstawiono zarejestrowane w eksperymencie rozkłady stężenia znacznika w poszczególnych trawersach łodzi pomiarowej w danym profilu pomiarowym. Analogicznie do eksperymentu poprzedniego wyznaczono wartości  $\sigma_{yi}^2$ ,  $\sigma_{max}^2$ ,  $y_{imax}$ ,  $t_{imax}$ ,  $y_{max}$ ,  $c_{max}$ .



## **PROFIL I**



**PROFIL II** 



## **PROFIL IV**

Rys.16. Wyznaczony kształt plamy przepływającego znacznika w danym profilu pomiarowym z zaznaczeniem linii izostężenia.

W Tablicy 13 przedstawiono odpowiednie wartości dla profili pomiarowych I, II, IV.

Tablica 13. Wartości maksymalne stężenie znacznika dla danej plamy oraz określono odpowiadającą mu wariancję rozkładu przestrzennego znacznika  $\sigma_y^2$  i czas od momentu dozowania dla każdego profilu pomiarowego.

	Profil I	Profil II	Profil IV
c <sub>max</sub>	904	222	52
$\sigma_y^2 [m^2]$	492,2	785,5	2272,7
t <sub>max</sub> [s]	1021	4941	12117

Wyznaczone krzywe zależności zmienności stężenia maksymalnego w funkcji czasu dla poszczególnych profili przedstawiono na rys.17.





Obliczono wariancje rozkładu czasów przepływu znacznika przez dany profil pomiarowy.

Dla profilu:

$$I - \sigma_t^2 = 104\ 633\ [s^2]$$
  
II -  $\sigma_t^2 = 371\ 947\ [s^2]$   
IV -  $\sigma_t^2 = 663\ 106\ [s^2]$ 

W oparciu o wyznaczone wartości  $\sigma_y^2$ ,  $\sigma_t^2$  oraz  $t_{max}$  analogicznie do poprzedniego eksperymentu, obliczono współczynniki dyspersji znacznika dozowanego do Wisły w badanym odcinku rzeki. Wyniki obliczeń przedstawiono w Tablicy 14

		egłość od Średni czas punktu transportu [s]	Średnia prędkość [m/s]	Współczynniki dyspersji		
Nr. przekroju	Odległość od punktu dozowania [m]			Podłużny [m²/s]	Poprzeczny [m <sup>2</sup> /s]	
Ι	673	1021	0,41	26,6	0,24	
Π	1920	4941	0,7	36,4	0,03	
IV	8765	12117	0,77	7,65	0,1	

Tablica 14. Obliczone wartości współczynników dyspersji: wzdłużnej i poprzecznej.

## 5.2.2. Oszacowanie drogi pełnego wymieszania.

Jedną z ważnych charakterystyk rzek jest tz. długość idealnego wymieszania  $L_m$  tj. droga, na której wprowadzony do rzeki znacznik ulegnie ujednorodnieniu w przekroju poprzecznym rzeki. Brak jest dobrze teoretycznie uzasadnionych wzorów opisujących wartości  $L_m$  w funkcji parametrów przepływu. W oparciu o dane doświadczalne opracowano dla rzek różnych geometrii wzory empiryczne [1] opisujące zależności  $L_m$  od podstawowych parametrów geometrycznych cieku wodnego.

Dla dozowania znacznika w nurcie (w pobliżu środka) dla dużych rzek stosowana jest zależność

$$L_m \approx 10 \sqrt{\frac{B^3}{h}}$$

gdzie: B – szerokość rzeki, h – głębokość rzeki.

Dla Wisły w badanym odcinku przepływu B  $\approx$  200 m oraz h  $\approx$  4. Odpowiednia obliczona wartość L<sub>m</sub> wynosi L<sub>m</sub>  $\approx$  14 km.

#### 6. WNIOSKI

- Przy występowaniu różnicy ok. 5 ‰ lub większej w stosunkach izotopowych deuteru 2H do wodoru 1H w wodach łączących się dwóch akwenów wodnych, metoda badania stosunków izotopowych może być z powodzeniem wykorzystywana do oceny intensywności procesów mieszania się wód.
- Uzyskane metodą pomiaru stosunków izotopowych odległości dobrego mieszania się wód znajdują się w zgodzie z analogicznymi wielkościami uzyskanymi metodą znacznikową lub numeryczną symulacją eksperymentu znacznikowego.
- 3. Uzyskane w eksperymencie polowym oraz oszacowane numerycznie lub w oparciu o zależności empiryczne drogi dobrego mieszania wynoszą odpowiednio  $L_m \approx 8 \text{ km}$  dla Zalewu Zegrzyńskiego oraz  $L_m \approx 14 \text{ km}$  dla Wisły w rejonie Modlina.
- 4. Na podstawie eksperymentów znacznikowych obliczono współczynniki dyspersji wzdłużnej oraz poprzecznej w Wiśle. W badanym akwenie wodnym dla natężenia przepływu  $Q \approx 487,3 \text{ m}^3$ /s zmieniają się one odpowiednio w przedziałach:  $D_x \approx 7,65 \text{ m}^2$ /s  $\div 54,6 \text{ m}^2$ /s,  $D_y \approx 0,02 \text{ m}^2$ /s  $\div 0,24 \text{ m}^2$ /s w zależności od profilu pomiarowego.
- 5. Dane uzyskane w eksperymencie, w którym znacznik dozowano impulsowo do wód BugoNarwi ( $D_x \approx 13.2 \text{ m}^2/\text{s} \div 54.6 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_y \approx 0.02 \text{ m}^2/\text{s} \div 0.15 \text{ m}^2/\text{s}$ ) wskazują, że obserwuje się niską dyspersję poprzeczną zanieczyszczeń niesionych z wodami BugoNarwi w wodach Wisły.
- 6. Dla oceny intensywności procesów mieszania się wód zachodzących w danym akwenie celowym wydaje się korzystanie z komplementarnych metod badawczych np. stosunków izotopowych SI i znacznikowych lub SI i numerycznej symulacji przepływu dla wzajemnej walidacji uzyskiwanych wyników.
- 7. Metoda pomiaru stosunków izotopowych wody pozwala na globalny opis procesów mieszania się wód w badanym akwenie tj. współczynników zmieszania w wybranych profilach drogi pełnego wymieszania itp. Metoda ta nie pozwala jednakże na określenie mechanizmu zachodzących procesów. Metoda znacznikowa, z kolei, pozwala na bardziej szczegółowy opis procesu mieszania tj. wyznaczenie lokalnych współczynników dyspersji wzdłużnej i poprzecznej, kształtu plamy znacznika itp. jednakże metoda ta jest trudniejsza eksperymentalnie i technicznie. W przypadkach akwenów, na których zlokalizowane są ujęcia wodne dodatkowym kłopotem jest fakt trudności z uzyskaniem pozwolenia na przeprowadzenie na nich eksperymentów znacznikowych.

#### 7. LITERATURA CYTOWANA

- [1]. "Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology", IAEA, Vienna, (1983)
- [2]. W.A. Brand: "High precision isotope ratio monitoring techniques mass spectrometry" J. Mass Spec. (1996), 31, 225-235.
- [3]. C. Kendall, T.B. Coplen: "Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination" Anal. Chem. (1985), 57, 1437-1440.
- [4]. C.A.M. Brenninkmeijer, P. Kraft, W.G. Mook: "Oxygen isotope fractionation between CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>0" Isotope geoscience 1 pp. 181-190 (1983)
- [5]. L. K. Dawydow, A.A. Dmitrijew, N.G. Konkina: "Hydrologia ogólna", PWN, Warszawa, str. 285 – 319 (1979)
- [6]. S. Szpilowski, A. Owczarczyk: "Investigation on dispersion of effluents by using radiotracer method" Environmental Protection Engineering 3, pp 5 – 17, (1983)
- [7]. W. Czernuszenko, P. Lebiecki, A. Owczarczyk, S. Szpilowski: "Współczynniki wymieszania w rzekach" Wiadomości IMGW, 4, 28 (1986)
- [8]. S. Szpilowski, A. Owczarczyk, R. Wierzchnicki, R. Strzelecki: "Application of tracer method for investigation of dilution and decay of petrochemical effluent discharge into big river" Water, Air and Soil Pollution, 78 199 – 213, (1994)
- [9]. A. Owczarczyk: "The tracer study on polutants dispersion in unregulated rivers" IAEA Symposium Isotope Techniques in Water Resources Development and Management, Vienna, 10 – 14 May, IAEA – SM – 361/19P, (1999)
- [10]. P. M. Rowiński. J.J. Napiórkowski, A. Owczarczyk: "Transport of passive admixture in a multichannel river system – the Upper Narew case study. Part 2. Application of dye tracer method" Ecohydrology, Hydrobiology, Vol. 3. No 4. pp. 381 – 388, (2003)
- [11]. E. Iller: "Badania znacznikowe w inżynierii procesowej" WNT, Warszawa, (1992)
- [12]. S. Szpilowski, A. Owczarczyk, A.G. Chmielewski: "Effluent dispersion in nature water receivers (tracer examination) INCT – 2156/VI. (1993)
- [13]. E.R. Holley "Field Tests for Evaluating Hydraulic Transport Processes in Rivers" Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Monographic Volume E-2 (325) Warszawa, pp. 39 - 51, (2001)

- [14]. J. Boczar: "Estymacja parametrów modeli matematycznych rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w rzekach". Sympozjum ISEM (Międzynarodowe Stowarzyszenie Modelowania Ekologicznego), Warszawa, (1986),
- [15]. W. Czernuszenko, P. Rowiński: "Water Quality Hazards and Dispersion of Pollutants" wyd. Springer, (2005)
- [16]. M. Mitosek; "Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska" PWN, Warszawa, str. 356 – 366, (2001)
- [17]. R. Szymkiewicz: "Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach" PWN, Warszawa, (2000)
- [18]. A. Owczarczyk, R. Wierzchnicki, A. Dobrowolski, J. Palige, S. Ptaszek: "Wykorzystanie naturalnie istniejących różnic w składzie izotopowym wód rzecznych jako znacznika procesów mieszania w systemach rzeka - dopływ" Konferencja Technika Jądrowa w Przemyśle, Medycynie i Ochronie Środowiska, Kraków, (2005), Mat. Konferencyjne, str. 133 – 138.
- [19]. A. Owczarczyk, R. Wierzchnicki: "Water isotope composition as a tracer for the study of mixing processes in rivers. Part I. Preliminary Studies. Annual report INCT, pp. 125 – 126, (2004)
- [20]. J. Palige, A. Dobrowolski, A. Owczarczyk, A.G. Chmielewski, S. Ptaszek: "Zastosowania obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) do modelowania struktury przepływu w osadnikach prostokątnych" Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 4s, str. 72 – 75, (2003)
- [21]. A. Owczarczyk, R. Wierzchnicki, R. Zimnicki, A. Dobrowolski, J. Palige, S. Ptaszek: "Water isotope composition as a tracer for stusy of mixing processes in rivers. Part II. Determination of mixing degrees in the tributary – main river systems" Annual Report INCT, pp 116 – 118, (2005)
- [22]. A. Owczarczyk, R. Zimnicki, J. Palige, S. Ptaszek: "Application of water isotope composition as a tracer for studyof mixing processes in the tributary – main river systems "International Conference TRACER 4, Grenoble, France, 3 – 5 October, (2006)

61