

Ireneusz Laks

AUTOREFERAT

osiągnięcia habilitacyjnego:

**Odwzorowanie retencji i obszaru przepływu
w numerycznych modelach przepływów nieustalonych
rzek nizinnych.**

Czerwiec 2018

Autoreferat

1. Ireneusz Tomasz Laks.

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

1. Magister inżynier, specjalność: budownictwo wodno-melioracyjne. Nadany przez Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska Akademii Rolniczej w Poznaniu (obecna nazwa: Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu), 1991.
2. Doktor nauk rolniczych w zakresie kształtowania środowiska, tyt. pracy: **„Modelowanie przepływów nieustalonych w korytach i zbiornikach przyrzecznych okresowo prowadzących wodę”**, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Akademia Rolnicza w Poznaniu (obecna nazwa: Wydział Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu), 1999.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

L.p.	Okres	Miejsce pracy	Etat/część etatu	Stanowisko
1	01.10.1991 - 31.10.1999	Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu	pełen etat	asystent
2	01.11.1999- 30.11.2016	Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu	pełen etat	adiunkt
3	1.12.2016-obecnie	Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu	pełen etat	starszy wykładowca

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) *osiągnięciem habilitacyjnym, określonym zgodnie z art.16 ust. 2 Ustawy o stopniach i tytule naukowym jest cykl 7 monotematycznych publikacji pod wspólnym tytułem:*

Odwzorowanie retencji i obszaru przepływu w numerycznych modelach przepływów nieustalonych rzek nizinnych.

b) *Cykl monotematycznych publikacji składa się z następujących pozycji (uporządkowane chronologicznie):*

- [1]. Kałuża T., Laks I., 2005, **Uwzględnienie aktywnej strefy przepływu w komputerowym systemie modelowania przepływu nieustalonego**, Gospodarka Wodna 1/2005, s.24-28.
- [2]. Laks.I., 2008, **Modelling of River Network with Widespread Floodplain Valleys**, Publications of the Institute of Geophysics E-10((406)), December 2008, s.83-89.

- [3]. Laks I., Wosiewicz B.J., 2008, **Tarowanie modelu długiej rzeki nizinnej jako problem optymalizacyjny**, CMPH Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Praca zbiorowa pt. Modelowanie procesów hydrotechnicznych, s. 172-189.
- [4]. Laks I., Kałuża T., 2012, **Modelowanie nieustalonych przepływów w rzekach nizinnych na przykładzie Warty**, Monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, recenzent wydawniczy prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak.
- [5]. Wosiewicz B.J., Laks I., Walczak Z., Sroka Z., 2015, **Problemy modelowania pracy zbiornika Przrzecznego**, monografia, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2015, recenzent wydawniczy prof. dr hab. inż. Janusz Kubrak.
- [6]. Laks I., Sojka M., Wróżyński R., Walczak Z., 2017, **Possibilities of Using Low Quality Digital Elevation Models of Floodplains in Hydraulic Numerical Models**, Water, 2017, 9(4), 283; doi:[10.3390/w9040283](https://doi.org/10.3390/w9040283). (IF 2016 1.832, IF 5 letni 2.056).
- [7]. Laks I., Kałuża T., Zawadzki P., 2018, **Der Einfluss einer Deichbresche eines Flusspolders auf die Hochwasser- welle – eine Fallstudie Golina an der Warthe in Polen**, WasserWirtschaft 5/2018 s.46-51 (IF 0.135 IF 5 letni 0.111).

c) *Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.*

Wstęp i cel naukowy osiągnięcia

Proces modelowania numerycznego przepływów nieustalonych w sieci koryt otwartych jest bardzo szeroko opisywany zarówno w literaturze naukowej oraz w czasopismach i książkach aplikacyjno-inżynierskich. Dotyczy to w szczególności dobrze znanych i wykorzystywanych w praktyce inżynierskiej jednowymiarowych modeli numerycznych bazujących na równaniach de Saint-Venanta jak i coraz częściej stosowanych modeli dwuwymiarowych wykorzystujących równania płytkiej wody. Rozwój numerycznych metod rozwiązywania równań transformacji przepływu i mocy obliczeniowych współczesnych komputerów sprawił, że nie istnieje już bariera czasu realizacji obliczeń oraz ilości danych niezbędnych do uzyskania poprawnego rozwiązania. Bariera ta została przesunięta raczej w kierunku możliwości i kosztu pozyskania wiarygodnych danych oraz metod identyfikacji modelu z obiektem rzeczywistym.

Modelowanie długiego odcinka rzeki z punktu widzenia geometrii obszaru przepływu ma zdecydowanie charakter jednowymiarowy (np. 200 km odcinek rzeki, której średnia szerokość koryta to 80 m a szerokość terenów zalewowych 2000 m). Zjawisko przepływu wody w cieku ma jednakże charakter przestrzenny i pełne jego odwzorowanie wymaga stosowania adekwatnych równań transformacji.

Równaniami podstawowymi w modelach hydrodynamicznych, opisującymi przepływ wody z powierzchnią swobodną, są równania Naviera-Stokesa. Przepływ w sieci rzecznej opisywany jest natomiast równaniami uśrednionego przepływu turbulentnego, które wyprowadzane są z równań Naviera-Stokesa poprzez wprowadzenie do nich wielkości uśrednionych, np. według metody Reynoldsa. Układ ten jest układem niedomkniętym, który musi zostać uzupełniony o zależności określające własności naprężeń turbulentnych, np. poprzez zastosowanie empirycznego modelu turbulencji Boussinesqa. Uśredniając równania Reynoldsa po głębokości (i wprowadzając szereg założeń upraszczających) otrzymuje się dwuwymiarowe równania płytkiej wody, w których jako niewiadome występują dwie składowe wektora prędkości oraz głębokość strumienia cieczy. Całkując te równania po głębokości oraz szerokości cieku otrzymujemy natomiast równania de Saint-Venanta najczęściej stosowane w analizie transformacji przepływu dla długich odcinków rzek.

Przedstawiony krótko schemat wyprowadzenia równań Saint-Venanta wskazuje, że opisują one przepływ w korytach otwartych w sposób uproszczony, który z założenia jest obarczony błędem odwzorowania danego zjawiska fizycznego. Na błąd odwzorowania transformacji przepływu w jednowymiarowym modelu bazującym na układzie równań Saint-Veneta wpływają zatem:

- a) uproszczony opis matematyczny oraz błędy numerycznych metod rozwiązywania układu równań różniczkowych (najczęściej metoda różnic skończonych lub metoda elementów skończonych),
- b) jakość danych odwzorowujących geometrię obszaru przepływu, budowli hydrotechnicznych, zbiorników przyrzecznych oraz wartości współczynników oporów ruchu,
- c) niepewność danych o warunkach brzegowych i początkowych.

Celem naukowym prezentowanego cyklu publikacji było doskonalenie rozwiązań i metod wpływających na zmniejszenie błędów odwzorowania zjawiska transformacji na długim odcinku rzeki nizinnej odnoszących się do punktów **a)** i **b)** przedstawionej powyżej listy.

W odniesieniu do punktu **a)** celami szczegółowymi były:

- opracowanie metodyki odwzorowania aktywnej strefy przepływu dla modeli numerycznych bazujących na układzie równań de Saint-Venanta o postaci:

- równanie ciągłości:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A_c + A_o)}{\partial t} = q \quad (1)$$

- równanie bilansu pędu:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A_c)}{\partial x} + gA_c \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_{ec} \right) + W = 0 \quad (2)$$

gdzie: Q - natężenie przepływu [m^3/s], h - rzędna zwierciadła wody [m], x - współrzędna położenia przekroju [m], A_c - pole powierzchni strefy aktywnej przekroju rzeki [m^2], A_o - pole powierzchni stref retencji przekroju rzeki [m^2], t - czas [s], g - przyspieszenie ziemskie [m/s^2], q - jednostkowy dopływ boczny na długości cieków [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$], β - współczynnik Saint-Venanta [-], S_f - spadek hydrauliczny [-], S_{ec} - człon uwzględniający straty przy zawężeniu lub rozszerzeniu przekroju [-], $W = qQ/A_c$ - człon uwzględniający jednostkowy dopływ boczny w równaniu ruchu [m^3/s^2].

Opis i analiza zaproponowanej metodyki znajduje się odpowiednio w pozycjach [1],[2],[3] i [4] cyklu publikacji,

- rozwinięcie punktowego, bazującego na krzywej napełnienia, modelu odwzorowania zbiornika przyrzecznego (polderu) o parametry uwzględniające jego przestrzenny charakter oddziaływania na transformację przepływu (pozycje [5] i [7] cyklu).

Celem szczegółowym odnoszącymi się do punktu **b)** było:

- opracowanie metodyki poprawy niskiej jakości numerycznego modelu terenu opracowanego na podstawie zdjęć lotniczych i jego dostosowanie do potrzeb numerycznych modeli przepływu (pozycja [6] cyklu).

Odwzorowanie aktywnej strefy przepływu.

W pracach [1],[3] i [4] stwierdzono, że szybki rozwój metod numerycznych stosowanych do rozwiązywania złożonych równań różniczkowych w połączeniu ze wzrostem mocy obliczeniowych współczesnych komputerów i systemów akwizycji danych spowodował szerokie wykorzystanie dwu (2D) i trój (3D) wymiarowych modeli hydrodynamicznych. Modele te są jednak stosowane dla krótkich odcinków sieci rzecznej, gdzie istotna jest znajomość szczegółowego rozkładu pola prędkości. Wymagają one dużych zbiorów danych odwzorowujących geometrię obszaru przepływu w postaci wysokiej jakości numerycznych modeli terenu (NMT) oraz znajomości przestrzennego rozkładu współczynników oporu ruchu. Również identyfikacja i weryfikacja tego typu modeli wymaga adekwatnego zbioru danych pomiarowych, który pozwoli porównać nie tylko rzędne zwierciadła wody i uśredniony przepływ, ale również rozkład pola prędkości. Liczba takich zbiorów pomiarowych, szczególnie dla naturalnych terenów zalewowych jest niewielka, co wynika z kosztu ich pozyskania oraz losowego charakteru występowania zjawisk powodziowych.

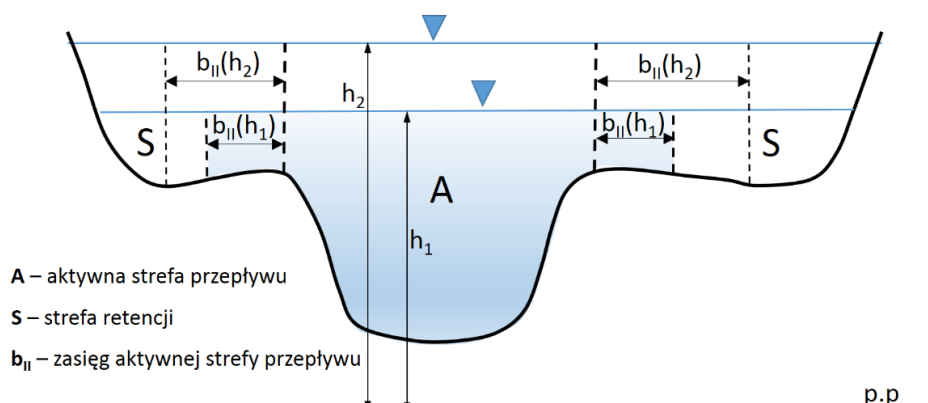
W modelowaniu długich odcinków rzek, gdzie mniejsze znaczenie ma znajomość lokalnych rozkładów prędkości a większe transformacja uśrednionych parametrów przepływu, nadal stosowane są modele jednowymiarowe. Dla tego typu modeli łatwo jest pozyskać informację o geometrii obszaru przepływu (przekroje poprzeczne) oraz zbudować topologię układu rzeczno. Również zbiór parametrów podlegających procedurze tarowania jest dużo mniejszy w porównaniu z modelami 2D i 3D. Łatwość implementacji, szybki czas obliczeń oraz relatywnie (w porównaniu z modelami 2D i 3D) mała liczba parametrów powodują, że znajdują one zastosowanie przede wszystkim jako narzędzie prognostyczne, wspierające proces zarządzania kryzysowego w okresach zagrożeń powodziowych. Wyniki z tego typu modeli są przydatne również przy pracach projektowych związanych z budową systemu ochrony przeciwpowodziowej, przebudowie budowli hydrotechnicznych czy regulacji koryt rzecznych.

Wykorzystanie modeli jednowymiarowych w sposób istotny komplikuje się w przypadku próby modelowania długiego, meandrującego, odcinka rzeki zawierającego szerokie tereny zalewowe, dopływy, poldery oraz budowle hydrotechniczne. Podstawowym problemem jest tutaj nieadekwatność przyjętego w modelach jednowymiarowych założenia o jednym dominującym kierunku przepływu do rzeczywistych warunków panujących w cieku. Naturalne, szerokie tereny zalewowe i poldery mają jednak decydujący wpływ na transformację przepływu w cieku dla fal wezbraniowych i powodziowych. Ich adekwatne odwzorowanie stanowi najbardziej istotny i najtrudniejszy element budowy jednowymiarowego modelu numerycznego rzeki.

Wpływ szerokich terenów zalewowych uwzględnia się w układzie równań Saint-Venanta przez umowne podzielenie przekroju rzeki na przekrój czynny A_c (przepływowy) oraz przekrój całkowity $A = A_c + A_o$ gdzie A_o oznacza pole powierzchni strefy aktywnej przekroju rzeki. Podstawową trudność jaką napotykamy jest określenie sposobu wyznaczenia pola powierzchni strefy aktywnej. Strefa ta wyznacza obszar transferu pędu, który dla wielu systemów modelowania (np. HEC-RAS czy MIKE 2000) definiowano na podstawie pomiarów bezpośrednich i uznawano za pewny i nie podlegający procedurze identyfikacji.

Analizując interakcję pomiędzy przepływem w korycie głównym a przepływem na terenach zalewowych zauważyć można, że wraz ze wzrostem stanów coraz większa część terenów zalewowych uczestniczy w procesie transferu pędu. W początkowej fazie ruch na terenach zalewowych odbywa się w strefie bezpośredniego oddziaływania koryta głównego i zwiększa się wraz ze wzrostem napełnienia na terenach zalewowych. Wykorzystując wyniki badań prowadzonych przez Pasche nad wzajemną wymianą pędu pomiędzy korytem głównym a terenami zalewowymi zaproponowano metodykę

wyznaczania zasięgu strefy aktywnej jako funkcji napełnienia terenów zalewowych oraz uśrednionych oporów ruchu na tych terenach.



Ryc.1. Schemat wyznaczania aktywnej części przekroju w jednowymiarowych modelach przepływu.

Założono, że czynna część przekroju składa się z obszaru wyznaczającego wodę brzegową powiększonego o zasięg tzw. strefy b_{II} (ryc.1) interakcji koryta głównego i terenów zalewowych, obliczanego zgodnie ze wzorem zawartym w pracy [1] cyklu :

$$b_{II} = \frac{R_{hz}^{\frac{4}{3}}}{8gn_z^2(0.068e^{0.56C_T} - 0.056)} \quad (3)$$

gdzie: R_{hz} - promień hydrauliczny terenu zalewowego [m], n_z - współczynnik szorstkości terenów zalewowych, C_T - parametr określający tzw. prędkość poślizgu ("slip-velocity") w metodzie Pasche.

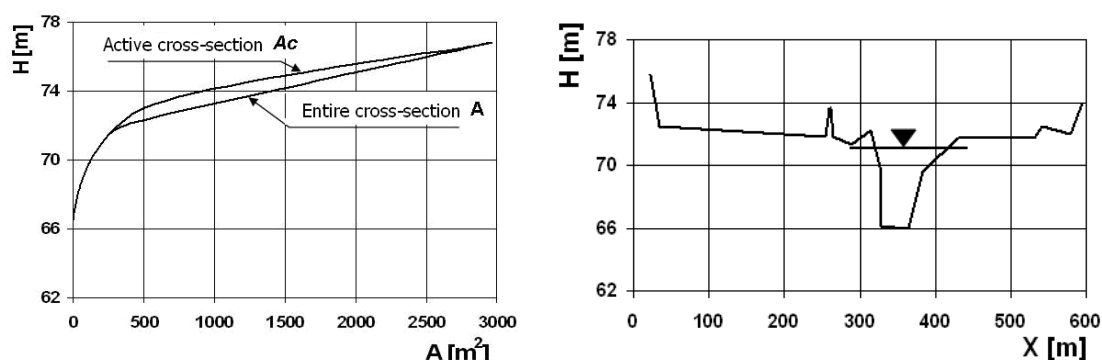
Autor habilitacji zaproponował, aby aktywna strefa przepływu wyznaczana była według schematu:

- dla stanów poniżej wody brzegowej strefa aktywna i obszar całkowitego przepływu pokrywają się,
- powyżej wody brzegowej, obliczany jest zasięg strefy aktywnej dla lewego i prawego brzegu zgodnie ze wzorem (3),
- znając zasięg strefy aktywnej można wyznaczyć pole powierzchni $A_c(h)$ oraz pozostałe parametry niezbędne do numerycznego rozwiązania układu równań de Saint-Venanta.

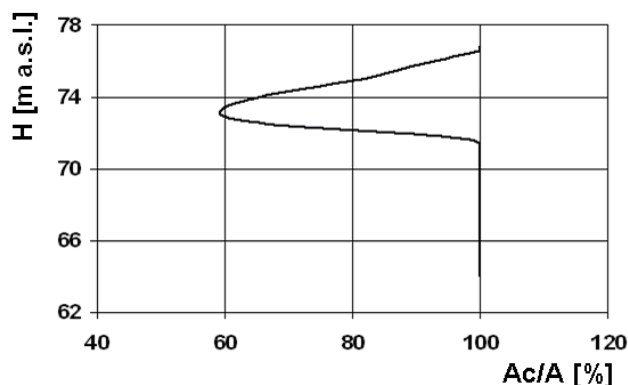
Dla powyższych założeń, w procesie numerycznego rozwiązywania układu równań (1) i (2) system modelowania numerycznego przechowuje zatem dwa zestawy danych, osobno dla strefy aktywnej oraz obszaru całkowitego przepływu. W systemie przechowywane są także wartości parametru C_T z równania (3) dla każdego z przekrojów, osobno dla lewego i prawego terenu zalewowego. Parametr C_T w zaproponowanej metodyce traktowany jest jako stała modelu, którego wartość ustalana jest w procesie jego tarowania.

W pracach [1] i [2] przeprowadzono analizę wpływu zaproponowanej metodyki na zestaw danych wprowadzany do systemu modelowania realizującego proces rozwiązywania równań de Saint-Venanta. Autor habilitacji przeanalizował zmianę pola aktywnej części przekroju oraz modułu przepływu w funkcji napełnienia dla charakterystycznych przekrojów rzeki Warty dla wartości współczynników C_T wyznaczonych w procesie kalibracji dla fali powodziowej z 1997 roku. Wykazano przydatność zaproponowanej metody zarówno dla przekrojów obwałowanych jak i szerokich dolin

zalewowych. Maksymalny procentowy udział pola powierzchni strefy aktywnej do pola powierzchni całego przekroju wahał się od 14% (przekrój z szerokimi terenami zalewowymi) do 100% (wąski przekrój ograniczony wałami). Warto na potrzeby autoreferatu przytoczyć rysunki 4 i 5 z pozycji [2] cyklu, które prezentowane są odpowiednio na ryc.2 i 3. W przekroju tym pole powierzchni aktywnej strefy przepływu oznaczone symbolem A_c , po przekroczeniu rzędnych koryta głównego, jest mniejsze od pola powierzchni całego przekroju A (część przekroju nie bierze udziału w transferze pędu i jest tylko uwzględniana w równaniu ciągłości). Wraz z napełnieniem terenów zalewowych zmienia się zasięg strefy aktywnej i procentowy stosunek powierzchni aktywnej do powierzchni całkowitej (A_c/A), co ilustruje ryc.3. Początkowo tylko niewielka część terenów zalewowych jest uwzględniana w równaniu bilansu pędu (odzworowywana jest faza, kiedy tereny zalewowe wypełniają się wodą ale spadki zwierciadła wody oraz kierunek przepływu determinują roślinność terenów zalewowych i lokalne spadki terenu, które często nie pokrywają się z kierunkiem spadku koryta głównego). Pomimo wzrostu napełnienia stosunek A_c/A maleje aż do punktu przegięcia, po przekroczeniu którego część retencyjna przekroju zaczyna maleć a wartość pola powierzchni aktywnej strefy przepływu zbliża się do wartości pola powierzchni przekroju całkowitego. Punkt przegięcia na wykresie można interpretować w uproszczonym opisie fizycznym zjawiska przepływu jako napełnienie, w którym wyrównują się kierunki i spadki w korycie głównym i na terenach zalewowych. W momencie kiedy $A_c=A$ całość przekroju poprzecznego jest uwzględniana w równaniu bilansu pędu.



Ryc.2. Przekrój obliczeniowy rzeki Warty w km 348+000. Porównanie pola powierzchni przekroju całkowitego oraz aktywnej strefy przepływu. (przytoczono ryc.4 z pracy [2]).



Ryc.3. Przekrój obliczeniowy rzeki Warty w km 348+000. Wykres procentowego stosunku przekroju aktywnego do przekroju całkowitego w funkcji napełnienia (przytoczono ryc.5 z pracy [2]).

Przedstawiona krótka analiza wskazuje, że zaproponowana metodyka w sposób uproszczony odzwierciedla zjawisko wymiany pędu pomiędzy korytem a terenami zalewowymi, rozszerzając tym

samym zastosowanie równań de Saint-Venanta również do sieci kanałów z szerokimi terenami zalewowymi. Zostało to również potwierdzone licznymi przykładami obliczeniowymi prezentowanymi w artykułach naukowych, których autor habilitacji jest współautorem, a które nie wchodzą w skład cyklu.

Warto zauważyć, że wykorzystując metodykę wyznaczania aktywnej strefy przepływu proponowaną przez autora można lepiej odwzorować wpływ terenów zalewowych w równaniu bilansu pędu. Wykorzystując parametr C_T można w procesie identyfikacji modelu określić zasięg strefy aktywnej tym samym wpływając zarówno na czas propagacji jak i na uśredniony spadek linii energii. Współczynniki szorstkości na terenach zalewowych będą w tej metodzie parametrami odzwierciedlającymi opory ruchu a nie parametrami korygującymi niedoskonałości odwzorowania geometrii obszaru przepływu.

Problematyka tarowania jednowymiarowych modeli przepływu, które uwzględniają aktywną strefę przepływu omówiono w pozycji nr [3] cyklu. W pracy tej podkreślono, że im większa liczba wolnych parametrów w modelu tym większe możliwości identyfikacyjne, ale proces identyfikacji jest trudniejszy. Pewna liczba parametrów modelu służy do skorygowania odstępstw w zachowaniu się modelu w stosunku do obserwacji na obiekcie. Muszą być one wyznaczone w procedurze identyfikacji modelu z obiektem. Do takich parametrów w klasycznym podejściu zalicza się współczynniki szorstkości definiujące opory ruchu, które w istocie są parametrami modelu ukrywającymi jego niedoskonałość i uproszczenia. Zestaw parametrów podlegających procedurze tarowania winien być jednak rozszerzony między innymi o parametry determinujące zasięg aktywnej strefy przepływu, współczynniki wydatków różnego typu budowli, szczególnie w sytuacji gdy zarówno formuły wydatku jak i współczynniki zostały przyjęte na podstawie danych literaturowych.

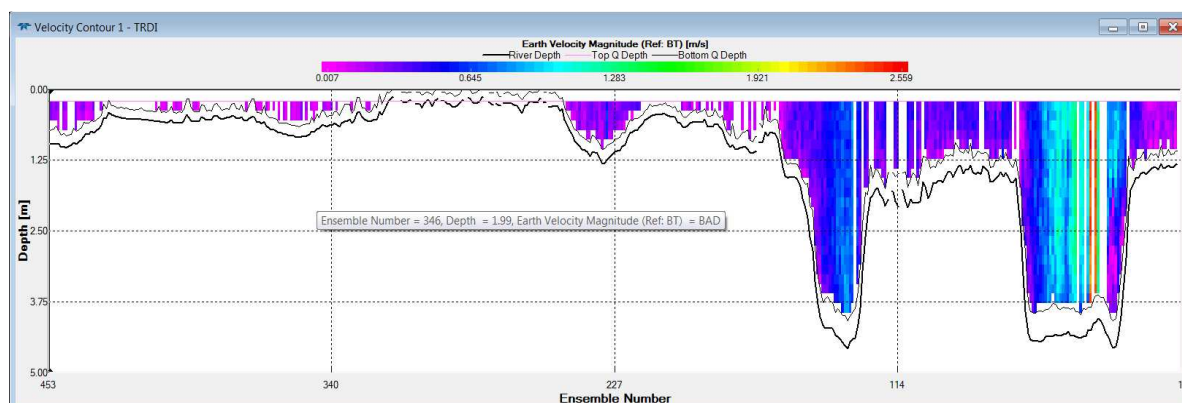
W omawianej pracy [3] przyjęto, że tarowanie modelu sprowadza się do typowego problemu optymalizacyjnego, w którym należy wyznaczyć pewną liczbę zmiennych, spełniających układ ograniczeń (równań lub nierówności) i minimalizujących pewną funkcję optymalizacyjną (kryterium jakości, które w przypadku modelu hydrodynamicznego jest zdefiniowaną miarą błędu). Jako zmienne decyzyjne przyjęto parametry C_T definiujące aktywną szerokość koryta rzeki w poszczególnych przekrojach. Przedstawiono dwa, istotnie różne, sformułowania problemu optymalizacyjnego. W pierwszym metryka dopasowania oparta jest na różnicach pomiędzy rzędnymi (obliczonymi a pomierzonymi w określonym przekroju). W drugim dopasowanie związane jest z czasem pojawienia się charakterystycznych punktów fali powodziowej. Do rozwiązania problemu zaproponowano metodę najszybszego spadku. Ponieważ metryki dopasowania nie były dane w jawnej postaci, zaproponowano numeryczne szacowanie składowych wektora gradientu. Zrealizowane przez autora habilitacji eksperymenty numeryczne wykazały przydatność zaproponowanej metody do wyznaczania zbioru wartości parametru C_T w procesie tarowania takiego (numerycznego) modelu przepływów nieustalonych, implementującego zaproponowaną metodykę odwzorowania strefy aktywnej.

W monografii stanowiącej pozycję nr [4] cyklu w rozdziale 8 (autor Laks I.) zatytułowanym „Weryfikacja wyznaczania aktywnej strefy przepływu w jednowymiarowych modelach przepływu nieustalonego” autor zaproponował wykorzystanie dwuwymiarowego modelu naturalnej doliny zalewowej do weryfikacji modelu 1D i wyznaczenia parametru C_T . Bazując na wynikach pomiarów z powodzi na rzece Warcie w 2010 roku autor habilitacji dodatkowo sprawdził i zweryfikował zaproponowaną metodykę wyznaczania aktywnej części przekroju. Do utworzenia modelu dwuwymiarowego wykorzystano system Rismo2D (**R**iver **S**imulation **M**odel), który do rozwiązania równań przepływu wykorzystuje metodę elementów skończonych (MES). System został opracowany w ramach projektu DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft Ro 365/31–6) „Die Entwicklung eines mathematisch-numerischen Verfahrens zur Berechnung naturnaher Fließgewässer“, który

realizowano w Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Rheinisch - Westfälische Technische Hochschule Aachen (za Schröder 1997 –pozycja literaturowa w omawianej pozycji cyklu).

Wykonane w trakcie powodzi 2010 roku pomiary przepływów z wykorzystaniem ultradźwiękowej sondy ADCP StreamPro dały możliwość punktowej weryfikacji zarówno modelu 2D jak i założeń wyznaczania strefy aktywnej w modelu 1D. Szczególnie istotnym było wykonanie pomiarów w obrębie doliny zalewowej powyżej mostu drogowego w Pyzdrach. Oczywiście jest, że liczba pomiarów nie jest jeszcze wystarczająca do pełnej analizy zagadnienia. Niemniej wykonanie pomiarów dla odcinka Warty w warunkach wystąpienia przepływu powodziowego, sprawia że pozyskany zbiór danych jest szczególnie wartościowy.

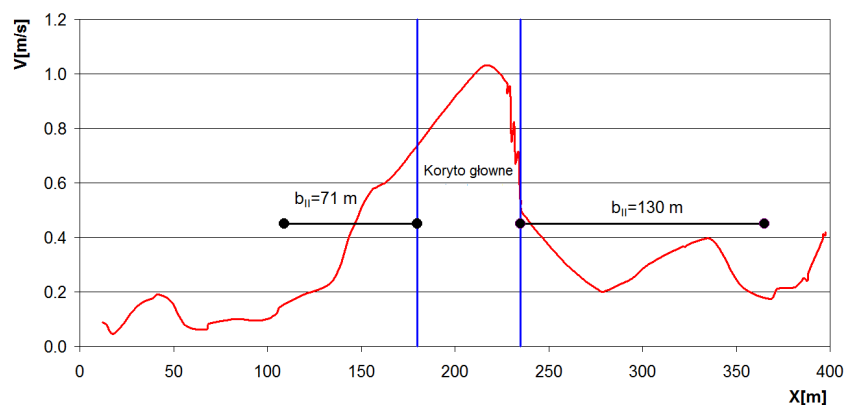
Warto przytoczyć ryc.8.4, z omawianej pozycji [4], przedstawiającą pomierzony, z wykorzystaniem sondy StreamPro, rozkład prędkości (ryc.4). Istotne znaczenie ma fakt, że pomiar został przerwany w odległości ok. 150 m od linii obwałowań lewego brzegu ze względu na wypływanie w tym rejonie. Głębokość zmalała do wartości poniżej 0.4 m a mierzone prędkości wody nie przekraczały 0.1 m/s, zaś kierunek wektorów prędkości w wielu punktach był skierowany przeciwnie do nurtu koryta głównego. Pomiary potwierdziły występowanie w obrębie szerokich dolin zalewowych obszarów, w których decydujący wpływ na rozkład pola prędkości mają lokalne spadki terenu nie pokrywające się z dominującym spadkiem cieku. Z punktu widzenia obliczeń przepływu nieustalonego modelami 1D bazującymi na równaniach Saint-Venanta obszar ten stanowi strefę martwą uwzględnianą jedynie w równaniu ciągłości.



Ryc.4. Pomierzony sondą StreamPro rozkład prędkości w przekroju w km 354,28 (przytoczono ryc.8.4 z pracy [4]).

Na podstawie analizy wykonanych pomiarów autor habilitacji zaproponował, że strefą aktywną przekroju jest obszar prowadzący 95% całości przepływu. Zakłada się, że pozostałe 5% przepływu rozkłada się symetrycznie po obu stronach koryta i stanowi błąd odwzorowania związany z uproszczeniami modelu jednowymiarowego.

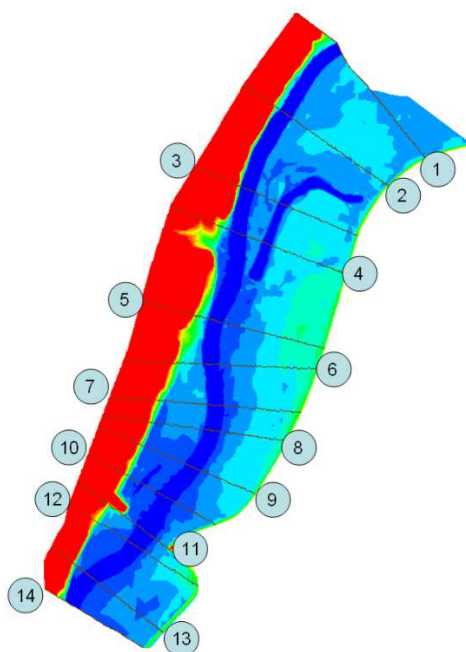
Dla tak przyjętych założeń obliczono zasięg strefy aktywnej dla poszczególnych przekrojów pomiarowych. Przykładowo, dla omawianego w cytowanej pracy [4] przekroju pomiarowego nr 1 zasięg strefy aktywnej wyniósł 71 m dla brzegu lewego i 130 m dla brzegu prawego. Wyniki te zostały przedstawione na ryc.5, na której również naniesiono rozkład pomierzonych prędkości. Znacznie niższe prędkości na lewym brzegu, które w odległości 125 m od linii obwałowań nie przekraczają wartości 0.2 m/s powodują znaczne skrócenie zasięgu strefy aktywnej na tym brzegu. Prędkości na brzegu prawym, na całej długości, były powyżej 0.2 m/s, stąd też zasięg strefy aktywnej jest prawie dwukrotnie większy od brzegu lewego.



Ryc.5. Zasięg strefy aktywnej w przekroju pomiarowym nr 1 wraz z rozkładem uśrednionych prędkości (przytoczono ryc.8.5 z pracy [4]).

Jak wspomniano wcześniej, praca [4] cyklu zawiera również opis zaproponowanego przez autora habilitacji sposobu weryfikacji modelu jednowymiarowego, w którym zaimplementowano algorytm wyznaczania strefy aktywnej, modelem dwuwymiarowym (punkt 8.3 omawianej pracy).

Przyjęto tam założenie, że model 2D utworzony na bazie NMT będzie rozwiązaniem dokładnym dla modelu 1D tylko wtedy, gdy geometria przekrojów poprzecznych dla modelu jednowymiarowego zostanie również wygenerowana z tego samego NMT. Charakterystyki geometryczne obszaru przepływu w modelu 1D będą zatem obarczone jedynie niewielkimi błędami interpolacji z NMT. Ich wpływ na rozwiązanie zostanie oszacowany poprzez porównanie wyników dla przepływu korytowego, w którym błędy uproszczeń modelu 1D są najmniejsze (dla przepływu w korycie składowe pionowe i poprzeczne wektora prędkości są wielokrotnie mniejsze od składowej równoległej do spadku dna koryta). Na bazie NMT wygenerowano 14 przekrojów poprzecznych, a ich lokalizacja przedstawiona została na ryc.6.



Ryc.6. Lokalizacja przekrojów poprzecznych w modelu jednowymiarowym (przytoczono ryc.8.7 z pracy [4]).

Odległość pomiędzy przekrojami wyznaczono w osi koryta głównego. Współczynnik szorstkości dla koryta głównego według formuły Maninga został ustalony na podstawie pomiarów terenowych przepływu i spadku zwierciadła wody wykonanych w marcu 2012 roku i jest równy $0.028 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. Wartość współczynnika oporów ruchu dla terenów zalewowych równą $0.038 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ przyjęto na podstawie analizy pokrywy roślinnej.

Jak widać na ryc.6 górny przekrój brzegowy (oznaczony nr 1), nie pokrywa się z brzegiem modelu 2D. Stąd też zarówno rozwiązania z modelu 2D jak i 1D nie mogły być porównywane, a zaburzenia spowodowane tą różnicą oddziaływały na przekroje o numerach 2 i 3. Stąd też weryfikacji i analizie porównawczej podlegały przekroje od 4 do 13, gdyż w przekroju brzegowym nr 14 zadawane było wymuszenie w postaci rzędnej zwierciadła wody. Obliczenia przeprowadzono dla pięciu przepływów z wymuszeniem warunku ruchu ustalonego, który uzyskano poprzez zadawanie tych samych wartości w przekrojach brzegowych (przepływu w górnym przekroju brzegowym i rzędnej zwierciadła wody w dolnym).

Weryfikacja modelu jednowymiarowego przebiegała według następującego schematu:

1. wykonanie obliczeń dla wody korytowej ($Q=65 \text{ m}^3/\text{s}$) i tarowanie współczynników szorstkości koryta głównego,
2. przeprowadzenie obliczeń dla przepływu dolinowego ($Q=386 \text{ m}^3/\text{s}$) i wyznaczenie wartości współczynników C_T dla analizowanych przekrojów,
3. obliczenia dla pozostałych przepływów i weryfikacja wyznaczonych w kroku 2 współczynników C_T .

Wartościami sprawdzającymi zgodność obydwu modeli dla założeń ruchu ustalonego mogły być wyłącznie rzędne zwierciadła wody w poszczególnych przekrojach obliczeniowych. Dopasowanie obydwu modeli uznawano za wystarczające, jeśli różnice w rzędnych nie przekraczały 0.01 m.

Wykonując dwa pierwsze kroki schematu weryfikującego otrzymano zestaw współczynników szorstkości koryta oraz wartości parametru C_T dla poszczególnych przekrojów, które prezentuje tabela 1.

Tabela 1.

Rzędne zwierciadła wody i wartości parametru C_T dla przepływu $Q=386 \text{ m}^3/\text{s}$ (przytoczono tabelę 8.5 z pracy [4])

Nr przekroju	Nr węzła modelu 2D	Model		Różnica $H_{2D} - H_{1D}$ [m]	C_T [-]
		2D	1D		
		H_{2D} [m]	H_{1D} [m]		
4	10529	74.356	74.365	-0.009	0.75
5	11339	74.32	74.321	-0.001	0.75
6	11525	74.306	74.30	0.006	0.95
7	11786	74.287	74.284	0.003	1.30
8	11997	74.279	74.277	0.002	1.30
9	12462	74.268	74.267	0.001	1.30
10	12384	74.256	74.258	-0.002	1.55
11	12979	74.233	74.233	0.000	1.55
12	4194	74.227	74.227	0.000	1.45
13	62232	74.218	74.212	0.006	1.45

W kroku trzecim wykonano obliczenia dla trzech pozostałych przepływów, które weryfikowały poprawność wyznaczonych parametrów. Wyniki tych obliczeń prezentuje tabela 2. Dla każdego z przepływów różnice rzędnych dla wszystkich analizowanych przekrojów nie przekroczyły założonej dokładności 0.01 m.

Tabela 2.

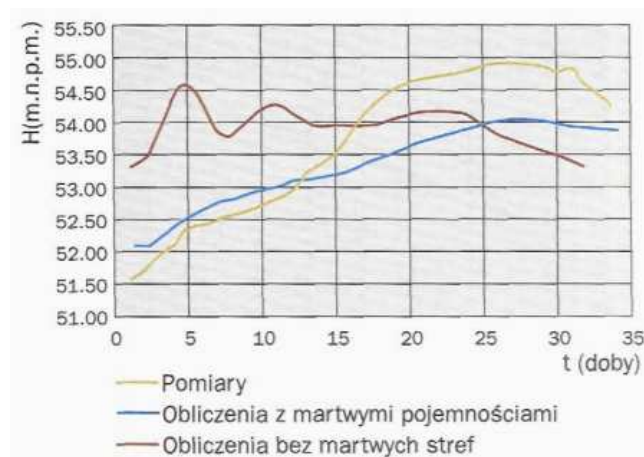
Rzędne zwierciadła wody dla przepływów dolinowych (przytoczono tabelę 8.5 z pracy [4])

Nr przekroju	Q=165 m ³ /s			Q=250 m ³ /s			Q=445 m ³ /s		
	2D	1D	Różnica	2D	1D	Różnica	2D	1D	Różnica
	H _{2D}	H _{1D}	H _{2D} - H _{1D}	H _{2D}	H _{1D}	H _{2D} - H _{1D}	H _{2D}	H _{1D}	H _{2D} - H _{1D}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
4	73.357	73.359	-0.002	73.798	73.804	-0.006	74.606	74.604	0.002
5	73.333	73.338	-0.005	73.772	73.780	-0.008	74.571	74.566	0.005
6	73.321	73.319	0.002	73.759	73.755	0.004	74.558	74.548	0.010
7	73.305	73.307	-0.002	73.740	73.740	0.000	74.540	74.533	0.007
8	73.300	73.301	-0.001	73.734	73.733	0.001	74.533	74.527	0.006
9	73.294	73.294	0.000	73.725	73.724	0.001	74.522	74.518	0.004
10	73.288	73.287	0.001	73.717	73.716	0.001	74.508	74.509	-0.001
11	73.279	73.277	0.002	73.703	73.700	0.003	74.483	74.481	0.002
12	73.277	73.274	0.003	73.700	73.696	0.004	74.476	74.475	0.001
13	73.266	73.263	0.003	73.689	73.683	0.006	74.468	74.461	0.007

Opisana procedura weryfikacji modelu jednowymiarowego modelem dwuwymiarowym nie uwzględnia oczywiście wszystkich aspektów zagadnienia. Przede wszystkim nie było możliwe zbadanie wpływu doboru parametrów strefy aktywnej na szybkość propagacji fali. Niemniej przedstawione w tabeli 2 wyniki wskazują na poprawność przyjętej metodyki. Wartości współczynnika C_T określone w procesie kalibracji modelu umożliwiły dobre dopasowanie rzędnych dla przepływów weryfikacyjnych w szerokim przedziale ich wartości, od niskich do wysokich napętnień terenów zalewowych.

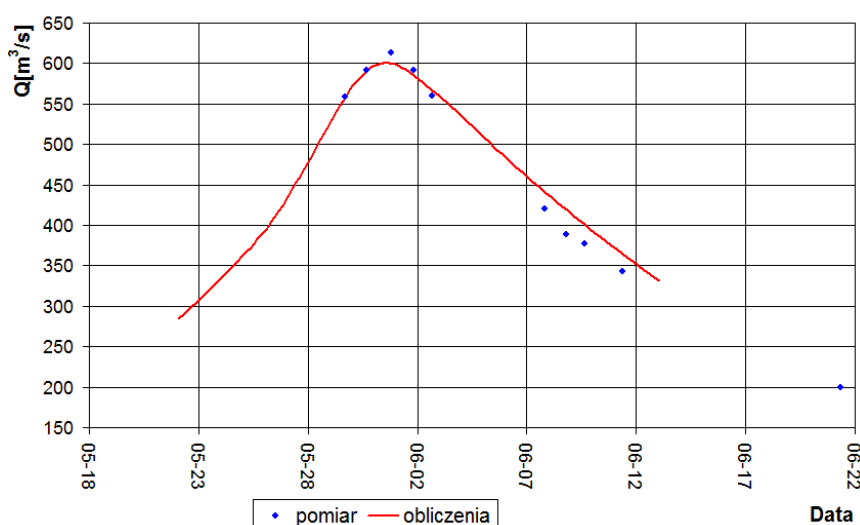
Omawiana metodyka odwzorowania strefy aktywnej w jednowymiarowych modelach przepływu nieustalonego została przez autora zaimplementowana w komputerowym systemie modelowania SPRUNER, który powstał i rozwijany jest na Wydziale Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej w Poznaniu. Autorami systemu, który powstał w 1993 roku na zamówienie ówczesnej Okręgowej Dyrekcji Gospodarki Wodnej w Poznaniu są Ireneusz Laks (autor główny), Bogdan Wosiewicz i Zbigniew Sroka. System jest nadal rozwijany przez autora autoreferatu. Wykorzystując system SPRUNER wykonano szereg symulacji przepływu na ponad 280 kilometrowym odcinku rzeki Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do Obornik. Ten fragment sieci rzecznej Warty zawiera 40 kilometrową szeroką, naturalną dolinę konińsko-pyzderską, która w sposób znaczący wpływa na transformację fal powodziowych i wezbraniowych. W pracy [1] przedstawiono wyniki obliczeń zrealizowane systemem SPRUNER, który odwzorował wpływ doliny konińsko-pyzderskiej z wykorzystaniem omawianej metodyki. Obliczenia wykonano tam bez procedury kalibracji modelu, przyjmując arbitralnie wartości współczynników C_T w przekrojach odwzorowujących geometrię doliny. Wykonano dwa warianty obliczeń: 1) system modelowania bazował na równaniach de Saint-Venanta bez wydzielonej strefy

aktywnej, 2) system modelowania implementował założenia opracowanej przez autora habilitacji metody. Wyniki tych obliczeń dla przekroju wodowskazowego Poznań przedstawia ryc.7, który przytoczono z pracy [1] cyklu. Widać znaczącą różnicę w kształcie fali powodziowej dla obydwu wariantów. Dla wariantu modelu bez wydzielonej strefy aktywnej kształt fali niewiele różni się od kształtu warunku brzegowego, zadawanego w przekroju 484+150. Kształt obliczonej fali jest całkowicie różny od kształtu fali pomierzonej. Maksymalny przepływ w przekroju wodowskazowym Poznań (243+300) wystąpił o prawie 22 dni wcześniej od rzeczywistego czasu przejścia kulminacji. W drugim wariantcie kształt fali z modelu jest już zbliżony do pomierzonego. Czas obliczeniowy wystąpienia maksimum stanów i przepływów pokrywa się z czasem wynikającym z danych pomiarowych. Istotne różnice pomiędzy danymi pomiarowymi a obliczeniowymi występują w wartościach rzędnych zwierciadła wody. Należy jednak podkreślić, że model nie podlegał wówczas szczegółowej procedurze tarowania i przedstawione wyniki traktowano jako wstęp do dalszych badań.



Ryc.7. Wyniki obliczeń transformacji fali wezbraniowej z 1997 r. dla przekroju wodowskazowego Poznań (km 243+300) (przytoczono ryc.7 z pracy [1]).

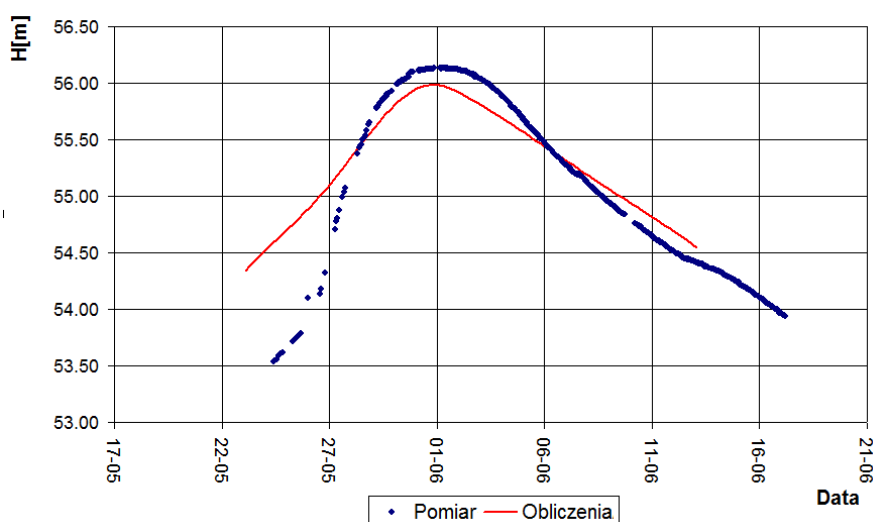
W rozdziale 6 pracy [4] cyklu autor habilitacji przedstawił porównanie wyników obliczeń wytarowanym i zweryfikowanym modelem i danych pomiarowych dla fali powodziowej z 2010 roku. Porównanie wykonano również dla przekroju wodowskazowego Poznań, co przedstawiają ryc.8 i 9 przytoczone z wspomnianej pracy [4].



Ryc.8. Porównanie obliczeniowych oraz pomierzonych hydrogramów przepływów w przekroju wodowskazowym Poznań dla fali z 2010 roku (przytoczono ryc.6.9 z pracy [4]).

Podkreślić trzeba bardzo dobre dopasowanie wyników otrzymanych z modelu do punktów pomiarowych, co wynika z wiarygodnej estymacji bilansu przepływu bazującej na danych pomiarowych oraz kalibracji współczynników C_T zarówno dla przekrojów w obrębie koniny konińsko-pyzderskiej, jak i dla szerokiej doliny zalewowej powyżej Śremu.

Przebieg hydrogramów stanów dla wodowskazu w Poznaniu został zilustrowany na ryc.9. Duże rozbieżności w początkowej fazie wynikają z wpływu warunku początkowego oraz z faktu, że nie prowadzono przed 29.05.2010 pomiarów przepływu w Poznaniu i nie dysponowano wiarygodnymi danymi o bilansie przepływu.



Ryc.9. Porównanie obliczeniowych oraz pomiarowych hydrogramów stanów w przekroju wodowskazowym Poznań dla fali z 2010 roku (przytoczono ryc.6.9 z pracy [4]).

Opracowany model odcinka Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do Obornik wykorzystywano wielokrotnie w różnego rodzaju analizach i opracowaniach, zarówno naukowych jak i praktycznych. Szersze omówienie zastosowań systemu SPRUNER jak i modeli opracowanych z jego wykorzystaniem zostało przedstawione w punkcie 5 autoreferatu.

Udoskonalenie punktowego modelu zbiornika przyrzecznego (polderu) o parametry uwzględniające jego przestrzenny charakter oddziaływania.

W pozycji [5] i [7] cyklu w szerokim zakresie omówiono problematykę pracy zbiornika przyrzecznego, w tym zagadnienia związane z jego odwzorowaniem w jednowymiarowych modelach przepływu nieustalonego. W rozdziale 2 pozycji [5] (autorzy I.Laks i B.J.Wosiewicz) stwierdzono, że każdy system efektywnego modelowania przepływów nieustalonych w złożonym systemie rzeczny (np. długa rzeka nizinna z kilkoma dopływami i złożoną zabudową hydrotechniczną, w tym polderami) musi posiadać możliwość modelowania wyprowadzania wody na poldery jak i ich zwrotu do rzeki. Przytoczono założenia dotyczące odwzorowania polderu w jednowymiarowych modelach przepływu zaimplementowane w systemie SPRUNER. Założenia te były efektem analiz zrealizowanych w ramach rozprawy doktorskiej autora. Zgodnie z tymi założeniami ciek może zasilać zbiornik przyrzeczny lub być alimentowany wypływem z niego. Poldery mogą być zasilane lub/i odwadniane przez jeden lub większą liczbę przelewów wałowych, które mogą być zlokalizowane na różnych odcinkach rzeki lub na dopływach.

Przy implementacji możliwości modelowania układów wieloma polderami w system SPRUNER przyjęto szereg założeń schematyzujących, a mianowicie:

- oddziaływanie hydrauliczne polderu na przepływ w rzece oraz rzeki na stany w zbiorniku odbywa się wyłącznie poprzez przelewy wałowe (pomija się przepływy filtracyjne, opady i parowanie oraz inne zjawiska w obrębie polderu jak zasilanie ze zlewni własnej),
- brak ruchu wody w zbiorniku (poziomy układ zwierciadła wody) a każdy zbiornik charakteryzuje wyłącznie krzywa napełnienia $V_k(H_z)$,
- z każdym zbiornikiem jest związany przynajmniej jeden przelew, a liczba przelewów m_k związanym z k -tym zbiornikiem jest ograniczona wyłącznie całkowitą liczbą zdefiniowanych przelewów ($m_k \leq m$),
- brak bezpośredniego oddziaływania polderów między sobą,
- odcinek z przelewem wałowym wymaga stosownego dobrania równaniami transformacji przepływu.

Większość tych założeń była i jest przyjmowana również przez autorów innych opracowań dotyczących tej problematyki. Podkreślić tu trzeba, że w takim ujęciu poldery są modelowane jako obiekty o parametrach skupionych (w pewnych punktach sieci rzecznej), bez uwzględnienia (choćby przybliżonego) ich rzeczywistej pracy przestrzennej.

Dla każdego przelewu wałowego należy zdefiniować równanie wydatku uwzględniające różne fazy pracy układu rzeka-polder (wypełnianie polderu, alimentacja rzeki, brak kontaktu hydraulicznego), parametry geometryczne i hydrauliczne oraz lokalizację przelewu wałowego. Dla przelewu o numerze j ($j = 1, 2, \dots, m_k$ gdzie m_k jest liczbą przelewów) można napisać, że zasilanie polderu Q_{prz}^j określa stosowna formuła:

$$Q_{prz}^j = f_j(Q_g^j, h_g^j, Q_d^j, h_d^j, H_z^j) \quad (4)$$

gdzie, Q_g^j, Q_d^j – przepływy w przekrojach odpowiednio powyżej i poniżej przelewu [m^3/s]; h_g^j, h_d^j – rzędne zwierciadła wody w przekrojach odpowiednio powyżej i poniżej przelewu [m], H_z^j – rzędna zwierciadła wody w zbiorniku (polderze) [m].

Dla każdego zbiornika przyrzecznego należy także zdefiniować równanie zmiany retencji polderu

$$V^k(t) = f(Q_{prz}^1, Q_{prz}^2, \dots, Q_{prz}^{m_k}) \quad (5)$$

Trzeba w tych równaniach uwzględnić, że przelewy pracują w obie strony, w zależności od fazy pracy (to znaczy zasilany jest polder lub alimentowana rzeka), oraz że przelewy na dolnym stanowisku (od strony rzeki lub polderu) mogą pracować jako zatopione lub nie, itd. Jak to rozwiązano w systemie SPRUNER pokazuje pozycja [4] w rozdziale 3 (autor rozdziału I.Laks).

Zmiany w czasie retencji (objętości) w k -tym zbiorniku mogą odbywać się przez m przelewów wałowych związanych z tym polderem, stąd równanie retencji tego zbiornika ma postać:

$$V^k(t) = \int_{t_p}^{t_k} \sum_{j=1}^{m_k} Q_{prz}^j(t) dt + V^k(t_p) \quad (6)$$

w którym t_p i t_k oznaczają odpowiednio początkowy i końcowy czas obliczeń (symulacji). W trakcie obliczeń zakłada się zazwyczaj, że funkcje podcałkowe są stałe na kroku czasowym (wartości szacowane na podstawie poprzedniego kroku czasowego). Obliczenia dopływu na polder sprowadzają się wówczas do wymnożenia wydatku dla kroku czasowego przez czas trwania tego kroku (całkowanie metodą prostokątów). Można oczywiście stosować także dokładniejsze formuły całkowania.

Wyznaczenie rzędnej zwierciadła wody w k -tym zbiorniku, wymaga zdefiniowania parametrów krzywej napełnienia polderu $V_k(H_z)$. Krzywa ta definiowana jest formalnie w postaci odpowiedniego równania, zwykle jednak opisana jest łamaną o n_w wierzchołkach.

Opisany powyżej sposób odwzorowania układu polderów w jednowymiarowym systemie modelowania sieci rzecznej traktuje zbiornik przyrzeczny jako element punktowy, oddziaływający na wszystkie budowle hydrotechniczne z nim powiązane poprzez poziome zwierciadło wody, obliczane z krzywej napełnienia. Już samo odwzorowanie obiektu przestrzennego poprzez model punktowy o parametrach skupionych jest znaczącym uproszczeniem. Kryterium poziomego lustra wody wprowadza dodatkowe uproszczenia wpływające przede wszystkim na modelowanie pracy budowli hydrotechnicznych. We wzorach na wydatek tych urządzeń pojawi się bowiem wartość rzędnej w zbiorniku obarczona błędem, co może skutkować na przykład nie uwzględnieniem warunku podtopienia upustu czy przelewu, a zatem zdecydowanie odmiennym charakterem pracy. Dla krzywej napełnienia, poza błędem wynikającym z dokładności jej odwzorowania (np. z NMT), pojawia się dodatkowy błąd związany z nachyleniem zwierciadła wody szczególnie w fazie przepływowej pracy zbiornika przyrzecznego.

Autor zaproponował, aby wyznaczając krzywą napełnienia jednoznacznie określić lokalizację umownego wodowskazu, dla którego została ona wyznaczona (zazwyczaj będzie to najniższy punkt w czaszy zbiornika). Można wówczas, z wykorzystaniem danych pomiarowych bądź modeli hydrodynamicznych, wprowadzać poprawki korygujące rzędne wody przy budowlach hydrotechnicznych.

Warto zwrócić uwagę, że praca urządzeń hydrotechnicznych będzie często uwarunkowana lokalnym układem spadków terenu i oporów ruchu na terenie zbiornika. Tworzy się wówczas swego rodzaju kanał odpływowy, który determinuje wydatek urządzeń hydrotechnicznych.

Równanie retencji (6) zawiera wyłącznie człony związane z wydatkiem urządzeń tworzących połączenia zbiornika z siecią rzeczna. W rzeczywistości polder zasilany może być również ze zlewni własnej (jak na przykład w przypadku polderu Majdany, który zasila rzeka Tralalka), ale także przepływem filtracyjnym z otaczającej sieci rzecznej, oraz innych wpływów. Stąd też bilans objętości zgromadzonej wody w zbiorniku jest niepełny.

Reasumując, wszystkie wymienione powyżej niedoskonałości takiego punktowego modelu polderu ograniczają jego stosowanie wyłącznie do sytuacji, w której przelewy zasilają polder a rzędne wody na zbiorniku poniżej urządzeń zasilających nie oddziałują na ich wydatek.

Autor zaproponował, aby punktowy model polderu, tam gdzie to jest istotne, został rozszerzony o parametry uwzględniające nachylenie zwierciadła wody oraz zasilanie ze zlewni własnej. Model powinien także uwzględniać lokalne warunki przepływu poniżej budowli hydrotechnicznych.

Dotychczasowe założenia modelowania polderu w systemie SPRUNER, jako obiektu o parametrach skupionych, zostały uzupełnione następująco:

- krzywa napełnienia zbiornika wyznaczana jest dla umownego wodowskazu referencyjnego (H_{wz}) o jednoznacznie zdefiniowanych współrzędnych położenia,
- objętość przypisana określonym rzędnym w krzywej napełnienia uwzględnia spadek zwierciadła wody na polderze (można je wyznaczyć modelami hydrodynamicznymi jedno- lub dwuwymiarowymi),
- rzędne zwierciadła wody od strony zbiornika przyrzecznego w punktach lokalizacji budowli hydrotechnicznych uwzględniają poprawki korygujące uwzględniające rzędne na wodowskazie

referencyjnym, poprawki obliczane choćby na podstawie statystycznego związku wodowskazów $H_z=f(H_{wz})$, przy czym postać równania uzależniona jest od przeprowadzonej analizy statystycznej, a dane do obliczeń parametrów tego równania można uzyskać przez pomiar bezpośredni lub wygenerować stosownym modelem hydrodynamicznym,

- dla budowli hydrotechnicznych, których wydatek może być uzależniony od warunków przepływu w kanale odpływowym wyznacza się krzywą przepływu dla dolnego stanowiska budowli,
- równanie retencji (4) zawiera człon związany z zasilaniem własnym zbiornika, który sumuje wszystkie dopływy nie będące efektem pracy budowli hydrotechnicznych i przyjmuje postać:

$$V^k(t) = \int_{t_p}^{t_k} \sum_{j=1}^m Q_{prz}^j(t) dt + \int_{t_p}^{t_k} Q_z(t) dt + V^k(t_p) \quad (7)$$

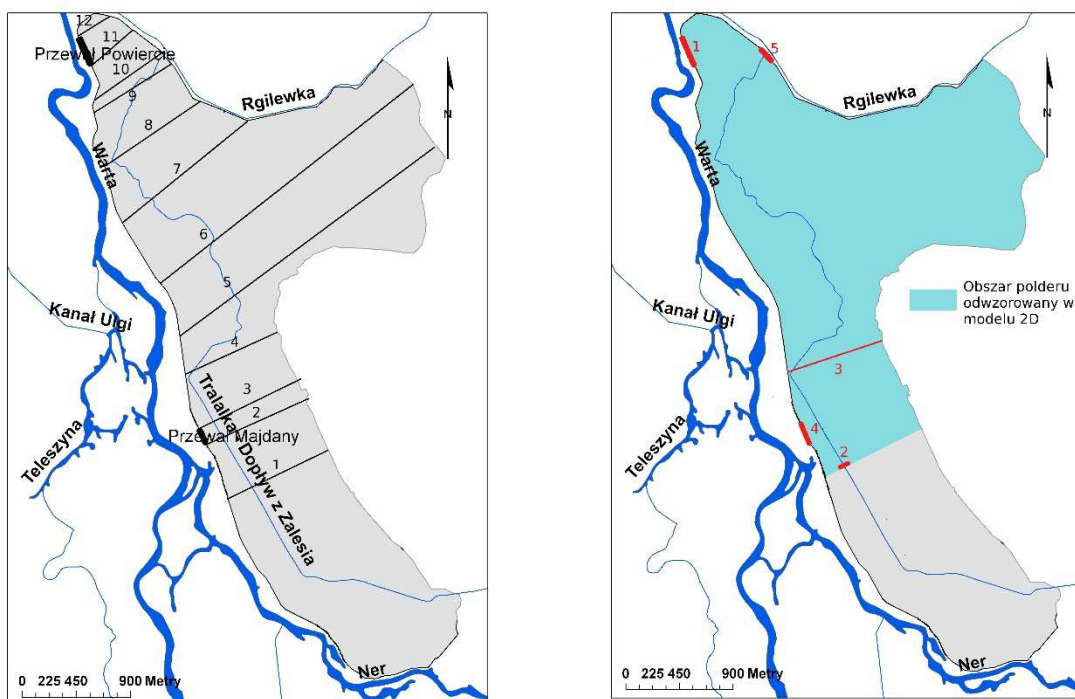
gdzie Q_z zasilanie własne zbiornika [m^3/s] a pozostałe oznaczenia jak we wzorze (6).

Tak zdefiniowany model polderu, pomimo swego nadal punktowego charakteru, uwzględnia w pewnym stopniu przestrzenny rozkład swojego oddziaływania. Model pozostaje relatywnie prosty w implementacji, choć wyraźnie zaczyna wzrastać liczba parametrów go opisujących.

Implementacja powyższych założeń w systemie modelowania powinna również uwzględniać możliwość definiowania różnorodnych typów budowli hydrotechnicznych, które spotyka się na polderach. Budowla ponadto może pracować w różnych reżimach przepływu (przelew zatopiony i niezatopiony, upust pracujący pod ciśnieniem, z zatopionym wlotem i niezatopionym wylotem etc.).

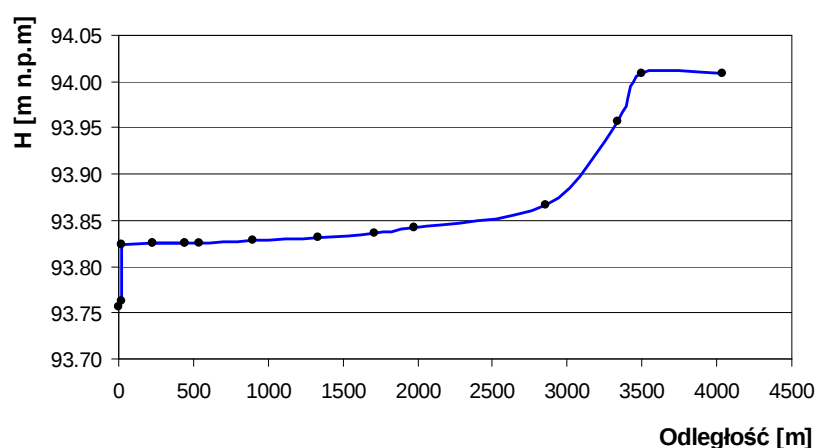
W rozdziale 4 pozycji [5] cyklu przedstawiono wyniki modelowania przejścia fali wezbraniowej z 2010 roku na odcinku Warty z polderem Majdany. W utworzonym modelu zaimplementowano opisane powyżej założenia uzupełniające punktowy model odwzorowania zbiornika przyrzecznego. Przeprowadzono analizy wariantowe pracy polderu Majdany, które wynikały z działań lokalnej społeczności próbującej zablokować górny przelew wałowy, przez który polder jest alimentowany przepływem z Warty. Jednym z bardziej interesujących wniosków praktycznych wynikających z przeprowadzonych analiz było stwierdzenie, że zablokowanie górnego przelewu wałowego spowodowałoby podniesienie się stanów na Warcie i woda wlewałaby się dolnym przelewem wałowym w ilości, która praktycznie napełniłaby polder do poziomu jaki osiąga się w reżimie pracy zgodnym z instrukcją eksploatacyjną.

W rozdziale 5 pracy [5] (autor I.Laks) przedstawiono wyniki odwzorowania przepływu wody na polderze z wykorzystaniem modelu jedno (1D) i dwu (2D) wymiarowego. Eksperymenty numeryczne zostały wykonane w celu oszacowania błędu jakie powoduje, w punktowym modelu polderu, uproszczenie o poziomym układzie zwierciadła wody oraz generowanie krzywej napełnienia na podstawie NMT. Obszar odwzorowania polderu Majdany w obydwu modelach przedstawia ryc.10. Modelem jednowymiarowym, który zawierał 12 przekrojów poprzecznych odwzorowano fazę pracy polderu, w którym następuje zasilanie polderu przelewem górnym (pomiędzy przekrojami nr 2 i 3) i odpływ przelewem dolnym (pomiędzy przekrojami nr 11 i 12). Na polderze musi wystąpić spadek zwierciadła wody umożliwiający przepływ wody pomiędzy przelewami wałowymi (polder w tej fazie spełnia funkcję kanału obiegowego).



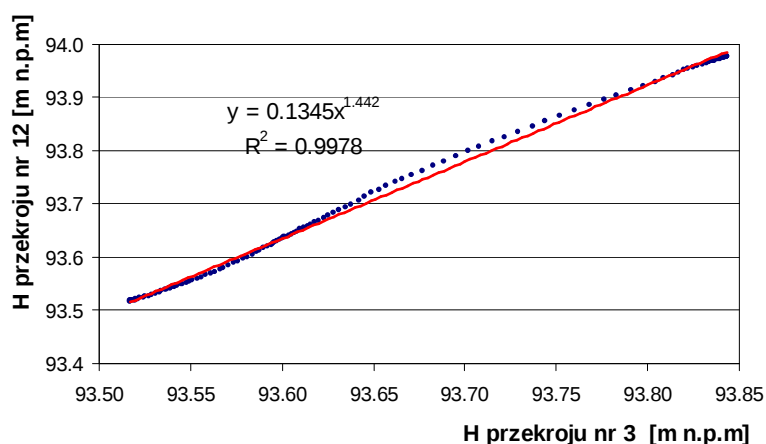
Ryc.10. Obszar polderu Majdany odwzorowany w modelu 1D przepływu (po lewej-przytoczono ryc.5.1 z pozycji [5]) oraz w modelu 2D (po prawej-przytoczono ryc.5.7 z pracy [5]).

Ryc.11 przedstawia obliczeniowy układ zwierciadła wody wzdłuż polderu w dniu 27 maja 2010 roku godz.14. Odpowiada to momentowi realizacji pomiarów w tym dniu przez zespół badawczy kierowany przez autora. Zwierciadło na długości 2800 m (od przekroju nr 12 do nr 4) ma średni spadek 0.00015, pomiędzy przekrojami 4 i 2 jest to wartość 0.00218 oraz pomiędzy przekrojami 1 i 2 jest równy zero.



Ryc.11. Rozkład stanów na długości polderu Majdany obliczony dla czasu 27 maja godz. 14:00 (przytoczono ryc.5.4 z pracy [5]).

Objętość zgromadzonej wody obliczona dla takiego układu zwierciadła wody wyniosła 4874 tys. m³ a dla poziomego układu zwierciadła wody równego rzędnej w przekroju nr 12 (93. 83 m n.p.m) jest równa 4493 tys. m³. Różnica wynosząca 381 tys. m³ stanowi 7.82 % całkowitej objętości zbiornika dla tego rozkładu stanów na polderze.



Ryc.12. Równanie krzywej związku wodowskazów dla przekrojów nr 3 i nr 12 (przytoczono ryc.5.5 z pracy [5]).

Uzyskane z modelu hydrodynamicznego rozkłady stanów umożliwiają wyznaczenie poprawki do wartości rzędnych obliczanych z krzywej napełnienia zbiornika w zależności od lokalizacji punktu na polderze. Poprawki te w postaci związków statystycznych można wykorzystać do lepszego odwzorowania pracy urządzeń hydrotechnicznych. Przykład równania związku wodowskazów dla przekrojów nr 3 i nr 12 ilustruje ryc.12. Wartość współczynnika korelacji równa 0.998 wskazuje, że błąd uproszczenia obliczania rzędnej w przekroju nr 3 na podstawie rzędnych w przekroju nr 12 nie będzie znaczący.

Opisane powyżej wyniki otrzymane z jednowymiarowego modelu przepływu polderu Majdany wykorzystane zostały do uzupełnienia zestawu danych i korekty krzywej napełnienia dla modelu punktowego z zaproponowanymi rozszerzeniami opisanymi w rozdziale 2 pozycji [5] cyklu.

Pełne odwzorowania transformacji przepływu na obszarze polderu wymaga jednak zastosowania modeli dwu, lub nawet trójwymiarowych opisujących przestrzenny zjawiska ruchu wody w sieci kanałów otwartych. Rozwój metod numerycznych rozwiązywania równań różniczkowych oraz mocy obliczeniowych współczesnych komputerów sprawił, że rozwiązanie problemu modeli **RANS** nie stanowi już znaczącego problemu. Dostępne są zaawansowane systemy modelowania przepływów nieustalonych zarówno w formie oprogramowania komercyjnego (np. Mike2D) jak i oprogramowania ogólnodostępnego bazującego na licencji typu free software lub open source. Przykładem oprogramowania dystrybuowanego na zasadach licencji free software jest wspomniany już wcześniej system Rismo2D, który został wykorzystany do przeprowadzenia symulacji transformacji przepływu na obszarze polderu Majdany.

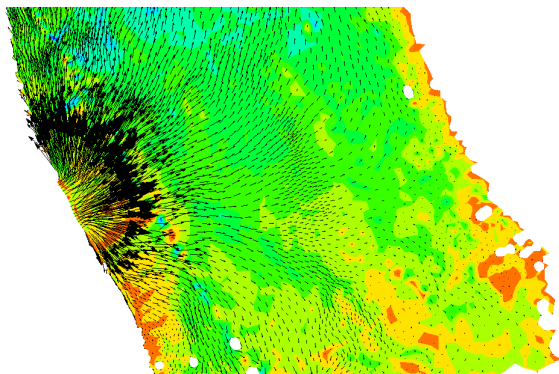
Wygenerowana na potrzeby modelu siatka MES zawierała 242863 węzłów oraz 120213 elementów trójkątnych. Średnia długość boku trójkąta wynosiła 10 m. Obszar polderu podzielony był równomiernie, bez wydzielania stref o różnym zagęszczeniu. Rzędne terenu poszczególnych węzłów siatki MES zostały przypisane z wykorzystaniem metody najmniejszych odległości z NMT bazującego na LIDAR. Wartości współczynników szorstkości według formuły Manninga przyjęto dla wszystkich elementów takie same jak dla terenów zalewowych w modelu 1D, które uzyskano w procedurze tarowania ($n=0.042$). Rozdzielczość przestrzenna siatki podziału na elementy uniemożliwiła jednak pełne odwzorowanie rzeki Tralalki, której szerokość waha się od 1.5 do 3 m. Obliczenia transformacji przepływu modelem 2D przeprowadzono dla dwóch wariantów:

- I. odwzorowanie układu zwierciadła wody z dnia 27 maja 2010 roku godz. 14:00 (warunki ruchu ustalonego),

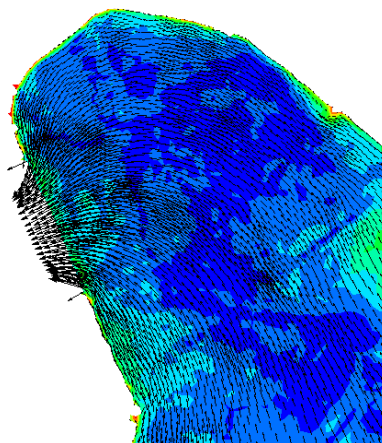
II. odwzorowanie hydrogramu stanów na polderze w okresie od 29 maja 2010 roku do 18 czerwca 2010 roku (warunki ruchu nieustalonego).

Wynikiem obliczeń były rozkłady stanów, pola prędkości oraz zasięg zalewu. Na ryc.14. przedstawiono rozkład pola prędkości w pobliżu górnego (a) i dolnego (b) przelewu wałowego, w pobliżu których następuje skumulowanie przepływu powodujące lokalny przyrost prędkości.

a)



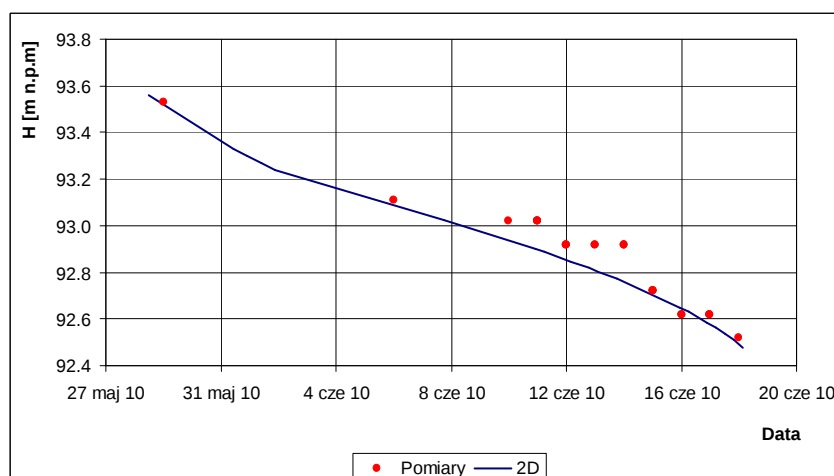
b)



Ryc.13. Rozkład pola prędkości w pobliżu górnego (a) i dolnego (b) przelewu wałowego dla przepływu z dnia 27 maja 2010 roku (przyczocono ryc.5.8 z pracy [5]).

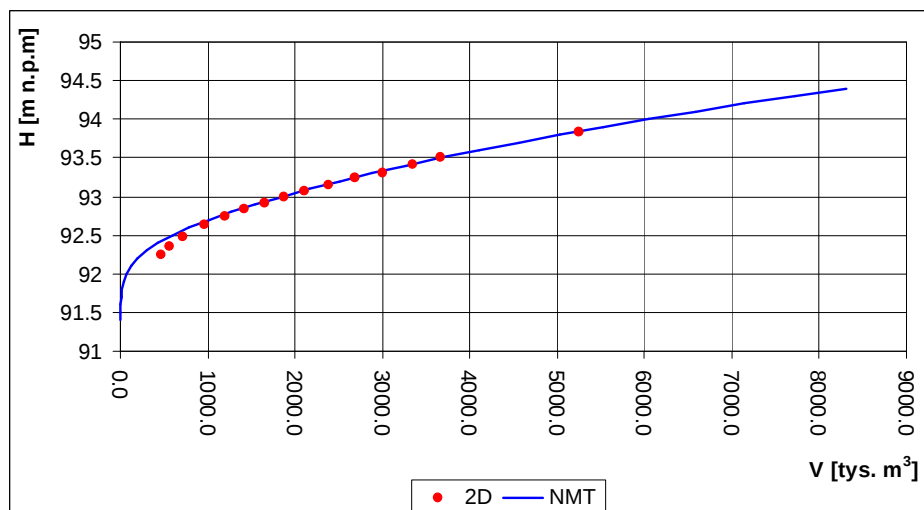
Maksymalna prędkość wody na obszarze polderu wystąpiła w pobliżu górnego przelewu wałowego i wyniosła 1.022 m/s.

Hydrogram rzędnych zwierciadła wody uzyskany z modelu 2D (wariant II) porównano z dostępnymi danymi pomiarowymi udostępnionymi przez ówczesny Wojewódzki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych w Poznaniu (oddział w Koninie), co ilustruje ryc.14. Model dobrze odwzorował początkową oraz końcową fazę odprowadzania wody powierzchniowej z polderu. Największe rozbieżności występują w okresie od 10 do 14 czerwca. Przebieg pomiarów w tym okresie budzi jednak wątpliwości, ze względu ich bardzo „schodkowy” charakter. Kilkudniowe okresy stałych stanów na polderze w trakcie jego osuszania wydają się mało realne. Niemniej zespół badawczy nie posiadał innych danych umożliwiających weryfikację zapisów w dzienniku pracy pompowni Powiercie I.



Ryc.14. Pomierzony i obliczony modelem 2D hydrogram rzędnych zwierciadła wody w przekroju kontrolnym nr 5 (przyczocono ryc.5.11 z pracy [5]).

Obliczany w poszczególnych krokach czasowych zasięg zalewu umożliwia wyznaczenie objętości zgromadzonej na polderze wody dla rzędnej zwierciadła wody odpowiadającej lokalizacji wodowskazu przy przepompowni. Otrzymujemy wówczas krzywą napełnienia zbiornika, która uwzględnia zarówno nachylenie zwierciadła wody, jak i również objętość zastoisk nie połączonych hydraulicznie z pompownią. Punkty takiej krzywej porównano z krzywą wyznaczoną z NMT (ryc.15) bazującego na LIDAR.



Ryc.15. Porównanie krzywych napełnienia polderu Majdany wyznaczonych z NMT przy założeniu poziomego zwierciadła wody oraz modelem 2D (przytoczono ryc.5.12 z pracy [5]).

Punkty krzywej obliczonej z modelu 2D dla objętości powyżej 1 mln m³ praktycznie pokrywają się z krzywą otrzymaną z NMT dla założeń poziomego zwierciadła wody. Dla mniejszych objętości krzywa z modelu 2D przebiega poniżej krzywej z NMT. Widoczny jest tutaj efekt uwzględnienia zastoisk w ogólnym bilansie objętości. Efektu tego nie można uzyskać wykorzystując modele uproszczone. Co istotne, krzywa napełnienia może posiadać inny kształt w fazie napełniania oraz opróżniania polderu (pętla histerezy).

Jednowymiarowy (1D) i dwuwymiarowy (2D) model przepływów nieustalonych polderu Majdany umożliwiły obliczenie rozkładu stanów zwierciadła wody na jego długości, przede wszystkim dla celów ilościowego oszacowania błędu wyznaczania krzywej napełnienia zbiornika przy założeniu poziomego układu zwierciadła wody. Posiadając informacje o układzie zwierciadła wody na zbiorniku przyrzecznym, możliwym jest skorygowanie krzywej napełnienia oraz wyznaczenie poprawek uwzględniających lokalizację budowli hydrotechnicznych, uzupełniając tym samym dane wymagane przez rozszerzony model punktowy polderu. Otrzymane z modelu 2D rozwiązanie może stanowić również warunek brzegowy dla modeli filtracyjnych, które odwzorowują końcową fazę osuszania polderu.

Założenia opisane w pracy [5] dotyczące odwzorowania polderów w jednowymiarowych modelach przepływu wykorzystano w pracy [7] cyklu, która przedstawia analizę wpływu awarii górnego przelewu wałowego polderu Golina na transformację przepływu w Warcie dla fali powodziowej z 2010 roku. Polder Golina znajduje się na prawym brzegu Warty, bezpośrednio poniżej miasta Konin, pomiędzy km 385,0 a km 398,0. Polder został wykonany w ramach projektu zabudowy szerokiej, naturalnej doliny konińsko-pyzderskiej. Powierzchnia polderu wynosi ok. 3055 ha, a jego objętość statyczna do rzędnej korony dolnego przelewu wałowego równej 80,49 m n.p.m. to 25,3 mln m³. Wartości te obliczone

zostały przez autora habilitacji na podstawie numerycznego modelu terenu bazującego na LIDAR. Polder ten stanowi ważny element systemu ochrony przeciwpowodziowej aglomeracji poznańskiej.



Bild 4: Sandausspülung aus dem Deichüberlaufbauwerk (Suffosion) am rechten Bauwerks- Widerlager



Bild 5: Lücke am rechten Widerlager des Deichüberlaufs in Kraśnica

Ryc.16. Zjawisko sufozji w okolicach prawego przyczółku przelewu wałowego (Bild 4:) oraz powstała w jej wyniku wyrwa w przewale (Bild 5:) (przytoczono rysunki 4 i 5 z pracy [8]).

Awaria przewалу (ryc.16) była spowodowana między innymi działalnością lokalnej społeczności, która workami z piasku zablokowała przewal, przeciwstawiając się zalaniu terenu polderu w trakcie przejścia kulminacji fali powodziowej. Powstała w przewale wyrwa wydłużyła dopływ wody do polderu i wymusiła wykonanie w wale dodatkowego przekopu odwadniającego, jeszcze bardziej komplikując pracę polderu w warunkach przejścia fali powodziowej.

Transformacja fali powodziowej na Warcie była monitorowana przez dedykowane służby administracji państwowej i samorządowej jak również przez zespół badawczy pracowników i studentów Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, kierowanego przez autora habilitacji. Unikatowym zbiorem pomiarowym pozyskanym przez zespół są pomiary wydatku uszkodzonego przelewu wałowego w Kraśnicy (wykorzystując sondę StreamPro) oraz odpowiadające im rzędne zwierciadła wody stanowiska dolnego. Wyniki tych pomiarów przedstawia tabela 3, w której **Datum** oznacza datę wykonania pomiaru, **Durchfluss** pomierzony przepływ a **Wasserstand** pomierzoną rzędną zwierciadła wody.

Tabela 3.

Wartości przepływów i stanów w przekroju pomiarowym poniżej uszkodzonego przelewu wałowego w Kraśnicy (przytoczono tabele 1 z pracy[8])

Datum	Durchfluss [m ³ /s]	Wasserstand [m + NN]
25.05.2010	50,45	81,95
27.05.2010	52,43	81,96
29.05.2010	41,20	81,90
31.05.2010	15,61	81,80

Pomiary umożliwiły określenie współczynników wydatku przelewu jak również wyznaczyć krzywą wydatku umownego kanału odpływowego. Pozwoliło to dobrze odwzorować w modelu

hydrodynamicznym pracę przeważu w trakcie awarii, a co się z tym wiąże również przebieg napełniania i osuszania się polderu.

Model obliczeniowy odcinka rzeki Warty od wodowskazu w Uniejowie do Obornik zawierał 353 przekroje poprzeczne powiązane w 356 odcinki obliczeniowe. W modelu wykorzystano przekroje batymetryczne wykonane w ramach projektu ISOK, a także pomiary własne batymetrii przekrojów wykonane przez autorów artykułu w latach 2010 – 2014. Warunkami brzegowymi były hydrogramy stanów w dolnym przekroju brzegowym (Oborniki) oraz hydrogram przepływów w górnym przekroju brzegowym (przekrój wodowskazowy w Uniejowie). Uwzględniono również główne dopływy Warty. Identyfikacja modelu została przeprowadzona dla wezbrań z roku 2003 oraz 2013. Weryfikację modelu przeprowadzono dla hydrogramów stanów z 2010 roku w przekrojach wodowskazowych: Uniejów, Koło, Sławsk, Nowa Wieś Podgórna i Poznań. Średnia różnica pomiędzy wartościami pomierzonymi i obliczonymi dla stanów średnich i wysokich była mniejsza niż 0.04 m. Tak dobre dopasowanie modelu do obiektu rzeczywistego zapewnia uzyskanie wiarygodnych wyników ilościowych niezbędnych do analizy rzeczywistego oddziaływania polderu Golina na rzekę Wartę.

Obliczenia zostały wykonane dla dwóch wariantów obliczeniowych :

- I. Odzworowujący rzeczywistą sytuację z roku 2010,
- II. Odzworowujący sytuację, w której polder pracuje zgodnie z instrukcją eksploatacyjną (brak blokady przepływu na przelewach, awarii przelewu w Krasnicy i przekopu odwadniającego).

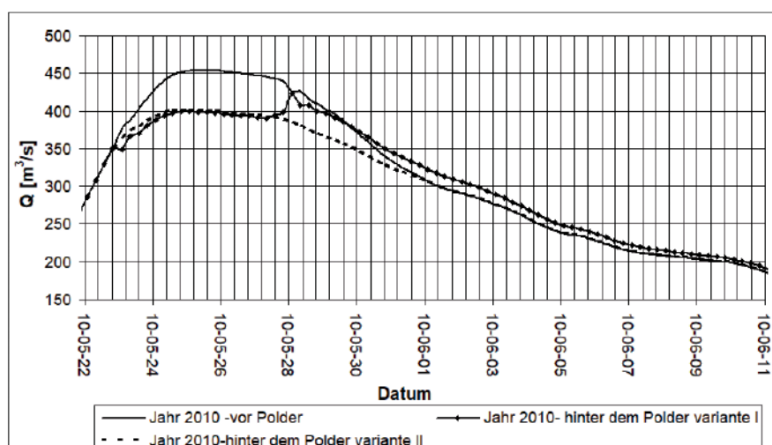


Bild 7: Transformation des Durchflusses durch den Polder Golina für Variante I und II, Hydrogramme des Durchflusses vor Polder und nach Polder

Ryc.17. Transformacja przepływu przez polder Golina dla wariantu I i II. Hydrogramy przepływu przed polderem i za polderem (przyczocono ryc.7 z pracy [8]).

Można zauważyć (ryc.17), że w obydwu wariantach czas włączenia się do pracy przelewu wałowego jest jednakowy. W obydwu wariantach ścięcie wierzchołka fali powodziowej jest bardzo podobne i wynosi $56.48 m^3/s$ dla wariantu I oraz $54.51 m^3/s$ dla wariantu II do momentu wykonania przekopu odwadniającego w dniu 27 maja 2010 roku. W tym momencie polder rozpoczął zasilanie Warty przepływem o maksymalnej wartości $18 m^3/s$. Stąd też rzeczywista redukcja przepływu maksymalnego dla wariantu I wyniosła $38 m^3/s$. Jednocześnie fala została wydłużona, co skutkowało dłuższą presją wysokich stanów wód na obwałowanie Warty, które w wielu miejscach było w złym stanie technicznym. Obszar polderu został wypełniony do rzędnej w wariantie I do 79.65 m n.p.m a w wariantie II do 79.85 m n.p.m. W obydwu wariantach poziom zwierciadła wody nie przekroczył rzędnej dolnego przelewu wałowego.

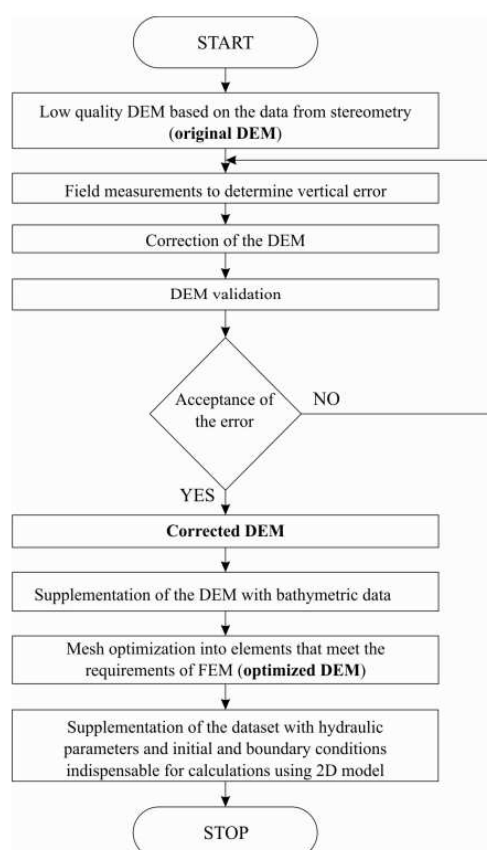
Przeprowadzone eksperymenty numeryczne oraz analizy opisane w pracy [8] potwierdziły poprawność przyjętych założeń modelowania polderów zaprezentowanych w pracy [5].

Metodyka poprawy niskiej jakości numerycznego modelu terenu opracowanego na podstawie zdjęć lotniczych i jego dostosowania do potrzeb numerycznych modeli przepływu

Celem pracy [6] było opracowanie metodyki poprawy dokładności NMT, opracowanych metodami fotogrametrycznymi, do celów modelowania 2D jak również szacowania zdolności retencyjnej dolin rzecznych i polderów. Opracowana metodyka bazuje na niewielkiej liczbie pomiarów bezpośrednich wykonanych geodezyjnym sprzętem GPS-RTK oraz optymalizacji siatki podziału na elementy. W pracy oszacowano wielkość błędu odwzorowania NMT oraz jego cechy tj. człon systematyczny i losowy. Wygenerowano siatkę podziału na elementy spełniającą kryteria wymagane przez MES oraz przypisano jej współrzędne wysokościowe. Przygotowano zestaw danych dla modelu numerycznego bazującego na rozwiązaniu równań płytkiej wody, którym wykonano obliczenia przepływu dla założeń ruchu ustalonego. Porównano rozkłady prędkości, objętość oraz zasięg zalewu na terenach zalewowych dla NMT bez modyfikacji, po wprowadzeniu korekty wysokościowej oraz dla modelu referencyjnego bazującego na NMT LIDAR.

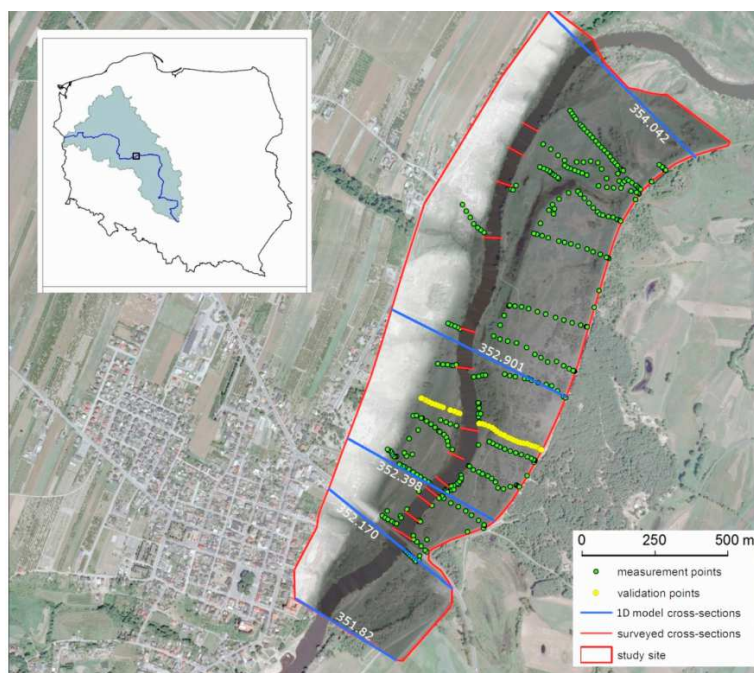
W pracy użyto następującego nazewnictwa: Original DEM – oznacza numeryczny model terenu bazujący na zdjęciach lotniczych w skali 1:26000, Corrected DEM oznacza numeryczny model terenu bazujący na zdjęciach lotniczych, ale z korektą błędu wysokości oraz uzupełniony o batymetrię cieku, Optimized DEM oznacza numeryczny model terenu bazujący na Corrected DEM oraz siatce podziału na elementy spełniającej wymogi MES, Reference DEM – model bazujący na danych z lotniczego skaningu laserowego LIDAR.

Autor habilitacji zaproponował następującą metodykę przygotowania danych dla modeli 2D, który prezentuje ryc.18.



Ryc.18. Proces przygotowania danych dla 2D modeli hydrodynamicznych (przyczocono ryc.1 z pracy [6]).

Obiektem badawczy (ryc.19) stanowił odcinek rzeki Warty o długości 2220 m zlokalizowany w pobliżu miejscowości Pyzdry, pomiędzy km 351.820 a km 354.042. Średnia szerokość doliny zalewowej to 490 m, a szerokość koryta głównego waha się od 50 do 84 m.



Ryc.19. Lokalizacja obiektu badawczego (przycięto ryc.2 z pracy [6]).

Na obszarze obiektu badawczego wykonano łącznie 450 pomiarów w charakterystycznych przekrojach poprzecznych w obrębie strefy zalewowej, na wałach przeciwpowodziowych i zboczach doliny rzecznej. Do oceny dokładności istniejącego NMT oraz poprawy jego dokładności wykorzystano 400 pomiarów, pozostałe 50 pomiarów wykorzystano do weryfikacji opracowanej metodyki.

Metodyka oceny dokładności numerycznego modelu terenu bazującego na zdjęciach lotniczych (Orginal DEM) zawierała kilka etapów. W pierwszym obliczono wielkości błędów Δh_i jako różnicę pomiędzy wysokościami odczytanymi z Orginal DEM a wysokościami pomierzonymi w terenie. Ponieważ lokalizacja punktów pomiarowych w terenie nie pokrywała się z lokalizacją punktów węzłowych Orginal DEM w formacie TIN, dlatego wysokości te zostały interpolowane z wykorzystaniem metody odwrotnych odległości.

W kolejnym etapie sprawdzono zgodność rozkładu błędów z rozkładem normalnym metodą graficzną oraz przy pomocy testu Shapiro-Wilka. Ocenę jakości przeprowadzono na podstawie powszechnie stosowanych globalnych miar statystycznych: błędu średniego ME, średniego błędu kwadratowego RMSE, odchylenia standardowego SD. Miarami dokładności modelu były: błędy średnie, przypadkowe oraz systematyczne.

Do określenia przestrzennego rozkładu błędów na rozpatrywanym odcinku doliny zalewowej zastosowano statystykę Morana I oraz Getisa-Orda. W kolejnym etapie oceny dokładności poszukiwano zależności pomiędzy wielkością błędu a pierwotnymi indeksami topograficznymi tj.: spadkami, ekspozycją i krzywizną.

Spółród prezentowanych w pracy wyników analiz statystycznych dotyczących oceny dokładności Orginal DEM warto przytoczyć podstawowe wartości błędów obliczone na podstawie pomiarów terenowych. Obliczone błędy na analizowanym obszarze wahały się od -0.21 m do 1.53 m. Wartości błędów miały rozkład normalny a średni błąd RMSE wynosił 0.63 m przy błędzie przypadkowym SD

0.30 m i błędzie systematycznym ME 0.56 m. Ponieważ na analizowanym obszarze występował błąd systematyczny to wszystkie wartości rzędnych w Original DEM obniżono o wartość błędu średniego RMSE, uzupełniono dane o batymetrii koryta głównego tworząc tym samym Corrected DEM. Przeprowadzone obliczenia wykazały również, że na analizowanym obszarze nie występuje zależność pomiędzy wielkościami błędu a spadkami terenu, ekspozycją i krzywizną.

W dalszym etapie analizy original DEM i corrected DEM zostały porównane z modelem referencyjnym bazującym na LIDAR. Analiza statystyczna bazowała na różnicach w wysokościach dla 61 839 punktów zlokalizowanych w obrębie terenów zalewowych. Odrzucono ok. 5 % punktów zawierających wartości ekstremalne i odstające. Różnice wysokości dla modelu referencyjnego oraz original DEM wahały się od -1.49 m do 0.56 m, a ich wartość średnia wyniosła -0.48 m a odchylenie standardowe 0.39 m. Taką samą analizę wykonano dla corrected DEM, dla którego błąd średni był równy 0.03 m, a różnice wysokości mieściły się w zakresie od -1.12 do 0.89 m.

W końcowym etapie analiz statystycznych dokonano oceny dokładności poszczególnych modeli, łącznie z referencyjnym bazując na zestawie danych pomiarowych nie wykorzystano uprzednio w analizach (50 punktów). Wyniki prezentuje tabela 4.

Tabela 4.

Ocena dokładności poszczególnych numerycznych modeli terenu (przytoczono tabelę nr 1 z pracy [6]).

DEM type	Minimum (m)	Maximum (m)	RMSE (m)	SD (m)	ME (m)
Original DEM	-0.05	1.22	0.65	0.20	0.61
Corrected DEM	-0.31	0.72	0.21	0.17	0.13
Reference DEM	-0.50	0.63	0.35	0.16	0.12

Dla celów analizy wpływu jakości NMT na wyniki obliczeń otrzymywane z modeli hydrodynamicznych opracowano trzy modele przepływów z wykorzystaniem wspomnianego już wcześniej w autoreferacie systemu Rismo2D. Warianty te bazowały odpowiednio na original DEM, corrected DEM i reference DEM. Wszystkie warianty posiadały taką samą informację o batymetrii koryta głównego oraz siatkę podziału na elementy (78 960 węzłów oraz 156 836 elementów). Siatka podziału na elementy została wygenerowana z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania GEMOF i spełniała wymagania MES. Rzędne wysokościowe węzłów siatki zostały interpolowane z wykorzystaniem metody odwrotnych odległości. Taka metodologia przygotowania danych powoduje, że błąd metody numerycznej wykorzystanej do rozwiązania powinien być taki sam dla wszystkich wariantów. Warunki brzegowe oraz wartości współczynników szorstkości dla modelu 2D otrzymano z modelu 1D (utworzonego z wykorzystaniem systemu SPUNER) 50 kilometrowego odcinka Warty od Nowej Wsi Podgórnej do Sławska.

Przeprowadzone symulacje umożliwiły określenie błędu odwzorowania objętości (V_{EE}) i obszaru zalewu (A_{EE}) a także porównać rozkłady pola prędkości dla wszystkich wspomnianych wariantów. Wartości (V_{EE}) i (A_{EE}) obliczono zgodnie z wzorami:

$$V_{EE} = \frac{|V - V_{referenced\ DEM}|}{V_{referenced\ DEM}} 100\% \quad (8)$$

$$A_{EE} = \frac{|A - A_{referenced\ DEM}|}{A_{referenced\ DEM}} 100\% \quad (9)$$

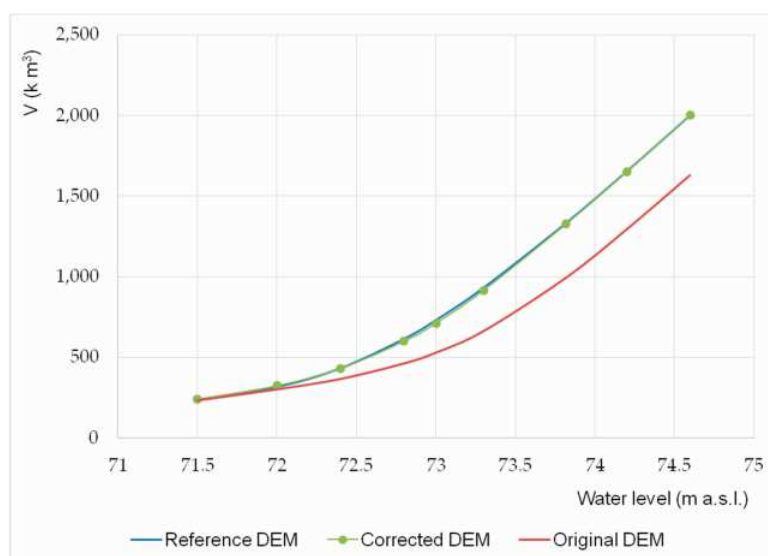
gdzie A and V są wartościami obliczonymi dla original DEM i corrected DEM.

Zbiorcze zestawienie otrzymanych wyników prezentuje tabela 5 oraz ryc.20.

Tabela 5.

*Porównanie wyników otrzymanych z modelu 2D dla poszczególnych numerycznych modeli terenu
(przyczocono tabelę 2 z pracy [6])*

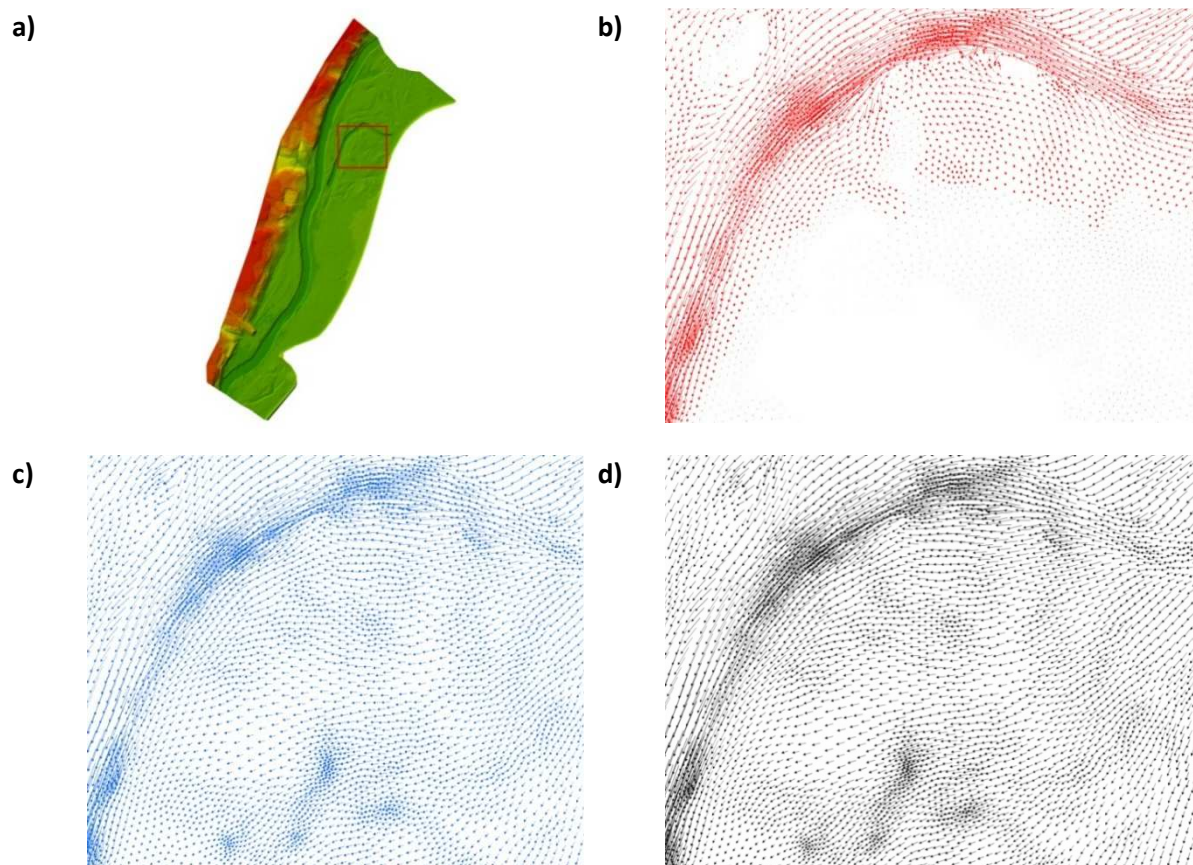
Water level	Flow rate	Original DEM		Corrected DEM		Referenced DEM		Original DEM	Corrected DEM
		Volume	Area	Volume	Area	Volume	Area	V_{EE}, A_{EE}	V_{EE}, A_{EE}
m a.s.l.	m ³ s ⁻¹	m ³	m ²	m ³	m ²	m ³	m ²	[%]	[%]
71.60	58.2	232060	134512	241863	142480	232865	142036	$V_{EE}=0.35$ $A_{EE}=5.30$	$V_{EE}=3.86$ $A_{EE}=0.31$
72.00	77.2	301785	145041	325404	211199	316005	210384	$V_{EE}=4.50$ $A_{EE}=31.06$	$V_{EE}=2.97$ $A_{EE}=0.39$
72.40	102.4	366208	184934	432995	328972	432270	375480	$V_{EE}=15.28$ $A_{EE}=50.75$	$V_{EE}=0.17$ $A_{EE}=12.39$
72.80	135.8	462709	296454	600996	511657	614302	538588	$V_{EE}=24.68$ $A_{EE}=44.96$	$V_{EE}=2.17$ $A_{EE}=5.00$
73.00	156.4	529487	380175	712843	606570	730252	619102	$V_{EE}=27.49$ $A_{EE}=38.59$	$V_{EE}=2.38$ $A_{EE}=2.02$
73.30	193.3	663362	511717	916696	731603	930610	712951	$V_{EE}=28.72$ $A_{EE}=28.23$	$V_{EE}=1.50$ $A_{EE}=2.62$
73.82	279.1	995113	743683	1328694	830030	1332140	817928	$V_{EE}=25.30$ $A_{EE}=9.08$	$V_{EE}=0.26$ $A_{EE}=1.48$
74.20	365.1	1294347	817313	1651892	867727	1650702	855057	$V_{EE}=21.59$ $A_{EE}=4.41$	$V_{EE}=0.07$ $A_{EE}=1.48$
74.60	484.3	1631276	863153	2001991	880865	1998564	881538	$V_{EE}=18.38$ $A_{EE}=2.09$	$V_{EE}=0.17$ $A_{EE}=0.08$
Average Error								$V_{EE}=18.48$ $A_{EE}=23.83$	$V_{EE}=1.51$ $A_{EE}=2.86$



Ryc.20. Porównanie krzywych opisujących związki pomiędzy rzędną zwierciadła wody w przekroju 381.820 a objętością retencjonowanej wody wyznaczonych na podstawie wyników otrzymanych z modelu 2D (przyczocono ryc.9 z pracy [6]).

Zauważyć można bardzo małe różnice pomiędzy wynikami z modeli bazujących na corrected DEM i reference DEM. Średni błąd dla objętości to zaledwie 1.51% a dla powierzchni 2.86 %. Dla original DEM wartości te są znacznie większe, odpowiednio 18.48 % oraz 23.83%.

Jakościowe porównanie rozkładów prędkości prezentowane jest na ryc.21.



Ryc.21. Porównanie rozkładów prędkości otrzymanych z modelu 2D dla przepływu równego $279.1 \text{ m}^3/\text{s}$: a) porównywany fragment obszaru przepływu zaznaczono czerwonym prostokątem, b) wyniki dla original DEM, c) wyniki dla corrected DEM and d) wyniki dla reference DEM (przytoczono ryc.11 z pracy [6]).

Rycina ta również potwierdza dobrą zgodność wyników otrzymanych z reference DEM oraz corrected DEM.

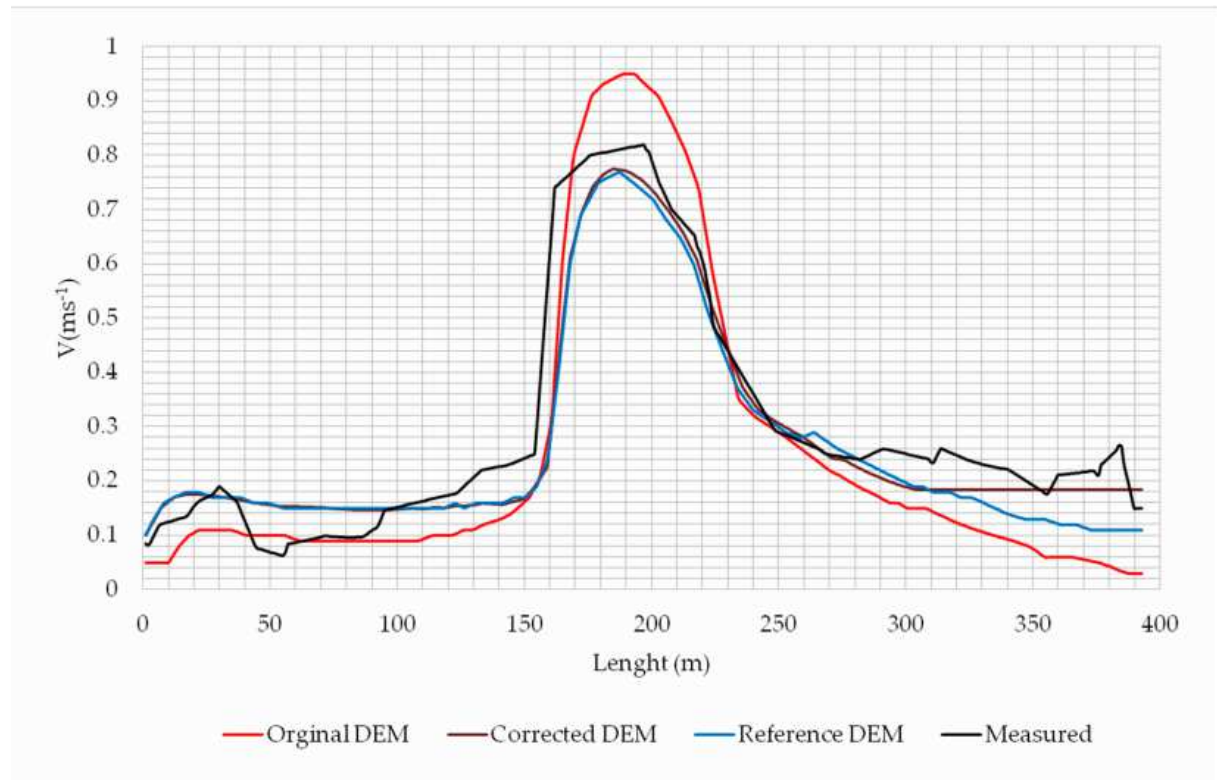
Tabela 6 prezentuje podstawowe miary statystyczne określające błąd odwzorowania prędkości w odniesieniu do modelu referencyjnego w modelach original DEM i corrected DEM dla przepływu równego $279.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabela 6.

Miary statystyczne różnic prędkości wody pomiędzy modelem 2D bazującymi na reference DEM a modelami bazującymi na corrected DEM oraz original DEM dla przepływu $Q = 279.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (przytoczono tabelę 3 z pracy [6])

DEM type	Min [ms^{-1}]	Max [ms^{-1}]	Mean [ms^{-1}]	Std dev [ms^{-1}]
corrected DEM	0.00	0.37	0.03	0.04
original DEM	0.00	0.73	0.12	0.10

Porównanie obliczonych i pomierzonych rozkładów prędkości w przekroju 352.398 przedstawia ryc.22. W tabeli 7 przedstawiono miary statystyczne dla tego przykładu tj. średnią różnicę prędkości, odchylenie standardowe dla różnic prędkości oraz współczynnik korelacji pomiędzy wartościami obliczonymi modelem 2D i wartościami pomierzonymi.



Ryc.22. Rozkład uśrednionych w pionie prędkości w przekroju 352.398 otrzymanych z modelu 2D oraz pomierzonego w trakcie powodzi w roku 2010 (przyczocono ryc.13 z pracy [6] cyklu)

Tabela 7.

Miary statystyczne wyznaczone dla rozkładów prędkości w przekroju 353.398 otrzymanych z modeli 2D, które porównano z wartościami pomierzonymi w trakcie powodzi z 2010 roku dla przepływu $Q = 279.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (przyczocono tabelę 4 z pracy [6]).

DEM type	Mean [ms ⁻¹]	Std dev [ms ⁻¹]	R [-]
reference DEM	0.057	0.053	0.95
corrected DEM	0.045	0.051	0.96
original DEM	0.084	0.058	0.96

Należy wspomnieć, że tereny zalewowe w original DEM są położone wyżej, co znacząco wpływa zarówno na napełnienia jak i na rozkład pola prędkości. Maksymalna różnica w objętości, w porównaniu z modelem referencyjnym, była większa niż 28 % a w powierzchni zalewu nawet o 50%. Na ryc.22. można zauważyć znacząco mniejsze prędkości na terenach zalewowych dla original DEM co bezpośrednio wiąże się z małymi napełnieniami. W takim przypadku oczywiście zwiększa się udział koryta głównego, w którym prędkości są znacząco większe od pomierzonych czy policzonych modelem referencyjnym.

Przedstawione wyniki obliczeń modelem 2D wskazują, że zaproponowana metodyka korekty rzędnych numerycznego modelu terenu bazującego na zdjęciach lotniczych znacząco polepsza jakość odwzorowania obszaru przepływu. Może ona stanowić alternatywę dla obszarów, dla których nie ma dokładnych NMT bazujących na LIDAR. W pracy przedstawiono również analizę ekonomiczną tej metody, wykazując, że dla niewielkich obszarów stanowi ona znacznie tańsze rozwiązanie niż zlecenie wykonania komercyjnego nalogu z wykorzystaniem aparatury LIDAR. Przedstawiony schemat przygotowywania danych dla modeli hydrodynamicznych ma zastosowanie dla wszystkich typów NMT niezależnie od ich jakości. Nawet uważane obecnie za dokładne NMT LIDAR z czasem ulegają dezaktualizacji i również wymagają przeprowadzenia procedury korekcyjnej, którą można przeprowadzić wykorzystując zaproponowaną metodykę

Możliwość wykorzystania wyników badań.

Przedstawione powyżej wyniki prowadzonych badań są wykorzystywane w praktyce inżynierskiej i znalazły zastosowanie w opracowanych i ciągle doskonalonych modelach długiego odcinka rzeki Warty. Zaproponowane metody dotyczące odwzorowania aktywnej strefy przepływu, polderów, retencji dolinowej są implementowane we wspomnianym wcześniej systemie modelowania przepływów nieustalonych SPRUNER. Warto jeszcze raz podkreślić ukierunkowanie prowadzonych badań na użyteczność w sferze praktycznej poprzez implementację rozwiązań w rozwijany przeze mnie system komputerowy SPRUNER. W wielu aspektach jest on bowiem porównywalny, w niektórych aspektach przewyższa nawet takie systemy jak HEC-RAS czy MIKE 2000 pomimo znacząco mniejszych nakładów poniesionych na jego wytworzenie i rozwój. Ten autorski system umożliwia szybkie wdrożenie i weryfikację rezultatów wynikających z analiz teoretycznych. Wykorzystując umiejętności i wiedzę i doświadczenie programistyczne autor może szybko wdrożyć zależności wynikające z prowadzonych badań. Nie jest to na ogół możliwe, jeśli wykorzystywane są systemy (nawet ogólnodostępne i nieodpłatne) zewnętrznych jednostek jak choćby wspomniany wcześniej system HEC-RAS. Co istotne obliczenia wykonane tak modyfikowanym systemem SPRUNER były wielokrotnie wykorzystywane w analizach inżynierskich (publikowane i niepublikowane opracowania) przyczyniając się do poprawy jakości jak również wiarygodności otrzymanych wyników.

Trzeba koniecznie podkreślić, że w światowej literaturze dotyczącej zagadnień modelowania długich odcinków rzek nie udało się znaleźć systemu odwzorowującego strefę aktywną bazującego, jak to jest w opracowanej przez autora metodzie, na parametrach hydraulicznych obszaru przepływu. Problem ten jest albo pomijany lub wskazuje się tylko na możliwość arbitralnego określenia zasięgu strefy aktywnej (np. w powszechnie stosowanym i wspomnianym już systemie HEC-RAS).

Istotnym i wymiernym osiągnięciem jest również zbudowanie, wytarowanie i zweryfikowanie jednowymiarowego modelu numerycznego prawie 300 kilometrowego odcinka Warty od zapory czołowej zbiornika Jeziorsko do Obornik. Model ten jest na tyle wiarygodny, że może i jest wykorzystywany do celów prognostycznych jak i analiz wariantowych związanych ze zmianą sposobu zagospodarowania terenów zalewowych. Omawiany odcinek Warty wraz z dopływami i zabudową hydrotechniczną jest jednym z dłuższych fragmentów sieci rzecznej modelowanych numerycznie jaki dotąd opisywano w światowej literaturze.

Opracowana metodyka dotycząca walidacji, korekty i wykorzystania numerycznych modeli terenu w modelowaniu hydrodynamicznym jest rozwiązaniem na tyle ogólnym, że może być wykorzystywana zarówno w badaniach naukowych jak i praktycznych. Co jest równie istotne pomimo stosunkowo krótkiego czasu od jej opublikowania jest już przytaczana w światowej literaturze.

Omówione wyniki badań były także upowszechniane w cyklach konferencji oraz w szkoleniach prowadzonych dla hydrotechnicznego środowiska inżynierskiego.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Będąc pracownikiem Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu kierowałem 3 grantami Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego a w jednym byłem głównym wykonawcą. Jestem opiekunem naukowym i wykonawcą w grantie NCN przyznanego w ramach konkursu PRELUDIUM14 w maju 2018 roku. Tytuł grantu jest również tytułem rozprawy doktorskiej Pani Joanny Lewandowskiej pt: **Ocena możliwości zachowania wsi olęderskich na terenach zagrożonych powodzią**, która realizowana jest na Wydziale Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Pełnię również funkcję promotora pomocniczego w tymże przewodzie doktorskim.

Uczestniczyłem jako wykonawca w 3 tematach badań statutowych oraz wykonawcą w dwóch tematach badań własnych. Jestem współautorem 5 oryginalnych osiągnięć projektowych, którymi są przede wszystkim programy i moduły informatyczne rozwijanego przeze mnie systemu SPRUNER jak również systemu bazodanowego o stanach i jakości wód gruntowych BASTA.

Mój dorobek publikacyjny związany jest przede wszystkim z zagadnieniami modelowania numerycznego zarówno przepływu w sieciach otwartych jak i ruchu wód gruntowych. Zestawienie dorobku publikacyjnego zostało przedstawione w tabeli 8.

Tabela 8.

Zestawienie dorobku publikacyjnego				
Liczba publikacji z listy A MNiSW (JRC)	Liczba publikacji z listy B MNiSW	Monografie	Liczba rozdziałów w monografiach i pracach zbiorowych	Liczba Materiałów konferencyjnych w języku kongresowym
Całkowity				
9	17	2	12	4
Po uzyskaniu stopnia doktora				
9 (210 pkt.MNiSW)	12 (62 pkt.MNiSW)	2 (40 pkt. MNiSW)	12 (39 pkt. MNiSW)	3 (6 pkt. MNiSW)

Sumaryczny impact factor według listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania to 13,388 a liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS) na dzień 3 czerwca 2018 roku jest równa 29. Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS) ma wartość 4. Łączna punktacja MNiSW po uzyskaniu stopnia doktora jest równa 362 pkt. Cykl publikacji stanowiących osiągnięcie habilitacyjne składa się z 7 prac o łącznej punktacji MNiSW wynoszącej 96 pkt.

Początkowo moje zainteresowania naukowe były ukierunkowane na zagadnienia związane z modelowaniem ruchu wód gruntowych z wykorzystaniem metod numerycznych takich jak Metoda Elementów Skończonych (MES) czy Metoda Różnic Skończonych (MRS). Posiadając szeroką wiedzę programistyczną uczestniczyłem w badaniach związanych z implementacją metod numerycznych w adekwatny program czy system komputerowy umożliwiający realizację obliczeń dla złożonych zagadnień filtracyjnych. Pod kierunkiem prof. dr hab. inż. B.J. Wosiewicza rozwijałem program FILJAZ służący do generowania i rozwiązywania modeli ustalonego przepływu filtracyjnego pod budowlami piętrzącymi bazujący na MES. Program ten stanowił element systemu SYMEL zrealizowanego w ramach rządowego projektu RRI14.

Od roku 1993 tematyka prowadzonych badań została skierowana głównie na zagadnienia modelowania przepływu cieczy w sieci kanałów otwartych. Było to spowodowane faktem, że zostałem powołany do zespołu realizującego projekt badawczy budowy komputerowego systemu analizy i prognozowania przepływów nieustalonych o nazwie SPRUNER. System ten został wykonany na zamówienie ówczesnej Okręgowej Dyrekcji Gospodarki Wodnej (ODGW) w Poznaniu. Cechą unikatową tego systemu w skali naszego kraju była architektura informatyczna, umożliwiająca jego użytkowanie przez instytucje i osoby nie posiadające wiedzy fachowej na temat zjawiska przepływów nieustalonych w sieciach otwartych. Jest to dotychczas jedyny tego typu system utworzony przez polską jednostkę naukową a eksploatowany przez administrację państwową bez bezpośredniego wsparcia kadry naukowej.

W trakcie budowy systemu SPRUNER pojawiło się wiele zagadnień naukowych, których rozwiązanie wymagało poszerzenia stanu wiedzy dotyczącej numerycznego modelowania przepływów w kanałach otwartych. Jednym z nich było modelowanie kanałów ulgi lub starorzeczy, które prowadzą wodę tylko okresowo. Stosowany powszechnie do opisu jednowymiarowego przepływu nieustalonego w kanałach otwartych układ równań różniczkowych de Saint Venanta nie może być stosowany dla odcinków, w których zanika przepływ. Zaproponowana technika tzw. fikcyjnej szczeliny polegała na modyfikacji geometrii przekrojów obliczeniowych w taki sposób, aby zapewnić przepływ wody dla pełnego zakresu rzędnych. Dla techniki tej przyjęto i przebadano odpowiednie równania transformacji (równanie fali kinematycznej) oraz ich schemat dyskretyzacji (schemat niejawni z różnicami wstecz). Wyniki zaimplementowano w system SPRUNER, przeprowadzono stosowne eksperymenty komputerowe i aplikację do kanałów ulgowych Warty, a ich szczegółową analizę opisano w rozprawie doktorskiej **Modelowanie przepływów nieustalonych w korytach i zbiornikach przyrzecznych okresowo prowadzących wodę.**

Moje zainteresowania naukowe zostały znacznie rozszerzone o zagadnienia wpływu roślinności terenów zalewowych na warunki przepływu. Wykonane przeze mnie pomiary terenowe rozkładów przepływu (wykorzystując sondę ADCP StreamPro) w przekrojach hydrometrycznych zlokalizowanych w obrębie terenów zalewowych, w warunkach przepływów powodziowych lub wezbraniowych, stanowiły bazę do weryfikacji modeli teoretycznych. Wykazano między innymi związek pomiędzy gatunkami roślinności trawiastej, bez szczegółowej analizy takich parametrów jak faza rozwoju czy gęstość, a lokalnymi stratami energii płynącej wody. Wyniki te mogą być wykorzystane do określenia przestrzennego rozkładu oporów ruchu na terenach zalewowych bazując wyłącznie na znajomości gatunku roślinności trawiastej. Wyniki prac zostały opublikowane w dwóch artykułach z listy A MNiSW.

Podjąłem również badania dotyczące wykorzystania metod optymalizacji do wspomagania procesu zarządzania zasobami zbiornika retencyjnego dla okresów ekstremalnych. Sformułowane zadanie optymalizacji dynamicznej z uwagi na jego nieliniowość uproszczono przechodząc poprzez dyskretyzację zmiennej niezależnej do zadania statycznego. Model wykorzystano między innymi do analizy wpływu zwiększenia rezerwy powodziowej czwartego co do objętości zbiornika Jeziorsko. Analizy odnosiły się zarówno do przepływów powodziowych jak i niżówkowych.

Uczestniczyłem wielokrotnie w cyklicznych konferencjach krajowych i zagranicznych z zakresu hydrauliki, hydrotechniki i modelowania takich jak Szkoła Hydrauliki, Problemy Hydrotechniki, Modelowanie procesów hydrotechnicznych.

Działalność dydaktyczna obejmuje realizację zajęć z przedmiotów **Technologie Informatyczne** (ćwiczenia i wykłady na kierunku Inżynieria Środowiska i Gospodarka Przestrzenna, studia stacjonarne i niestacjonarne), **Mechanika Budowli i Informatyczne Podstawy Projektowania** (ćwiczenia na studiach stacjonarnych). Zajęcia te realizowane są często z wykorzystaniem platformy e-learning

Moodle. Byłem pierwszą osobą na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu, która uruchomiła i wdrożyła rozwiązania e-learning w procesie dydaktycznym. Brałem udział w pracach zespołu wykonującego materiały dydaktyczne w formie internetowych kursów e-learning z zakresu termodynamiki dla kierunku zamawianego „Technologie energooszczędne w budownictwie”. Pełniłem funkcje pełnomocnika rektora ds. kształcenia na odległość w latach 2006-2008.

Wiedza, doświadczenie i umiejętności dotyczące kształcenia na odległość zostały wykorzystane w międzynarodowym projekcie „E-learningowe Centrum Edukacji dla MSP”, który był realizowany w ramach programu Interreg III C Stiment (udziałowcami były instytucje z Polski, Finlandii i Szwecji). W projekcie realizowanym w latach 2004-2005 byłem odpowiedzialny za przygotowanie multimedialnych materiałów dydaktycznych. Opracowywałem również materiały dydaktyczne w formie multimedialnych kursów internetowych dla Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu czy firmy szkoleniowej Euroconsult sp. z o.o.

2015-7