

## Załącznik 2a

# Autoreferat o osiągnięciach w działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej

## Spis treści

1. Imię i nazwisko	str. 2
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	str. 2
3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych	str. 3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki	str. 3
a) Tytuł osiągnięcia naukowego	str. 3
b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia	str. 3
c) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników	str. 5
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	str. 35
a) Przed uzyskaniem stopnia doktora	str. 36
b) Po uzyskaniu stopnia doktora	str. 38
6. Podsumowanie dorobku naukowego	str. 48
7. Działalność dydaktyczna	str. 50
8. Działalność organizacyjna	str. 55
9. Zestawienie dorobku	str. 57

**1. Imię i nazwisko: Katarzyna Ewa Weinerowska-Bords**

**2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe**

- a) 1997 r. – **dyplom ukończenia studiów wyższych magisterskich** na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej, na kierunku Inżynieria Środowiska, specjalizacja: inżynieria sanitarna (z wynikiem celującym) i **uzyskanie stopnia mgr inż.** Tytuł pracy dyplomowej: *Projekt pralni dla Szpitala dla Psychicznie i Nerwowo Chorych w Gdańsku-Wrzeszczu, ul. Srebrniki*, promotor: mgr inż. Andrzej Nurek.
- b) 1998 r. – **dyplom ukończenia rocznych Studiów Uzupełniających** na kierunku Inżynieria Środowiska na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej (w ramach Studium Doktoranckiego „Geotechnika i Inżynieria Środowiska”).
- c) 2001 r. - ukończenie Studium Doktoranckiego „Geotechnika i Inżynieria Środowiska” kierunek: Inżynieria Środowiska i **uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, specjalność Hydraulika.** Tytuł rozprawy doktorskiej: *Zagadnienia odwrotne w hydraulice koryt otwartych*. Promotor: prof. dr hab. inż. Romuald Szymkiewicz. Politechnika Gdańska, Wydział Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska. Rozprawa doktorska została wyróżniona.
- d) 2010 r. – ukończenie Kursu Pedagogicznego organizowanego w Politechnice Gdańskiej.
- e) 2015 r. – ukończenie kursu: Szkoła Tutorów I stopnia, przeprowadzonego przez Collegium Wratislaviense i uzyskanie Certyfikatu Tutora.
- f) 2016 r. – ukończenie III edycji certyfikowanego kursu *Praktyk Tutoringu* Collegium Wratislaviense (Szkoła Tutorów II stopnia) i uzyskanie Certyfikatu Praktyka Tutoringu.

### 3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

- a) 1.10.1997 do 2.07.2001 r. słuchaczka Studium Doktoranckiego „Geotechnika i Inżynieria Środowiska”, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Środowiska; doktorantka w Katedrze Hydrauliki i Hydrologii
- b) 1.08.2001 do 30.09.2015 r. - adiunkt w Katedrze Hydrauliki i Hydrologii (obecnie: Katedra Hydrotechniki) Wydziału Budownictwa Wodnego i Inżynierii Środowiska (od 2004 r. Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska) Politechniki Gdańskiej  
*W okresie : marzec 2007 – marzec 2008 – roczna przerwa (choroba i urlop macierz.)*
- c) 1.10.2015 do chwili obecnej – starszy wykładowca w Katedrze Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

### 4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. W Dz.U. z 2016 r. poz. 1311)

#### a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji jednotematycznych: **Modelowanie przepływów nieustalonych w przewodach pod ciśnieniem w warunkach uderzenia hydraulicznego.**

#### b) Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia

1. **Weinerowska-Bords K.** (2006): Viscoelastic model of waterhammer in single pipeline – problems and questions, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, vol. 53, no. 4, 331-351, **punktacja wg MNiSW = 6 pkt**; (wg 2018 r. **14 pkt**)

*Publikacja samodzielna, udział 100%*

2. **Weinerowska-Bords K.** (2006): Accuracy and parameter estimation of elastic and viscoelastic models of water hammer, TASK Quaterly, vol. 11, no. 4, 383-395, **punktacja wg MNiSW = 6 pkt**; (wg 2018 r. **10 pkt**)

*Publikacja samodzielna, udział 100%*

3. **Weinerowska-Bords K.** (2011): Space-time conservation method applied to numerical solution of water hammer equations, TASK Quaterly, vol. 15, no. 3-4, 353-368, **punktacja wg MNiSW = 9 pkt;** (wg 2018 r. **10 pkt**)

*Publikacja samodzielna, udział 100%*

4. **Weinerowska-Bords K.** (2015): Alternative approach to convolution term of viscoelasticity in equations of unsteady pipe flow, Journal of Fluid Engineering-ASME, vol. 137, no.5, doi:10.1115/1.4029573 **punktacja wg MNiSW= 30 pkt., IF= 1.283**

*Publikacja samodzielna, udział 100%*

5. Kodura A., Stefanek P., **Weinerowska-Bords K.** (2017): An experimental and numerical analysis of water hammer phenomenon in slurries, Journal of Fluid Engineering-ASME, vol. 139, no.12, FE-17-1134. doi:10.1115/1.4037678, **punktacja wg MNiSW= 30 pkt., IF= 1.915**

*Mój wkład w powstanie tej pracy: opracowanie modelu matematycznego przebiegu uderzenia hydraulicznego w rurociągu szlamowym, wraz z jego implementacją numeryczną, przeprowadzeniem obliczeń i opracowaniem wyników symulacji numerycznych oraz na współudziale w redagowaniu treści artykułu (części teoretycznej, części dotyczącej modelu numerycznego i wniosków). Mój udział szacuję na 40%.*

6. Kodura A., Kubrak M., Stefanek P., **Weinerowska-Bords K.** (2018): An experimental investigation of pressure wave celerity during the transient slurry flow, In: Kalinowska M., Mrokowska M., Rowiński P. (eds) Free Surface Flows and Transport Processes, GeoPlanet: Earth and Planetary Science, Springer, Cham, 259-269. doi:10.1007/978-3-319-70914-7\_16, **punktacja wg MNiSW= 10 pkt.**

*Mój wkład w powstanie tej pracy: współuczestnictwo w wykonaniu pomiarów terenowych i opracowaniu wyników. Mój udział szacuję na 35%*

7. Kodura A., **Weinerowska-Bords K.**, Artichowicz W., Kubrak M., Stefanek P., (2019): In situ verification of numerical model of water hammer in slurries, Journal of Fluid Engineering-ASME, vol.141. no.8: 081115-081115-8. doi:10.1115/1.4042959 **punktacja wg MNiSW= 30 pkt., IF= 1.915**

*Mój wkład w powstanie tej pracy: opracowanie modelu matematycznego przebiegu uderzenia hydraulicznego w sieci przewodów szlamowych, wraz z jego implementacją numeryczną, przeprowadzeniem obliczeń i opracowaniem wyników symulacji numerycznych (dla epizodów pomierzonych i hipotetycznych) oraz na współredagowaniu treści artykułu (całość rozdziału poświęconego aspektom numerycznym). Mój udział szacuję na 40%.*

Tab. Zestawienie publikacji wraz z punktacją i udziałem procentowym habilitanta

Pozycja	Procent udziału w publik.	Liczba pkt (wg roku publ.)	Liczba pkt (wg roku publ.) z uwzgl. udziału	Liczba punktów (wg 2018 r.)	Liczba punktów (wg 2018 r.) z uwzgl. udziału	Impact Factor	Liczba cytowań w publ. indeks. na WoS	Liczba cytowań wg WoS	Liczba cytowań wg Google Scholar
Ad.1	100%	6	6	14	14	0	10		19
Ad.2	100%	6	6	10	10	0	11		13
Ad.3	100%	9	9	10	10	0			
Ad.4	100%	30	30	30	30	1.283	14	14+1*	19
Ad.5	40%	30	12	30	12	1.915	1	1+1*	3
Ad.6	35%	10	3,5	10	3,5	0			1
Ad.7*	40%	30*	12*	30	12	1.915			
<b>Suma</b>		<b>121</b>	<b>78,5</b>	<b>134</b>	<b>91,5</b>	<b>5,113</b>	<b>36</b>	<b>15+2*</b>	<b>55</b>

\* Publikacja z roku 2019, jeszcze nieuwzględniona na WoS

Mój średni udział w publikacjach z IF wynosi 60% (średni udział we wszystkich publikacjach: 73,5%).

### c) Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników

Analiza przepływów nieustalonych w przewodach pod ciśnieniem stanowi istotną i rozbudowaną grupę zagadnień, odnoszących się zarówno do szeroko pojętej inżynierii środowiska, jak i szeregu innych dziedzin (w tym m.in. różnorodnych gałęzi przemysłu czy też medycyny). Ze względu na odmienną specyfikę zachodzących zjawisk oraz ich potencjalne skutki, z grupy tej wyodrębnia się kategorię przepływów o najbardziej dynamicznych zmianach w czasie, określaną mianem uderzenia hydraulicznego. Pod tym pojęciem rozumie się gwałtowne zmiany ciśnienia, powstające na skutek raptownych zmian prędkości przepływu, przemieszczające się w przewodzie z bardzo dużą prędkością w postaci fali zaburzenia o bardzo dużej amplitudzie i wysokiej częstotliwości oscylacji. Uderzenia hydrauliczne są szczególnie istotne w inżynierii i technice sanitarnej (np. w sieciach i instalacjach wodociągowych i grzewczych, w instalacjach przeciwpożarowych), hydroenergetyce, instalacjach i sieciach przemysłowych, hydrotechnicznych i przeznaczonych do hydrotransportu (w tym m.in. w ciśnieniowych rurociągach tranzytowych czy też na platformach wiertniczych), w rolniczych sieciach nawadniających, czy też w

elektrowniach słonecznych i nuklearnych (m.in. Samani i Khayatzadeh 2003, Wang, Jiang i Lan 2014, Cristoffanini i in. 2014, Leishear 2017 i in.). Ich opis matematyczny bywa także wykorzystywany w zagadnieniach transportu np. do modelowania gwałtownych zmian natężenia ruchu pojazdów (np. Teodoro i in. 2018). Szczególną, choć odmienną rolę odgrywają w zagadnieniach natury medycznej (biomechaniki), np. w problemach propagacji fali ciśnienia w naczyniach krwionośnych oraz w narządach mowy (m.in. Van de Vosse i Stergiopoulos 2011, Alastruey i in. 2012, Sciamarella i Artana 2009) .

Pomimo szerokiego wachlarza wymienionych dziedzin, zjawisko uderzenia hydraulicznego bywa często uznawane z jednej strony za „niszowe”, z drugiej – za powszechnie znane, wystarczająco dobrze rozpoznane i w konsekwencji nie wartę głębszych analiz. Jest to prawdopodobnie pokłosiem silnego zakorzenienia w funkcjonujących standardach obliczeniowych formuł opracowanych jeszcze na przełomie XIX i XX wieku. Należą do nich: 1) opublikowany w 1878 r. wzór Kortewega na prędkość rozprzestrzeniania się fali zaburzenia, 2) przypisywany Żukowskiemu (lub Żukowskiemu i Allieviemu) a datowany na 1898 r. wzór umożliwiający wyznaczenie maksymalnego przyrostu ciśnienia oraz 3) sformułowany w 1913 r przez Allievięgo, a uzupełniony przez Stricklera i Gibsona (w latach 20. XX w.) „klasyczny” opis matematyczny uderzenia hydraulicznego w postaci układu równań bilansu masy i równania dynamicznego przepływu ściśliwej cieczy w jednorodnym przewodzie sprężystym. Chociaż wspomniany opis odnosił się wówczas jedynie do pojedynczych przewodów, w których uderzenie hydrauliczne przejawia się oscylacjami ciśnienia o regularnej obwiedni i ekstremum przypadającym zawsze na pierwszą amplitudę, do dziś bywa on traktowany jako obowiązujący kanon oszacowań głównych parametrów uderzenia hydraulicznego.

Tymczasem zapoczątkowany w XX wieku i trwający do dziś intensywny rozwój techniki i technologii spowodował konieczność zrewidowania poglądów na przebieg i możliwości modelowania uderzenia hydraulicznego. Możliwość precyzyjniejszej analizy zjawiska na drodze eksperymentalnej (szczególnie w odniesieniu do dokładności pomiaru szybkozmiennych ciśnień w przewodzie), a także coraz lepsze i skuteczniejsze algorytmy obliczeniowe, wykazały istotną niezgodność między obserwacjami (pomiarami) a obliczeniami dokonywanymi przy wykorzystaniu „klasycznego” opisu, co z kolei kazało wnioskować, że zjawisko uderzenia hydraulicznego ma bardziej złożoną naturę niż pierwotnie zakładano. W konsekwencji, konieczna stała się zatem modyfikacja modeli obliczeniowych

w celu umożliwienia odwzorowania wpływu czynników wcześniej nie uwzględnianych. W odpowiedzi na wspomniane wyżej zapotrzebowanie nastąpiła fala intensywnego rozwoju badań naukowych, mających na celu uzyskanie poprawy zgodności pomiędzy wynikami eksperymentów pomiarowych i obliczeniowych. W aktualnych rozważaniach dotyczących uderzenia hydraulicznego, prowadzonych równolegle w kilku ośrodkach na świecie, wyraźnych jest kilka zasadniczych kierunków badań, z których do najistotniejszych należą m.in.: analiza mechanizmów dyssypacji energii w czasie uderzenia hydraulicznego (m.in. Szymkiewicz i Mitosek 2007), ocena roli i możliwości opisu członu tarcia w warunkach przepływu nieustalonego (m.in. Brunone i in. 1991, 2000, 2004, Zarzycki 1994, Pezzinga 2000, 2009, Bergant i in. 2001 i in.), opis matematyczny zjawiska w przewodach z materiałów lepkosprężystych (m.in. Covas i in. 2002, 2004, 2005), analiza interakcji między cieczą a ścianką przewodu (Tijsseling 1996, Wiggert i Tijsseling 2001, Keramat i in. 2011), analiza uderzenia hydraulicznego w przypadkach bardziej złożonych układów przewodów (zmiana średnicy, połączenia przewodów z różnych materiałów, przewód z lokalną nieszczelnością, sieci przewodów itp., np. McInnis i Karney 1995, Meniconi i in. 2012) lub w przypadku przepływu mieszanin (m.in. Samson i Biello 2016, Zambrano i in. 2016). Złożoność i różnorodność aspektów związanych z uderzeniem hydraulicznym sprawia jednak, że jak dotąd brakuje pełnej i usystematyzowanej analizy wszystkich problemów powstających na etapie tworzenia i eksploatacji modeli obliczeniowych, szczególnie w odniesieniu do samej postaci modelu matematycznego, kwestii identyfikacji jego parametrów oraz stosowanych metod numerycznego rozwiązania równań.

Ta właśnie złożoność i wieloaspektowość zagadnień towarzyszących zjawisku uderzenia hydraulicznego, przy jednoczesnym silnym jego umocowaniu w kontekście praktycznym, stały się jednym z głównych powodów, dla którego – za namową ówczesnego Kierownika mojej Katedry, prof. Romualda Szymkiewicza - postanowiłam podjąć tę tematykę badawczą. W praktyce wiązało się to z rozszerzeniem wachlarza zainteresowań naukowych o nowy kierunek, gdyż w ramach pracy doktorskiej, a także w ciągu kilku lat bezpośrednio po uzyskaniu stopnia doktora (do ok. 2005 roku) zajmowałam się przepływami ze swobodną powierzchnią, publikując w tym zakresie około dziesięć prac i prowadząc m.in. badania w ramach międzynarodowego programu *US-Poland Technology Transfer Program* (**Autoreferat, pkt.5**). Podejmując nową tematykę badawczą w pierwszej kolejności, na podstawie dokonanego wówczas przeze mnie przeglądu bogatej bibliografii (liczącej ponad sto pozycji literaturowych o różnym charakterze), dokonałam rozpoznania i

usystematyzowania różnorodnych aspektów związanych z modelowaniem zjawiska uderzenia hydraulicznego. Było to niezbędne dla potrzeb sprecyzowania celu badań i sformułowania tezy badawczej.

### Sformułowanie tezy i celu badań

Dokonane przeze mnie rozpoznanie wykazało, że na zagadnienie uderzenia hydraulicznego warto spojrzeć z szerszej perspektywy i rozróżnić dwie zasadnicze płaszczyzny, na których można rozpatrywać to zjawisko – płaszczyznę zastosowań praktycznych i płaszczyznę rozważań teoretycznych.

Patrząc na problem z czysto **praktycznego** punktu widzenia, do najistotniejszych zadań należy niewątpliwie zaliczyć 1) **przewidywanie potencjalnych maksymalnych i minimalnych wartości ciśnienia** oraz 2) **identyfikację miejsc najbardziej narażonych na wystąpienie nadmiernych amplitud ciśnienia**, co z kolei pozwala na dobór rodzaju i lokalizacji urządzeń zabezpieczających oraz opracowanie strategii sterowania urządzeniami pracującymi w systemie w celu niedopuszczenia do przekraczania dopuszczalnych wartości ciśnienia (np. dopasowanie minimalnych czasów otwierania/zamykania zasuw, włączania/wyłączania pomp, czy też opracowania strategii działania na wypadek awarii).

Prawidłowe rozpoznanie i realizacja wymienionych wyżej celów w większości rzeczywistych sytuacji praktycznych nie jest jednak zadaniem prostym i trywialnym. Poprawnego rozwiązania zazwyczaj nie da się sprowadzić jedynie do zastosowania dwóch podstawowych wzorów – Kortewega (na prędkość fali ciśnienia w przewodzie sprężystym) i Żukowskiego (na maksymalny przyrost ciśnienia), co mogłoby być wystarczającą aproksymacją jedynie w przypadku pojedynczego przewodu sprężystego o stałej średnicy. Przykładem świadczącym o ciągłej powszechności przeświadczenia o adekwatności tak uproszczonego opisu zagadnienia jest zapis w normie PN-EN 13480:2012, zalecający ocenę bezpieczeństwa systemu właśnie na podstawie dwóch wspomnianych wcześniej wzorów. Tymczasem obserwacje w trakcie badań eksperymentalnych przeprowadzone dla różnych konfiguracji przewodów wykazują m.in., że (m.in. Covas i in. 2005, Malesińska 2002 i in.):

- wartość prędkości fali ciśnienia często nie jest zgodna z wartością uzyskiwaną ze wzoru Kortewega, a co więcej, jest zmienna w trakcie trwania zjawiska;



- maksymalny przyrost/spadek ciśnienia niekoniecznie musi wystąpić w pierwszej amplitudzie, a obwiednia charakterystyki ciśnienia nie zawsze ma regularny kształt;
- wartość maksymalnego przyrostu/spadku ciśnienia nie zawsze zgadza się z wartością uzyskaną ze wzoru Żukowskiego (może być zarówno wyższa jak i niższa od wartości „teoretycznej”, w zależności od konkretnej sytuacji).

Co więcej, miejsce wystąpienia najmniej korzystnych zmian ciśnienia w sieciach przewodów nie zawsze jest oczywiste, gdyż ostateczne rozkłady ciśnienia są efektem współdziałających wielu czynników wynikających ze specyfiki konkretnego układu przewodów.

A zatem, pozostając nadal na płaszczyźnie czysto **praktycznego** spojrzenia na zagadnienie, w kontekście przedstawionych wcześniej celów, postulowane jest poszukiwanie takich metod obliczeniowych, które z jednej strony będą relatywnie proste i łatwe w aplikacji, a z drugiej umożliwią prawidłowe odtworzenie nie tylko wartości pierwszej amplitudy ciśnienia, ale także pełnych charakterystyk zmienności ciśnienia w trakcie przepływu nieustalonego. Metody te powinny zapewniać akceptowalną zgodność obliczonych charakterystyk ciśnienia z ich odpowiednikami pomiarowymi (rzeczywistymi). Inaczej rzecz ujmując, z praktycznego punktu widzenia pożądanym jest model prawidłowo **odtworzący końcowy efekt** zjawiska uderzenia hydraulicznego, bez konieczności pełnego i szczegółowego rozpoznania i odwzorowania ogółu powodujących go mechanizmów i czynników, nawet za zgodą pewnych istotnych uproszczeń opisu zjawiska, w tym także wprowadzania wielkości zastępczych. Ideowo takie podejście można porównać do modelowania „konceptualnego”, w odróżnieniu od podejścia „hydrodynamicznego”, w którym istotę stanowi prawidłowe rozpoznanie fizykalnych podstaw analizowanych procesów.

Na drugim biegunie, stanowiącym niejako opozycję w stosunku do podejścia „praktycznego”, jest podejście **teoretyczne**. Rozpatrując zjawisko z tego punktu widzenia, za najistotniejsze aspekty należy uznać:

- **poprawny opis matematyczny zjawiska**, będący efektem rozpoznania poszczególnych mechanizmów determinujących jego przebieg i prawidłowego ich odzwierciedlenia w formie równań,
- **prawidłową identyfikację parametrów** charakteryzujących zjawisko,
- **poprawne rozwiązanie równań** stanowiących opis matematyczny zjawiska, związane z wyborem modeli numerycznych o wysokiej dokładności, umożliwiających minimalizację efektów o charakterze czysto numerycznym,

- **uzyskanie zgodności** obliczonych charakterystyk ciśnienia z obserwowanymi,
- **opracowanie modelu o dostatecznym stopniu uniwersalności.**

Rozpoznanie fizycznej strony mechanizmów determinujących przebieg uderzenia hydraulicznego w celu stworzenia pełnego i poprawnego opisu matematycznego jest punktem wyjścia do opracowywania modeli „hydrodynamicznych”, stanowiących podstawę naukowego podejścia do analizy zjawiska i alternatywę dla podejścia „konceptualnego”. Z kolei zrozumienie różnorodności czynników wpływających na przebieg zjawiska oraz efektów numerycznych modyfikujących rozwiązanie jest elementem umożliwiającym prawidłowe tworzenie modelu matematycznego oraz późniejszą poprawną interpretację wyników jego działania.

Analiza dotychczasowego stanu wiedzy skłoniła mnie do stwierdzenia, że pomimo bardzo dużej liczby prac badawczych poświęconych uderzeniu hydraulicznemu, prawidłowe rozwiązywanie zagadnień związanych z tym zjawiskiem jest ciągle sprawą otwartą. U podstaw wspomnianego stanu rzeczy leży szereg czynników, spośród których do najistotniejszych zaliczyłam:

- **duży stopień skomplikowania przebiegu zjawiska**, szczególnie w przypadku rzeczywistych układów przewodów,
- **brak pełnego rozpoznania wszystkich mechanizmów kształtujących przebieg zjawiska** uderzenia hydraulicznego,
- **podobny efekt działania różnych mechanizmów** determinujących przebieg uderzenia hydraulicznego,
- **podobieństwo (pod względem jakościowym) wpływu efektów numerycznych** na uzyskiwane wyniki obliczeń (kształt charakterystyk ciśnienia) do efektów wywoływanych przez mechanizmy o podłożu fizycznym (opory ruchu, lepkość ścianek przewodu),
- **duży stopień trudności prowadzenia pełnej i poprawnej identyfikacji parametrów modelu** (m.in. ze względu na wspomniane wcześniej równoczesne współistnienie różnych mechanizmów, a co za tym idzie – relatywnie dużą liczbę współdziałających parametrów o różnym charakterze i trudność w ich „wyekstrahowaniu”),
- **swoiste „przywiązanie” wielu badaczy do klasycznej metody numerycznego rozwiązywania równań** ruchu nieustalonego, często bez analizy konsekwencji tego wyboru dla uzyskiwanych rozwiązań.

Prezentowane w literaturze przykłady obliczeniowe w przeważającej mierze wykorzystują metodę charakterystyk, przy której uzyskanie rozwiązania o wysokiej dokładności jest w praktyce trudne. Za wystarczający dowód poprawności prezentowanych analiz bardzo często uznaje się osiągniętą zgodność pomiędzy charakterystykami obliczeniowymi a wynikami eksperymentu. Tymczasem zgodność ta jest często skutkiem efektów numerycznych a nie naturalną konsekwencją poprawnego opisu zjawiska. Liczba parametrów występujących w równaniach (szczególnie w przypadku przepływu w przewodach z tworzyw sztucznych) jest relatywnie duża, a identyfikacja ich wartości odbywa się zazwyczaj dla każdego przypadku indywidualnie, na drodze dopasowania ich wartości do potrzeb wyników eksperymentów pomiarowych w konkretnym zadaniu. Mankamentem takiego podejścia jest jednorazowy charakter tego doboru, bez przełożenia na bardziej uniwersalny wymiar, który umożliwiłby stosowanie prezentowanych procedur także do innych przypadków.

Na drugim biegunie prezentowanych publikacji naukowych z kolei można znaleźć takie, w których opis matematyczny opiera się na modelach o relatywnie wysokim stopniu złożoności, co najmniej dwuwymiarowych, z zastosowaniem złożonych modeli poszczególnych mechanizmów (np. oporów przepływu), aproksymowanych funkcjami wysokich rzędów. Opis matematyczny uwzględnia więcej czynników, ale pojawiają się w nim dodatkowe wielkości, często zmienne w czasie i przestrzeni, trudne do określenia w przypadkach rzeczywistych układów przewodów. Prowadzi to w efekcie do modeli o wysokiej liczbie parametrów. Parametry te mają zazwyczaj różnorodny, często niemierzalny, charakter, co powoduje konieczność ich dopasowywania metodami przybliżonymi lub z wykorzystaniem optymalizacji, bez odniesienia do strony fizycznej zjawisk. Pomiar eksperymentalne umożliwiają poznanie finalnego efektu (np. wynikowych charakterystyk ciśnienia), który w rzeczywistości jest wypadkową kilku mechanizmów działających równocześnie. Stopień skomplikowania równań definiujących tak skonstruowany model matematyczny wymaga z kolei stosowania odpowiednio złożonych metod rozwiązania oraz poprawnego formułowania większej liczby warunków brzegowych, co z kolei utrudnia wykorzystanie takiego podejścia dla praktycznych zastosowań o szerszym i bardziej uniwersalnym zasięgu.

Podsumowując, można zatem stwierdzić, że dwie wspomniane wcześniej płaszczyzny postrzegania zjawiska uderzenia hydraulicznego – praktyczna i teoretyczna, pozostają w stosunku do siebie w swoistej opozycji. Zestawiając ze sobą z jednej strony wymienione

problemy wynikające ze stopnia złożoności analizowanych zjawisk i konsekwencji tego faktu dla aspektów obliczeniowych, a z drugiej strony – ich praktyczne znaczenie i realną potrzebę opracowania skutecznego algorytmu rozwiązania, celowe wydało się poszukiwanie podejścia o charakterze pośrednim. Taki „quasi-konceptualny” model, stanowiący swoistą kombinację podejścia hydrodynamicznego i konceptualnego, mógłby pozwolić na uzyskiwanie zadowalających wyników w relatywnie prosty sposób, przy jednoczesnym uniknięciu osiągnięcia zgodności wyników obliczeń z pomiarami na skutek nadmiernych błędów numerycznych, czy też „jednorazowego” dopasowania wartości dużej liczby parametrów nie posiadających fizycznej interpretacji.

### Teza i cel badań

W kontekście przedstawionych wcześniej rozważań, **postawiono następującą tezę:**

1. Kluczowe znaczenie dla modelowania uderzenia hydraulicznego ma fakt, że wiele mechanizmów determinujących sumaryczny obraz tego zjawiska ma jakościowo podobny wpływ na wypadkowe charakterystyki ciśnienia, a jednostkowy udział poszczególnych procesów (mechanizmów) jest w praktyce niemożliwy do pełnego „wyzolowania” z wypadkowych charakterystyk ciśnienia.
2. Pomimo wspomnianej sytuacji możliwe jest opracowanie relatywnie prostego modelu uderzenia hydraulicznego, pozwalającego na dobre odtworzenie skutków zjawiska w różnorodnych przypadkach. W modelu tym niektóre z mechanizmów opisane mogą być w sposób uproszczony, a część parametrów może mieć konceptualny charakter. W przypadku niektórych parametrów możliwe jest jednak opracowanie procedury identyfikacji o bardziej uniwersalnym charakterze niż tylko odniesionej do każdego przypadku indywidualnie.

### Za cel prowadzonych badań przyjęłam zatem:

1. Rozpoznanie i usystematyzowanie zagadnień dotyczących możliwości i problemów powstających przy modelowaniu matematycznym zjawiska uderzenia hydraulicznego w przewodach ciśnieniowych (z uwzględnieniem przewodów z tworzyw sztucznych),
2. Opracowanie relatywnie prostego i uniwersalnego modelu umożliwiającego obliczanie przepływów nieustalonych (symulację przebiegu uderzenia hydraulicznego) w pojedynczych przewodach pod ciśnieniem i ich sieciach, wraz

z jego aplikacją do typowych zagadnień inżynierskich oraz epizodów uderzenia hydraulicznego pomierzonych w warunkach laboratoryjnych i w skali rzeczywistej,

3. Weryfikację postawionych hipotez badawczych.

### Realizacja celu badawczego

W pierwszym etapie badań stworzyłam narzędzie numeryczne umożliwiające symulację przebiegu uderzenia hydraulicznego w pojedynczym przewodzie z materiału sprężystego, czyli w klasycznym układzie „zbiornik-przewód-zawór” (ZPZ), rozszerzony w kolejnym etapie do przypadku prostych sieci przewodów pod ciśnieniem (umożliwiających m.in. symulację uderzenia hydraulicznego w układach przewodów o różnych charakterystykach, czy też w przewodzie z lokalną nieuszczelnością). Kod źródłowy programu komputerowego napisałam w języku FORTRAN, a do opisu matematycznego zjawiska w pierwszej kolejności wykorzystałam klasyczny układ równań przepływu nieustalonego dla cieczy ściśliwej w przewodzie sprężystym (m.in. Wylie i Streeter, 1978), rozszerzany w późniejszych etapach o różne modyfikacje, umożliwiające uwzględnienie dodatkowych czynników wpływających na przebieg zjawiska. W programie umożliwiłam zadawanie różnych warunków brzegowych (w postaci stałej lub zmiennej wartości ciśnienia/prędkości/natężenia przepływu na brzegach rozpatrywanego układu) w zależności od rodzaju węzła brzegowego (zbiornik, swobodny wypływ, przekrój z zaworem itp.). Jako warunki początkowe przyjąłam warunki przepływu ustalonego w przewodzie (sieci przewodów), obliczane w programie na podstawie układu równań ruchu ustalonego.

Do rozwiązania układu równań ruchu nieustalonego wykorzystałam kilka różnych metod numerycznych (umożliwiłam w programie wybór metody przez użytkownika) – metodę charakterystyk (powszechnie wykorzystywaną przez wielu autorów), schemat czteropunktowy metody różnic skończonych (z jego szczególną postacią – schematem Preissmanna) oraz mniej popularną, ale posiadającą bardzo dobre własności numeryczne – metodę czasoprzestrzennych objętości skończonych, zastosowaną wcześniej przeze mnie do rozwiązania zagadnienia odwrotnej transformacji przepływów ([Autoreferat, pkt.5](#)).

Korzystając z opracowanego modelu przeprowadziłam szereg symulacji numerycznych, w których odtworzyłam przebiegi różnorodnych epizodów uderzenia hydraulicznego, dla których dostępne były opublikowane wyniki pomiarów z eksperymentów przeprowadzonych przez innych autorów. Wykorzystałam zarówno wyniki pomiarów dla

prostych przypadków pojedynczych przewodów, jak również dla układów bardziej złożonych – ze zmianą średnicy lub z lokalną nieszczelnością. Na tym etapie podjęłam również trwającą do dziś współpracę z dr Apoloniuszem Kodurą z Politechniki Warszawskiej, który prowadził już wówczas wartościowe badania eksperymentalne w Laboratorium swojego Wydziału. Część z przeprowadzonych wyników eksperymentów została mi wówczas udostępniona dla potrzeb oceny możliwości odtworzenia ich na drodze symulacji numerycznych. Współpraca ta zaowocowała w kolejnych latach powstaniem kilku pierwszych wspólnych publikacji, niewchodzących w skład ocenianego dzieła, wyszczególnionych w kolejnej części Autoreferatu (**Autoreferat, pkt.5** oraz **Załącznik 3 pkt. II.C**). We wszystkich wspomnianych wspólnych publikacjach byłam odpowiedzialna za całość prac związanych z modelowaniem matematycznym (w tym implementacją numeryczną modelu, jego aplikacją do konkretnego przypadku, identyfikacją parametrów modelu, prowadzeniem symulacji, oceną i dyskusją wyników), podczas gdy dr Kodura odpowiadał za część eksperymentalną. W części związanej z modelowaniem numerycznym na tym etapie analiz wykorzystałam uproszczony model uderzenia hydraulicznego, oparty na równaniach przepływu cieczy w przewodzie sprężystym z quasi-ustalonym członem tarcia. Wyniki naszych prac zostały przedstawione na odbywających się równolegle II Kongresie Inżynierii Środowiska w Lublinie (prezentacja dra Kodury) oraz Międzynarodowym Sympozjum WMHE w Austrii (moja prezentacja). Ponadto przygotowałam referat poświęcony problemom występującym przy modelowaniu przebiegu uderzenia hydraulicznego, przedstawiony przeze mnie na Seminarium naukowym odbywającym się w 2005 r na Politechnice Gdańskiej, zorganizowanym przez Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej oraz Sekcję Inżynierii Sanitarnej KILiW PAN, którego byłam współorganizatorem. W 2006 w Zeszytach monograficznym Politechniki Gdańskiej ukazała się także moja samodzielna publikacja nawiązująca do tej tematyki (**Autoreferat, pkt. 5** oraz **Załącznik 3 pkt. II.C**).

Ten etap prac umożliwił wstępną ocenę wpływu wartości parametrów modelu oraz dokładności schematu numerycznego na jakość uzyskiwanych wyników. Do najważniejszych wniosków zaliczyć należy jednak potwierdzenie możliwości relatywnie „dobrego” matematycznego odwzorowania przebiegu uderzenia hydraulicznego w różnych prostych wariantach przepływu, o ile owa poprawność odwzorowania będzie oceniana jedynie w kontekście zgodności pomiarów z obliczeniem. Wykazano, że w niektórych przypadkach możliwe jest uzyskanie zadowalającej zgodności wyników obliczeń z pomiarami nawet jeśli zastosowany model nie odzwierciedla prawidłowo mechanizmów zachodzących w trakcie

przepływu (np. gdy model dla przewodów sprężystych zastosowany zostanie do symulacji uderzenia hydraulicznego w przewodzie w tworzywa sztuczne, lub gdy zastosuje się „zastępczą” wartość prędkości fali zaburzenia i wprowadzi dyfuzję numeryczną).

Kolejnym etapem prac było rozszerzenie modelu obliczeniowego o możliwość **odwzorowania efektów lepkosprężystego oddziaływania ścianek przewodu**. W tym celu wyprowadziłam ponownie znane w literaturze równania uderzenia hydraulicznego w przewodach z materiałów lepkosprężystych, dokonałam analizy istotności poszczególnych członów równania, a następnie zaimplementowałam je w programie obliczeniowym. Do opisu lepkosprężystych własności materiału przewodu (ściślej do stworzenia modelu konstytutywnego dla materiału przewodu) wykorzystałam powszechnie akceptowany do wspomnianych celów model Kelvina-Voigta. **Za wkład własny na tym etapie uważam zastosowanie do rozwiązania układu równań dwóch schematów numerycznych - schematu czteropunktowego oraz schematu czasoprzestrzennych objętości skończonych, a także wykonanie szczegółowej analizy własności obu schematów numerycznych.** W publikacjach literaturowych odnoszących się do przypadków przewodów lepkosprężystych praktycznie zawsze stosowana jest metoda charakterystyk. Zastosowanie innych schematów obliczeniowych z grupy metod różnic, elementów lub objętości skończonych, ograniczone jest do bardzo nielicznych prac poświęconych uderzeniu hydraulicznemu w przewodach sprężystych i za wyjątkiem pojedynczych publikacji, nie towarzyszy im żadna analiza własności schematów numerycznych.

**W celu rozpoznania własności numerycznych schematów zastosowałam metodę równania zmodyfikowanego (Fletcher 1991), umożliwiającą ocenę zgodności i dokładności schematu numerycznego oraz określenia rodzaju błędu numerycznego występującego w rozwiązaniu.** Sprawdzenie **zgodności** wymaga zastąpienia wartości węzłowych funkcji w równaniu aproksymującym ich rozwinięciami w szeregi Taylora wokół badanego węzła. W efekcie uzyskuje się równania zmodyfikowane, w których występują człony rozwiązywanych równań różniczkowych oraz człony dodatkowe. Te dodatkowe człony równań zmodyfikowanych stanowią tzw. błąd obcięcia, determinują własności numeryczne schematu oraz pozwalają ocenić jakiej wielkości i jakiego rodzaju błędy (dyspersji czy dyfuzji numerycznej) dominują w rozwiązaniu.

Do oceny **stabilności** schematów numerycznych zastosowałam metodę Neumanna. Stabilność metody numerycznej związana jest z jej zdolnością do wytłumiania

przypadkowych błędów. W metodzie Neumanna błędy na danym poziomie czasowym w węzłach rozwija się w skończony szereg zespolony Fouriera, a następnie bada się zachowanie pojedynczej składowej tego szeregu przy przejściu z poziomu czasowego  $n$  na poziom  $n+1$ . Jeśli w wyniku takiego przejścia amplituda fali jest tłumiona, to schemat jest stabilny. Jeśli następuje jej wzmocnienie – schemat cechuje się niestabilnością. Dla potrzeb analizowanych schematów **określiłam postacie tzw. macierzy wzmocnienia i dokonałam oceny stabilności na podstawie modułu największej wartości własnej tej macierzy**. Porównanie własności schematów numerycznych wyraźnie wykazało wpływ rodzaju schematu oraz przyjmowanych wartości parametrów numerycznych na uzyskane rozwiązanie ze względu na występowanie w rozwiązaniu błędów numerycznych o różnym charakterze i wielkości. Porównanie analizowanych schematów z metodą charakterystyk wykazało, że ta ostatnia nie jest optymalną metodą rozwiązania zagadnienia. Metoda charakterystyk jest schematem dokładnym tylko w przypadku gdy liczba Couranta jest równa jedności. Spełnienie tego warunku jest w praktyce bardzo trudne, chociażby ze względu na brak możliwości wyznaczenia dokładnej wartości prędkości fali. Jeśli liczba Couranta nie jest równa jedności, w rozwiązaniu pojawiają się błędy pochodzenia numerycznego. W błędzie obcięcia pierwszy człon zawiera pochodną drugiego rzędu, co oznacza że schemat odznacza się dokładnością pierwszego rzędu, a w rozwiązaniu dominuje błąd dyfuzji numerycznej. Jeśli  $Cr < 1$ , schemat jest stabilny ale dyssypatywny, czyli powoduje nadmierne wygładzenie rozwiązania, które często bywa błędnie interpretowane jako efekt tarcia lub oddziaływań lepkosprężystych. Gdy  $Cr > 1$ , schemat traci stabilność.

Schemat czasoprzestrzennych objętości skończonych, podobnie jak metoda charakterystyk, jest schematem jawnym, co w konsekwencji oznacza jego warunkową stabilność (dla  $Cr < 1$ ), ma jednak spośród analizowanych schematów najwyższą dokładność (drugiego rzędu) i najmniejsze błędy numeryczne. Schemat czteropunktowy, z kolei, jest absolutnie stabilny, a przy odpowiednio dobranych wartościach parametrów numerycznych, niezależnie od wartości liczby Couranta może również zapewnić wysoką dokładność rozwiązania.

Na tym etapie prac badawczych przeprowadziłam kolejny szereg symulacji dla zadań znanych z publikacji innych autorów, tym razem z uwzględnieniem efektów lepkosprężystych. Szczególnej analizie poddałam kwestię **identyfikacji parametrów modelu**, którą uznałam za kluczową. **Za swój autorski wkład na tym etapie pracy badawczej uważam wnikliwą analizę różnych aspektów związanych z doбором parametrów**



**modelu, zazwyczaj pomijanych w publikacjach, bagatelizowanych lub sprowadzanych do kwestii o drugorzędym znaczeniu, w tym szczególnie kwestie związane z jednoznacznością i unikalnością rozwiązania.** Swoją dyskusję odniosłam zarówno do spostrzeżeń natury ogólnej, jak i do przykładów prezentowanych w publikacjach innych autorów.

**Uwieńczeniem całości przedstawionych wcześniej etapów analiz stały się opublikowane wówczas trzy artykuły, wchodzące w skład zgłoszonego do oceny dzieła.** W pierwszej kolejności pojawiły dwa, które uważam za bardzo istotne w swoim dorobku naukowym:

Ad. 1) „*Viscoelastic model of waterhammer in single pipeline – problems and questions*” (Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 2006);

Ad.2) “*Accuracy and parameter estimation of elastic and viscoelastic models of the water hammer*” (TASK QUATERLY, 2007),

Chociaż opublikowane w czasopismach mniejszej rangi (lista B), zostały zauważone przez czołowych autorów zajmujących się tematyką uderzenia hydraulicznego (m.in. Pezzinga, Ferrante, Brunone, Meniconi i in.) i doczekały się relatywnie dużej liczby cytowań, w tym także w czasopismach indeksowanych przez Web of Science (około dwudziestu na WoS).

We wspomnianych publikacjach przedstawiłam szereg wniosków z przeprowadzonych wcześniej analiz. Do najistotniejszych zaliczam kwestię identyfikacji tych parametrów modelu, które nie są bezpośrednio mierzalne, a niekiedy nie mają także swej czytelnej interpretacji fizycznej. Do takich wielkości należą parametry opisujące funkcję pełzania materiału przewodu, czyli czasy retardacji i moduły sprężystości odniesione do poszczególnych elementów modelu Kelvina-Voigta. Jeśli do opisu zachowań lepkosprężystych zastosowany zostanie  $N$ -elementowy model Kelvina-Voigta (co jest relatywnie często stosowane w szeregu publikacji innych autorów), to już z tego tylko powodu w modelu obliczeniowym pojawi się  $2*N$  parametrów pozbawionych interpretacji fizycznej, wymagających identyfikacji. Jeśli będzie ona przeprowadzana jedynie na podstawie dopasowania wyników obliczeń do wyników pomiarów, możliwe jest uzyskanie bardzo dobrej zgodności, nawet przy nieprawidłowym odwzorowaniu wszystkich innych mechanizmów. Wspomniane parametry mają bowiem charakter konceptualny, mogą więc być stosunkowo łatwo dopasowane na drodze optymalizacji lub metodą prób i błędów, przy czym uzyskane rozwiązanie nie tylko nie będzie miało jednoznacznego charakteru, ale będzie miało

zastosowanie tylko do jednego konkretnego przypadku, dla którego zostało opracowane. Wartości tak dobranych parametrów mogą w sobie „ukryć” wszystkie mankamenty metody rozwiązania (w tym także potencjalne błędy numeryczne), co uniemożliwia prawidłową interpretację wyników obliczeń. W takiej sytuacji uzyskanie zgodności między pomiarami a obliczeniami nie świadczy o prawidłowym rozwiązaniu zagadnienia.

Drugą istotną grupą wniosków były te odnoszące się do określania wartości prędkości fali zaburzenia. Wykazano, że pozyskiwanie jej wartości drogą jej obliczania ze wzoru Kortewega, nie prowadzi do pozytywnych rezultatów. Już samo precyzyjne określenie wartości modułu sprężystości materiału przewodu jest w praktyce trudne, szczególnie w przypadku tworzyw sztucznych. Badania innych autorów wykazały, że chociaż parametry materiałowe mogą być określane eksperymentalnie na podstawie badań wytrzymałościowych, to uzyskiwane wyniki zależą m.in. od wielkości próbki i historii naprężeń. A to oznacza, że posilkowanie się tego rodzaju analizami nie będzie skutecznym rozwiązaniem, ze względu na brak możliwości przełożenia wyników uzyskiwanych dla niewielkich rozmiarów próbek na rzeczywistych rozmiarów przewody. Posilkowanie się wartościami modułów sprężystości publikowanymi w literaturze też okazuje się nieskuteczne. W jednym ze wspomnianych artykułów (Ad. 1) wykazałam na drodze prostej analizy, że w efekcie przyjętych różnych wartości modułu sprężystości (ale zawsze z zakresu odpowiedniego dla danego rodzaju materiału) można uzyskać różnice w obliczonej wartości prędkości fali nawet rzędu 100 m/s, co następnie powoduje różnice w maksymalnych amplitudach ciśnienia rzędu 0,1 MPa. Jeśli wziąć dodatkowo pod uwagę efekty lepko-sprężyste wpływające na prędkość rozprzestrzeniania się fali zaburzenia oraz obserwowaną na podstawie wyników eksperymentów zmienność prędkości fali ciśnienia w trakcie epizodu uderzenia hydraulicznego (nawet o ok. 10%), wartości prędkości fali obliczane na podstawie formuły Kortewega nie powinny być traktowane jako miarodajny sposób określania tego parametru. Są one przeciętnie o około 10-25% niższe od wartości pomierzonych. Analizy wykazały, że najlepszym sposobem prawidłowej identyfikacji tej wielkości jest jego określenie na podstawie długości okresu fali ciśnienia zaobserwowanej w wyników pomiarów. Okres ten w ogólnym przypadku ulega pewnym zmianom w trakcie trwania zjawiska, ale wyznaczona na jego podstawie uśredniona prędkość fali może być uznana za reprezentatywną wartość parametru, gdyż prowadzi do dobrych wyników obliczeń. Oczywiście powyższe rozważania dotyczą sytuacji, gdy mamy do czynienia z jednorodnym przewodem. W przypadku, gdy przewód zmienia swą charakterystykę (np. średnicę, grubość ścianki lub materiał),

obliczeniowo taki układ powinien być potraktowany jak sieć przewodów, o odmiennej charakterystyce i tym samym odmiennych prędkościach rozprzestrzeniania się fali zaburzenia.

W wyniku wspomnianych wcześniej analiz opublikowałam także artykuł skoncentrowany na jednej z zastosowanych do rozwiązania metod numerycznych:

*Ad.3) “Space-time conservation method applied to numerical solution of water hammer equations” (TASK Quaterly, 2011).*

W pracy tej przedstawiłam metodę czasoprzestrzennych objętości skończonych odniesioną do zagadnienia przepływu nieustalonego w sprężystych przewodach pod ciśnieniem. Została szczegółowo opisana idea metody, wyprowadziłam równania końcowe, przedstawiłam analizę własności schematu obliczeniowego i dyskusję znaczenia parametrów numerycznych. W artykule znalazły się także przykłady testów numerycznych, w których zilustrowano własności schematu. W pracy zwrócono szczególną uwagę na rolę błędów numerycznych. Zastosowanie schematu wyższej dokładności paradoksalnie nie prowadziło do zadowalających wyników w kontekście zgodności obliczeń z obserwacjami. „Poprawę” uzyskiwano wprowadzając w sposób kontrolowany dyfuzję numeryczną. Oznacza to, że efekt pojawiania się błędów numerycznych w rozwiązaniach może zostać mylnie zinterpretowany jako skutek działania czynników o charakterze fizycznym. Z drugiej strony – potwierdza to nieadekwatność klasycznego opisu uderzenia hydraulicznego dla odwzorowywania przebiegu tego zjawiska.

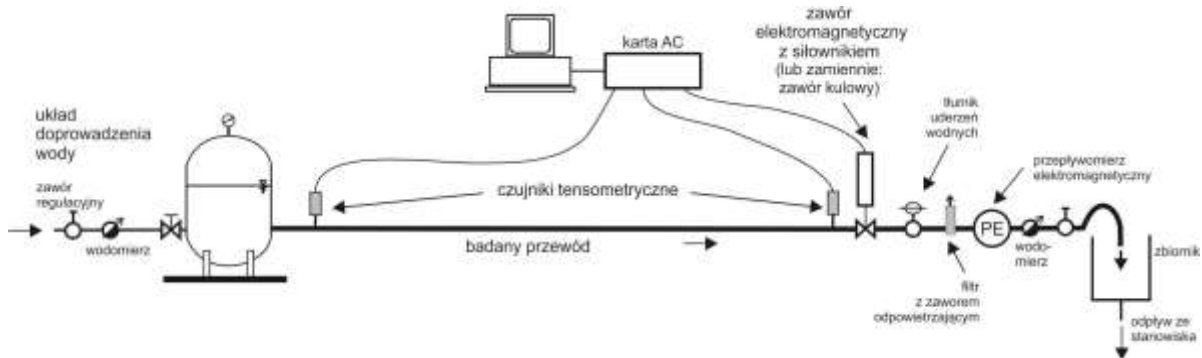
Ważnym elementem moich doświadczeń u progu kolejnego etapu prac badawczych była **budowa własnego stanowiska pomiarowego** do badań uderzenia hydraulicznego. Starania w tym zakresie rozpoczęłam równoległe z prowadzeniem przedstawionych wcześniej badań analitycznych i symulacji numerycznych. Przegląd publikacji zawierających oryginalne wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego wykazał, że liczba laboratoriów, w których prowadzone są podobne badania na świecie jest relatywnie mała (nie przekracza dziesięciu, w tym ważne miejsce zajmuje Laboratorium Politechniki Warszawskiej i wspomniane już stanowiska pomiarowe dra Apoloniusza Kodury). Do najistotniejszych powodów, dla których ważne było dla mnie stworzenie własnego stanowiska, zaliczam możliwość rozpoznania problemów przy eksperymentalnym badaniu zjawiska na podstawie własnych doświadczeń, możliwość wykonania eksperymentów dla przypadków rzadko lub

jeszcze wcale niepublikowanych w literaturze (w tym m.in. dla przypadków uderzenia hydraulicznego w czasie przepływu w rurze z innych materiałów lepkosprężystych niż HDPE, MDPE i PCV, m.in. dla przewodów usieciowanych (PE-X) lub wielowarstwowych, np. PERT-Al-PERT) oraz wykonanie pomiarów na stanowisku, na którym wyeliminowane zostaną wszelkie elementy zakłócające przebieg zjawiska, takie jak zmiana kierunku przepływu (wynikająca np. z konieczności podłączenia przewodu prowadzonego po posadzce lub ścianie do zbiornika lub z ograniczonej przestrzeni przeznaczonej na prowadzenie przewodów), redukcje średnic, „wstawki” konstrukcyjne z innego materiału itp. Projekt stanowiska pomiarowego stworzyłam na podstawie analizy istniejących podobnych stanowisk w innych ośrodkach badawczych, wykorzystując doświadczenia badawcze dra A. Kodury, którego pomoc doradcza była dla mnie szczególnie cenna. W celu pozyskania środków na budowę stanowiska i wykonanie badań, dwukrotnie (w roku 2010 i 2012) złożyłam wnioski badawcze o dofinansowanie (jako kierownik projektu i główny wykonawca, zapraszając do zespołu badawczego dra A. Kodurę z Politechniki Warszawskiej w charakterze głównego wykonawcy oraz prof. Romualda Szymkiewicza z Politechniki Gdańskiej w charakterze doradcy i eksperta). Niestety, wnioski nie zostały zakwalifikowane do finansowania. Wobec braku możliwości pozyskania dofinansowania zewnętrznego, utworzenie stanowiska badawczego zostało rozłożone na kilka kolejnych lat, a koszty jego tworzenia zostały pokryte przy wykorzystaniu środków Katedry Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska PG, materiałów pozyskanych nieodpłatnie od firm oraz ze środków własnych.

Stanowisko do badań uderzenia hydraulicznego zostało utworzone w Laboratorium Hydrauliki i Inżynierii Środowiska Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawia rys.1. W skład stanowiska, oprócz zasadniczej jego części, stanowiącej odcinki analizowanych przewodów, wchodzi także m.in:

- *układ zasilający model* (przewód doprowadzający wodę, zawory odcinające, zbiornik ciśnieniowy (poj. 500 dm<sup>3</sup>,  $H = 1,7$  m) z armaturą umożliwiającą regulację oraz utrzymanie stałego ciśnienia w zbiorniku w trakcie trwania uderzenia hydraulicznego),
- *czujniki tensometryczne* (przetworniki ciśnienia) do pomiaru wysokości ciśnienia w szybkozmiennych warunkach przepływu (CL-1A, zakres 0-2,4 MPa, częstotliwość próbkowania – do 2000 Hz, dokładność 0,2 % z wbudowanym wzmacniaczem sygnału),
- *karta analogowo-cyfrowa* (m-DAQ firmy EAGLE),

- zestaw komputerowy do rejestracji, obróbki i graficznej prezentacji danych)
  - zawór elektromagnetyczny z siłownikiem (ESM87 f. LECHAR; czas zamykania przepływu 20-60 ms) / zawór kulowy (zamiennie – do wywoływania uderzenia hydraulicznego),
  - tłumik uderzeń wodnych (na odcinku odpływowym, w celu zabezpieczenia przepływomierza elektromagnetycznego przed skutkami uderzenia, f. REFLEX);
  - filtr z zaworem odpowietrzającym (na odcinku odpływowym),
  - przepływomierz elektromagnetyczny (MPP 6 f. ENKO, DN 20, zakres pomiaru 0,1-10 m/s, dokładność 0,5% dla  $v > 0,5$  m/s oraz 1% dla  $v < 0,5$  m/s)
- oraz dodatkowe wyposażenie (zawór spustowy, przewody do podłączenia czujników, uzupełniająca armatura kontrolna, elementy pomocnicze).



Rys.1. Schemat stanowiska laboratoryjnego

W celu maksymalnego wyeliminowania elementów modyfikujących przebieg uderzenia hydraulicznego, na stanowisku zachowałam jednolitość średnic (elementy łączące dostosowane były do średnicy wewnętrznej badanego przewodu), poziomy układ przewodu na odcinku od zbiornika do zaworu wywołującego uderzenie, zamocowanie przewodów do ściany za pomocą uchwyty montażowe oraz bezinwazyjne podłączenie czujników pomiaru ciśnienia poprzez trójnikowe obejmy montażowe nałożone na przewód, w którym wykonano jedynie otwór.

Na stanowisku pomiarowym wykonałam eksperymenty dla przewodów z HDPE, LDPE, PEX, PEX/Al/PEX i stalowych w różnych warunkach początkowego ciśnienia i prędkości w ruchu ustalonym. Wyniki pomiarów (materiały niepublikowane) potwierdziły duży wpływ rodzaju materiału na przebieg uderzenia hydraulicznego (zarówno w odniesieniu do prędkości fali zaburzenia i związanej z nią częstotliwości oscylacji (długości okresu

oscylacji), jak i tempa tłumienia zjawiska. Badania potwierdziły także potrzebę określania prędkości fali na podstawie pomiarów, a nie obliczeń z wykorzystaniem wzoru Kortewega, gdyż ten ostatni nie prowadzi do wyników o zadowalającej dokładności. Wprowadzając do modelu obliczeniowego wartości prędkości fali wyznaczone na podstawie wzoru Kortewega uzyskuje się charakterystyki zmienności ciśnienia zasadniczo odbiegające od rzeczywistych (zarówno w kwestii częstotliwości oscylacji, jak i wartości amplitud ciśnienia). Szczególnie było to wyraźne w przypadku przewodów o niejednorodnej strukturze ścianki (przewody sieciowane lub uwarstwione), w których element wzmacniający w sposób istotny modyfikował własności materiału, a którego wpływ nie jest uwzględniany w klasycznej postaci wzoru Kortewega.

W kolejnym etapie prac badawczych podjęłam próbę wnikliwszej **analizy postaci równań w przypadku przepływu w przewodach z materiałów lepkosprężystych**. Ten etap zaowocował publikacją, którą uznaję za najistotniejszą w moim dorobku naukowym:

*Ad.4) „Alternative approach to convolution term of viscoelasticity in equations of unsteady pipe flow” (Journal of Fluids Engineering, 2015).*

**W pracy tej przedstawiłam alternatywne podejście do opisu członów związanych z lepkosprężystością, wykazałam ich rolę, charakter splotu, związek z teorią hydrogramu jednostkowego i wynikające z tego faktu konsekwencje.** W artykule wykazałam, że dodatkowy człon w równaniu bilansu masy, reprezentujący efekty lepkosprężyste (ściślej – wpływ opóźnionych odkształceń przewodu) mający postać splotu, może być zapisany jako suma dwóch składników – części zależnej od aktualnych warunków przepływu oraz części zależnej od „historii” naprężeń w układzie. W procedurze obliczeń numerycznych oznacza to, że na wielkość tego członu mają wpływ wartości wielkości opisujących przepływ na aktualnym oraz minionych poziomach czasowych („historia”). Tymczasem w praktycznych aplikacjach które można znaleźć w literaturze, dla uproszczenia procedury obliczeniowej, człon ten jest wyznaczany wg procedury zaproponowanej przez Covas i in. (2005), tylko na podstawie wartości z aktualnego i poprzedniego poziomu czasowego, z wykorzystaniem liniowej aproksymacji. Taki zabieg wprawdzie skraca czas obliczeń, ale także uniemożliwia pełną interpretację postaci „członów lepkosprężystych”. **W artykule wykazałam, że dodatkowe człony w równaniu bilansu masy mają postać całek**

**splotu, a funkcje splotu wykazują pełną analogię do** wykorzystywanego w hydrologii i hydraulicie **chwilowego hydrogramu jednostkowego**. Odpowiednikiem stałej  $K$  występującej w chwilowym hydrogramie jednostkowym są wartości czasów retardacji  $\tau$  odnoszące się do kolejnych elementów modelu Kelvina-Voigta. Tym samym interpretacja tych parametrów jest analogiczna do parametru  $K$ . **Co więcej, postaci członów lepkosprężystych wykazują pod względem „budowy” analogię do postaci członu tarcia zapisanego w formie splotu, co sprawia, że oba równania układu opisującego przepływ nieustalony (równanie bilansu masy i równanie dynamiczne) mogą być zapisane w spójnej formie i oba są związane z „pamięcią” opisywanego systemu.** Wyjaśnia to po części podobieństwo wpływu tych – pod względem fizycznym dwóch różnych – mechanizmów na kształtowanie się charakterystyk ciśnienia i trudność w odseparowaniu w uzyskiwanym wyniku pomiaru wpływu obu tych czynników. **Biorąc pod uwagę postać członów lepkosprężystych, w konsekwencji wykazałam, że czas retardacji nie musi być traktowany jako parametr czysto „matematyczny” i wyznaczany tylko na drodze dopasowania wyników obliczeń do wyników pomiarów (metodą prób i błędów, bądź na drodze automatycznej optymalizacji).** Przy takim podejściu zazwyczaj konieczne jest zastosowanie kilkuelementowego modelu Kelvina-Voigta, by uzyskać odpowiednio dużą liczbę parametrów, dzięki czemu, przy odpowiedniej ich kalibracji możliwe jest uzyskanie bardzo dobrej zgodności wyników obliczeń z pomiarami. Tymczasem, przeprowadzając odpowiednie testy dla różnej liczby elementów w modelu Kelvina-Voigta (z wykorzystaniem przygotowanego przez siebie programu wykorzystującego optymalizację metodą Controlled Random Search), **wykazałam, że parametr  $\tau$  może być skutecznie określony na podstawie analizy pamięci systemu, a przy prawidłowym jego wyznaczeniu wystarczająco dobrym modelem opisującym lepkosprężystość materiału przewodu staje się jednoelementowy model Kelvina-Voigta.** Takie podejście nie tylko znacząco obniża liczbę „niemierzalnych” parametrów modelu (nawet o 8 w stosunku do niektórych rozwiązań prezentowanych przez Covas i in.), ale pozwala na to, by przynajmniej część z nich zyskała swoją fizyczną interpretację. **Analiza i wnioski przedstawione w artykule w moim odczuciu stanowią istotny mój wkład w ogólną dyskusję dotyczącą możliwości matematycznego odwzorowania uderzenia hydraulicznego oraz roli parametrów występujących w modelu.**

Na podstawie uzyskanych doświadczeń z poprzednich etapów badań opracowałam ostatecznie jednowymiarowy **model umożliwiający odwzorowanie przebiegu uderzenia hydraulicznego w sieci przewodów ciśnieniowych** (sieć o strukturze każdorazowo dostosowywanej do specyfiki rozpatrywanego układu). Układ równań opisujący nieustalony przepływ w sieci przewodów składa się z równań bilansu masy i równań dynamicznych dla poszczególnych gałęzi sieci, a dodatkowo z analogicznych równań bilansu dla wszystkich połączeń wewnętrznych przewodów oraz z równań definiujących warunki brzegowe, których postać uzależniona jest od typu węzła oraz specyfiki samego układu i warunków jego pracy. W modelu przyjęto, że pomijane będą opory przepływu o charakterze lokalnym w węzłach połączeniowych. Uwzględnienie tych oporów wymagałoby znajomości współczynników oporów lokalnych nie tylko w warunkach ustalonych, ale także w przypadku przepływu zmiennego w czasie (w trakcie uderzenia hydraulicznego). Na tym etapie wykorzystałam wnioski z przeprowadzonych wcześniej przez siebie badań laboratoryjnych, dotyczących eksperymentalnej analizy współczynników oporów przepływu dla wybranych kształtek i złączy, m.in. kolanek, rozszerzeń i redukcji średnic oraz trójników (badania przeprowadzone na innym, specjalnie stworzonym stanowisku pomiarowym, opisane w dalszej części Autoreferatu; **Autoreferat, pkt.5**). Badania te wyraźnie wykazały, że przyjęcie wartości współczynników oporu z literatury bądź danych producenta nie byłoby zabiegiem właściwym, ze względu na znacząco odbiegające ich wartości w stosunku do tych uzyskiwanych na drodze eksperymentalnej. Co więcej, wartości współczynników zależą nie tylko od rodzaju i cech konstrukcyjnych kształtki, ale także od warunków przepływu, są więc w trakcie tego przepływu zmienne. Z drugiej strony próba oszacowania ich zmienności (szczególnie w przypadku bardziej złożonych sieci i tym samym dużej liczby oporów miejscowych) stanowiłaby duże wyzwanie i oddzielny problem badawczy. Uzyskany w ten sposób model „wzbogaciłby się” o dużą liczbę trudnych do zidentyfikowania parametrów, co znacząco skomplikowałoby obliczenia i interpretację wyników. Biorąc pod uwagę, że w praktycznych aplikacjach opory lokalne uwzględniane są zazwyczaj „ryczałtem” w oporach liniowych, a tworzony model ma charakter wspomnianego wcześniej „modelu „quasi-konceptualnego”, zdecydowałam się na przyjęcie wspomnianego wcześniej uproszczenia. Warto przy tej okazji wspomnieć, że podobne założenie czynią inni autorzy publikujący analizy przepływów dla sieci przewodów, chociaż zazwyczaj bez przedstawienia dyskusji dotyczącej tej kwestii.



Struktura sieci w opracowanym przeze mnie modelu może być każdorazowo zadawana przez liczącego poprzez zdefiniowanie liczby gałęzi, liczby węzłów zewnętrznych (początkowych i końcowych) oraz liczby i konfiguracji wewnętrznych połączeń przewodów. Przewody mogą mieć dowolną konfigurację wysokościową i każdy z nich może być indywidualnie definiowany przez parametry określające jego podstawowe cechy (długość odcinka, średnicę wewnętrzną, grubość ścianki, rzędne osi przewodu itd.). Prędkość fali zaburzenia może być zadawana odgórnie (np. na podstawie wcześniejszych badań eksperymentalnych) lub też liczona wewnątrz modelu na podstawie wybranych formuł (formułą Kortewega lub inną zdefiniowaną przez liczącego, w zależności od specyfiki zadania). Czasy retardacji (w przypadku przewodów z materiałów lepkosprężystych) powinny być określone wg procedury w przedstawionej we wcześniej cytowanym artykule (Ad.4), chociaż oczywiście dla celów testowych mogą być także wyznaczane w inny sposób (zadawane odgórnie lub uzyskiwane na drodze optymalizacji). W programie można opcjonalnie uwzględnić zmienność gęstości cieczy oraz zmiany średnicy przewodu pod wpływem zmian ciśnienia oraz wybrać sposób uwzględniania oporów tarcia (np. model quasi-ustalony, zwiększenie współczynnika oporów liniowych o współczynnik korekcyjny, model Brunonego, Vitkovskiego i Simpsona).

Do rozwiązania układu równań ostatecznie wybrałam schemat czteropunktowy metody różnic skończonych, który cechuje wysoka dokładność i jednocześnie bezwarunkowa stabilność, niezależnie od wartości liczby Couranta. Analizowany wcześniej schemat czasoprzestrzennych objętości skończonych charakteryzuje się jeszcze wyższą dokładnością, jednak ze względu na warunkową stabilność staje się mniej skuteczny w przypadkach sieci, gdy w układzie znajdują się przewody o zróżnicowanych parametrach (różnych średnicach, grubościach ścianek i materiałach). Zmienność ta powoduje to, że prędkość fali zaburzenia jest różna w różnych miejscach układu (w różnych przewodach). Sprawia to, że trudniej jest dobrać odpowiedni krok czasowy, by jednocześnie spełnić warunek stabilności i zachować wysoką dokładność schematu.

Działanie modelu sprawdziłam w przypadkach przepływu wody w pojedynczym przewodzie prostym (o jednakowej średnicy) z materiału sprężystego lub lepkosprężystego, w prostych układach przewodów (np. w przewodzie z jedną zmianą średnicy, w ciągach przewodów o różnej charakterystyce) oraz w przypadku przepływu wody w prostej sieci przewodów. Model zweryfikowałam na podstawie przykładów literaturowych i eksperymentów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych. Szczególnie cennym

sprawdzeniem działania modelu była możliwość jego aplikacji do przypadku rzeczywistych rurociągów, odprowadzających wody nadosadowe ze składowiska na Obieckie Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) „Żelazny Most” (KGHM), realizowanego w ramach zadania (**Załącznik 3, pkt. III.M**):

*„Analiza zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągach „D” i „E” na OUOW Żelazny Most” (oprac. dla DHV Hydroprojekt).*

**W zadaniu uczestniczyłam jako wykonawca, odpowiedzialny za całość obliczeń z wykorzystaniem modelowania numerycznego.** Celem opracowania było sprawdzenie pracy rurociągów w warunkach potencjalnego uderzenia hydraulicznego wywołanego albo awarią zasuw, albo brakiem zasilania i przerwaniem pracy pomp. Model okazał się skuteczny, a wnioski z badań posłużyły identyfikacji punktów newralgicznych wzdłuż rurociągów oraz opracowaniu strategii ochrony przed uderzeniem hydraulicznym (materiały niepublikowane, opracowanie wewnętrzne dla zleceniodawcy).

Bardzo ważnym etapem pracy badawczej było sprawdzenie możliwości zaadoptowania opracowanego wcześniej modelu **do przypadku przepływu cieczy niejednorodnej o charakterze mieszaniny szlamowej, zarówno w pojedynczym przewodzie jak i w sieci przewodów.** Badania zostały wykonane przy okazji obszernego zadania badawczego pt.

*„Analiza numeryczna propagacji ciśnienia w rurociągach szlamowych podczas trwania zjawiska uderzenia hydraulicznego dla rzędnych korony OUOW od 180 m n.p.m. do 195 m n.p.m.”,*

realizowanego dla KGHM Polska Miedź S.A. przez Politechnikę Warszawską pod kierownictwem dr inż. Apoloniusza Kodury, przez którego zostałam zaproszona do współpracy. Projekt dotyczył zlokalizowanej w Polsce dużej i relatywnie skomplikowanej sieci przewodów szlamowych, prowadzących mieszaninę poprodukcyjną z trzech Zakładów Wzbogacania Rudy (ZWR) – w Polkowicach, Rudnej i Lubinie na składowisko odpadów OUOW „Żelazny Most”. Nadrzędnym celem zadania było stworzenie modelu numerycznego wspomagającego bieżącą eksploatację rurociągów (pod kątem możliwości wystąpienia uderzenia hydraulicznego), także dla potrzeb modyfikowanych w przyszłości warunków pracy sieci (np. zmiany materiału lub średnic przewodów, zmiany rzędnej składowania

osadów itp.). Ponadto celem analiz była identyfikacja punktów sieci najbardziej narażonych na skutki potencjalnych uderzeń hydraulicznych i sprawdzenie krytycznych wartości ciśnienia w różnych scenariuszach przepływów nieustalonych (uderzeń hydraulicznych wywołanych awariami pomp lub awariami zasuw). **W ramach tego obszernego zadania byłam autorką całości prac związanych z opracowaniem i wykorzystaniem modelu numerycznego (opracowanie modelu matematycznego, implementacja numeryczna, testowanie, weryfikacja na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, przeprowadzenie symulacji numerycznych),** a także współuczestniczyłam w pracach studialnych (szczególnie w odniesieniu do rozpoznania możliwości i ograniczeń modelowania przepływu mieszanin), w pomiarach terenowych (udział w jednej kampanii pomiarowej), w pracach związanych z opracowaniem i interpretacją wyników badań pomiarowych dla potrzeb identyfikacji parametrów modelu matematycznego oraz na etapie formułowania wniosków pośrednich i końcowych oraz przygotowywania opracowań tekstowych.

Analizowana sieć przewodów obejmowała rurociągi tranzytowe doprowadzające mieszaninę z trzech wspomnianych wcześniej ZWR (kilkoma równoległymi trasami z każdego ZWR), przewody łączące oraz sieć przewodów w układzie pierścieniowym, umożliwiającą skierowanie mieszaniny z dowolnego ZWR do jednego z ponad 10 wylotów punktowych lub licznych sekcji wydatkujących, rozmieszczonych wokół obwodu składowiska opadów. Sieć utworzona jest przez ok. 380 odcinków przewodów o łącznej długości ponad 150 km, o różnorodnej charakterystyce (przewody stalowe, przewody z tworzyw sztucznych; zróżnicowane średnice, przekraczające 800 mm) i umożliwia przekierowywanie mieszaniny wzdłuż różnych tras, w zależności od aktualnych potrzeb.

**Mój udział w całym zadaniu obejmował rozpoznanie literaturowe w zakresie modelowania matematycznego przepływów nieustalonych mieszanin (w tym przegląd dostępnych modeli i ocenę możliwości ich zastosowania w analizowanym przypadku), przygotowanie modelu matematycznego dla potrzeb odwzorowania przebiegu uderzenia hydraulicznego w mieszaninie szlamowej w instalacji laboratoryjnej (stworzonej dla potrzeb zadania w Laboratorium Politechniki Warszawskiej przez zespół dra Kodury), współdziałanie w analizie i ocenie wyników pomiarów laboratoryjnych, wykorzystanie wniosków z analiz laboratoryjnych dla potrzeb ustalenia sposobów optymalnej konfiguracji i identyfikacji parametrów modelu, przeprowadzenie symulacji numerycznych dla pomierzonych w laboratorium epizodów uderzenia hydraulicznego i**

**przyjęcie metodologii postępowania dla sytuacji sieci rzeczywistej, stworzenie modelu symulacji uderzenia hydraulicznego w rzeczywistej sieci przewodów, weryfikacja modelu na podstawie pomiarów in situ (przeprowadzanych przez zespół dra Kodury, w których częściowo uczestniczyłam) oraz przeprowadzenie symulacji uderzenia hydraulicznego w sieci rzeczywistej w różnych hipotetycznych wariantach pracy układu (różne trasy przepływu, różne warunki hydrauliczne, różne przyczyny wywołujące uderzenie hydrauliczne).**

Przeprowadzone analizy zaowocowały trzema zespołowymi publikacjami:

Ad.5) *“An Experimental and Numerical Analysis of Water Hammer Phenomenon in Slurries”* (Kodura A., Stefanek P., Weinerowska-Bords K.; *J. Fluids Eng.- ASME*, 2015); mój udział 40%);

Ad.6) *“An Experimental Investigation of Pressure Wave Celerity During the Transient Slurry Flow”* (Kodura A., Kubrak M., Stefanek P., Weinerowska-Bords K., Springer, 2018); mój udział 35%);

oraz:

Ad.7) *“In situ verification of numerical model of Water Hammer in Slurries”* (Kodura A., Weinerowska-Bords K., Artichowicz W., Kubrak M., Stefanek P.; *J. Fluids Eng.- ASME*, 2019; mój udział 40%).

W pierwszej z nich (Ad.5) przedstawione zostały podstawy teoretyczne związane z modelowaniem matematycznym przepływu mieszanin, badania eksperymentalne uderzenia hydraulicznego w mieszaninie szlamowej przeprowadzone w warunkach laboratoryjnym oraz całość zagadnień związanych z tworzeniem i implementacją modelu matematycznego odwzorowującego przebieg zarejestrowanych w laboratorium epizodów uderzenia hydraulicznego w czasie przepływu mieszaniny szlamowej w pojedynczym przewodzie pod ciśnieniem. **Mój udział w realizacji tego artykułu obejmował współtworzenie części teoretycznej, ze szczególnym uwzględnieniem dyskusji praktycznych możliwości implementacji funkcjonujących w literaturze modeli obliczeniowych, całość prac związanych z częścią poświęconą analizom numerycznym (tworzenie modelu, identyfikacja parametrów, dyskusja wyników, wprowadzenie zastępczych parametrów o charakterze konceptualnym, analiza uzyskanych rezultatów) oraz współredagowanie wniosków i całej treści artykułu pod względem językowym.** W ramach prac przeanalizowałam różne koncepcje opisu matematycznego przepływu nieustalonego w mieszaninach oraz możliwości i bariery w skutecznym identyfikowaniu występujących w tym

opisie parametrów. Do podstawowych problemów należała ocena praktycznych możliwości odzwierciedlenia w modelu charakteru mieszaniny (jednorodna, quasi-jednorodna, niejednorodna), a także roli dodatkowych zjawisk towarzyszących przepływowi (np. powstawanie, osadzanie się oraz zmienność w czasie i przestrzeni grubości podsadzki). Na podstawie wyników obserwacji i pomiarów przeprowadzonych (przez zespół dra Kodury) na etapie badań laboratoryjnych (w tym m.in. na podstawie wyników pomiarów koncentracji zawiesiny oraz obserwacji zachowania frakcji stałej w czasie przepływu nieustalonego w przewodzie) oraz na podstawie wstępnych symulacji numerycznych, ostatecznie zdecydowałam się na zastosowanie modelu cieczy quasi-jednorodnej, przy jednoczesnym odrzuceniu teoretycznych (dostępnych w literaturze i zaprezentowanych w artykule) formuł na prędkość fali zaburzenia i zastosowaniu wartości empirycznej prędkości fali, określonej na podstawie pomierzonych charakterystyk ciśnienia, indywidualnie dla mieszanin o różnych koncentracjach. Takie podejście było możliwe dzięki relatywnie małym koncentracjom frakcji stałej. Uzyskany w ten sposób model matematyczny prawidłowo odwzorowywał częstość oscylacji ciśnienia i tempo ich zanikania, powodował natomiast niedokładności w odwzorowaniu maksymalnych amplitud ciśnienia, tym większe im większa była koncentracja mieszaniny. Analizy potwierdziły literaturowe przesłanki, że w przypadku przepływu mieszanin maksymalny przyrost ciśnienia jest większy niż wynikałoby to z obliczeń wzorem Żukowskiego, ale prezentowane w literaturze formuły nie prowadziły do wyników zgodnych z obserwacjami. Oznacza to, że w zastosowanym opisie matematycznym zjawiska nie są uwzględniane wszystkie mechanizmy, które w rzeczywistości modyfikują przebieg uderzenia hydraulicznego w mieszaninie szlamowej. Alternatywą byłoby zastosowanie bardziej złożonego modelu, w którym obie fazy (ciekła i stała) byłyby opisywane oddzielnymi równaniami bilansu, a ich wzajemnie oddziaływanie uwzględniałyby dodatkowe równania interakcji między fazami. Innym podejściem mogłoby być obliczeniowe „wydzielenie” w przekroju poprzecznym „nieaktywnej” (nieruchomej i zmniejszającej przekrój strumienia) warstwy dennej oraz pozostałej „aktywnej” części strumienia. Niestety, dla potrzeb identyfikacji i weryfikacji takich modeli byłyby potrzebne bardziej wnikliwe badania pomiarowe, umożliwiające ocenę zmienności (zarówno w czasie jak i wzdłuż strumienia) koncentracji mieszaniny (stanowiącej fazę „aktywną”), oraz grubości warstwy dennej powstającej na skutek osadzania się frakcji stałej. W rzeczywistej sieci przewodów szlamowych w praktyce takich pomiarów wykonać nie można.

Z wymienionych wyżej powodów zaproponowałam ostatecznie zastosowanie modelu uproszczonego o zmodyfikowanych parametrach. Porównanie wyników przeprowadzonych przeze mnie symulacji obliczeniowych z wynikami eksperymentów w laboratorium wykazało, że wypadkowy efekt działania dodatkowych czynników, nieuwzględnianych w matematycznym opisie przepływu w przypadku założenia mieszaniny quasi-jednorodnej, jest jakościowo zbliżony do efektów, jakie wystąpiłyby w tym przewodzie w przypadku przepływu cieczy jednorodnej o zwiększonej gęstości. Zgodność ta dotyczy nie tylko samej wartości maksymalnej amplitudy ciśnienia, ale także całego przebiegu oscylacji ciśnienia. **Do najistotniejszego własnego wkładu w tym zakresie zaliczam zaproponowanie wprowadzenia konceptualnego parametru „zastępczej gęstości”, który w sposób kompleksowy uwzględni te czynniki, które mają istotny wpływ na przebieg uderzenia hydraulicznego, a których nie można w praktyce uwzględnić w sposób dokładny ze względu na zbyt dużą złożoność i zmienność (w czasie i przestrzeni) procesów oraz brak możliwości identyfikacji opisujących je parametrów.** Do czynników takich można zaliczyć wspomniane wcześniej powstawanie i zmienność grubości warstwy osadów dennych, nierównomierny rozkład koncentracji w przekroju poprzecznym i wzdłuż osi przewodu itp.

Zastosowanie konceptualnego parametru „zastępczej gęstości” (czyli w praktyce, odpowiednie zwiększenie gęstości mieszaniny ponad wartość wynikającą z gęstości poszczególnych faz i ich koncentracji) znacząco poprawiło jakość wyników obliczeń i umożliwiło satysfakcjonujące (w sensie zgodności wyników obliczeń z pomiarami) odwzorowanie przebiegu zarejestrowanych epizodów. Ostatecznie, zgodnie z pomysłem dra A. Kodury, zastępczy parametr został w artykule nazwany gęstością ekwiwalentną. Dr A. Kodura jest również autorem opublikowanej w artykule propozycji formuły określającej związek gęstości ekwiwalentnej z grubością podsadzki.

W drugiej z cytowanych publikacji zespołowych (Ad.6) przedstawiono bardziej szczegółowo eksperymentalny etap badań, zarówno część laboratoryjną jak i wstępne wyniki z części terenowej. Mój udział w tej publikacji sprowadzał się do współpracowania części teoretycznej oraz części poświęconej opracowaniu i interpretacji wyników z części pomiarowej, a także udziału w jednej z terenowych kampanii pomiarowych. Na uwagę zasługuje fakt, że zarówno w przypadku pomiarów laboratoryjnych jak i terenowych, wyniki uzyskiwanych na drodze eksperymentalnej prędkości fali zaburzenia  $a$  dla tych samych tras przepływów i „jednakowych” koncentracji mieszanin wykazywały pewną zmienność, a co więcej – niezgodność (ok. 10 %) z wynikami uzyskiwanymi na drodze obliczeń z

wykorzystaniem wzorów teoretycznych (dla mieszanin). W kontekście poprzednich rozważań nie wydaje się to zaskakujące. Jest to natomiast czynnik utrudniający identyfikację tych parametrów i potwierdzający wcześniejsze wnioski, iż najlepszą drogą ich określania jest eksperyment. Niestety, w przypadku rzeczywistych obiektów (szczególnie dużych sieci przemysłowych) przeprowadzenie pomiarów jest często bardzo trudne lub wręcz – z przyczyn technicznych - niemożliwe.

Ostatnia z wymienionych publikacji (Ad.7) poświęcona jest w całości opracowaniu modelu przepływu mieszanin w analizowanej rzeczywistej sieci przewodów KGHM. **Mój udział obejmował całość prac związanych z opracowaniem modelu matematycznego, jego numeryczną implementacją, identyfikacją i weryfikacją na podstawie wyników pomiarów terenowych oraz przeprowadzeniem testów numerycznych dla sytuacji pomierzonych w terenie oraz przyszłych hipotetycznych epizodów uderzenia hydraulicznego, spowodowanych potencjalną awarią w sieci.** W artykule stanowi to rozdział „*Numerical calculations*”. Ze względu na ograniczone możliwości objętościowe artykułu, w jego treści przedstawiony został tylko wycinek znacznie obszerniejszych analiz wykonanych w ramach projektu. Zaproponowany wcześniej model okazał się skuteczny także w przypadku tak skomplikowanej sieci przewodów tłoczących mieszaninę szlamową. Dla jego weryfikacji konieczne było wyznaczenie miarodajnych gęstości ekwiwalentnych dla mieszanin szlamowych pochodzących z różnych ZWR oraz określenie wartości prędkości fali uderzenia hydraulicznego (zależnych od cech mieszanin i wybranej trasy ich transportu, zmiennych wzdłuż drogi przepływu). Na podstawie przeprowadzonych na tym etapie badań zostały wyciągnięte wnioski dotyczące bezpieczeństwa analizowanej sieci oraz strategii umożliwiającej ochronę przed potencjalnymi uderzeniami hydraulicznymi. W sensie wymiernym został opracowany i przekazany Zamawiającemu relatywnie elastyczny model obliczeniowy, do którego przyjazny użytkownikowi interfejs przygotował dr inż. Wojciech Artichowicz z Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

Badania wykazały, że model jednowymiarowego przepływu nieustalonego dla cieczy jednorodnej może być z powodzeniem zaaplikowany do przepływu mieszanin o relatywnie niskich koncentracjach, a tym samym bardziej złożone modele, o większej liczbie parametrów i wymagającym procesie ich kalibracji mogą być w wielu przypadkach zastąpione prostszymi modelami o charakterze quasi-konceptualnym.

## **Podsumowanie**

Zgłoszony do oceny cykl publikacji stanowi efekt wieloletnich prac poświęconych badaniom zjawiska uderzenia hydraulicznego w przewodach pod ciśnieniem. Badania te obejmowały zarówno rozważania natury teoretycznej, jak i analizy obliczeniowe oraz eksperymentalne. Zjawisko uderzenia hydraulicznego rozpatrywane było w kontekście dwóch płaszczyzn – teoretycznej i praktycznej, a analizy odnosiły się zarówno do kwestii samego opisu matematycznego, jak i do zagadnień związanych z możliwościami i ograniczeniami implementacji numerycznej, identyfikacją parametrów, własnościami stosowanych schematów numerycznych i praktycznymi aplikacjami proponowanych rozwiązań.

W ujęciu bardziej szczegółowym, w ramach analiz:

- przeprowadzono szeroką dyskusję znaczenia i możliwości identyfikacji parametrów występujących w równaniach stanowiących matematyczny opis przepływów nieustalonych,
- wykonano analizę własności wybranych schematów numerycznych i przeprowadzono dyskusję roli efektów numerycznych pojawiających się w rozwiązaniu równań ruchu nieustalonego,
- zaproponowano alternatywne podejście do opisu i interpretacji członów występujących w równaniu bilansu masy dla przepływu cieczy w przewodach lepkosprężystych,
- wykazano analogię postaci członów związanych z lepkosprężystością do chwilowego hydrogramu jednostkowego oraz wykorzystano konsekwencje tego faktu dla potrzeb identyfikacji parametrów,
- wykazano podobieństwo pod względem „budowy” członów lepkosprężystości w równaniu bilansu masy i członu tarcia nieustalonego w równaniu dynamicznym,
- zaprojektowano i wdrożono stanowisko pomiarowe do badań uderzenia hydraulicznego,
- na podstawie wcześniejszych analiz opracowano model przepływu nieustalonego w pojedynczym przewodzie i sieci przewodów pod ciśnieniem, w którym – w przypadku modelowania przepływu mieszanin - zaproponowano konceptualny parametr „gęstości zastępczej/ekwiwalentnej”,
- zweryfikowano model na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych.

W efekcie prowadzonych analiz zaproponowano model „quasi-konceptualny” o relatywnie prostej strukturze, a jednocześnie szerokim potencjalnym spektrum zastosowań.



W modelu uwzględniono możliwość prowadzenia obliczeń dla przepływu cieczy jednorodnej lub niejednorodnej w sieci różnorodnych przewodów o przekroju kołowym, o dowolnej, definiowanej przez użytkownika, liczbie i konfiguracji gałęzi (w tym także sieci pierścieniowych), z dowolnych materiałów sprężystych lub lepkosprężystych. Uwzględniono elastyczną możliwość definiowania warunków brzegowych (zależnych od konfiguracji sieci i rodzaju stosowanych urządzeń) oraz uwzględniono wewnątrz sieci obecność zaworów i zasuw, definiowanych w modelu poprzez wprowadzenie dodatkowych warunków wewnętrznych. Konstrukcja modelu umożliwia dalszą jego rozbudowę poprzez uwzględnianie w strukturze sieci innej armatury i urządzeń.

W ramach analiz rozpatrzono istotność poszczególnych parametrów dla odwzorowania skutków uderzenia hydraulicznego oraz możliwości ich identyfikacji. Zaproponowany model zweryfikowano na podstawie eksperymentów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych oraz w warunkach terenowych poprzez jego aplikację dla rzeczywistej sieci przemysłowej przewodów tłoczących ciśnieniowo mieszaninę szlamową. W modelu udało się w zadowalający sposób obliczeniowo odwzorować nieustalony przepływ mieszaniny szlamowej, nawet w przypadku obecności podsadzki i niewielkich ilości powietrza zgromadzonego w przewodach. Tym samym model okazał się przydatny nie tylko do celów analiz o charakterze badawczym, ale także praktycznych aplikacji dla potrzeb oceny zagrożeń i podejmowania decyzji dotyczących dopuszczalnych warunków pracy urządzeń w skomplikowanych sieciach przewodów przemysłowych.

Przeprowadzone analizy pozwoliły potwierdzić stawianą wcześniej tezę, iż wiele czynników determinujących przebieg uderzenia hydraulicznego, choć różniących się znacząco na podłożu fizycznym, ma zbliżony wpływ na kształtowanie się wynikowych charakterystyk ciśnienia, a co za tym idzie może być modelowanych w podobny sposób w modelach o charakterze ‘quasi-konceptualnym’, poprzez uproszczenie opisu matematycznego rozpatrywanych mechanizmów oraz wprowadzenie zastępczych parametrów opisujących cechy odwzorowywanych systemów. Aby jednak możliwa była poprawna interpretacja uzyskiwanych wyników, potrzebne jest usunięcie z rozwiązania fałszujących wyniki błędów numerycznych, a także wiarygodna identyfikacja występujących w modelu parametrów.

Przeprowadzone badania mają w moim odczuciu znaczenie zarówno poznawcze jak i użyteczne. Z jednej strony pozwalają – przynajmniej częściowo – lepiej rozpoznać, zidentyfikować i zinterpretować praktyczne problemy powstające na różnych etapach

modelowania zjawiska uderzenia hydraulicznego, z drugiej – dostarczają praktyczne narzędzie obliczeniowe, które może być wykorzystane do odwzorowania przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w przypadku przepływu wody oraz mieszanin o niskich koncentracjach w sieciach przewodów pod ciśnieniem.

## Bibliografia

- [1] Alastruey J., Parker K.H., Sherwin S.J. (2012): Arterial pulse wave haemodynamics. W: Proc. Of the 11th International Conference on Pressure Surges, Lisbon, Portugal, 24-26 October 2012, 401-442.
- [2] Bergant A., Simpson A.R., Vitkovsky J. (2001): *Development in unsteady pipe flow friction modeling*. J. of Hydr. Res., vol. 39, no.3.
- [3] Brunone B., Golia U.M., Greco M. (1991): *Some remarks on the momentum equation for fast transients*. Proc. Int. Meeting on Hydraulic Transients and Water Column Separation, 9<sup>th</sup> Round Table, IAHR, Valencia, Spain, 201-209.
- [4] Brunone B., Karney B.W., Mecarelli M., Ferrante M. (2000). *Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow*. J. of Water Res. Planning and Managm. Vol. 126, No.4, 236-244.
- [5] Brunone B., Ferrante M., Cacciamani M. (2004): *Decay of pressure and energy dissipation in laminar transient flow*, J. of Fluid Engineering, Vol. 126, No. 6, 928-934. DOI: Covas D., Stoianov I.,Graham N., Maksimovic C., Ramos H., Butler D. (2002).*Inverse transient analysis for leak detection and calibration – a case study in a polyethylene pipe*, in: Fifth International Conference on Hydroinformatics, Cardiff, UK, 1154-1159
- [6] Covas D., Stoianov I., Mano J.F., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. (2004). *The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part I – experimental analysis and creep characterization*. J. of Hydraul. Res., Vol. 42, No. 5., 516-530.
- [7] Covas D., Stoianov I., Mano J.F., Ramos H., Graham N., Maksimovic C. (2005). *The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients. Part II – model development, calibration and verification*. J. of Hydraul. Res., Vol. 43, No. 1., 56-70.
- [8] Cristoffanini C., Karkare M., Aceituno M. (2014), *Transient Simulation of Long Distance Tailings and Concentrate Pipelines for Operation Training*. Proc. of SME Annual Meeting/Exhibit, February 24-26, 2014, Salt Lake City, UT, USA
- [9] Fletcher C.A.J. (1991): *Computational techniques for fluid dynamics. Part 1: Fundamental and general techniques*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [10] Keramat A., Tijsseling A.S., Hou Q., Ahmadi A. (2011): Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer, J. of Fluids and Structures, 28, 434-455. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2011.11.001.
- [11] Leishear R.A. (2017): Nuclear power plant fires and explosions, IV Water hammer explosions mechanisms, w: Proc. of the ASME 2017 Pressure vessels and piping conference, Waikoloa, HI, USA, 16-20 July 2017.
- [12] Malesińska A. (2002): Rozprzestrzenianie się zaburzenia ciśnienia o skończonej amplitudzie w ciągu przewodów o różnych średnicach, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa.
- [13] McInnis D., Karney B.W. (1995): Transients in Distribution Networks: Field tests and demand Models, J. of Hydraul. Eng., 121(3), 218-231.
- [14] Meniconi S., Brunone B., Ferrante M. (2012) : Water-hammer pressure waves interaction at cross-section changes in series in viscoelastic pipes, J. of Fluids and Structures, vol.33, 44-58. DOI : 10.1016/j.jfluidstructs.2012.05.007.
- [15] Pezzinga G. (2000): Evaluation of unsteady flow resistance by quasi-2D or 1D models, J. of Hydr. Eng., Vol. 126, No.10, 778-785.
- [16] Pezzinga G. (2009): Local balance unsteady friction model, J. of Hydr. Eng., Vol. 135, No.1, 45-56. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:1(45).
- [17] Samani H.M.V., Khayatzadeh A. (2002): Transient flow in pipe networks, J. of Hydraul. Res., 40(5), 637-644.
- [18] Samson, R., Biello, J.A. (2017): Longitudinal instability of slurry pipeline flow. Int. J. Multiphase Flow, 90, 57-63. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.12.005.
- [19] Sciamarella D., Artana G. (2009): A water hammer analysis of pressure and flow in voice production system, Speech Communications, 51, 344-351.
- [20] Szymkiewicz R., Mitosek M. (2007): Numerical aspects of improvement of the unsteady pipe flow equations, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 55, 1039-1058. DOI: 10.1002/flid.1507.
- [21] Teodoro I.P., Ribeiro D.F., Botari T., Martins T.S., Santos A.A. (2018): Fast simulation of railway pneumatic brake systems, J. of Rail and Rapid Transit, online first version, DOI: 10.1177/0954409718796903

- [22] Tijsseling A.S. (1996): Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review, *Journal of Fluids and Structures*, 10, 109-146.
- [23] Van de Vosse F.N., Stergiopoulos N. (2011): Pulse wave propagation in the arterial tree, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 43, 467-499.
- [24] Wang T., Jiang J., Lan G. (2014): Research on accumulator for water hammer protection of long-distance slurry transportation pipelines, *Proc. of 6th Int. Symp. on Fluid Machinery and Fluid Engineering*, 22 October 2014. DOI: 10.1049/cp.2014.1256
- [25] Wiggert D.C., Tijsseling A.S. (2001): Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping, *ASME Appl. Mech. Rev.*, vol. 54, No. 5, 455-481.
- [26] Wylie E.B., Streeter V.L. (1978): *Fluid transients*, McGraw Hill Inc., USA
- [27] Zambrano, H., Sigalotti, L. D.G., Klapp, J., Pena-Polo, F. and Bencomo, A. (2017): Heavy oil slurry transportation through horizontal pipelines: Experiments and CFD simulations. *Int. J. Multiphase Flow*, 91, 130-141. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.013.
- [28] Zarzycki Z. (1994): Opory niestacjonarnego ruchu cieczy w przewodach zamkniętych, *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, Nr 516, Szczecin.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Patrząc z perspektywy lat, w mojej pracy naukowo-badawczej można wyodrębnić trzy różne nurty tematyczne:

- 1) analiza przepływów ze swobodną powierzchnią, ze szczególnym uwzględnieniem występujących w tej kategorii przepływów zagadnień odwrotnych,
- 2) badania przepływów nieustalonych w przewodach pod ciśnieniem, w tym analiza ich szczególnej kategorii – uderzenia hydraulicznego,
- 3) naukowe i praktyczne podstawy obliczania ilości i zagospodarowania wód opadowych odprowadzanych z terenów (z)urbanizowanych.

Przedstawiona wyżej różnorodność tematyczna wynika z jednej strony ze specyfiki ukończonej przeze mnie specjalizacji studiów magisterskich (inżynieria sanitarna) – jej szerokiego wachlarza tematycznego i jednocześnie silnego przełożenia na kwestie praktyczne, z drugiej strony jest efektem zmieniającego się bieżącego zapotrzebowania na tematykę badawczą, zarówno ze strony mojej macierzystej Katedry, jak i szeroko pojętego środowiska przemysłowego i branżowego. W ostatnich latach mojej pracy naukowo-badawczej wspomniane nurty realizowane były w dużej części równolegle, co z jednej strony stanowiło znaczące utrudnienie ze względu na różnorodność tematyczną, z drugiej jednak – w istotny sposób wpływało na poszerzenie horyzontów badawczych i możliwość realizacji na różnych polach tematycznych. Pozwoliło to także czerpać inspiracje z różnych dziedzin inżynierii środowiska i stosować metody zazwyczaj przypisane innym obszarom do pozornie odmiennych zastosowań.

Większość osiągnięć naukowych z zakresu tematyki przedstawionej w pkt.2) (analiza przepływów nieustalonych w przewodach pod ciśnieniem) została zgłoszona do oceny w ramach postępowania habilitacyjnego, są więc one szerzej opisane w poprzednim rozdziale. Poniżej zostaną więc przedstawione przede wszystkim osiągnięcia w zakresie tematyki 1) i 3) oraz – w mniejszym stopniu – osiągnięcia z zakresy tematyki 2) nieuwzględnione w poprzedniej części Autoreferatu.

#### a) Przed uzyskaniem stopnia doktora

Działalność naukowo-badawczą rozpoczęłam formalnie 1 października 1997 r. wraz z wstąpieniem na Studium Doktoranckie „Geotechnika i Inżynieria Środowiska” przy Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej. Wcześniejsze moje doświadczenia związane były z działalnością w ramach Koła Naukowego *Ekologia w Budownictwie i Inżynierii Środowiska*, działającego przy Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej. W tamtym okresie wzięłam udział w kilku wyjazdach organizowanych przez Koło oraz zaprezentowałam dwa referaty na I Krajowym Seminarium Kół Naukowych „Techniczne aspekty ochrony środowiska”, które odbyło się na Politechnice Gdańskiej.

Z chwilą rozpoczęcia Studium Doktoranckiego podjęłam współpracę naukową z prof. dr hab. inż. Romualdem Szymkiewiczem, który zaproponował mi pracę w Katedrze Hydrauliki i Hydrologii (obecnie Katedra Hydrotechniki) i zajęcie się tematyką badawczą dotyczącą przepływów w kanałach otwartych. Tematem pracy doktorskiej zostały **zagadnienia odwrotne w hydraulice koryt otwartych**. W pierwszym okresie realizacji pracy doktorskiej dokonałam przeglądu literatury, klasyfikacji formalnej typów zagadnień formułowanych w odniesieniu do przepływów w kanałach otwartych oraz identyfikacji zagadnień jeszcze nie do końca rozpoznanych. W pierwszym roku studiów doktoranckich odbyłam trzymiesięczny staż doktorski na Uniwersytecie Josepha Fouriera w Grenoble, pod opieką Jeana Pierra Choletta. Praca w tym okresie skoncentrowana była na pogłębianiu wiedzy z zakresu możliwości i ograniczeń opisu matematycznego przepływów nieustalonych w kanałach otwartych i zaowocowała powstaniem pracy pt. „*Zagadnienia odwrotne w hydraulice koryt otwartych. Przepływ nieustalony wolnozmienny*”, która formalnie była też pracą kończącą Studia Uzupełniające. W dalszym etapie zajęłam się pogłębianiem tematyki **modelowania numerycznego**, ze szczególnym uwzględnieniem metod **oceny dokładności i stabilności schematów numerycznych**. Dla własnych potrzeb przeprowadziłam analizy

własności podstawowych schematów stosowanych w ramach metody różnic skończonych, w tym m.in. schematów Leap-Frog, Laxa, Laxa-Wendroffa, schematu czteropunktowego i in. Dokonałam też przeglądu rzadziej wykorzystywanych metod, które ze względu na swoje szczególne własności mogłyby być wykorzystane przy rozwiązywaniu wymagającego **zadania odwrotnej transformacji przepływów**. Dla potrzeb tego ostatniego wyprowadziłam opisujący je układ równań, przeprowadziłam dyskusję sposobu zadawania warunków brzegowych oraz praktycznych problemów występujących przy jego rozwiązaniu. Ostatecznie, do rozwiązania tego zagadnienia wybrałam dwie metody – schemat czteropunktowy metody różnic skończonych oraz mało znaną metodę czasoprzestrzennych objętości skończonych, z których to właśnie ta ostatnia okazała się optymalna ze względu na własności uzyskanego schematu numerycznego.

Drugą grupą rozwiązywanych zagadnień odwrotnych były zadania identyfikacji parametrów modeli w przypadku zagadnienia przepływu ustalonego i nieustalonego, zarówno w pojedynczym kanale jak i w sieciach kanałów. Dla potrzeb tych zadań konieczne było zgłębienie zagadnień związanych z **teorią optymalizacji**. W tym zakresie dokonałam przeglądu metod optymalizacyjnych oraz najczęściej stosowanych funkcji celu. Dla różnych przypadków zadań identyfikacyjnych (w których identyfikowane były zazwyczaj wartości współczynników szorstkości i/lub dopływu bocznego, w różnych konfiguracjach kanałów i w różnych warunkach przepływu (ustalonego/ nieustalonego)) przeprowadziłam szereg analiz i eksperymentów numerycznych, a wyniki obliczeń zweryfikowane były dla przypadków przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych oraz dostępnych danych z pomiarów w terenie. Część wyników swoich prac przedstawiłam w artykule i referacie pt. „*Identyfikacja parametrów charakteryzujących opory ruchu w sieci kanałów otwartych*” podczas XIX Ogólnopolskiej Szkoły Hydrauliki we Fromborku (1999). Zaprezentowana przeze mnie praca została nagrodzona w konkursie na najlepszy referat młodych pracowników nauki. W tym samym roku przedstawiłam też referat i publikację pt. „*Określanie parametrów charakteryzujących opory ruchu w kanałach otwartych*” na II Krajowym Seminarium Kół Naukowych „Techniczne aspekty ochrony środowiska” zorganizowanym na Politechnice Gdańskiej.

W celu pogłębienia wiedzy związanej z możliwościami i ograniczeniami stosowania różnych metod optymalizacji, w 1999 r. wzięłam udział (w charakterze słuchacza) w **konferencji „Algorytmy Ewolucyjne i Optymalizacja Globalna”** w Potoku Złotym. Zaowocował on zainteresowaniem tego rodzaju metodami, co w późniejszym czasie

zaowocowało ich zastosowaniem do wybranych zadań inżynierskich. Dzięki udziałowi w tej konferencji miałam przyjemność bycia poproszoną przez dra Jarosława Arabasa (organizatora wspomnianego wydarzenia) o przeczytanie manuskryptu jego przygotowywanej wówczas książki „Wykłady z algorytmów ewolucyjnych” i stworzenie „nieformalnej recenzji”. Autor był tak miły, że wspomniał o tym fakcie w podziękowaniach zamieszczonych w opublikowanej niedługo potem książce (2001), co do dzisiaj stanowi dla mnie miłą pamiątkę.

W 2000 roku rozpoczął się mój udział w pracach w ramach Grantu KBN nr PO4D 032 19 „Sterowanie operacyjne falą wezbraniową w warunkach powodzi”, realizowanych w zespole wykonawców: prof. Romuald Szymkiewicz, mgr inż. Katarzyna Weinerowska, mgr inż. Tomasz Dysarz, trwających do roku 2003 włącznie ([Załącznik 3, pkt.III.A.3](#)).

W efekcie przeprowadzonych w ciągu czterech lat prac przedstawiłam **rozprawę doktorską zatytułowaną „Zagadnienia odwrotne w hydraulice koryt otwartych”**, której recenzentami zostali prof. Janusz Kubrak (SGGW w Warszawie) oraz prof. Jerzy M. Sawicki (Politechnika Gdańska). Pracę obroniłam z wyróżnieniem w lipcu 2001 r. Z dniem 1 sierpnia 2001 zostałam zatrudniona na etacie adiunkta w Katedrze Hydrauliki i Hydrologii Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Gdańskiej. W 2002 r. otrzymałam Nagrodę Rektora Politechniki Gdańskiej (indywidualną II stopnia) za działalność naukową w 2001 roku.

#### b) Po uzyskaniu stopnia doktora

#### Tematyka badawcza 1)

W krótkim czasie po uzyskaniu stopnia doktora ukazało się kilka moich kolejnych publikacji związanych z przepływami w kanałach otwartych, w większości samodzielnych:

**Weinerowska K.** (2001): *Identyfikacja parametrów charakteryzujących opory nieustalonego przepływu w sieci kanałów otwartych*; Materiały XXI Ogólnopolskiej Szkoła Hydrauliki, Sasino, 17-21 września 2001 r., Gdańsk PAN Inst. Bud. Wodnego, 103-108.

**Weinerowska K.** (2002): *Procesy transformacji przepływu przez oczyszczalnię i ich praktyczne konsekwencje*, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „HYDRO-MOD’2002 Hydrauliczne metody modernizacji oczyszczalni ścieków”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2002 r., 23-34.

**Weinerowska K.** (2003): *Zastosowanie metody czasoprzestrzennych objętości skończonych do rozwiązania wybranych zagadnień nieustalonego przepływu wody*

w kanale otwartym, w: „Problemy Hydrotechniki. Współczesne podstawy planowania i projektowania w inżynierii i gospodarce wodnej”, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2003

**Weinerowska K.** (2002): *Reverse Flow Routing Problem solved by the Space-Time Conservation Method*, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics

Szymkiewicz R., **Weinerowska K.** (2005): *Analytical-numerical approach to solve the transport equation for steady gradually varied flow in open channel*, Far East J. App. Math., 19(2), 213-228.

W pracach tych przedstawione zostały różne aspekty związane z modelowaniem przepływów w kanałach otwartych, odnoszące się zarówno do tzw. zagadnień „wprost” (zagadnień prostych) jak i zagadnień odwrotnych. W publikacjach tych duży nacisk starałam się kłaść na kwestie poprawności formułowania zagadnień, wpływu własności stosowanych schematów numerycznych na uzyskiwane wyniki obliczeń oraz na dyskusję praktycznych zastosowań i potencjalnych problemów występujących na etapie ich aplikacji.

W tym także czasie ukazała się także publikacja będąca efektem prac w ramach wspomnianego wcześniej grantu „*Sterowanie operacyjne falą wezbraniową w warunkach powodzi*”, realizowanych dla potrzeb trzech zadań: „*Opracowanie danych koryt Nisy Kłodzkiej i Odry dla modelu przepływu nieustalonego*”, „*Tarowanie modelu przepływu nieustalonego i opracowanie jego wersji użytkowej*”, „*Zintegrowanie modelu przepływu z modelem optymalizacyjnym*”:

Szymkiewicz R., **Weinerowska K.** (2003); *Simplified Unsteady Flow Routing Models for Flood Operating Systems*, w: “Modelling and control of floods”, Publications of the Institute of Geophysics PAS, E-3 (365).

Analizowany odcinek Nisy Kłodzkiej stanowił wyzwanie nie tylko ze względu na obecność systemu zbiorników retencyjnych, ale także na złożoność geometryczną kształtu koryta rzecznoego, zmienność parametrów szorstkości wzdłuż kanału, a także istotną zmienność czasową i przestrzenną intensywności dopływu bocznego. Z jednej zatem strony model matematyczny wymagał uwzględnienia stopnia skomplikowania opisywanego systemu, z drugiej – ze względu na potrzebę jego wbudowania w model sterowania przepływami w całym systemie (rzeki wraz ze zbiornikami) – wskazana była jego relatywna prostota, by przy konieczności wielokrotnego uruchamiania obliczeń dla potrzeb poszukiwania optymalnych strategii sterowania systemem, uzyskiwać rozwiązanie w

akceptowalnie krótkim czasie. Ostatecznie opracowano model, który skutecznie został wykorzystane dla potrzeb sterowania i zweryfikowany na przykładach historycznych epizodów wezbrań powodziowych na rozpatrywanym obszarze.

W tym okresie byłam również współautorem wniosku o grant badawczy w ramach amerykańsko-polskiego programu: US-Poland Technology Transfer Program, zatytułowanego „*Flood control management in the river with system of reservoirs – application for Nysa Kłodzka Reservoir System in Poland*” (kierownik projektu: prof. Romuald Szymkiewicz, zespół wykonawców jak w poprzednim projekcie). Dofinansowanie zostało nam przyznane, a w ramach prac trwających w latach 2003-2004 zajmowałam się opracowywaniem modelu matematycznego dla analizowanego odcinka Nysy Kłodzkiej (z wykorzystaniem amerykańskiego oprogramowania CCHE1D) wraz z jego weryfikacją, a także opracowaniem raportów przejściowych i raportu końcowego. W tym czasie miały także miejsce dwa międzynarodowe spotkania uczestników projektów (w Stanach Zjednoczonych i w Polsce). Jako reprezentant naszego zespołu prezentowałam wyniki naszych prac przed przedstawicielami instytucji finansujących i innymi uczestnikami projektu. Nasz projekt uzyskał ocenę bardzo dobrą. W efekcie prac ukazała się publikacja:

Dysarz T., Szymkiewicz R., **Weinerowska K.** (2005): *Application of the CCHE1D Model to the Problem of Flood Control in Nysa Kłodzka Reservoir System in Poland*, in: ”Computational modeling for the development of sustainable water-resources system in Poland. US-Poland Technology Transfer Program”, Publications of the Institute of Geophysics PAS, E-5 (387).

W późniejszym terminie ukazała się jeszcze jedna moja publikacja związana z zagadnieniami przepływów w kanałach otwartych:

**Weinerowska-Bords K.** (2007): *Determination of selected parameters in a 1D open channel flow model*; TASK Quarterly. Vol. 11, nr.4, s. 341-364

Okolo roku 2003, prof. Romuald Szymkiewicz, będący ówczesnym Kierownikiem Katedry Hydrauliki i Hydrologii, w której byłam zatrudniona, zaproponował mi zmianę tematyki badawczej na zagadnienia związane z uderzeniem hydraulicznym w przewodach pod ciśnieniem. Niektóre z wymienionych wyżej analiz przeprowadzane więc były równolegle z nowo podjętym tematem naukowym.



## Tematyka badawcza 2) (przepływy w przewodach pod ciśnieniem)

Przeważający zakres prac związanych z tym kierunkiem badawczym został przedstawiony w poprzedniej części **Autoreferatu**. W ramach tematyki związanej z uderzeniem hydraulicznym opublikowałam kilka dodatkowych prac, niewchodzących w zakres ocenianego dzieła. Są to (krótko wspomniane w poprzednim punkcie Autoreferatu) publikacje:

**Weinerowska K.** (2006): *Przykłady problemów występujących przy modelowaniu uderzenia hydraulicznego*. W: Sawicki J.M., Weinerowska K. (red), *Hydraulika tranzytowych systemów w inżynierii sanitarnej. Zeszyt monograficzny nr 2*, PAN KILiW i PG, Gdańsk. Wydawnictwo AGNI, Pruszcz Gd., 69-78,

Kodura A., **Weinerowska K.** (2005): *Oddziaływanie lokalnej nieszczelności rurociągu na właściwości uderzenia hydraulicznego*”, II Kongres Inżynierii Środowiska, 4-7 września 2005, materiały tom 1, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol.32, 399-407.

Kodura A., **Weinerowska K.** (2005): *Some Aspects of Physical and Numerical Modelling of Water Hammer in Pipelines*, W: Nachtnebel H.P., Jugovic C.J. (eds), *Water Management and Hydraulic Engineering: Ninth Int. Symp. Proc.*, Ottenstein, Austria, 4th-7th Sept., Paper No. II.05, 125-134.

Kodura A. , **Weinerowska K.** (2007): *The influence of the local pipe leak on water hammer properties*. W: Pawłowski L., Dudzińska M., Pawłowski A. (eds): *Environmental Engineering, Proc. of the Second National Congress of Environmental Engineering*, 4-8 September, Lublin, Poland. Taylor & Francis, London, pp.239-244.

W pierwszej z przedstawionych wyżej publikacji przedstawiłam problemy związane z prawidłowym odwzorowaniem zjawiska uderzenia hydraulicznego na drodze modelowania numerycznego. Materiał został wcześniej zaprezentowany w czasie Seminarium naukowego zorganizowanego przez Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska oraz Sekcję Inżynierii Sanitarnej KILiW PAN w dniu 21 października 2005 roku, którego byłam współorganizatorem. Recenzentami prezentowanych prac byli prof. Czesław Grabarczyk oraz dr hab. Roman Wichowski.

W kolejnych pracach zaprezentowane zostały wyniki pomiarów i symulacji numerycznych wybranych epizodów uderzenia hydraulicznego, zarejestrowanych w czasie badań w laboratorium Politechniki Warszawskiej. Mój udział w każdej z prac polegał na

opracowaniu modelu numerycznego przebiegu uderzenia hydraulicznego wraz z przeprowadzeniem obliczeń i opracowaniem wyników symulacji numerycznych oraz na współdziałanie w redagowaniu treści artykułu (udział w każdej z tych publikacji szacuję na 50%). Efekty analiz przedstawiłam w postaci referatu w trakcie międzynarodowego sympozjum w Austrii, (WMHE, 2005), podczas gdy w tym samym czasie prezentację na II Kongresie Inżynierii Środowiska w Lublinie wygłosił dr A. Kodura.

W ramach tematyki badawczej 2) pojawił się także inny wątek w moich analizach.

Ze względu na zapotrzebowanie zgłaszane przez firmy zajmujące się dystrybucją systemów instalacyjnych z tworzyw sztucznych, część moich prac badawczych została ukierunkowana na **analizy zmienności współczynników strat lokalnych** w czasie przepływów pod ciśnieniem. Zasadniczy problem w praktycznych obliczeniach hydraulicznych polega na tym, że dostępne w literaturze (a upowszechnione w treści dawnej normy dotyczącej zasad obliczania strat ciśnienia w rurociągach PN-76/M-34034 oraz w licznych publikacjach naukowych i branżowych) wartości współczynników oporów zostały wyznaczone na podstawie badań materiałów i kształtek dostępnych w pierwszej połowie XX w., a ich systematyzacja została dokonana w latach 60. i 70. W związku z tym odnoszą się one przede wszystkim do przewodów stalowych, żeliwnych, ceramicznych i betonowych, a nie mają odniesienia do nowych systemów instalacyjnych z tworzyw sztucznych, w tym szczególnie do systemów rur wielowarstwowych oraz z polietylenu sieciowanego (PEX). Co więcej, powszechnie publikowane i szeroko wykorzystywane w praktyce tabele prezentują wartości współczynników bez ich uzależnienia od rodzaju materiału, z jakiego zostały wykonane, wartości liczb Reynoldsa (a co za tym idzie – prędkości przepływu), szczegółów związanych z typem połączenia z odcinkami prostymi rurociągu (spawane, zgrzewane, gwintowane itp) i innych specyficznych cech konkretnego przypadku. Istnieje więc konieczność wyznaczania współczynników oporów na drodze laboratoryjnej, indywidualnie dla każdego rodzaju kształtek.

Wobec dużego zainteresowania tego rodzaju analizami, złożyłam wniosek o dofinansowanie badań, nie został on jednak zaklasyfikowany do finansowania. W tej sytuacji, korzystając z dostępnych środków Katedry, wsparcia sponsorów w zakresie wyposażenia w systemy instalacyjne oraz przy częściowym wkładzie własnym, udało mi się ostatecznie zaprojektować, zorganizować i wdrożyć nowe stanowisko badawczo-dydaktyczne do analiz

oporów w trakcie przepływu pod ciśnieniem. Na stanowisku przeprowadzono analizy współczynników oporów dla różnych kształtek/złązek wybranych systemów instalacyjnych.

W efekcie prac powstała m.in. publikacja:

**Weinerowska-Bords K.** (2014): *Eksperymentalna analiza współczynników oporów lokalnych dla wybranych kształtek i złązek w systemach rur wielowarstwowych*, Instal 6(352), s. 42-49,

a także opracowania wewnętrzne, ekspertyzy oraz wiele prac dyplomowych. Badania potwierdziły, iż funkcjonujące w literaturze wartości współczynników są znacznie niższe niż rzeczywiste wartości uzyskiwane w trakcie przepływów. Co więcej, wartości współczynników oporów lokalnych zależą od warunków przepływu (liczby Reynoldsa, proporcji rozdziału strumieni w przypadku trójników itp.) i od szczegółów konstrukcyjnych kształtek, nie są więc wartościami stałymi. Warto przy tym zauważyć, że o ile stosowane dawniej przewody stalowe pracowały zazwyczaj w zakresie w pełni rozwiniętego ruchu turbulentnego, o tyle przewody nowszej generacji, szczególnie te o mniejszych średnicach i mniejszych prędkościach przepływu (np. w systemach ogrzewania podłogowego) pracują najczęściej w warunkach przepływu w przewodach hydraulicznie gładkich i w strefie przejściowej. Co więcej, podobne kształtki (np. kolanka DN 20 90°) pochodzące z systemów instalacyjnych różnych producentów cechowały znacząco różne wartości współczynników oporów, co było efektem pozornie mało znaczących różnic w ich konstrukcji. Potwierdziło to celowość wykonywania badań i potrzebę indywidualnego określania tych współczynników dla konkretnych systemów instalacyjnych. Wnioski z badań laboratoryjnych na tym etapie zostały też wykorzystane dla potrzeb analizy możliwości modelowania przepływów nieustalonych w przewodach pod ciśnieniem.

**Tematyka badawcza 3)** (problemy określania ilości wód opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych).

Rozszerzenie tematyki badań o kolejny obszar zrodziło się w wyniku decyzji Kierownika Katedry o wyznaczeniu mnie na reprezentanta naszego zespołu na III Ogólnopolskiej Konferencji Szkoleniowej „Wody opadowe – aspekty prawne ekonomiczne i techniczne”, odbywającej się w Toruniu (10-11 kwiecień 2008 r.). Wymagane było przygotowanie wykładu związanego z tematyką konferencji. Dokonałam więc analizy

podstawowych modeli obliczeniowych wykorzystywanych do określania ilości wód opadowych dla potrzeb projektowania i weryfikacji sieci i urządzeń kanalizacyjnych i odwodnieniowych, mającej na celu pokazanie, w jakim stopniu upraszczanie modeli obliczeniowych przekłada się na dokładność odwzorowania rzeczywistych procesów hydrologicznych w zlewniach. Na podstawie tych analiz opracowałam i wygłosiłam wykład p.t. „*Konsekwencje założeń upraszczających w obliczeniach kanalizacji wód opadowych*”, a rok później ukazała się publikacja:

**Weinerowska-Bords K.** (2008): *Uproszczenia w obliczeniach kanalizacji deszczowej*, *Wodociągi i kanalizacja*, 5(51)/2008, 76-77.

Temat okazał się bardzo na czasie, a wystąpienie wzbudziło zainteresowanie, zarówno przedstawicieli środowiska badawczego, jak i pracowników biur projektowych oraz środowisk branżowych. W tym też czasie rozpoczęła się moja współpraca z prof. Ziemowitem Suligowskim (Politechnika Gdańska), który nie tylko zachęcał do kontynuowania prac nad tą istotną tematyką, ale także skontaktował mnie z przedstawicielami środowiska branżowego i wydawcami, którzy byli zainteresowani moimi analizami. W efekcie przeprowadziłam dalszy etap badań mających na celu bardziej wnikliwą analizę różnych aspektów związanych z odwzorowaniem procesów hydrologicznych w procedurach obliczania odpływu ze zlewni zurbanizowanej. W zakresie tych badań leżały m.in. analizy wpływu na dokładność uzyskiwanych oszacowań odpływu ze zlewni takich czynników jak: stopień uproszczeń w opisie charakterystyk zlewni, szczegółowość stosowanych charakterystyk opadowych, poprawność i dokładność wyznaczania czasu koncentracji odpływu ze zlewni, typ stosowanego modelu obliczeniowego oraz cechy szczególne konkretnej metody obliczeniowej.

W efekcie tych analiz kilkakrotnie jeszcze wystąpiłam na seminariach i konferencjach:

**Weinerowska-Bords K.** (2009): Wykład p.t.: „*Problem umowności ustaleń przy planowaniu systemów odprowadzania wody opadowej*”, IV Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa „Wody opadowe – aspekty prawne, ekonomiczne i techniczne”, 6-7 kwietnia 2009 r., Włocławek

**Weinerowska-Bords K.** (2010): Wykład p.t.: „*Oceny ilościowe wód opadowych*”, V Ogólnopolska Konferencja Szkoleniowa „Wody opadowe – aspekty prawne, ekonomiczne i techniczne”, Gdynia 14-16.04.2010

**Weinerowska-Bords K.** (2011): „*Selected aspects of simplified runoff calculation in urban catchment*”, XII International Conference on Water Management and Hydraulic Engineering WMHE, 5-8 września 2011, Gdańsk.

oraz opublikowałam artykuły, zarówno w czasopismach naukowych jak i branżowych:

**Weinerowska-Bords K.** (2009): *Umowność ustaleń a wody opadowe*, Wodociągi i kanalizacja, 4(62)/2009, 38-39.

**Weinerowska-Bords K.** (2009): *Oceny ilościowe wód opadowych*, Wodociągi i kanalizacja, 4(74)/2010, 40-41.

**Weinerowska-Bords K.** (2010): *Względność ustaleń ilościowych w obliczeniach systemów odprowadzania wody opadowej*, Przegląd Komunalny: Gospodarka i Ochrona Środowiska. Zeszyty Komunalne [dodatek], 4(223)/2010, 68-73.  
Publikacja samodzielna, udział 100%

**Weinerowska-Bords K.** (2011): *Wybrane aspekty związane z zastosowaniem równania Manninga dla potrzeb szacowania ilości ścieków sanitarnych*, Gaz Woda i Technika Sanitarna 3/2011, 98-102.

**Weinerowska-Bords K.** (2011): *Relativity of simplified runoff calculations for rainwater drainage systems*, In: Sawicki J.M., Weinerowska-Bords K. (eds) „Technical progress in sanitary engineering”, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 214-224.  
Publikacja samodzielna, udział 100%

**Weinerowska-Bords K.** (2010): *Time of concentration in simplified calculations in urban catchments*, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN. vol 68, Warszawa, 367-377, punktacja wg MNiSW= 15 pkt. (indeksowany w bazie WoS)

Olechnowicz B., **Weinerowska-Bords K.** (2014): *Impact of Urbanization on Stormwater Runoff from a Small Urban Catchment: Gdańsk Małomiejska Basin Case Study*, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol.61, No.3-4, 141-162, DOI: 10.1515/heem-2015-0004.

**Do najistotniejszych publikacji z tego zakresu prac zaliczam monografię:**

**Weinerowska-Bords K.** (2010): *Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk,

w której przedstawiłam obszerną syntezę problemów występujących przy obliczaniu ilości wód opadowych odprowadzanych ze zlewni (począwszy od kwestii formalnych i prawnych, poprzez sformułowanie problemu, ilość i jakość dostępnych danych oraz dobór metody obliczeniowej) oraz analizę czynników determinujących dokładność obliczeń przy

zastosowaniu metod globalnych (uproszczonych). W monografii przedstawiłam wiele analiz szczegółowych, w tym porównanie różnych formuł opadowych, porównanie metod obliczania czasu koncentracji oraz analizę podstawowych metod obliczeniowych wykorzystywanych w Polsce (metoda stałych natężeń deszczu i metoda natężeń granicznych) w kontekście ich zgodności z procesami hydrologicznymi w zlewni. **Wg mojej wiedzy było to pierwsze tego rodzaju opracowanie.** Książka została wkrótce wykorzystana jako podręcznik w nauczaniu powiązanych tematycznie przedmiotów, a także jest wykorzystywana przez wielu praktyków w biurach projektów i instytucjach.

W tym również okresie, otrzymawszy uprzednio od dr inż. Elżbiety Wołoszyn rozpoczęte a niedokończone analizy zmienności opadów na terenie Gdańska, podjęłam się ich uzupełnienia o brakujące dane oraz przeprowadziłam ich pełną analizę i **opracowałam wstępne formuły opadowe dla obszaru Gdańska-Wrzeszcza** (na podstawie wyników pomiarów opadów w stacji pomiarowej Politechniki Gdańskiej). **Wg mojej wiedzy było to pierwsze tego rodzaju opracowanie dla obszaru Gdańska.** W efekcie tych prac powstały artykuły:

**Weinerowska-Bords K.** (2012): Lokalne formuły opadowe dla Gdańska-Wrzeszcza na podstawie dwudziestoletnich obserwacji opadów na Politechnice Gdańskiej, Inżynieria Morska i Geotechnika, Rok 33, Nr 6, 662-672

**Weinerowska-Bords K.** (2015): *Development of Local IDF-formula using Controlled Random Search method for Global Optimization*, Acta Geophysica, DOI:10.2478/s11600-014-0242-5, vol.63., No.1/2015, 232-274, (indeksowany w baize WoS),

z których **drugi uważam za kolejne bardzo ważne opracowanie w moim dorobku.** Jest to obszerny artykuł, w którym oprócz samej analizy danych opadowych znalazły się rozważania na temat podstaw teoretycznych opracowania charakterystyk opadowych, w tym m.in. kwestii spójności i kompletności danych, dostępnych metod obliczeniowych oraz wpływu sposobu prowadzenia analiz na uzyskiwane wyniki. W artykule opisano także zastosowaną w analizach metodę *Controlled Random Search*, która posłużyła do celów wyznaczenia parametrów funkcji opisujących zależność natężenia opadów od czasu trwania deszczu i prawdopodobieństwa jego przewyższenia. Wspomnianą metodę porównano z efektami działania innych metod optymalizacji, w tym m.in. algorytmu ewolucyjnego. Przy okazji prowadzonych analiz wykorzystano szereg doświadczeń z wcześniejszych etapów pracy

naukowej, m.in. z okresu prac nad identyfikacją parametrów dla modeli przepływów w kanałach otwartych.

Kontynuacją prac nad charakterystykami opadów w Gdańsku były analizy czasowej i przestrzennej zmienności opadów na terenie innych dzielnic. W tym okresie podjęłam współpracę z Melioracjami Gdańskimi (obecne Gdańskie Wody), co umożliwiło wykorzystanie danych opadowych z kilku stacji na obszarze zlewni potoku Strzyża w Gdańsku. W efekcie zostały opracowane kolejne zależności opisujące zmienność natężenia opadów, co poskutkowało publikacją:

Bielecka K., **Weinerowska-Bords K.**, Szydłowski M. (2013): *Analiza czasowej i przestrzennej zmienności opadów w zlewni potoku Strzyża w Gdańsku*, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr. 6 (2013), s.490-501

wystąpieniem na seminarium naukowo-technicznym:

**Weinerowska-Bords K.** (2013): „*Analiza czasowej i przestrzennej zmienności opadów w zlewni potoku Strzyża w Gdańsku*”, Seminarium naukowo-techniczne „Lokalne zagrożenia powodziowe w małych zlewniach miejskich gmin pomorskich”, 24 maja 2013, Gdańsk

oraz udziałem w projekcie badawczo-rozwojowym „*Sterowanie retencją wód opadowych i roztopowych oraz prognozowanie zagrożenia powodziowego w przymorskiej zlewni zurbanizowanej*”, finansowanym przez WFOŚiGW w Gdańsku (2015-2017). Kierownikiem projektu był prof. Michał Szydłowski, a wykonawcami Piotr Zima, **Katarzyna Weinerowska-Bords**, Patrycja Mikos-Studnicka, Jakub Hakiel i Andrzej Świerszcz. Mój udział w projekcie polegał na realizacji zadania: „*Czasoprzestrzenny rozkład opadów atmosferycznych w Gdańsku*” a udział w realizacji projektu wynosił 10%. W efekcie moich prac nad opracowaniem zaktualizowanych charakterystyk opadowych powstało wewnętrzne opracowanie:

**Weinerowska-Bords K.** (2017): *Analiza opadów zarejestrowanych w wybranych stacjach pomiarowych na obszarze zlewni potoku Strzyża w Gdańsku* (opracowanie wewnętrzne Katedry Hydrotechniki WILiŚ PG),

które zostało wykorzystane w dalszych etapach prac w ramach projektu oraz przy opracowaniu raportu końcowego. Wymiernym efektem prac zespołu była publikacja:

Szydłowski M., Mikos-Studnicka P., Zima P., **Weinerowska-Bords K.**, Hakiel J., Szawurska D. (2015): *Storwater and snowmelt runoff storage control and flash*

---

*flood hazard forecasting in the urbanized coastal basin*, 14th International Symposium Water Management and Hydraulic Engineering 2015/ ed. J.Riha, T.Julinec, K.Adam, Institute of Water Structures, FCE, Brno University of Technology, 2015, s.141-150 (indeksowana na WoS).

W zakresie moich prac badawczych z obszaru tematyki hydrologicznej były także analizy **retencyjności wód opadowych na dachach zielonych**. W tym celu opracowałam i wdrożyłam nowe stanowisko badawczo-dydaktyczne dla potrzeb badania zmienności czasowej retencji wód opadowych na modelu zielonego dachu oraz przygotowałam projekt koncepcyjny i nadzorowałam wykonanie drugiego stanowiska badawczo-dydaktycznego - do badania wpływu retencyjności substratu roślinnego oraz gatunków roślin ekstensywnych na retencję wód opadowych. Wyniki z tych badań nie zostały jeszcze opublikowane (etapy pośrednie zostały częściowo zrealizowane i opisane w ramach trzech prac dyplomowych magisterskich).

W ramach nurtu hydrologicznego wykonałam także kilka ekspertyz i opracowań związanych zazwyczaj z obliczaniem odpływu ze zlewni (zurbanizowanych i niezurbanizowanych).

Lista wszystkich opracowań, także tych nieujętych w szczegółowym opisie, znajduje się w **Załączniku 3 pkt II.D. oraz III.M.**

## **6. Podsumowanie dorobku naukowego**

Mój dorobek naukowy tematycznie lokuje się na trzech różnych polach, opisanych w poprzednich częściach autoreferatu. Większość z publikacji stanowi prace indywidualne lub wykonywane w niewielkich zespołach (najczęściej dwu- lub trzyosobowych). Wiele z podjętych tematów ma duże przełożenie na aspekty praktyczne i często stanowi odpowiedź na zapotrzebowanie środowiska branżowego/przemysłowego. Taki stan rzeczy z jednej strony utrudnił uzyskanie wyższych indeksów parametryzacyjnych, z drugiej jednak znacząco wpłynął na różnorodność prac i na moje doświadczenie naukowe i zawodowe, co znalazło swoje przełożenie na działalność dydaktyczną i popularyzatorską, opisane w dalszej części autoreferatu. Poniżej przedstawiono szczegółowe podsumowanie działalności naukowej.



### Przed uzyskaniem stopnia doktora

W latach 1997-2001 napisałam jedną pracę przejściową po pierwszym roku Studium Doktoranckiego oraz opublikowałam cztery artykuły, wszystkie w materiałach recenzowanych. Uczestniczyłam w pięciu konferencjach, wygłaszając cztery referaty (Załącznik 3, pkt.II.C). Za jeden z nich otrzymałam nagrodę dla młodych pracowników nauki (1999 r.) (Załącznik 3, pkt.II.I). Brałam udział w pracach nad jednym projektem badawczym w charakterze wykonawcy (Załącznik 3, pkt.II.H). Odbylam jeden staż zagraniczny (Załącznik 3, pkt.III.L).

### Po uzyskaniu stopnia doktora

W latach 2001-2019 opublikowałam łącznie 33 prace naukowe, w tym 6 w materiałach indeksowanych na Web of Science (z czego cztery posiadają Impact Factor), jedną monografię (o zasięgu krajowym), 5 rozdziałów w monografiach (z czego 4 o zasięgu międzynarodowym), 11 artykułów z czasopismach recenzowanych (nieposiadających IF), 6 materiałów konferencyjnych recenzowanych oraz 4 w czasopismach branżowych i materiałach konferencyjnych nierecenzowanych (Załącznik 3, pkt.I B, II.A i C).

Uczestniczyłam w 16 konferencjach i seminariach, z czego na dziesięciu wygłosiłam referaty (Załącznik 3, pkt.II.J i III.B). Napisałam 2 recenzje artykułów w czasopismach indeksowanych w bazie JCR (Załącznik 3, pkt. III.P).

Byłam wykonawcą prac badawczych w trzech projektach badawczych, w tym jednym międzynarodowym (Załącznik 3, pkt.III.A). Uczestniczyłam w wykonaniu 16 ekspertyz i prac projektowych/koncepcyjnych (Załącznik 3, pkt.II.C i III.M).

Za swoją działalność naukową otrzymałam dwie nagrody (Załącznik 3, pkt.II.I).

Sumaryczny *impact factor* moich publikacji (wg listy JCR, zgodnie z rokiem publikacji) wynosi 6,058. Indeks Hirscha wg WoS wynosi 2, wg bazy Scopus 3, a wg Google Scholar 6. Całkowita liczba cytowań wg bazy WoS 18 (+3\*), wg bazy Scopus 34, wg Google Scholar 111. Sumaryczna liczba punktów MNiSW wszystkich publikacji naukowych zgodnie z rokiem publikacji wynosi 191, natomiast wg punktacji z 2018 r. stanowi 237 pkt.

\*) W chwili zakończenia prac nad Autoreferatem jedna z publikacji (Załącznik 3, pkt.I.B. poz. 7) nie została jeszcze zindeksowana na WoS, tym samym nie są widoczne wszystkie cytowania. Inna publikacja (Załącznik 3, pkt.II.A. poz.3) jest zindeksowana na WoS, ale nie jest przypisana do profili autorów. Nie zostało też zindeksowane jej cytowanie. Oba problemy zgłoszono do administratorów WoS, są w trakcie korekty.

## 7. Działalność dydaktyczna

Z szeroko rozumianą działalnością dydaktyczną jestem związana od początku swojej pracy zawodowej na Politechnice Gdańskiej (1998 r.).

**Zajęcia dydaktyczne** prowadzę od 1998 roku, początkowo jako uczestniczka Studium Doktoranckiego „*Geotechnika i Inżynieria Środowiska*” przy ówczesnym Wydziale Inżynierii Środowiska (obecnie Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska), a od 2001 r. do chwili obecnej – jako pracownik Politechniki Gdańskiej (początkowo naukowo-dydaktyczny, obecnie dydaktyczny). W pierwszych latach pracy prowadziłam zajęcia ćwiczeniowe, projektowe i laboratoryjne z przedmiotów *Hydraulika* oraz *Hydrologia* na kierunkach Budownictwo oraz Inżynieria Środowiska. W kolejnych latach lista prowadzonych przeze mnie przedmiotów rozszerzyła się o *Mechanikę płynów i hydraulikę*, *Hydrologię zlewni zurbanizowanej* oraz *Urban hydrology*, a epizodycznie także *Gospodarkę wodną*, *Techniczne aspekty obiektów gospodarki wodnej* oraz *Melioracje i odwodnienia*. Od czasu podjęcia studiów doktoranckich do chwili obecnej prowadziłam wszystkie formy zajęć (wykłady, ćwiczenia, projekt, seminarium, laboratoria, praktyki) w ramach studiów stacjonarnych i niestacjonarnych (pierwotnie jednolitych, a po zmianie programów nauczania - pierwszego i drugiego stopnia), w języku polskim i angielskim, na swoim macierzystym Wydziale (na kierunkach Inżynieria Środowiska, Budownictwo oraz Environmental Engineering). Dodatkowo od roku 2009 prowadzę zajęcia dla studentów Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej (w latach 2009-2016 z przedmiotu *Hydrologia i gospodarka wodna* dla kierunku Technologie Ochrony Środowiska, a od roku 2017 – z części hydrologicznej w ramach przedmiotu *Geologia i hydrologia* dla kierunku Zielone Technologie i Monitoring). Od 2005 roku corocznie uczestniczę w programach SOCRATES/ERASMUS, w ramach których prowadzę zajęcia dla studentów z zagranicy (w jęz. angielskim).

W związku z kilkukrotnie zmieniającymi się programami studiów, w tym także zmianą systemu kształcenia (przejście na studia dwustopniowe), we wspomnianym okresie opracowałam i wdrożyłam autorskie **programy nauczania** z przedmiotów *Hydrologia zlewni zurbanizowanej* i *Urban hydrology* (dla których jestem osobą odpowiedzialną za przedmiot i które w całości prowadzę) oraz z części hydrologicznej przedmiotu *Geologia i hydrologia*, którego jestem współprowadzącym. Dodatkowo współtworzyłam nowe programy nauczania z przedmiotów *Hydraulika* i *Hydrologia* w zakresie zajęć ćwiczeniowych, laboratoryjnych i projektowych, modyfikowane kilkakrotnie w ciągu minionego okresu. Ponadto dla potrzeb

otwieranego w roku akad. 2015/2016 **Studium Podyplomowego „Współczesne metody hydrologii inżynierskiej w gospodarce wodnej”** przy WILiŚ PG opracowałam treści programowe dwóch przedmiotów: *Podstawy modelowania matematycznego w hydrologii* oraz *Modelowanie odpływu ze zlewni zurbanizowanej*, które to przedmioty następnie w całości prowadziłam dla słuchaczy wspomnianego studium w latach 2015/2016 oraz 2016/2017.

Prowadziłam też wykłady gościnne w jęz. angielskim dla studentów Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezyjnej Uniwersytetu w Ljublanie (w maju 2005 r.) pt. *Flood control management in the river with systems of reservoirs*.

W ankietach studenckich oceniających pracę dydaktyczną nauczyciela uzyskałam średnią ocenę 4,85 (w skali od 2,0 do 5,0).

Szczegółowy zakres prowadzonych przeze mnie zajęć przedstawia **Załącznik 3, pkt.III. I.d) i e)**.

Dla potrzeb prowadzonych zajęć dydaktycznych opracowałam samodzielnie lub współtworzyłam szereg różnorodnych **materiałów dydaktycznych**. W 2004 roku byłam redaktorem i współautorem pracy zbiorowej (podręcznika) „*Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki*”, wydanej w formie cyfrowej przez Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej (udział ok. 60%). W 2008 r. opublikowałam książkę p.t. „*Od Pitota do Reynoldsa. Dziewięć historii o tych, którzy tworzyli hydraulikę*”(Wydawnictwo PG), która w 2013 r. doczekała się kolejnego wydania. W 2010 r. ukazała się moja książka p.t. „*Wpływ uproszczeń na obliczanie sphywu deszczowego w zlewni zurbanizowanej*”, która stała się podstawowym podręcznikiem do przedmiotu Hydrologia zlewni zurbanizowanej oraz została wykorzystana jako podręcznik pomocniczy do innych przedmiotów. W 2017 i 2018 roku ukazały się dwa wydania książki „*Hydraulika do poćwiczenia. Przepływy w przewodach ciśnieniowych*”, stanowiącej materiały dydaktyczne do ćwiczeń z przedmiotu Hydraulika. Oprócz książek opracowywałam także pomocnicze materiały dydaktyczne w formie konspektów lub też instrukcji.

W 2013 roku, na potrzeby Urzędu Miasta w Gdyni, opracowałam **materiały szkoleniowe** pt. „*Obliczanie ilości wód opadowych i ścieków sanitarnych na terenach zurbanizowanych*”, które zostały udostępnione pracownikom Urzędu.

Od 2001 roku byłam **promotorem 63 zakończonych już prac dyplomowych, w tym 35 prac inżynierskich oraz 28 prac dyplomowych magisterskich**. Wiele spośród wspomnianych prac realizowanych było we współpracy z lokalnym środowiskiem branżowym oraz firmami związanymi z inżynierią środowiska. Trzy spośród wspomnianych

prac magisterskich realizowane były w jęz. angielskim w ramach międzynarodowej wymiany studentów programu ERASMUS (dwie studentki Politechniki Gdańskiej – Agnieszka Lorbicka (2005 r.), Wigna Kwapisz (2016 r.) oraz jeden student Uniwersytetu w Ljublanie – Marko Zibret (2005 r.)). W ciągu tego okresu powierzono mi także napisanie 23 recenzji prac dyplomowych, w tym 8 prac inżynierskich i 15 magisterskich.

Siedmioro moich podopiecznych dyplomantów uzyskało **wyróżnienia i nagrody**:

- *stypendia Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku w ramach konkursów dla magistrantów* (trzy osoby):

Katarzyna Rzeszutek: „Analiza czasowej zmienności opadów w Gdańsku na podstawie 20-letnich obserwacji opadów w ogródku meteorologicznym Politechniki Gdańskiej” (2010)

Borys Olechnowicz: „Analiza możliwości alternatywnego zagospodarowania wód opadowych dla wybranego obszaru osiedla Gdańsk Orunia Górna” (2011)

Danuta Hering: „Analiza odpływu wód deszczowych ze zlewni zurbanizowanej na terenie Gdyni na przykładzie Potoku Chyłońskiego i rzeki Chylonki” (2011),

- *nagrody za najlepszą pracę dyplomową magisterską WILiŚ*:

Agnieszka Lorbicka (Temat pracy: Zastosowanie metody chwilowego hydrogramu jednostkowego do określania odpływu ze zlewni niekontrolowanej”) 2005

Natalia Gietka (Temat pracy: „Doświadczalna i teoretyczna analiza współczynników oporów lokalnych na kolankach w systemach przewodów wielowarstwowych”) 2013

- *nagroda w konkursie PZITS na najlepszą pracę dyplomową*

Wioleta Szultka i Aleksandra Zelma za pracę p.t. „Eksperymentalna analiza wartości współczynników oporów lokalnych przy przepływie przez trójnik dla wybranych systemów rur wielowarstwowych”. Nagroda pieniężna oraz udział w warsztatach dla laureatek oraz zaproszenie na warsztaty dla promotora (wrzesień 2016)

- *wyróżnienie w konkursie Pomorskiej Okręgowej Izby Inżynierów Budownictwa kadencji 2014-2018 na najlepszą pracę dyplomową*:

Wioleta Szultka i Aleksandra Zelma za pracę p.t. „Eksperymentalna analiza wartości współczynników oporów lokalnych przy przepływie przez trójnik dla wybranych systemów rur wielowarstwowych”. Nagroda pieniężna oraz udział w warsztatach dla laureatek oraz zaproszenie na warsztaty dla promotora (wrzesień 2016)

Obecnie w trakcie realizacji jest 9 prac dyplomowych magisterskich oraz jedna inżynierska.

W latach 2013-2016 byłam opiekunem pomocniczym, a od 2016 roku jestem **promotorem pomocniczym jednej pracy doktorskiej** (Natalia Gietka: Wpływ niejednorodności materiałowych rurociągu na warunki propagacji fali ciśnienia w trakcie

przepływu nieustalonego”, data otwarcia przewodu: 26.10.2016, promotor: prof. dr hab. inż. Romuald Szymkiewicz).

Od 2001 roku trzykrotnie sprawowałam **opiekę nad Indywidualnym Przebiegiem Studiów** studentów: Wacława Grzywacza (rocznik 2008 Inżynierii Środowiska), Magdaleny Prabuckiej (rocznik 2009 Inżynierii Środowiska) oraz Anety Senk (rocznik 2009, Inżynieria Środowiska). Byłam także opiekunem roku dla rocznika 2009 Inżynierii Środowiska.

W latach 2014-2015 uczestniczyłam w pracach nad tworzeniem, a następnie byłam pierwszym **współopiekunem Koła Naukowego „Konfuzor”** działającego przy Katedrze Hydrotechniki WILiŚ PG. W ramach opieki nad Kołem naukowym opracowałam ramy działalności naukowej koła, byłam także inicjatorem i współautorem cyklu otwartych wykładów dla studentów, wygłoszonych przez pracowników Katedry Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, związanych tematycznie z hydrauliką, hydrologią i gospodarką wodną, ale wykraczających poza zakres objęty programem studiów. Dodatkowo, byłam pomysłodawcą cyklu prezentacji przygotowywanych przez studentów dla studentów, a także współorganizatorem warsztatów poświęconych umiejętnościom komunikacyjnym i pracy w zespole (współorganizowanych i prowadzonych przez studentów Wydziału Nauk Społecznych Uniwersytetu Gdańskiego).

W kolejnych latach współpracowałam z Kołem Naukowym prowadząc **indywidualną opiekę naukową** nad kilkorgiem studentów, co zaowocowało przedstawieniem przez nich referatów i posterów na konferencjach i seminariach oraz publikacją artykułów w czasopiśmie i materiałach branżowych lub konferencyjnych. Byli to:

- inż. Wioleta Szultka, inż. Aleksandra Zelma: „Eksperymentalna analiza wartości współczynników oporów lokalnych przy przepływie przez trójnik dla wybranych systemów rur wielowarstwowych”, wystąpienie: V Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa „Inżynieria Środowiska Młodym Okiem”, Białystok 2016; (publikacja: Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem, tom 20, 2016)
- Artur Groth: „Analiza zmienności opadów na obszarze zlewni Strzyży w Gdańsku”, wystąpienie: V Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa „Inżynieria Środowiska Młodym Okiem”, Białystok 2016; (publikacja: Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem, tom 20, 2016);
- inż. Weronika Łykowska, inż. Przemysław Kłós: „Eksperymentalna analiza wartości współczynników oporów lokalnych na nagłym zwężeniu przewodu i złączce prostej dla wybranych systemów rur wielowarstwowych”, - poster na I Interdyscyplinarnej Akademickiej Konferencji Ochrony Środowiska 2016
- inż. Weronika Łykowska, inż. Adrianna Necel: „Doświadczalne wyznaczanie retencyjności na modelach zielonych dachów” - poster na II Interdyscyplinarnej Akademickiej Konferencji Ochrony Środowiska, Gdańsk 2017.

- Marek Pobłocki: „Eksperymentalna analiza współczynników oporów lokalnych przy przepływie przez wybrane trójniki systemu rur wielowarstwowych”, wystąpienie: VI Międzynarodowa Studencka Konferencja Naukowa „Inżynieria Środowiska Młodym Okiem”, Białystok, maj 2017 (publikacja: Rynek Instalacyjny Nr10/2017)

Jedna z wymienionych osób, Artur Groth, uzyskała nagrodę za najlepszy referat na V Międzynarodowej Studenckiej Konferencji: Inżynieria Środowiska Młodym Okiem.

W ramach swojej działalności dydaktycznej od dłuższego czasu staram się wprowadzać aktywizujące metody nauczania, w tym m.in. pracę metodą warsztatową, *case study*, oraz pracę indywidualną z podopiecznym z wykorzystaniem metod z zakresu tutoring. Sukcesywnie **podnoszę kwalifikacje zawodowe**. W 2010 ukończyłam Kurs Pedagogiczny organizowany przez Politechnikę Gdańską. W 2015 r. ukończyłam certyfikowany kurs Collegium Wratislaviense „Szkoła Tutorów I stopnia” (w ramach którego odbyłam zajęcia m.in. z zakresu edukacji spersonalizowanej, tutoring naukowego i rozwojowego oraz wykorzystania wybranych narzędzi coachingowych w pracy ze studentami), a w 2016 r. kolejny stopień kursu – „Praktyk Tutoringu”, uzyskując oba certyfikaty. W 2016 r. uczestniczyłam także w III Ogólnopolskim Kongresie Tutoringu w Warszawie jako słuchacz i uczestnik warsztatów. Dodatkowo, w 2018 roku wzięłam udział w warsztacie szkoleniowym „Efektywna komunikacja i współpraca ze studentami dla kadry dydaktycznej Politechniki Gdańskiej”, realizowanym w ramach Modułu III projektu „Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Gdańskiej” POWER 3.5 (obecnie uczestniczę nadal w tym projekcie, w ramach czego przygotowuję aktualizację i modyfikację wybranych materiałów dydaktycznych).

Pozyskane kompetencje dydaktycznie pozwalają na ciągłe udoskonalanie zajęć. Zaowocowały także zainicjowaniem i realizacją (w 2015 r) dwusemestralnego **Pilotażowego Programu Tutoringu** na kierunku Inżynieria Środowiska.

Jestem także **autorką czterech artykułów o tematyce dydaktycznej oraz rozdziału w recenzowanej monografii naukowej** poświęconej tutoringowi („Tutoring jako spotkanie. Historie indywidualnych przypadków”; red.:B. Karpińska-Musiał, Magdalena Panońko; Wolters Kluwer, Warszawa 2018).

Za działalność dydaktyczną otrzymałam cztery Nagrody Rektora Politechniki Gdańskiej (w tym trzy nagrody indywidualne II stopnia oraz jedną nagrodę zbiorową III stopnia), dwie nagrody Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska za wyróżniające prowadzenie zajęć dydaktycznych oraz dwie nagrody i jedno wyróżnienie Studentów WILiŚ dla najlepszego prowadzącego zajęcia. W 2013 roku otrzymałam Medal Komisji Edukacji Narodowej.

## 8. Działalność organizacyjna

W latach 2000-2017 wzięłam udział w **trzech projektach badawczych**, w tym jednym międzynarodowym w ramach US-Poland Technology Transfer Program, współpracując z National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi. W ramach prac czynnie uczestniczyłam w badaniach oraz brałam osobisty udział w spotkaniach uczestników projektu w Polsce oraz Stanach Zjednoczonych (Oxford, Mississippi; 2004 r). W ramach współpracy międzynarodowej jestem także wieloletnim **uczestnikiem programów SOCRATES/ERASMUS**. Oprócz działalności dydaktycznej związanej z tym programem, wzięłam też udział w spotkaniach roboczych poświęconych współpracy między Wydziałem Inżynierii Lądowej i Geodezyjnej Uniwersytetu w Ljubljanie a Katedrą Hydrotechniki Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej, na których prezentowałam Wydział oraz uzgadniałam szczegóły wymiany studenckiej i opieki nad dyplomantami, oraz przeprowadziłam gościnne wykłady. Obecnie biorę udział w „**Zintegrowanym Programie Rozwoju Politechniki Gdańskiej**” finansowanym ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój.

Łącznie współuczestniczyłam lub byłam uwzględniana jako wykonawca w 6 składanych wnioskach grantowych, w tym trzykrotnie jako kierownik projektu.

Byłam **współorganizatorem trzech seminariów naukowych oraz jednej konferencji naukowo-technicznej** (Załącznik 3, pkt.III.C). Byłam też **członkiem komitetów redakcyjnych** Zeszytów monograficznych Politechniki Gdańskiej oraz monografii „Technical progres in sanitary engineering”, a także samodzielnym redaktorem jednej pracy zbiorowej (podręcznika) (Załącznik 3, pkt.III.I).

W czynny sposób przyczyniałam się do **rozwoju bazy dydaktyczno-badawczej** swojego Wydziału. W latach 2010-2017 opracowałam, współorganizowałam i wdrożyłam pięć stanowisk badawczo-dydaktycznych (Załącznik 3, pkt.III.Ie2). Wielokrotnie podejmowałam współpracę z przedstawicielami firm z branży inżynierii środowiska w celu współorganizowania pomocy dydaktycznych, wyposażania stanowisk badawczych, umożliwiania kontaktów naukowo-zawodowych między studentami a przedstawicielami firm, organizowania wykładów gościnnych, prezentacji wybranej tematyki.

W czynny sposób **popularyzowałam tematykę związaną z bezpiecznym odprowadzaniem wód opadowych** z terenów zurbanizowanych, poprzez wygłaszanie

wykładów dla przedstawicieli środowisk naukowych, projektowych i wykonawczych (w ramach konferencji i seminariów), prowadzenie szkoleń i przygotowywanie materiałów szkoleniowych (np. dla pracowników urzędów miast) oraz popularyzację literatury naukowej. W tym celu m.in. ponad 120 egzemplarzy przygotowanej monografii (Weinerowska-Bords, 2010) zostało rozproszonych do biur projektów i do osób prywatnych. Wg mojej wiedzy, w wielu przypadkach książka ta stała się istotnym podręcznikiem wspomagającym pracę projektantów i urzędników. Ponadto jestem także autorem rozdziału w *Poradniku kierownika budowy i inspektora nadzoru* (Wyd. Dashoffer Verlag).

Z drugiej strony troszczyłam się o **angażowanie studentów** w poznawanie i propagowanie tematyki zielonych dachów. Współorganizowałam wraz z nimi pokazy w ramach Bałtyckich Festiwali Naukowych oraz Pomorskiego Festiwalu Naukowego, angażowałam ich w prace badawcze. Wielu spośród moich podopiecznych znalazło pracę w ważnych instytucjach i wiodących firmach z branży inżynierii sanitarnej.

Brałam też udział w innych działaniach popularyzatorskich, m.in. w akcji „Dziewczyny na Politechniki”, czy też angażowałam się w przygotowywanie prezentacji Katedry w środowisku branżowym.

Angażowałam się także w inne **prace organizacyjne na rzecz swojego Wydziału lub swojej Katedry**, m.in. dwukrotnie byłam członkiem Komisji Kwalifikacyjnej w czasie rekrutacji na studia, przez wiele lat rozliczałam w Katedrze godziny dydaktyczne. Obecnie jestem koordynatorem katedralnym d.s. kart przedmiotów i punktów ECTS. Brałam udział w przygotowywaniu modyfikacji efektów kształcenia prowadzonych przez katedrę przedmiotów. Zajmowałam się także uaktualnianiem proponowanych w katedrze tematów prac dyplomowych oraz brałam udział w przygotowywaniu pytań egzaminacyjnych na egzaminy dyplomowe inżynierskie i magisterskie. Wielokrotnie uczestniczę w komisjach egzaminacyjnych dyplomowych. W roku ak. 2017/2018 na prośbę Kierownika Katedry przeprowadziłam hospitacje zajęć dydaktycznych prowadzonych przez doktorantów naszej Katedry.

Przez jedną kadencję byłam członkiem Rady Wydziału, reprezentując pracowników niesamodzielnych.

Od 2011 roku jestem członkiem Stowarzyszenia Hydrologów Polskich. Do marca 2018 r. byłam także członkiem Polskiego Stowarzyszenia „Dachy Zielone”.

Za całokształt pracy został mi przyznany Brązowy Medal za Długoletnią Służbę (2011 r.)



## 9. Zestawienie dorobku

L.p.	Rodzaj osiągnięcia	Liczba	
		Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora
1	<b>Publikacje naukowe, w tym:</b>	<b>4</b>	<b>33</b>
	- indeksowane na WoS (w czasopismach posiadających Impact Factor)		6 (4)
	- monografie w jęz. o zasięgu krajowym		1
	- rozdziały w monografiach w jęz. o zasięgu międzynarodowym		4
	- rozdziały w monografiach w jęz. o zasięgu krajowym		1
	- artykuły w czasopismach recenzowanych		11
	- materiały konferencyjne recenzowane	4	6
	- czasopisma branżowe i materiały konferencyjne nierecenzowane		4
2	<b>Publikacje dydaktyczne i popularyzatorskie, w tym:</b>		<b>9</b>
	- książki i monografie w języku o zasięgu krajowym		3
	- rozdziały w monografii w języku o zasięgu krajowym		1
	- artykuły o treści dydaktycznej i popularyzatorskiej		5
3	<b>Projekty badawcze, w tym:</b>		<b>3</b>
	- międzynarodowe		1
	- krajowe		2
4	<b>Autor i współautor prezentacji na konferencjach i seminariach, w tym:</b>	<b>4</b>	<b>10</b>
	- międzynarodowych		2
	- krajowych	4	8
5	<b>Twórcze prace zawodowe, w tym:</b>		<b>21</b>
	- nowe stanowiska badawcze		5
	- opinie i ekspertyzy		4
	- prace projektowe i koncepcyjne		12
6	<b>Nagrody i wyróżnienia, w tym:</b>		<b>13</b>
	- za działalność naukową	1	2
	- za działalność dydaktyczną		10
	- za całokształt pracy		1
7	<b>Promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim</b>		<b>1</b>
8	<b>Promotor prac dyplomowych, w tym:</b>		<b>63</b>
	- inżynierskich		35
	- magisterskich		28
9	<b>Recenzent prac dyplomowych, w tym:</b>		<b>23</b>
	- inżynierskich		8
	- magisterskich		15
10	<b>Cytowania</b>		<b>111</b>
11	<b>Indeks Hirscha</b>		<b>2</b>
12	<b>Impact Factor</b>		<b>6,058</b>
13	<b>Sumaryczna liczba pkt MNiSW wg roku publikacji (wg 2018 r.), w tym:</b>		<b>238(297)</b>
	- z publikacji naukowych		191 (237)
	- z publikacji dydaktycznych i popularyzatorskich		47(60)

Katarzyna Weinerowska-Bords  
K.Bords