

POLITECHNIKA KRAKOWSKA

im. Tadeusza Kościuszki

mgr inż. Andrzej Mączałowski

**HYDRAULICZNE ASPEKTY DZIAŁANIA
SZEREGOWEGO UKŁADU PRZELEWÓW BOCZNYCH
W ŚWIETLE BADAŃ NA MODELU FIZYCZNYM**

Praca doktorska

Promotor: Dr hab. inż. Andrzej Prystaj, prof. PK

Kraków 2005



Pragnę serdecznie podziękować wszystkim, którzy poprzez swoją radę, cenne uwagi i bogate doświadczenie okazali mi pomoc przy przygotowaniu i realizacji badań oraz redagowaniu niniejszej rozprawy. Dziękuję Promotorowi Pracy Panu dr hab. inż. Andrzejowi Prystajowi, profesorowi PK, za bardzo istotną pomoc przy ukierunkowywaniu i sprawdzaniu postępu prac oraz dbałość o najmniejsze szczegóły. Wyrazy wdzięczności kieruję także do Pani Dyrektor Instytutu Inżynierii i Gospodarki Wodnej prof. dr hab. inż. Elżbiety Nachlik, dziękując za otwartość w dyskusjach naukowych, wyrozumiałość oraz umożliwienie mi przeprowadzenia badań. Swoją wdzięczność pragnę wyrazić Panom inż. Stanisławowi Kowalczykowi oraz mgr inż. Krzysztofowi Arciszewskiemu za wykonane prace przy budowie modelu, a także pomoc w trakcie prowadzenia badań, szczególnie podczas przygotowywania dokumentacji fotograficznej.

Wśród osób, które znacząco przyczyniły się do powstania niniejszej rozprawy, pragnę wymienić Pana dr inż. Piotra Jeża, którego życiowa postawa, serdeczność oraz zawodowa pasja obudziła we mnie chęć do pracy naukowej, a szczególnie zamiar podjęcia badań eksperymentalnych.

Spis treści

<i>Ważniejsze przyjęte oznaczenia</i>	4
1. Wprowadzenie	6
2. Sformułowanie problemu badawczego	8
3. Cel, tezy i zakres pracy	11
4. Hydraulika przelewu bocznego bez zamknięć. Podstawy teoretyczne	13
4.1. Ogólna klasyfikacja obiektów	13
4.2. Teoria de Marchi i ustalenia Pietrowa	18
4.3. Przegląd formuł na wydatek przelewów bocznych	31
4.4. Kinematyka odpływu przez przelew – dane literaturowe	50
5. Przelewy boczne w układzie szeregowym. Badania doświadczalne	57
5.1. Stanowisko pomiarowe	57
5.2. Przyjęty zakres badań na modelu hydraulicznym. Przypadki badawcze	61
5.3. Rezultaty eksperymentów	66
5.3.1. Przestrzenny układ zwierciadła wody w obszarze wpływu przelewów	66
5.3.2. Oddziaływanie przelewów na pole prędkości przepływu	74
5.3.3. Współczynnik wydatku przelewów bocznych tworzących układ	97
6. Symulacyjne obliczenia działania przelewów bocznych z wykorzystaniem modelu komputerowego	107
6.1. Równania modelu	107
6.2. Wyniki obliczeń	110
7. Podsumowanie i wnioski	117
<i>Literatura</i>	121
<i>Załącznik: Pełna dokumentacja rezultatów badań</i>	

Ważniejsze przyjęte oznaczenia

- A – pole powierzchni przekroju przepływu (przekroju strumienia cieczy)
- E – wysokość całkowitej energii mechanicznej strumienia, liczonej na jednostkę ciężaru cieczy
- L – długość korony przelewu
- Q – wydatek przelewu bocznego
- A_d, A_g – odpowiednio: pole powierzchni przekroju przepływu w korycie głównym bezpośrednio za i przed przelewem
- A_k – pole powierzchni przekroju przepływu na długości koryta głównego
- B_d, B_g – szerokość koryta głównego na poziomie zwierciadła cieczy odpowiednio: w przekroju, w którym kończy się lub zaczyna przelew (w dolnym lub górnym przekroju przelewu)
- B_k – szerokość koryta głównego na poziomie zwierciadła cieczy
- Q_d, Q_g – natężenie przepływu, odpowiednio: w dolnym lub górnym stanowisku przelewu bocznego
- Q_k – natężenie przepływu w korycie głównym
- Q_0 – natężenie dopływu do koryta hydraulicznego na modelu
- g – przyspieszenie ziemskie
- h – grubość warstwy wody na przelewie
- i – spadek dna koryta głównego
- n – współczynnik szorstkości do wzoru Manninga
- p – wzniesienie korony przelewu nad dno koryta
- q – jednostkowy wydatek przelewu bocznego (na 1 mb długości korony)
- t – czas
- x, y, z – współrzędne ortokartezjańskie
- b_k – szerokość dna koryta głównego
- h_d, h_g – napełnienie koryta głównego, odpowiednio: w przekroju poprzecznym, w którym kończy się lub zaczyna przelew boczny
- h_k – napełnienie na długości koryta głównego
- h_{kr} – głębokość krytyczna w przekroju koryta
- i_f – spadek hydrauliczny (spadek linii energii), liczony wg formuły Manninga
- i_{kr} – spadek krytyczny dna koryta

-
- q_k – jednostkowe natężenie przepływu w korycie głównym (na 1 mb szerokości dna)
- v_k – średnia prędkość przepływu w korycie głównym
- α – współczynnik Coriolisa
- β – współczynnik Boussinesqu'a
- δ – szerokość korony przelewu bocznego
- γ – ciężar objętościowy cieczy
- μ – współczynnik wydatku przelewu bocznego

Indeksy dolne:

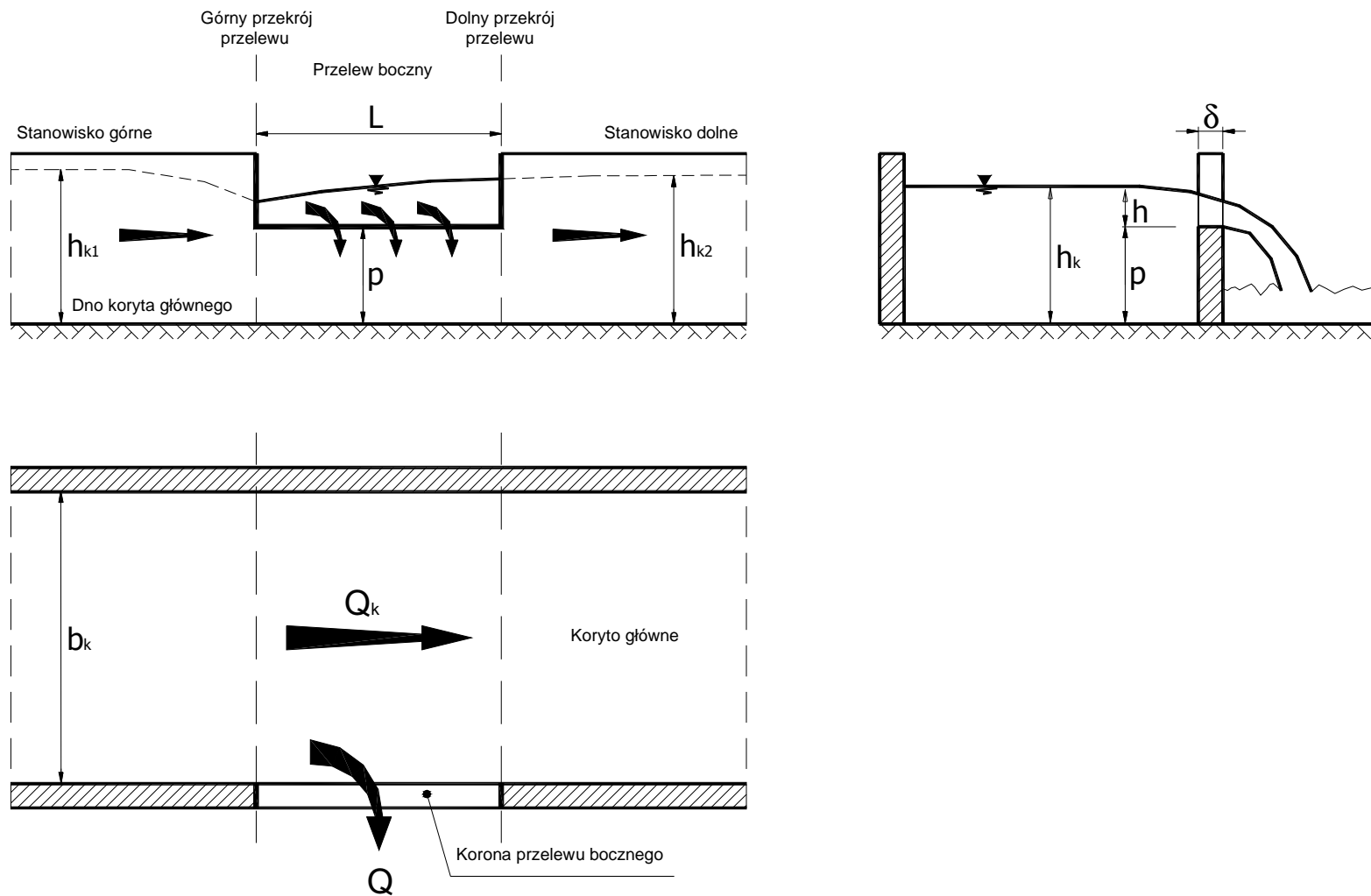
- 1 – bezpośrednio przed przelewem (w stanowisku górnym)
- 2 – bezpośrednio za przelewem (w stanowisku dolnym)

1

Wprowadzenie

Jeżeli w bocznej ścianie kanału (przewodu, koryta cieką) wykonane jest wycięcie, przez które przelewać się może ciecz, mamy do czynienia z przelewem bocznym. Przelew taki może być samoistnym obiektem inżynierskim służącym do określonych celów, może też stanowić element większej całości obiektów, składających się na konkretną budowlę wodną. Odnośnie do pierwszego przypadku można wymienić kilka niewątpliwych przykładów: przelewy burzowe w kolektorach kanalizacyjnych odprowadzające na zewnątrz nadmiar ścieków deszczowych, przelewy wlotowe do kanałów nawadniających umieszczane wzdłuż kanału głównego, obniżenia wałów przeciwpowodziowych chroniących dolinę rzeki, które to obniżenia pełniąc rolę przelewów umożliwiają zasilenie obszarów polderów, przelewy o takiej właśnie, jak wyżej, funkcji, ale budowane wzdłuż cieką w postaci odrębnych obiektów wyposażonych w urządzenia zamykające, itp.

Na niżej zamieszczonym rysunku 1.1 pokazano schematycznie fragment koryta wraz z przelewem bocznym, w widoku z góry oraz w przekroju podłużnym i poprzecznym. Zaznaczono podstawowe parametry geometryczne podając przyjęte ich symbole, objaśniono także przyjętą nomenklaturę charakterystycznych przekrojów i obszarów przepływu w korycie (górny i dolny przekrój przelewu, stanowisko górne i dolne). Koryto, w którym ciecz (woda) dopływa w sąsiedztwo przelewu, będzie w niniejszej pracy nazywane korytem głównym. Istotną kwestią jest określenie miejsca, w którym należy dokonywać pomiaru wielkości h określającej grubość warstwy wody na przelewie bocznym: czy ma ono leżeć poza zasięgiem krzywej depresji zwierciadła, czy zbiegać się z krawędzią przelewu. Problem ten powróci w następnym rozdziale i jego rozwiązanie będzie uznane za jeden z celów szczegółowych podjętych tu badań.



Rys. 1.1. Przelew boczny – podstawowe oznaczenia

2

Sformułowanie problemu badawczego

Jak już było wspomniane, przelewy boczne pełnią ważną funkcję w wielu zastosowaniach inżynierskich mających duże znaczenie dla mniejszych czy większych przedsięwzięć realizowanych w ramach ogólnie pojętej gospodarki wodnej.

Wydaje się, że – nie umniejszając znaczenia innych – szczególnie godny zainteresowania jest problem zasilania polderów rzecznych, które stanowią jeden z elementów technicznych systemów ochrony przeciwpowodziowej. Jak wiadomo, polder jest to naturalnie lub sztucznie ukształtowany, odpowiednio przygotowany teren zalewowy, leżący bezpośrednio poza łożyskiem rzeki, który pełni rolę szczególnego rodzaju zbiornika retencyjnego gromadząc nadmiar wody, jaki pojawia się w rzece w czasie trwania wezbrań. Z uwagi na wspomnianą retencyjną rolę polderu wyróżnia się poldery przepływowe i tzw. zamknięte. Pierwsze z wymienionych wyposażone są w oddzielne urządzenia wlotowe i wylotowe, które ze względu na swoją konstrukcję pozwalają kontrolować poziom napełnienia polderu poprzez regulację objętości wody przepływającej przez jego obszar. Poldery zamknięte, nie przepływowe, nie mają odrębnych obiektów, których wyłącznym celem działania byłoby opróżnianie polderu. Funkcję tę realizuje ten sam obiekt, który służy jednocześnie do napełniania obszaru polderu, np. przelew boczny odprowadzający wodę wypełniającą w czasie wezbrania dolinę rzeki. Jeżeli taki przelew jest przelewem bez zamknięć, zasilanie polderu zachodzi automatycznie z chwilą przekroczenia przez poziom wody w rzece określonej rzędnej. Polder jest niesterowalny, bez możliwości regulacji tak zasilania, jak i odpływu z jego obszaru.

Nawet z tak pobieżnego opisu zagadnienia wynika, że przelew boczny na rzece jest bardzo istotnym elementem systemu ochrony przed powodzią. Podobnie ważną rolę przelew boczny spełniać może także w innych realizacjach inżynierskich. Na tym tle

można stwierdzić, że przelew taki, jako obiekt sam w sobie stać się powinien istotnym podmiotem badań i to z wielu punktów widzenia. Ważne jest jego usytuowanie, geometria, wymiary, a u podstaw oceny prawidłowego jego działania, gwarantującego oczekiwane efekty, leżą problemy hydrauliczne związane ogólnie mówiąc z mechaniką przepływu cieczy przez obiekt.

Właśnie tej ostatniej tematyce poświęcona jest niniejsza praca. Autor dostrzega konieczność rozważenia kilku istotnych problemów z zakresu hydrauliki przelewów bocznych, które – jak wynika z przeglądu literatury dokonanej w podrozdziałach 4.3 i 4.4 – wymagają podjęcia badań. Ważnym zagadnieniem jest kwestia określania współczynnika wydatku przelewu, jego krzywej konsumcyjnej, a nade wszystko problemy kinematyki dopływu wody do obiektu. To pole badań jest rozpoznane słabo i fragmentarycznie, a przecież wydaje się, że istnieje tu bezpośredni związek obrazu ruchu cieczy, układu linii prądu, rozkładów prędkości na odbiór wody przez przelew i efektywne jego funkcjonowanie.

Niezwykle interesującą dla praktyki wydaje się sytuacja, gdy wzdłuż brzegu kanału czy rzeki umieszczonych jest kilka przelewów bocznych, leżących blisko siebie tak, że współpracują one ze sobą hydraulicznie tworząc szeregowy układ (system) obiektów. Można by oczekiwać, że przy takim właśnie układzie urządzeń technicznych zasilających np. poldery, sumaryczna jego przepustowość będzie zawsze proporcjonalna do liczby przelewów w systemie i będzie wielokrotnością wydatku pojedynczego przelewu bocznego. Ponieważ jednak nie ma takiej pewności, jako że wzajemne współdziałanie hydrauliczne przelewów w układach wcale nie musi wywołać takiej samej reakcji każdego z przelewów, problem ten autor uznał za godny zainteresowania. Jest takim również zagadnienie układu pola wektorowego prędkości w sąsiedztwie pracujących przelewów ułożonych szeregowo. Odwołując się znowu do przeglądu literatury przeprowadzonego w rozdziale czwartym trzeba stwierdzić, że działanie szeregowego układu przelewów bocznych rozważane było jedynie na drodze teoretycznej; badań eksperymentalnych nie dokonywano. Prace Singh'a i Satyanarayana (zob. str. 46) dotyczyły wprawdzie czterech równocześnie pracujących przelewów bocznych ułożonych jeden za drugim, lecz w tak znacznej - w stosunku do długości wycięcia przelewu - odległości od siebie, że trudno mówić o wzajemnym oddziaływaniu współpracujących elementów układu. Zresztą, przedmiot tamtych badań był inny niż zamysł niniejszej pracy, chodziło bowiem o taki dobór parametrów geometrycznych

poszczególnych przelewów w szeregu, aby ich wydatek był jednakowy. Swoim badaniom autor nadaje charakter badań podstawowych, poznawczych, mając nadzieję, że w określonym stopniu poszerzą one wiedzę o hydraulice tak specyficznych obiektów, jak przelew boczny.

Jednym z istotnych szczegółowych pytań, na które literatura nie daje jednoznacznej odpowiedzi, jest kwestia, o której już wspomniano w rozdziale pierwszym, a dotycząca położenia przekroju pomiarowego, w którym wyznacza się grubość warstwy wody na bocznym przelewie. Wbrew pozorom nie jest to bez znaczenia. Wielkość h określająca tę grubość jest bodaj najważniejszym parametrem obliczeniowym, bowiem jej wartość ma wpływ na wartości współczynnika wydatku i samego wydatku przelewu.

Przemyślenia te stały się podstawą sformułowania tezy niniejszej pracy i celów badań, które uzasadnieniu tej tezy służą.

3

Cel, tezy i zakres pracy

Jako zasadnicze cele rozprawy przyjęto:

- badanie kinematyki przepływu w korycie głównym (dopływowym) w obszarze przyległym do pojedynczego przelewu bocznego i do układu szeregowego takich przelewów; wyznaczenie pól prędkości, rozmiarów i dynamiki ich zniekształceń, deformacji swobodnego zwierciadła cieczy w obszarze,
- ustalenie parametrów hydraulicznych i geometrycznych mających zasadniczy wpływ na proces hydrodynamicznego współdziałania koryta z obiektem przelewowym,
- określenie kierunku zmian współczynników wydatku przelewów bocznych w różnych warunkach ich pracy, co za tym idzie zmian przebiegu krzywych konsumcyjnych przelewów, zwłaszcza pracujących w układzie szeregowym,
- określenie znaczenia miejsca pomiaru grubości warstwy wody na przelewie bocznym w odniesieniu do wydatku tego przelewu.

Stawia się tezę, że hydrauliczne efekty wzajemnego oddziaływania przelewów bocznych pracujących w układzie szeregowym, a także sprzężenie wpływu warunków ich pracy z warunkami przepływu w korycie i na odwrót, są znaczące i trzeba je brać pod uwagę proponując konkretne rozwiązania inżynierskie.

Podjęto decyzję, że badania będą miały charakter przede wszystkim eksperymentalny i zostaną przeprowadzone w korycie hydraulicznym na modelu fizycznym. Serie badawcze różnicowano w zależności od natężenia przepływu w korycie dopływowym, w którym usytuowane są przelewy boczne, od liczby przelewów w szeregu, wymiarów ich wycięcia i wysokości korony. W sumie badania objęły dwadzieścia cztery serie; pomiarów dokonywano korzystając z odpowiednio zestawionej i wykalibrowanej aparatury sprzężonej z rejestratorami cyfrowymi.

Używano nieinwazyjnej sondy dopplerowskiej ADV-LAB 2D, a także umieszczonych na specjalnej platformie pięciu czujników szybkozmiennego położenia zwierciadła wody w korycie, wykonanych na specjalne zamówienie. Dokonywano wizualizacji linii prądu w obszarze pracujących przelewów, co udokumentowano szeregiem zdjęć fotograficznych. Do analizy otrzymanych z pomiarów danych używano specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Szczegółowy opis stanowiska pomiarowego oraz samych serii badań podany jest w podrozdziałach 5.1 i 5.2.

Przeprowadzone eksperymenty na modelu traktowanym jako obiekt w skali naturalnej uzupełniono o obliczenia symulacyjne, wykonane z pomocą programu komputerowego Hec-Ras. Zamieszczone zostały uwagi na temat budowy tego programu, jego procedur, a przede wszystkim równań modelu, który jest podstawą obliczeń.

4

Hydraulika przelewu bocznego bez zamknięć. Podstawy teoretyczne

4.1. Ogólna klasyfikacja obiektów

Kilka wstępnych, lecz o zasadniczym charakterze uwag na temat przelewu określanego jako boczny, zawarto już w rozdziale 1. Podano tam definicję tego rodzaju obiektu, a także wskazano na niektóre funkcje, jakie przelewy boczne mogą pełnić stanowiąc element budowli hydrotechnicznej współpracującej z kanałem lub naturalnym ciekim wodnym. Rozwijając temat wypada omówić teraz możliwy podział przelewów, wynikający z jednej strony z konstrukcji samych obiektów z przelewem, z drugiej zaś z hydraulicznych warunków ich pracy.

Jak to ma miejsce w przypadku każdego przelewu, niekoniecznie bocznego, zasadniczymi kryteriami podziału są:

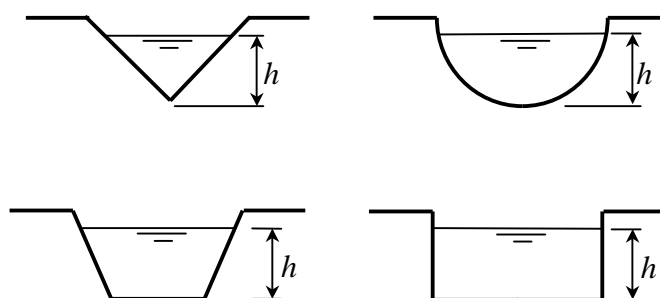
- 1) kształt wycięcia, przez które przelewa się ciecz na stronę stanowiska dolnego (zob. rys. 4.1),
- 2) wymiary przekroju poprzecznego ściany z przelewem,
- 3) położenie zwierciadła w stanowisku dolnym w stosunku do poziomu krawędzi przelewu.

Nie można pominąć faktu, że szczególnie istotne są uwarunkowania hydrodynamiczne, które decydują o charakterze i sposobie dopływu cieczy (wody) do przelewu. Mając to na uwadze podane wyżej trzy kryteria podziału uzupełniane są dwoma następnymi szczególnie znaczącymi zwłaszcza w przypadku przelewów bocznych. Te dodatkowe kryteria pozwalają uwzględnić:

- 4) usytuowanie przelewu na trasie cieku,

- 5) kształt przekroju poprzecznego koryta rzeki czy kanału na odcinku bezpośrednio przed miejscem odbioru wody przez przelew.

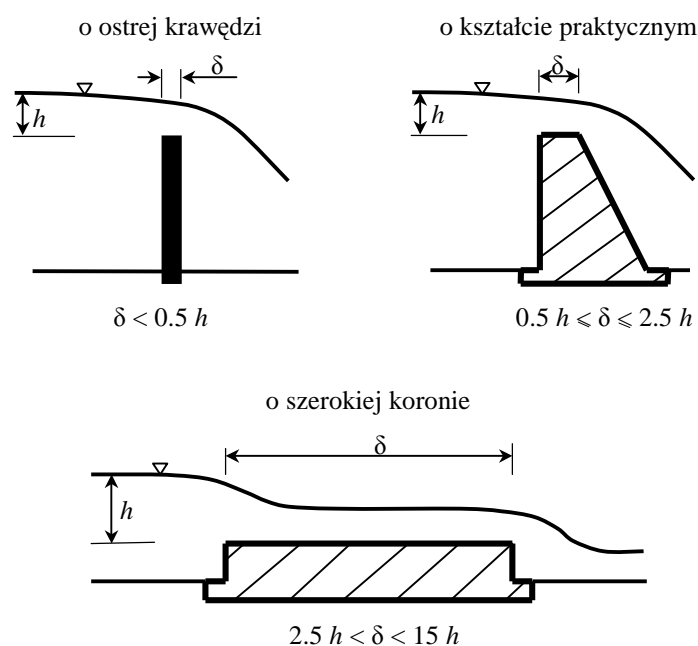
Podział według kryterium 1) wydaje się dość oczywisty. Stosownie do kształtu wycięcia tworzącego przelew można wyróżnić przelewy prostokątne, trapezowe, trójkątne, kołowe (rys. 4.1). Inne kształty wycięcia są w przypadku bocznych przelewów rzadko stosowane. Dla przykładu, przelewy boczne, których zadaniem jest odprowadzenie wody z rzeki na przyległy teren polderu, są z reguły przelewami prostokątnymi, rzadziej trapezowymi, o bardzo znacznej niekiedy długości korony. W przypadkach braku mechanicznych zamknięć wycięcia takich przelewów ich długość może osiągać w skrajnych przypadkach nawet i kilkaset metrów. Z kolei kształt wycięcia przelewów burzowych (zawsze bocznych), stosowanych w kanalizacji jest z reguły prostokątny, a długość korony nie przekracza kilku metrów.



Rys. 4.1. Wycięcia przelewów

Przyjmując za podstawę podziału kryterium oznaczone numerem 2) wyróżnia się generalnie przelewy o ostrej krawędzi (inaczej mówiąc cienkościennie), o kształcie praktycznym oraz o szerokiej koronie. Przy tym kryterium decydujący jest stosunek szerokości korony przelewu δ do grubości h warstwy wody przelewającej się przez przelew (rys. 4.2). Dla ścisłości zauważmy, że wielkość h jest niekiedy niepoprawnie nazywana „ciśnieniem na przelewie”, podczas gdy jest w rzeczywistości wysokością nadciśnienia na poziomie jego korony (w warunkach występowania swobodnego zwierciadła cieczy na przelewie). Jak z powyższego wynika, przy klasyfikacji przelewów według drugiego kryterium kształt przekroju poprzecznego ściany przelewu nie jest ważny. Wprawdzie szerokość korony δ jest konstrukcyjnie powiązana z kształtem całej budowli przelewowej

i z kształtu tego w określonym sensie wynika, niemniej o nazwie rodzaju przelewu decyduje iloraz δ/h i on jedynie ma tu znaczenie.

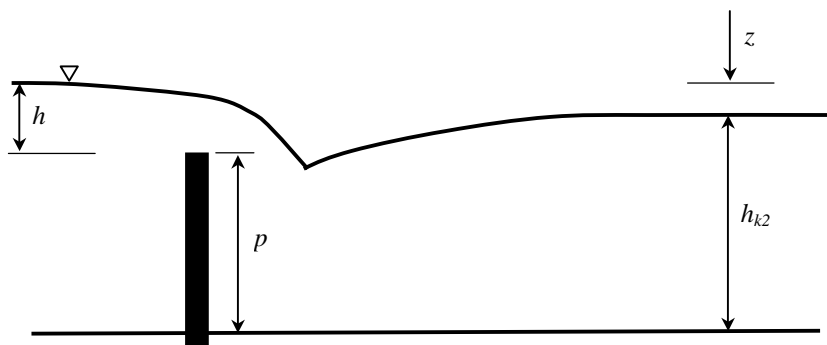


Rys. 4.2. Podział przelewów według drugiego kryterium

W konsekwencji, nawet w przypadku jednego i tego samego obiektu rodzaj przelewu ustalany zgodnie z kryterium drugim może się zmieniać (w sensie nazwy), jeśli tylko zmienia się implikowana warunkami przepływu w cieku wartość h i – co za tym idzie – gdy iloraz δ/h przechodzi do innego przedziału liczbowego charakteryzującego przelew.

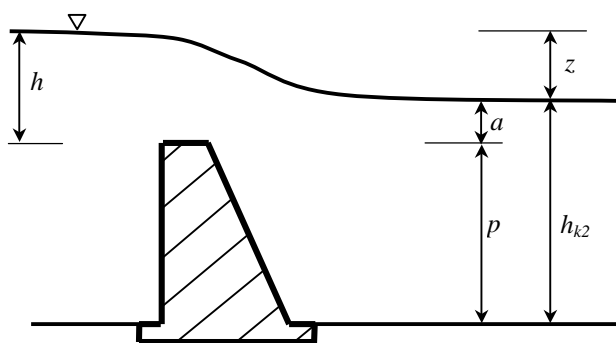
Położenie zwierciadła wody dolnej za przelewem w stosunku do poziomu jego krawędzi (kryterium 3)) rozstrzyga o tym, czy przelew należy traktować jako niezatopiony, czy też zatopiony. Można ogólnie powiedzieć, przy dalej podanym zastrzeżeniu (rys. 4.3) dotyczącym przelewów o szerokiej koronie, że jeżeli bezpośrednio za ścianą przelewu zwierciadło wody układa się poniżej krawędzi wycięcia, przelew jest przelewem niezatopionym. W podanej definicji istotne są słowa „bezpośrednio za”. Jest możliwe, że – dla przykładu – za przelewem wytworzy się odrzucony odskok hydrauliczny, gdy zwierciadło wody dolnej w reżimie nadkrytycznym ułoży się na odpowiednio niskim poziomie. Nawet, jeżeli rzędna zwierciadła za odskokiem wyższa będzie od rzędnej korony przelewu, sam przelew pozostanie niezatopiony, jeżeli tylko pierwsza głębokość sprzężona odskoku określi napełnienie w korycie o poziomie niższym, niż

krawędź wycięcia przelewowego. Z powyższego wynikają tzw. dodatkowe warunki zatopienia, które podano niżej na rysunku 4.3.



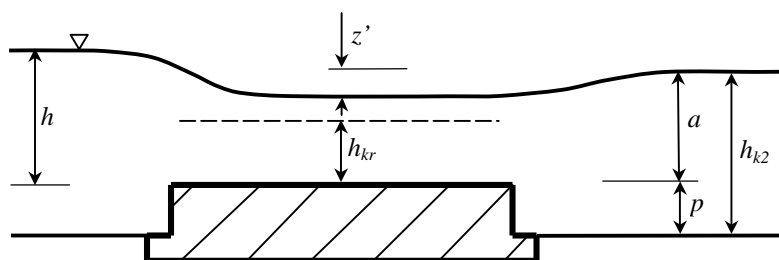
warunki zatopienia:

- 1) $h_{k2} > p$
- 2) $z/p < (z/p)_h$; $(z/p)_h = f(h/p)$



warunki zatopienia:

- 1) $h_{k2} > p$
- 2) $z/p < 0.7$
- 3) $a/h > 0.4$



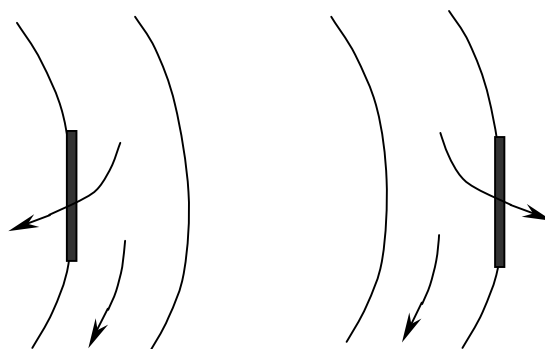
warunek zatopienia:

- 1) $a > h_{kr} + z'$; $z' = (v_{kr} v_{k2} - v_{k2}^2)/g$

Rys. 4.3. Warunki zatopienia przelewów

Jak wspomniano, kryterium 4) odnosi się szczególnie do przelewów bocznych. Można wyróżnić przelewy usytuowane na brzegu prostego odcinka kanału

dopływowego oraz przelewy umiejscowione na łukach tego kanału (cieku), wklęsłych lub wypukłych (rys. 4.4). W przypadku przelewów burzowych w kanalizacji ma miejsce ta pierwsza sytuacja; co do przelewów bocznych sytuowanych wzdłuż kanałów lub koryt rzecznych nie ma wyraźnej reguły, liczy się głównie logika postępowania przy realizacji konkretnego przedsięwzięcia inżynierskiego. Kryterium czwarte, a także następne, piąte, nie definiują żadnych nowych nazw klasyfikowanych przelewów, lecz jedynie opisują możliwe sytuacje usytuowania obiektu.

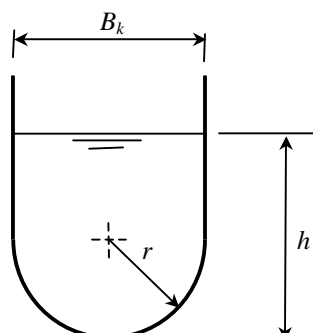


Rys. 4.4. Położenie bocznych przelewów zasilających polder

Podział przelewów bocznych według kryterium piątego przynosi informację o kształcie przekroju poprzecznego koryta cieku, z którego woda odbierana jest przez przelew, przy czym ma się na uwadze ten fragment cieku, nazywany przez nas dalej korytem głównym, który leży bezpośrednio przed miejscem usytuowania przelewu. Kryterium to uwzględnia warunki przepływu wody w korycie, zależne niewątpliwie także od kształtu jego przekroju, czyli, patrząc z innego punktu widzenia, warunki dopływu wody do przelewu. Stosując kryterium 5) można mówić o przelewach bocznych usytuowanych w brzegu koryt zwartych o przekroju prostokątnym, trapezowym, a także w przypadku kanałów sztucznych o przekroju kołowym lub trójkątnym, czy niekiedy U-kształtnym, który pokazano na rys. 4.5. Wyróżnić ponadto należy przelewy boczne w skarpach koryt wielodzielnych, co odnosi się szczególnie do sytuacji, jakie mają miejsce w naturalnych korytach większych rzek.

Autor ma świadomość, że czwarte i piąte kryteria podziału przelewów stawia problem w sposób w określonym sensie uproszczony. Hydrodynamiczne warunki przepływu w korycie zależą przecież od bardzo wielu czynników, związanych choćby ze

spadkiem cieku czy z szorstkością jego łożyska. Poprzestanie na uwzględnieniu samej tylko geometrii przekroju poprzecznego koryta głównego oddaje rzeczywistość fizyczną z pewnym, ogólnym przybliżeniem.



Rys. 4.5. Przekrój U-kształtnej korytki otwartej

4.2. Teoria de Marchi i ustalenia Pietrowa

Pierwsze eksperymentalne badania pracy przelewów bocznych miały miejsce w początkach dwudziestego wieku. Prowadzili je (wg Tchobanoglous, 1981) między innymi: Parmley (1905), niezależnie Babbitt i Engels (1917), Smith i Coleman (1923) oraz Tyler, Carollo i Steyskal (1923). Wyniki tych prac stały się podstawą określenia empirycznych zależności opisujących działanie przelewów bocznych.

Teoretyczne opracowanie na temat bocznych przelewów przedstawił po raz pierwszy Nimmo w 1928 roku. Rozważał on obszar przepływu obejmujący górne i dolne stanowisko przelewu bocznego (zob. rys. 1.1). Zakładając poziome dno korytki głównego o przekroju prostokątnym i pomijając działanie sił tarcia doszedł Nimmo do następującego równania określającego profil zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu bocznego:

$$\frac{dh_k}{dL} = \frac{A_k Q_k}{B_k Q_k^2 - Q_k A_k^3} \frac{dQ_k}{dL} \quad (1)$$

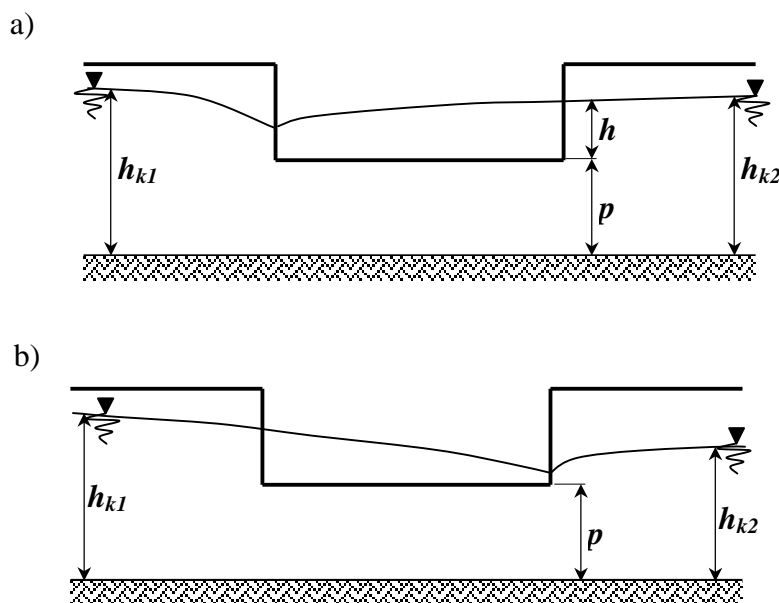
oraz wyprowadził równanie opisującego zmianę wydatku na długości przelewu:

$$\frac{dQ}{dL} = C \sqrt{2g} (h_k - p)^{3/2} \quad (2)$$

w którym C jest pewną stałą.

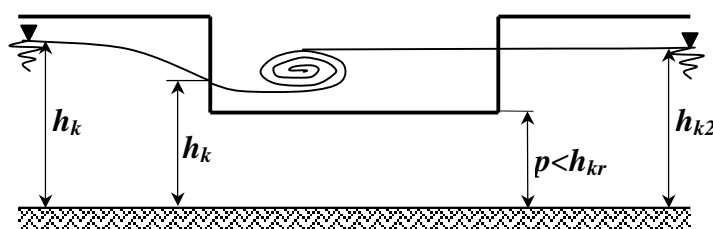
Autorem prac teoretycznych, uznanych do dziś za podstawowe w kwestii hydraulicznego opisu pracy przelewu bocznego, jest de Marchi.

W 1934 roku opublikował on rezultaty analiz, które doprowadziły go do równania (1) opracowanego wcześniej przez Nimmo. Analizy te posłużyły jednocześnie do wyjaśnienia pewnych faktów dowiedzionych uprzednio eksperymentem. Badania eksperymentalne wykazały, a de Marchi udowodnił to teoretycznie, że w zależności od charakteru ruchu w korycie głównym zwierciadło wody na długości korony przelewu kształtuje się w różny sposób. Jeśli w korycie głównym ma miejsce ruch spokojny, wówczas na długości korony przelewu zwierciadło wody początkowo opada, a następnie wznosi się stopniowo (rys. 4.6 a). Przy ruchu rwącym w korycie zwierciadło wody na przelewie układa się konsekwentnie według krzywej depresji (rys. 4.6 b), a następnie poziom jego zdecydowanie wzrasta.



Rys. 4.6. Kształt zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu bocznego: a) przy ruchu spokojnym w korycie głównym, b) przy ruchu rwącym w korycie.

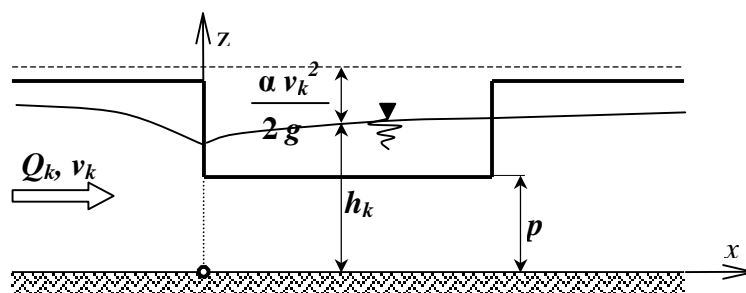
W sytuacji ruchu rwącego w korycie głównym, przelew nie oddziałuje na warunki przepływu w górnym jego stanowisku. W przypadku pokazanym na rys. 4.6 oddziaływanie takie istnieje, czego skutkiem jest lokalne obniżenie zwierciadła wody na samym początku wycięcia przelewu bocznego. Można rozważyć przypadek, gdy wysokość p ściany przelewu bocznego jest mniejsza od głębokości krytycznej obliczonej dla koryta głównego przy określonym natężeniu przepływu Q_k . W takiej sytuacji zwierciadło wody w korycie w górnym przekroju przelewu (zob. rys. 1.1) osiąga tę właśnie głębokość krytyczną. Jeśli założyć, że w korycie głównym ruch jest nadkrytyczny, wówczas musi mieć miejsce sprzężenie poziomów pomiędzy zwierciadłem na przelewie a zwierciadłem w korycie, w wyniku którego powstaje odskok hydrauliczny (rys.4.7).



Rys. 4.7. Kształt zwierciadła na przelewie bocznym przy $p < h_{kr}$

W dowolnym przekroju prostokątnego, pryzmatycznego koryta głównego na długości przelewu całkowita wysokość mechanicznej energii strumienia cieczy jest równa (rys.4.8):

$$E = h_k + \frac{\alpha v_k^2}{2g} = h + \frac{\alpha (Q_k)^2}{2g A_k^2} \quad (3)$$



Rys. 4.8. Oznaczenia do równań (3) – (9)

De Marchi założył, że wzdłuż przelewu wysokość energii E się nie zmienia, zatem:

$$\frac{dE}{dx} = 0 \quad (4)$$

a więc

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dh_k}{dx} + \frac{\alpha}{2g} \frac{d}{dx} \left(\frac{(Q_k)^2}{A_k^2} \right) = \frac{dh_k}{dx} + \frac{\alpha}{2g} 2 \left(\frac{Q_k}{A_k} \right) \frac{d}{dx} \left(\frac{Q_k}{A_k} \right) = 0 \quad (5)$$

Ponieważ wartości poszczególnych parametrów h_k , Q_k , A_k zmieniają się wzdłuż przelewu, wobec tego:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dh_k}{dx} + \frac{\alpha}{g} \left(\frac{Q_k}{A_k} \right) \frac{A_k \frac{dQ_k}{dx} - Q_k \frac{dA_k}{dx}}{A_k^2} = 0 \quad (6)$$

lub inaczej

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dh_k}{dx} + \frac{\alpha}{g} \frac{Q_k}{A_k^2} \frac{dQ_k}{dx} - \frac{\alpha}{g} \frac{Q_k^2}{A_k^3} \frac{dA_k}{dx} = 0 \quad (7)$$

Mnożąc wszystkie wyrazy równania (7) przez gA_k^3 i uwzględniając, że $dA_k = b_k dh_k = B_k dh_k$, otrzymamy:

$$gA_k^3 \frac{dh_k}{dx} + \alpha A_k Q_k \frac{dQ_k}{dx} - \alpha Q_k^2 \frac{B_k}{A_k^3} \frac{dh_k}{dx} = 0 \quad (8)$$

skąd

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{\alpha A_k Q_k}{\alpha B_k Q_k^2 - g A_k^3} \frac{dQ_k}{dx} \quad (9)$$

Można zauważyć, że iloczyn $\alpha A_k Q_k$ jest zawsze dodatni, zaś iloraz dQ_k/dx zawsze ujemny (ilość wody w korycie maleje w miarę przesuwania się wzdłuż korony przelewu). Wynika stąd, że znak lewej strony równania (9) zależy wyłącznie od znaku mianownika prawej jego strony. Jeżeli:

$$\alpha B_k Q_k^2 - g A_k^3 < 0 \quad (10)$$

wówczas

$$\frac{dh_k}{dx} > 0 \quad (11)$$

zaś, gdy

$$\alpha B_k Q_k^2 - g A_k^3 > 0 \quad (12)$$

wtedy

$$\frac{dh_k}{dx} < 0 \quad (13)$$

Rozważmy przypadek ruchu spokojnego w korycie doprowadzającym wodę do przelewu bocznego. Wówczas:

$$\frac{A_k^3}{B_k} > \frac{\alpha Q_k^2}{g} \quad (14)$$

czyli

$$\alpha B_k Q_k^2 - g A_k^3 < 0 \quad (15)$$

a więc

$$\frac{dh_k}{dx} > 0 \quad (16)$$

Jeżeli w korycie panuje ruch rwący, wówczas:

$$\frac{A_k^3}{B_k} < \frac{\alpha Q_k^2}{g} \quad (17)$$

czyli

$$\alpha B_k Q_k^2 - g A_k^3 > 0 \quad (18)$$

a zatem

$$\frac{dh_k}{dx} < 0 \quad (19)$$

Przytoczona analiza stanowi podane przez de Marchi'ego uzasadnienie kształtu profilu zwierciadła cieczy wzdłuż korony przelewu bocznego.

Do wywodów de Marchi odniósł się Pietrow w swojej publikacji „Ruch cieczy ze zmianą wydatku po drodze” (1951). Wykazuje on, że założenie stałości energii mechanicznej strumienia wzdłuż korony przelewu bocznego kryje w sobie nieścisłość, która prowadzi w konsekwencji do znaczących błędów w opisie procesu odpływu przez przelew.

Rozumowanie Pietrowa przebiega następująco. Równanie ruchu cieczy o zmiennej masie (dotyczy to między innymi sytuacji rozdziału przepływu w korycie głównym na odpływ korytem i odpływ przelewem bocznym) ma postać:

$$\frac{d(M u)}{dt} = F + \frac{dM_1}{dt} \theta_1 - \frac{dM_2}{dt} \theta_2 \quad (20)$$

przy czym:

F - rzut wypadkowej działających sił zewnętrznych na oś x zgodną z głównym kierunkiem przepływu,

M - masa przepływającej cieczy równa sumie masy głównej M_0 w przekroju poprzedzającym miejsce jej zmian, masy dodatkowego dopływu (M_1), masy ubytku przepływu (M_2),

u - prędkość poruszania się masy M cieczy,

θ - rzut wektora prędkości przepływu na oś x ; θ_1 dla masy M_1 , θ_2 dla masy M_2 .

Rozważając elementy masy głównej strumienia cieczy, masy dopływającej i masy ubytku, wzięto pod uwagę działanie sił ciężkości, parcia na ściany czołowe elementów kontrolnych oraz tarcia. Ostatecznie wypadkową jednostkową siłę F (liczoną na jednostkę masy cieczy) określi równanie:

$$F = g \left[-\frac{d}{dx} \left(\frac{p_k}{\gamma} + z \right) - i_f \right] \quad (21)$$

w którym p_k oznacza ciśnienie wywierane przez ciecz na dno przewodu doprowadzającego (np. koryta ciekłu), p_k/γ jest wysokością tego ciśnienia, natomiast z jej uzupełnieniem do przyjętego poziomu porównawczego. Po podstawieniu do równania (20) następujących zależności:

$$M = \frac{\gamma}{g} u dA_k = \frac{\gamma}{g} dQ_k; \quad M_1 = \frac{\gamma}{g} u_1 dA_{k1} = \frac{\gamma}{g} dQ_{k1}; \quad M_2 = \frac{\gamma}{g} u_2 dA_{k2} = \frac{\gamma}{g} dQ_{k2}$$

oraz równości (21), otrzymuje się:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\gamma}{g} u^2 dA_k \right) = \frac{\gamma}{g} dQ_k \left[-g \frac{d}{dx} \left(\frac{p_k}{\gamma} + z \right) - g i_f \right] + \theta_1 \frac{d}{dt} \left(\frac{\gamma}{g} u_1 dA_{k1} \right) - \theta_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\gamma}{g} u_2 dA_{k2} \right) \quad (22)$$

Założmy, że pojawienie się mas M_1 i M_2 nie jest równoczesne. Wprowadzając średnią wartość prędkości przepływu v_k i przechodząc od pojedynczej strugi elementarnej do przekroju strumienia o skończonych wymiarach, Pietrow uzyskuje następującą postać równania ruchu cieczy o zmiennej masie:

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g}\right) + \frac{dp_k}{\gamma} + dz + i_f dx + \frac{\alpha(v_k - \theta)v}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (23)$$

czyli inaczej (przy $\frac{dp_k}{\gamma} = dh_k$ oraz $dz = -i dx$):

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g}\right) + dh_k - i dx + i_f dx + \frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (24)$$

Rozważmy teraz dwa przypadki ruchu cieczy w korycie głównym bezpośrednio przed przelewem bocznym.

□ *Ruch spokojny* ($i < i_{kr}$)

Jeżeli przyjąć za Pietrowem, że w równaniu (24) $i = i_f$ (warunek ruchu jednostajnego), wówczas:

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g}\right) + dh_k + \frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (25)$$

lub

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g} + h_k\right) = -\frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} \quad (26)$$

Założmy, tak jak to uczynił de Marchi, że wysokość energii mechanicznej strumienia cieczy na długości korony przelewu nie ulega zmianie:

$$E = \frac{\alpha v_k^2}{2g} + h_k = \text{const.} \quad (27)$$

Łącząc równania (26) i (27) otrzymujemy:

$$\frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (28)$$

Równość ta może być prawdziwa wówczas, gdy:

- $dQ_k = 0$, co oznacza $Q_k = \text{const}$. Jest to sprzeczne z tym oczywistym faktem, że w korycie głównym na długości wycięcia przelewu bocznego następuje zmiana wartości natężenia przepływu;
- $v_k = 0$, czyli gdy nie ma ruchu cieczy w korycie, co przecież nie ma miejsca.

Z powyższego wynika wniosek, że równanie (28), a zatem założenie de Marchi nie opisują rzeczywistej sytuacji fizycznej.

□ Ruch rwący ($i > i_{kr}$)

W tym przypadku równanie (24) można zapisać w postaci:

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g}\right) + dh_k - i dx + \frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (29)$$

czyli przy przyjęciu założenia de Marchi o stałości wysokości energii strumienia cieczy

$$i = \frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{gQ_k} \frac{dQ_k}{dx} \quad (30)$$

Po lewej stronie równania (30) występuje dodatni spadek dna koryta głównego. Ponieważ człon dQ_k/dx ma znak ujemny, gdyż następuje redukcja wartości natężenia przepływu w korycie na długości przelewu bocznego, zatem aby zachować zgodność znaków stron równania prędkość θ ubytku masy M_2 – spowodowanego np. odpływem przez przelew boczny – musi być większa od prędkości v_k w korycie głównym. Jest to naturalnie fizycznie niemożliwe, zatem znów założenie de Marchi budzi określone zastrzeżenia.

Według Pietrowa można uniknąć wszelkich wątpliwości próbując wyjaśnić specyficzny kształt zwierciadła cieczy wzdłuż korony przelewu bocznego nieco inną

drogą niż to uczynił de Marchi. Wychodząc mianowicie z równania (23) oraz wprowadzając związki:

$$d\left(\frac{\alpha v_k^2}{2g}\right) = \frac{\alpha}{2g} dv_k^2 = \frac{\alpha}{2g} 2v_k dv_k = \frac{\alpha}{g} v_k dv_k = \frac{\alpha v_k}{g Q_k} Q_k dv_k$$

$$\frac{\alpha(v_k - \theta)v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = \frac{\alpha v_k^2}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} - \frac{\alpha \theta}{g} \frac{dQ_k}{Q_k}$$

otrzymuje się:

$$\frac{\alpha v_k}{g Q_k} d(v_k Q_k) + \frac{dp_k}{\gamma} + dz + i_f dx - \frac{\alpha \theta v_k}{g} \frac{dQ_k}{Q_k} = 0 \quad (31)$$

Wprowadzając:

$$v_k = \frac{Q_k}{A_k}; \quad \frac{dp_k}{\gamma} = dh_k; \quad dz = -i dx$$

oraz przyjmując, że prędkość θ nie osiąga znacznych wartości, co wiąże się ze specyficznymi warunkami odpływu przez przelew boczny, w szczególności z niewielkim napełnieniem na przelewie - równanie (31) ma ostatecznie postać:

$$\frac{\alpha}{g A_k} d\left(\frac{Q_k^2}{A_k}\right) + dh_k - i dx + i_f dx = 0 \quad (32)$$

Rozważając sytuację gdy koryto główne ma poprzeczny przekrój prostokątny ($A_k = b_k h_k$) Pietrow prowadzi dalszą analizę w sposób niżej podany.

□ *Ruch spokojny ($i < i_{kr}$), ustalony jednostajny ($i = i_f$)*

Równanie (32) można zapisać jako:

$$\frac{\alpha}{g A_k} d \left(\frac{Q_k^2}{A_k} \right) + dh_k = 0 \quad (33)$$

czyli

$$\frac{2\alpha Q_k}{g A_k^2} dQ_k - \frac{\alpha Q_k^2 b_k}{g A_k^3} dh_k + dh_k = 0 \quad (34)$$

Po wyznaczeniu z tego równania wielkości dh_k oraz po obustronnym podzieleniu przez dx otrzymuje się:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{-\frac{2\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{dQ_k}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q_k^2 b_k}{g A_k^3}} \quad (35)$$

Z uwagi na to, że natężenie przepływu w korycie głównym maleje wzdłuż pracującego przelewu bocznego, zatem pochodna $\frac{dQ_k}{dx}$ ma znak ujemny, a licznik prawej strony równania będzie miał znak dodatni. Zauważmy z kolei, że drugi składnik mianownika prawej strony tego równania jest wyrażeniem określającym liczbę Froude'a. Ponieważ rozpatrujemy przypadek ruchu spokojnego, wyrażenie to jest mniejsze od jedności, zatem cały mianownik ma znak dodatni. Ostatecznie można zapisać:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{(+)}{(+)} > 0 \quad (36)$$

Jak widać, przy ruchu spokojnym w korycie głównym mamy do czynienia ze wzrostem głębokości w tym korycie na odcinku przyległym do przelewu. Zwierciadło cieczy na tym odcinku przyjmie formę krzywej spiętrzenia. Aby określić kierunek wypukłości tej krzywej określić znak drugiej pochodnej zmiennej h_k . Zgodnie z równaniem (35) po odpowiednich przekształceniach uzyskuje się:

$$\frac{d^2 h_k}{dx^2} = \frac{(-)}{(+)} < 0 \quad (37)$$

co oznacza, że wypukłość krzywej spiętrzenia skierowana będzie do góry.

□ *Ruch rwący ($i > i_{kr}$), pominięcie strat hydraulicznych w korycie (założenie dodatkowe)*

Równanie (32) przyjmie postać:

$$\frac{\alpha}{g A_k} d \left(\frac{Q_k^2}{A_k} \right) + dh_k - i dx = 0 \quad (38)$$

lub

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - \frac{2\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{dQ_k}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q_k^2 b_k}{g A_k^3}} \quad (39)$$

W tym przypadku:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{(+)}{(-)} < 0 \quad (40)$$

Badając, jak poprzednio, wypukłość krzywej zwierciadła cieczy w korycie zauważmy,

że znak drugiej pochodnej $\frac{d^2 h_k}{dx^2}$ zależy od relacji między następującymi wyrażeniami:

$$W_I = \frac{6\alpha Q_k}{g A_k^3} \frac{dQ_k}{dx} \frac{dh_k}{dx} - \frac{2\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{d^2 Q_k}{dx^2} \quad (41)$$

oraz

$$W_{II} = \frac{2\alpha}{g A_k^2} \left(\frac{dQ_k}{dx} \right)^2 + \frac{3\alpha Q_k^2 b_k}{g A_k^3} \left(\frac{dh_k}{dx} \right)^2 \quad (42)$$

Jeśli $W_I > W_{II}$ wówczas:

$$\frac{d^2 h_k}{dx^2} = \frac{(+)}{(-)} < 0 \quad (43)$$

natomiast gdy $W_I < W_{II}$ to:

$$\frac{d^2 h_k}{dx^2} = \frac{(-)}{(-)} > 0 \quad (44)$$

Można zatem stwierdzić, że w przypadku ruchu rwącego w korycie głównym zwierciadło cieczy na długości przelewu bocznego układać się będzie zgodnie z krzywa depresji; w sytuacji określonej nierównością (43) z wypukłością skierowaną ku górze oraz z wypukłością w dół w sytuacji, dla której adekwatna jest nierówność (44).

Wydaje się, że przytoczone ustalenia Pietrowa wymagają pewnego komentarza. Wróćmy do równania (28). Jest możliwe, że średnia prędkość przepływu w korycie głównym v_k będzie co do wartości równa prędkości odpływu θ przez przelew boczny; potwierdzają to rezultaty badań El-Khashaba i Smitha, o których mowa będzie w następnym rozdziale. Jeżeli tak, to równanie (28) byłoby prawdziwe dla realnej sytuacji fizycznej, wbrew kategorycznemu zdaniu Pietrowa, a to z kolei oznacza, że założenie de Marchi o stałości wysokości linii energii na długości przelewu bocznego byłoby słuszne. Opisana sytuacja mogłaby mieć miejsce dla określonych przypadków pracy przelewów (niewielka długość korony, niski jej poziom w stosunku do dna koryta głównego). Z kolei założenie o stosunkowo niewielkiej prędkości θ odpływu przez przelew boczny, co pozwalało uprościć równanie (31), można przyjąć za słuszne wobec wąskiej tylko grupy przypadków eksploatacji przelewów bocznych (tu odwrotnie: znaczna długość korony przelewu, wysokie jej położenie, niewielkie napełnienie na przelewie).

Ostatecznie można stwierdzić, że pomijając pewne, określone sytuacje, w jakich pracuje przelew boczny, rozumowanie zarówno de Marchi jak i Pietrowa prowadzi *de facto* do tej samej konkluzji, natomiast w przypadkach szczególnych, o których mowa bezpośrednio wyżej, założenie o stałości wysokości energii na przelewie bocznym może budzić niejakie wątpliwości teoretyczne.

4.3. Przegląd formuł na wydatek przelewów bocznych

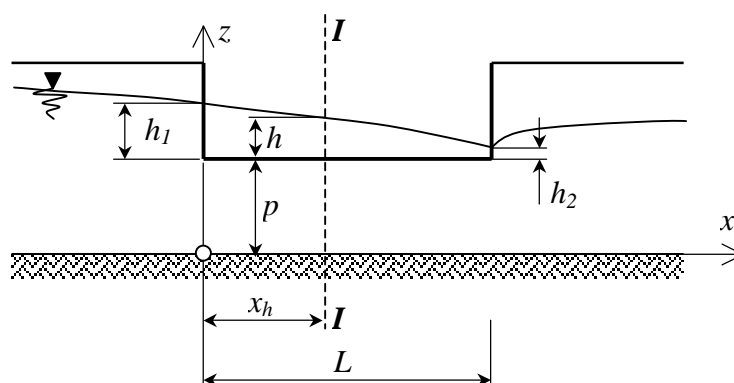
Literatura przedmiotu przynosi bogatą informację co do formuł określających wydatek przelewu bocznego, zakresu stosowania tych formuł, sposobu obliczania współczynnika wydatku przelewu, a także określania profilu zwierciadła na długości jego korony. Niżej przedstawiono rezultaty przede wszystkim doświadczalnych badań dotyczących wymienionych zagadnień i przeprowadzonych przez różnych autorów, przy czym cytowane są te prace, które dotyczą przelewów o ostrej krawędzi i wycięciu prostokątnym, usytuowanych w korycie o przekroju prostokątnym.

P. Ackers (1957)

Doświadczenia na modelu fizycznym wykonywano w przyrządowym, prostokątnym korycie o szerokości 0,12 m w warunkach ruchu rwącego, przyjmując różne długości korony bocznego przelewu w zakresie 7,63 ÷ 45,75 cm. Równanie określające wydatek przelewu, przyjęte przez Ackersa, miało postać:

$$Q = C L h^{\frac{3}{2}} \quad (45)$$

gdzie C jest pewną stałą. Celem badań Ackersa było określenie sposobu wyznaczenia położenia przekroju $I - I$ w obrębie przelewu bocznego (rys. 4.9), w którym należy mierzyć wartość h używaną w podanym wyżej wzorze.



Rys. 4.9. Położenie przekroju obliczeniowego $I - I$

Wysokość energii właściwej strumienia w dowolnym przekroju koryta głównego można zapisać jako

$$E = \frac{v_k^2}{2g} + h_k \quad (46)$$

a po wprowadzeniu współczynników Coriolisa i Boussinesqu'a

$$E = \frac{\alpha v_k^2}{2g} + \beta h_k \quad (47)$$

Przypomnijmy, że współczynnik Coriolisa α uwzględnia nierównomierność rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym strumienia, natomiast współczynnik Boussinesqu'a β pozwala uwzględnić taką nierównomierność w stosunku do wartości pędu. Wysokość energii E liczona jest od poziomu dna koryta w konkretnym jego przekroju. Napiszmy teraz, czemu się równa wysokość energii mierzona od poziomu korony przelewu bocznego. Otrzymamy:

$$E_w = \frac{\alpha v_k^2}{2g} + \beta h \quad (48)$$

Natężenie przepływu w korycie głównym oraz wydatek przelewu bocznego są wielkościami, które wzajemnie od siebie zależą. Można pokazać, że:

$$\frac{dQ_k}{dx} = \frac{dB_k}{dx} (h + p)v_k + B_k \left[(h + p) \frac{dv_k}{dx} + v_k \frac{dh}{dx} \right] \quad (49)$$

gdzie $x \in \langle 0, L \rangle$ (zob. rys. 4.9). Zgodnie z założeniem de Marchi $E_w = \text{const}$, zatem:

$$\frac{dv_k}{dx} = - \frac{g}{v_k} \frac{\beta}{\alpha} \frac{dh}{dx} \quad (50)$$

a więc równanie (49) z uwzględnieniem zależności (50) przyjmuje postać:

$$C h^{\frac{3}{2}} = -\frac{dB_k}{dx} (h+p)v_k + B_k \left[(h+p) \frac{g}{v_k} \frac{\beta}{\alpha} - v_k \right] \frac{dh}{dx} \quad (51)$$

Jeśli na długości korony przelewu bocznego szerokość koryta głównego B_k zachowuje stałą wartość, wówczas po przekształceniu równania (51) mamy:

$$\frac{dx}{dh} = \frac{dB_k}{\alpha v_k} \frac{1}{C h^{\frac{3}{2}}} \left[\beta(h+p) - \frac{\alpha v_k^2}{g} \right] \quad (52)$$

Wprowadzając do tej zależności równanie (48) i wykonując odpowiednie działania otrzymuje się:

$$x = x_h = \frac{B_k}{C} \sqrt{\frac{2g}{\alpha}} \left\{ \left(2 - \frac{\beta p}{E_w} \right) \left(\sqrt{\frac{E_w}{h_2} - \beta} - \sqrt{\frac{E_w}{h_1} - \beta} \right) - 3\sqrt{\beta} \left[\frac{1}{\cos \sqrt{\frac{\beta h_2}{E_w}}} - \frac{1}{\cos \sqrt{\frac{\beta h_1}{E_w}}} \right] \right\} \quad (53)$$

Symbole h_1 i h_2 oznaczają napelnienia na krańcach korony przelewu bocznego, odpowiednio h_1 na jej początku, h_2 – na końcu (zob. rys. 4.9).

Równanie (53) pozwala wyznaczyć odległość x_h od początku wycięcia przelewu do przekroju obliczeniowego, w którym określać się powinno grubość h warstwy wody na przelewie. Aby móc tego dokonać, koniecznym jest ustalenie wartości następujących parametrów: C , α , β , h_1 , h_2 oraz E_w . W swoich badaniach Ackers przyjmował $C = 3,33$, $\alpha = 1,4$, $\beta = 0,8$ oraz na podstawie badań Colemana i Smith'a (1923) $h_1 = 0,5 E_w$ lub dla bardzo krótkich przelewów $h_1 = 0,57 E_w$. Wartość wysokości energii E_w można określić następująco:

$$E_w = 1,2 \frac{v_{k1}^2}{2g} + (h_{k1} - p) \quad (54)$$

gdzie:

h_{k1} – głębokość normalna w korycie głównym w obrębie stanowiska górnego przelewu,
 v_{k1} – średnia prędkość przepływu w stanowisku górnym.

Wartości h_{kl} były przyjmowane przez Ackersa na podstawie pomiarów na modelu fizycznym.

Korzystając z równania (53) Ackers dochodzi ostatecznie do zależności podanych w poniższej tabeli.

Tabela. 4.1. Prace Ackersa: zestawienie formuł empirycznych

$n_h = \frac{h_1}{h_2}$	x_h
5	$2,03 B_k (2,81 - 1,55 p/E_w)$
7	$2,03 B_k (3,90 - 2,03 p/E_w)$
10	$2,03 B_k (5,28 - 2,63 p/E_w)$
15	$2,03 B_k (7,23 - 3,45 p/E_w)$
20	$2,03 B_k (8,87 - 4,13 p/E_w)$

Podane wyżej związki $x_h = f(B_k, p, E_w)$ obowiązują dla $p < 0,5 E_w$. Po wyznaczeniu odległości x_h , czyli po określeniu położenia przekroju obliczeniowego, można w tym przekroju wyznaczyć drogą pomiaru napełnienie h i korzystając z równia (45) obliczyć wydatek przez przelew.

W. Frazer (1957)

Badania modelowe uwzględniały trzy przypadki. W pierwszym (przypadek I) w korycie głównym miał miejsce przepływ rwący, a wzdłuż przelewu bocznego zwierciadło układało się w formie krzywej depresji. Drugi przypadek (przypadek II) dotyczył ruchu spokojnego z krzywą spiętrzenia na długości przelewu. Przypadek trzeci (III) odnosił się do sytuacji, w której w obrębie przelewu następowała w korycie głównym zmiana charakteru ruchu z rwącego w spokojny, czemu towarzyszyło powstanie odskoku hydraulicznego.

Po dokonaniu wstępnych pomiarów badania prowadzono ostatecznie w korycie o szerokości 0,30 m i długości 6,10 m. Korona przelewu bocznego miała długość kolejno równą: 3,81 cm, 7,62 cm i dalej co 3,81 cm do 1,52 m. Napełnienia koryta głównego w stanowisku górnym przelewu (h_g) oraz w stanowisku dolnym (h_d)

wyznaczane były jako wartość średnią z pomiarów w trzech pionach w danym przekroju poprzecznym.

Przypadek I

Pomierzone wartości h_g i h_d , B_k (szerokość koryta głównego) oraz p (wysokość ściany przelewu), odniesiono do wartości głębokości krytycznej h_{kr} w korycie, obliczonej dla określonego natężenia przepływu Q_k . Otrzymano następujące proporcje: $h_g = (0,848 \div 0,966)h_{kr}$, $B_k = (0,7 \div 4,22) h_{kr}$, $p = (0,154 \div 0,39) h_{kr}$.

W wyniku badań na modelu uzyskano następującą zależność między natężeniem przepływu (wg. Frazera Q_5) w przekroju poprzecznym koryta głównego w obszarze wyznaczonym długością korony przelewu, a natężeniem przepływu w stanowisku górnym (Q_g):

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_g} = \frac{h_5}{h_{kr}} \sqrt{2,5 - 1,5 \frac{h_5}{h_{kr}}} \quad (55)$$

gdzie h_5 oznacza napełnienie koryta głównego w przekroju odpowiadającym przepływowi Q_5 . Związek pomiędzy wartością q_5 a długością korony przelewu L proponuje Frazer określić zgodnie ze wzorem:

$$\frac{1 - q_5}{1 - \frac{p}{h_{kr}} \sqrt{2,5 - 1,5 \frac{p}{h_{kr}}}} = (1 - 10)^{\frac{-L}{8B}} \quad (56)$$

Przypadek II

Zależność (55) przyjmuje postać:

$$q_5 = \frac{h_5}{h_{kr}} \sqrt{0,99 \left(2 \frac{h_g}{h_{kr}} + \frac{1}{\left(\frac{h_g}{h_{kr}} \right)^2} \right) - 2 \frac{h_g}{h_{kr}}} \quad (57)$$

Zauważono, że zmiana średniej głębokości w korycie głównym przebiega w tym przypadku badawczym znacznie łagodniej niż dla ruchu rwącego. Napętnienie h_d wynosić będzie maksymalnie $1,5h_g$, przy czym h_g w korycie głównym będzie równe głębokości krytycznej. W porównaniu z poprzednio omówionym przypadkiem prędkości przepływu oraz napętnienia na samym przelewie okazały się być niższe, z kolei kąt napływu strug wody na przelew boczny jest większy i względnie stały na długości L , można także uznać, że profil krzywej spiętrzenia zwierciadła wzdłuż korony przelewu nie jest zbyt stromy. Powyższe powody uzasadniają fakt, że zmienność natężenia przepływu w korycie głównym na długości przelewu bocznego można wyrazić za pomocą zależności:

$$1 - q_d = C_{II} \left(\frac{2 \frac{h_d}{h_{kr}} + \frac{h_g}{h_{kr}}}{3} - \frac{p}{h_{kr}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{L}{B} \quad (58)$$

w której

$$C_{II} = 0,73 - \frac{0,32 h_{kr}}{h_g} - \frac{0,14}{L} \quad (59)$$

zaś q_d oznacza stosunek natężenia przepływu w korycie głównym na końcu przelewu bocznego do natężenia przepływu w korycie na początku wycięcia $q_d = Q_d/Q_g$.

Przypadek III

Po uzyskaniu w korycie warunków hydraulicznych niezbędnych do powstania odskoku w obrębie przelewu bocznego (co sprawiło badaczowi nieco kłopotu), zaobserwowano dwie formy tego odskoku: postać falową oraz postać wyraźnego walca wodnego. Dokładne pomiary i uważna obserwacja procesu przepływu doprowadziły do wniosku, że istnienie odskoku na długości przelewu bocznego nie wpływa na warunki przepływu w górnym jego stanowisku; są one identyczne jak w przypadku badawczym I.

Omawiany przypadek III stanowi w pewnym sensie połączenie dwóch poprzednich, lecz z uwagi na fakt rozproszenia energii w odskoku przepływowi poniżej niego odpowiadać będzie nowa, niższa wartość wysokości energii E .

Definiując jak poprzednio wielkość $q_d = Q_d/Q_g$ otrzymano:

$$q_d = \frac{h_d}{h_{kr}} \sqrt{2 \frac{h_4}{h_{kr}} + \frac{q_3^2}{\left(\frac{h_3}{h_{kr}}\right)^2} - 2 \frac{h_d}{h_{kr}}} \quad (60)$$

gdzie h_3 , h_4 oznaczają odpowiednio głębokości w korycie głównym bezpośrednio przed i bezpośrednio za odskokiem hydraulicznym (w obrębie wycięcia przelewu), natomiast $q_3 = \frac{Q_3}{Q_g}$, gdzie Q_3 jest średnim natężeniem przepływu w korycie głównym na długości odskoku. Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami można także napisać, że:

$$q_3 - q_d = C_{III} \left(\frac{h_d}{h_{kr}} - p \right)^{\frac{3}{2}} \frac{L_2}{B_k} \quad (61)$$

Parametr L_2 oznacza tę część długości korony przelewu bocznego, która leży poza zasięgiem odskoku hydraulicznego w dół koryta, natomiast C_{III} jest współczynnikiem wydatku przelewu. Wartość tego współczynnika Frazer określa następująco:

$$\begin{aligned} C_{III} &= 0,532 && \text{dla } q_3 = 0,600 \div 0,765 \text{ oraz } B_k = 0,80 \div 1,02 \text{ m} \\ C_{III} &= 0,76 - 0,25 L_2 && \text{dla } q_3 = 0,478 \div 0,600 \text{ oraz } B_k = 0,80 \div 1,76 \text{ m} \end{aligned}$$

Podsumowując, według badań Frazera do opisu możliwych form zwierciadła wody na przelewie bocznym konieczne jest obok uwzględnienia charakteru ruchu w korycie głównym także określenie związków pomiędzy natężeniem przepływu i głębokością w tym korycie, a długością korony przelewu.

K. Subramanya i S. Awasthy (1972)

Przyjmując założenie de Marchi Sumbramanya i Awasthy podali równanie profilu zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu bocznego, usytuowanego w ścianie przyzmatycznego koryta o przekroju prostokątnym i o poziomym dnie. Równanie to ma postać:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{Q_k h_k \left(-\frac{dQ_k}{dx} \right)}{g B_k^2 h_k^3 - Q_k^2} \quad (62)$$

Jednostkowy wydatek przelewu bocznego q można obliczać jako:

$$q = \frac{2}{3} C_M \sqrt{2g} (h_k - p)^{1.5} = -\frac{dQ_k}{dx} \quad (63)$$

gdzie C_M jest współczynnikiem wydatku określonym w sposób następujący:

$$C_M = 0,611 \sqrt{1 - \frac{3Fr^2}{Fr^2 + 2}} \quad (64)$$

W powyższym wzorze Fr oznacza liczbę Froude'a określoną dla górnego stanowiska koryta (zob. rys. 1.1). Za wartość h_k użytą we wzorze (63) należy podstawić głębokość normalną dla przepływu w korycie głównym, przed przelewem bocznym.

Wzór (64) powstał drogą opracowania danych uzyskanych z eksperymentów, które przeprowadzono dla przelewu bocznego o ostrej krawędzi. Szerokość koryta B_k zmieniano od 0,25 do 0,61 m wysokość przelewu p wynosiła $0 \div 0,51$ m, $L/B_k = 0,2 \div 1,0$, $p/h_k = 0,2 \div 0,96$ oraz $h_k/L = 0,1 \div 2,4$. Badania prowadzono przy całym zakresie reżimu ruchu, od spokojnego, poprzez krytyczny, do rwącego, przy wartościach $Fr = 0,02 \div 4,3$.

Należy zaznaczyć, że w ruchu spokojnym dla liczby Froude'a $1 > Fr > 0,6$ równanie (64) częściowo tylko odzwierciedla wyniki badań modelowych. Z kolei w przypadku ruchu rwącego, dla $Fr > 2,0$, uzyskano zależność liniową:

$$C_M = 0,36 - 0,08 Fr \quad (65)$$

K. Smith (1973)

Według Smith'a modelowanie komputerowe wydaje się być bardziej efektywne i technicznie prostsze niż badania eksperymentalne, przede wszystkim z uwagi na możliwość uzyskania znacznie szerszego zakresu analizowanych przypadków badawczych oraz na krótszy czas samych badań symulacyjnych.

Wychodząc z założenia de Marchi o stałości energii strumienia na przelewie i stosując odpowiednie przekształcenia, Smith podaje równanie opisujące układ zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu bocznego o następującej postaci:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{dQ_k}{dx} + \frac{\alpha Q_k^2 h_k}{g A_k^3} \frac{db_k}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q_k^2 B_k}{g A_k^3}} \quad (66)$$

oraz wzór na wydatek przelewu bocznego:

$$\frac{dQ_k}{dx} = -W C \sqrt{g} (h_k - p)^{1,5} \quad (67)$$

gdzie $W = 1$ dla przypadku, gdy przelew boczny usytuowany jest z jednej tylko strony koryta, lub $W = 2$ przy przelewach po obu jego stronach. C oznacza współczynnik wydatku przelewu bocznego i jak twierdzi Smith może być z łatwością wyrażony jako funkcja różnicy $(h_k - p)$, czyli grubości warstwy wody na przelewie.

Wprowadzając zamiast głębokości w korycie h_k rzędną zwierciadła wody z , można równanie (66) przedstawić w postaci:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{i_A - i_f - \frac{\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{dQ_k}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q_k^2 B_k}{g A_k^3}} - i_A \quad (68)$$

gdzie i_A oznacza lokalny (czyli w określonym przekroju) spadek zwierciadła wody wzdłuż osi koryta.

Smith wyróżnia trzy rodzaje form zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu bocznego: krzywa spiętrzenia, krzywa depresji wypukłością skierowana ku górze, krzywa depresji wypukłością skierowana w dół. W tym względzie praca Smith'a nie przynosi nic nowego w porównaniu z ustaleniami teoretycznymi Pietrowa (zob. rozdz. 4.2), badania te natomiast posłużyły jako baza dla algorytmu programu komputerowego, zaproponowanego przez Smitha.

W konkluzji autor dochodzi do wniosku, że wartość współczynnika wydatku przelewu trzeba mimo wszystko uzyskać na drodze eksperymentalnej, potem dopiero wykorzystywanie symulacji komputerowych jest sensowne. Stwierdzenie to świadczy o słabnącym nieco entuzjazmie Smitha wobec teoretycznych modeli komputerowych, które przecież zawsze wymagają rzeczywistych danych wejściowych.

A. El-Khashab i K. Smith (1976)

Na modelu fizycznym badano prostokątny przelew boczny o ostrej krawędzi, umieszczony w korycie o przekroju prostokątnym. Szerokość koryta b_k wynosiła 0,46 m, długość wycięcia przelewu $L = 1,20$ m oraz 2,30 m, wysokość ściany przelewu przyjmowana była w granicach od 0,10 do 0,25 m. Zakładano różne spadki dna koryta oraz różne wartości natężenia przepływu w korycie głównym ($Q_k \max = 220$ l/s). Prędkość przepływu mierzono w czternastu przekrojach poprzecznych koryta, przy czym trzy z nich usytuowano przed przelewem bocznym, dziewięć na jego długości i dwa za przelewem.

Autorzy na drodze teoretycznej wyprowadzili równania opisujące profil zwierciadła wody wzdłuż wycięcia przelewu. Opierając się na założeniu niezmienności energii strumienia na przelewie otrzymano:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f - \frac{\alpha Q_k}{g A_k^2} \frac{dQ_k}{dx}}{1 - \frac{\alpha Q_k^2 B}{g A_k^3}} \quad (69)$$

natomiast po wykorzystaniu zasady zachowania pędu:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f - \frac{1}{g A_k} (2\beta v_k - U) \frac{dQ_k}{dx}}{1 - \beta \frac{Q_k^2 B}{g A_k^3}} \quad (70)$$

W pierwszym w podanym wyżej równań nie ma rozróżnienia pomiędzy podłużną składową prędkości przepływu przez przelew boczny U , a prędkością średnią v_k w dowolnym przekroju koryta na długości przelewu. W równaniu (70) wynikającym z zasady zachowania pędu rozróżnienie takie występuje.

Eksperymentalne badania El-Khashaba i Smith'a miały na celu zweryfikowanie zacytowanych równań. Badania te wykazały, że na długości przelewu bocznego ma miejsce znaczny spadek linii energii strumienia, zarówno dla spokojnego jak i rwącego reżimu przepływu w korycie. Zaobserwowano ponadto, że wartości prędkości U są zawsze wyższe niż wartość prędkości v_k . Przy ruchu rwącym w korycie odnotowano gwałtowny spadek zwierciadła wzdłuż korony przelewu, przy stosunkowo niewielkim wydatku przelewu w porównaniu z natężeniem przepływu w korycie głównym. W przypadku ruchu spokojnego zwierciadło wody na długości korony przelewu układało się zgodnie z krzywą spiętrzenia, czemu towarzyszył znaczny wzrost wydatku przez przelew.

Można stwierdzić, że praca El-Khashaba i Smith'a nie potwierdza w pełni słuszności założenia de Marchi i nie chodzi tu wyłącznie o kwestię uwzględnienia strat na tarcie na długości przelewu. Wyniki pomiarów wskazują na zasadę zachowania pędu jako podstawę wyznaczania charakterystyk przepływu przez przelew boczny.

W. Hager (1987)

Badania modelowe przeprowadził Hager w korycie o stałej szerokości $b_k = 0,30$ m, w którego ścianie wykonany był prostokątny przelew boczny o wysokości p zmienianej w zakresie od zera (poziom dna) do 0,20 m. Długość korony przelewu L była równa 1,00 m. Warunki ruchu w korycie określano liczbą Froude'a, która dla

przeprowadzonych eksperymentów wynosiła od 0,3 do 2,0. Spadek dna koryta głównego regulowano w granicach od – 0,5 % (spadek odwrotny!) do 2,0 %.

Celem eksperymentów była weryfikacja wyników obliczeń wydatku przelewu bocznego, dokonanych przy użyciu następujących wzorów:

$$q = C_d \sqrt{2g} (E - p)^{1,5} \quad (71)$$

oraz

$$C_d = 0,42 \left[1 + \frac{1}{7} \left(\frac{E - p}{E} \right)^3 \right] \quad (72)$$

$$C_d = 0,42 \left[1 - \frac{2}{9 \left(\frac{E - p}{\delta} \right)^4} \right] \quad (73)$$

(zależności Kandaswamy'ego i Rouse'a kolejno dla przelewów o ostrej krawędzi i przelewów o szerokiej koronie). Weryfikowano również wzór Ranga Raju:

$$C_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \left(1 + \frac{\frac{22 \left(\frac{E - p}{r} \right)^2}{81}}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{E - p}{r} \right)^2} \right) \quad (74)$$

stosowany – jak podaje Hager – dla przelewów o kształcie praktycznym, w którym r oznacza promień zaokrąglenia poprzecznego przekroju korony przelewu bocznego.

Omawiane badania Hagera potwierdziły słuszność cytowanych zależności. Dodatkowo przeprowadził Hager doświadczenia dla przypadku prostokątnych koryt niepryzmatycznych z przelewami bocznymi, uzyskując niżej podany wzór obliczeniowy:

$$q = \frac{3}{5} n C_d' \sqrt{g E^3} \left(\frac{h_k}{E} - \frac{p}{E} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1 - \frac{p}{E}}{3 - 2 \frac{h_k}{E} - \frac{p}{E}} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - (\theta + i) \left[\frac{3 \left(1 - \frac{h_k}{E} \right)}{\frac{h_k}{E} - \frac{p}{E}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (75)$$

W podanej formule n jest liczbą przelewów wykonanych w ścianie koryta. Zaproponowano, że współczynnik C_d' dla przelewu o ostrej krawędzi ma wartość 1,0, zaś dla przelewu o szerokiej koronie i kształcie praktycznym wartości $C_d' = C_d$ wyznaczają wzory (73) i (74). Kąt θ jest kątem zbieżności ścian koryta głównego (dopływowego); np. na rys. 1.1. kąt θ równy jest zeru.

J. E. Davis (1990) oraz K. A. Tynes (1989)

Davis postawił sobie za cel opracowanie kompleksowego programu komputerowego, który umożliwiłby projektowanie wymiarów przelewu bocznego lub ewentualnie układu takich przelewów, sytuowanych w korycie rzeczonym dla uzyskania odpowiedniej redukcji kulminacji przemieszczającej się fali powodziowej. Realizując to zadanie Davis dokonał analizy teoretycznych równań określających wydatek przelewu bocznego oraz profil zwierciadła wody wzdłuż jego korony, raz (A) sformułowanych na bazie zasady zachowania energii, w drugim przypadku (B) według zasady zachowania pędu.

Równania profilu zwierciadła wody były postaci:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f + \frac{\alpha v_k q_k}{A_k g}}{1 - Fr^2} \quad (76)$$

w sytuacji (A) oraz:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f + (1 - 2\beta) \frac{v_k q_k}{A_k g}}{1 - \beta Fr^2} \quad (77)$$

w sytuacji (B). Dla wyznaczenia wartości przepływu przez przelew boczny można według Davisa stosować następujące zależności: dla przelewów o ostrej krawędzi

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (78)$$

zaś dla przelewów o szerokiej koronie

$$q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{\frac{2}{3} g} h^{3/2} \quad (79)$$

gdzie C_d jest współczynnikiem wydatku przelewu bocznego.

Rozważania ograniczono do warunków spokojnego reżimu ruchu w korycie głównym. Realizując proponowaną przez siebie procedurę projektowania przelewu bocznego uznał Davis, że parametry obszaru (polderu) za przelewem, na którym to obszarze następowało retencjonowanie wód powodziowych, muszą wchodzić w zakres zestawu danych. Uzyskane z obliczeń parametry przelewu będą satysfakcjonujące, jeżeli nastąpi wywołana pracą przelewu żądana redukcja fali powodziowej.

Prace Tynesa prowadzone były równoległe do badań Davisa i były pracami wyłącznie eksperymentalnymi. Doświadczenia na modelu hydraulicznym dokonywane były w korycie o przekroju trapezowym, którego ściany boczne nachylnono w stosunku 1:2,5, szerokość dna b_k wynosiła od 0,55 m do 1,04 m, spadek dna koryta był równy 0,385 ‰. Wycięcie przelewu bocznego miało kształt trapezu; długość korony L przyjmowano równą 0,61 m, 1,53 m, 3,05 m, 4,58 m, 6,10 m i 7,29 m, wysokość przelewu p wynosiła 0,16 m i 0,215 m, szerokość korony $\delta = 0,146$ m. Nachylenie m bocznych krawędzi wycięcia było zawsze równe 2. W rezultacie przeprowadzonych badań Tynes uzyskał następujące równanie określające wydatek przelewu bocznego (dla przypadku ruchu spokojnego w korycie głównym):

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g} C_d (L + h m) h^{\frac{3}{2}} \quad (80)$$

Wartość współczynnika C_d określana jest następująco:

dla przelewu niezatopionego

$$C_d = \frac{1,134}{\exp\{0,0813[\ln(F_{wd} + 3)]^{5,15}\} \exp\left\{0,0328 \left[\ln\left(\frac{L}{B_k} + 3\right) \right]^{2,20}\right\}} \quad (81)$$

dla przelewu zatopionego

$$C_{dz} = \left[1 - 28,84 \left(\frac{h_d - p}{h_z} - 0,5 \right)^{4,85} \right] C_d \quad (82)$$

(C_d wg formuły (81)). Jeżeli koryto zmienia swą szerokość na odcinku, na którym sytuowany jest przelew boczny, proponuje się zależność:

$$C_d = 0,810 + 0,177 F_{wd}^3 + 1,77 \left(\frac{B_g - B_d}{L} \right)^3 \quad (83)$$

W cytowanych formułach F_{wd} oznacza liczbę Froude'a dla strumienia cieczy przelewającej się przez przelew, wyznaczoną w przekroju kończącym ten przelew, natomiast h_z jest grubością warstwy wody dolnej na przelewie zatopionym, mierzoną od strony polderu.

Badania Tynesa uzupełniają pracę Davisa w tym sensie, że dostarczają doświadczalnych wzorów na występujące w opisie teoretycznym współczynniki wydatku przelewu bocznego.

P. Swamee (1994)

Swamee z zespołem przeprowadził badania modelowe w betonowym, prostokątnym korycie o szerokości 0,5 m z przelewem bocznym. Wartości charakterystycznych parametrów przyjmowane były w następującym zakresie: $p = 0,0 \div 0,1$ m, $h_g = 0,08 \div 0,32$ m, $Q_g = 0,02 \div 0,1$ m³/s, $L = 0,2 \div 0,5$ m, wydatek przelewu $Q =$

0,001 ÷ 0,049 m³/s. Reżim przepływu w korycie charakteryzowano liczbą Froude'a, której wartości w górnym stanowisku przelewu wynosiły $Fr = 0,10 \div 0,93$.

Przyjęto, że zmianę natężenia przepływu Q_k w korycie na długości przelewu opisuje podane już wcześniej równanie (63), w którym $x \in \langle 0; L \rangle$ (zob. rys.4.9), przy czym w miejsce współczynnika wydatku C_M podstawiony jest współczynnik C_{Me} dla elementarnej długości korony dx . Wartość tego współczynnika zależy – wg badań Swamee'ego – od napełnienia w korycie głównym w przekroju odpowiadającym rozważanemu odcinkowi przelewu oraz od wysokości samego przelewu:

$$C_{Me} = 0,447 \left[\left(\frac{44,7 p}{49 p + h_k} \right)^{6,67} + \left(\frac{h_k - p}{h_k} \right)^{6,67} \right]^{-0,15} \quad (84)$$

Równanie określające profil zwierciadła cieczy na przelewie ustalono jak niżej:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - \frac{Q_k^2 n^2}{g b_k^2 h_k^{4/3}} + \left(1 + \frac{2h_k}{b_k} \right)^{4/3} - \frac{2\sqrt{2}}{3} C_{Me} (h_k - p)^{1,5} \frac{Q_k}{b_k^2 h_k^2 \sqrt{g}}}{1 - \frac{Q_k^2}{g b_k^2 h_k^3}} \quad (85)$$

Należy stwierdzić, że istnieje bardzo duża zgodność rezultatów obliczeń teoretycznych oraz obserwacji dokonanych przez zespół Swamee'ego.

R. Singh i T. Satyanarayana (1994)

Badania modelowe prowadzono w poziomym korycie hydraulicznym o stałej szerokości 0,25 m. Na długości koryta zainstalowano cztery przelewy boczne, posiadające koronę długości 0,40 m, przy czym odległość między przelewami wynosiła 4 m. Celem badań było opracowanie programu komputerowego służącego do projektowania systemu przelewów bocznych zasilających układ nawadniający.

Bazując na założeniu de Marchi jednostkowy wydatek pojedynczego przelewu bocznego określano wzorem (63), wyznaczając wartość współczynnika wydatku C_M zależnością:

$$C_M = 0,33 - 0,81 Fr + 0,49 \frac{P}{h_g} \quad (86)$$

w której Fr oznacza liczbę Froude'a w obszarze przepływu bezpośrednio przed przelewem. Napelnienie h_k koryta głównego proponuje się obliczać poprzez wyznaczenie profilu zwierciadła wody wzdłuż koryta. Rzędne zwierciadła uzyskuje się stosując wielokrotnie równanie Bernoulli'ego formułowane dla przekrojów początkowych i końcowych kolejnych przelewów bocznych w ścianie koryta:

$$z_{g,i} + h_{g,i} + \frac{Q_{g,i}^2}{2g A_{g,i}^2} = z_{d,i} + h_{d,i} + \frac{Q_{d,i}^2}{2g A_{d,i}^2} + \frac{Q_{s,i}^2 n_{s,i}^2}{A_{s,i}^2 R_{s,i}^{4/3}} x \quad (87)$$

(z – rzędna dna koryta, A , R , n – odpowiednio: pole przepływu, promień hydrauliczny i współczynnik szorstkości koryta, indeksy: g , d , s – odpowiednio: przekrój początkowy, końcowy i wartość średnia, i – numer przelewu liczony zgodnie z kierunkiem przepływu w korycie).

W wyniku badań opracowano algorytm obliczania parametrów systemu przelewów bocznych, głównie długości koron L_i i wysokości ścian przelewów p_i tak, aby wydatek każdego przelewu był jednakowy, równy żądanemu. Danymi wejściowymi do obliczeń stały się: natężenie przepływu w korycie głównym, wydatek poszczególnych przelewów, współczynnik szorstkości koryta, wymiary jego przekroju, rozmieszczenie przelewów w ścianie bocznej koryta.

A. Das (1997)

Autor przeprowadził eksperymenty badawcze w korycie o przekroju asymetrycznego trapezu. Lewa ściana koryta była pionowa, natomiast prawą ścianę stanowiła grobla o nachyleniu skarpy w stosunku 1:2 po stronie koryta oraz 1:3 po stronie polderu poza przelewem bocznym, usytuowanym w tej grobli. Szerokość dna koryta b_k wynosiła 0,6 m, wysokość pionowej jego ściany 0,5 m. W pierwszej serii badań wysokość przelewu bocznego p była równa 0,363 m przy szerokości jego korony $\delta = 0,225$ m. Redukując w następnych seriach wartość p zwiększano siłą rzeczy szerokość korony δ ; zmieniana była także długość korony przelewu L . Zakres parametrów był następujący: $\delta/p = 0,62 \div 22,20$, $L/b_k = 0,583 \div 5,217$, $L/p = 0,964 \div$

41,733, $Q/Q_g = 0,060 \div 0,995$. Reżim ruchu w korycie określano liczbą Froude'a dla stanowiska górnego przelewu, przyjmując wartości $Fr = 0,139 \div 0,844$.

W badaniach przyjęto, że jednostkowy wydatek przelewu bocznego określa zależność:

$$q = \left[\left(\frac{2}{3} \right)^3 g (E - p)^3 \right]^{0.5} \quad (88)$$

natomiast profil zwierciadła wody wzdłuż korony przelewu kształtuje się zgodnie z równaniem:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f + (2\beta - 1) \left(-\frac{dQ_k}{dx} \right) \left(\frac{Q_k}{g A_k^2} \right)}{1 - \frac{\beta Q_k^2 B_k}{g A_k^3}} \quad (89)$$

Pomiary wykazały, że współczynnik Coriolisa α , niezbędny do obliczenia wartości wysokości energii E , należy przyjmować jako równy 1,166, natomiast współczynnik Boussinesqu'a β powinien wynosić 1,074. W konkluzji Das stwierdza, że podane wyżej równania w sposób zadowalający opisują hydraulikę bocznego przelewu.

A. Kotowski (2001)

Badania modelowe prowadzono w korycie o przekroju prostokątnym oraz w korycie o przekroju U-kształtnym. W przypadku pierwszym szerokość koryta b_k wynosiła 0,315 m, a jego spadek i był równy 0,33 %. Wykonany w ścianie bocznej przelew miał stałą wysokość $p = 0,21$ m oraz zmienianą w trakcie badań długość korony $L = 0,60$ m, 0,90 oraz 1,20 m. Badania przeprowadzono w warunkach ruchu spokojnego w korycie przy liczbie Froude'a w górnym stanowisku przelewu wynoszącej $Fr = 0,14 \div 0,35$. W przypadku koryta o przekroju U-kształtnym przyjęto $B_k = 0,287$ m, wysokość korony przelewu bocznego $p = 0,204$ m, długość korony $L = 1,20$ m; liczba Froude'a w korycie głównym przed przelewem wynosiła $Fr = 0,17 \div 0,46$.

Celem badań była identyfikacja wartości współczynników występujących w matematycznym opisie procesu przepływu cieczy przez przelew boczny. Opis ten sformułowany został przy wykorzystaniu zasady zachowania pędu. Po uwzględnieniu różnicy między średnią prędkością przepływu v_k w korycie głównym a składową prędkości U na przelewie bocznym, równanie profilu zwierciadła cieczy na długości przelewu Kotowski zapisał w postaci:

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{i - i_f - \left[(2\beta - k\beta_p) Q_k \frac{dQ_k}{dx} + Q_k^2 \frac{d\beta}{dx} \right] \frac{1}{g A_k^2}}{1 - \beta \frac{Q_k^2 b}{g A_k^3}} \quad (90)$$

gdzie $k = \frac{U}{v_k}$, zaś β_p jest współczynnikiem pędu obliczonym dla strumienia przelewającego się przez przelew. Wydatek przelewu określony został zależnością (63). Eksperymentalne dane pozwoliły określić wartości współczynników β , C_M oraz $\eta = 2\beta - k\beta_p$:

$$\beta = 0.287 + 0.180q_r + 0.116q_r^2 + 0.807W_0 - 3.43W_0^2 - 0.622\xi + 0.573 \exp \xi \quad (91)$$

$$C_M = 0.644 - 0.052q_r + 0.0088L_0 + 0.035W_0 - 0.075F_1 - 0.065K_0 \quad (92)$$

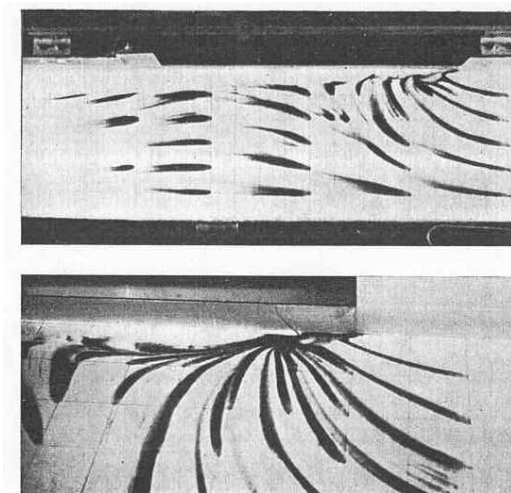
$$\eta = 6.46 + 5.61q_r - 1.3q_r^2 - 0.0531L_0 - 59.2W_0 + 80.4W_0^2 - 4.94F_1^2 - 0.46K_0 + 2.11\xi - 1.27\xi^2 \quad (93)$$

gdzie:

$$K_0 = \frac{b_k h_g}{A_g}, \quad L_0 = \frac{L}{h_g}, \quad q_r = \frac{Q_k}{Q_g}, \quad W_0 = \frac{h}{h_g}, \quad \xi = \frac{x}{L}; \quad x \in (0, L).$$

4.4. Kinematyka odpływu przez przelew – dane literaturowe

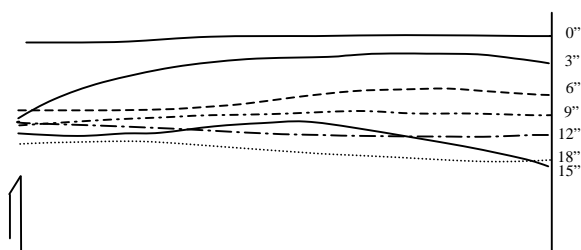
Dokonany przegląd literatury przedmiotu skłania do stwierdzenia, że badania kinematyki przepływu cieczy w obszarze oddziaływania przelewu bocznego nie są najczęściej traktowane jako pierwszoplanowe; cele badawcze, jakie stawiają sobie poszczególni autorzy koncentrują się raczej na określaniu formuł na wydatek przelewu, wyznaczaniu wartości współczynnika wydatku, profilu zwierciadła wody na przelewie, itp. O ile pomiarów położenia zwierciadła wody w obrębie przelewu dokonywano w szerokim zakresie, gdyż stanowiły one tło dla innych rozważań, związanych z działaniem przelewu w różnych warunkach hydrodynamicznych (różny reżim ruchu), to pomiary pól prędkości robią wrażenie fragmentarycznych i w pewnym sensie pomocniczych w stosunku do głównego tematu badań. Generalnie, informacje dotyczące obrazu ruchu w korycie i na samym przelewie bocznym nie są zbyt szerokie. Niżej zacytowano przedstawione w formie graficznej wybrane fragmenty badań eksperymentalnych, opublikowane przez badaczy wymienionych już w poprzednim rozdziale. Można stwierdzić, że interesujące nas tu wyniki eksperymentów nie są szerzej komentowane przez ich autorów i tym samym nie wydają się być dobrą podstawą do szerszych uogólnień.



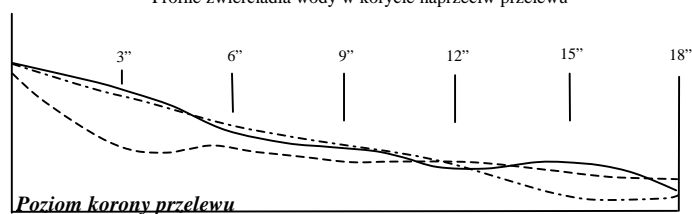
Rys. 4.10. Badania Frazera: wizualizacja linii prądu na poziomie dna koryta w sąsiedztwie przelewu *

* Cyt. z Frazer (1957)

Krzywe depresji zwierciadła wyznaczone w różnych przekrojach na długości korony przelewu



Profile zwierciadła wody w korycie naprzeciw przelewu

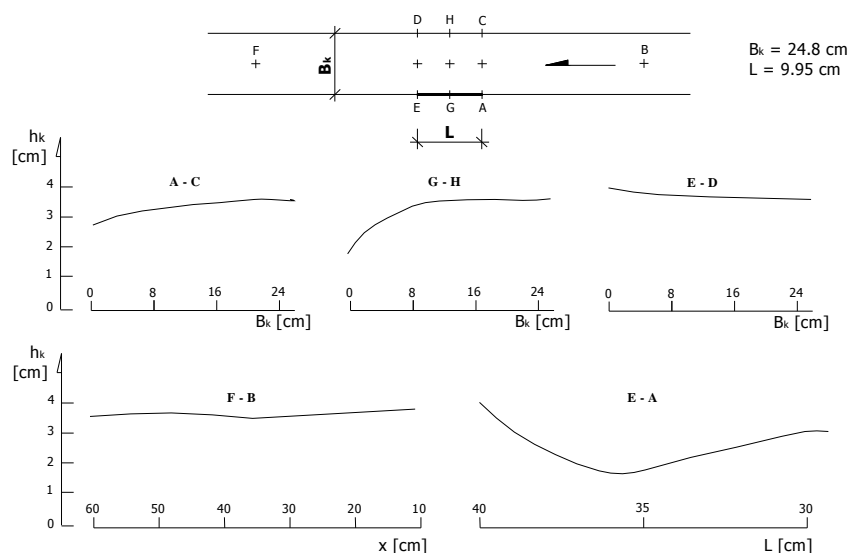


Poziom dna koryta

----- na przelewie ————— w osi koryta - · - · - przy ścianie koryta

Rys. 4.11. Wyniki eksperymentów Ackersa *

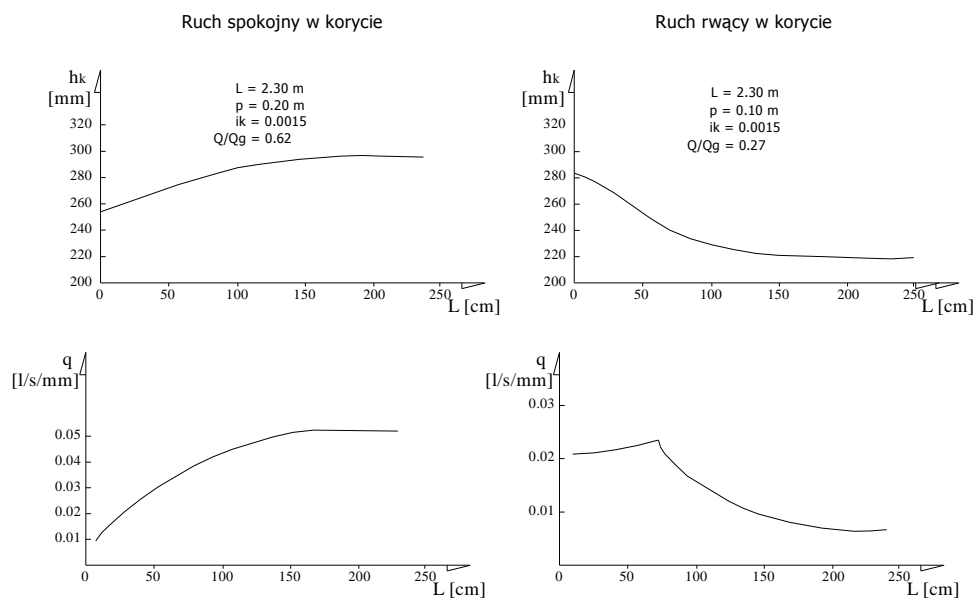
Oznaczenia przekrojów badawczych



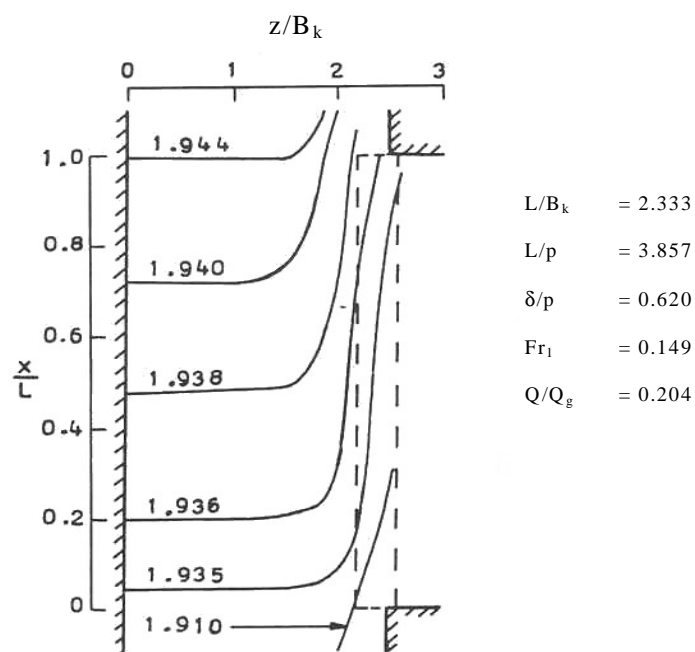
Rys. 4.12. Badania Subramanya i Awasthy: układ zwierciadła wody w korycie w obszarze oddziaływania przelewu (przypadek ruchu spokojnego)**

* Cyt. z Ackers (1957)

** Cyt. z Subramanya i Awasthy (1972)



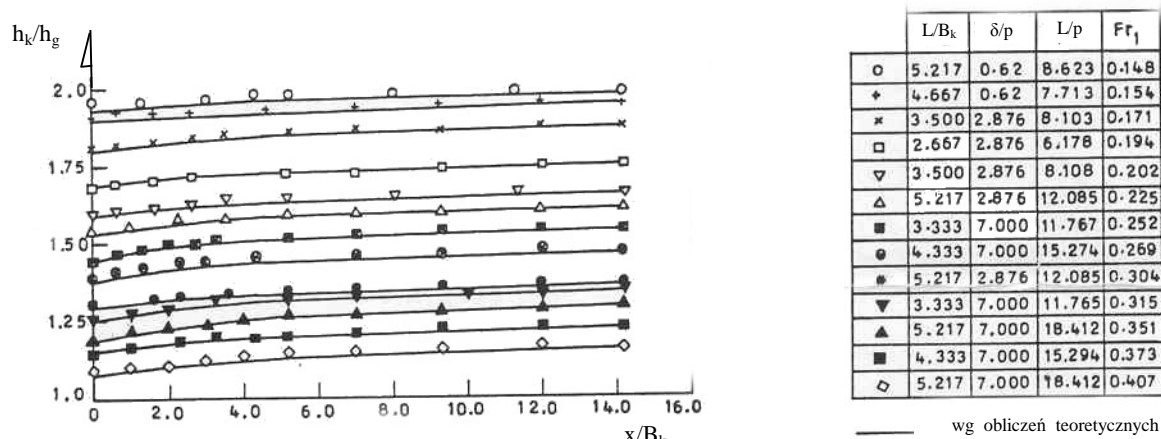
Rys. 4.13. Badania El-Khashaba i Smith'a: zmienność napełnienia i wydatku wzdłuż korony przelewu bocznego*



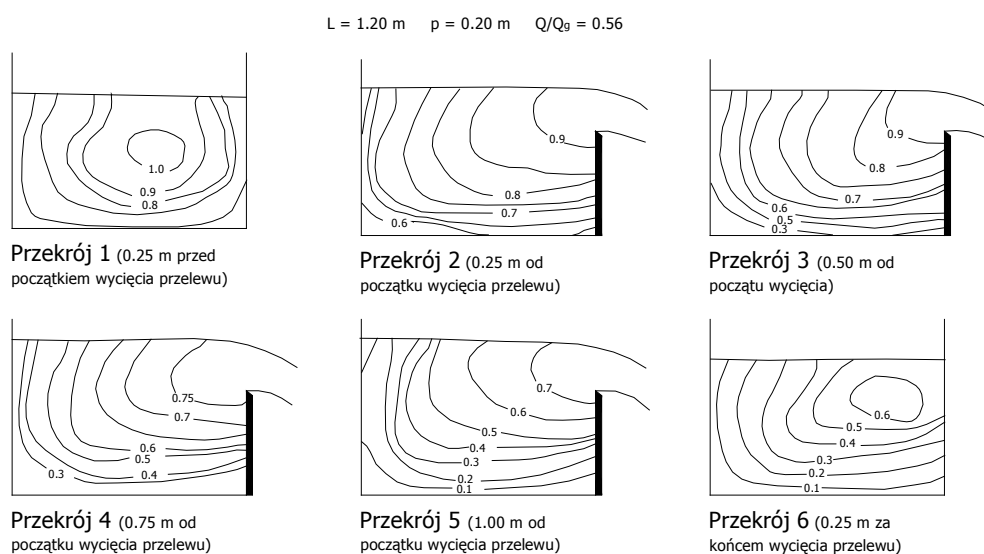
Rys. 4.14. Badanie Dasa: typowe izobaty w korycie głównym w pobliżu przelewu bocznego**

* Cyt. z El-Khashaba i Smith'a (1976)

** Cyt. z Dasa (1997)



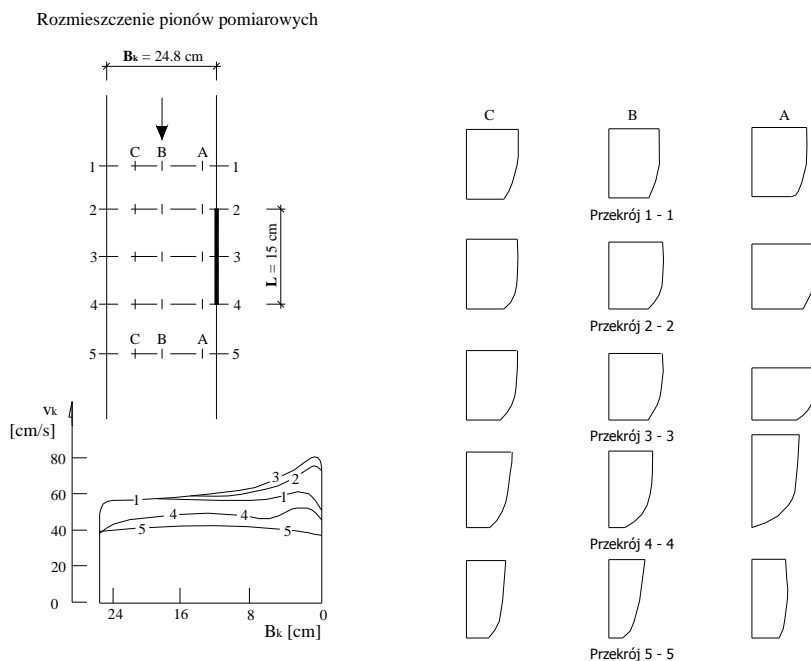
Rys. 4.15. Badania Dasa: typowe profile zwierciadła w przekroju poprzecznym koryta z przelewem bocznym*



Rys. 4.16. Badania El-Khashaba i Smith'a: rozkład prędkości w przekrojach poprzecznych w obszarze oddziaływania przelewu bocznego (przypadek ruchu spokojnego)**

* Cyt. z Dasa (1997)

** Cyt. z El-Khashaba i Smith'a (1976)



Rys. 4.17. Badania Subramanya i Awasthy: rozkłady prędkości w korycie z przelewem bocznym (ruch spokojny)*

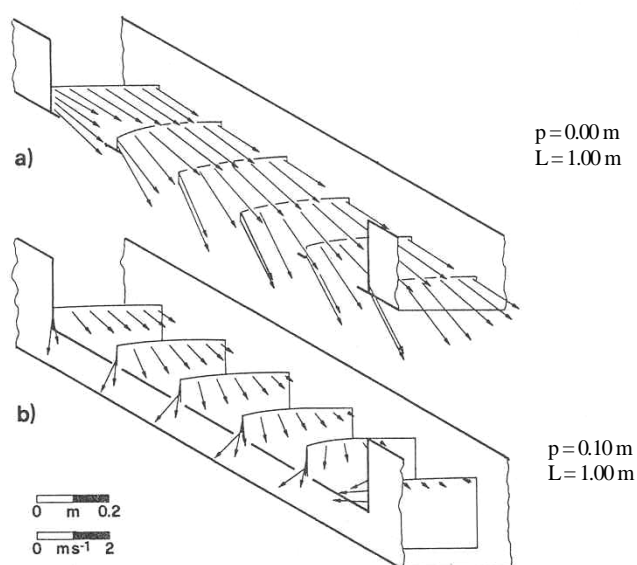
Kilka zdań szczegółowych należy poświęcić результатам doświadczeń Hagera, który specjalną uwagę zwrócił na takie parametry jak napełnienie i prędkość przepływu w korycie głównym. Na ich wartości wpływ ma działanie przelewu bocznego, przy czym istnieje tu naturalnie oddziaływanie odwrotne: efekty pracy przelewu są zależne od warunków ruchu w korycie dopływowym. Hager prowadził pomiary w dwóch korytach o identycznym kształcie i wymiarach przekroju poprzecznego, przy czym w jednym z nich zainstalowany był czołowy przelew prosty, w drugim zaś boczny przelew, również prostokątny. Przy jednakowym napełnieniu w obu korytach obserwowano znacznie wyższe prędkości przepływu w obrębie przelewu bocznego, co wydać się może intuicyjnie uzasadnione, niemniej jednak interesujące.

Ciekawym także rezultatem badań Hagera jest ustalona przez niego zależność:

* Cyt. z Subramanya i Awasthy (1972)

$$\sin \phi = \left[\frac{\frac{h_k - p}{E} - \frac{p}{E}}{3 - 2 \frac{h_k - p}{E} - \frac{p}{E}} \right]^{0.5} \quad (94)$$

Pozwala ona określić wartość kąta ϕ , zawartego pomiędzy krawędzią korony przelewu bocznego, a kierunkiem linii działania wektorów prędkości cieczy przepływającej przez ten przelew. Średnia prędkość ruchu cieczy ukryta jest w parametrze E , który jest wysokością energii mechanicznej strumienia. Według autora podanej wyżej zależności, kąt ϕ zależy od napełnienia h_k w korycie w tym pionie, w którym określany jest wektor prędkości przepływu a także od wysokości ściany przelewu p . Wzór (94) obowiązuje dla koryt pryzmatycznych. Zmiany kierunku wektorów prędkości powierzchniowej w wybranych przekrojach poprzecznych koryta z przelewem bocznym pokazane są za Hagerem na rys. 4.18.



Rys. 4.18. Badanie Hagera: przykład wizualizacji wektorów prędkości w obszarze przepływu związanym z przelewem bocznym*

Spośród badaczy, których nazwiska przywołane zostały w poprzednim rozdziale, tylko ci, o których mowa była wyżej opublikowali dane na temat interesującej nas

* Cyt. z Hager (1987)

kwestii obrazu ruchu w korycie z przelewem bocznym. Jak już wcześniej wspomniano dokonany tu przegląd literatury dotyczył tylko tych prac, które prowadzone były w korytach o prostokątnym przekroju poprzecznym i dla przelewów o takimże wycięciu. Trzeba stwierdzić, że rezultaty badań dotyczących koryt i przelewów o innej geometrii nie poszerzają informacji na temat ujęty w tytule tego rozdziału.

5

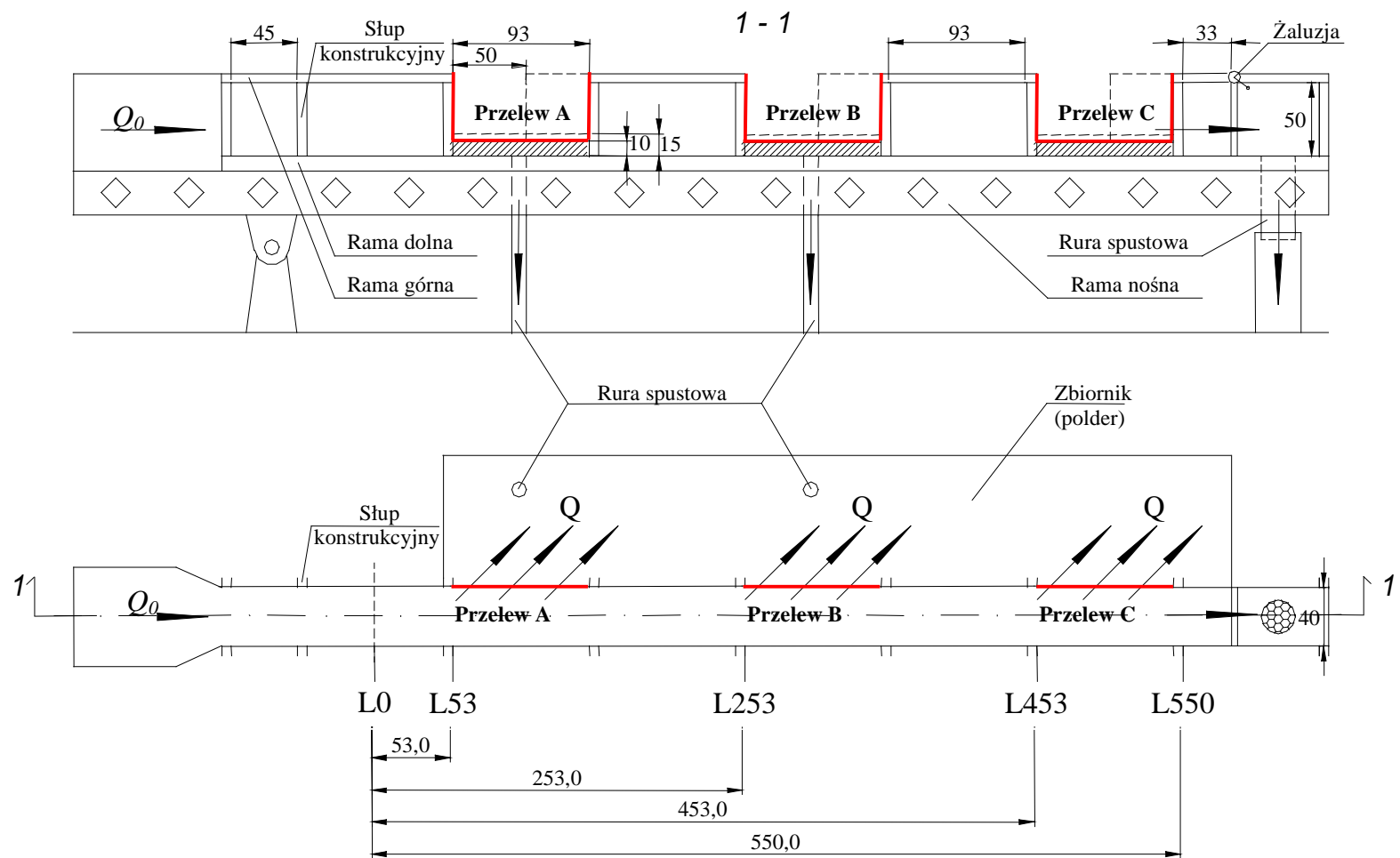
Przelewy boczne pojedyncze i w układzie szeregowym. Badania doświadczalne

5.1. Stanowisko pomiarowe

Jak już kilkakrotnie wspomniano, cele postawione w pracy były realizowane poprzez eksperymenty wykonane na fizycznym modelu obiektu w laboratorium hydraulicznym. Pod słowem „obiekt” rozumie się tu przedmiot badań, którym był albo pojedynczy przelew boczny w korycie, albo też układ takich przelewów; zgodnie z przyjętym zakresem doświadczeń rozważano układ szeregowy – dwa lub trzy kolejno po sobie następujące przelewy boczne.

Badania zostały przeprowadzone w laboratorium naukowym Zakładu Hydrauliki i Hydromechaniki Instytutu Inżynierii i Gospodarki Wodnej Politechniki Krakowskiej.

Budując stanowisko pomiarowe (patrz rys. 5.1) wykorzystano istniejące już koryto hydrauliczne wraz z układem zasilania i odpływu wody. Całkowita długość koryta wynosi 8.0 m, przy czym jego część użyteczna dla badań jest długości 5,50 m. Koryto ma prostokątny przekrój o wymiarach 40 cm x 50 cm, jego ściany wykonane ze szkła (grubości 10 mm) umocowane są na dnie podtrzymywanym stalową konstrukcją. Początkowy fragment koryta, do którego bezpośrednio kierowana jest woda z układu pompowego, pełni funkcję komory tłumiącej. Poprzez zainstalowanie ścian perforowanych i odpowiedniego wypełnienia elementami siatkowymi, w komorze tej następuje uspokojenie przepływu, ujednoczenie kierunku torów strug napływającej wody i wyeliminowanie falowania zwierciadła. Z kolei na odcinku końcowym koryta zainstalowane są obracające się w pionie płaskie zamknięcia tworzące żaluzję, pozwalającą na regulację poziomu zwierciadła w korycie przy określonym odpływie.



Rys. 5.1. Stanowisko pomiarowe

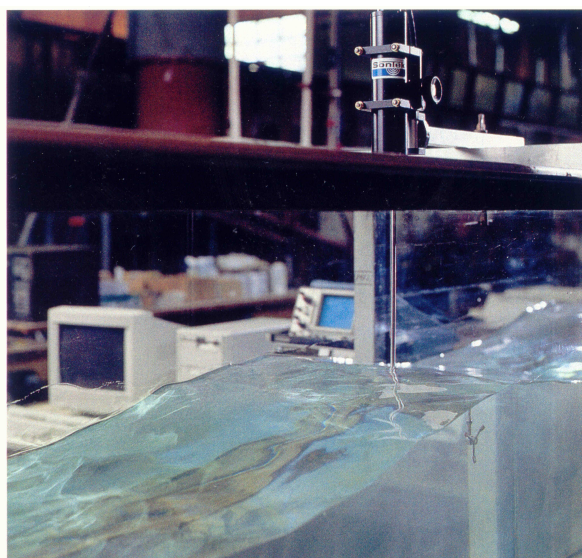
Zasilanie oraz odbiór wody z koryta odbywa się w obiegu zamkniętym. Jego elementami są trzy wolno stojące pompy, układ rurociągów ssawnych i tłocznych z zasuwaniami regulującymi ich przepustowość oraz trzy zbiorniki: górny, pośredni i dolny. Woda spływająca ze zbiornika górnego napędza zbiornik pośredni, w którym zainstalowany jest kołowy, ostrokrawędzisty przelew pomiarowy, a następnie przepływa do koryta hydraulicznego. Rurą spustową na jego końcu następuje odpływ wody do zbiornika dolnego, z którego za pomocą pomp zasilany jest zbiornik górny. Pomiędzy zbiornikami górnym i pośrednim znajduje się zasuwa regulująca dopływ do koryta. Wartość dopływu określa się poprzez odczyt stanu wody na koronie wspomnianego przelewu pomiarowego i naniesienie tego odczytu na sporządzoną krzywą konsumcyjną. Maksymalny wydatek jaki można uzyskać opisanym układem pompowym wynosi $0,120 \text{ m}^3/\text{s}$. Prowadząc badania wykorzystywano tylko jedną pompę ustalając jej wydatek tak, aby uzyskiwać stały dopływ do koryta ustalony w planie badań.

W jednej z bocznych ścian koryta wykonano przelewy boczne, nazwane kolejno przelewami A, B i C, licząc zgodnie z kierunkiem przepływu wody w korycie. Wycięcia wszystkich przelewów były prostokątne; tak długość korony tych przelewów jak i jej wysokość mogła być zmieniana. Z uwagi na istniejącą konstrukcję stalową koryta hydraulicznego podstawowa długość L korony przelewów wynosiła 93 cm. (Z punktu widzenia prowadzonych badań wartość L jako taka nie miała znaczenia, toteż dostosowano się do zastanych w laboratorium warunków technicznych, których poważniejsza zmiana nie była celowa.) Poszczególne przelewy położone były w stałej odległości od siebie. Z uwagi na proporcje pomiędzy grubością korony przelewów, określoną grubością płyty szklanej, a grubością warstwy przepływającej przez nie wody, wszystkie przelewy należały do klasy przelewów o ostrej krawędzi.

Do koryta hydraulicznego dobudowany został zbiornik gromadzący wodę odpływającą z badanych przelewów bocznych. Średnica przewodów, którymi woda z tego zbiornika odpływała do zbiornika dolnego w układzie pompowym, była tak dobrana, aby poziom zwierciadła za przelewami bocznymi utrzymywany był poniżej ich korony; przelewy pracowały jako niezatopione. Całość stanowiska badawczego pokazana została na rysunku 5.1.

Na oprzyrządowanie pomiarowe składały się: prędkościomierz (sonda do pomiaru prędkości przepływu wody), sondy opornościowe do pomiaru poziomu wody w korycie, wodowskaz główny w zbiorniku pośrednim, cyfrowe rejestratory sygnałów

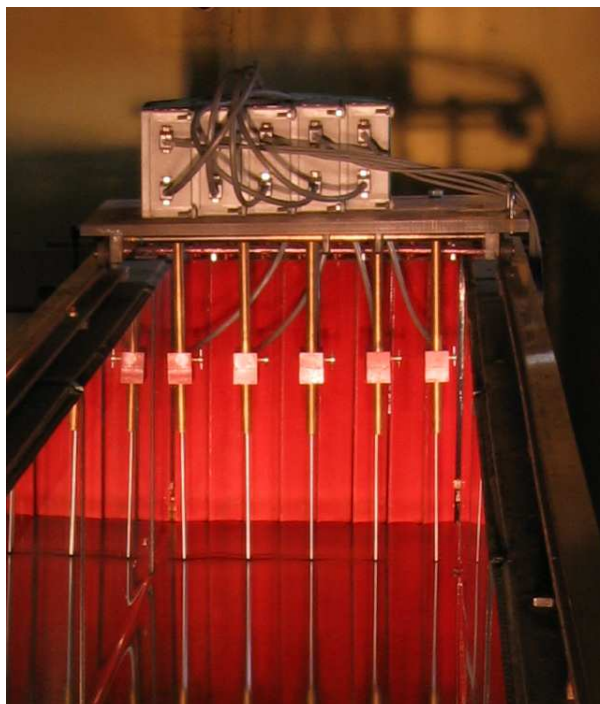
przesyłanych przez sondy, monitory do wyświetlania odczytów połączone z pamięcią komputerów. Funkcję prędkościomierza pełniła akustyczna sonda Dopplera Sontec ADVLab-2D. Można było za jej pomocą mierzyć prędkość przepływu jednocześnie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach leżących na jednej poziomej płaszczyźnie, a zatem wyznaczać żądane składowe prędkości v_L i v_B (patrz fot. 5.1 oraz rys. 5.4).



Fot. 5.1. Sonda ADV z oprzyrządowaniem

Zasadniczą częścią sond opornościowych są dwa sztywne nierdzewne przewodniki prądu elektrycznego. Zależnie od grubości warstwy wody wyznaczonej zanurzeniem sondy i poziomem zwierciadła, napięcie prądu pomiędzy przewodnikami się zmienia, co jest podstawą pomiaru tego poziomu. Sondy wyposażone były w układy kompensacyjne eliminujące szумы w przesyłanych sygnałach i zwiększające dokładność oraz czułość pomiaru. W badaniach stosowano zestaw pięciu odpowiednio wykalibrowanych sond opornościowych, które zamontowane były na wózku przesuwym wzdłuż koryta hydraulicznego (zob. fot. 5.2).

Poszczególne serie pomiarowe dokumentowano cyfrowymi zdjęciami fotograficznymi. Chodziło szczególnie o zwizualizowanie linii prądu wody płynącej korytem i przez przelewy, czyli uzyskanie obrazu powierzchniowego zasięgu oddziaływania tych przelewów. W tym celu stosowano duże ilości drobnych pływaków, których drogę przemieszczania się fotografowano przy specjalnie dobranym oświetleniu i odpowiednio dużym czasie ekspozycji.



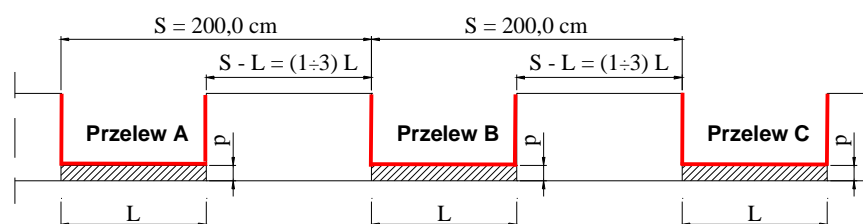
Fot. 5.2. Sondy opornościowe z układem kompensacyjnym

5.2. Przyjęty zakres badań na modelu hydraulicznym. Przypadki badawcze

Dla określonego natężenia dopływu wody do koryta bezpośrednie pomiary na modelu dotyczyły położenia zwierciadła wody i wartości składowych prędkości przepływu. Pomiary prowadzono w warunkach ruchu ustalonego w korycie; czas trwania badanych procesów hydrodynamicznych nie był parametrem badanym, a wszelkie zmienne opisujące proces przepływu w korycie nie były od czasu zależne.

Przyjmowano dwie wartości natężenia dopływu Q_0 do koryta hydraulicznego: $0,020 \text{ m}^3/\text{s}$ i $0,030 \text{ m}^3/\text{s}$. Eksperyment objął w sumie dwadzieścia cztery przypadki badawcze ujmujące trzy grupy serii pomiarowych, w każdej grupie po osiem serii. Pierwsza grupa dotyczyła badań działania pojedynczego przelewu bocznego, który został oznaczony jako przelew B (zob. rys. 5.1 i 5.2). W następnej kolejności przeprowadzono badania układu dwóch przelewów, B oraz A , przy czym przelew A fizycznie, na ścianie koryta, poprzedzał poprzednio badany przelew B . Ostatnia grupa serii pomiarowych dotyczyła szeregowego układu trzech działających równocześnie

przelewów bocznych, *A*, *B* oraz *C* (zob. ponownie rys. 5.1 lub 5.2). Wszystkie przelewy były przelewami prostokątnymi, o ostrej krawędzi (zgodnie z klasyfikacją podaną w rozdz. 4.1), pracującymi jako niezatopione. Współrzędne lewych krawędzi wycięcia przelewów nie były w trakcie badań zmieniane, przyjmowano natomiast dwie różne długości tych wycięć L (długości korony przelewu). Siłą rzeczy przy różnych układach przelewów różne były odległości między nimi (rys. 5.2); wynosiły one $(1 \div 3) L$. Różnicowano także wysokość korony przelewów p , czyli wzniesienie krawędzi wycięcia nad dno koryta dopływowego.



Rys. 5.2. Wycięcia badanych przelewów

Jak z powyższego wynika poszczególne ośmioseryjne grupy eksperymentów dotyczyły określonej liczby przelewów, a w ramach każdej z tych grup różnicowane były poszczególne parametry badanego układu obiektów. W tabeli nr 5.1 zestawiono wszystkie serie pomiarowe.

Realizując przyjęte cele badawcze zakresem doświadczeń objęto niżej wymienione kwestie.

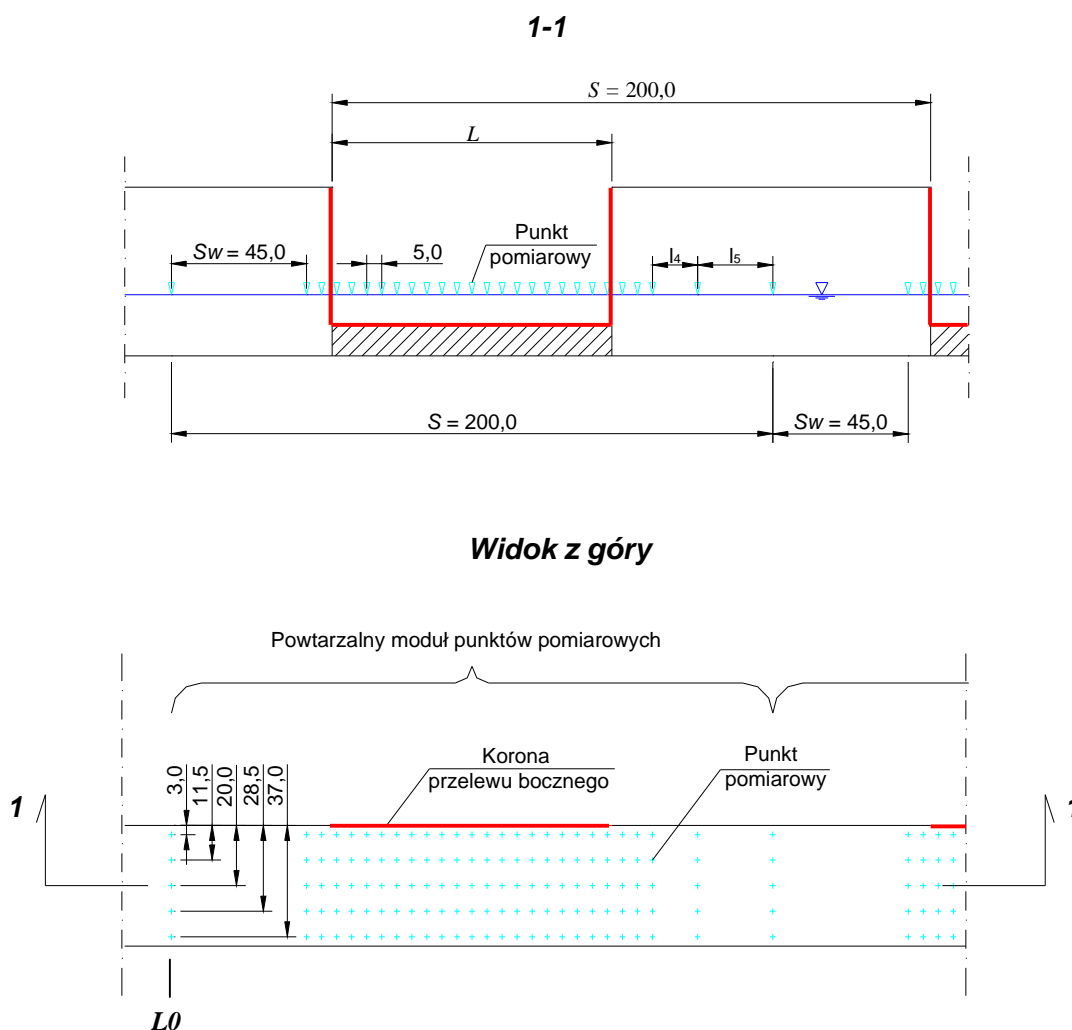
1. **Pomiar rzędnych** zwierciadła wody w korycie głównym (dopływowym) wzdłuż całego układu pracujących przelewów: *B*, *A-B*, *A-B-C*. Jak już wspomniano do tego celu użyto sond opornościowych z układem kompensacyjnym. Rysunki 5.2 oraz 5.3 pokazują układ punktów, w których dokonywano pomiaru rzędnych zwierciadła. Jak widać, rozmieszczenie tych punktów jest wzdłuż koryta powtarzalne i tworzy moduły pomiarowe o stałej długości S . Moduły te obejmują zawsze fragment koryta przed danym przelewem (odcinek S_w o stałej długości) oraz cały obszar wody w korycie bezpośrednio sąsiadujący z wycięciem przelewu. Na rysunku 5.3 pokazane jest dokładne rozmieszczenie punktów

pomiaru poziomego zwierciadła względem siebie, w przekrojach poprzecznym i podłużnym koryta.

Tabela. 5.1. Serie eksperymentów

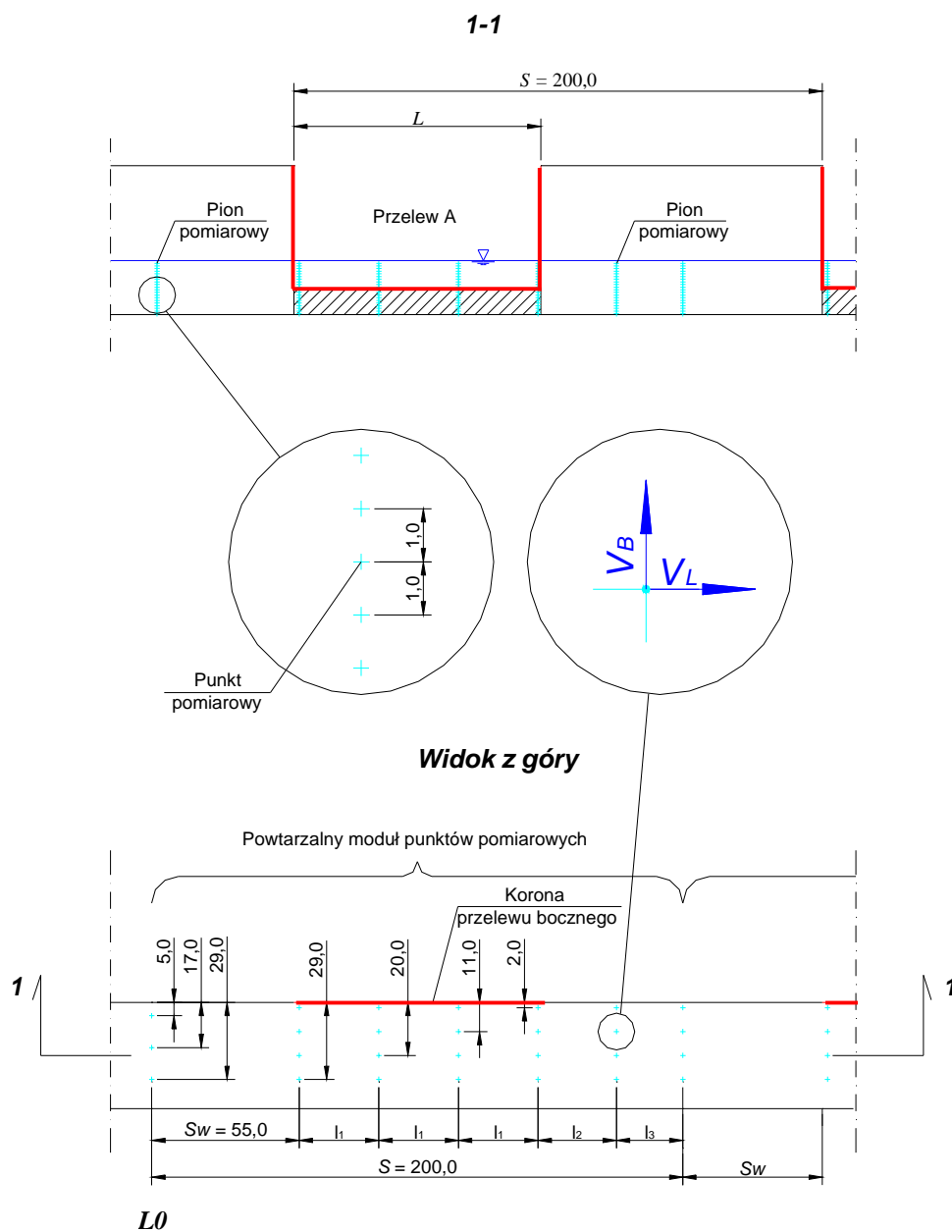
Seria	Liczba przelewów w układzie n	Parametry przelewu		Dopływ do koryta głównego Q_0
		L	p	
		cm	cm	dm ³ /s
1	1	93	10	30
2	1	93	10	20
3	1	93	15	20
4	1	93	15	30
5	1	50	10	30
6	1	50	10	20
7	1	50	15	20
8	1	50	15	30
9	2	93	10	30
10	2	93	10	20
11	2	93	15	20
12	2	93	15	30
13	2	50	10	30
14	2	50	10	20
15	2	50	15	20
16	2	50	15	30
17	3	93	10	30
18	3	93	10	20
19	3	93	15	20
20	3	93	15	30
21	3	50	10	30
22	3	50	10	20
23	3	50	15	20
24	3	50	15	30

2. **Pomiar średniej prędkości** przepływu wody w korycie dopływowym przy różnych układach i wymiarach pracujących przelewów bocznych. Pomiarów dokonywano punktowo używając - zgodnie z tym co powiedziano w punkcie 5.1 - sondy ADV-Lab2D, pracującej przy wykorzystaniu zjawiska Döpplera. Podobnie jak przy pomiarze rzędnych zwierciadła wody tak i tu ustalono pewne moduły pomiarowe, zawierające określoną liczbę przekrojów poprzecznych koryta, w których rejestrowano wartości prędkości przepływu. Na długości koro-



Rys. 5.3. Punkty pomiaru rzędnych zwierciadła wody w korycie (wymiały w cm)

ny każdego z przelewów znajdowały się cztery takie przekroje, przy czym pierwszy z nich usytuowany był zawsze na początku przelewu, a ostatni zawsze na jego końcu. Z uwagi na to, że przyjmowano różną długość korony przelewów, odległości l_i pomiędzy przekrojami pomiarowymi prędkości były różne. Z kolei pomiędzy sąsiednimi przelewami w szeregu zawsze umieszczano dwa przekroje pomiarowe, a przed przelewem, który występował jako pierwszy (przy przelewie pojedynczym był to naturalnie przelew jedyny) zakładano jeden taki przekrój. Wspomniany moduł pomiarowy zaczynał się na tym właśnie przekroju, a kończył na takimże, lecz dla przelewu następnego (patrz rysunek 5.4). Układ punktów, w których mierzona była prędkość przepływu, tak w pionie jak i wzdłuż danego przekroju poprzecznego koryta, pokazano na rysunku 5. 4.



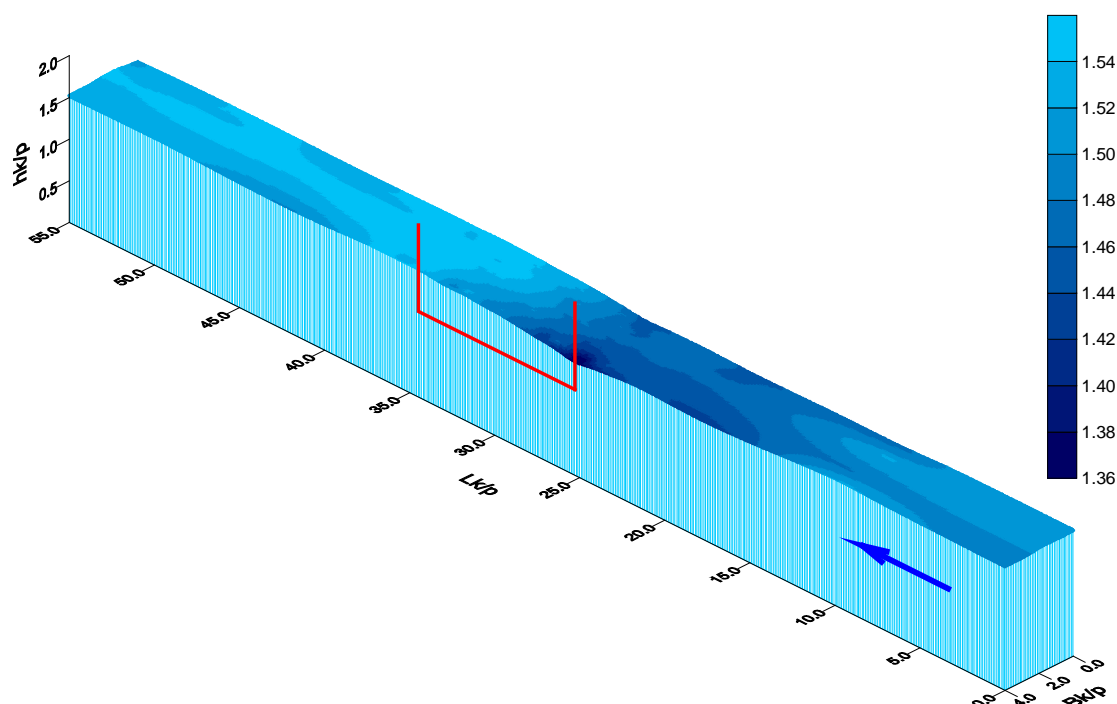
Rys. 5.4. Punkty pomiaru prędkości przepływu wody w korycie (wymiary w cm)

5.3. Rezultaty eksperymentów

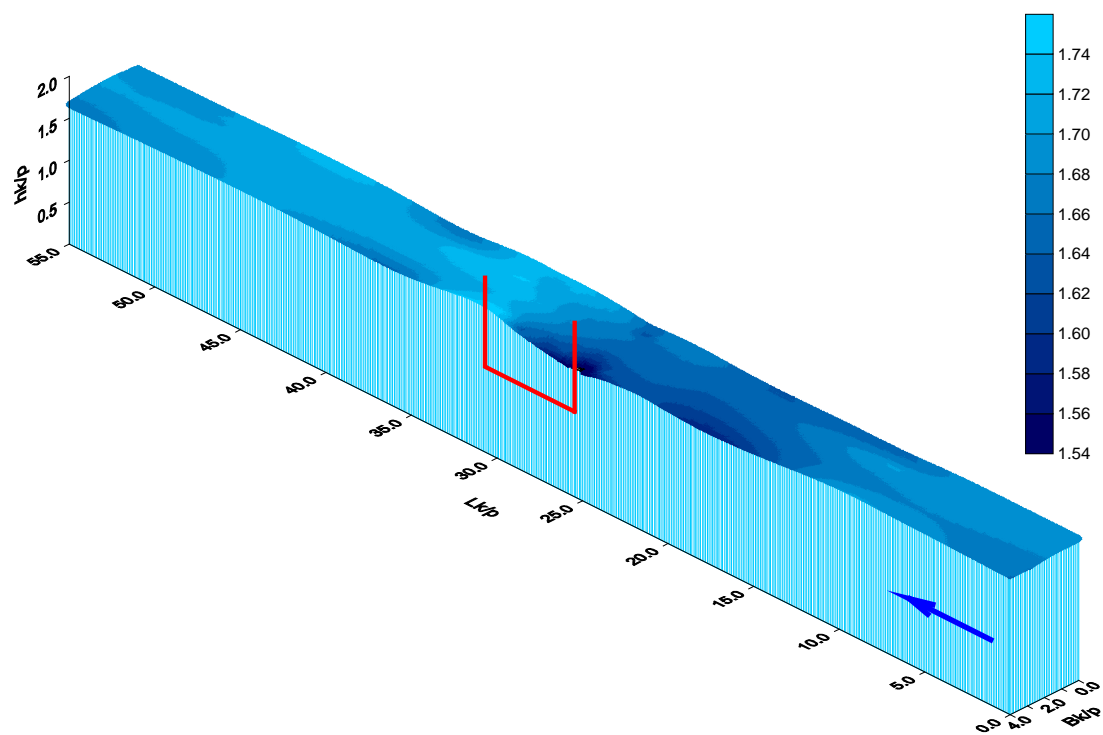
5.3.1. Przestrzenny układ zwierciadła wody w obszarze wpływu przelewów

Uzyskane z pomiarów dane dotyczące układu zwierciadła wody w korycie z działającymi przelewami bocznymi posłużyły do wygenerowania przestrzennego obrazu tego układu. Jego graficzną wizualizację umożliwił program Surfer 6.04. Została ona dokonana dla wszystkich serii pomiarowych, przy czym w zasadniczym tekście pracy zamieszczono jedynie wybrane, najbardziej interesujące przypadki (rys. od 5.5 do 5.16). Pozostały materiał został ujęty w załączniku.

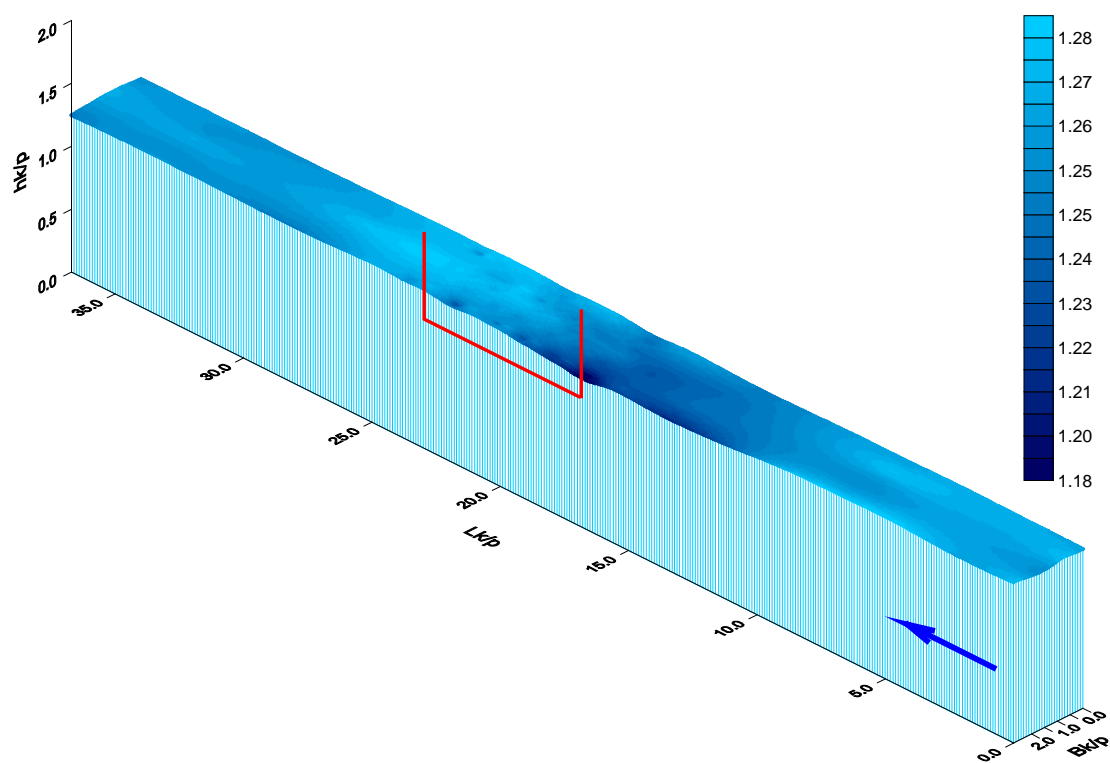
W przypadku każdego z rysunków na osi pionowej zaznaczono bezwymiarowe wartości napęnienia w korycie. Wielkością charakterystyczną służącą do normalizacji tych napęnień była wysokość korony przelewu p . Oś podłużna w płaszczyźnie dna koryta jest osią długości bezwymiarowych, zaś na osi poprzecznej odkładano bezwymiarowe szerokości koryta dopływowego. Czerwoną linią zaznaczone jest wycięcie przelewu, a przestrzenny układ rzędnych zwierciadła wody zaznaczony został odpowiednio dobraną skalą barw.



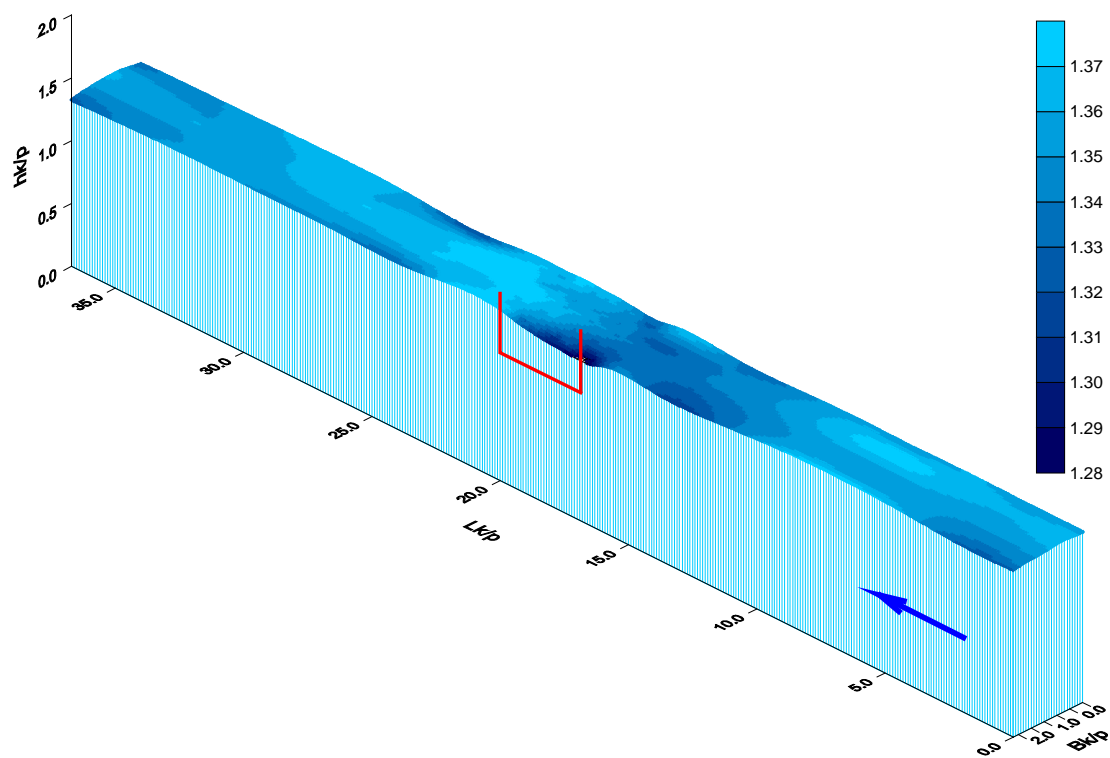
Rys. 5.5. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 1



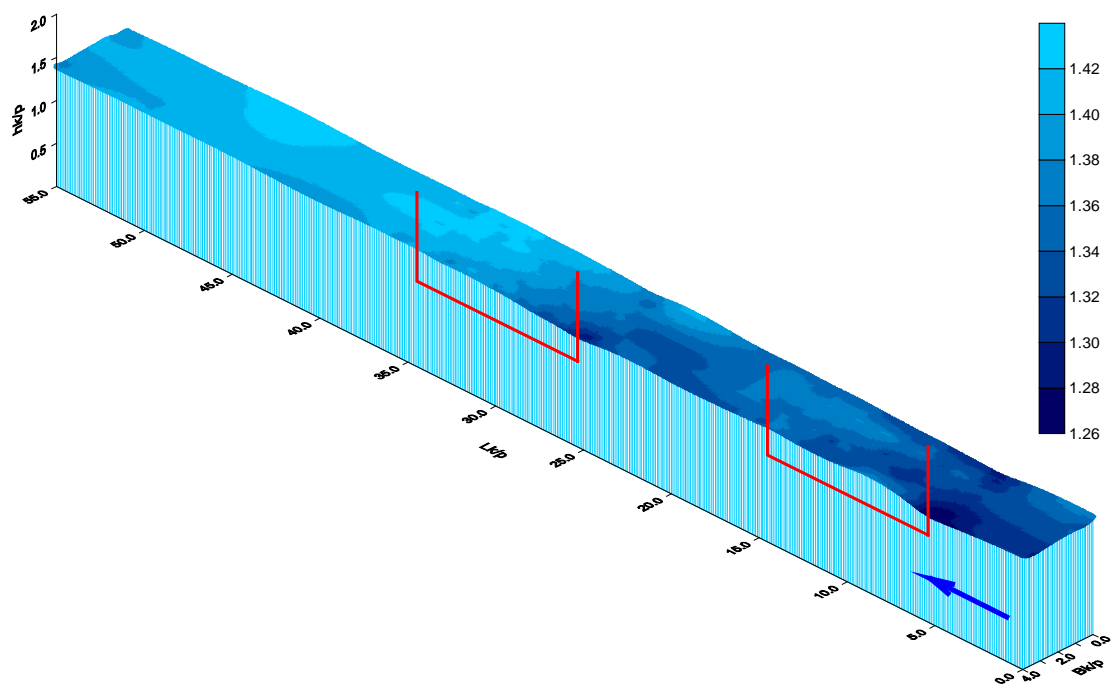
Rys. 5.6. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 5



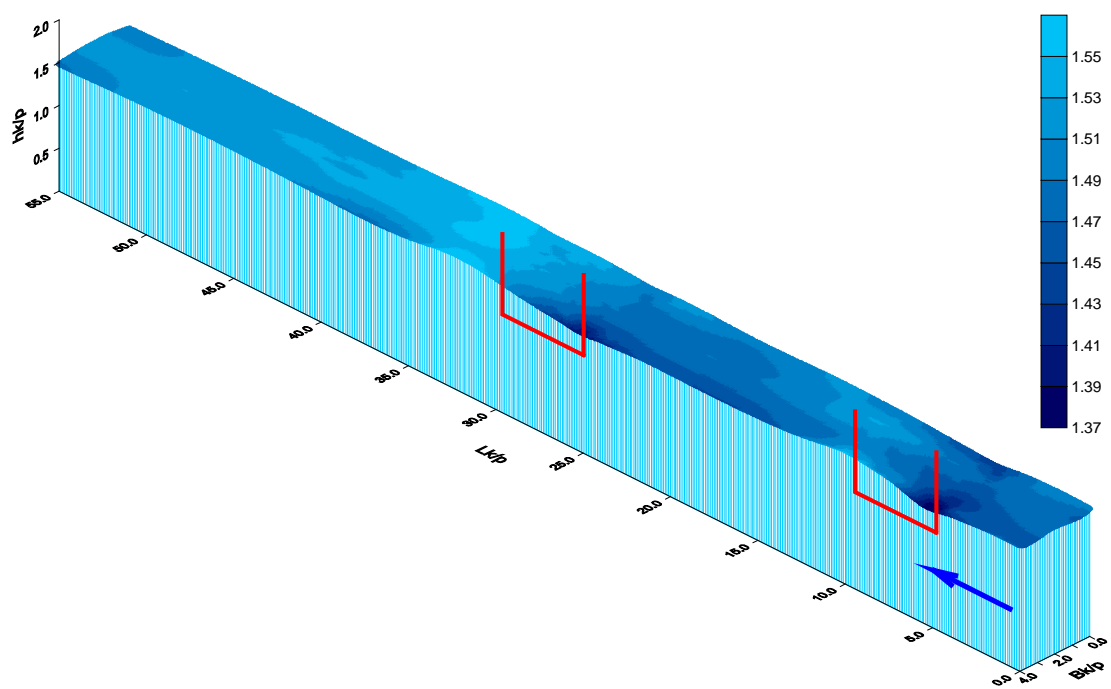
Rys. 5.7. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 4



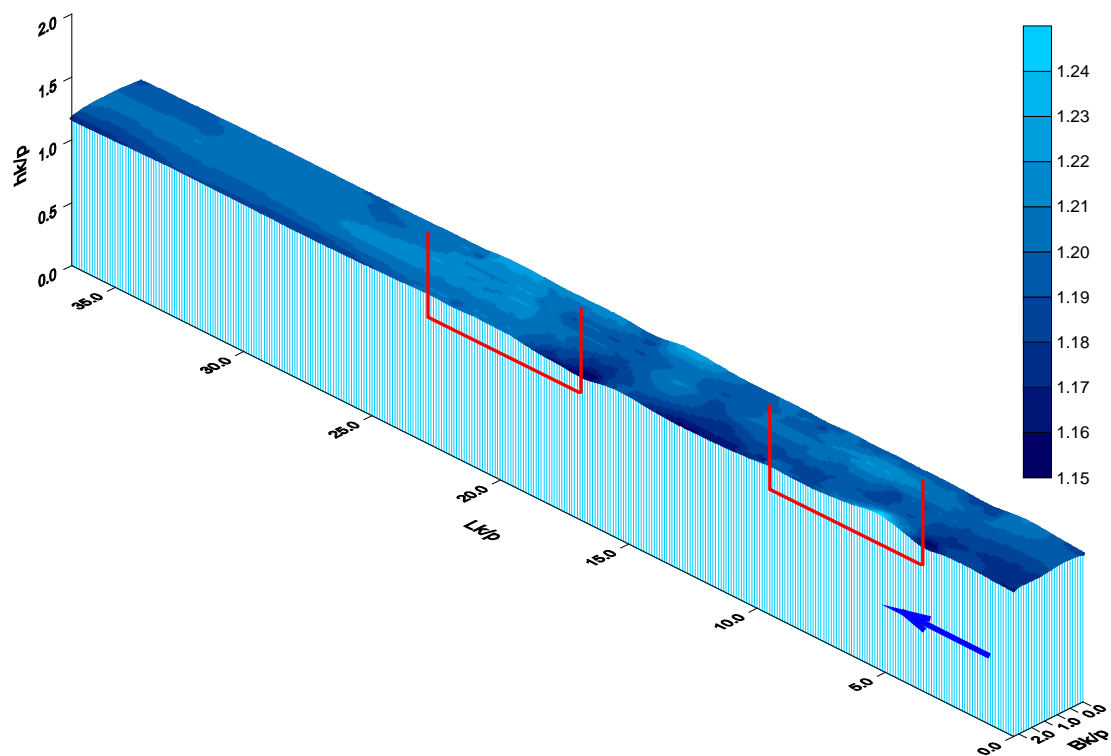
Rys. 5.8. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 8



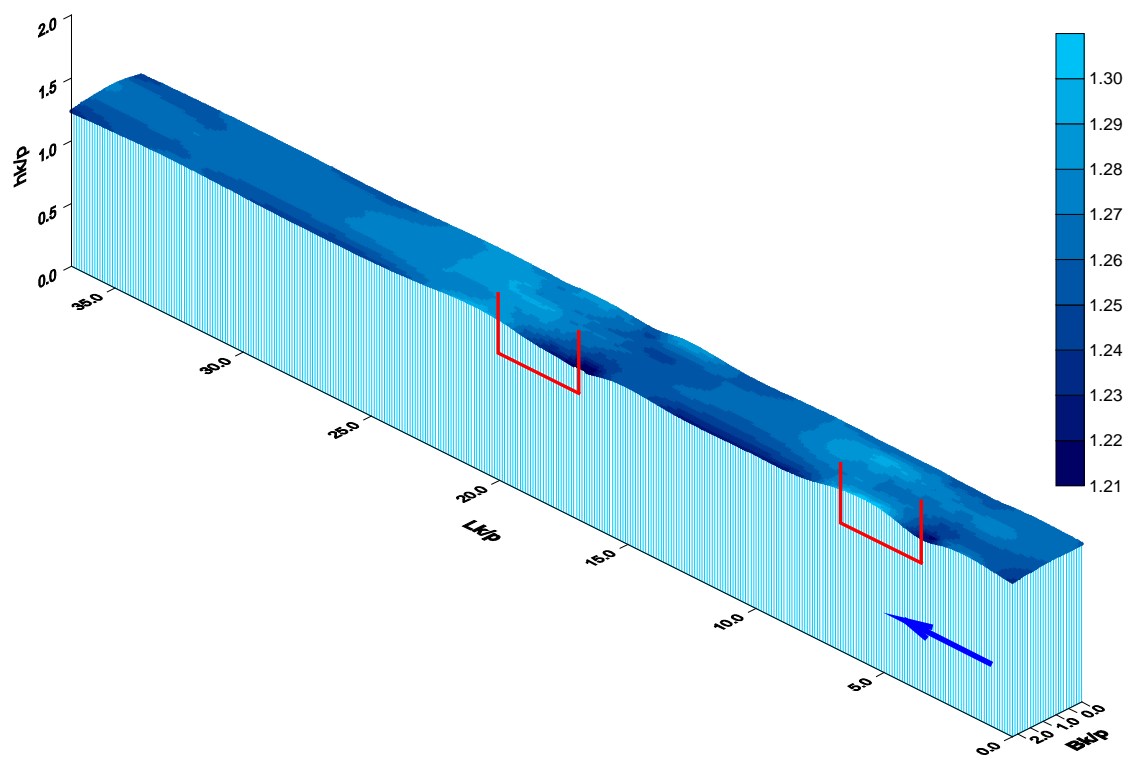
Rys. 5.9. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 9



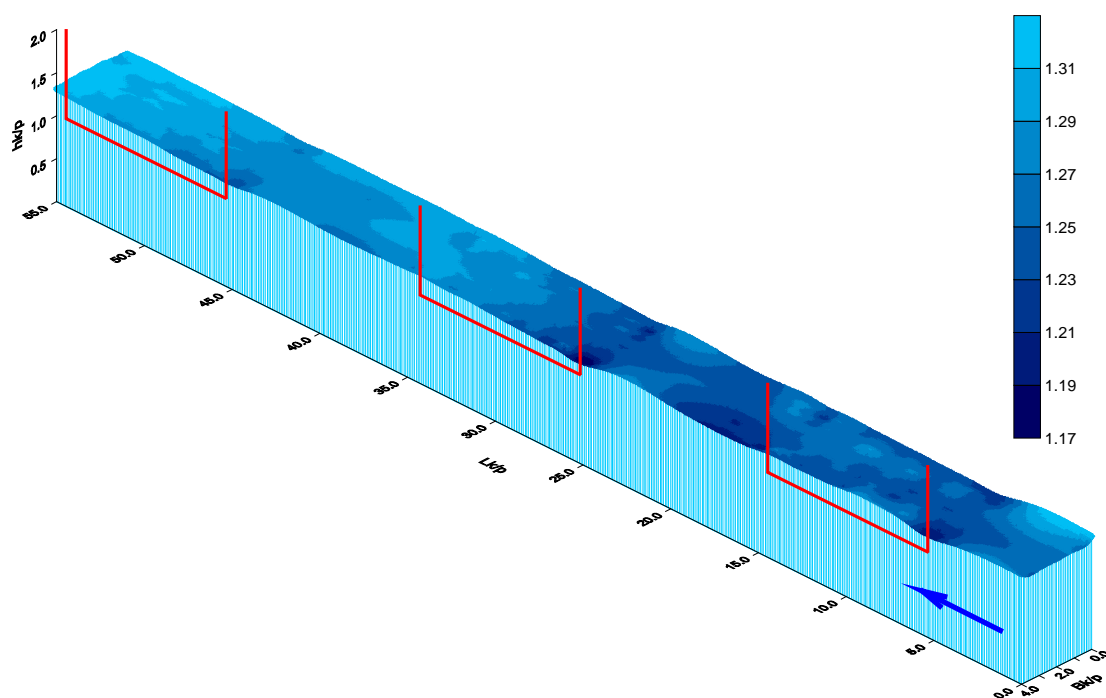
Rys. 5.10. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 13



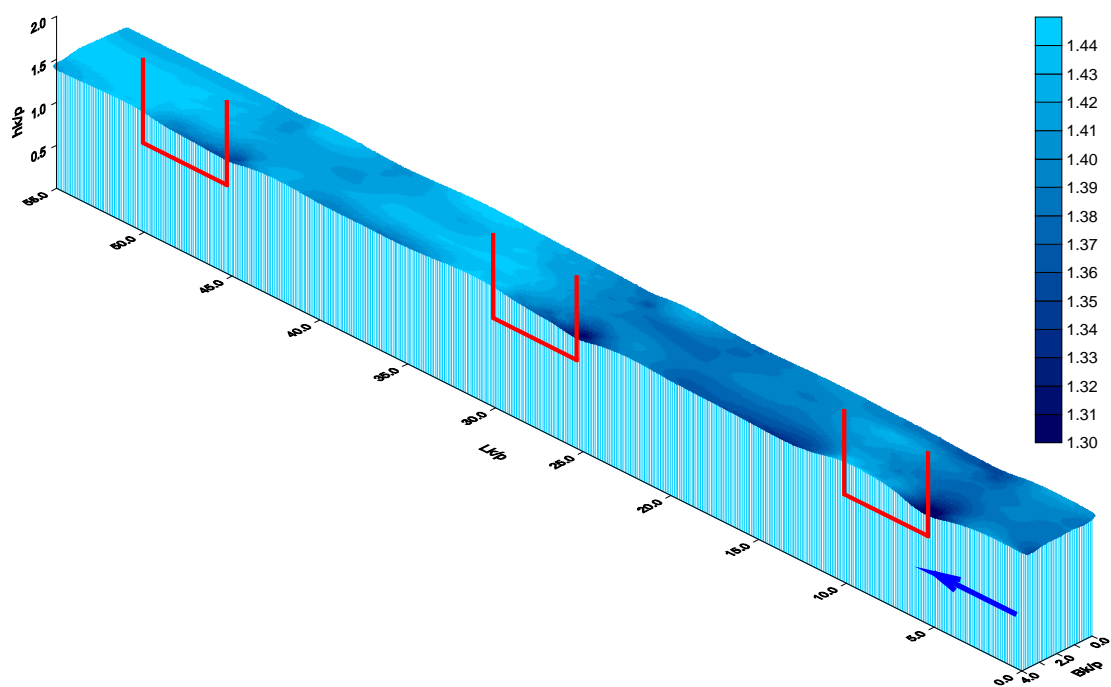
Rys. 5.11. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 12



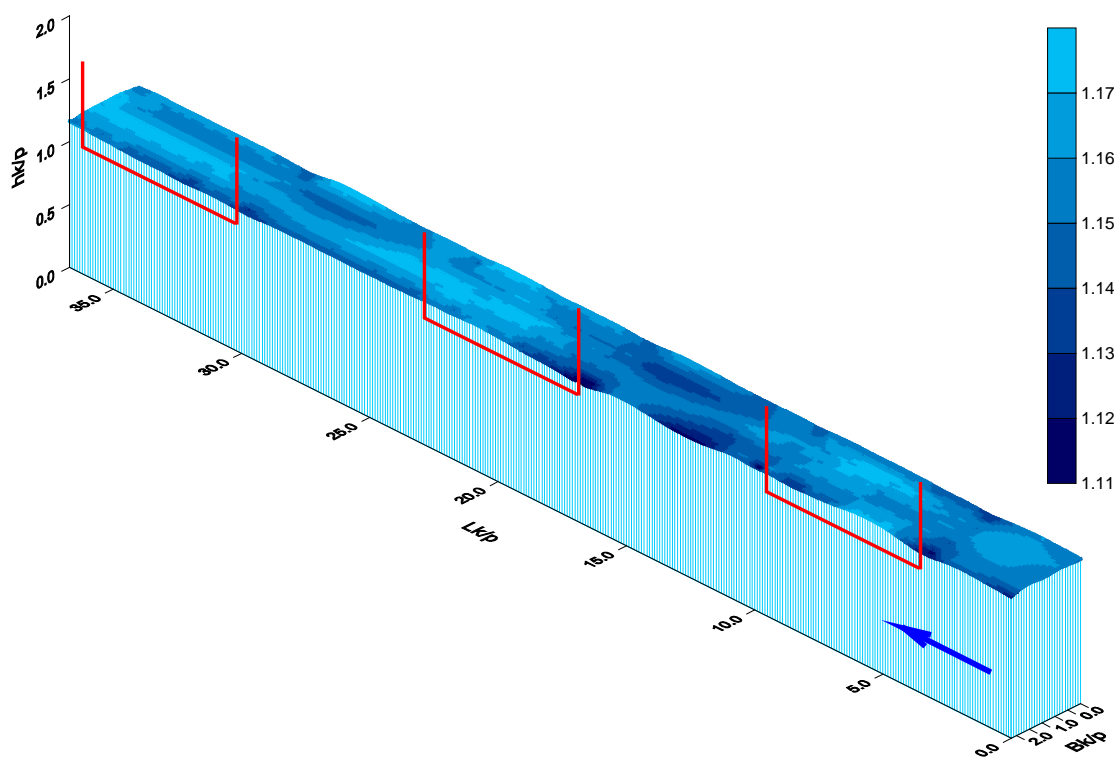
Rys. 5.12. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 16



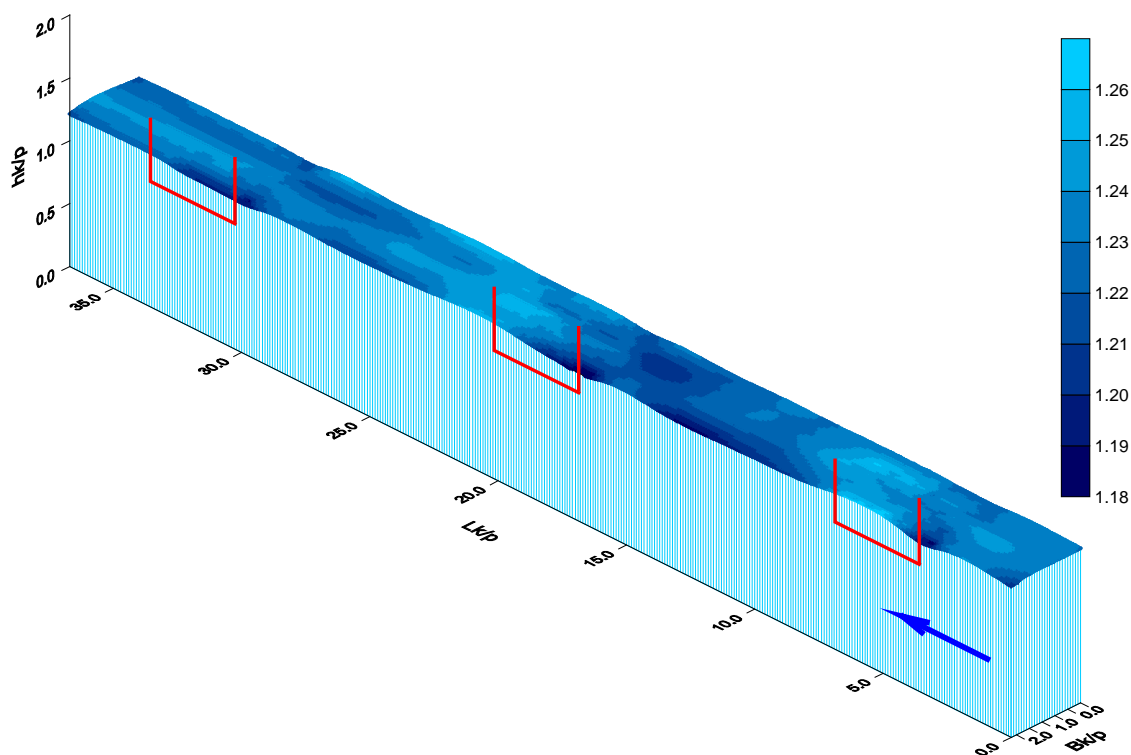
Rys. 5.13. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 17



Rys. 5.14. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 21



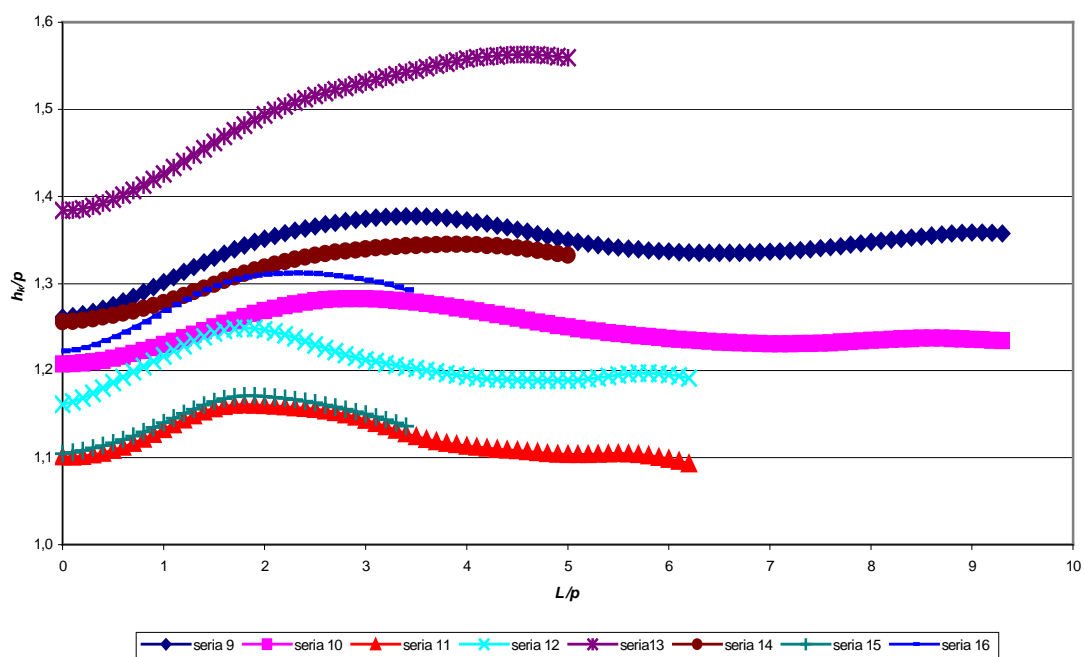
Rys. 5.15. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 20



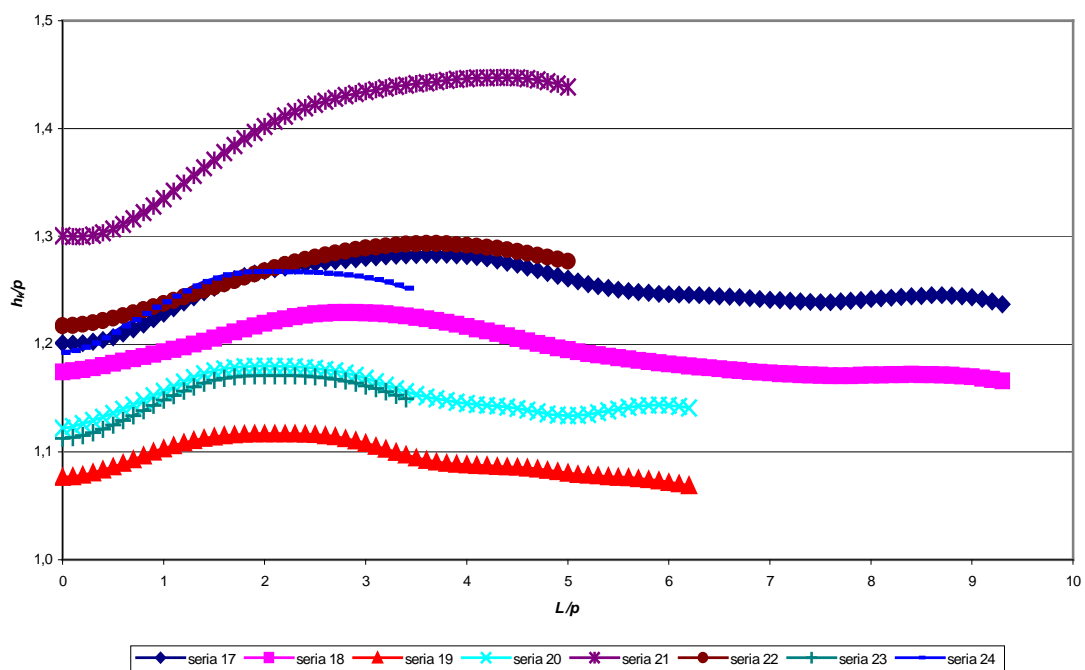
Rys. 5.16. Przestrzenny układ zwierciadła wody: seria 24

We wszystkich seriach pomiarowych odnotowano wznoszenie się zwierciadła wody na długości korony przelewu bocznego. Jest to zgodne z teoretycznymi przewidywaniami odnośnie obrazu ruchu spokojnego w korycie przed przelewem. Również we wszystkich badanych przypadkach zarejestrowano gwałtowne obniżenie zwierciadła wody na początku każdego z pracujących przelewów. Na długości krawędzi wycięć obserwowane było spiętrzenie zwierciadła, początkowo gwałtowne, później coraz bardziej łagodne. W przypadku przelewów otwierających szereg dwu lub trzech wycięć widoczne jest maksimum poziomu zwierciadła na przelewie, występujące w odległości $(2\div 3)p$ mierząc od początku wycięcia (fakt ten pokazują wyraźnie zamieszczone niżej rysunki 5.17 i 5.18). W pozostałych przypadkach nie jest to już tak wyraźne.

Przy powiększaniu liczby przelewów bocznych w szeregu widoczne było coraz większe falowanie zwierciadła wzdłuż koryta. Zwiększenie liczby przelewów z jednego do dwóch, a następnie z dwóch do trzech, powoduje wyraźną redukcję napętnienia wzdłuż koryta głównego. Efekt ten jest naturalnie oczekiwany, ale jak okaże się później,



Rys. 5.17. Układ zwierciadła wody w płaszczyźnie ściany przelewu A2



Rys. 5.18. Układ zwierciadła wody w płaszczyźnie ściany przelewu A3

w połączeniu z występującymi zmianami prędkości w korycie suma wydatków układu przelewów nie jest tak znaczna, jak można byłoby się spodziewać na podstawie analizy samych zmian głębokości w korycie.

Daje się zauważyć wyraźna zmiana układu zwierciadła wody w obszarze leżącym bezpośrednio przed przelewem. Zmiany te zachodzą coraz łagodniej, w miarę, jak powiększa się liczba przelewów w szeregu.

5.3.2. Oddziaływanie przelewów na pole prędkości przepływu

Wszystkie pomierzone na modelu wartości prędkości przepływu sprowadzono do wartości bezwymiarowych, przyjmując za prędkość odniesienia średnią prędkość przepływu v_0 w przekroju początkującym koryta dopływowe. Przy zmianie natężenia dopływu do koryta (jak wspomniano w punkcie 5.2 ustalane były dwie wartości tego dopływu) następowała naturalnie zmiana prędkości v_0 . Postępując jak poprzednio, zamieszcza się w tym rozdziale niektóre rysunki z wybranymi, otrzymanymi z badań rozkładami prędkości, zachowując pozostałe w załączniku do pracy.

Wspomniane rozkłady prędkości przepływu (pola prędkości) odnoszą się po pierwsze do prędkości podłużnej wzdłuż koryta, po drugie do prędkości poprzecznej w kierunku wycięcia przelewu. Zarówno w pierwszym jak i drugim przypadku konieczne są w tym miejscu szersze objaśnienia.

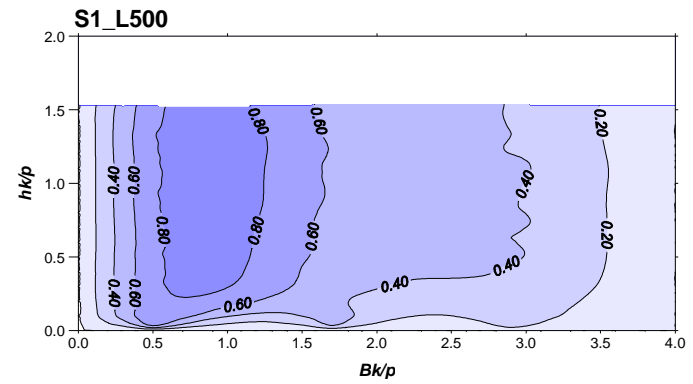
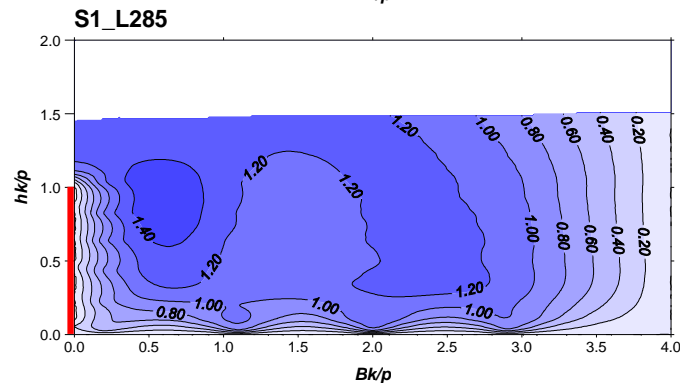
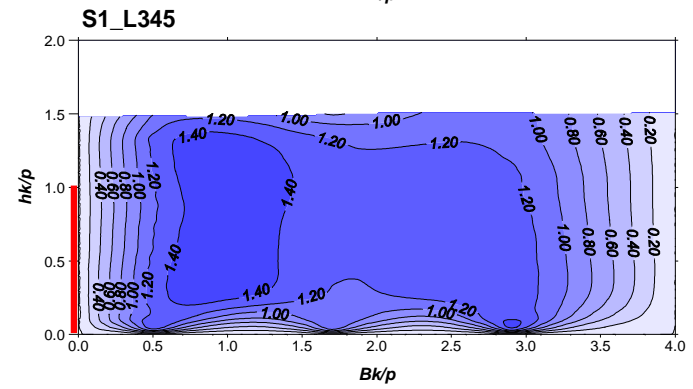
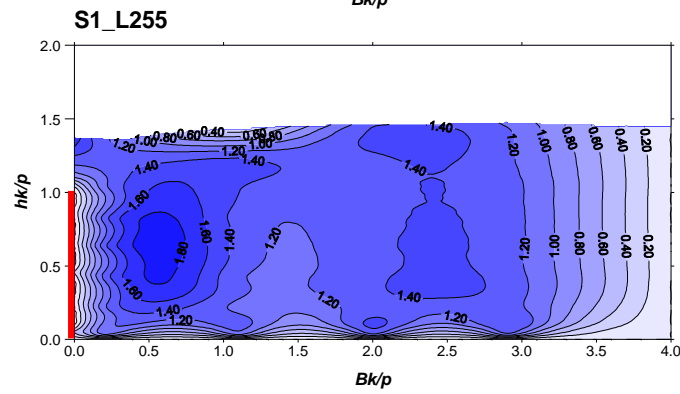
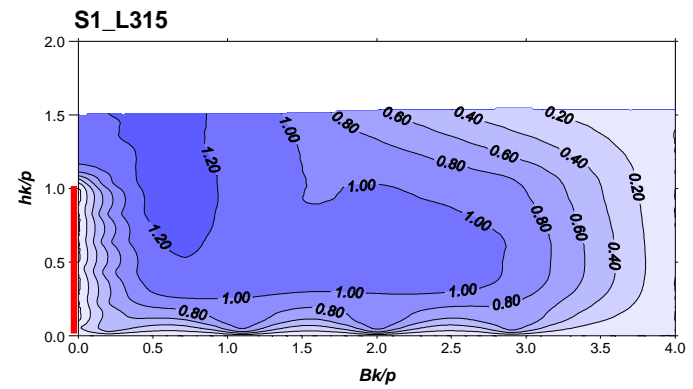
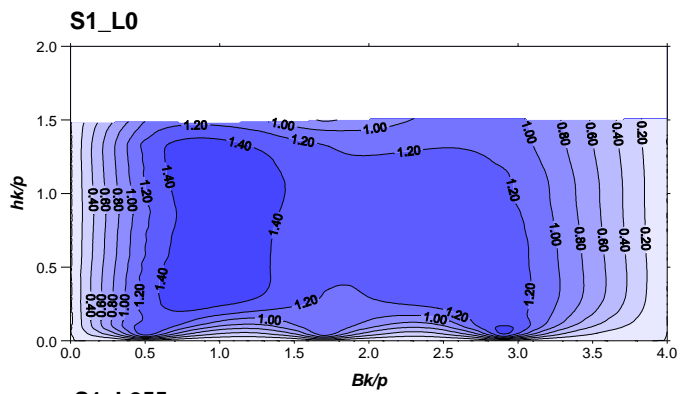
Na rysunku 5.4 pokazano rozmieszczenie punktów pomiarowych w korycie. Wyznaczając pola prędkości podłużnej wzdłuż koryta, pokazano je w kilku płaszczyznach prostopadłych do ściany koryta. Opis rysunków 5.19 – 5.30 ujmuje to w sposób następujący. Litera S z liczbą oznacza serię pomiarową (np. S_6), litera L z liczbą mówi, że chodzi o określoną płaszczyznę przecinającą prostopadle koryto (liczba przy literze L informuje o odległości położenia danej płaszczyzny od pierwszej płaszczyzny pomiarowej umieszczonej na samym początku układu przelewów – zob. L_0 na rys. 5.4; liczba np. 285 określa, że pokazane pole prędkości istnieje w płaszczyźnie oddalonej od płaszczyzny L_0 o 285 cm na modelu, L_{300} oznacza, że pole prędkości odległe jest od pola L_0 o 300 cm, itd.) Jak pokazuje rysunek 5.4 zawsze mamy do czynienia z jedną płaszczyzną pomiarową przed danym przelewem, czterema płaszczyznami w obrębie przelewu i jedną za przelewem. Płaszczyzny te tworzą moduł pomiarowy.

Co do pól prędkości poprzecznych w kierunku prostopadłym do przelewu (rysunki 5.31 – 5.36), oznaczenia są analogiczne. Dla przykładu: *B11* oznacza, że przekrój pomiarowy wzdłuż przelewu oddalony był od niego o 11 cm, *B29* jest przekrojem podłużnym koryta odległym od przelewu o 29 cm, itd. (zob. rys. 5.4).

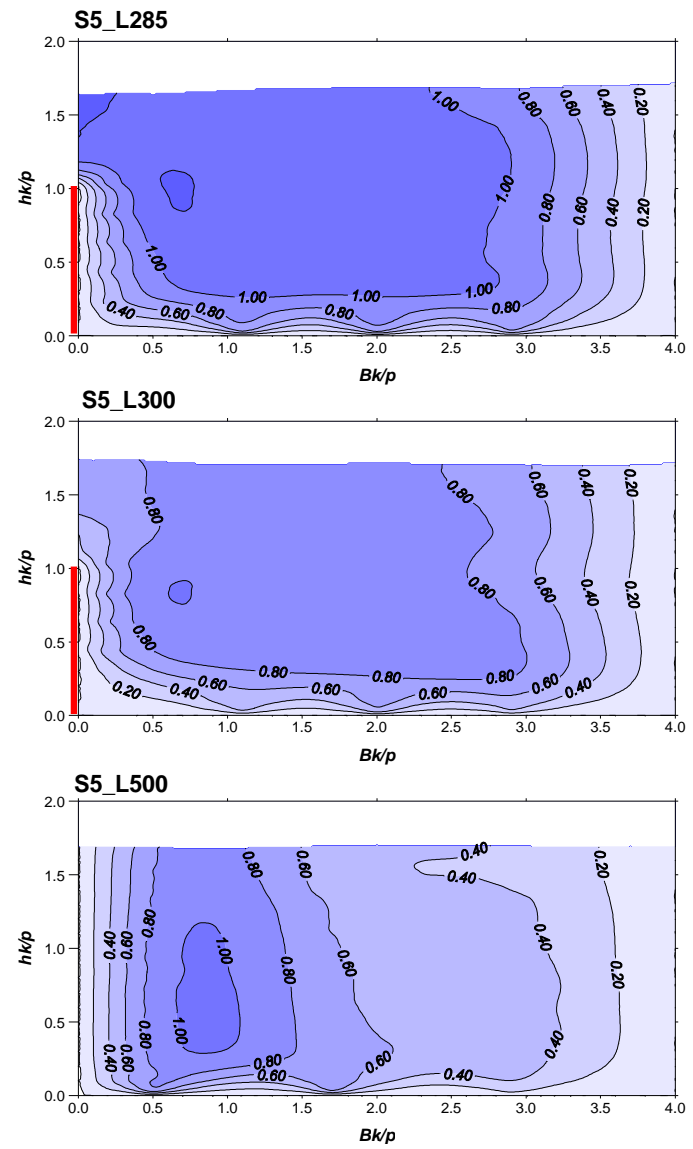
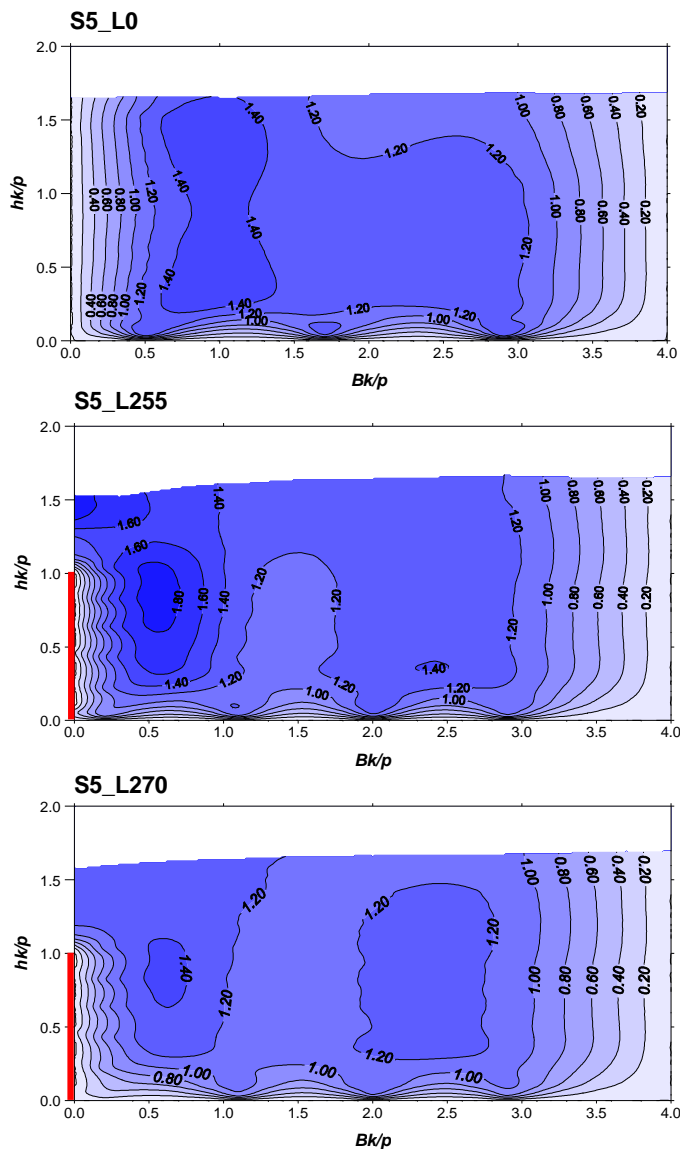
Jak wynika z rysunków 5.19 – 5.30 pola prędkości podłużnej wykazują znaczną koncentrację przy ścianie koryta, w której umieszczone są przelewy. Izotachy ulegają znacznej deformacji w obszarze przyległym do przelewu, przy czym deformacje te są tym większe, im krótsza jest długość korony przelewu L . Widać, że prędkości w obrębie przelewów wyraźnie przekraczają średnią prędkość dopływu do koryta. Zmniejszenie długości korony przelewu w pewnym stopniu likwiduje te dysproporcje.

Przy dwóch działających przelewach w szeregu sumaryczny odpływ rozdziela się na dwa wycięcia i rozkład prędkości w obszarze drugiego przelewu wygląda zupełnie inaczej niż gdyby był on przelewem pojedynczym, pojawiają się wyraźne wiry, a prędkości znacznie się różnicują. Po skróceniu długości korony przy obydwu przelewach w układzie formują się wyraźne dwa nurty wzdłuż koryta głównego. Przy trzech przelewach w szeregu zmniejszenie długości korony nie zmienia obrazu ruchu wody; wspomniane dwa nurty pozostają i dominują w obszarze przepływu.

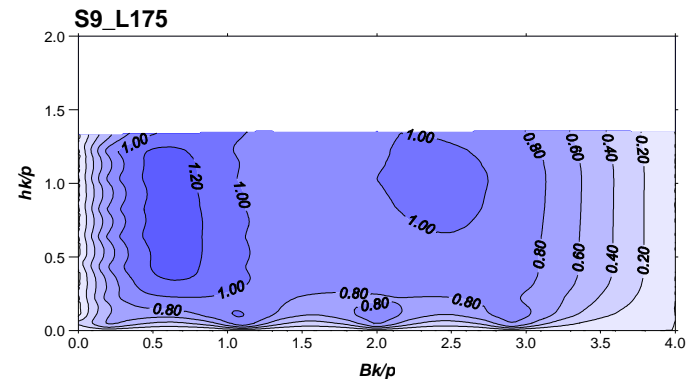
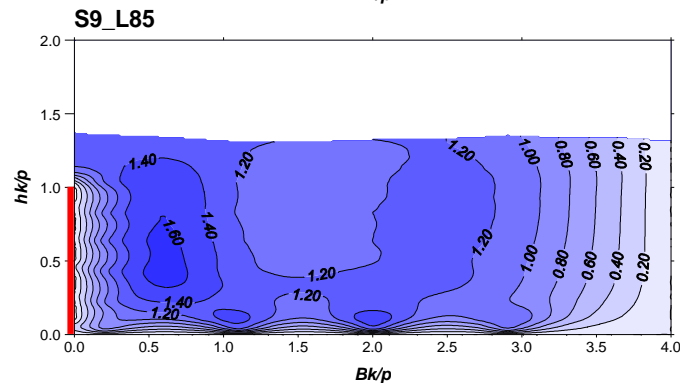
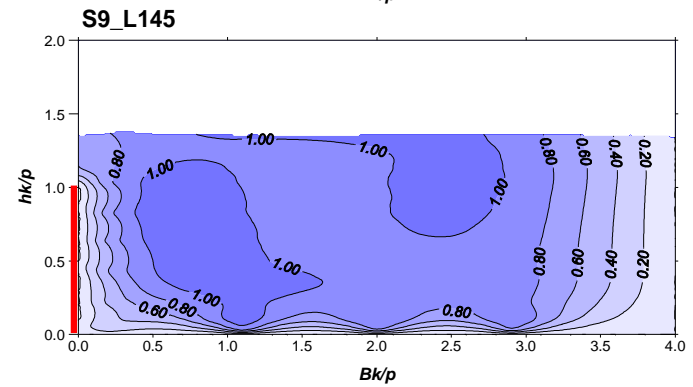
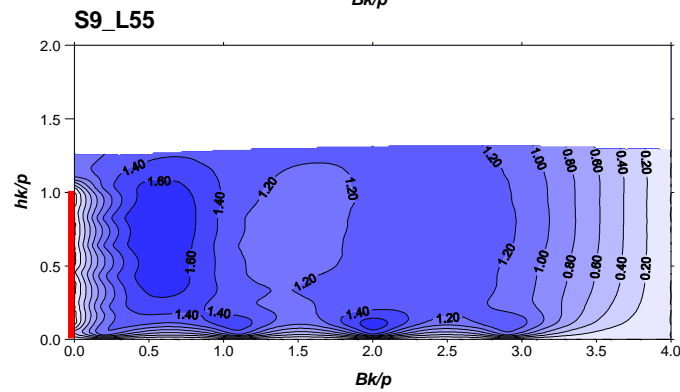
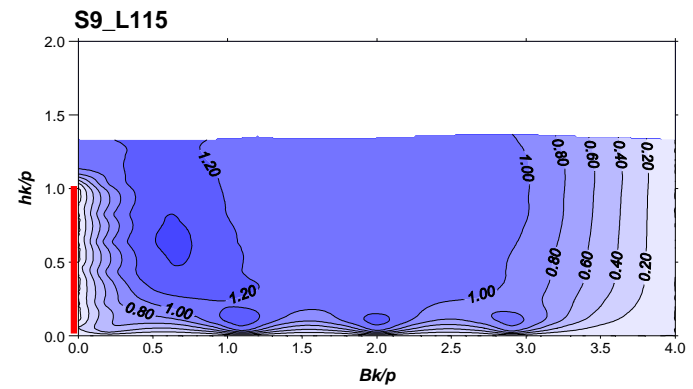
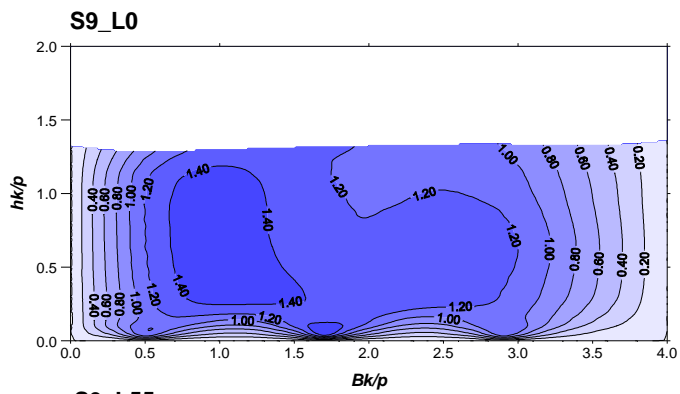
Rys. 5.19. Pola prędkości podłużnej v/V_0 : seria 1, przelew B



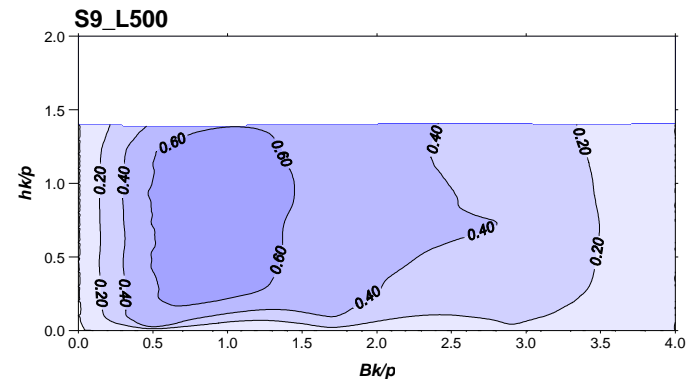
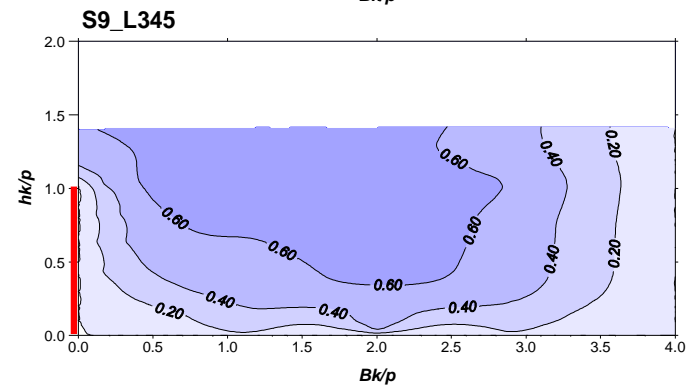
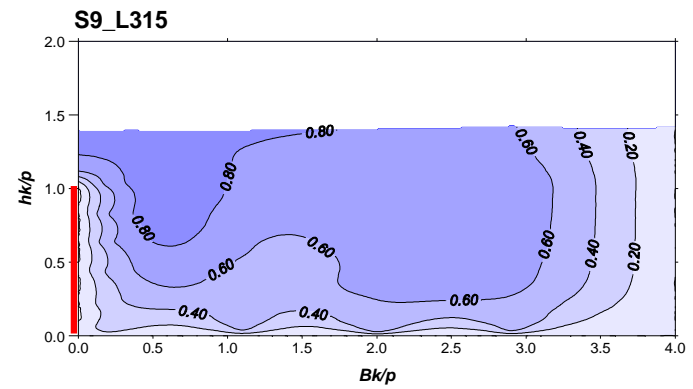
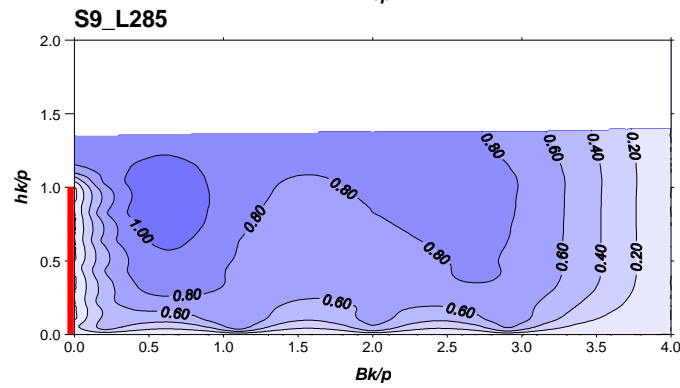
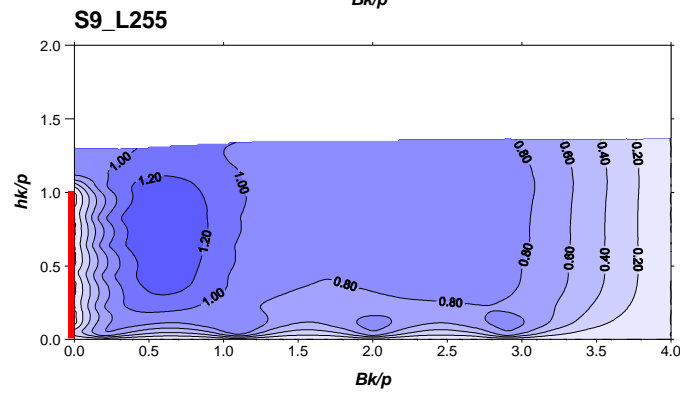
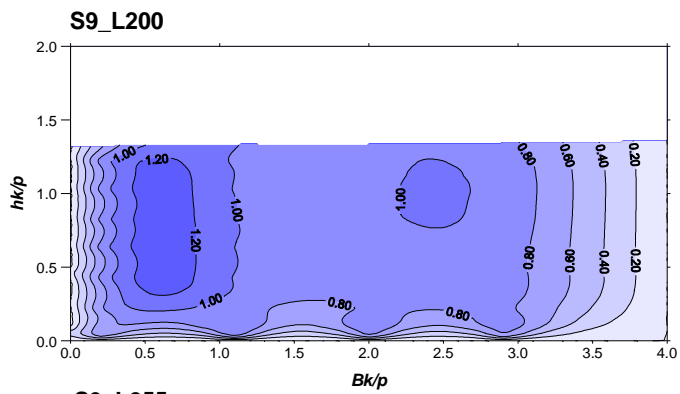
Rys. 5.20. Pola prędkości podłużnej v/V_0 : seria 5, przelew B



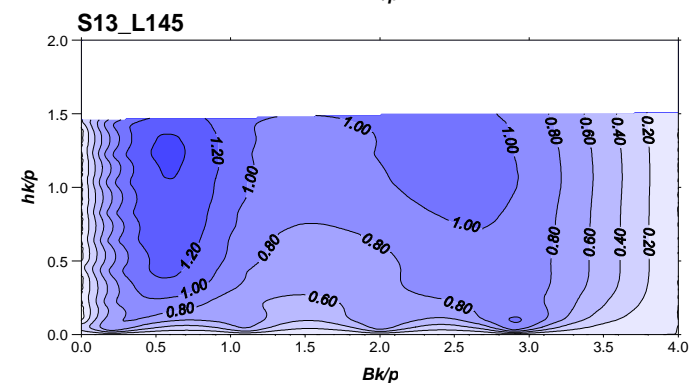
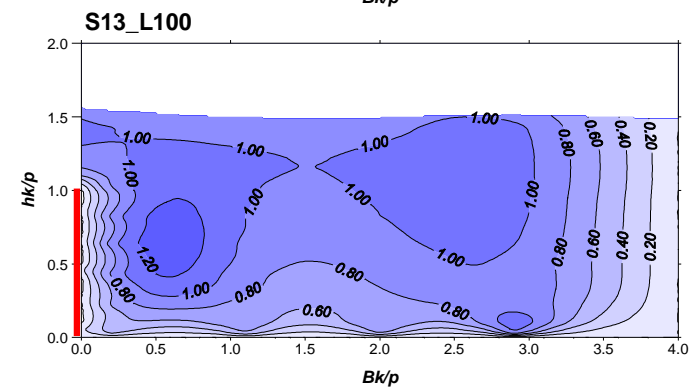
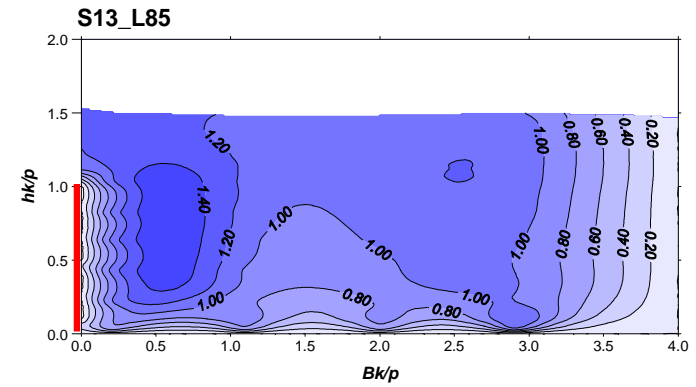
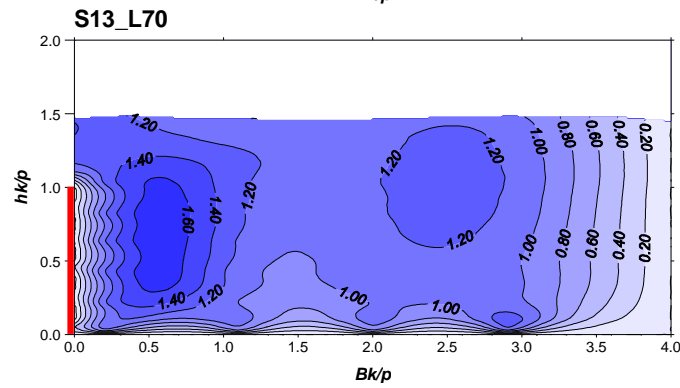
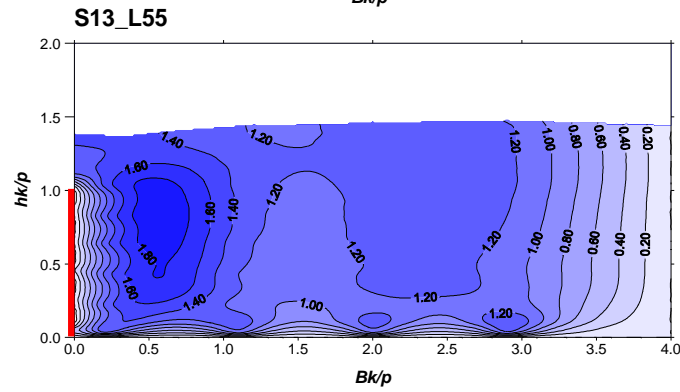
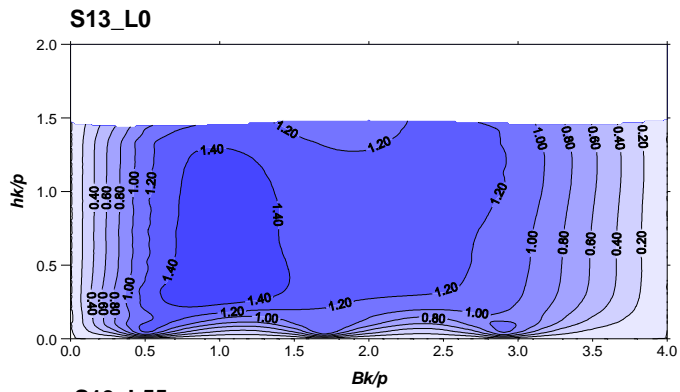
Rys. 5.21. Pola prędkości podłużnej v_L/v' : seria 9, przelew A



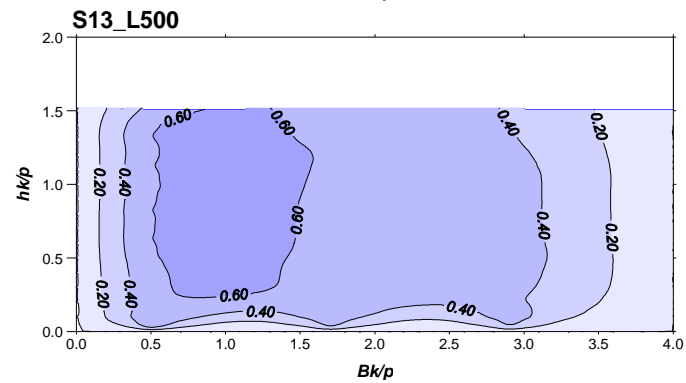
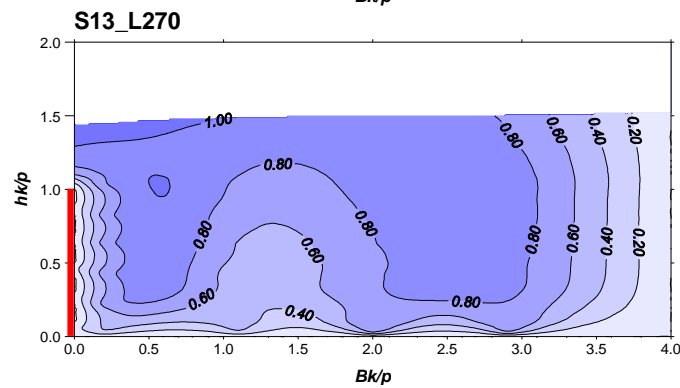
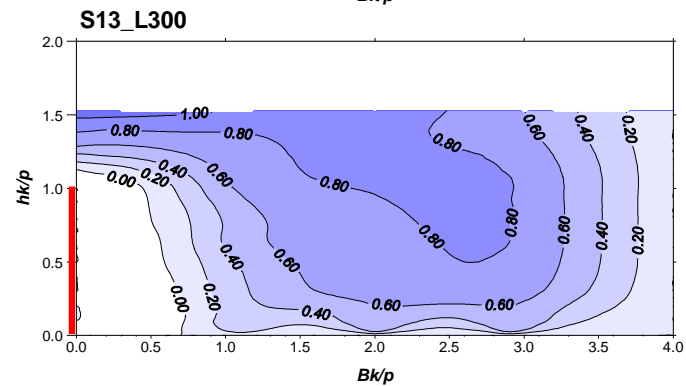
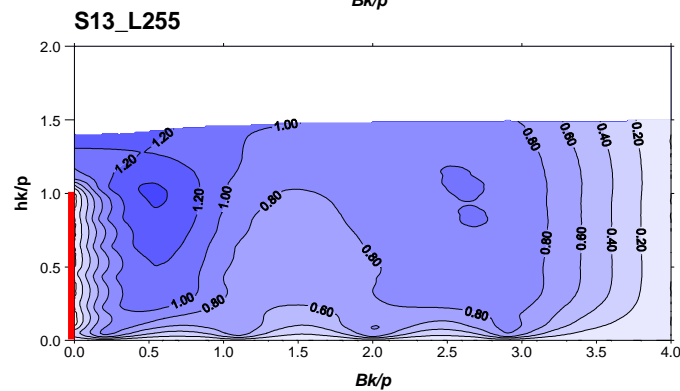
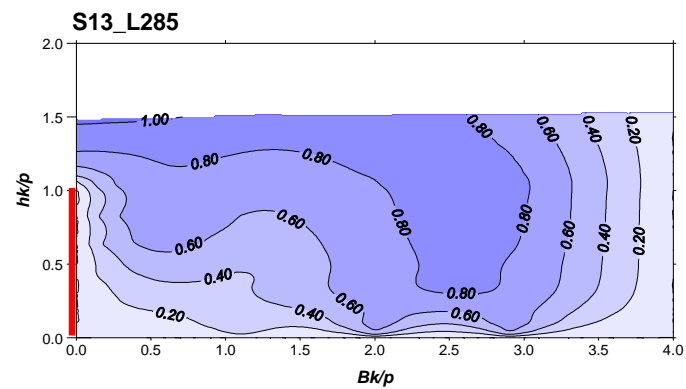
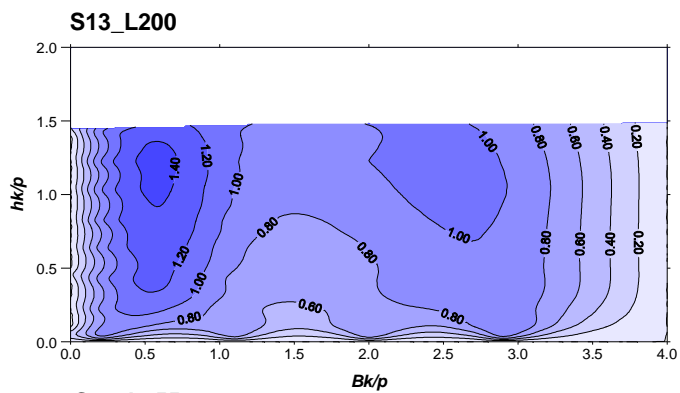
Rys. 5.22. Pola prędkości podłużnej v_L/v_0 : seria 9, przelew B



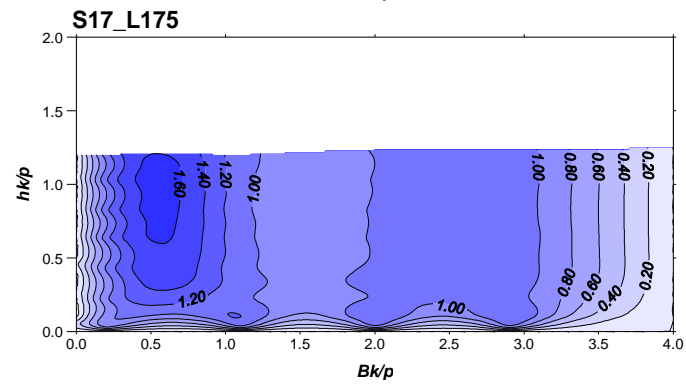
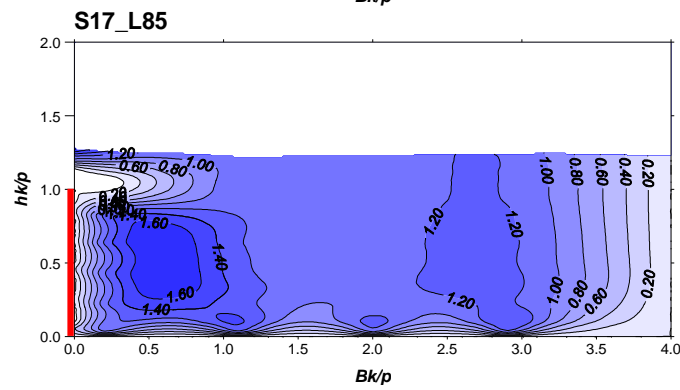
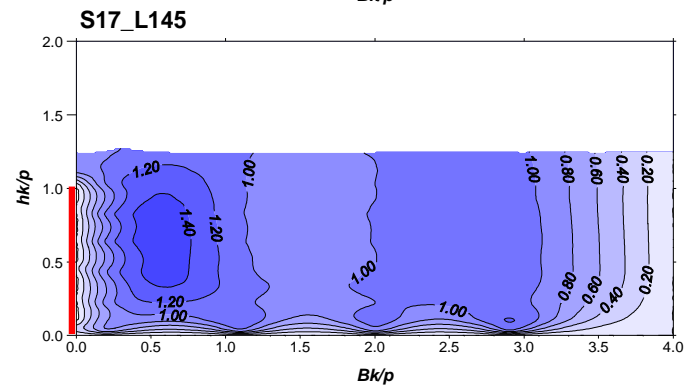
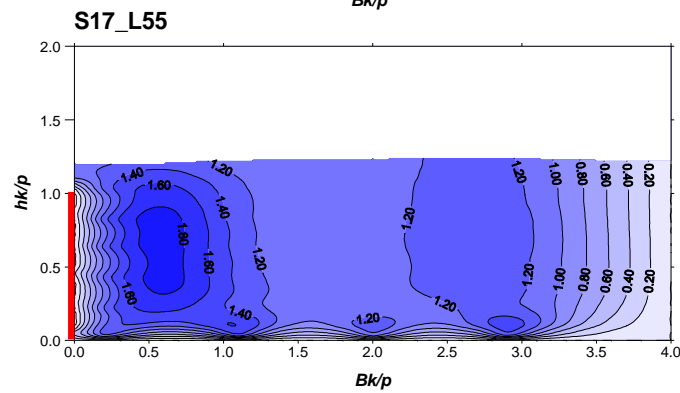
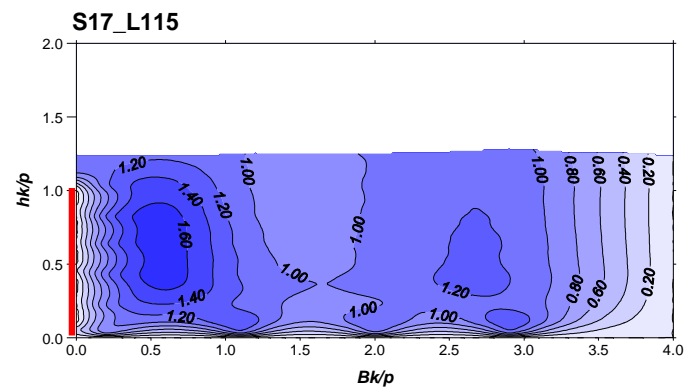
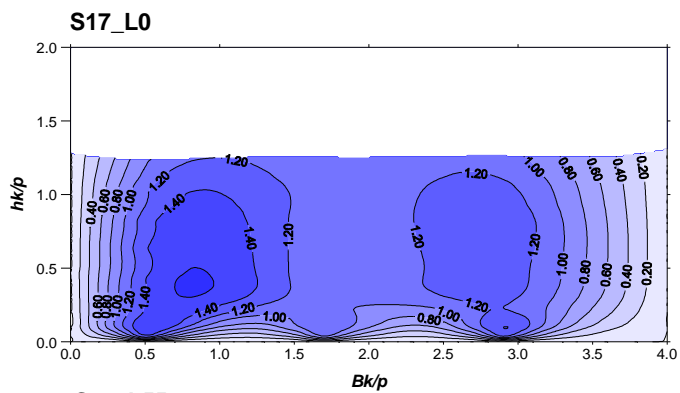
Rys. 5.23. Pola prędkości podłużnej v/V_0 : seria 13, przelew A



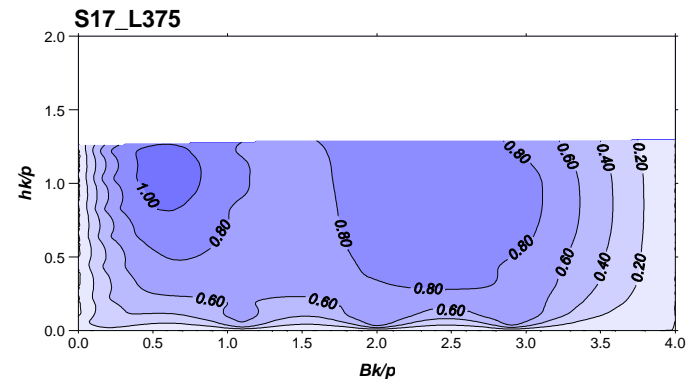
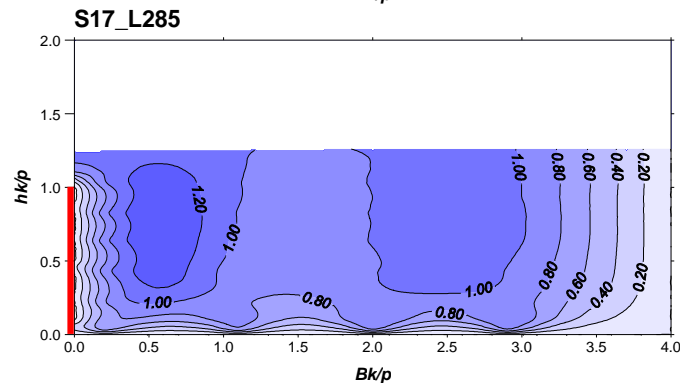
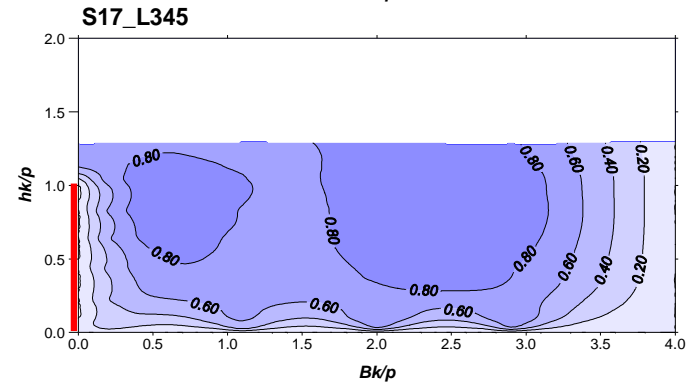
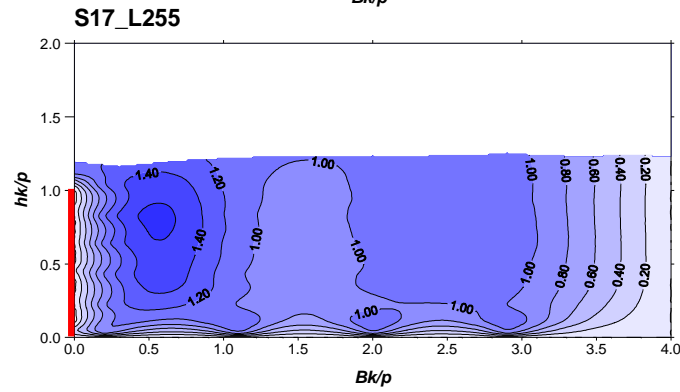
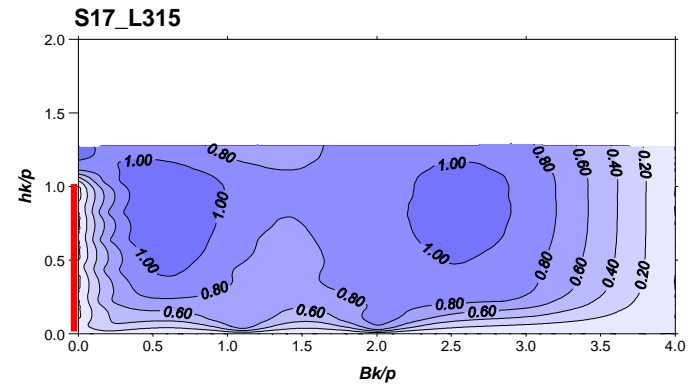
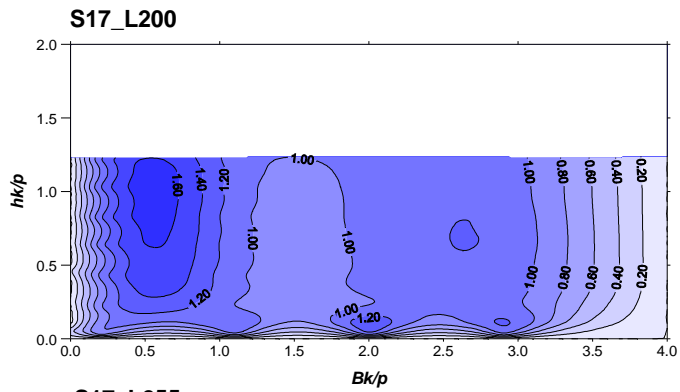
Rys. 5.24. Pola prędkości podłużnej v_L/v_0 : seria 13, przelew B



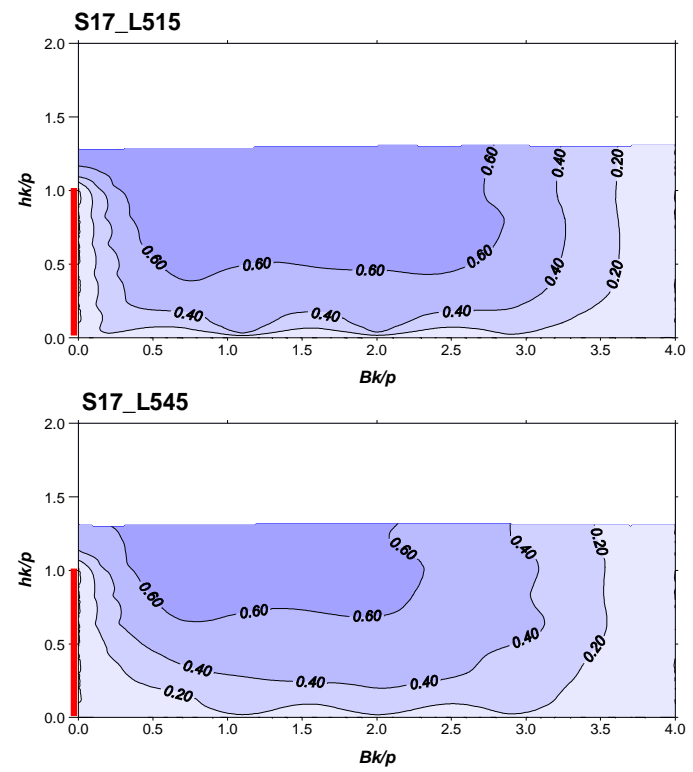
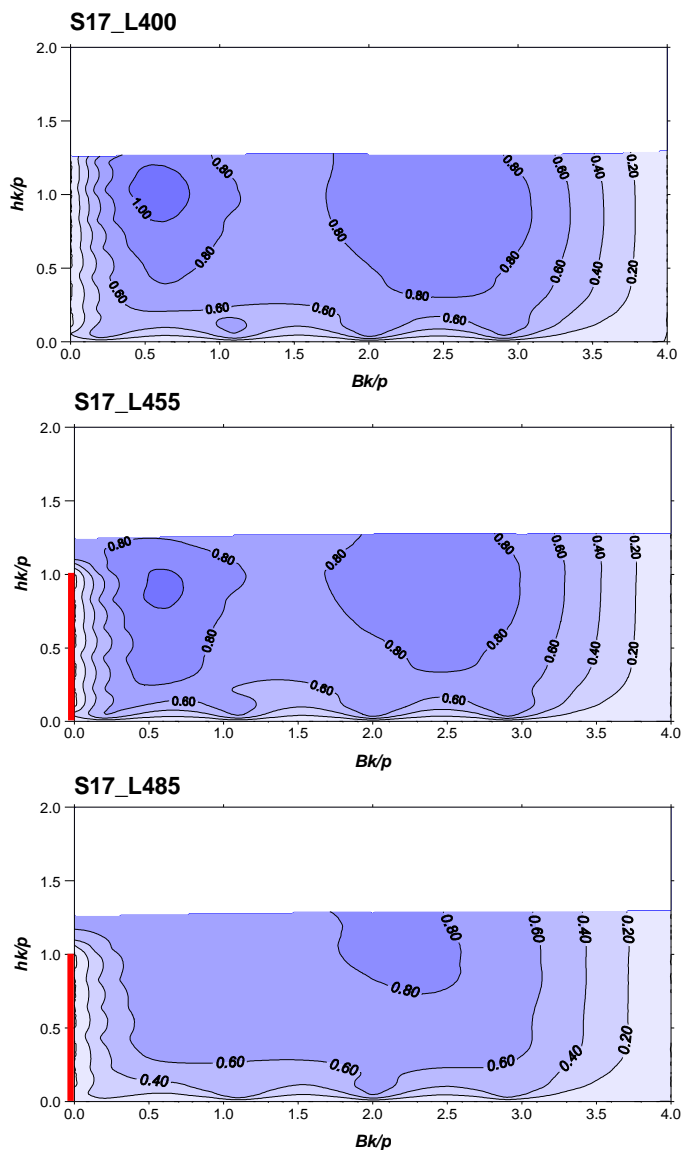
Rys. 5.25. Pola prędkości podłużnej v_x/v_0 ; seria 17, przelew A



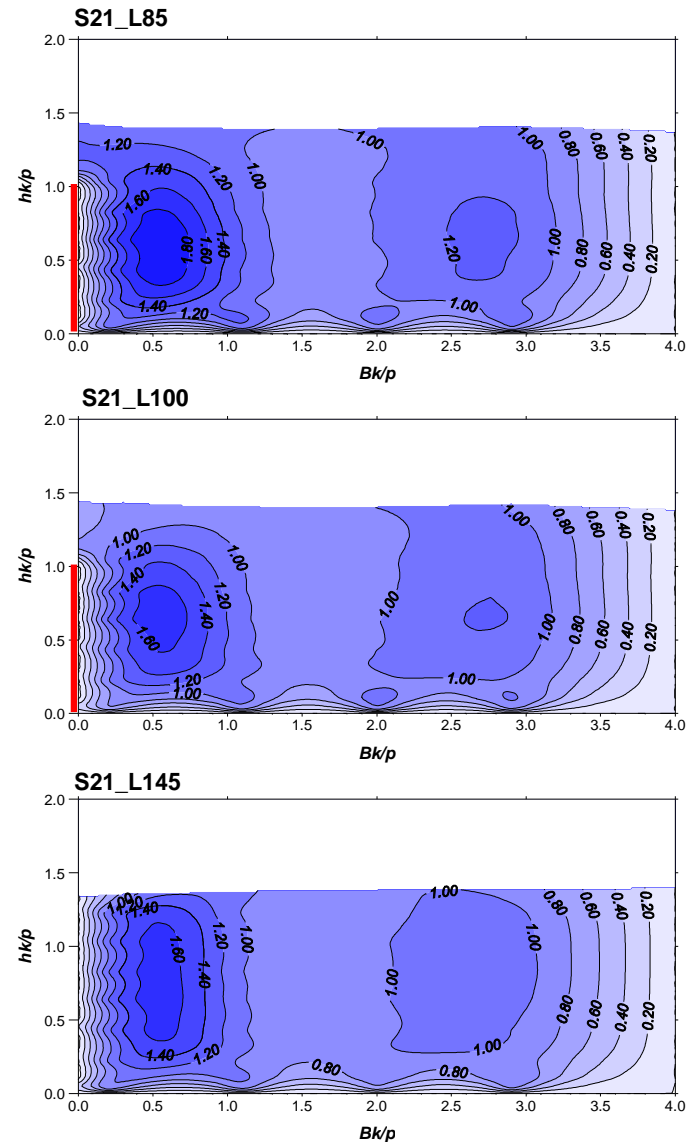
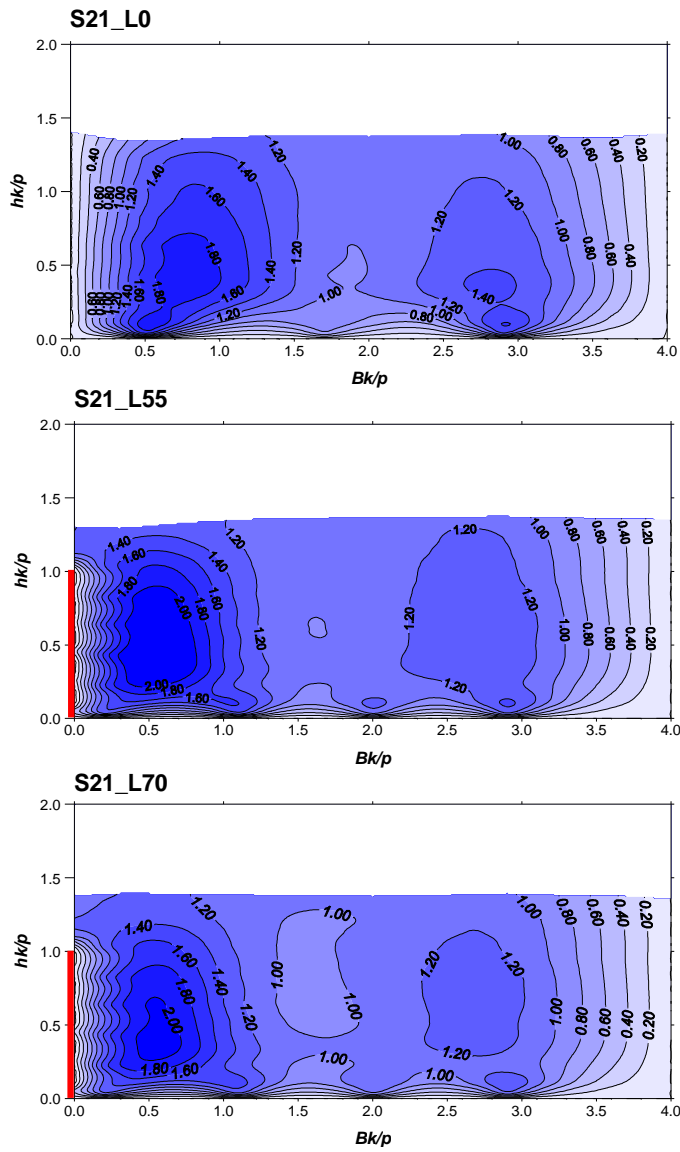
Rys. 5.26. Pola prędkości podłużnej v_x/v_0 : seria 17, przelew B



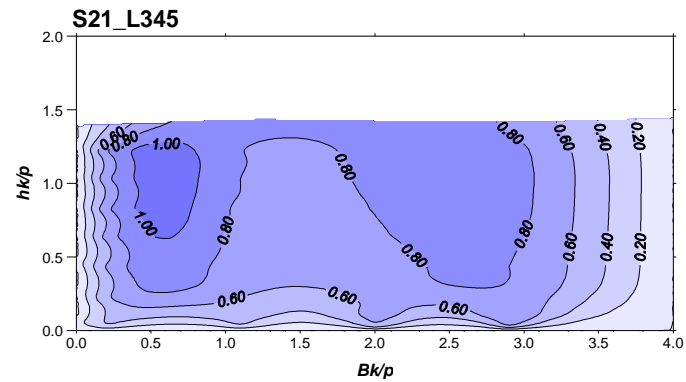
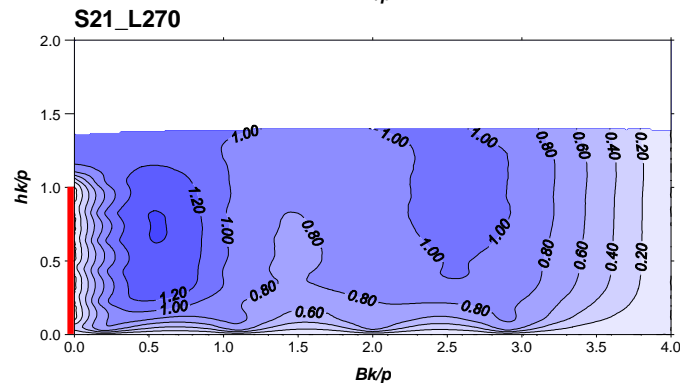
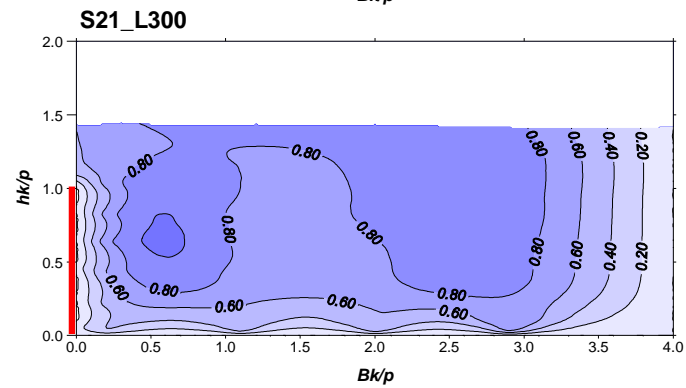
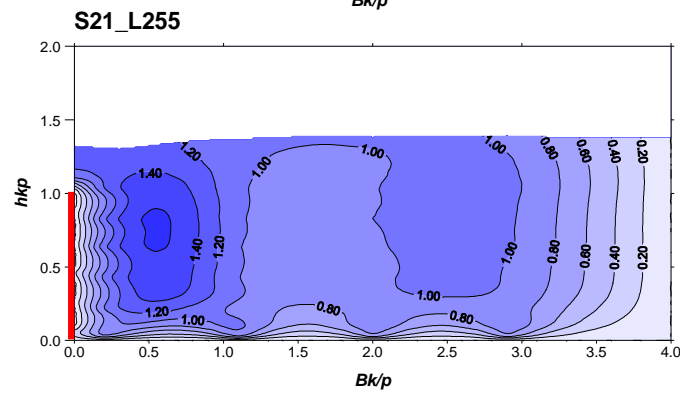
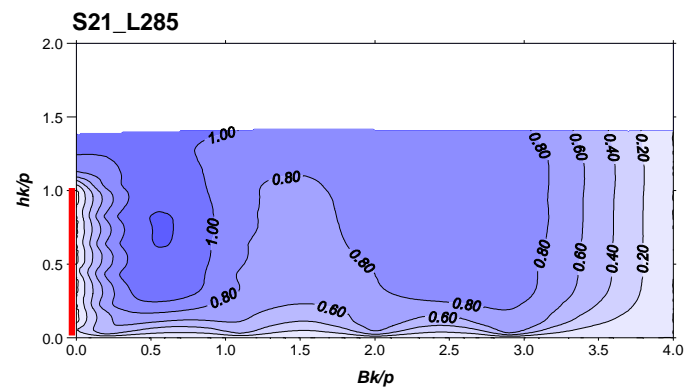
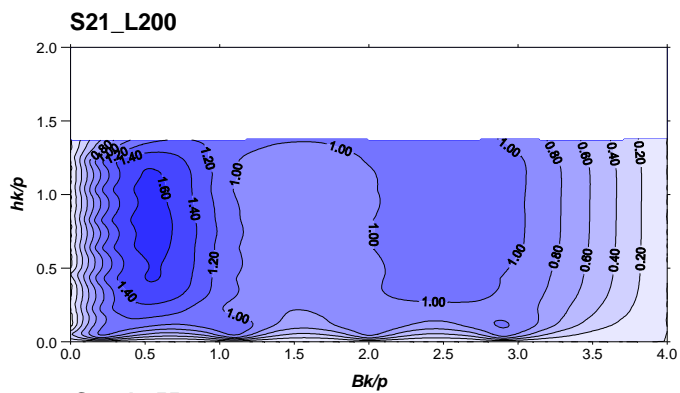
Rys. 5.27. Pola prędkości podłużnej v_L/v_0 : seria 17, przelew C



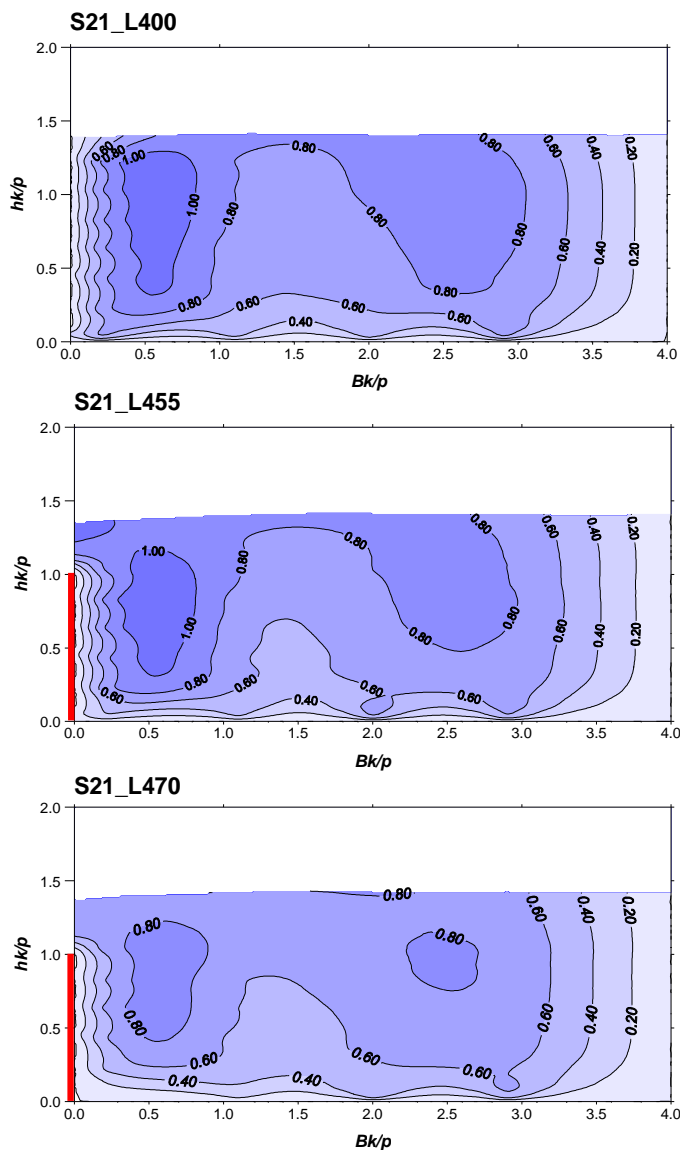
Rys. 5.28. Pola prędkości podłużnej v_x/v_0 : seria 21, przelew A



Rys. 5.29. Pola prędkości podłużnej v_L/v_0 : seria 21, przelew B



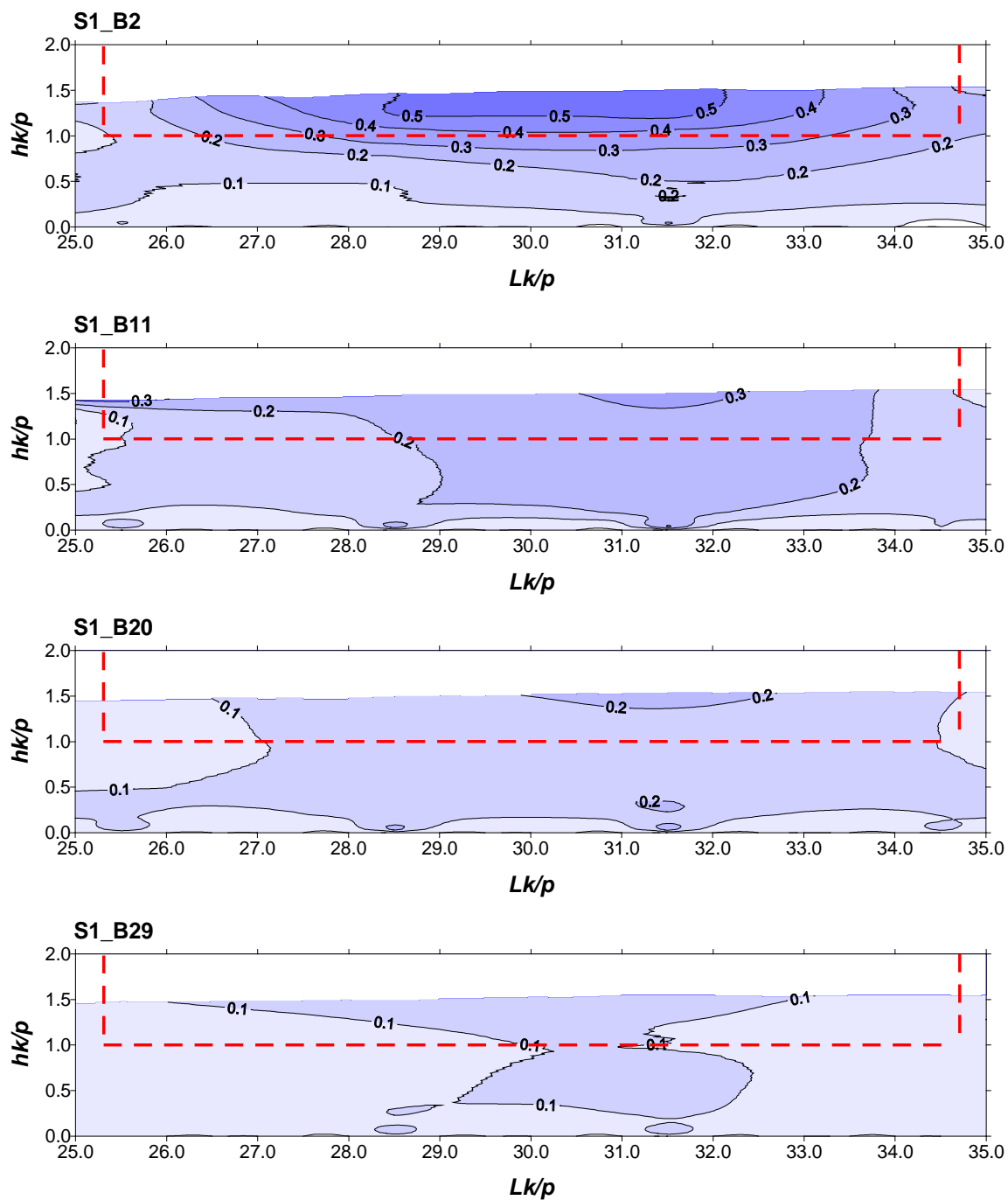
Rys. 5.30. Pola prędkości podłużnej v_L/v_0 : seria 21, przelew C



W wielu przypadkach odnotowano ujemne prędkości podłużne (białe obszary na polach prędkości). Świadczy to o istnieniu zawirowań, które powodują powstawanie nieaktywnych (martwych) obszarów ruchu wody. Bardzo szczególną sytuację zauważyć można w sąsiedztwie pierwszego z trzech przelewów w szeregu przy siedemnastej serii pomiarowej: mamy tam do czynienia z zawirowaniem na samej koronie przelewu. Można zauważyć, że zarówno przy pojedynczym pracującym przelewie, jak i szczególnie przy przelewie drugim w szeregu, wzdłuż ściany przelewowej w pionie występuje strefa prędkości bliskich zeru.

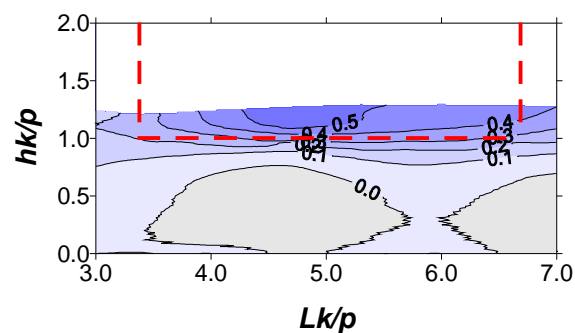
Niżej zamieszczone rysunki od 5.31 do 5.36 pokazują pola prędkości w pionowych płaszczyznach równoległych do ściany przelewu, usytuowanych w różnych od niej odległościach. Rysunki te dotyczą wybranych przypadków badawczych; pozostałą ich część zawiera dodatek do pracy. Można stwierdzić, że wraz z oddalaniem się od wycięcia przelewu rozkład prędkości bardzo szybko się wyrównuje. Maksymalne prędkości dopływu strug wody na przelew występują – co warto podkreślić – w centralnej części wycięcia przelewu w sytuacji, gdy, jak stwierdzono wcześniej, napełnienie na wzdłuż korony przelewu nie jest jednakowe. Prowadzi to do wniosku, że odpływ przez poszczególne partie przelewu nie jest sobie równy.

W trakcie badań rejestrowano obraz ruchu wody w korycie także poprzez fotografowanie przebiegu jej powierzchniowych strug. Jak już wspomniano, był on wizualizowany drobnymi pływakami (wióra drzewne). Z bogatej dokumentacji fotograficznej wybrano kilka zdjęć, które pokazane są niżej.

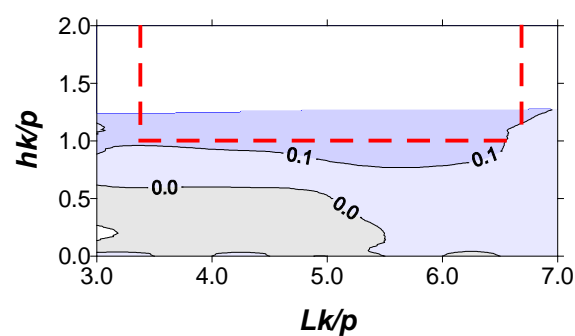


Rys. 5.31. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 1, przelew B

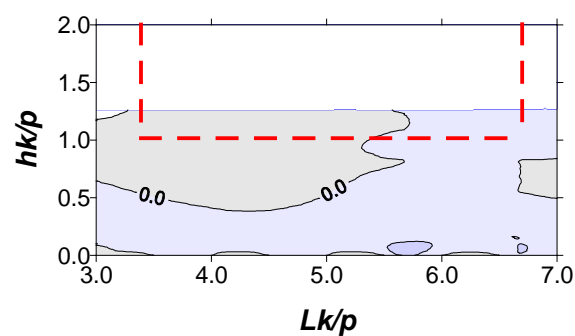
S16_B2



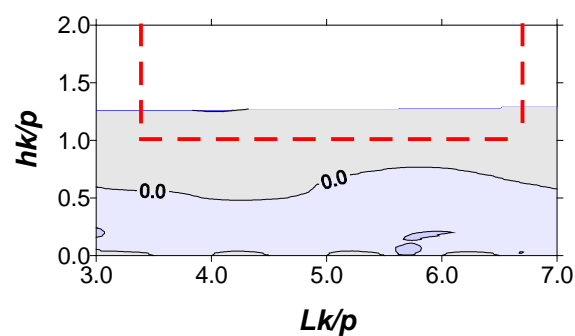
S16_B11



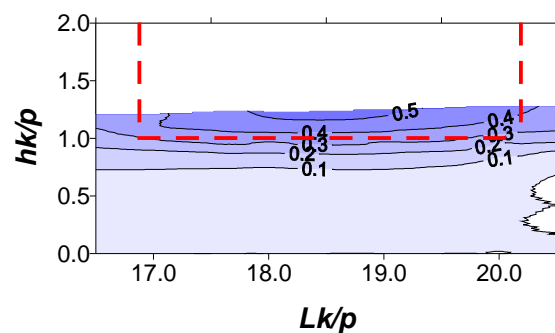
S16_B20



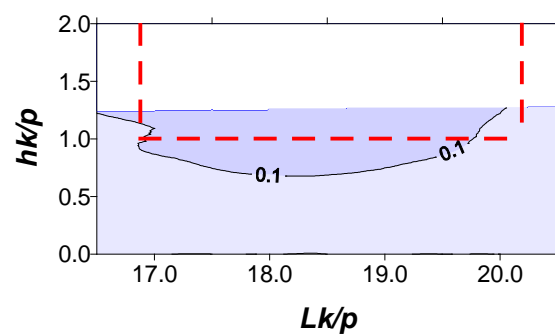
S16_B29

Rys. 5.32. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 16, przelew A

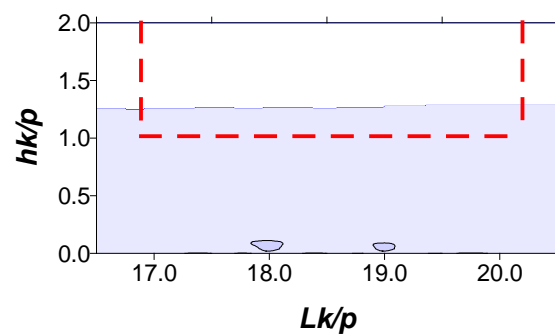
S16_B2



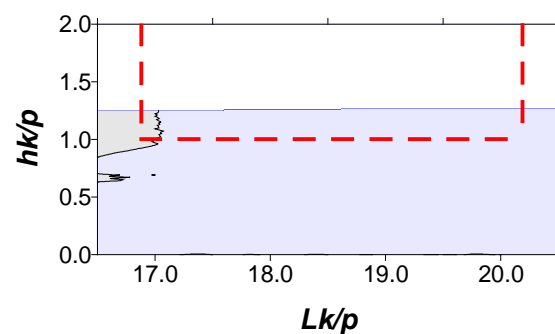
S16_B11



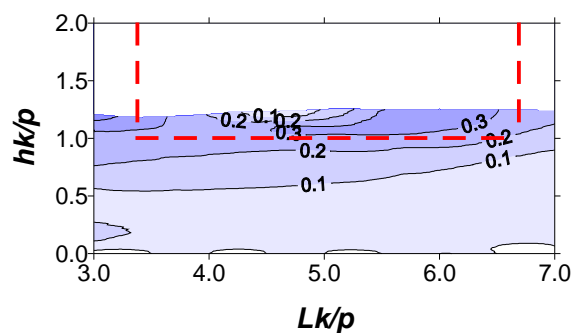
S16_B20



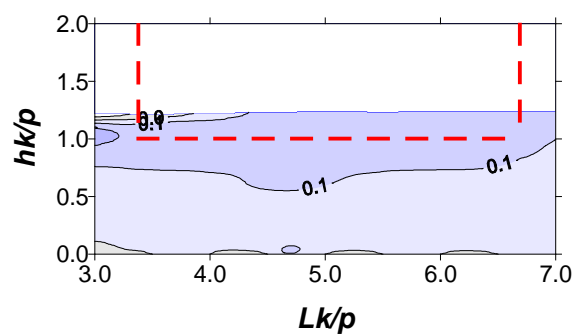
S16_B29

Rys. 5.33. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 16, przelew B

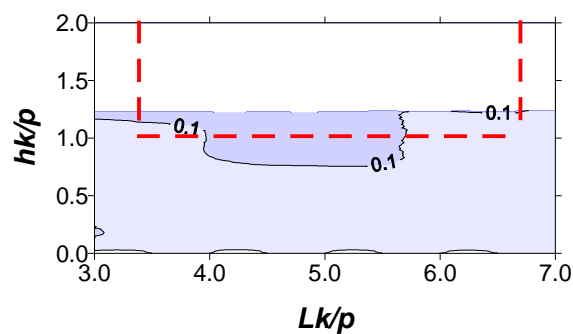
S24_B2



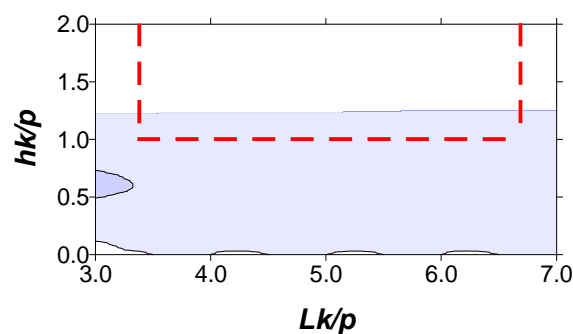
S24_B11



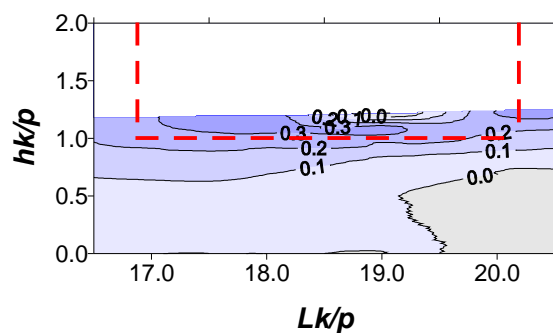
S24_B20



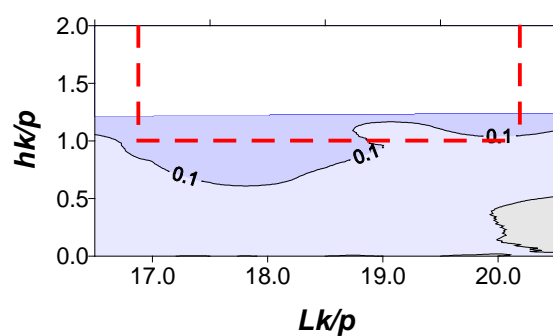
S24_B29

Rys. 5.34. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 24, przelew A

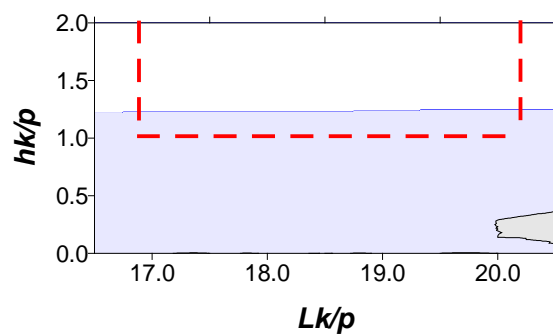
S24_B2



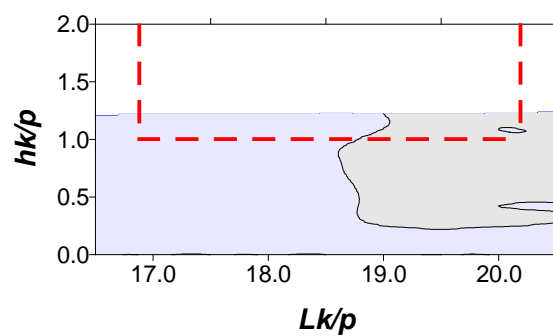
S24_B11



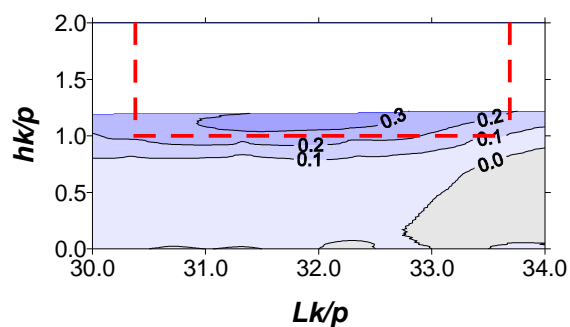
S24_B20



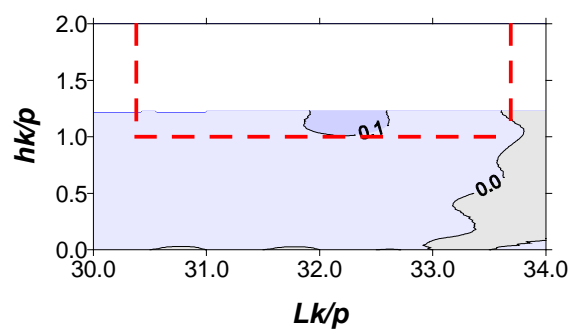
S24_B29

Rys. 5.35. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 24, przelew B

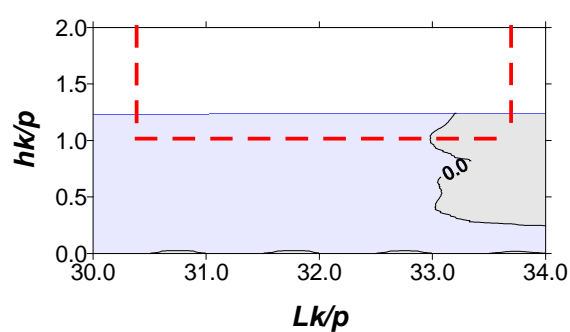
S24_B2



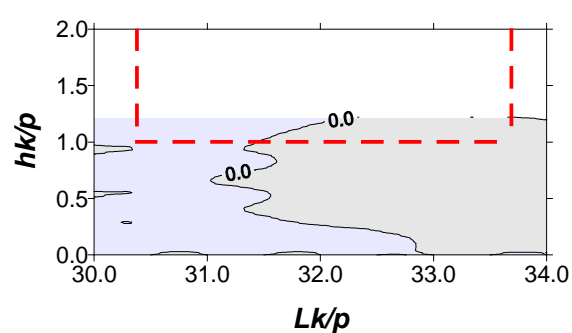
S24_B11



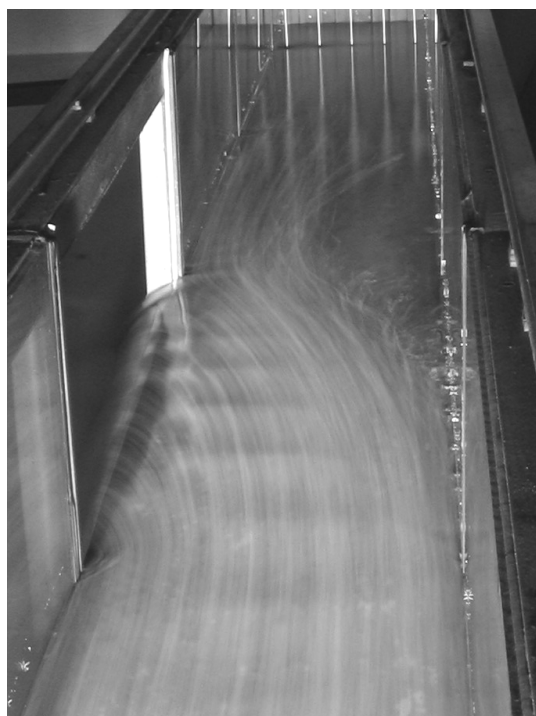
S24_B20



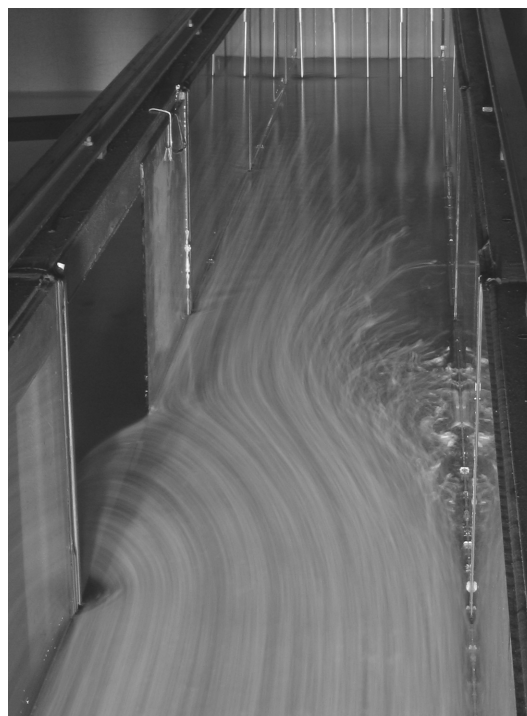
S24_B29

Rys. 5.36. Pola prędkości poprzecznej v_B/v_0 : seria 24, przelew C

Fot. 5.3. Serial 1, przelew B



Fot. 5.4. Serial 5, przelew B



Fot. 5.5. Serial 12, przelew A



Fot. 5.6. Serial 12, przelew B



Fot. 5.7. Seria 19, przelew A



Fot. 5.8. Seria 19, przelewy B i C



Fot. 5.9. Seria 21, przelew A



Fot. 5.10. Seria 21, przelewy B i C



5.3.3. Wydatek układu przelewów bocznych. Współczynnik wydatku

Chcąc obliczyć wydatek Q poszczególnych badanych przelewów bocznych należało przede wszystkim powrócić do bezwzględnych wartości prędkości przepływu w poszczególnych punktach pomiarowych i operować izotachami prędkości o wartościach opatrzonych określoną jednostką (w obliczeniach operowano centymetrami na sekundę). Po dokonaniu tej operacji posłużono się w dalszej kolejności programem komputerowym Surfer 6.04. Wczytywane były wartości prędkości pomierzone w poszczególnych punktach pomiarowych, przy czym brano pod uwagę punkty tworzące przekrój poprzeczny koryta LO na rys. 5.4 oraz punkty przekroju przedostatniego w module pomiarowym (zob. wspomniany wyżej rysunek). Program wyznaczał obwiednię wektorów prędkości, a na tej podstawie kształt bryły tworzonej tymi wektorami. Objętość tej bryły była poszukiwaną objętością przepływu przez dany przekrój. Różnica pomiędzy wartościami natężenia przepływu w branych pod uwagę przekrojach określała wydatek przelewu bocznego. Analogiczne postępowanie można by przeprowadzić rozważając pola prędkości poprzecznej, te, które pokazują rysunki 5.31 – 5.36. Wątpliwość dotyczy jednak faktu, że w tym przypadku wektory prędkości nie są, zwłaszcza na samym przelewie, prostopadłe do jego ściany. Z tego podejścia zrezygnowano.

W tabeli 5.3 ujęte zostały otrzymane wyniki obliczeń. Program Surfer używa trzech metod rachunkowych: *Trapezoidal Rule*, *Simpson's Rule*, *Simpson's 3/8 Rule*. Ostatecznym rezultatem obliczeń jest średnia z wyników otrzymanych tymi metodami. W kolumnach nr 6, 10 i 14 podano procentowe wartości wydatku przelewu w stosunku do wartości dopływu do koryta ($100\% Q/Q_0$). Dla ułatwienia analizy rezultatów obliczeń w tabeli 5.4 pokazano, jaki procent wartości dopływu do koryta stanowi odpływ przez dany przelew, w różnych układach definiowanych liczbą i wymiarami przelewów. Wymieniona tabela jest podstawą rysunku 5.37, który ilustruje otrzymane wyniki.

Tabela. 5.2 Wyniki obliczeń programem Surfer

seria	metoda	przelew A				przelew B				przelew C				
		dopływ	odpływ	wydatek	% dop	dopływ	odpływ	wydatek	% dop	dopływ	odpływ	wydatek	% dop	
		[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[%]	[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[%]	[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[cm ³ /s]	[%]	
- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -	- 7 -	- 8 -	- 9 -	- 10 -	- 11 -	- 12 -	- 13 -	- 14 -	
1	Trapezoidal Rule:					30429.2	13842.6	16589.7	54.52					
	Simpson's Rule:					30416.7	13826.0							
	Simpson's 3/8 Rule:					30433.6	13841.8							
2	Trapezoidal Rule:					18648.0	11027.5	7620.6	40.88					
	Simpson's Rule:					18637.9	11014.4							
	Simpson's 3/8 Rule:					18631.9	11014.0							
3	Trapezoidal Rule:					18967.5	15694.1	3270.8	17.25					
	Simpson's Rule:					18942.7	15675.8							
	Simpson's 3/8 Rule:					18956.7	15684.7							
4	Trapezoidal Rule:					31223.7	19085.3	12133.9	38.88					
	Simpson's Rule:					31193.8	19064.5							
	Simpson's 3/8 Rule:					31203.5	19069.6							
5	Trapezoidal Rule:					30539.4	15755.6	14768.4	48.39					
	Simpson's Rule:					30500.0	15743.3							
	Simpson's 3/8 Rule:					30514.5	15749.9							
6	Trapezoidal Rule:					18601.5	12177.3	6418.9	34.54					
	Simpson's Rule:					18573.5	12162.8							
	Simpson's 3/8 Rule:					18584.6	12162.9							
7	Trapezoidal Rule:					17361.5	15855.3	1507.2	8.69					
	Simpson's Rule:					17339.2	15841.5							
	Simpson's 3/8 Rule:					17356.4	15838.6							
8	Trapezoidal Rule:					30329.3	20502.4	9825.6	32.41					
	Simpson's Rule:					30308.2	20480.8							
	Simpson's 3/8 Rule:					30312.7	20490.1							
9	Trapezoidal Rule:	29889.9	24402.0	5489.0	18.38	23922.6	12281.5	11633.7	38.95					
	Simpson's Rule:	29841.1	24358.0			23904.0	12266.6							
	Simpson's 3/8 Rule:	29862.8	24366.9			23893.4	12270.7							
10	Trapezoidal Rule:	19179.0	16206.3	2971.1	15.50	16149.3	9956.3	6189.7	32.29					
	Simpson's Rule:	19138.1	16168.6			16131.0	9941.9							
	Simpson's 3/8 Rule:	19186.4	16215.4			16146.0	9959.1							
11	Trapezoidal Rule:	18654.1	17989.0	652.1	3.50	17574.8	14921.5	2651.7	14.23					
	Simpson's Rule:	18614.4	17968.4			17560.6	14903.3							
	Simpson's 3/8 Rule:	18624.7	17979.5			17555.8	14911.4							
12	Trapezoidal Rule:	30207.4	25496.7	4707.4	15.59	25536.6	16845.4	8683.7	28.75					
	Simpson's Rule:	30183.4	25477.6			25498.9	16829.9							
	Simpson's 3/8 Rule:	30215.9	25510.1			25538.7	16847.7							
13	Trapezoidal Rule:	29479.3	24062.5	5421.0	18.40	23910.8	13162.3	10737.3	36.44					
	Simpson's Rule:	29440.6	24022.3			23865.1	13144.5							
	Simpson's 3/8 Rule:	29480.0	24052.0			23912.8	13169.9							
14	Trapezoidal Rule:	17688.5	15136.8	2550.3	14.43	15178.8	10169.1	5004.8	28.32					
	Simpson's Rule:	17657.4	15109.5			15158.0	10154.3							
	Simpson's 3/8 Rule:	17669.3	15118.1			15157.6	10156.7							

Tabela 5.2. – cd.

15	Trapezoidal Rule:	17239.9	17099.6	140.3	0.81	17051.2	14593.2	2452.8	14.24				
	Simpson's Rule:	17217.0	17081.3			17020.6	14576.0						
	Simpson's 3/8 Rule:	17228.6	17083.6			17036.0	14580.3						
16	Trapezoidal Rule:	27848.3	24927.2	2924.1	10.51	25181.2	18303.0	6874.9	24.70				
	Simpson's Rule:	27832.4	24891.5			25140.0	18280.8						
	Simpson's 3/8 Rule:	27809.8	24899.6			25167.3	18280.0						
17	Trapezoidal Rule:	29342.4	26058.0	3299.6	11.25	27773.7	19805.5	7953.6	27.13	19350.0	12485.3	6858.3	23.39
	Simpson's Rule:	29313.0	25997.5			27730.0	19787.6			19324.8	12471.0		
	Simpson's 3/8 Rule:	29306.4	26007.4			27716.0	19765.8			19326.0	12469.7		
18	Trapezoidal Rule:	18494.6	18314.2	181.0	0.98	18187.2	13928.5	4260.7	23.05	13710.8	9793.3	3929.1	21.26
	Simpson's Rule:	18461.1	18272.7			18175.3	13907.4			13707.2	9773.0		
	Simpson's 3/8 Rule:	18491.1	18316.8			18181.0	13925.5			13726.5	9790.8		
19	Trapezoidal Rule:	18262.1	18527.3	-261.0	-1.43	18527.3	16593.8	1932.8	10.59	16593.8	14615.9	1972.8	10.81
	Simpson's Rule:	18240.2	18497.6			18497.6	16565.1			16565.1	14599.3		
	Simpson's 3/8 Rule:	18245.0	18505.5			18505.5	16573.1			16573.1	14598.4		
20	Trapezoidal Rule:	31166.1	28125.5	3054.8	9.80	28125.5	22351.9	5769.5	18.51	22351.9	16563.7	5786.1	18.57
	Simpson's Rule:	31156.8	28105.0			28105.0	22326.4			22326.4	16541.3		
	Simpson's 3/8 Rule:	31161.3	28089.4			28089.4	22333.1			22333.1	16548.0		
21	Trapezoidal Rule:	31313.7	26960.5	4340.9	13.88	27166.4	20622.9	6528.1	20.87	20303.8	13640.6	6664.3	21.30
	Simpson's Rule:	31263.2	26939.4			27114.7	20593.7			20277.1	13607.3		
	Simpson's 3/8 Rule:	31279.2	26933.6			27129.2	20609.3			20275.5	13615.7		
22	Trapezoidal Rule:	18628.2	17035.4	1599.3	8.59	17180.9	14348.9	2832.8	15.21	13802.8	10069.1	3728.5	20.02
	Simpson's Rule:	18606.0	16998.7			17157.2	14321.9			13778.5	10057.6		
	Simpson's 3/8 Rule:	18624.5	17026.8			17188.8	14357.6			13796.2	10065.2		
23	Trapezoidal Rule:	18968.1	18639.4	330.0	1.74	18664.7	17008.4	1653.5	8.72	16778.9	14821.4	1956.0	10.32
	Simpson's Rule:	18959.3	18620.1			18644.1	16989.4			16762.5	14805.6		
	Simpson's 3/8 Rule:	18948.6	18626.4			18643.9	16994.3			16761.2	14807.7		
24	Trapezoidal Rule:	30486.4	27730.9	2753.3	9.04	27558.9	23353.1	4211.0	13.82	22820.3	17400.4	5418.2	17.78
	Simpson's Rule:	30446.2	27696.1			27552.3	23326.8			22800.2	17382.6		
	Simpson's 3/8 Rule:	30486.5	27732.3			27554.8	23353.2			22821.9	17404.9		

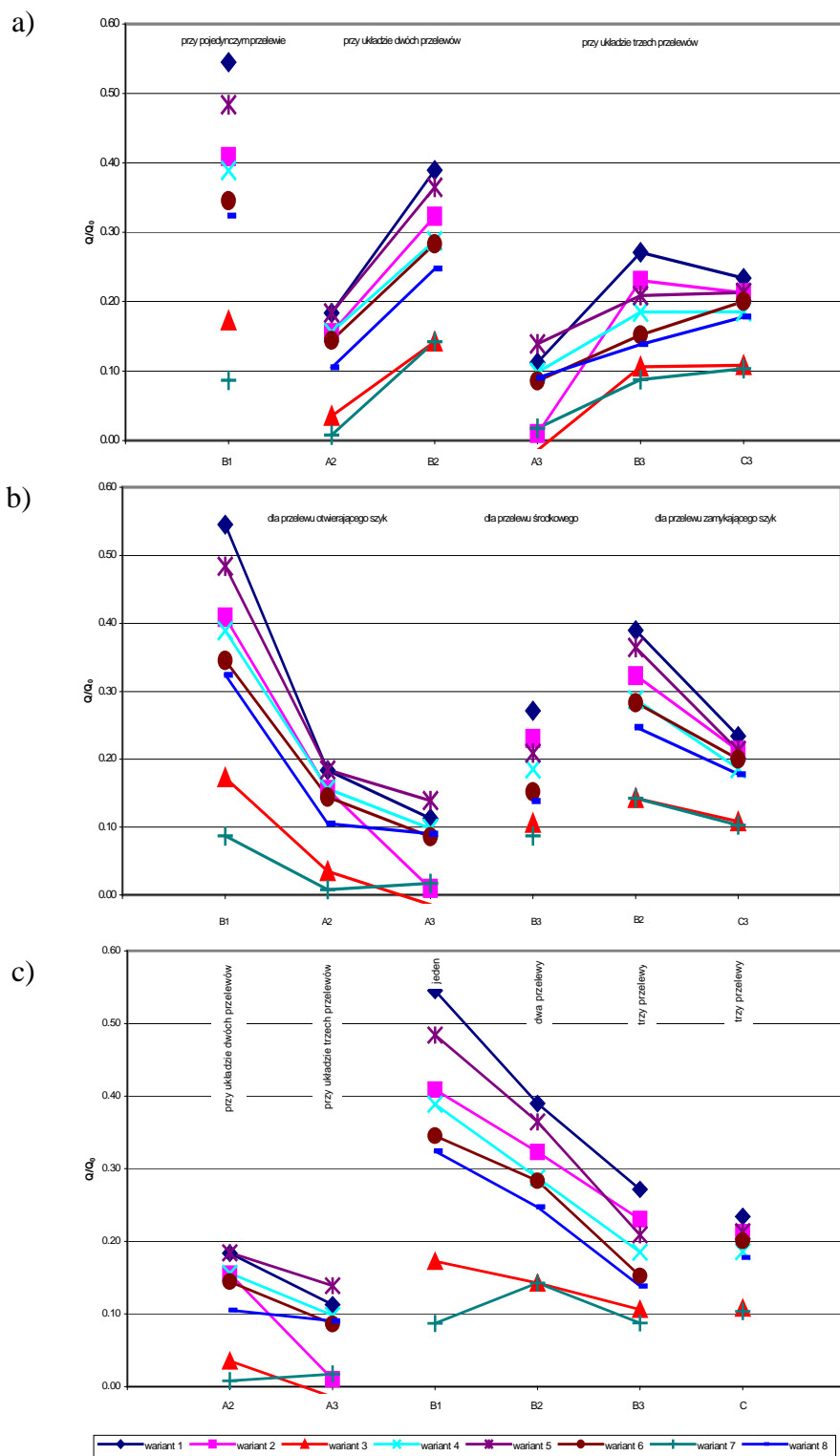
Tabela 5.3. Procentowe wartości wydatku przelewów (100% Q/Q_0)

Seria	Przelew	Q_0	L_k	p	Q/Q_0
		[dm ³ /s]	[cm]	[cm]	[%]
1	B1	30	93	10	54.52
2	B1	20	93	10	40.88
3	B1	20	93	15	17.25
4	B1	30	93	15	38.88
5	B1	30	50	10	48.39
6	B1	20	50	10	34.54
7	B1	20	50	15	8.69
8	B1	30	50	15	32.41

Tabela. 5.3. – cd.

9	A2	30	93	10	18.38
	B2				38.95
10	A2	20	93	10	15.50
	B2				32.29
11	A2	20	93	15	3.50
	B2				14.23
12	A2	30	93	15	15.59
	B2				28.75
13	A2	30	50	10	18.40
	B2				36.44
14	A2	20	50	10	14.43
	B2				28.32
15	A2	20	50	15	0.81
	B2				14.24
16	A2	30	50	15	10.51
	B2				24.70
17	A3	30	93	10	11.25
	B3				27.13
	C3				23.39
18	A3	20	93	10	0.98
	B3				23.05
	C3				21.26
19	A3	20	93	15	-1.43
	B3				10.59
	C3				10.81
20	A3	30	93	15	9.80
	B3				18.51
	C3				18.57
21	A3	30	50	10	13.88
	B3				20.87
	C3				21.30
22	A3	20	50	10	8.59
	B3				15.21
	C3				20.02
23	A3	20	50	15	1.74
	B3				8.72
	C3				10.32
24	A3	30	50	15	9.04
	B3				13.82
	C3				17.78

Objaśnienia: cyfry przy symbolach oznaczających przelewy (A, B, C) określają liczbę przelewów w szyku.



Rys 5.37. Zmienność wydatku przelewów bocznych wywołana: a) liczbą przelewów w szyku, b) kolejnością w szyku, c) miejscem w szyku.

Tabela. 5.4. Porównanie łącznego wydatku układu przelewów

Łączny wydatek ($\Sigma Q/Q_0$ 100%)						Różnica wydatku	
przelewu B1		układu przelewów A2 i B2		układu przelewów A3, B3 i C3		$\Delta 1^*$	$\Delta 2^*$
seria	[%]	seria	[%]	seria	[%]	[%]	[%]
1	54.52	9	57.33	17	61.77	2.81	7.25
2	40.88	10	47.79	18	45.29	6.91	4.41
3	17.25	11	17.73	19	19.97	0.48	2.72
4	38.88	12	44.34	20	46.89	5.46	8.00
5	48.39	13	54.84	21	56.04	6.44	7.65
6	34.54	14	42.75	22	43.83	8.22	9.29
7	8.69	15	15.05	23	20.78	6.37	12.09
8	32.41	16	35.21	24	40.63	2.80	8.22

*) $\Delta 1$ – różnica sumarycznego wydatku układu dwóch przelewów w stosunku do wydatku przelewu pracującego samodzielnie,

$\Delta 2$ – różnica sumarycznego wydatku układu trzech przelewów w stosunku do wydatku przelewu pracującego samodzielnie.

Korzystając z danych zawartych w tabelach 5.3 i 5.4 można określić tendencje zmian wartości Q , zależnie od przypadków eksploatacji przelewów. Stwierdzono, że:

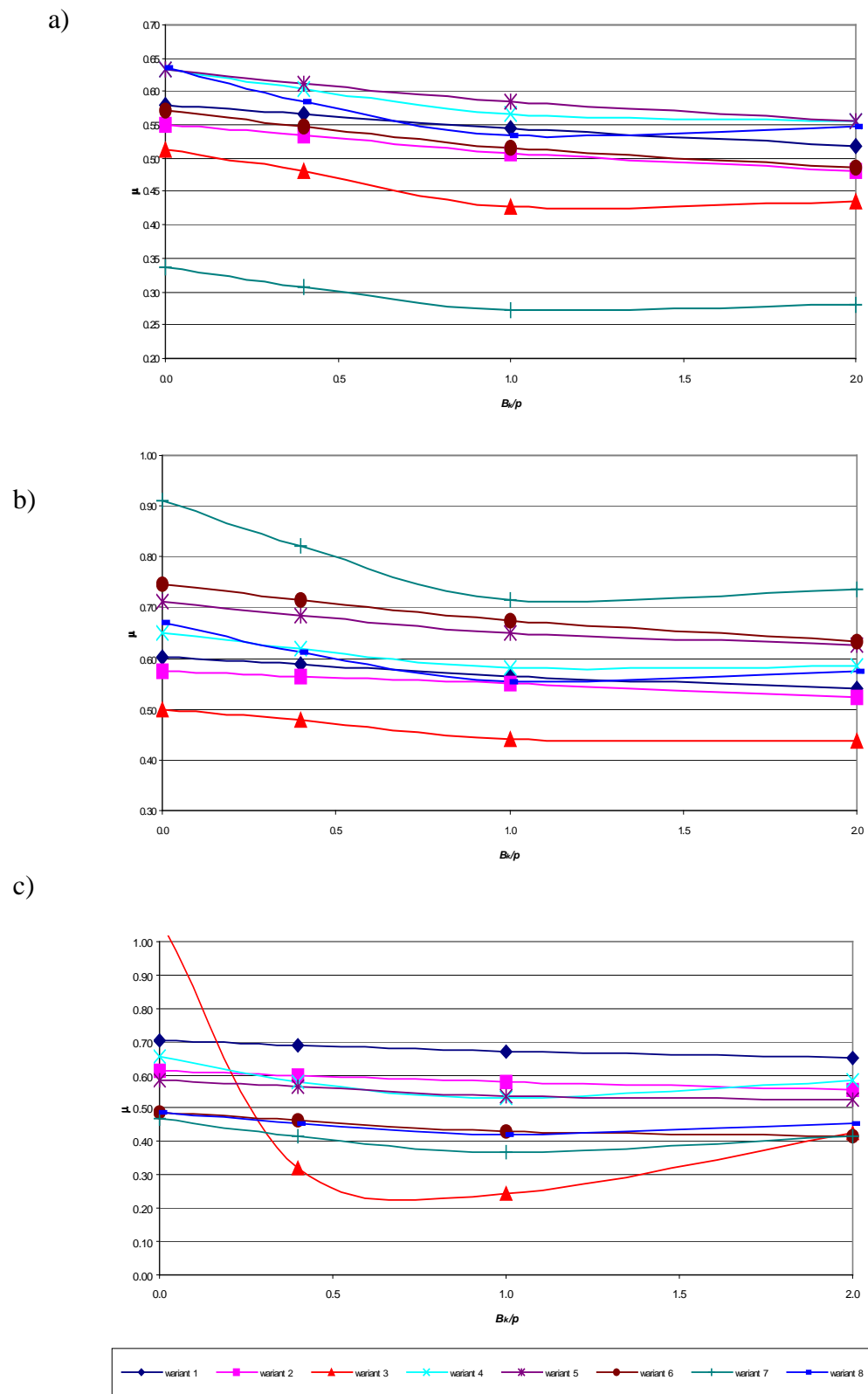
- przy tworzeniu szeregowych układów przelewów bocznych i przy zwiększaniu liczby przelewów w szyku uzyska się wzrost wydatku w sensie ilości wody odbieranej z koryta, natomiast wydatki poszczególnych przelewów w takich układach zmniejszą się w stosunku do tej ilości, którą odprowadziłby przelew pracujący jako pojedynczy,
- po dodaniu drugiego przelewu do już pracującego i utworzeniu dwójkowego szyku wydatek przelewu drugiego w kolejności jest większy od wydatku przelewu pierwszego; w szyku trójkowym można się spodziewać, że największy wydatek da przelew ostatni,
- łączny wydatek dwóch przelewów w szyku jest w stosunku do pojedynczego przelewu nieco tylko większy (kilka procent); podobnie jest dla układu trzech przelewów, co upoważnia do wniosku, że zwiększanie liczby przelewów bocznych w układzie szeregowym daje wprawdzie efekt, lecz niespecjalnie zachęcający.

Przyjmując do obliczeń teoretyczny wzór na wydatek przelewu bocznego (nr 63) i wprowadzając do niego wartości Q uzyskane z badań eksperymentalnych oraz parametry geometryczne i hydrauliczne badanych przelewów, wyznaczono wartości ich współczynnika wydatku μ . W tym kontekście podjęto próbę odniesienia się do kwestii, która w hydraulice przelewów bocznych nie jest jednoznacznie postawiona. Chodzi mianowicie o usytuowanie miejsca pomiaru grubości warstwy wody h na przelewie. O ile dla przelewów czołowych, prostych, zaleca się dokonywanie tego pomiaru w odległości większej niż trzykrotna, szacowana wartość h , o tyle dla przelewów bocznych nie jest to określone, choć być może należałoby postępować tak samo. Wyniki obliczeń dokonanych w niniejszej pracy sugerują, że wartość współczynnika wydatku przelewu, związana przecież z wartością h , przestaje się zmieniać począwszy od miejsca pomiaru tej wielkości w odległości p od ściany przelewu bocznego, przesuując się w poprzek koryta. Dla przypomnienia, p jest wysokością ściany przelewu.

Ilustracją tych stwierdzeń jest niżej pokazany rysunek 5.38. Objasnienia do niego są następujące: wariant 1 oznacza, że układ wartości parametrów Q_0 , L , p jest taki, jak w seriach 1, 9 i 17, wariant 2 – odpowiada seriom 2, 10 i 18 i dalej tak, jak pokazuje poniższa tabela 5.5.

Tabela.5.5. Objasnienia do rysunków 5.37 i 5.38

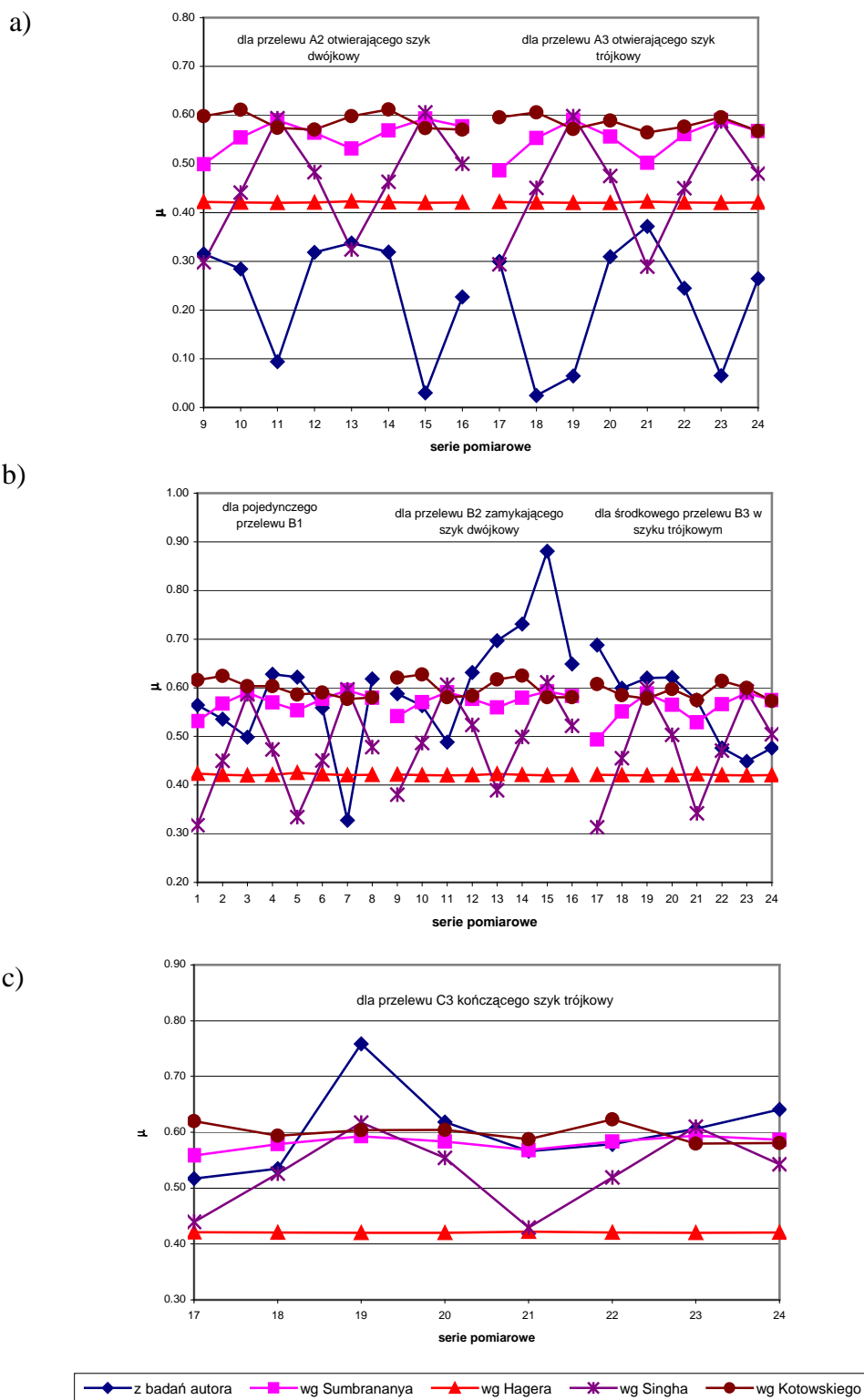
Wariant	Układ wartości parametrów Q_0 , L , p
1	Serie 1, 9, 17
2	Serie 2, 10, 18
3	Serie 3, 11, 19
4	Serie 4, 12, 20
5	Serie 5, 13, 21
6	Serie 6, 14, 22
7	Serie 7, 15, 23
8	Serie 8, 16, 24



Rys. 5.38. Zmienność współczynnika wydatku przelewu: a) pojedynczego (B1), b) kończącego szyk dwójkowy (B2), c) środkowego w szyku trójkowym (B3), zależnie od odległości punktu pomiaru h od jego korony.

Uznano, że w kontekście rozważań na temat wartości współczynników wydatku przelewów bocznych warto przekonać się, jak rezultaty obliczeń według formuł proponowanych przez różnych autorów korespondują z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy. Wybrano pięć zależności, a mianowicie zaproponowane przez Sumbramanya, Hagera, Swamee'ego, Singha i Kotowskiego (zob. rozdz. 4.3). Zależności te zostały dobrane w ten sposób, aby zakres ich stosowania odpowiadał charakterystyce przelewów rozważanych w niniejszej pracy. W grę wchodzi geometria wycięcia przelewu bocznego, hydrauliczne warunki jego pracy, szerokość korony, kształt przekroju koryta dopływowego. Po wprowadzeniu wartości parametrów z badań tu opisywanych do formuł wymienionych autorów, porównano otrzymane wartości współczynników wydatku z wartością μ tych współczynników obliczonych w oparciu o własne badania eksperymentalne.

Okazało się, że rezultaty obliczeń wzorem Swamee'ego w całym zakresie są nie do przyjęcia z tego powodu, że współczynnik wydatku według tego wzoru przyjmuje wartość wielokrotnie wyższą od jedności. Wzór ten wyłączono z dalszych porównań. Ilustrację przeprowadzonych analiz stanowi rysunek 5.39. Widać, że wzięte do porównań wzory nie uwzględniają faktu współpracy hydraulicznej przelewów w układzie, bowiem niezależnie od struktury takiego układu rezultaty obliczeń dla każdego z przelewów są niemal identyczne. Z doświadczalnych badań autora wynika natomiast, że to, jakie jest miejsce przelewu w szyku (przelew otwierający układ szeregowy, przelew środkowy, przelew zamykający) nie jest bez znaczenia i ma między innymi wpływ na wartość współczynnika wydatku. Zgodnie z podanymi wcześniej uwagami na temat różnic w wydatkach przez przelew boczny zależnie od jego usytuowania w układzie współczynniki wydatku przelewów otwierających szyk są najniższe, dla następnych wyższe. Wymaga ponownego podkreślenia, że uwagi te tyczą układu przelewów, które ze sobą hydraulicznie współpracują. W przypadkach braku takiej współpracy rozumianej jako wzajemne wpływy pól prędkości i układu zwierciadła pomiędzy przelewami, dany przelew jest przelewem pojedynczym i wzięte do porównania wzory, o których mowa była wyżej, są naturalnie słuszne: potwierdza to zestawienie wartości współczynnika wydatku dla samodzielnego przelewu B na rys. 5.39 (w części odpowiadającej seriom od 1 do 8).



Rys. 5.39. Porównanie wartości współczynników wydatku: a) dla przelewu A2 i A3, b) dla przelewu B1, B2 i B3, c) dla przelewu C3

6

Symulacyjne obliczenia działania przelewów bocznych z wykorzystaniem modelu komputerowego

Niezależnie od badań na modelu fizycznym dokonano symulacji działania przelewów bocznych w różnych układach posługując się numerycznym modelem o nazwie Hec-Ras. Ogólnie mówiąc, pozwala on prowadzić obliczenia dla warunków ruchu ustalonego i nieustalonego w korycie otwartym w obecności konkretnych obiektów inżynierskich (w przypadku rzek i kanałów mogą to być mosty, jazy, także przepusty, przelewy, w tym przelewy boczne). W wyniku obliczeń uzyskuje się wartości parametrów przepływu w korycie czy kanale, a więc wartości prędkości ruchu i napełnień, a w przypadku takich obiektów, jak np. przelewy, także wartości odpływu przez nie.

Podstawą modelu Hec-Ras są jednowymiarowe równania ruchu uzupełnione równaniem ciągłości przepływu. Owa jednowymiarowość jest naturalnie uproszczeniem w stosunku do przeprowadzonych przez autora badań eksperymentalnych, niemniej można z zaufaniem przyjąć wyniki obliczeń dotyczące odpływów Q przez przelewy, a także odnoszące się do kształtu profilu podłużnego zwierciadła wody w korycie głównym. Z tego względu można dokonać stosownych porównań z wynikami eksperymentu, przyjmując różną geometrię przelewów bocznych i różne ich układy.

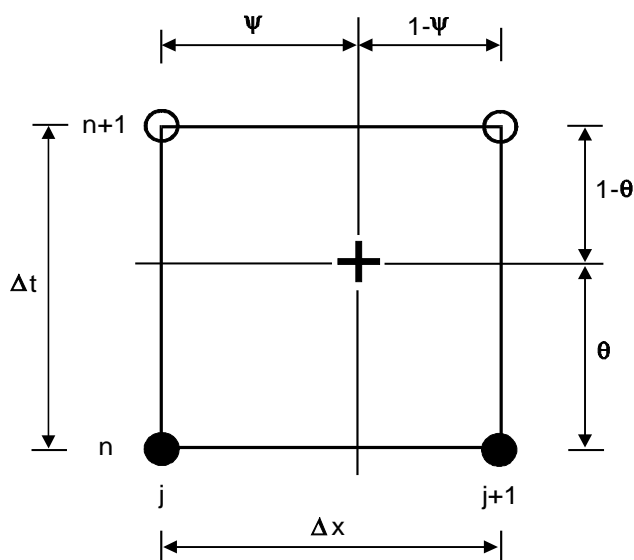
6.1. Równania modelu

Jak wspomniano model matematyczny formułują równania: ciągłości, wyrażające prawo zachowania masy oraz dynamiczne, będące matematycznym wyrazem zasady zachowania pędu, tworzące łącznie tzw. układ równań Saint-Venanta:

$$\begin{cases} \frac{\partial A_k}{\partial t} + \frac{\partial Q_k}{\partial x} - q = 0 \\ \frac{\partial Q_k}{\partial t} + \frac{\partial Q_{v_k}}{\partial x} + gA_k \left(\frac{\partial h_k}{\partial x} + i_f \right) = 0 \end{cases} \quad (95)$$

Jest to układ nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu, typu hiperbolicznego. Aby otrzymać jednoznaczne rozwiązanie podanego układu, musi on być uzupełniony warunkami początkowo-brzegowymi. Jako warunek początkowy podaje się wartości napełnienia wzdłuż koryta w chwili $t = 0$, lub też wartości natężenia przepływu Q_k w poszczególnych przekrojach koryta w tejże chwili. Lewy warunek brzegowy stanowią wartości dopływu Q_0 do koryta, zaś prawy współrzędne punktów krzywej konsumcyjnej w przekroju kończącym badany odcinek cieku.

Do rozwiązania postawionego zagadnienia mieszanego model Hec-Ras wykorzystuje numeryczną metodę różnic skończonych, realizowaną przy użyciu różnicowego niejawnego schematu Preissmanna (rys. 6.1). Ciągły obszar rozwiązania



Rys. 6.1. Oczko siatki dyskretyzacyjnej

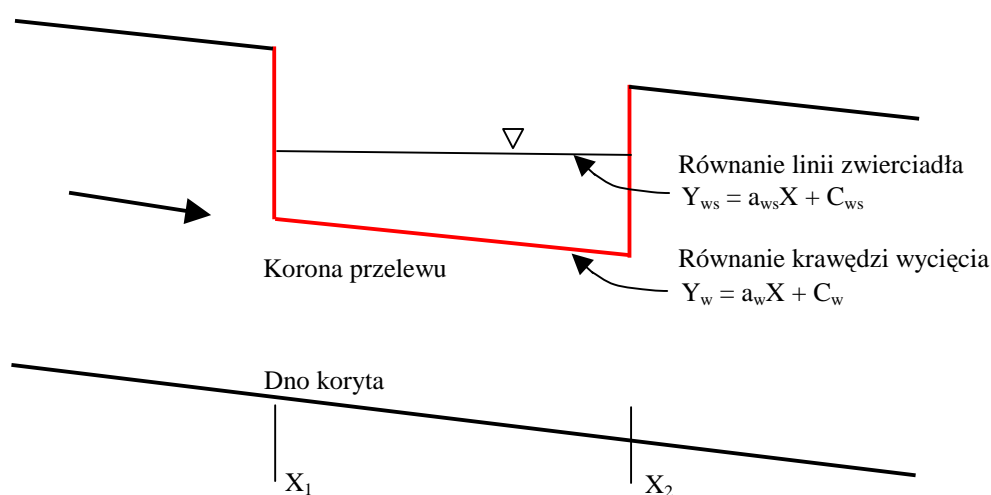
dyskretyzuje się poprzez nałożenie nań siatki o wymiarach oczek Δx i Δt . Przedział Δx jest przyjętą długością kroku przestrzennego, Δt jest krokiem czasowym. Funkcje oraz pochodne układu 95 aproksymuje się różnicami skończonymi:

$$f(x,t) \approx \frac{\theta}{2}(f_{j+1}^{n+1} + f_j^{n+1}) + \frac{1-\theta}{2}(f_{j+1}^n + f_j^n)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} f(x,t) \approx \theta \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x} \quad (96)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} f(x,t) \approx \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n + f_j^{n+1} - f_j^n}{2\Delta t}$$

gdzie f jest wartością danej funkcji w j -tym przekroju przestrzennym w określonej chwili. Ψ oraz θ są współczynnikami wagowymi przyjmowanymi z przedziału $[0,1]$.



Rys. 6.2. Hec-Ras: przyjęty schemat obliczeniowy układu zwierciadła wody na przelewie bocznym

Autor prowadził obliczenia ustalając naturalnie, że wzdłuż koryta sytuowane są przelewy boczne. W przekrojach cieku, w których przelewy takie występują, formułowano tzw. wewnętrzne warunki brzegowe, podając związek określający wydatek tych przelewów. Równanie zastosowane do obliczenia wydatku przelewu bocznego przyjęto w postaci:

$$dQ = C(Y_{ws} - Y_w)^{3/2} dX \quad (97)$$

gdzie parametr $C = 0,67 \mu (2g)^{1/2}$. Po podstawieniu $a_I = a_{ws} - a_w$ i $C_I = C_{ws} - C_w$ oraz całkując w granicach od X_1 do X_2 otrzymuje się ostatecznie:

$$Q_{X_1-X_2} = \frac{2C}{5a_1} \left((a_1 X_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 X_1 + C_1)^{5/2} \right) \quad (98)$$

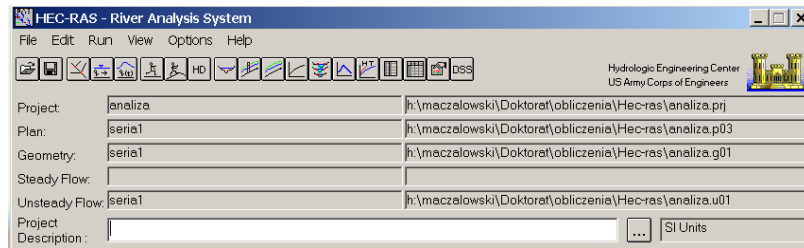
Jeżeli poziom zwierciadła wody układu się wzdłuż korony przelewu równoległe do niej, model Hec-Ras używa następującego uproszczonego wzoru na wydatek przelewu bocznego:

$$Q = C L h^{3/2} \quad (99)$$

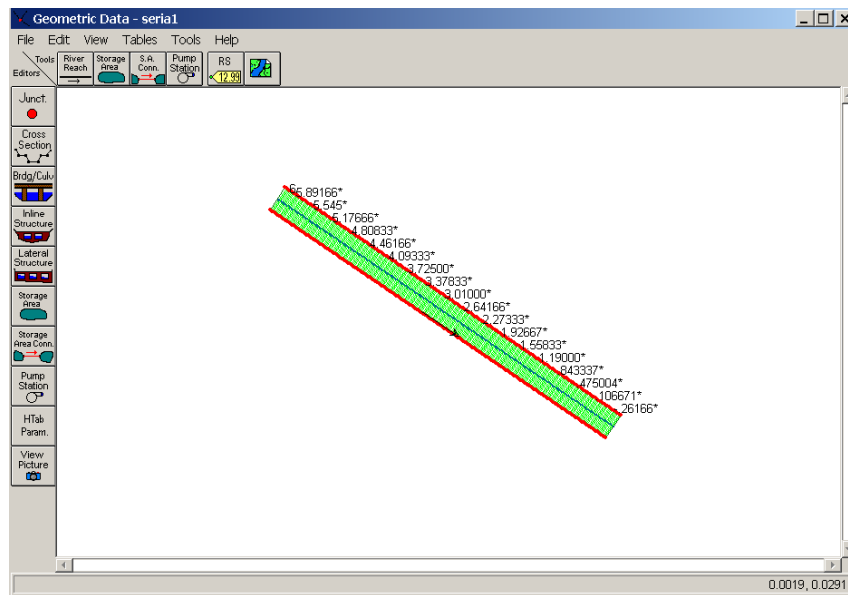
Dla dokonania obliczeń proponowany jest odpowiedni, komercyjny program komputerowy. Program ten zawiera dwie opcjonalne procedury do obliczenia wydatku przelewu bocznego. Pierwsza z nich opierając się na równaniu 98 lub 99 rozwiązuje je przy znanych wartościach h , wyliczonych przy użyciu innych procedur programu. Druga, stosując te same wzory, pozwala wyliczyć wydatek przelewu w oparciu o zmiany wysokości linii energii wody wzdłuż jego korony. W przypadku koryta głównego o jednodzielnym przekroju procedury tej nie należy stosować z uwagi na to, że średnie prędkości przepływu w osi koryta i na przelewie mogą być bardzo różne, czego jednowymiarowy model (wzdłuż cieków) Hec-Ras nie uwzględnia.

6.2. Wyniki obliczeń

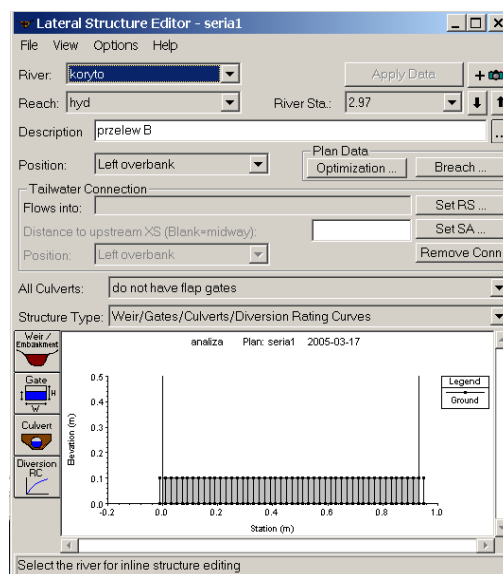
Na rysunkach 6.3 – 6.7 pokazano niektóre okna dialogowe oraz wybrane okna wyników programu komputerowego pakietu Hec-Ras. Na rysunku 6.7 a) widać układ zwierciadła wody w korycie głównym, okno 6.7 b) informuje o napełnieniu w przekrojach poprzecznych prowadzonych przez koryto i przelew, okno 6.7 c) podaje wartości prędkości przepływu w korycie zaś 6.7 d) krzywą konsumcyjną w wybranym przekroju koryta. Pełny zestaw wyników obliczeń, dotyczących wartości również innych parametrów, drukowany jest w postaci tabel.



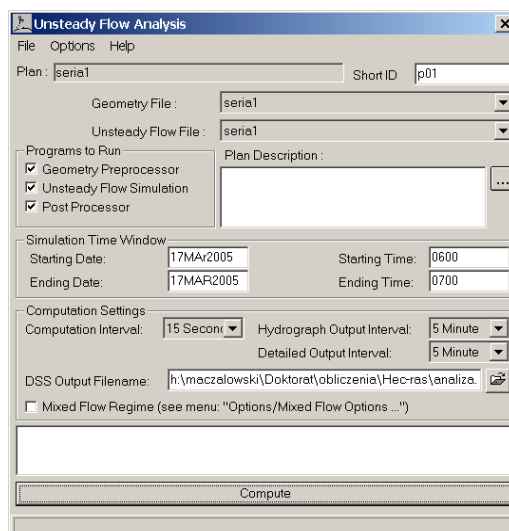
Rys. 6.3. Program Hec-Ras: Główne okno programu



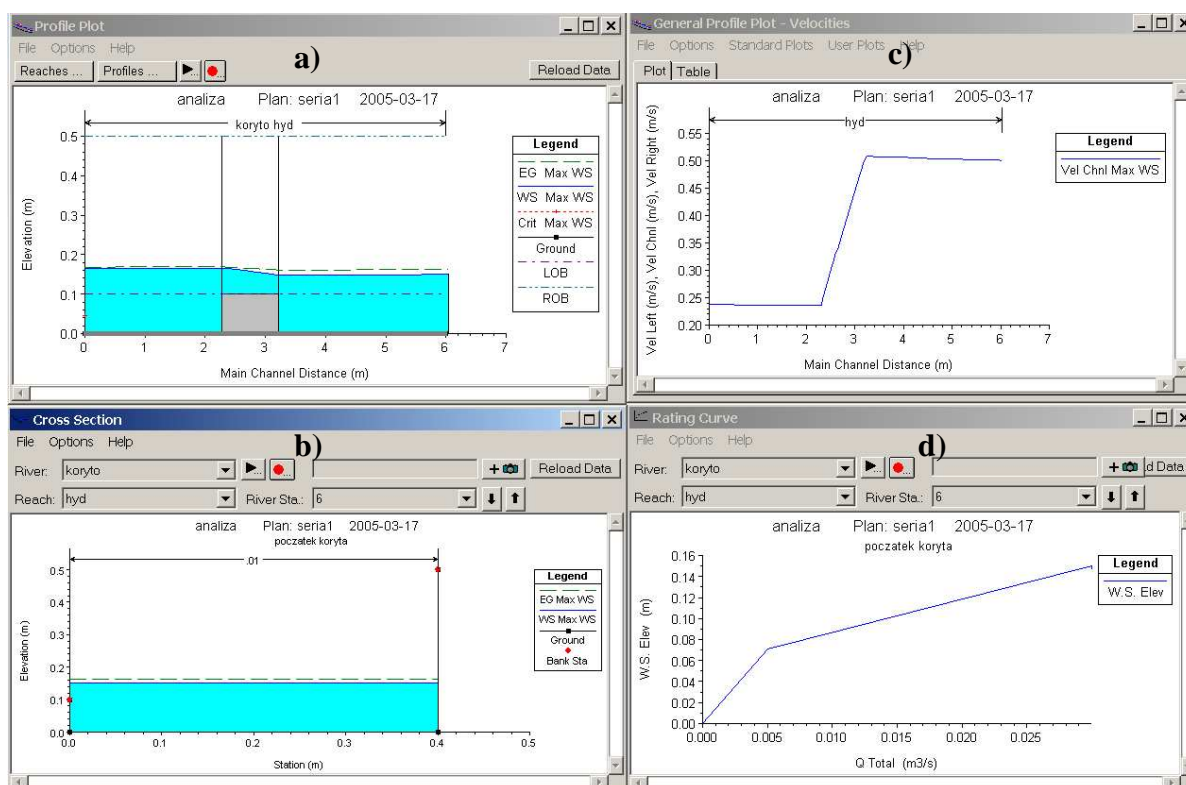
Rys. 6.4. Program Hec-Ras: Edytor geometrii koryta



Rys. 6.5. Program Hec-Ras: Edytor geometrii przelewów bocznych



Rys. 6.6. Program Hec-Ras: Edytor obliczeń



Rys. 6.7. Program Hec-Ras: Przykłady wyników w formie graficznej

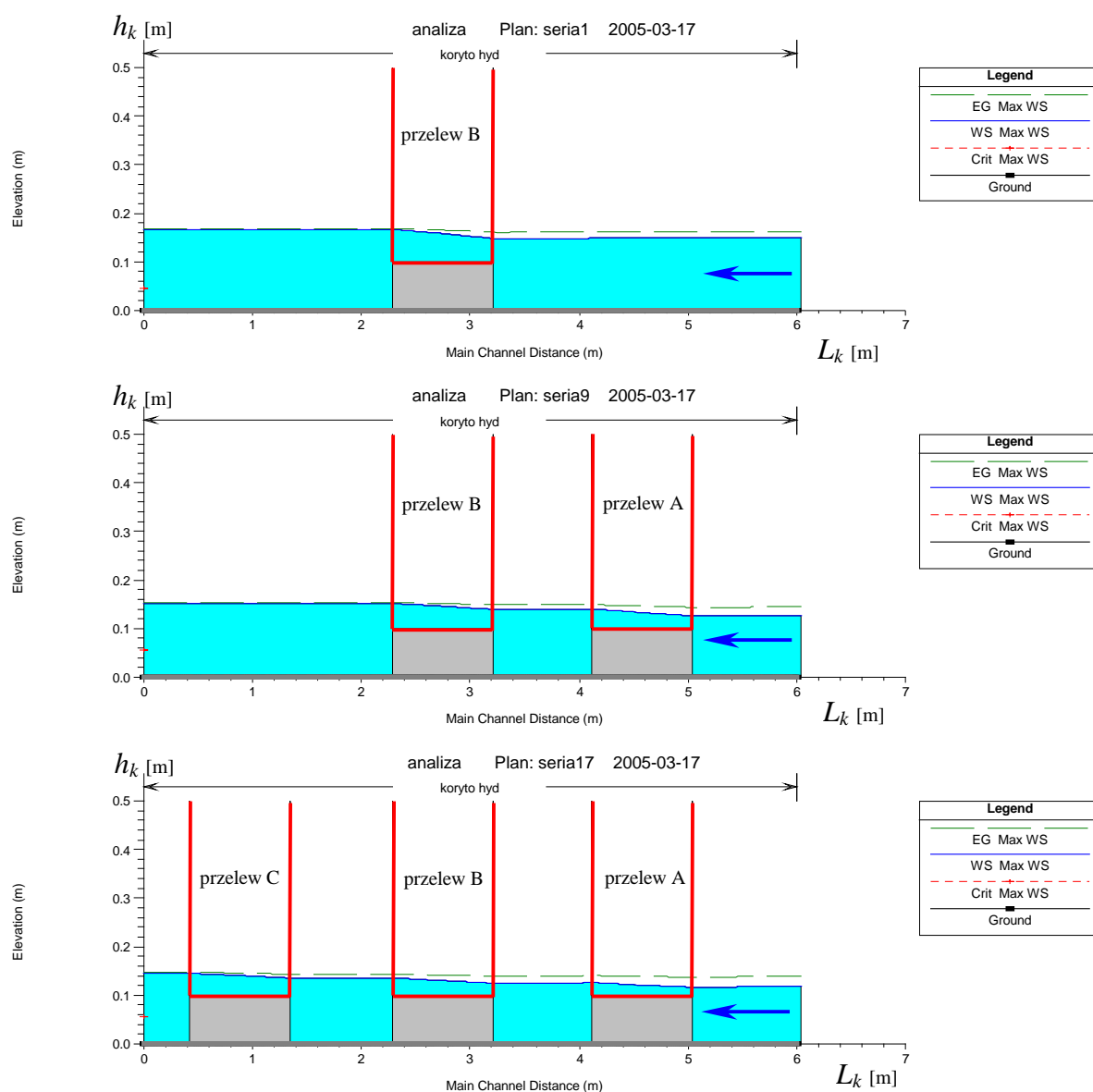
Niżej zestawiono podstawowe wartości danych, jakie wprowadzono do programu Hec-Ras oraz najistotniejsze otrzymane wyniki obliczeń. Dla informacji należy nadmienić, że używano wersji 3.1.2. wspomnianego programu.

Tabela. 6.1. Program Hec-Ras: zestaw danych i wyników

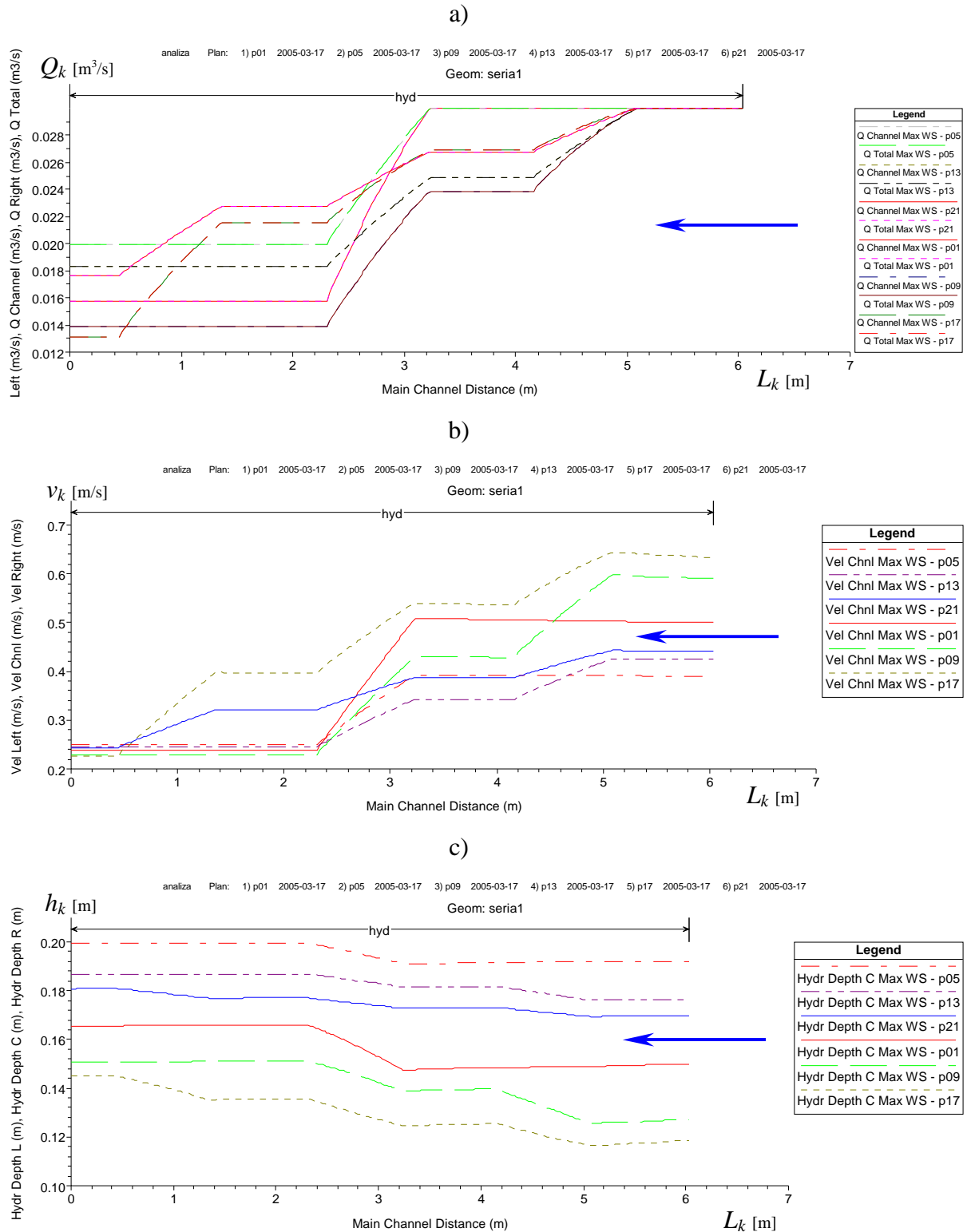
seria	Dane								Rezultaty obliczeń			kol. 7 – kol.11
	p	L	Q_0	przelew	Q			μ	Q	h_{k1}	h_{k2}	
	cm	cm	dm ³ /s		cm ³ /s	% Q_{up}	% Q_0		% Q_{up}	m	m	
- 1 -	- 2 -	- 3 -	- 4 -	- 5 -	- 6 -	- 7 -	- 8 -	- 9 -	- 11 -	- 12 -	- 13 -	- 14 -
9	10	93	30	A2	5489.0	18.38	18.38	0.315	12.00	0.12	0.13	6.38
10	10	93	20	A2	2971.1	15.50	15.50	0.284	11.46	0.12	0.12	4.04
11	15	93	20	A2	652.1	3.50	3.50	0.094	5.04	0.14	0.14	-1.54
12	15	93	30	A2	4707.4	15.59	15.59	0.318	13.40	0.14	0.15	2.19
13	10	50	30	A2	5421.0	18.40	18.40	0.338	10.42	0.17	0.17	7.98
14	10	50	20	A2	2550.3	14.43	14.43	0.319	5.86	0.16	0.16	8.57
15	15	50	20	A2	140.3	0.81	0.81	0.030	0.55	0.17	0.17	0.26
16	15	50	30	A2	2924.1	10.51	10.51	0.227	8.07	0.19	0.19	2.44
17	10	93	30	A3	3299.6	11.25	11.25	0.300	4.97	0.11	0.12	6.28
18	10	93	20	A3	181.0	0.98	0.98	0.024	0.61	0.12	0.11	0.37
19	15	93	20	A3	261.0	1.43	1.43	0.065	1.45	0.12	0.12	-0.02
20	15	93	30	A3	3054.8	9.80	9.80	0.309	6.63	0.12	0.13	3.17
21	10	50	30	A3	4340.9	13.88	13.88	0.371	7.23	0.17	0.17	6.65
22	10	50	20	A3	1599.3	8.59	8.59	0.245	3.68	0.16	0.16	4.91
23	15	50	20	A3	330.0	1.74	1.74	0.065	1.05	0.17	0.17	0.69
24	15	50	30	A3	2753.3	9.04	9.04	0.264	6.04	0.18	0.18	3.00
1	10	93	30	B1	16589.7	54.52	54.52	0.564	51.45	0.13	0.16	3.07
2	10	93	20	B1	7620.6	40.88	40.88	0.535	40.31	0.13	0.14	0.57
3	15	93	20	B1	3270.8	17.25	17.25	0.498	33.39	0.14	0.15	-16.14
4	15	93	30	B1	12133.9	38.88	38.88	0.628	46.51	0.15	0.17	-7.63
5	10	50	30	B1	14768.4	48.39	48.39	0.622	37.53	0.18	0.19	10.86
6	10	50	20	B1	6418.9	34.54	34.54	0.559	19.03	0.17	0.17	15.51
7	15	50	20	B1	1507.2	8.69	8.69	0.327	12.35	0.18	0.18	-3.66
8	15	50	30	B1	9825.6	32.41	32.41	0.618	32.33	0.19	0.2	0.08
9	10	93	30	B2	11633.7	48.66	38.95	0.588	48.75	0.13	0.15	-0.09
10	10	93	20	B2	6189.7	38.34	32.29	0.563	36.86	0.12	0.13	1.48
11	15	93	20	B2	2651.7	15.10	14.23	0.488	31.71	0.14	0.14	-16.61
12	15	93	30	B2	8683.7	34.02	28.75	0.632	43.10	0.15	0.16	-9.08
13	10	50	30	B2	10737.3	44.93	36.44	0.696	33.86	0.17	0.18	11.07
14	10	50	20	B2	5004.8	33.00	28.32	0.731	17.15	0.16	0.16	15.85
15	15	50	20	B2	2452.8	14.40	14.24	0.880	17.91	0.17	0.17	-3.51
16	15	50	30	B2	6874.9	27.32	24.70	0.649	29.81	0.19	0.2	-2.49
17	10	93	30	B3	7953.6	28.67	27.13	0.688	22.08	0.11	0.13	6.59
18	10	93	20	B3	4260.7	23.43	23.05	0.599	18.92	0.11	0.12	4.51
19	15	93	20	B3	1932.8	10.44	10.59	0.620	15.93	0.12	0.13	-5.49
20	15	93	30	B3	5769.5	20.53	18.51	0.621	20.55	0.13	0.14	-0.02
21	10	50	30	B3	6528.1	24.06	20.87	0.574	16.04	0.17	0.17	8.02
22	10	50	20	B3	2832.8	16.49	15.21	0.476	8.17	0.16	0.16	8.32
23	15	50	20	B3	1653.5	8.87	8.72	0.449	7.42	0.17	0.17	1.45
24	15	50	30	B3	4211.0	15.28	13.82	0.476	13.23	0.18	0.18	2.05
17	10	93	30	C3	6858.3	35.47	23.39	0.517	43.53	0.13	0.14	-8.06
18	10	93	20	C3	3929.1	28.65	21.26	0.535	32.98	0.12	0.13	-4.33
19	15	93	20	C3	1972.8	11.90	10.81	0.758	31.65	0.12	0.13	-19.75
20	15	93	30	C3	5786.1	25.90	18.57	0.619	38.71	0.14	0.15	-12.81
21	10	50	30	C3	6664.3	32.85	21.30	0.566	26.39	0.17	0.18	6.46
22	10	50	20	C3	3728.5	27.03	20.02	0.578	12.75	0.16	0.16	14.28
23	15	50	20	C3	1956.0	11.67	10.32	0.606	12.03	0.17	0.17	-0.36
24	15	50	30	C3	5418.2	23.75	17.78	0.641	24.89	0.18	0.19	-1.14

Warto przypomnieć, że symbolem Q_{k1} oznaczono natężenie przepływu w korycie głównym przed przelewem bocznym, natomiast h_{k1} oznacza napełnienie koryta przed, a h_{k2} napełnienie za przelewem. Trzeba zwrócić uwagę, że ze względu na jednowymiarowość modelu numerycznego Hec-Ras nie jest możliwe uzyskanie rozkładu prędkości przepływu w całej płaszczyźnie przekrojów koryta, toteż w tej kwestii symulacje użyty tu programem komputerowym nie mogą posłużyć do porównań z wynikami badań na modelu.

Fragment graficznej prezentacji rezultatów obliczeń symulacyjnych pokazano niżej na kolejnych rysunkach.



Rys. 6.8. Układ zwierciadła wody w korycie dla 1, 9 i 17 serii pomiarowej



Rys. 6.9. Parametry przepływu w korycie głównym: a) natężenie przepływu, b) średnia prędkość przepływu, c) napelnienie.

W większości przypadków uzyskano zgodność (z dokładnością od 0.02 do 8.57%) wartości wydatku przez przelewy boczne biorąc pod uwagę przeprowadzone badania eksperymentalne i obliczenia symulacyjne. Obliczenia te traktować należy jako postępowanie dodatkowe, a dokonywane w oparciu o nie porównania zaś świadczą przede wszystkim o merytorycznej wartości modelu Hec-Ras; wzorcem weryfikacyjnym są tu niewątpliwie badania modelowe. Można powiedzieć, że w zakresie, w którym te badania były prowadzone, model numeryczny zakładający jednowymiarowość przepływu w korycie okazał się być może całkiem skuteczny, przynajmniej w odniesieniu do kwestii wydatków przelewów bocznych. Należy jednak z całą mocą podkreślić, że jedną z podstawowych danych wejściowych do programu komputerowego była wartość współczynnika wydatku przelewu, a tę ustalono na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez autora. Potwierdza się tym samym przekonanie podzielane przez autora, że badania na modelach fizycznych są sprawą podstawową dla opisu zjawisk i procesów hydrodynamicznych.

7

Podsumowanie i wnioski

Jako obiekty inżynierskie przelewy boczne pełnią istotne funkcje w wielu przedsięwzięciach z zakresu inżynierii i gospodarki wodnej. Przykładów można znaleźć wiele, od zastosowań w laboratoriach badawczych, poprzez instalacje ujęć wody i oczyszczania ścieków, do tak znaczących realizacji, jak obiekty ochrony przeciwpowodziowej, kiedy to przelewy boczne występują w roli budowli zasilających poldery. Powyższe powody sprawiają, że przelew boczny jako obiekt sam w sobie powinien być ważnym podmiotem badań, których rezultaty pozwolą ustalić wiele istotnych kwestii: usytuowanie przelewu, geometria i wymiary jego wycięcia, hydraulika działania, a w szczególności współczynnik wydatku, krzywą konsumcyjną i generalnie przedstawić kinematykę dopływu wody do przelewu.

Przegląd literatury doprowadza do wniosku, że określone wyżej pole badań jest rozpoznane jedynie fragmentarycznie i sprowadza się do ustalenia w zasadzie tylko podstawowych zależności pozwalających projektować wydatek przelewu. Autor dostrzega znacznie szerszy kontekst problemu, obejmujący przede wszystkim bezpośredni związek obrazu ruchu cieczy i rozkładu prędkości w korycie z efektywnym funkcjonowaniem przelewu bocznego. W tym względzie można natrafić na wyrywkowe tylko ustalenia innych badaczy. Wydaje się, że interesujące - z punktu widzenia praktyki inżynierskiej - byłoby zwłaszcza rozeznanie sytuacji, w której wzdłuż ciekłu (kanału) sytuuje się kolejno kilka przelewów bocznych. Współpracując ze sobą hydraulicznie tworzą one szeregowy układ przelewów, ustawionych w określonym szyku. Zbadanie wzajemnego wpływu obiektów na siebie i ustalenie jego skutków w odniesieniu do wydatku takiego układu, efektywności poszczególnych przelewów, zmian pól prędkości w obszarze ich oddziaływania – wszystkiemu temu można nadać charakter badań podstawowych z wyraźnym wskazaniem aplikacyjnym w praktyce inżynierskiej.

Na tym tle sformułowano tezę pracy oraz jej cele szczegółowe. Objęły one: przede wszystkim wyznaczenie pól prędkości i dynamiki ich deformacji w obszarach koryta objętych oddziaływaniem pracujących przelewów bocznych, określenie zmian położenia zwierciadła cieczy w tych obszarach, określenie zmian wartości współczynnika wydatku przelewów bocznych w różnych ich układach. Sugeruje się, że hydrauliczne efekty oddziaływania takich przelewów pracujących w układach szeregowych są istotne.

Badania autora, których dotyczy niniejsza rozprawa, były badaniami eksperymentalnymi, przeprowadzonymi w korycie hydraulicznym na modelu fizycznym. Geometrię wycięcia przelewów ograniczono do kształtu prostokąta, ustalając, że badane przelewy są przelewami o ostrej krawędzi i pracują jako niezatopione. Rozważano ruch ustalony, spokojny w korycie dopływowym, w którym usytuowane są przelewy boczne. Badania objęły dwadzieścia cztery serie różnicowane w zależności od natężenia przepływu w tym korycie, od liczby tych przelewów w układzie, także od długości i wysokości korony przelewu. W uzupełnieniu tych badań, które stanowią sedno pracy, dokonano kilku przebiegów obliczeń symulacyjnych posługując się odpowiednim modelem numerycznym.

Wydaje się, że teza rozprawy została dowiedziona. Świadczą o tym rezultaty pomiarów, które doprowadziły do wniosków szczegółowo omówionych w odpowiednich miejscach tekstu rozdziału 5. Wnioski te można ująć syntetycznie następująco:

1. Zgodnie z teorią obserwowano wznoszenie się zwierciadła wody na długości korony przelewów bocznych, przy czym w przypadku przelewów otwierających szereg kilku wycięć maksimum poziomu zwierciadła wody na przelewie występuje w odległości około trzykrotnej wysokości p jego korony, licząc od początku wycięcia. Odnosząc się do próby określenia usytuowania miejsca pomiaru grubości warstwy wody h na przelewie bocznym stwierdzono, że leżeć ono powinno w odległości p od ściany przelewu.
2. W obszarze przyległym do przelewu bocznego pole prędkości przepływu w korycie ulega istotnej deformacji, mające odzwierciedlenie w kształcie izotach; deformacje te są tym większe im krótsza jest długość korony przelewu. Jednocześnie wraz ze skracaniem korony przelewu różnice między wartościami prędkości w punktach danego pola przepływu ulegają zmniejszeniu. Rozkład

prędkości w obszarze przelewu stanowiącego kolejny element układu szeregowego jest wyraźnie inny niż w obszarze oddziaływania przelewu, który pracuje jako pojedynczy. Pojawiają się zawirowania, znaczne różnicowanie wartości prędkości. Zwraca uwagę występowanie martwych obszarów przepływu.

3. Analizując wydatek układu przelewów bocznych ustawionych w szyku dwójkowym i trójkowym, dochodzi się do następujących konkluzji:
 - przy tworzeniu szeregowych układów przelewów bocznych i przy zwiększaniu liczby przelewów w szyku uzyska się wzrost wydatku w sensie ilości wody odbieranej z koryta, natomiast wydatki poszczególnych przelewów w takich układach zmniejszą się w stosunku do tej ilości, którą odprowadziłby przelew pracujący jako pojedynczy,
 - po dodaniu drugiego przelewu do już pracującego i utworzeniu dwójkowego szyku wydatek przelewu drugiego w kolejności jest większy od wydatku przelewu pierwszego; w szyku trójkowym można się spodziewać, że największy wydatek da przelew ostatni,
 - łączny wydatek dwóch przelewów w szyku jest w stosunku do pojedynczego przelewu nieco tylko większy (o kilka procent); podobnie jest dla układu trzech przelewów, co upoważnia do wniosku, że zwiększanie liczby przelewów bocznych w układzie szeregowym daje niezbyt znaczący efekt.
4. Badania eksperymentalne dowiodły, że na wartość współczynnika wydatku przelewu bocznego ma wpływ miejsce tego przelewu w układzie szeregowym. Współczynniki wydatku przelewów otwierających szyk są najniższe, dla następnych wyższe. Jest to spowodowane wzajemnym wpływem pól prędkości i układu zwierciadła w korycie między przelewami. Wpływu tego nie uwzględniają wzory inżynierskie, odnoszące się do przelewów pracujących pojedynczo.
5. Do przeprowadzonych na modelu fizycznym badań dołączono kilka przebiegów symulacji numerycznych dokonanych z pomocą programu Hec-Ras. Wyrażając w tym kontekście swą opinię, autor skłonny jest przytoczyć *in extenso* słowa, umieszczone w zakończeniu rozdziału 6.2: „Można powiedzieć, że w zakresie, w którym badania były prowadzone, model numeryczny zakładający jednowymiarowość przepływu w korycie okazał się być może całkiem

skuteczny, przynajmniej w odniesieniu do kwestii wydatków przelewów bocznych. Należy jednak z całą mocą podkreślić, że jedną z podstawowych danych wejściowych do programu komputerowego była wartość współczynnika wydatku przelewu, a tę ustalono na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez autora. Potwierdza się tym samym przekonanie, że badania na modelach fizycznych są sprawą podstawową dla opisu zjawisk i procesów hydrodynamicznych”.

Autor dostrzega potrzebę kontynuowania podjętych badań, bowiem w trakcie już dokonanych wyłoniło się wiele kwestii, które niewątpliwie wymagają dalszych odniesień. Należy do nich choćby problem ustalenia, przy jakim rozstawie przelewów bocznych w szeregu i przy jakich wartościach poszczególnych parametrów różnego charakteru zanika wpływ wzajemnego oddziaływania tych przelewów. Szeroko zakrojonych eksperymentów, w których przyjęto by różne kształty wycięcia przelewu, różne kształty przekroju poprzecznego koryta (praca przelewów w naturalnych ciekach o przekroju wielodzielnym), spełnienie kryteriów zatopienia etc., należy się jeszcze spodziewać. Kwestie te wykraczały poza zakres niniejszej pracy, lecz inspirują one do dalszych poczynań badawczych.

Literatura

- Akers P., *A theoretical consideration of side weirs as storm-water overflows*, J. Inst. of Civil Engrg., vol. 6, 1957
- Allen J. W., *The discharge of water over side weirs in circular pipes*, J. Inst. of Civil Engrg., vol. 6, 1957
- Balmforth D. J. and Sarginson E. J., *The effects of curvature in supercritical side weir flow*, International Association for Hydraulic Research, vol. 21, 1983
- Błaszczak W., Stamatello H., Błaszczak P., *Kanalizacja*, t. 1, Arkady, Warszawa, 1983
- Bogomołow A. I., Michajłow K. A., *Gidrawlika*, Strojizdat, Moskwa, 1972
- Bolszakow W. A., Pietrasz A. D., *Wlianie odnositelnoj sziriny poroga na koefficient raschoda trapiieczdalnych wodosliwow*, Mat. nauk.-techn. „Gidrawlika i gidrotiechnika”, nr 3, Izdat. Tiechnika, Kijów, 1966
- Cebertowicz R., *Budowle hydrotechniczne w świetle doświadczeń na modelach*, PWN, Warszawa 1958
- Chow V. T., *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Comp. Inc., New York, 1959
- Collinge V. K., *The discharge capacity of side weirs*, J. Inst. of Civil Engrg., vol. 6, 1957
- Czetwertyński E., *Hydraulika i Hydromechanika*, PWN, Warszawa, 1958
- Czugajew R. R., *Gidrawlika*, Energia, Leningrad, 1970
- Das A., *Spatially varied flow over an embankment side weir*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 123 No 4, 1997
- Davis J. E., *The design and modeling of side weirs for detention basin facilities*, The University of Texas at Austin, 1990
- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A., *Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych*, PWRiL, Warszawa, 1982

- El-Kashab A. and Smith K. V. H., *Experimental Investigation of flow over side weirs*, Journal of the Hydraulics Division, 1976
- Frazer W., *The behaviour of side weirs in prismatic rectangular channels*, J. Inst. of Civil Engrg. vol. 6, 1957
- Gidrawliczieskije rascziety wodosbrasnych gidrotechnicznych sooruzienij*, pr. zbiorowa, Energoatomizdat, Moskwa, 1988
- Hager W. H., *Lateral outflow over side weirs*, Journal of Hydraulic Engineering, 1987
- Ishikawa T., *Water surface profile of stream with side overflow*, Journal of Hydraulic Engineering, vol. 110, 1984
- Jarosz A., *Hydraulika*, Hortpress, Warszawa, 1996
- Ka-Leung Lee, Holley E. R., *Physical modeling for side-channel weirs*, CRWR Report, Austin, 1998
- Kisielew P. G., *Gidrawlika. Osnowy miechaniki zidkosti*, Gosud. Energ. Izdat., Moskwa, 1963
- Kotowski A., *Analiza równań ruchu cieczy w kanałach z bocznymi przelewami*, Gaz, Woda i technika Sanitarna, Nr 3, 2000
- Kotowski A., *Dimensionless Equation for side-channel weirs*, Archives of Hydroengineering and Environmental Mechanics, IBW PAN, Gdańsk, 2001
- Kotowski A., *Współczynnik przelewu bocznych upustów regulacyjnych*, Gospodarka Wodna, Nr 7, 2002
- Kubrak E., Kubrak J., *Hydraulika techniczna*, Wydawn. SGGW, Warszawa, 2004
- Kumar C. P. and Pathak S. K., *Triangular side weirs*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 113, 1987
- Mączyński A., *Obliczanie współczynnika wydatku przelewu bocznego. Wybrane formuły empiryczne*, Materiały XXII Ogólnopolskiej Szkoły Hydrauliki, Wydawnictwo IBW PAN, Gdańsk, 2002
- Mączyński A., Prystaj A., *Kinematyczny efekt działania przelewu bocznego - badania eksperymentalne*, Czasopismo Techniczne "Środowisko", Politechnika Krakowska, 2005
- Mitosek M., *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*, Oficyna Wydawn. Politechniki Warszawskiej, 1997
- Paszko N. N. i Dołgaczew F. M., *Gidrawlika ocnowy gidrologii*, Energia, Moskwa, 1977

- Pietrow G. A., *Dwizhenie zhidkosti s izmieniem raschoda wdol puti*, Strojizdat, Moskwa, 1951
- Poradnik *hydromechanika i hydrotechnika*, pr. zbiorowa pod red. A. Kisiela, Wydawn. Politechniki Czestochowskiej, 2003
- Prasad R., *Numerical mehod of computing flow profiles*, Journal of the Hydraulics Division, 1970
- Rogala R., Machajski J., Rędownicz W., *Hydraulika stosowana. Przykłady obliczeń*, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, 1991
- Sawicki J., *Przepływy ze swobodną powierzchnią*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1998
- Singh R., Satyanarayana T., *Automated field irrigation system using side weirs*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 120 No 1, 1994
- Smith K. V. H., *Computer programming for flow over side weirs*, Journal of the Hydraulics Division, 1973
- Sobota J., *Hydraulika i mechanika płynów*, Wydawn. Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2003
- Sprawocznik po gidrawliczieskim rasczietam*, pr. zbiorowa pod red. P.G. Kisieleva, Energia, Moskwa, 1974
- Subramanya K. and Awasthy S. C., *Spatially varied flow over side-weirs*, Journal of the Hydraulics Division, 1972
- Swamee P. K. i inni, *Subcritical flow over rectangular side weir*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 120 No 1, 1994
- Szuster A., Utrysko B., *Hydraulika i podstawy hydromechaniki*, Wydawn. Politechniki Warszawskiej, 1986
- Taylor J. R., *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*, PWN, Warszawa, 1999
- Tchobanoglous G., *Wastewater engineering: Collection and pumping of wastewater*, Metcalf and Eddy INC, 1981
- Tynes K. A., *Hydraulics of side-channel weirs for regional detention basins*, The University of Texas at Austin, 1989
- Uyumaz A. and Smith H., *Design procedure for flow over side weirs*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 117, 1991
- Uyumaz A., Muslu Y., *Flow over side weirs in circular channels*, Journal of Hydraulic Engineering, 1985

-
- Uyumaz A., *Side weir in U-shaped channels*, Journal of Hydraulic Engineering, 1997
- Wilson E. B., *Wstęp do badań naukowych*, PWN, Warszawa 1968
- Wit M., *Obniżenie kulminacji fali powodziowej przez polder Smolice do ochrony Krakowa przed powodzią*, Gospodarka Wodna, Nr 3, Warszawa, 1999
- Yen. B. C and Wenzel H. G., *Dynamic equations for steady spatially varied flow*, Journal of the Hydraulics Division, 1970
- Zasady badań modelowych w budownictwie wodnym*, Zeszyty Naukowe „Budownictwo wodne”, nr 2, Politechnika Krakowska, 1966
- Żbikowski A., *Małe budowle wodne*, PWN, Warszawa, 1967

Załącznik

Pełna dokumentacja rezultatów badań

<i>Spis zawartości</i>	<i>Strona</i>
Wyniki pomiarów na modelu hydraulicznym ^{*)}	
1. Przestrzenny układ zwierciadła wody w korycie dopływowym	2
2. Rozkłady prędkości podłużnej v_L/v_0	14
3. Rozkłady prędkości poprzecznej v_B/v_0	38
Fotograficzna dokumentacja badań ^{*)}	62
Zestawienie wyników obliczeń przeprowadzonych przy użyciu programu Hec-Ras ^{*)}	72

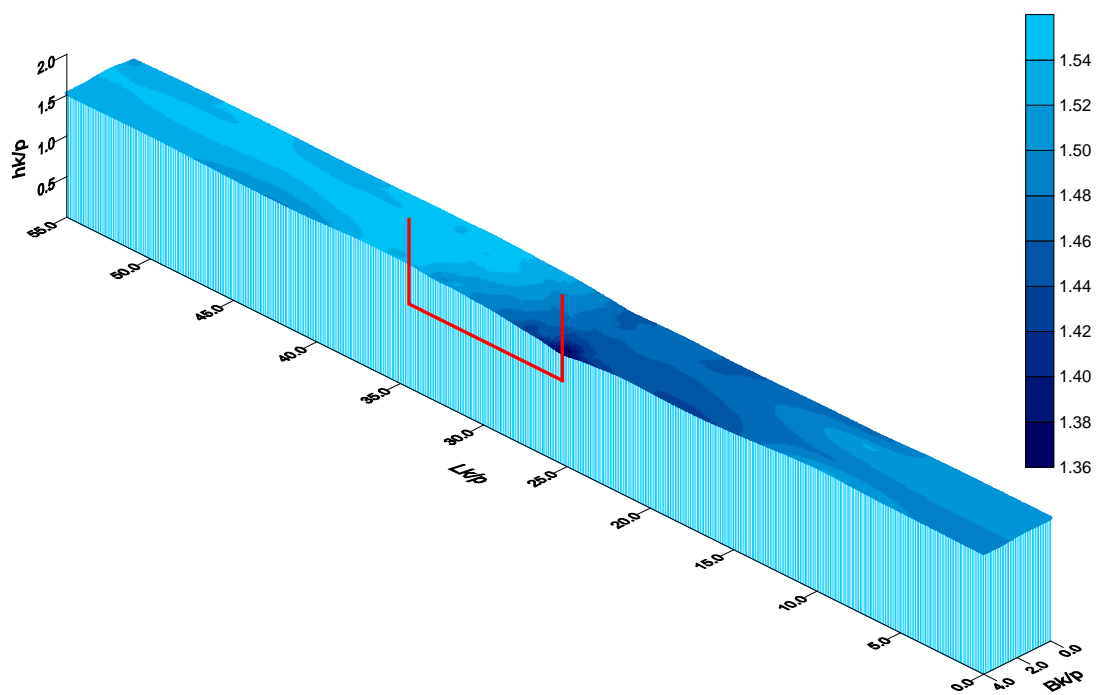
^{*)} Opis serii pomiarowych i oznaczenia przelewów są zamieszczone w rozdz. 5.

Wyniki pomiarów na modelu hydraulicznym

Przestrzenny układ zwierciadła wody w korycie dopływowym

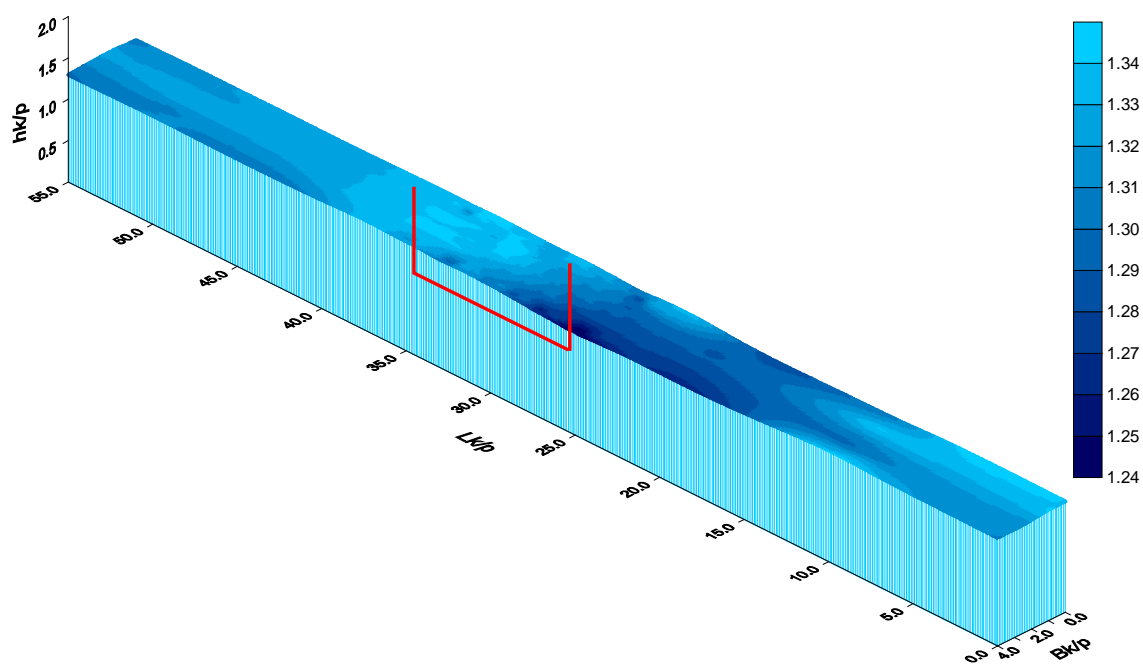
Układ zwierciadła wody

Seria 1



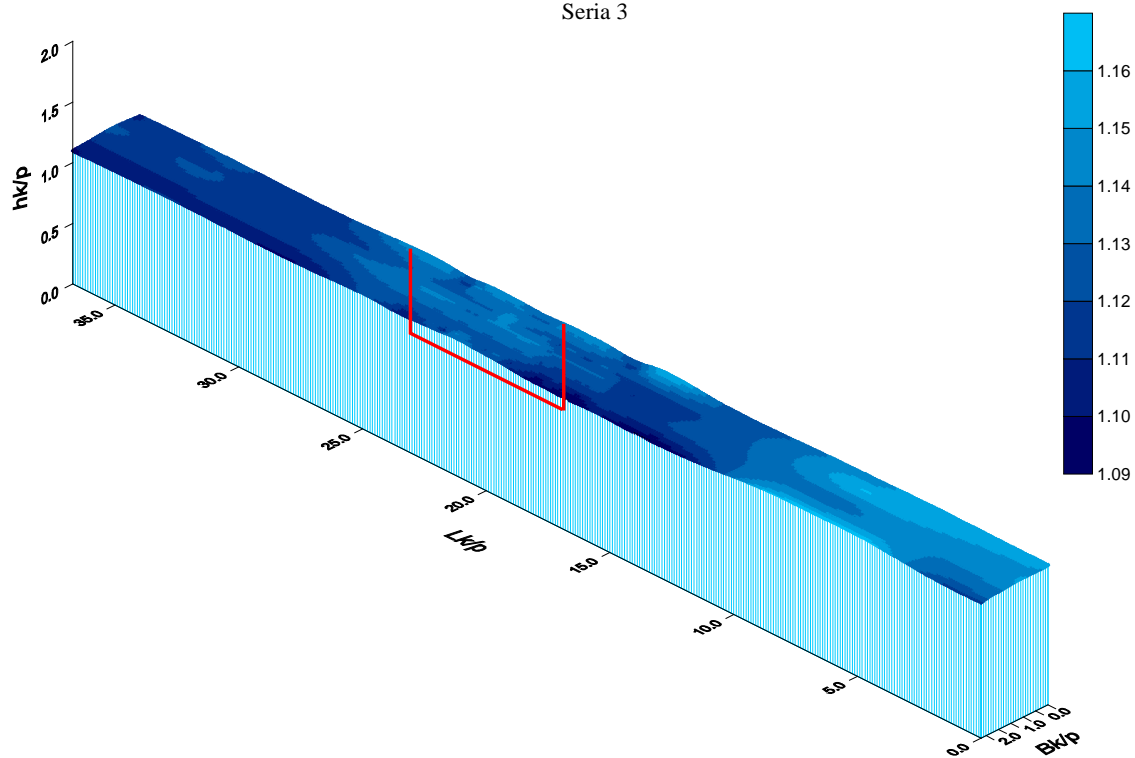
Układ zwierciadła wody

Seria 2



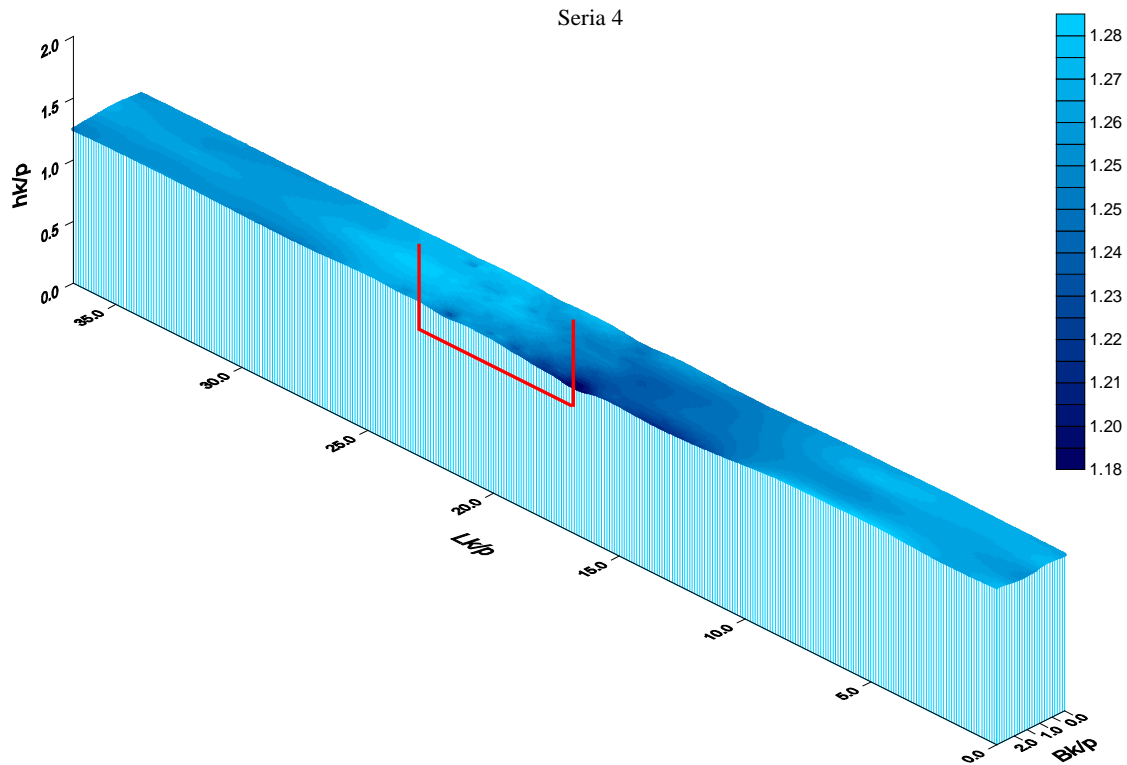
Układ zwierciadła wody

Seria 3



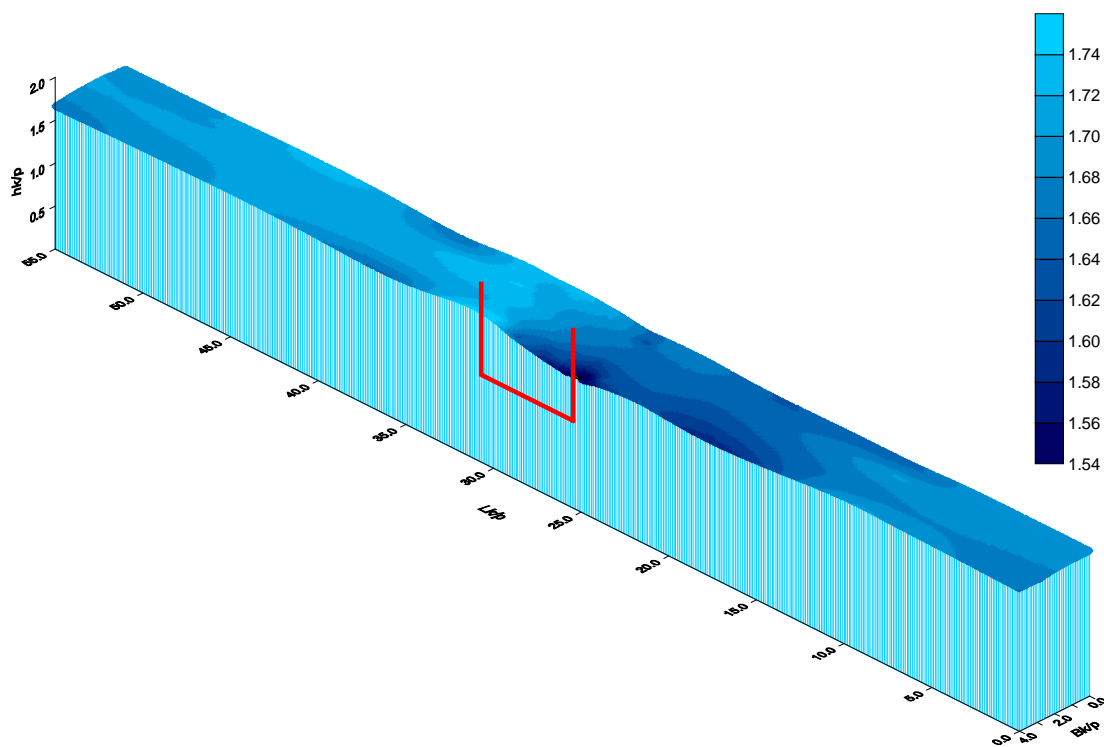
Układ zwierciadła wody

Seria 4



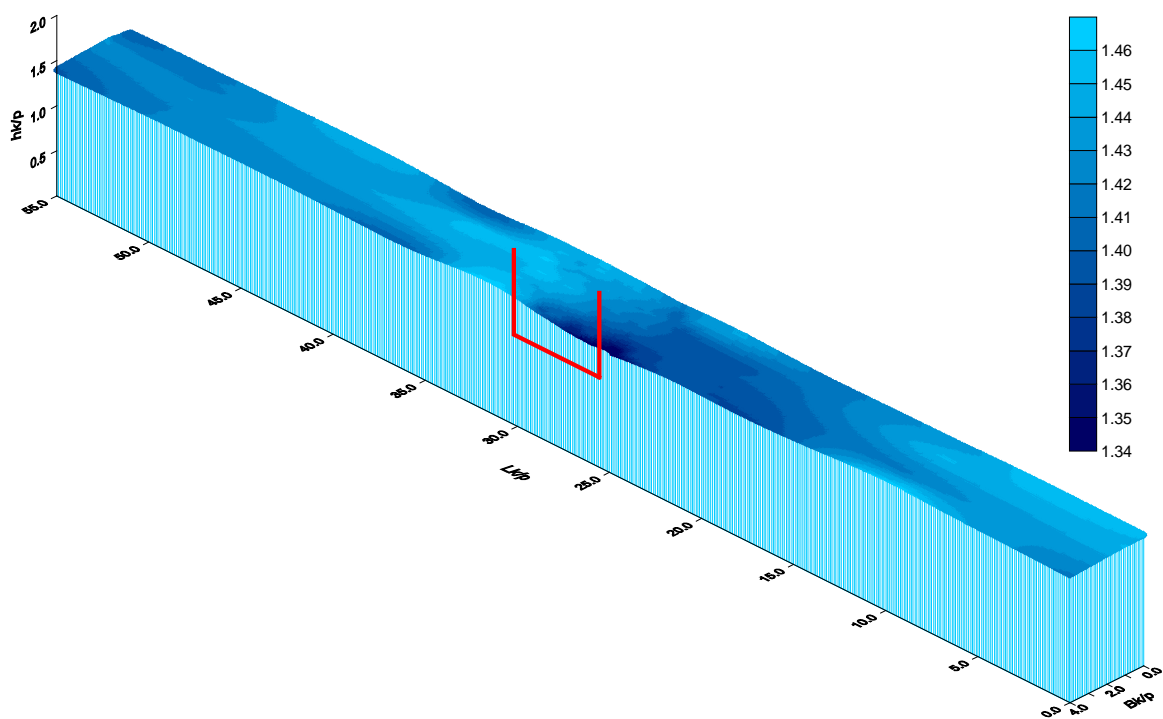
Układ zwierciadła wody

Seria 5



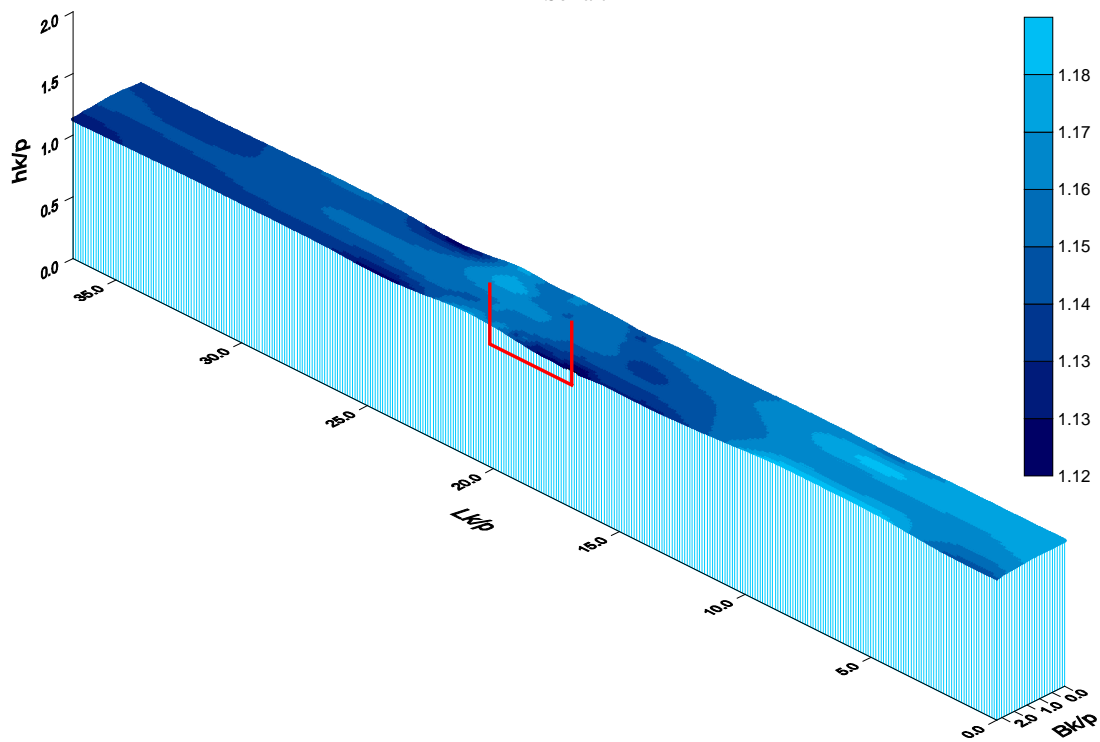
Układ zwierciadła wody

Seria 6



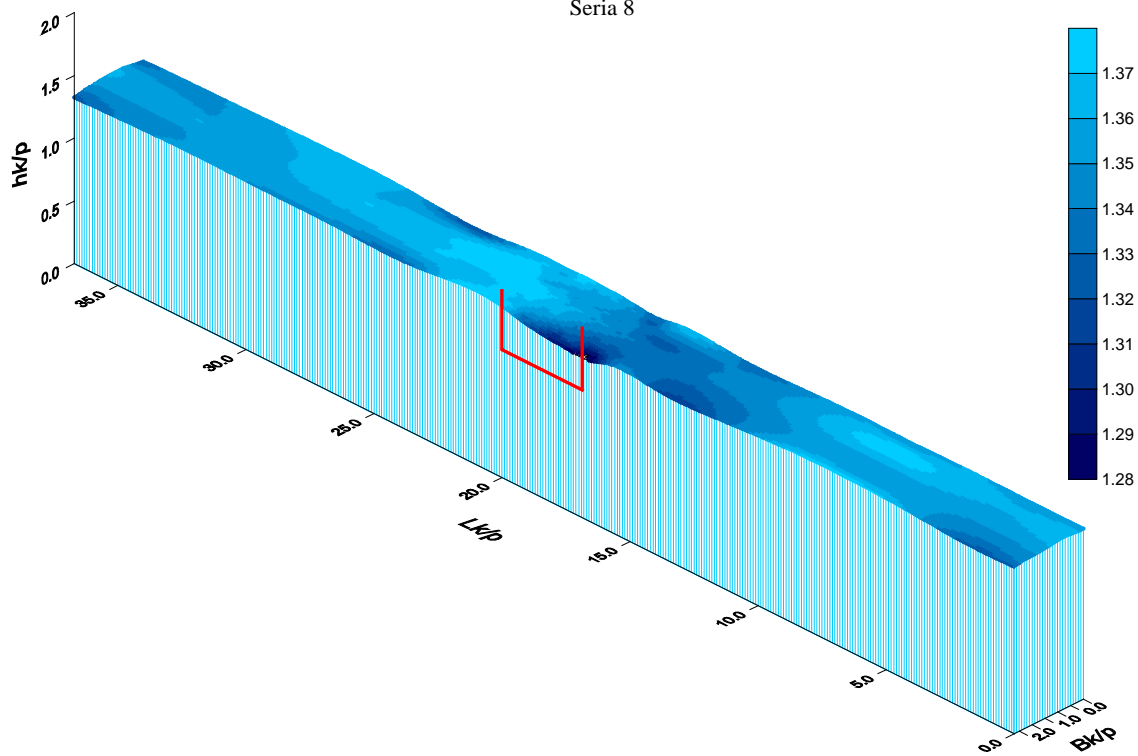
Układ zwierciadła wody

Seria 7



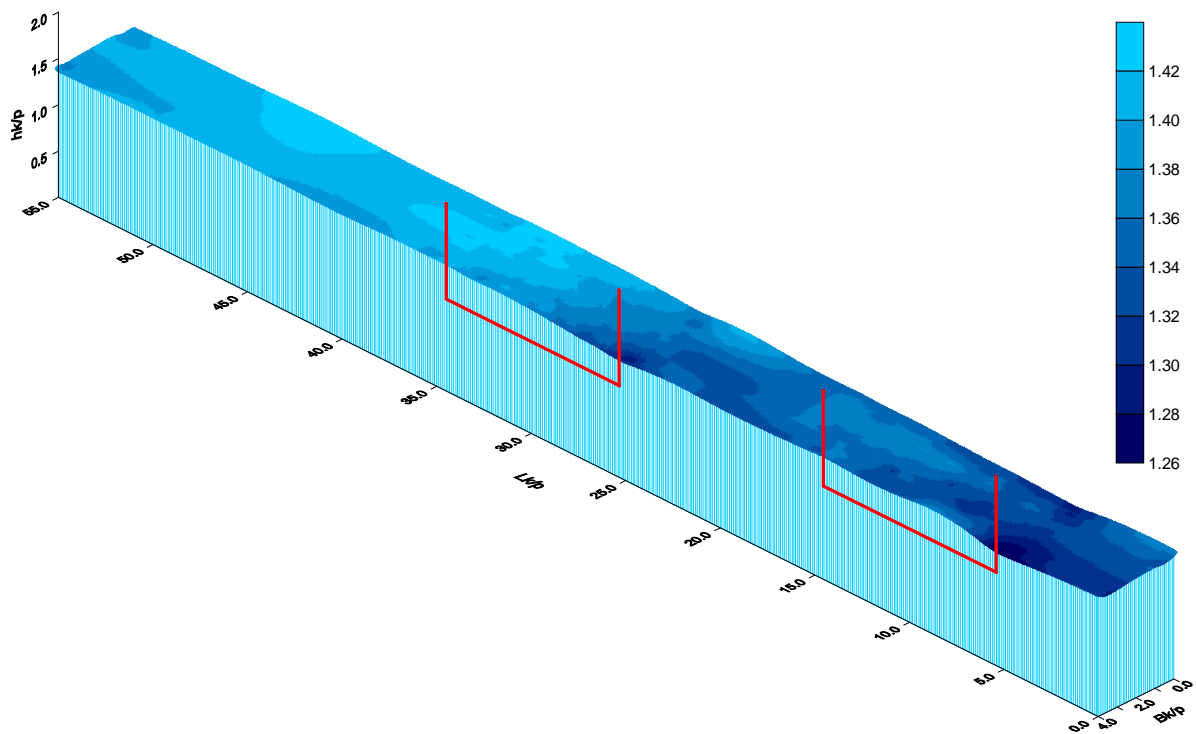
Układ zwierciadła wody

Seria 8



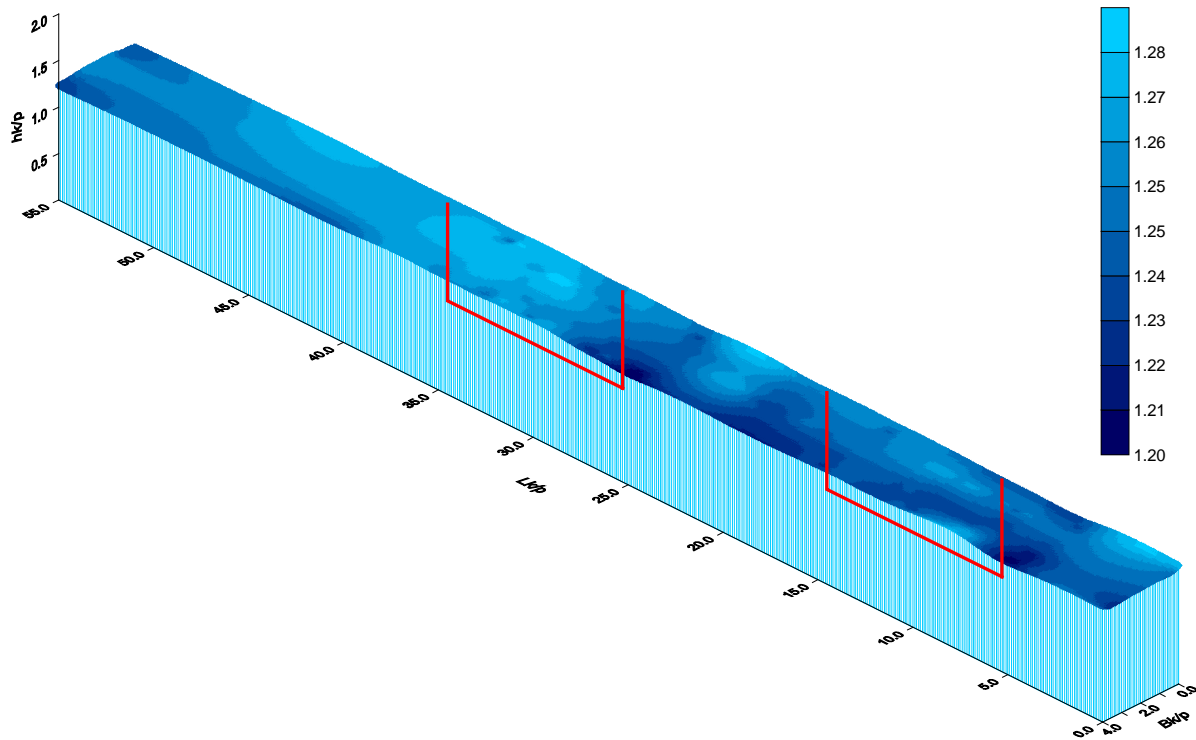
Układ zwierciadła wody

Seria 9



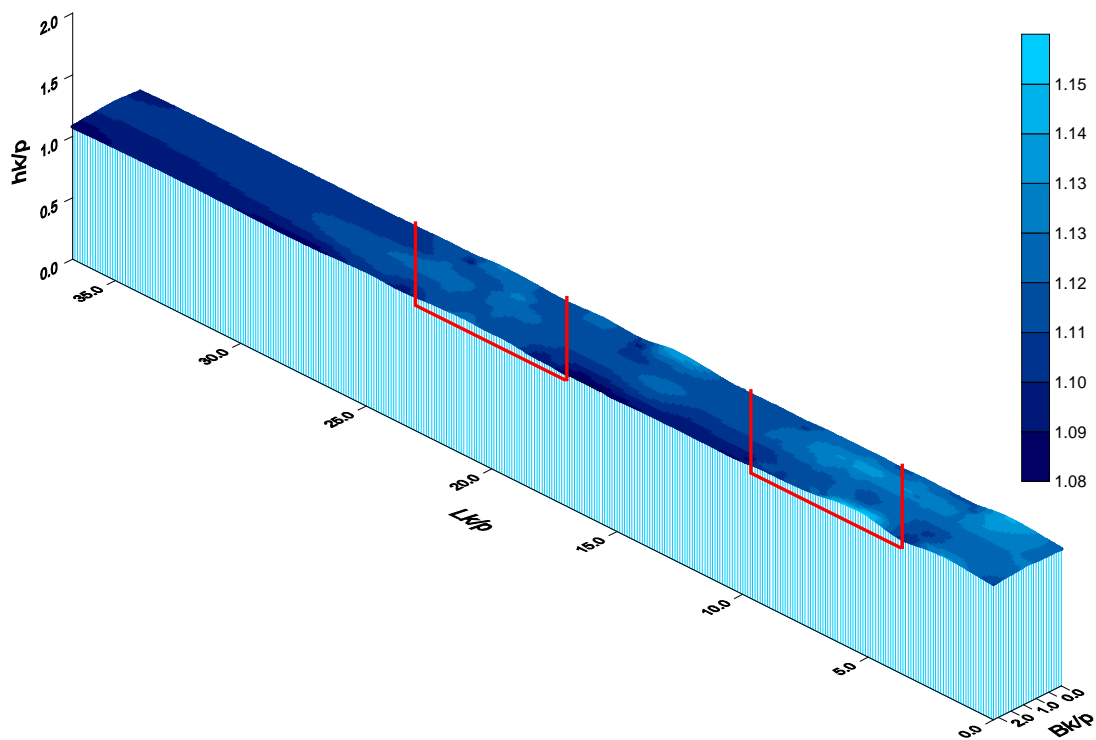
Układ zwierciadła wody

Seria 10



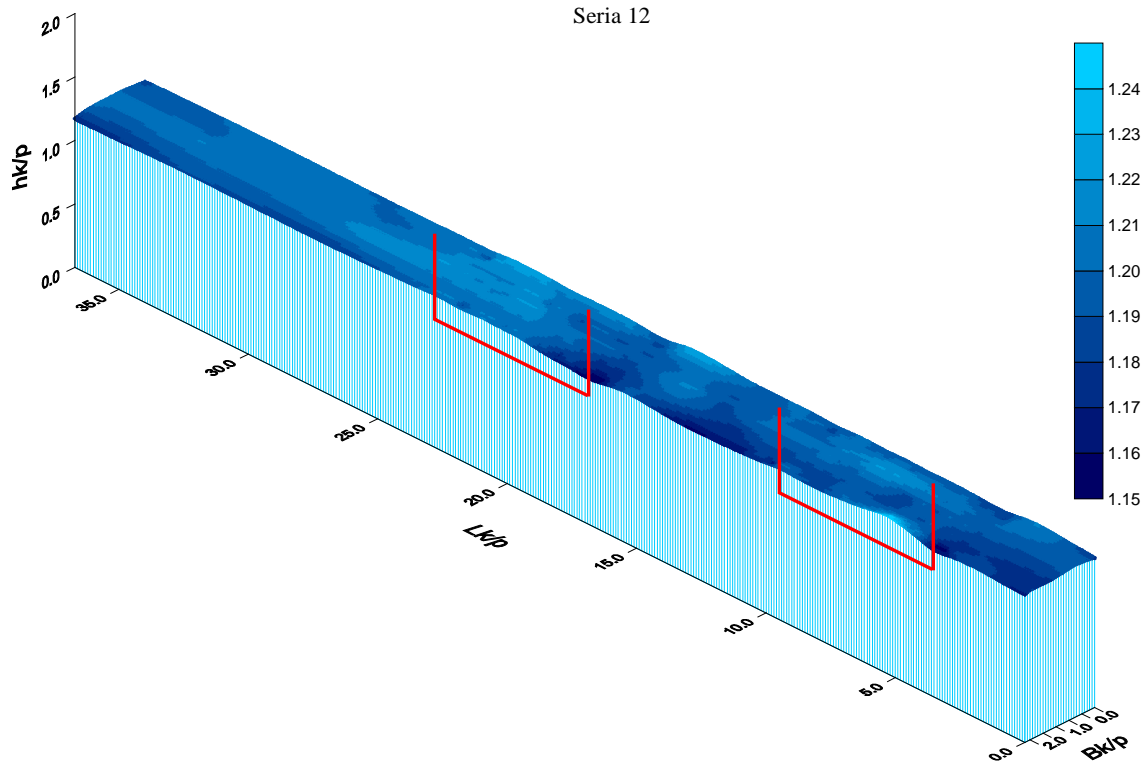
Układ zwierciadła wody

Seria 11



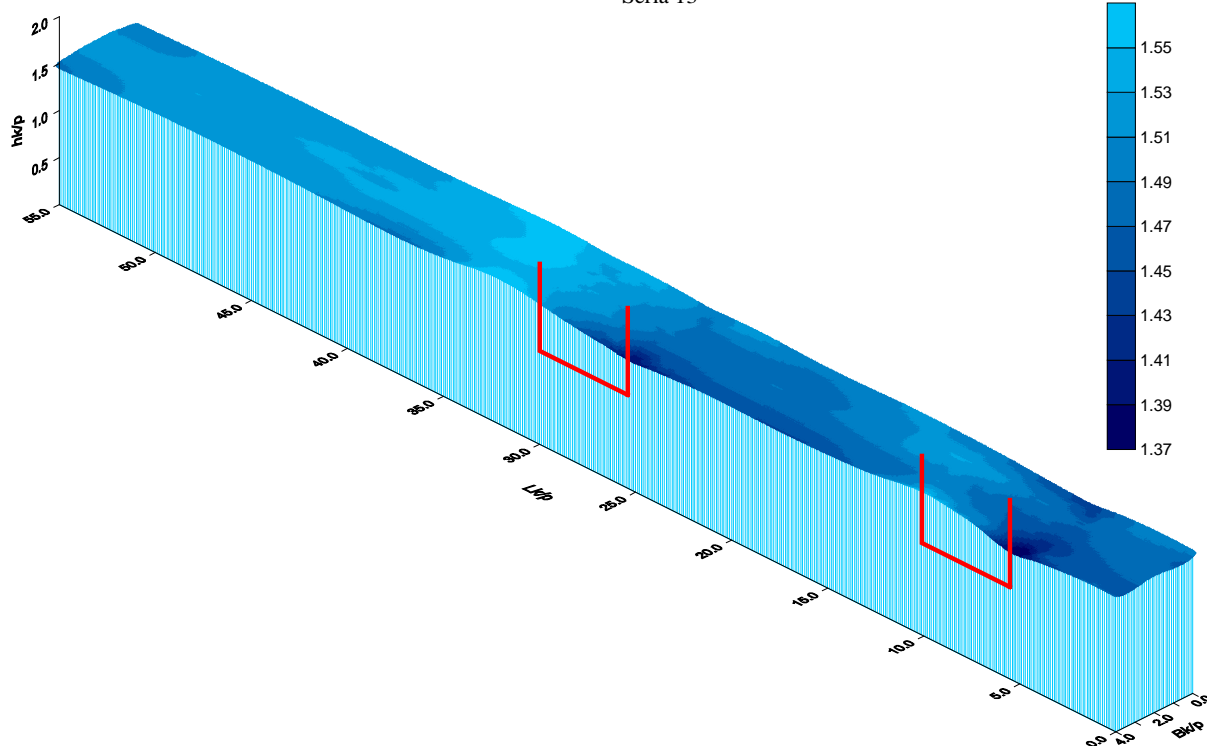
Układ zwierciadła wody

Seria 12



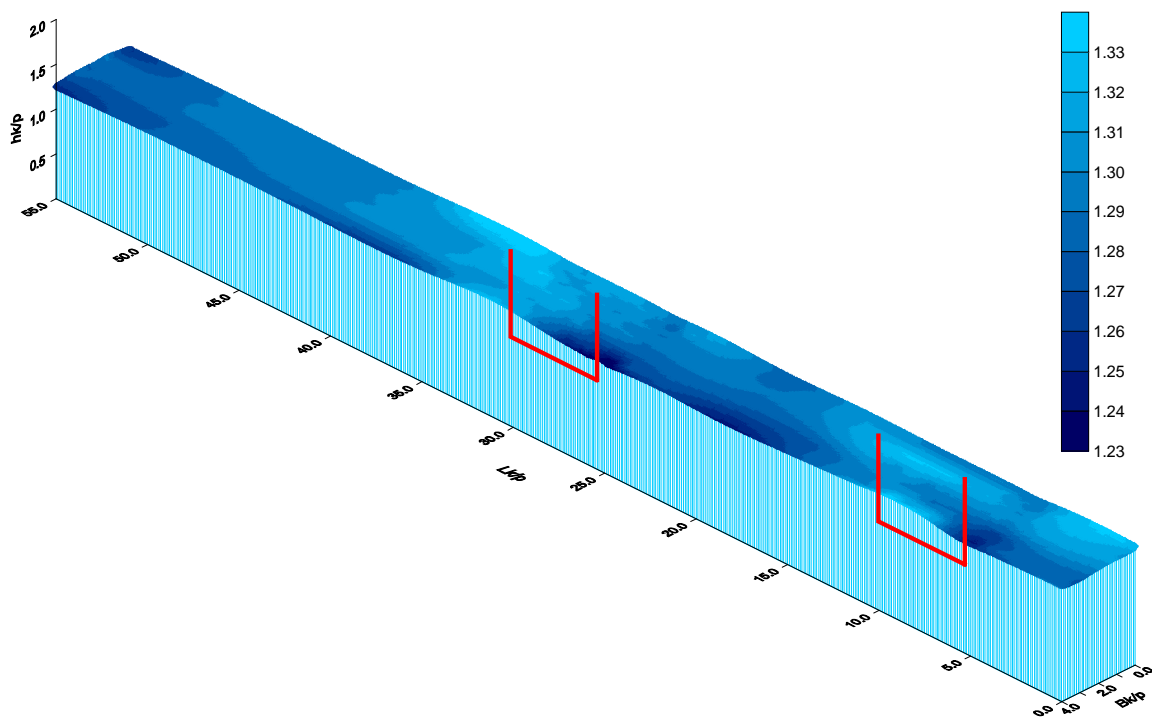
Układ zwierciadła wody

Seria 13



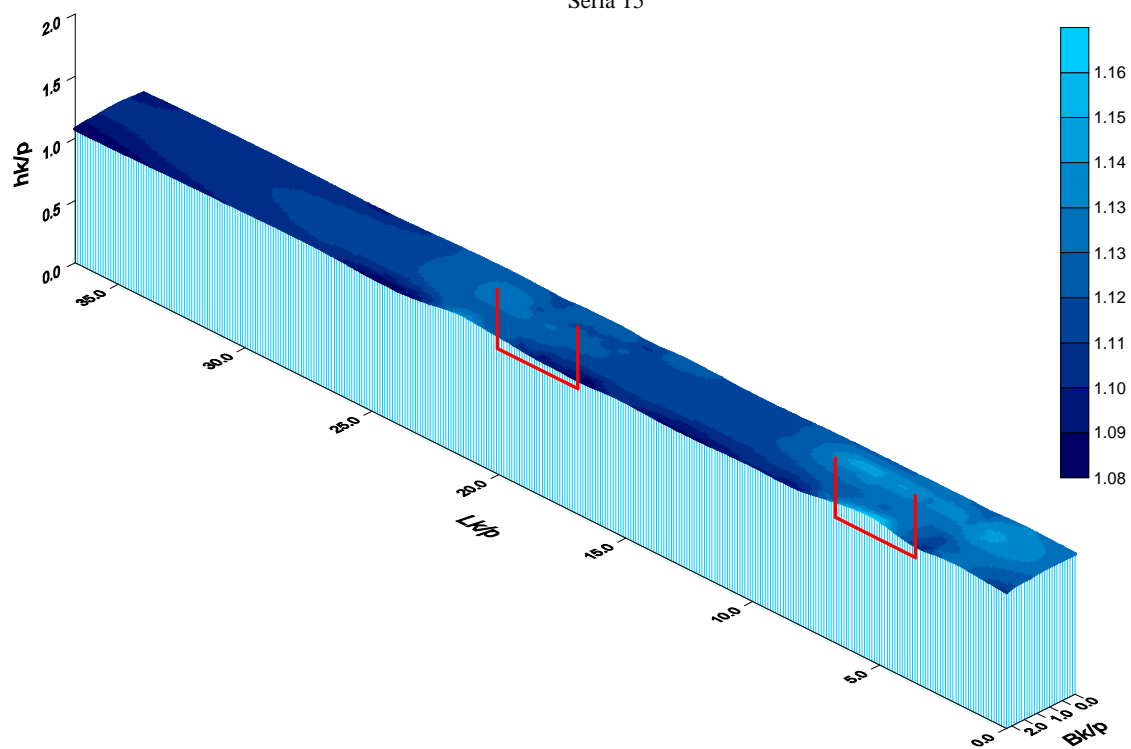
Układ zwierciadła wody

Seria 14



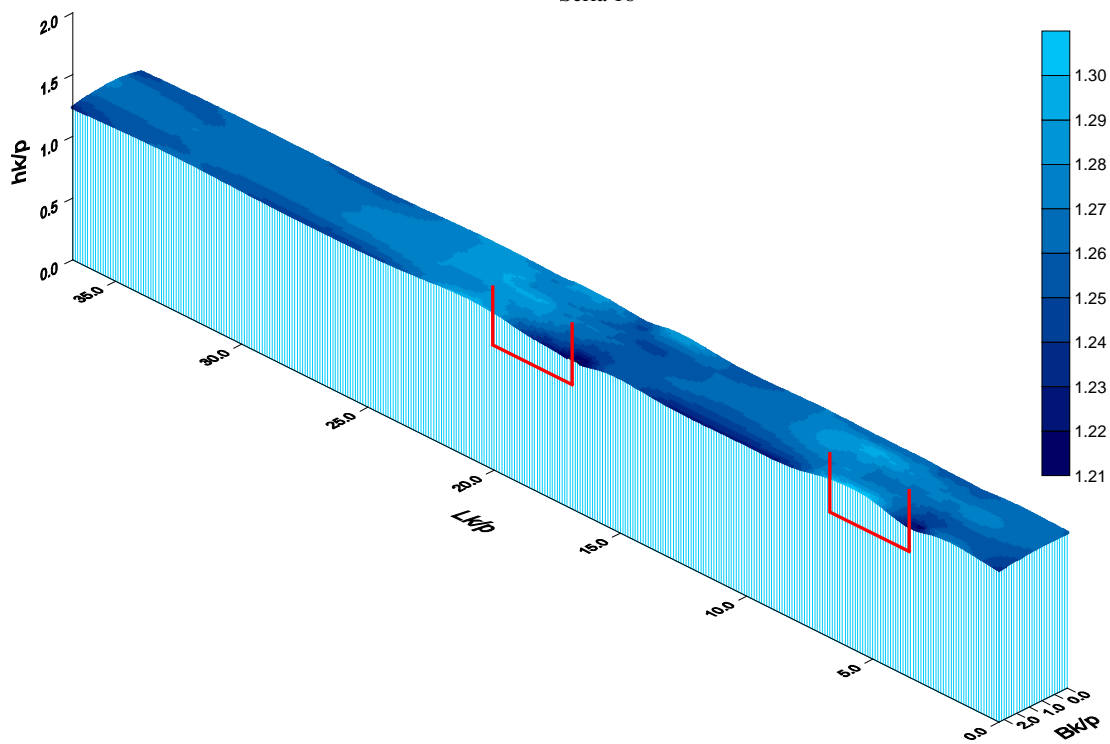
Układ zwierciadła wody

Seria 15



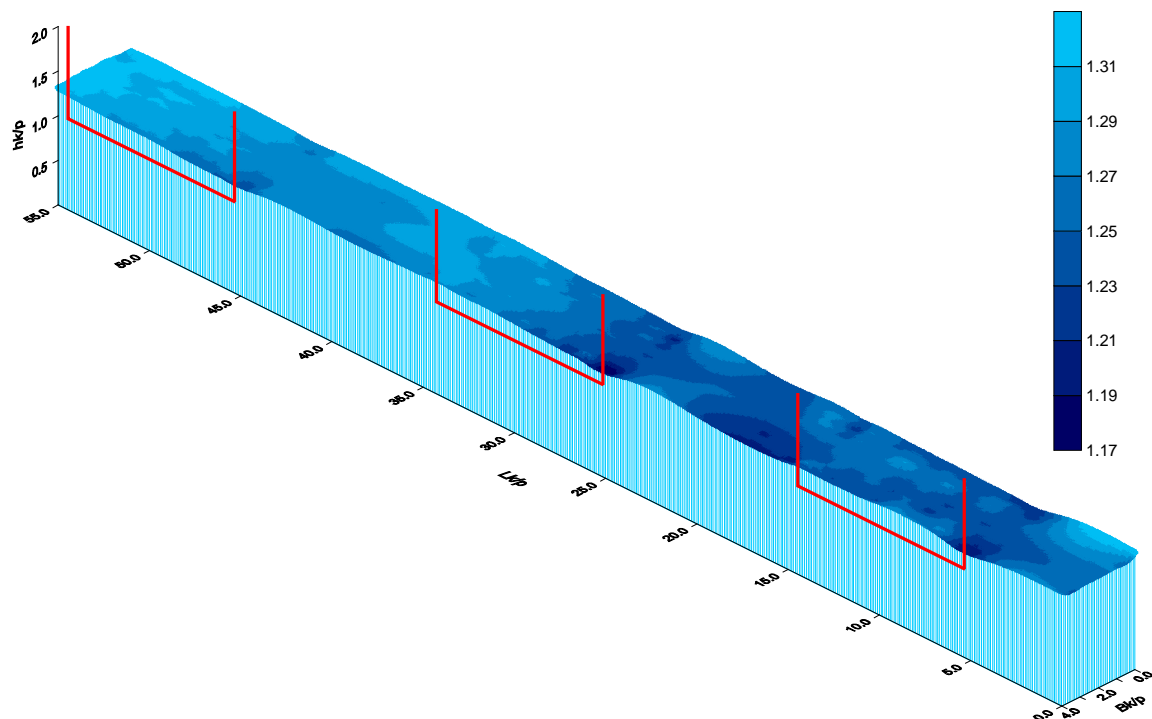
Układ zwierciadła wody

Seria 16



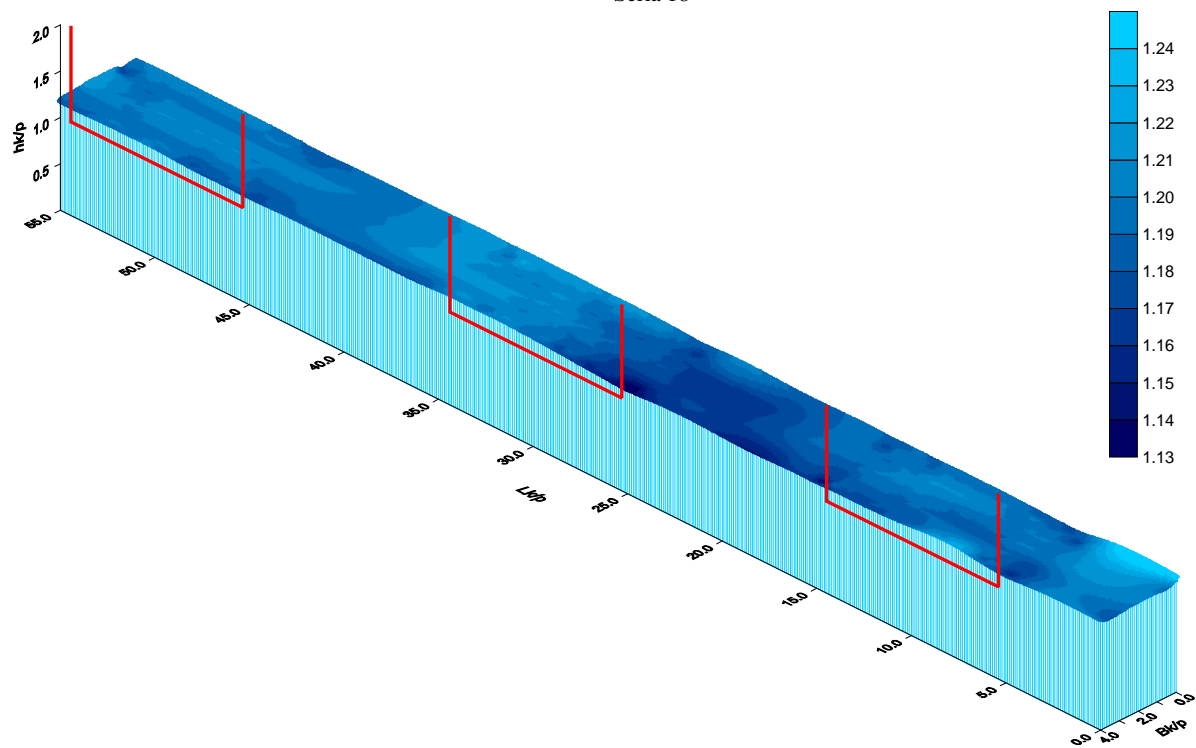
Układ zwierciadła wody

Seria 17



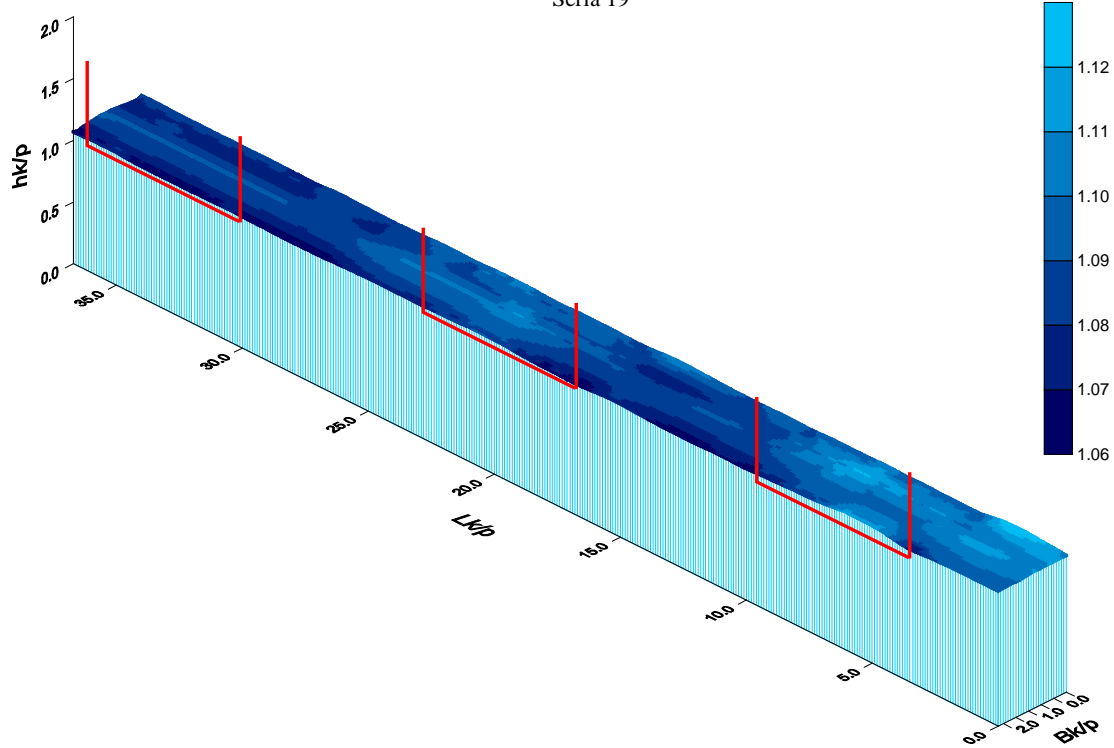
Układ zwierciadła wody

Seria 18



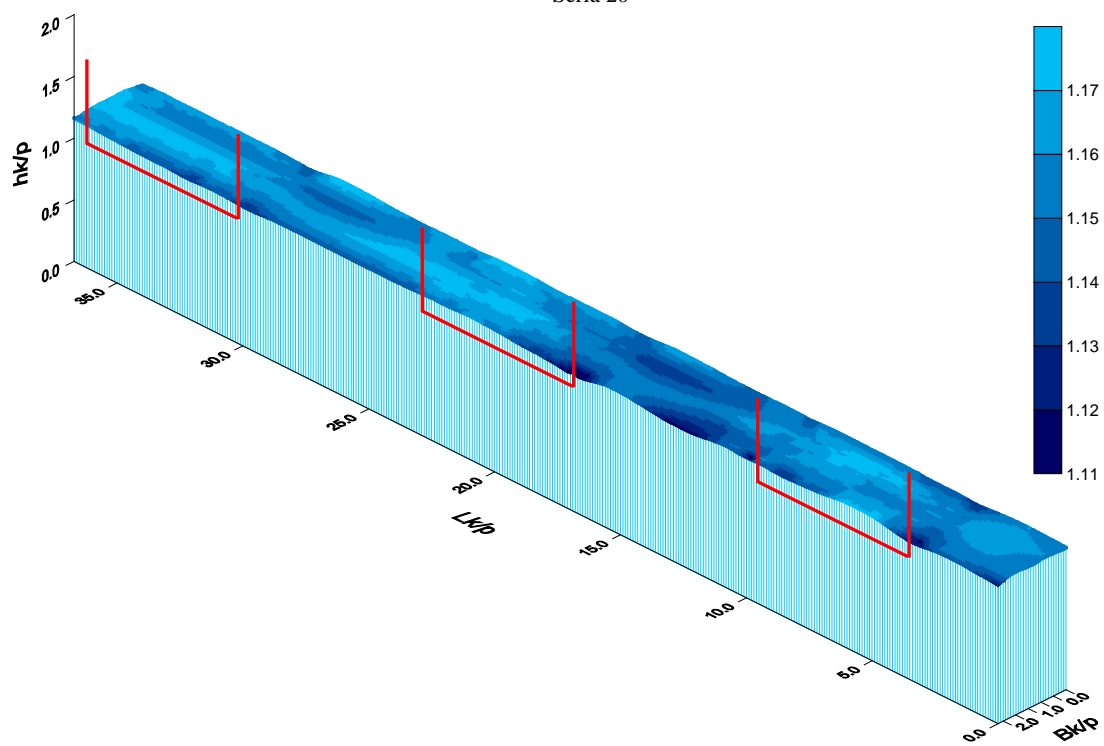
Układ zwierciadła wody

Seria 19



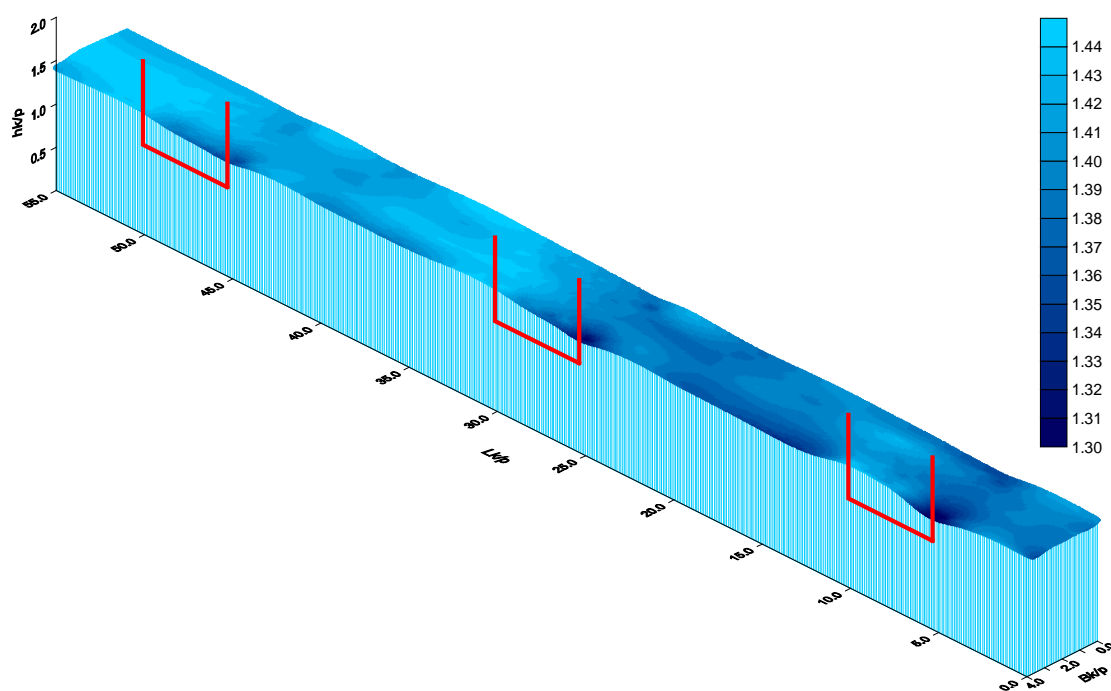
Układ zwierciadła wody

Seria 20



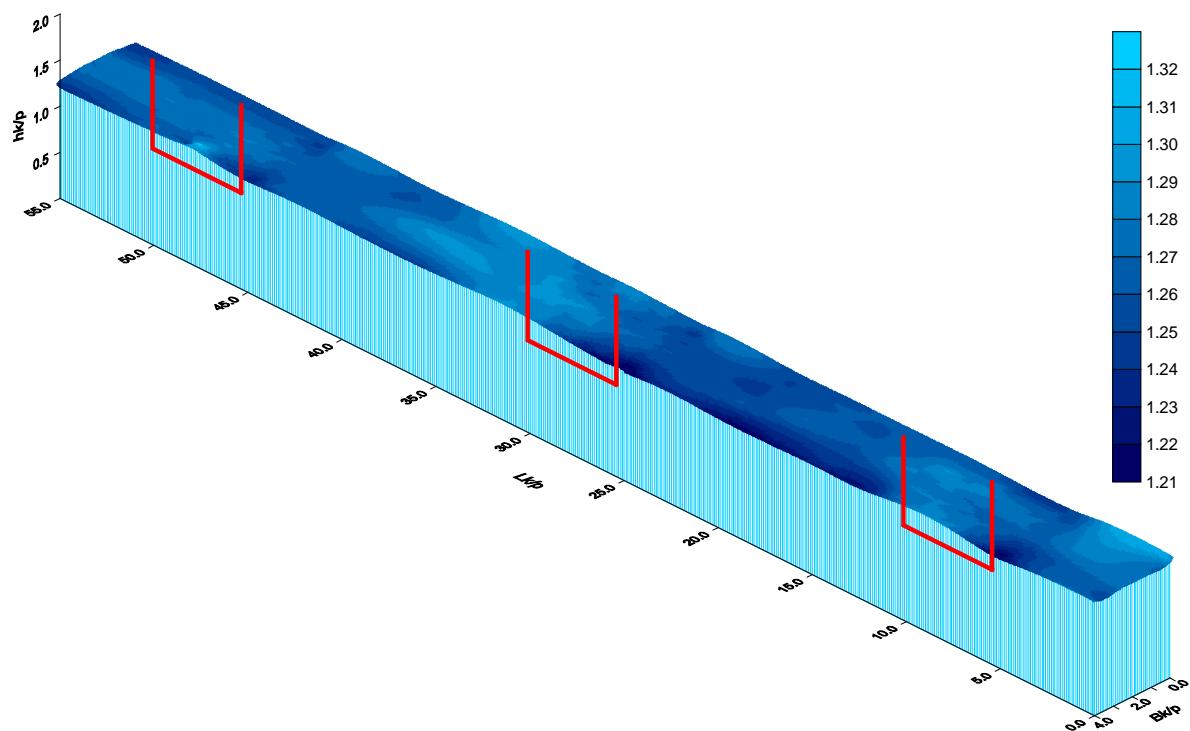
Układ zwierciadła wody

Seria 21



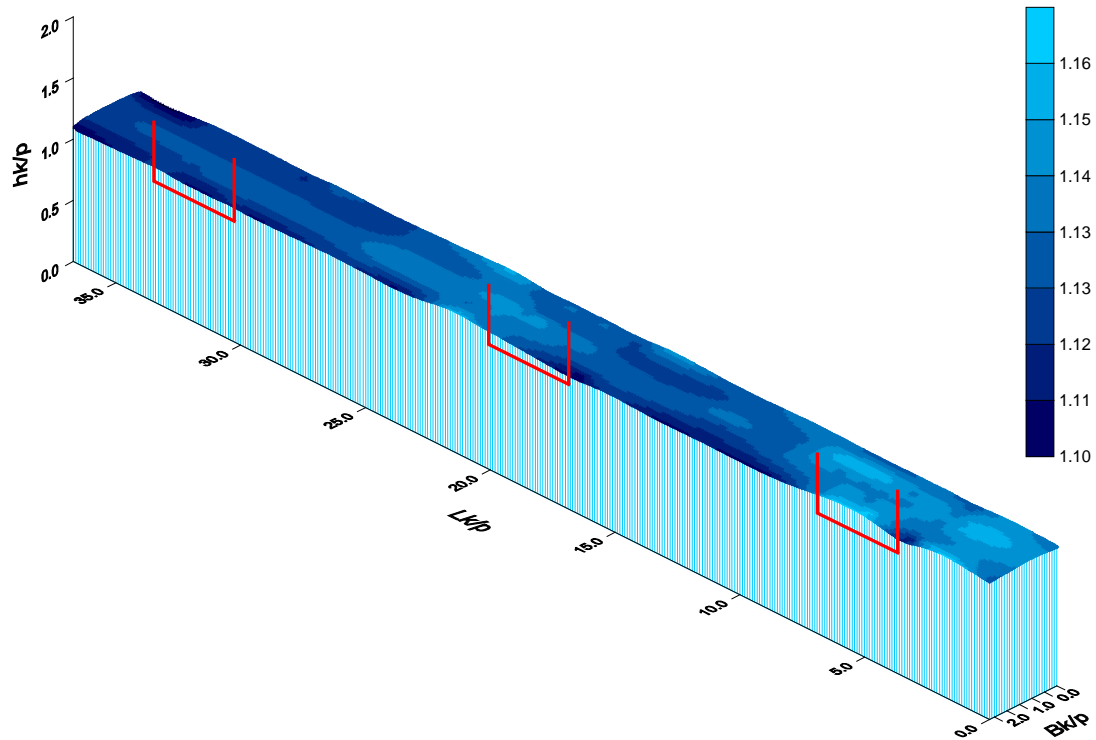
Układ zwierciadła wody

Seria 22



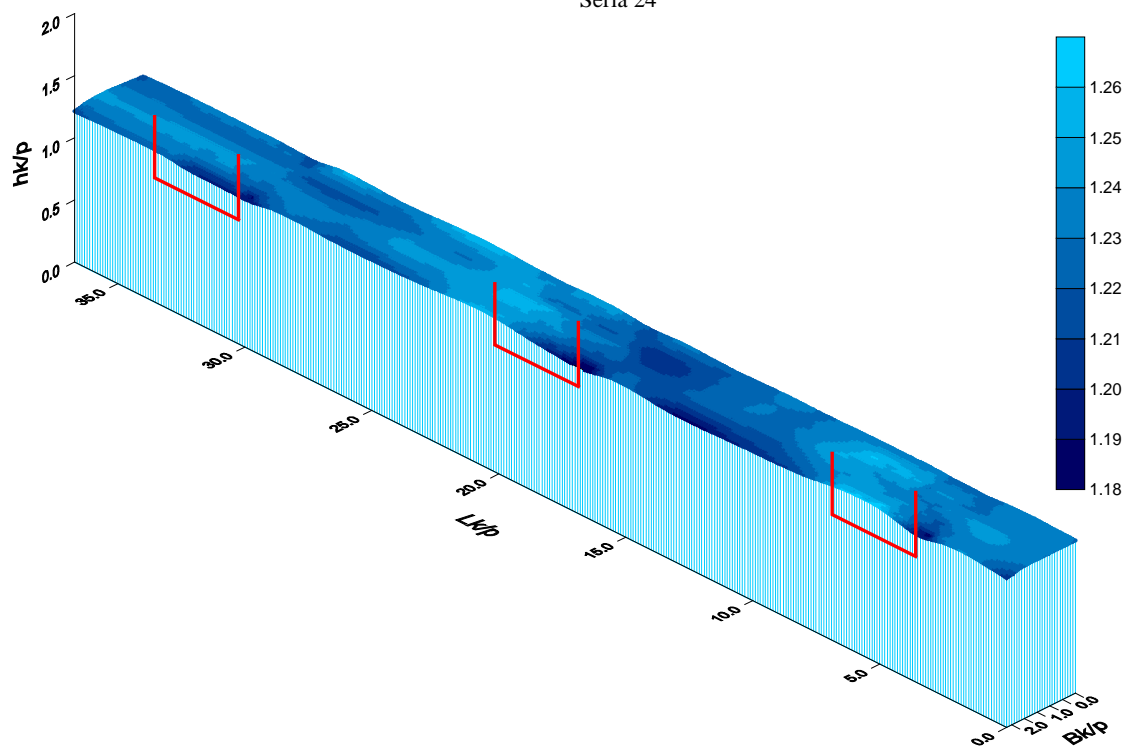
Układ zwierciadła wody

Seria 23



Układ zwierciadła wody

Seria 24

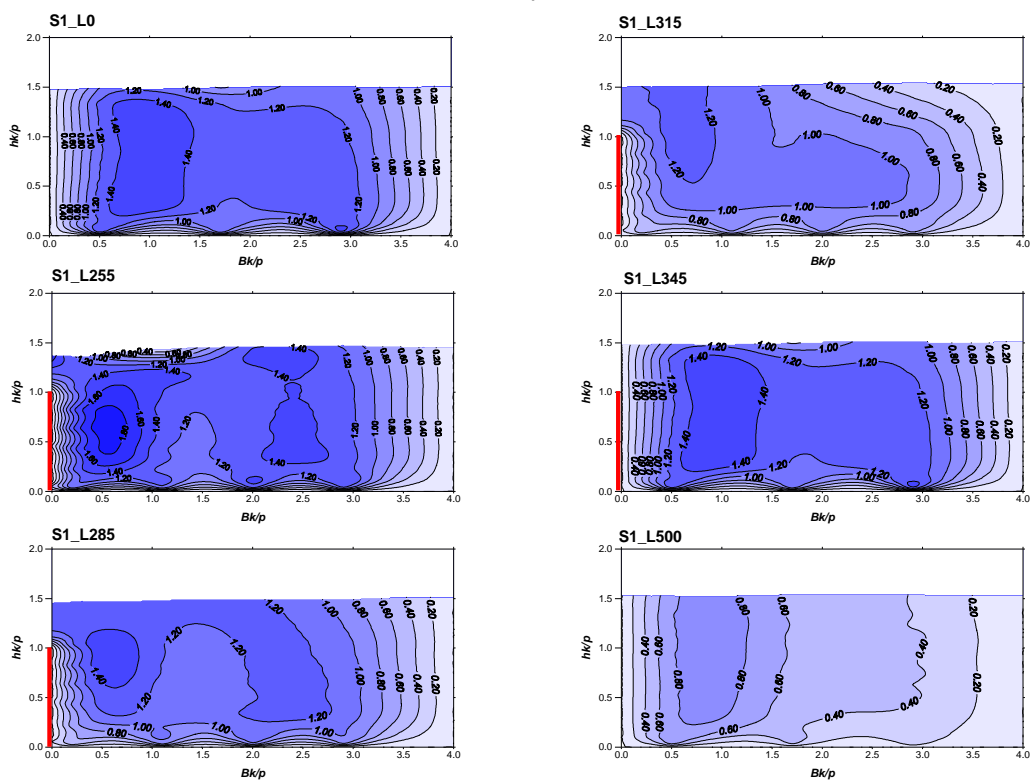


Wyniki pomiarów na modelu hydraulicznym

Rozkłady prędkości podłużnej v_L/v_0

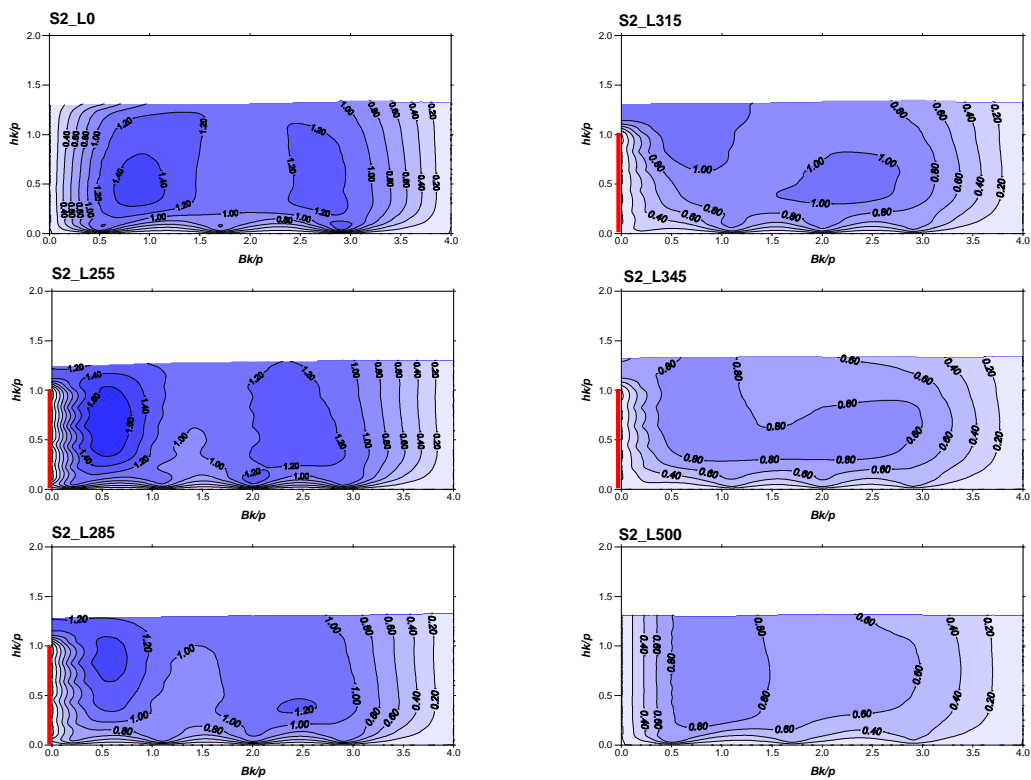
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 1 - przelew B



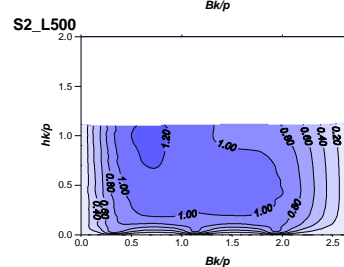
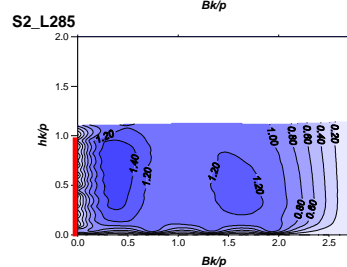
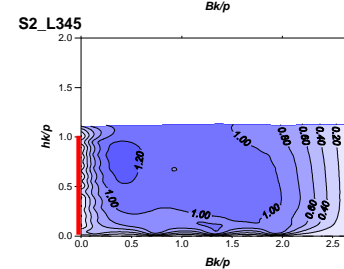
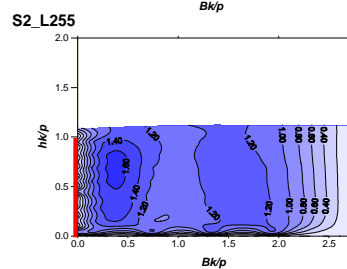
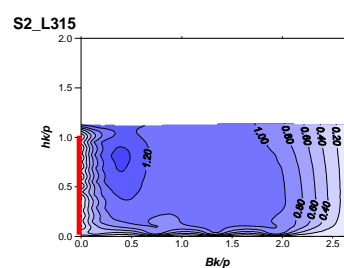
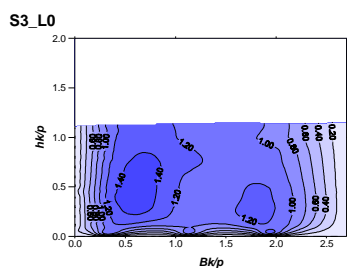
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 2 - przelew B



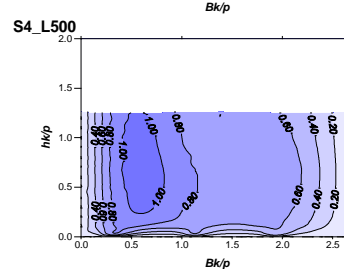
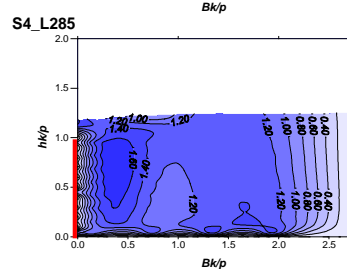
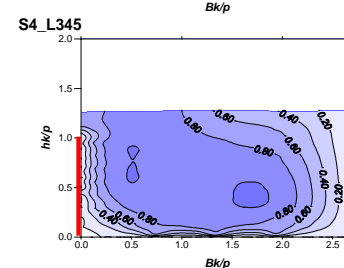
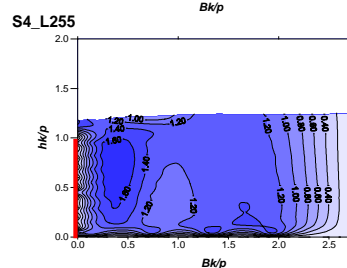
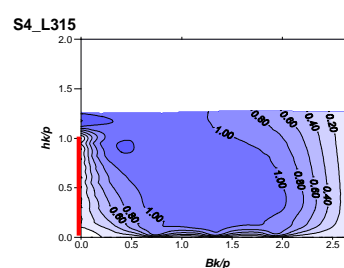
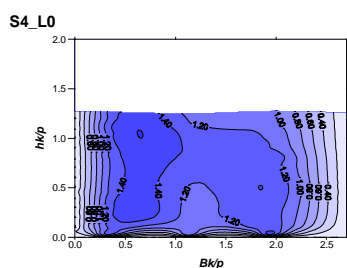
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 3 - przelew B



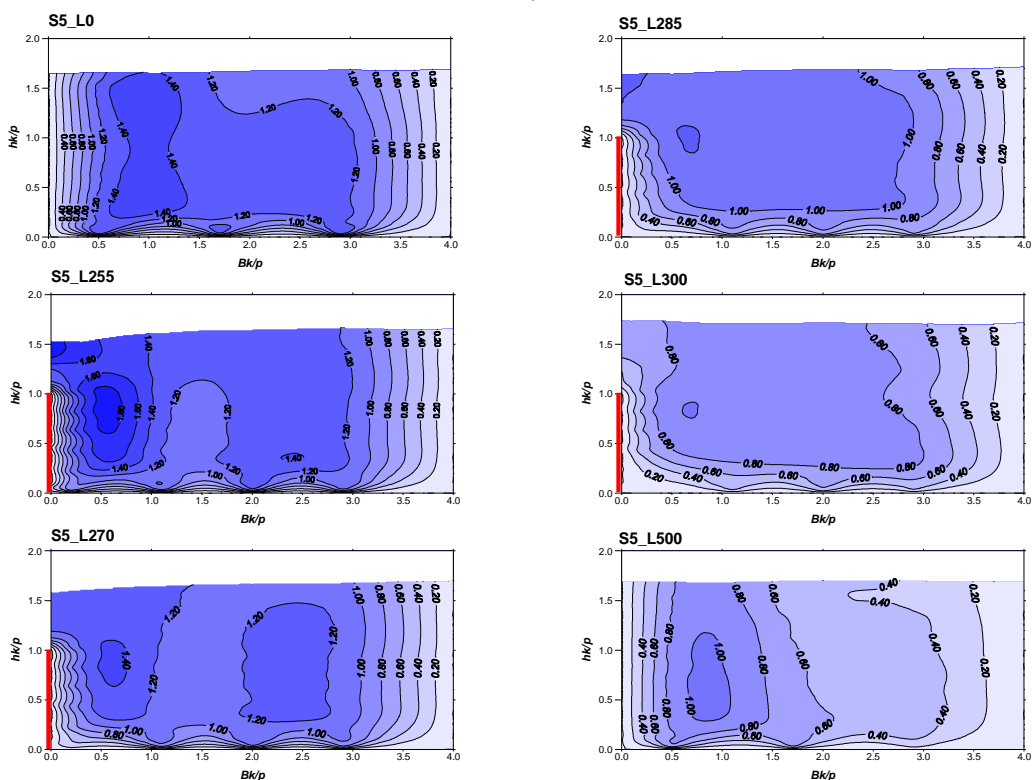
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 4 - przelew B



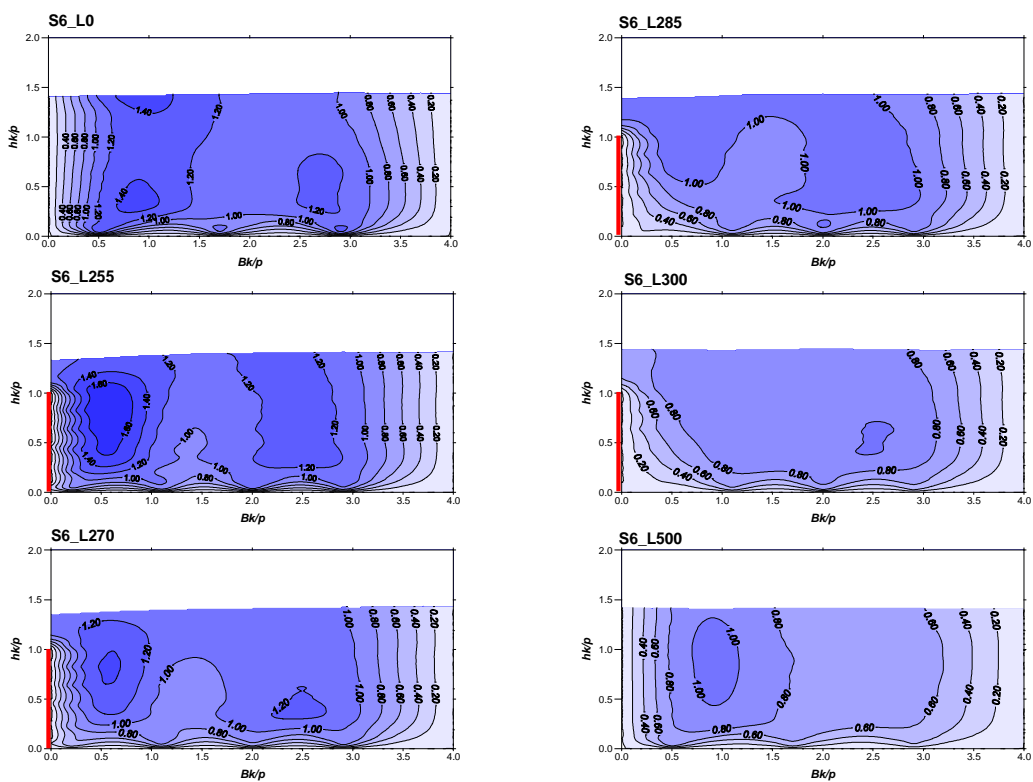
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 5 - przelew B



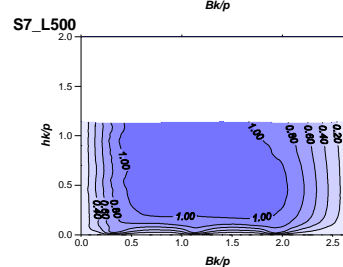
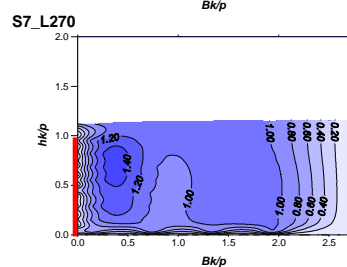
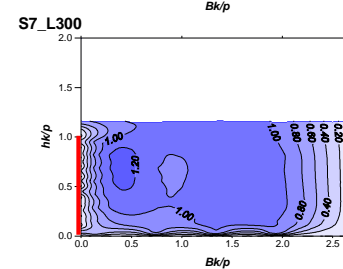
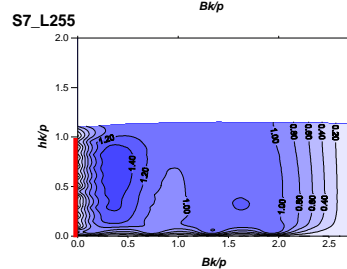
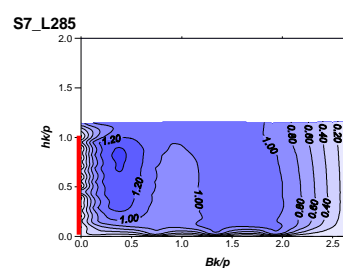
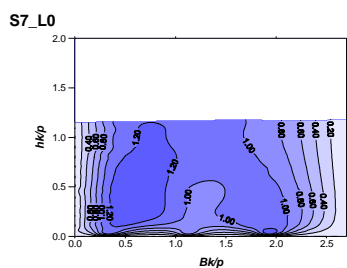
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 6 - przelew B



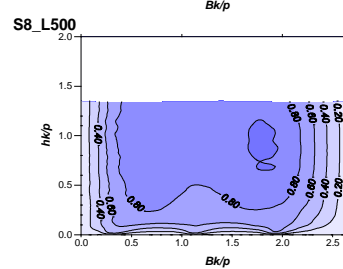
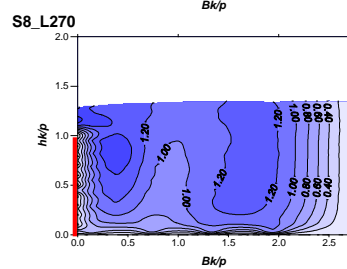
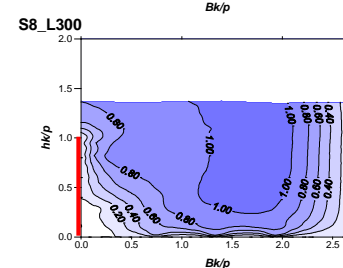
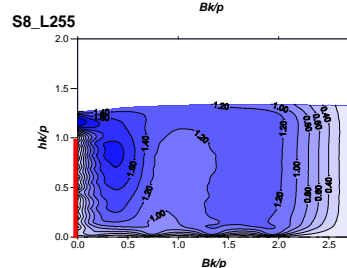
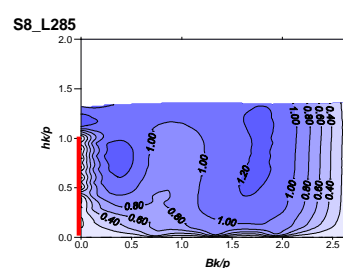
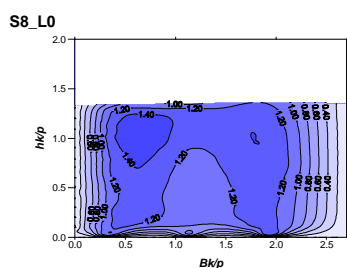
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 7 - przelew B



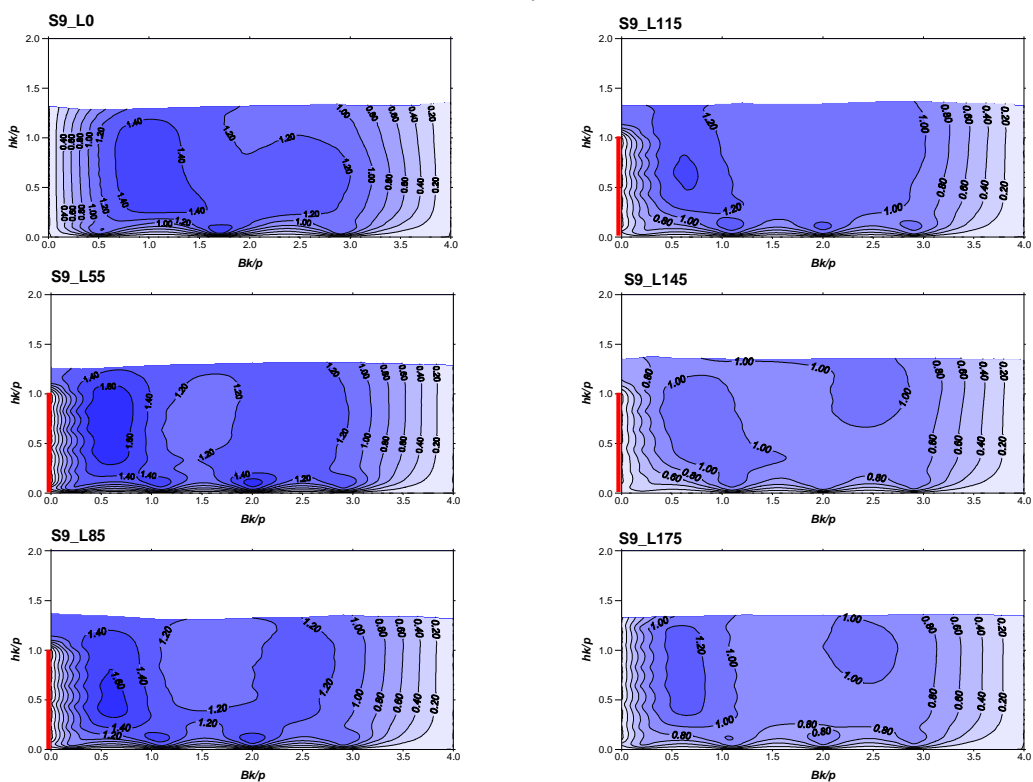
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 8 - przelew B



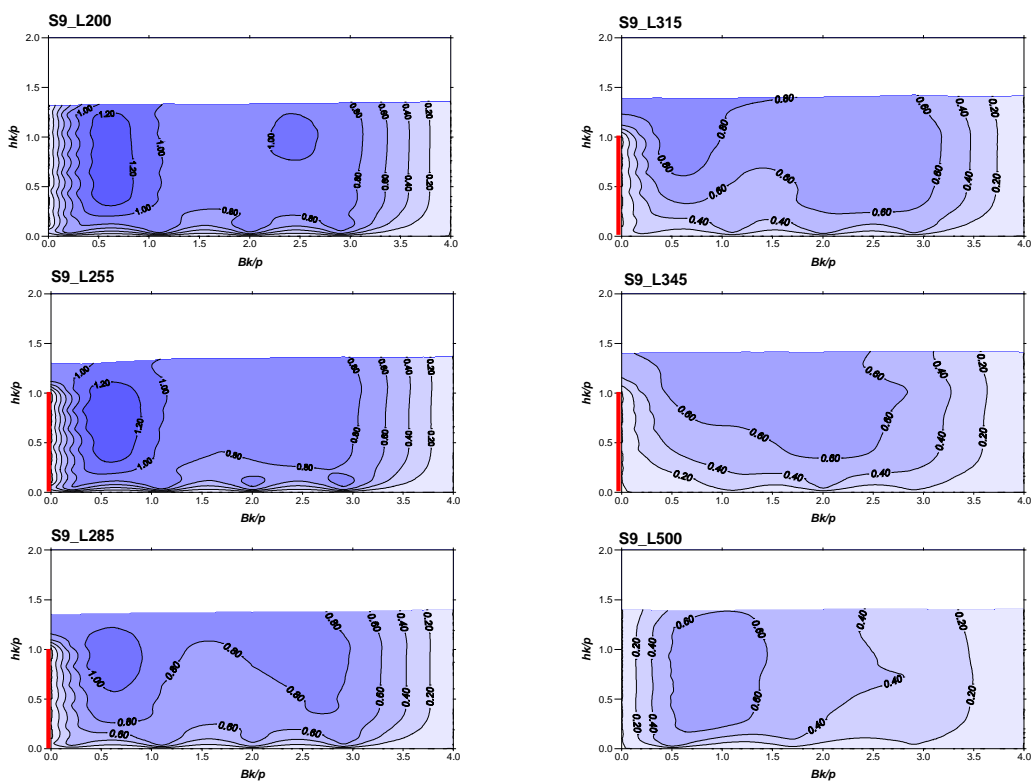
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 9 - przelew A



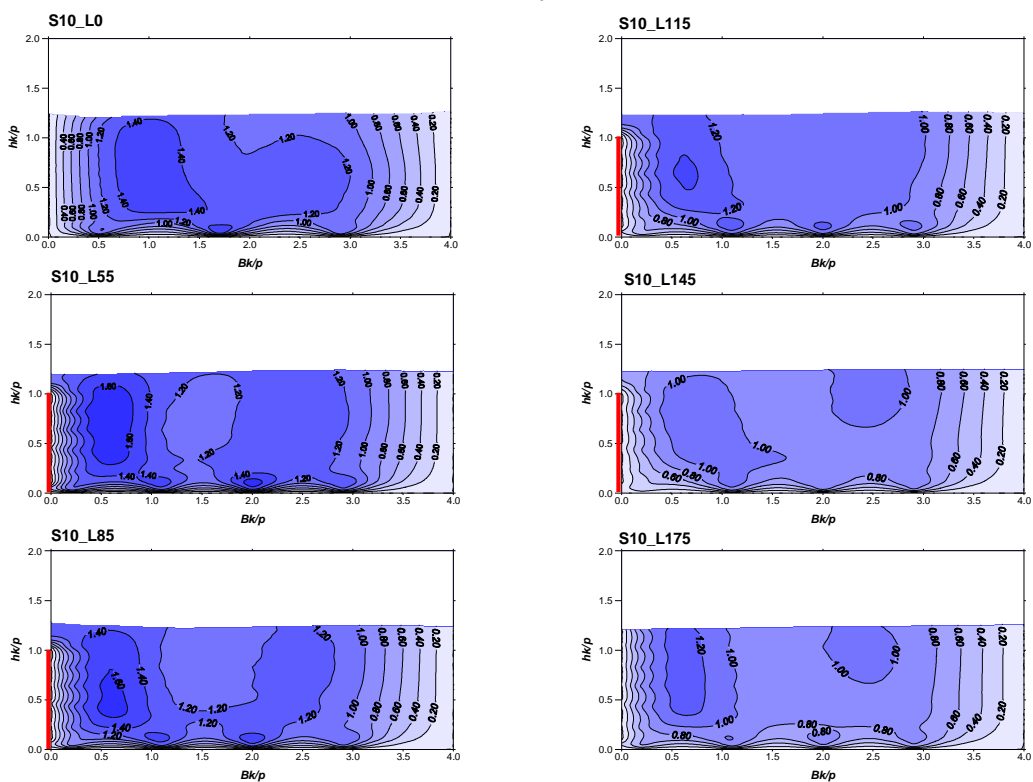
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 9 - przelew B



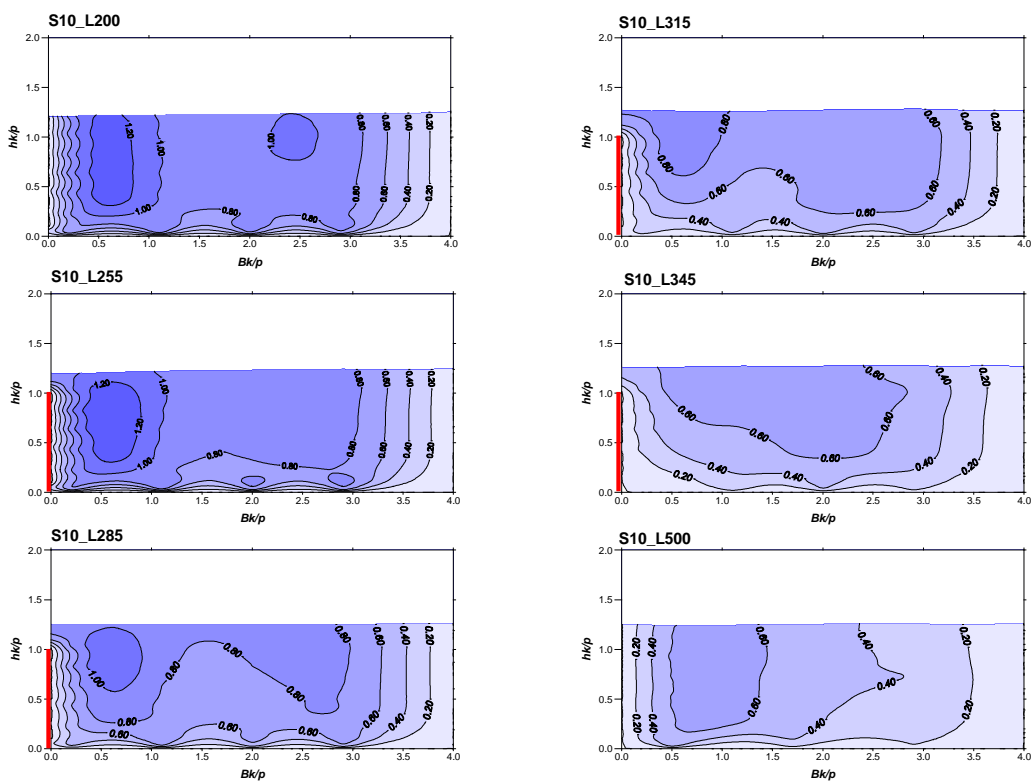
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 10 - przelew A



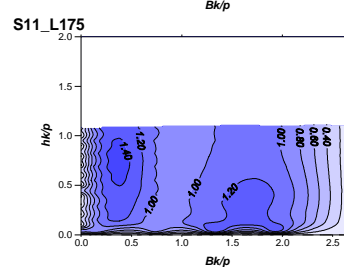
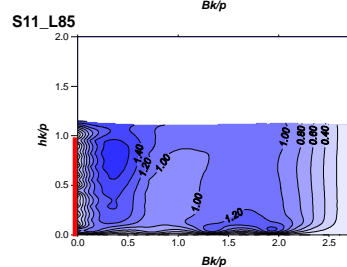
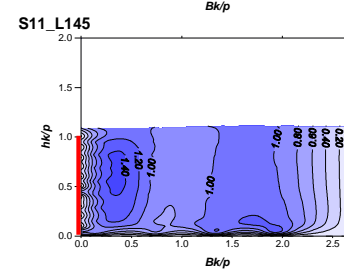
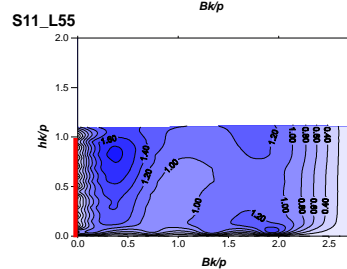
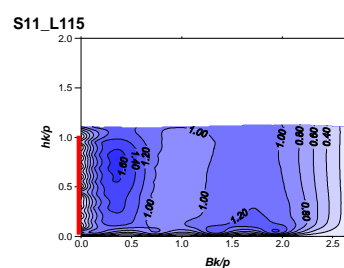
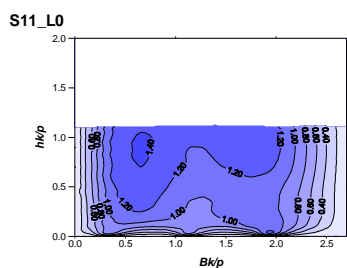
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 10 - przelew B



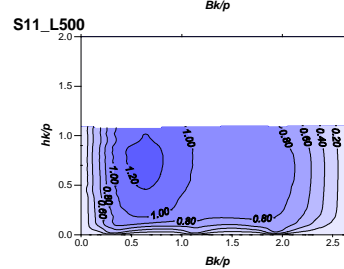
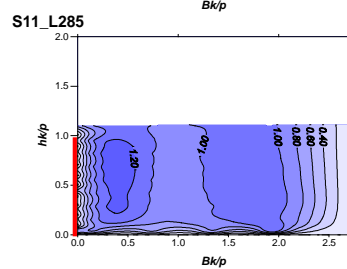
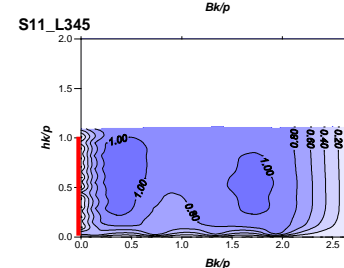
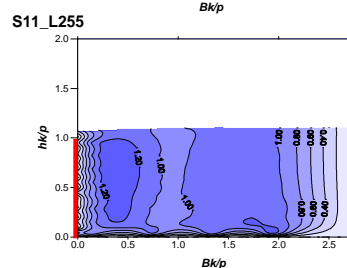
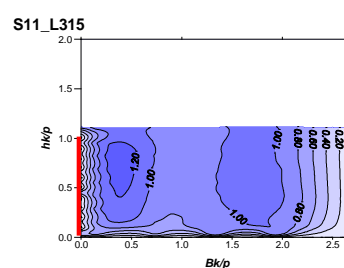
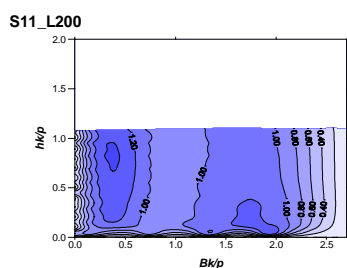
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 11 - przelew A



Pola prędkości podłużnej VL/V0

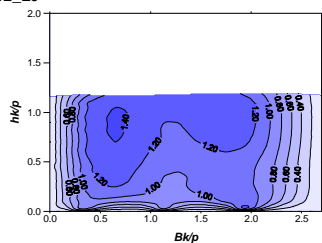
Seria 11 - przelew B



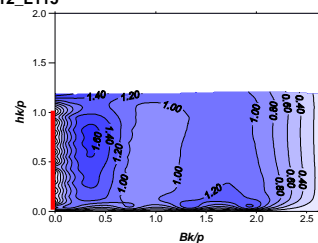
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 12 - przelew A

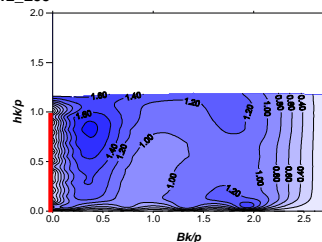
S12_L0



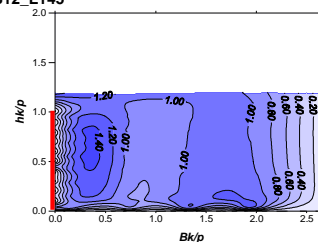
S12_L115



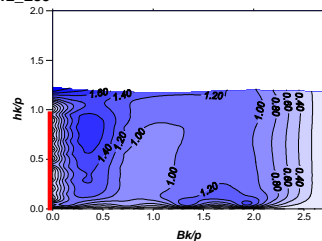
S12_L55



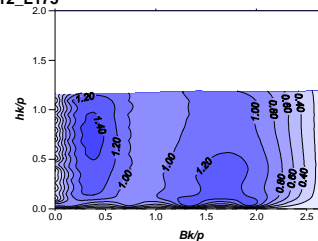
S12_L145



S12_L85



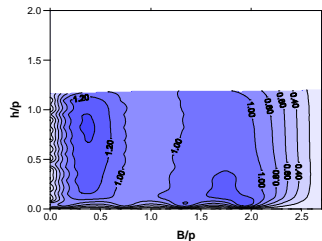
S12_L175



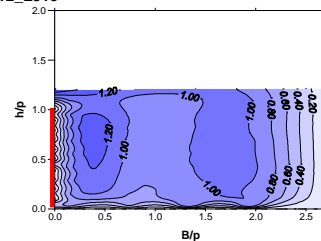
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 12 - przelew B

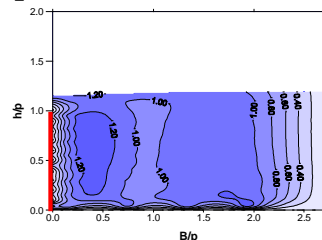
S12_L200



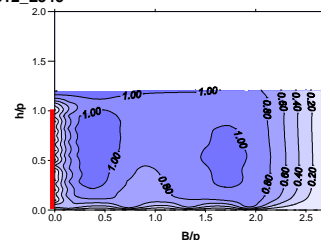
S12_L315



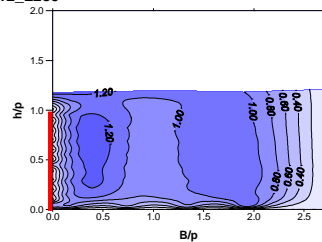
S12_L255



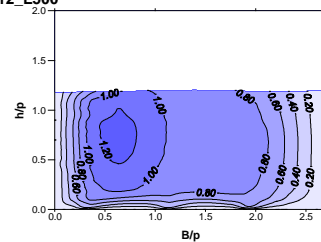
S12_L345



S12_L285

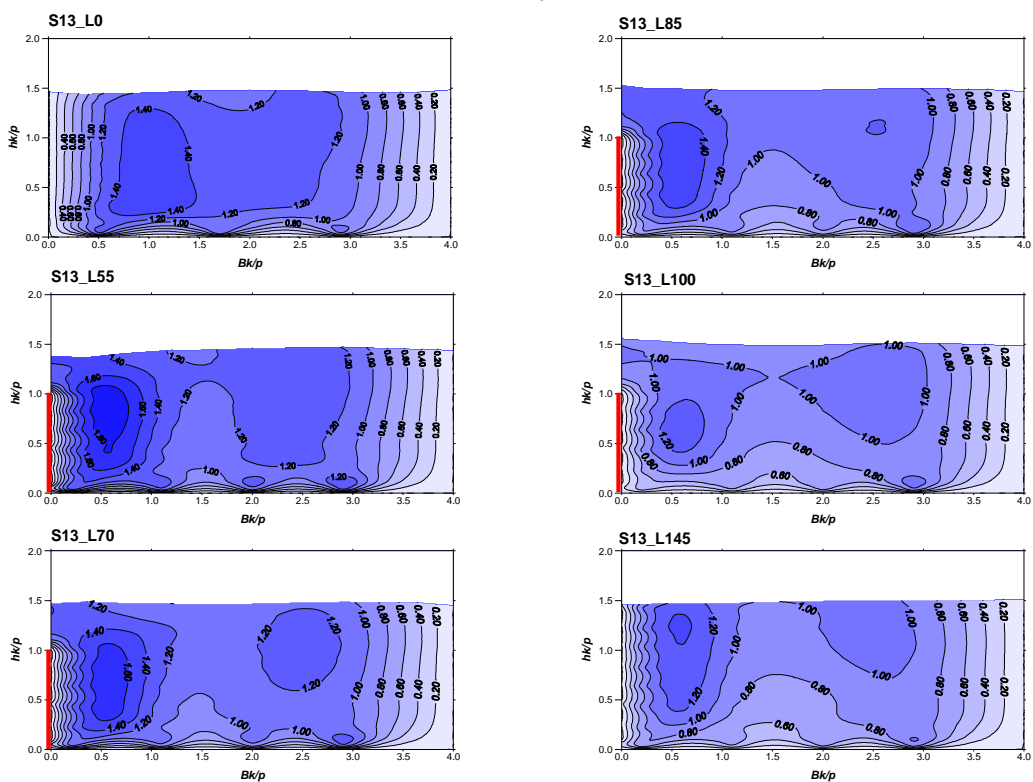


S12_L500



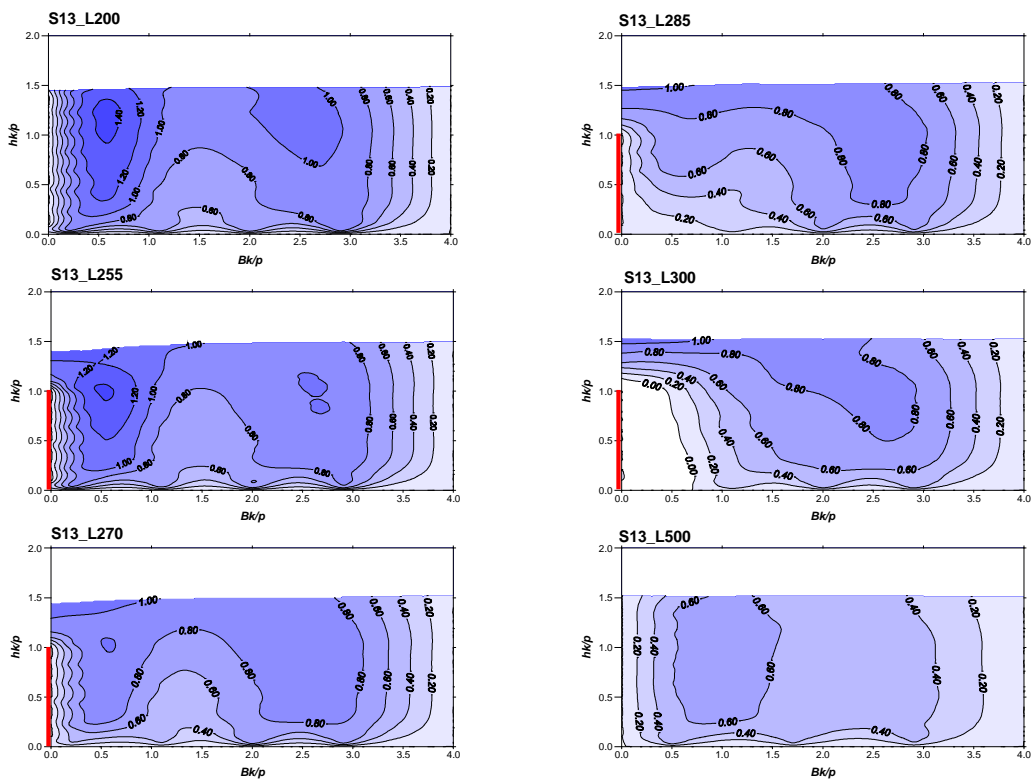
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 13 - przelew A



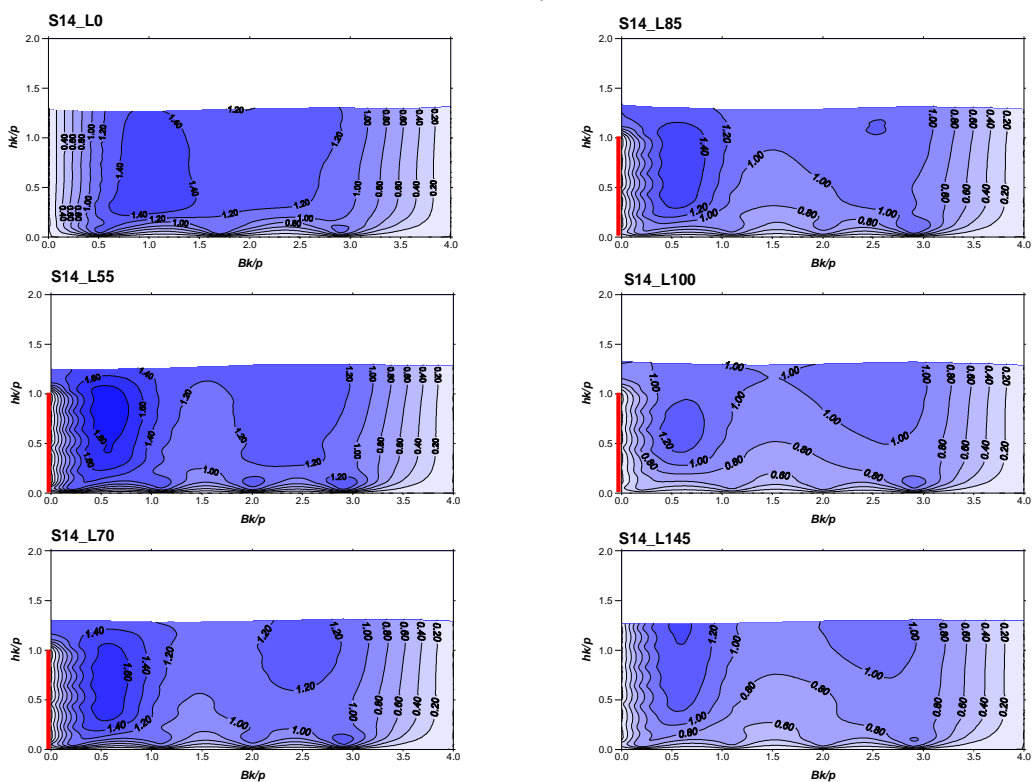
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 13 - przelew B



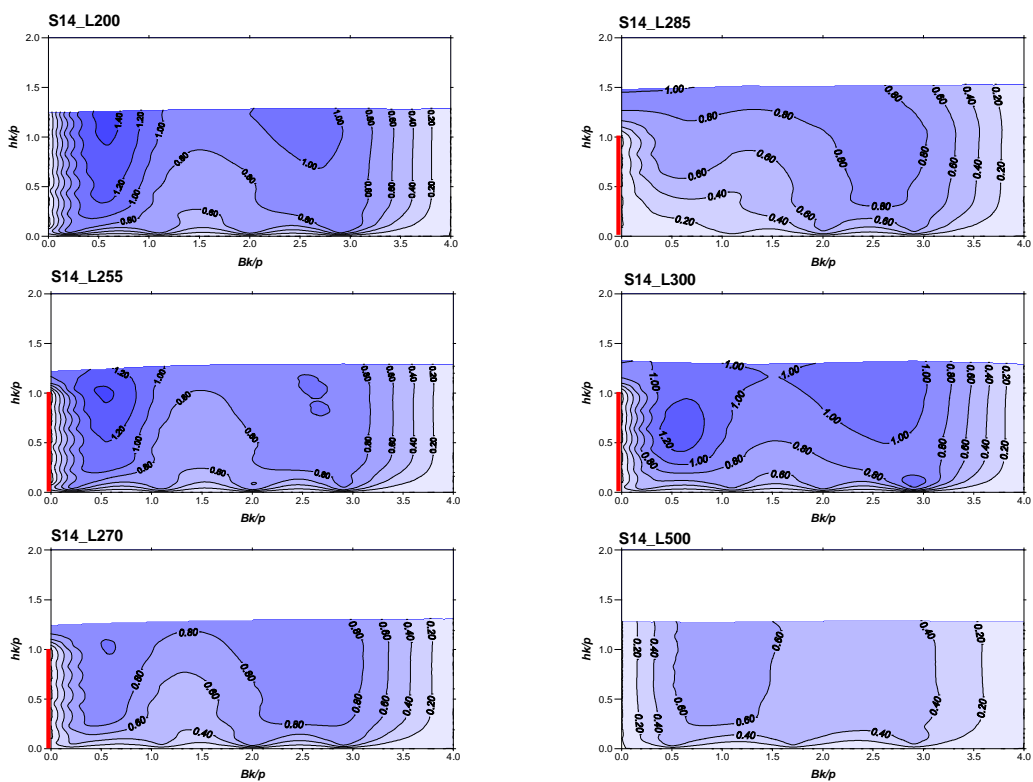
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 14 - przelew A



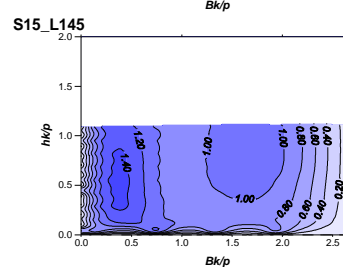
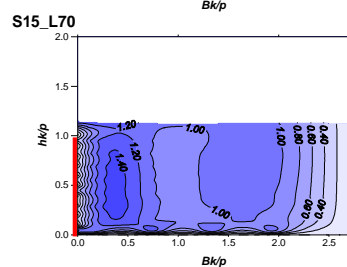
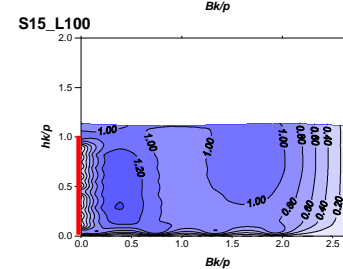
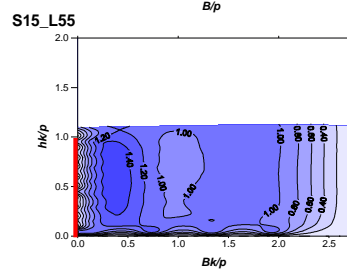
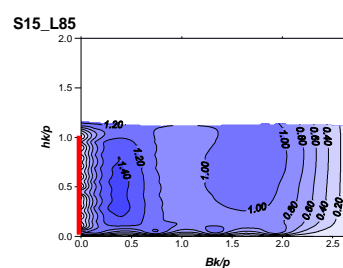
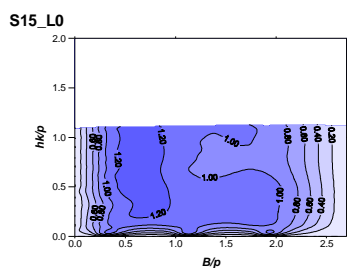
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 14 - przelew B



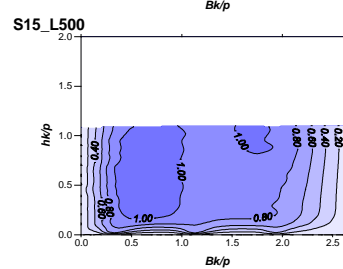
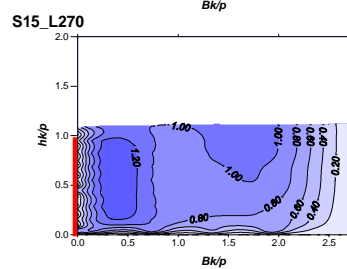
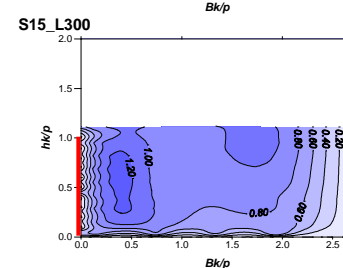
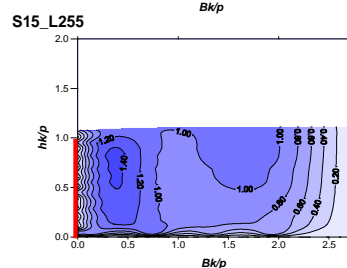
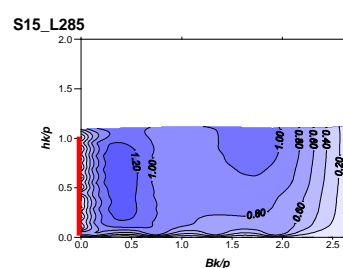
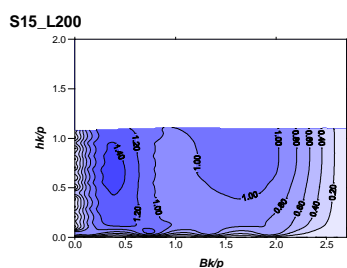
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 15 - przelew A



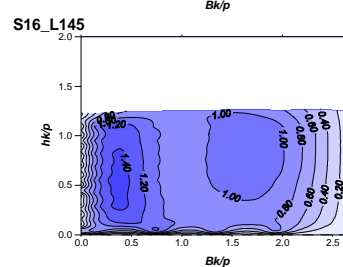
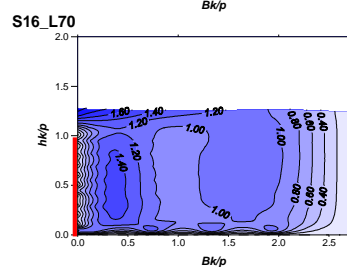
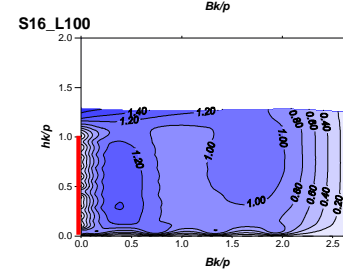
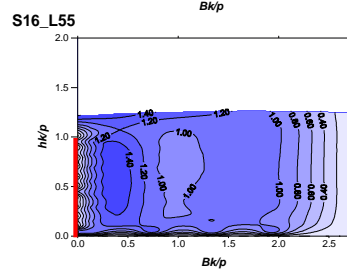
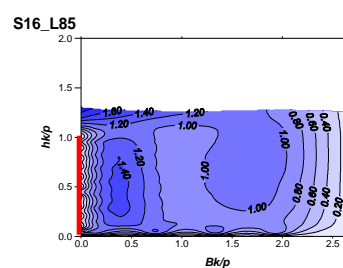
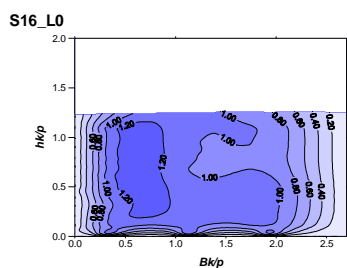
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 15 - przelew B



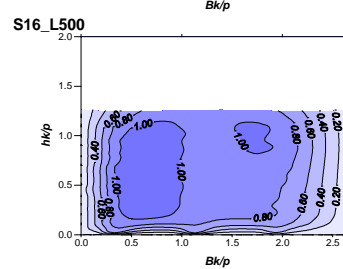
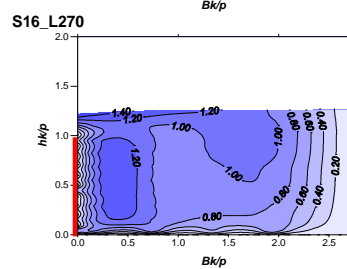
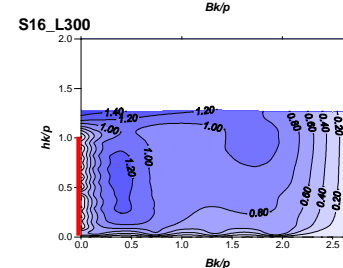
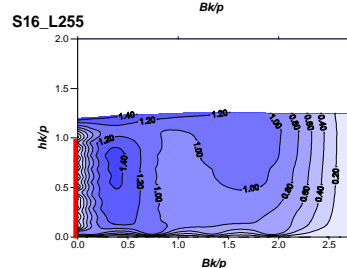
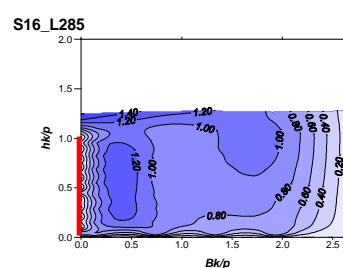
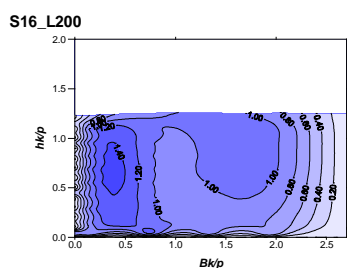
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 16 - przelew A



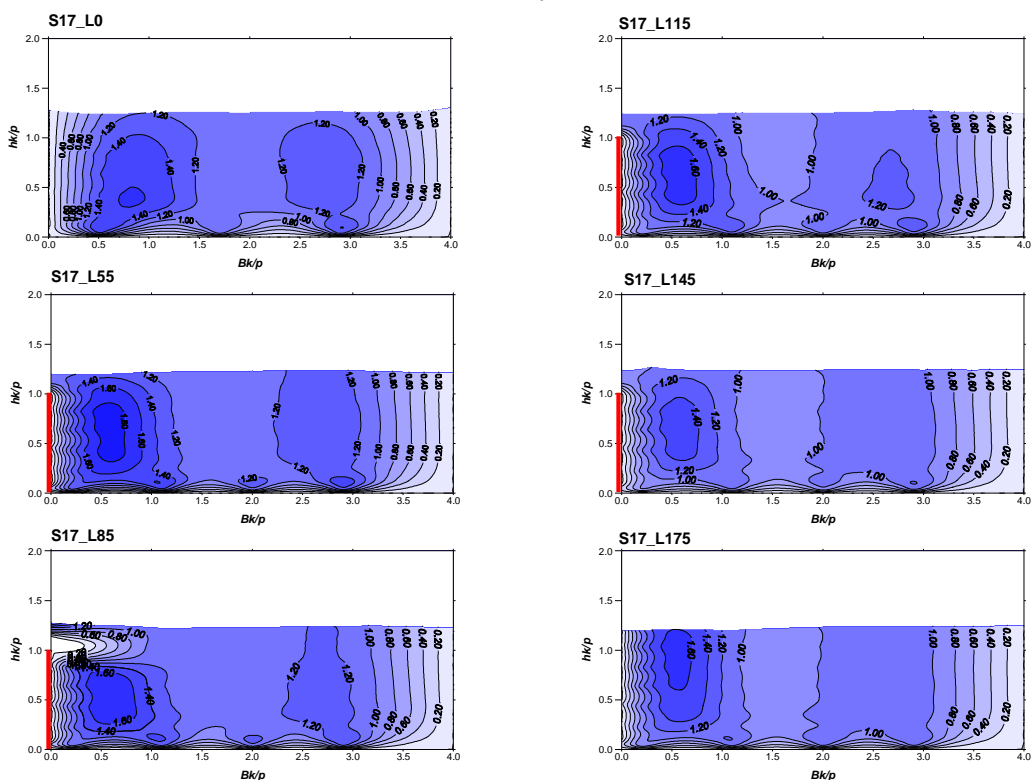
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 16 - przelew B



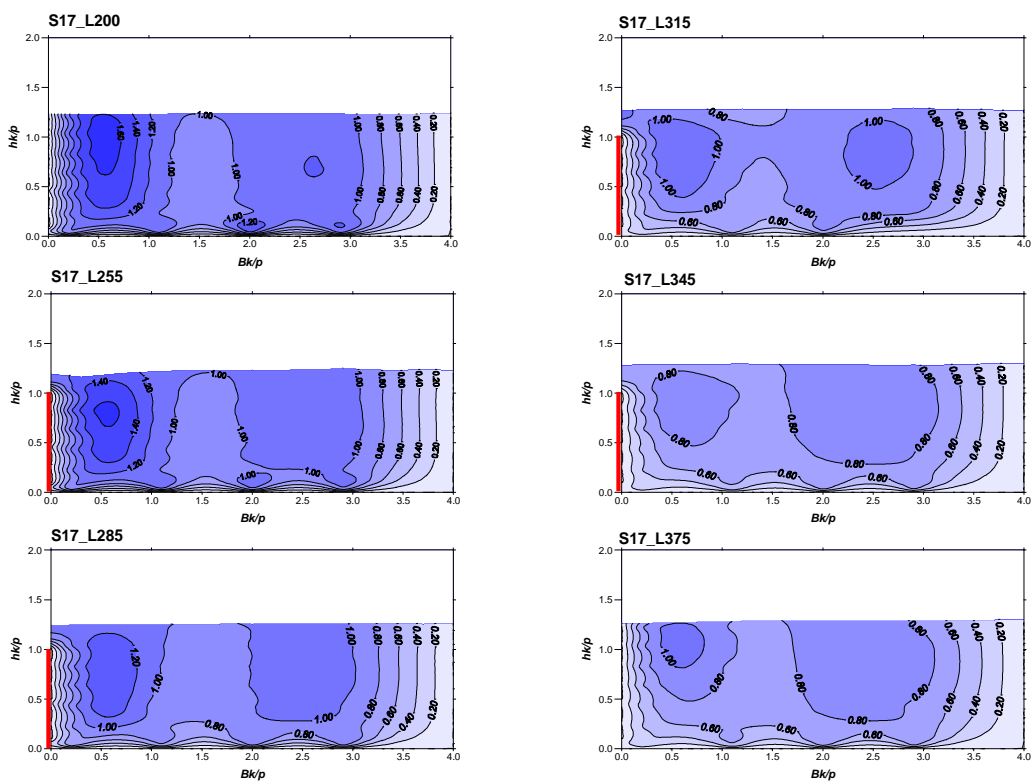
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 17 - przelew A



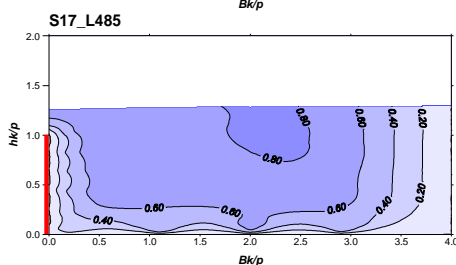
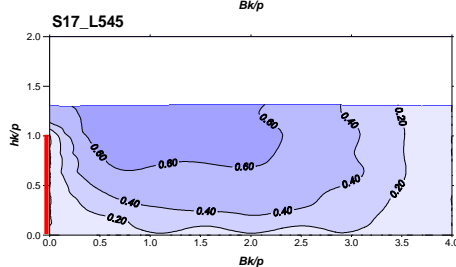
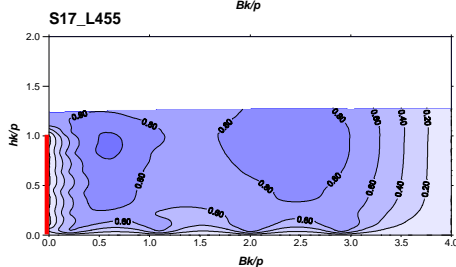
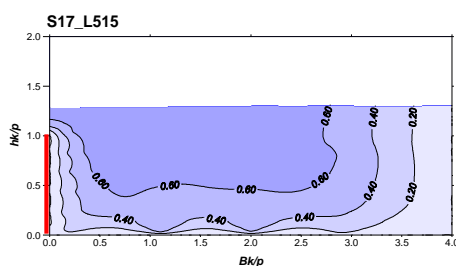
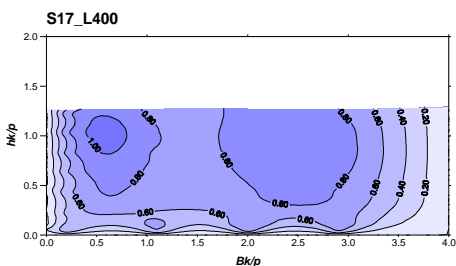
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 17 - przelew B



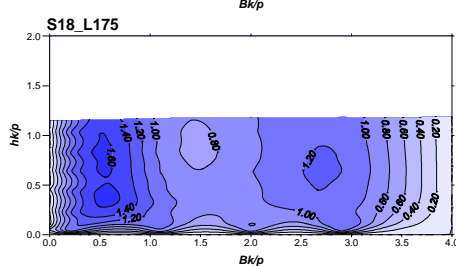
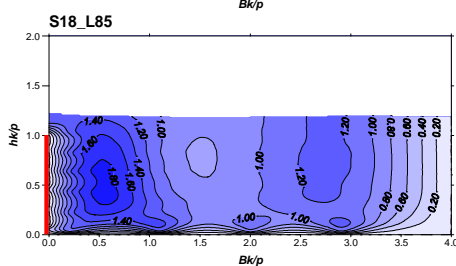
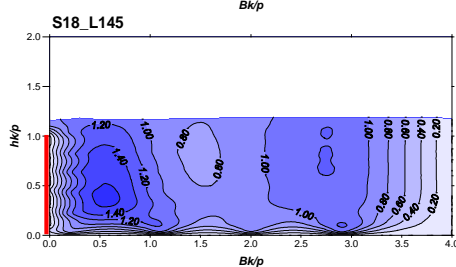
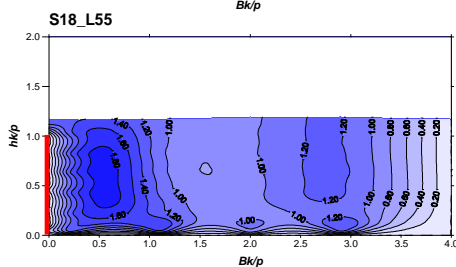
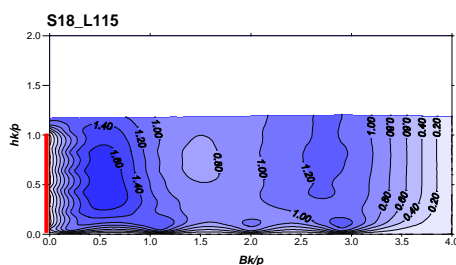
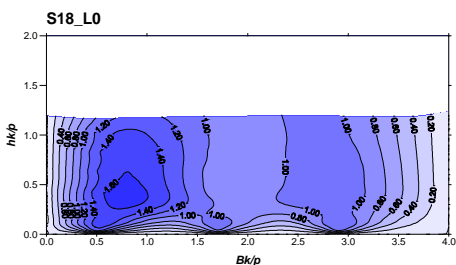
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 17 - przelew C



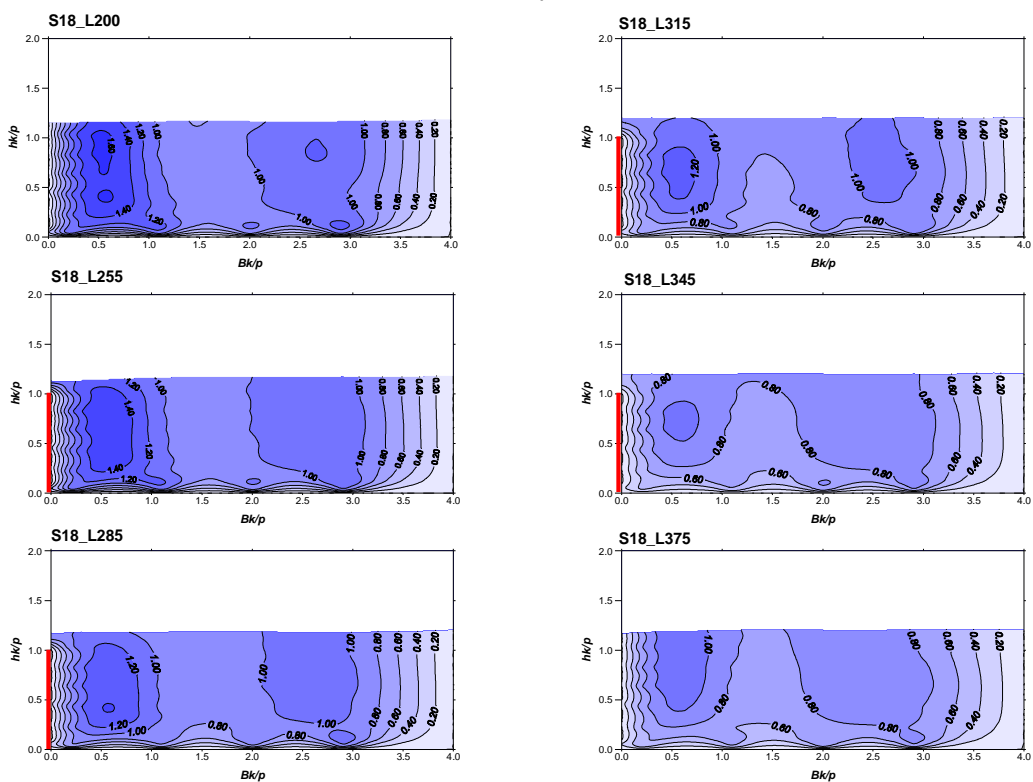
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 18 - przelew A



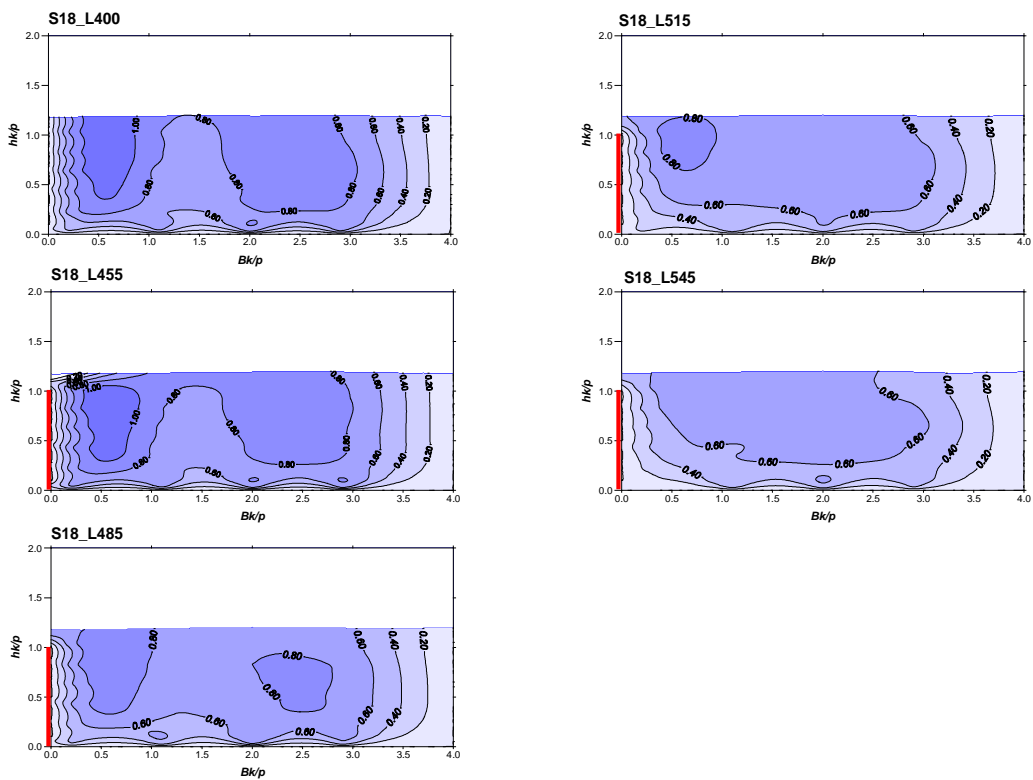
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 18 - przelew B



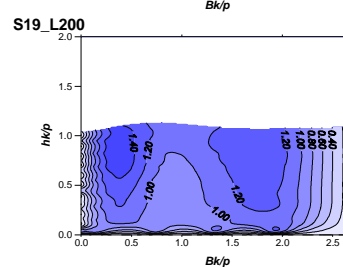
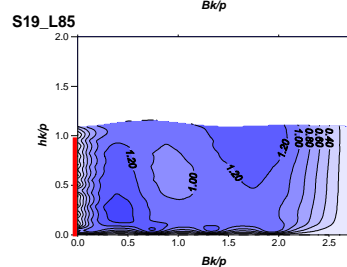
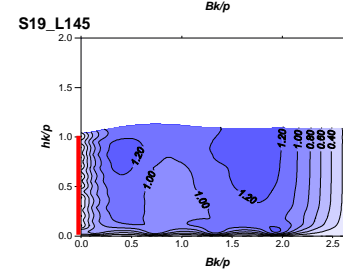
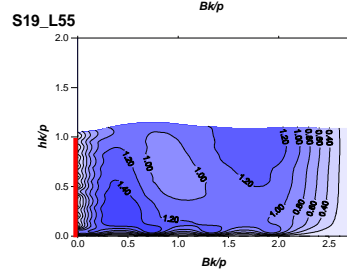
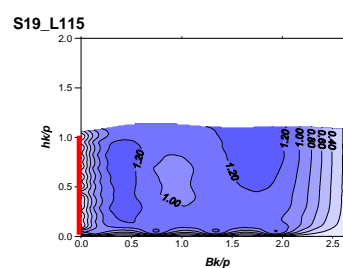
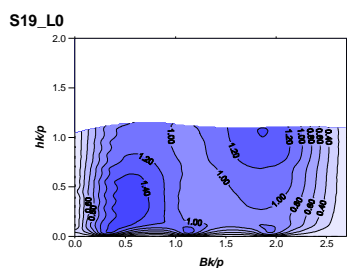
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 18 - przelew C



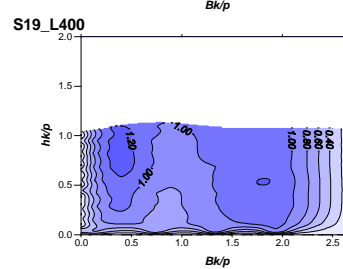
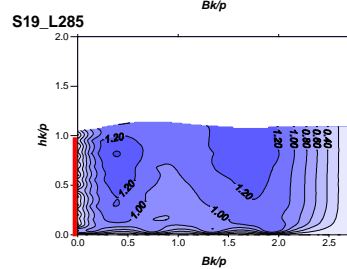
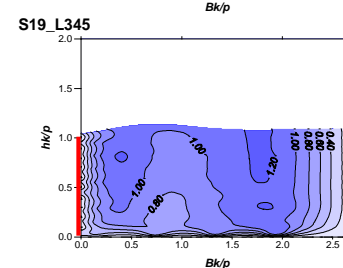
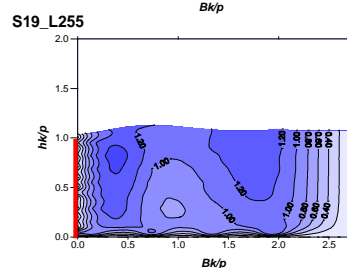
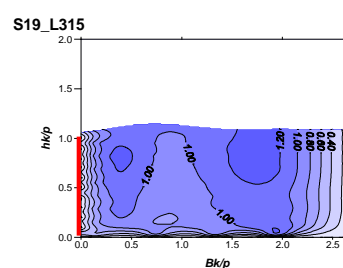
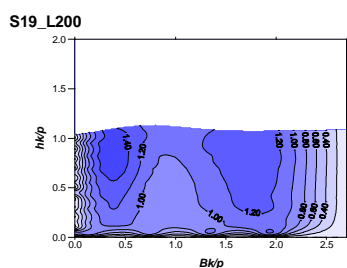
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 19 - przelew A



Pola prędkości podłużnej VL/V0

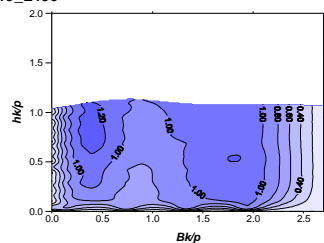
Seria 19 - przelew B



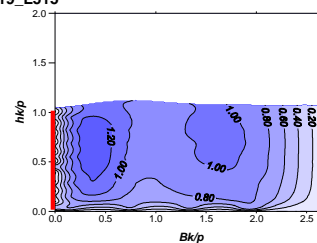
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 19 - przelew C

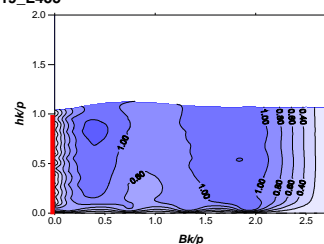
S19_L400



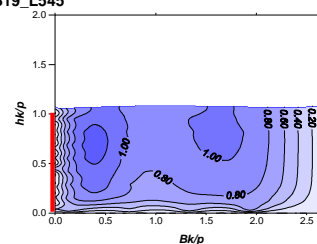
S19_L515



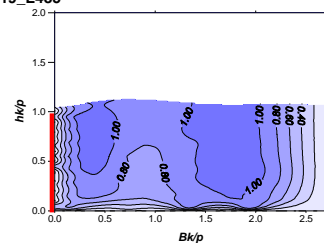
S19_L455



S19_L545



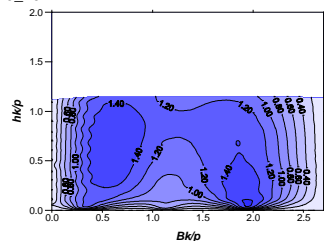
S19_L485



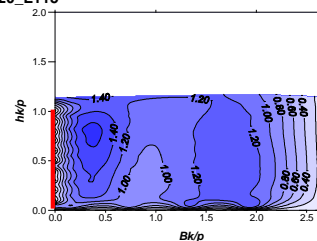
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 20 - przelew A

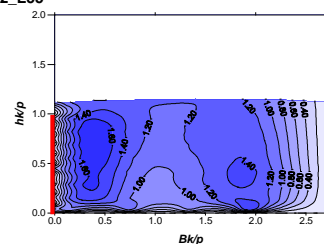
S20_L0



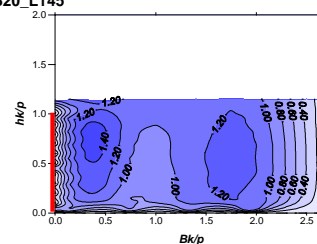
S20_L115



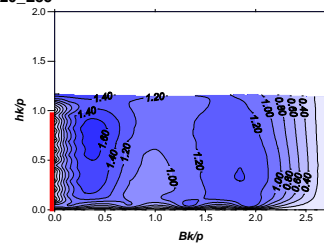
S20_L55



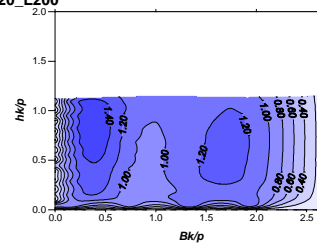
S20_L145



S20_L85



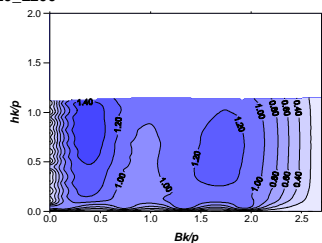
S20_L200



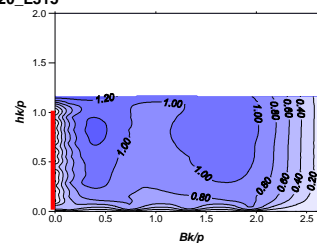
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 20 - przelew B

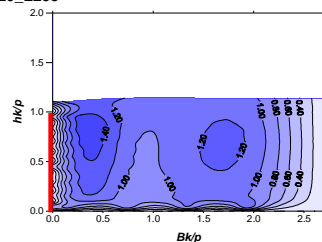
S20_L200



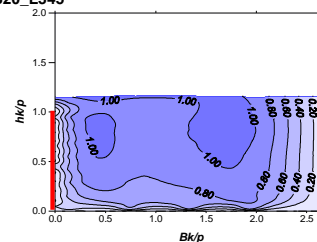
S20_L315



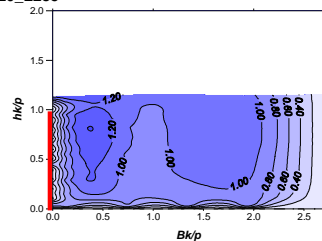
S20_L255



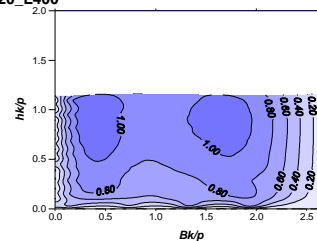
S20_L345



S20_L285



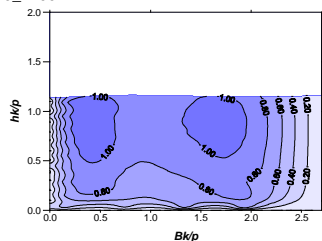
S20_L400



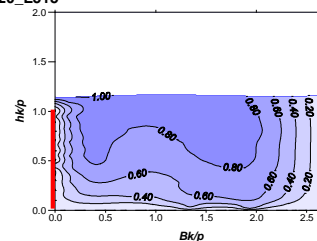
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 20 - przelew C

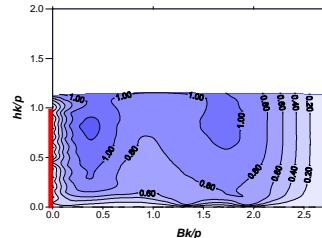
S20_L400



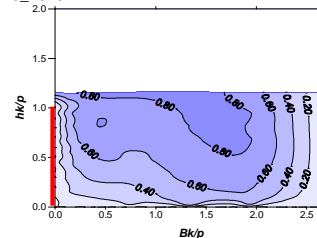
S20_L515



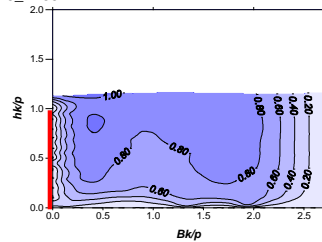
S20_L455



S20_L545

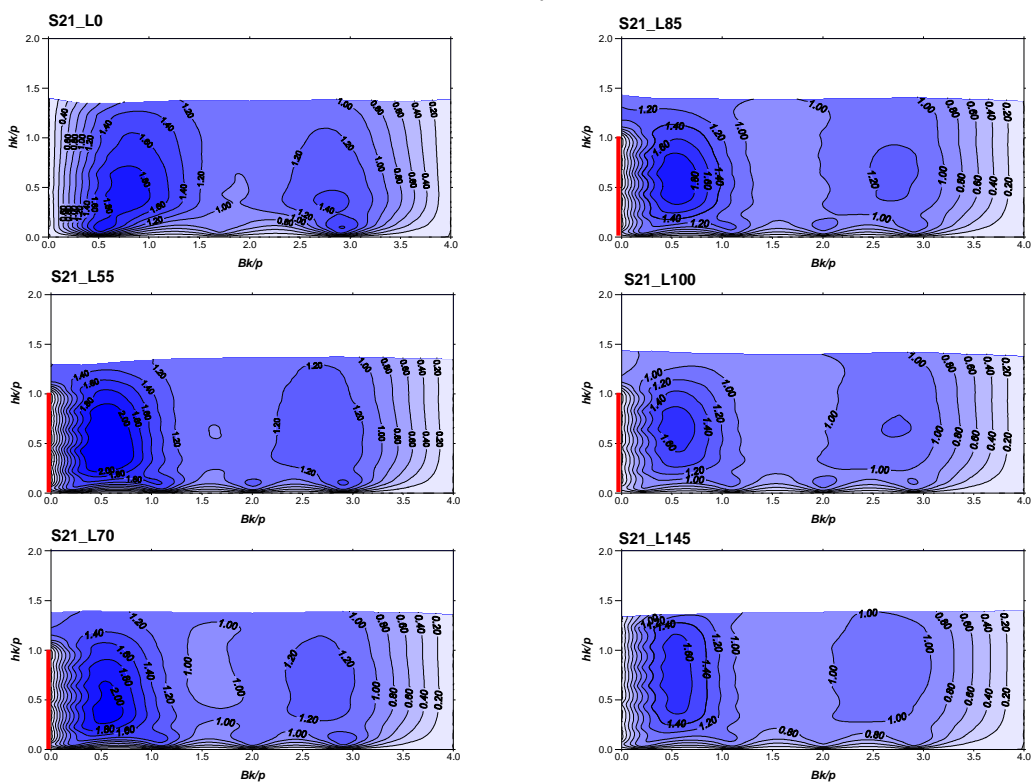


S20_L485



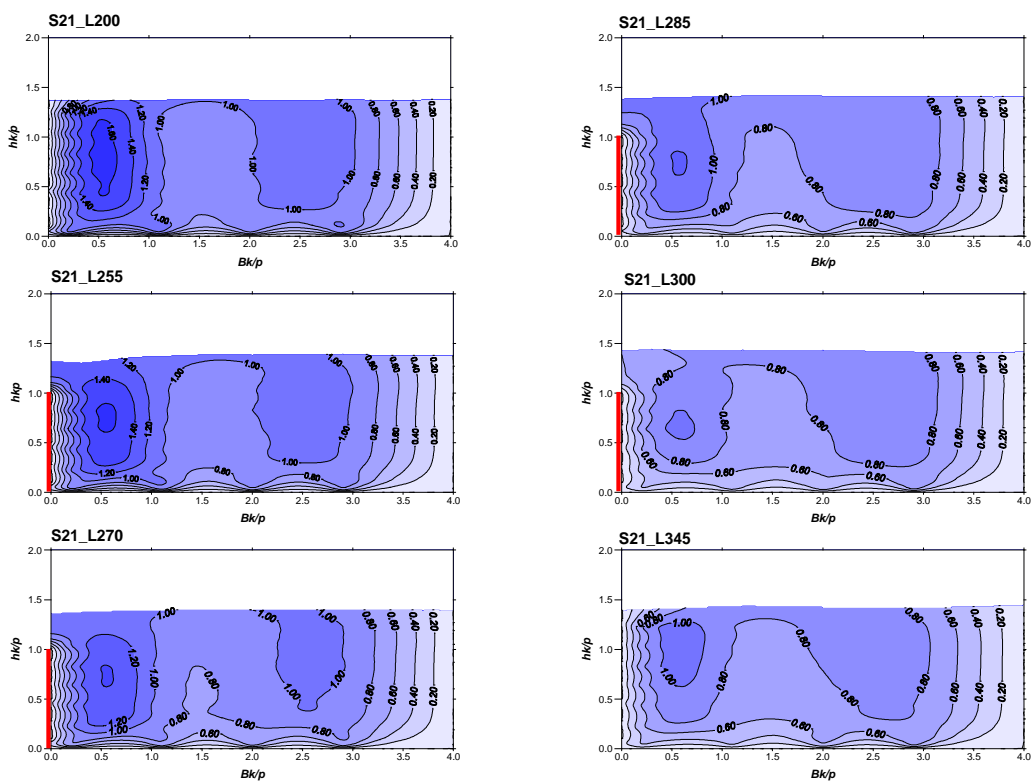
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 21 - przelew A



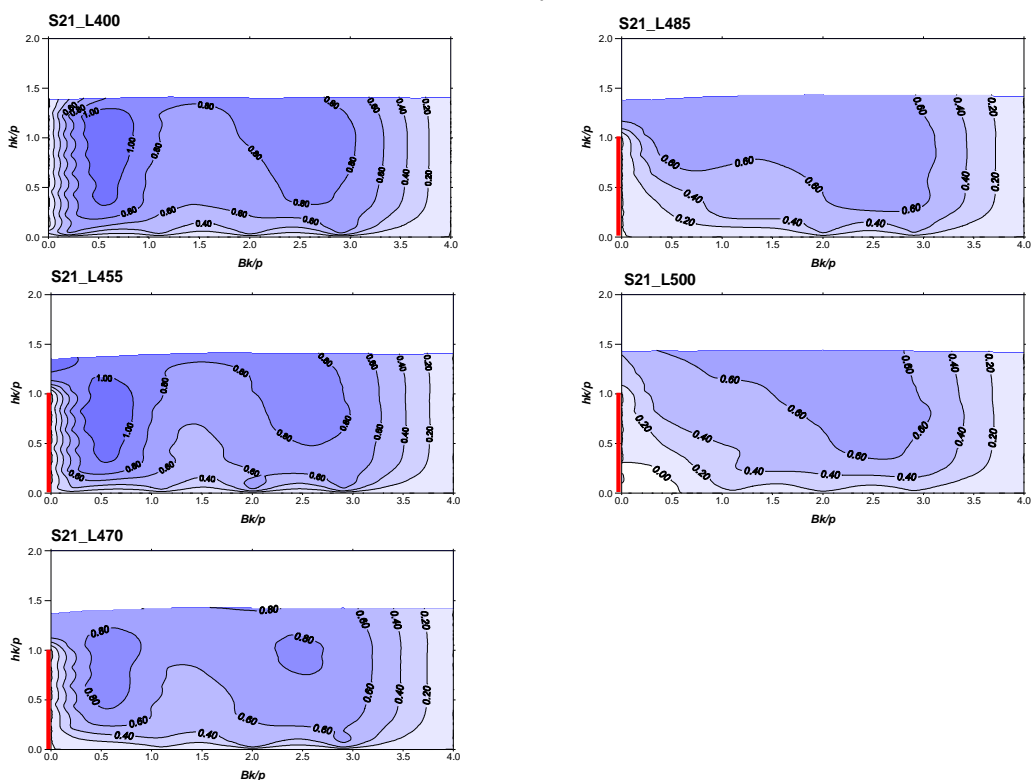
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 21 - przelew B



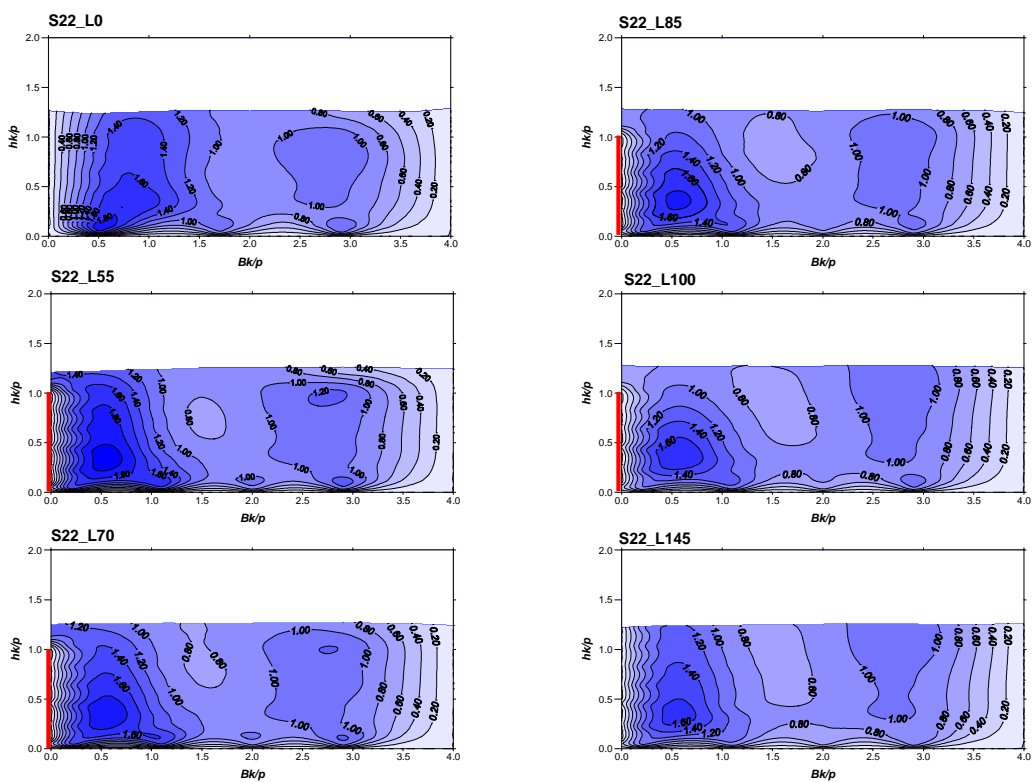
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 21 - przelew C



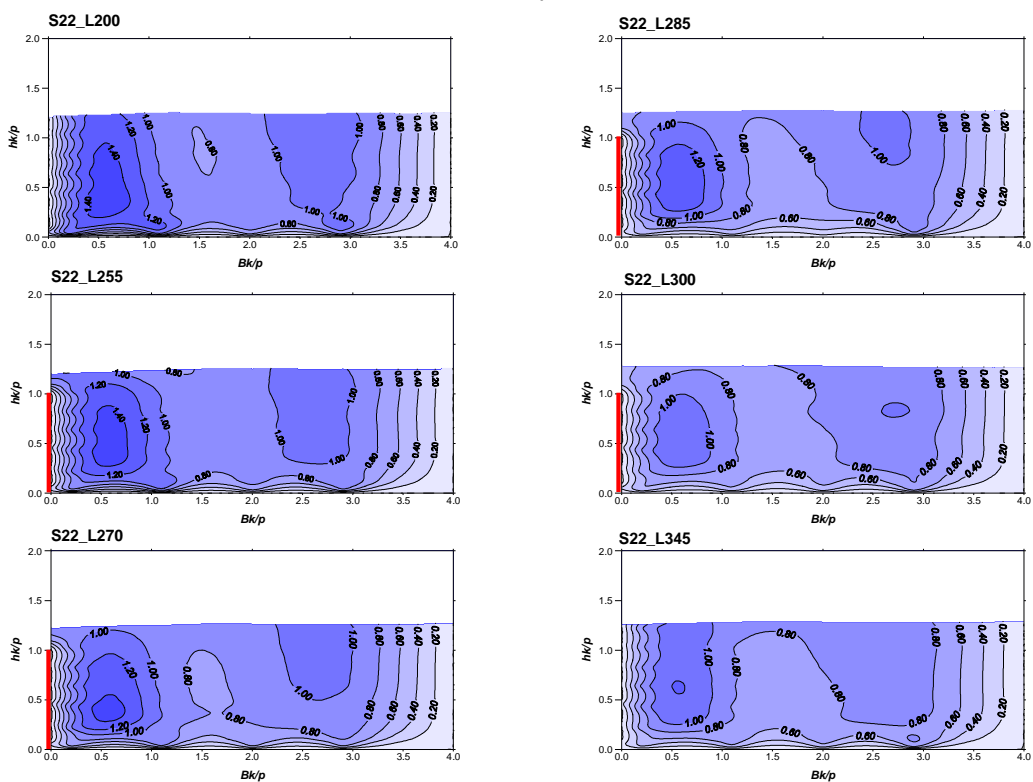
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 22 - przelew A



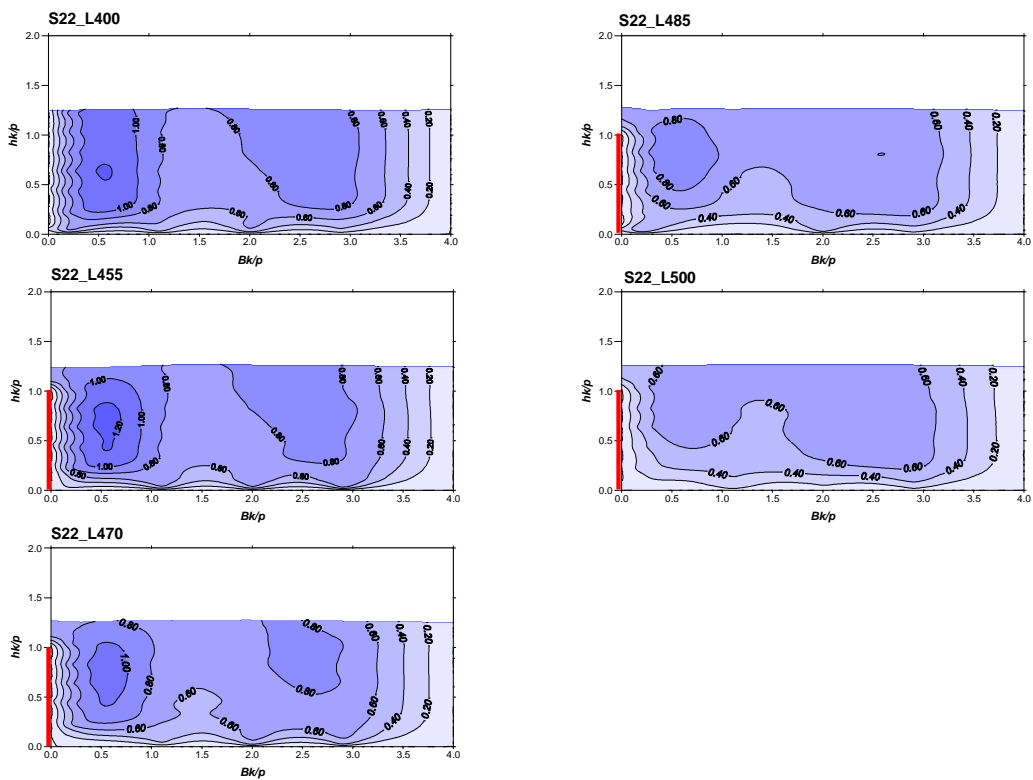
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 22 - przelew B



Pola prędkości podłużnej VL/V0

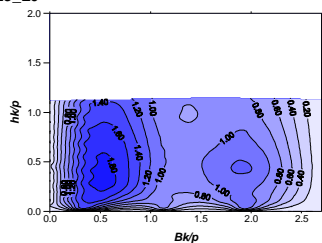
Seria 22 - przelew C



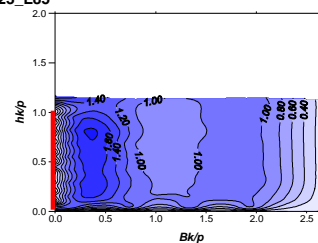
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 23 - przelew A

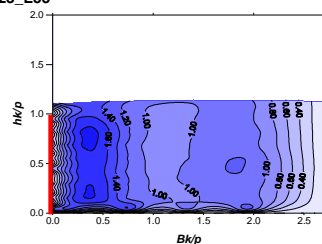
S23_L0



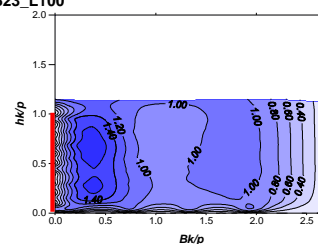
S23_L85



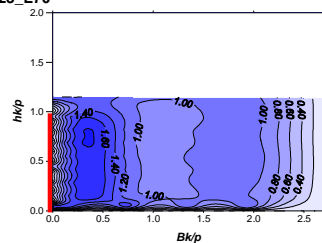
S23_L55



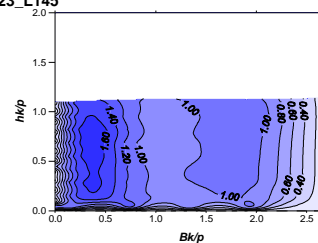
S23_L100



S23_L70



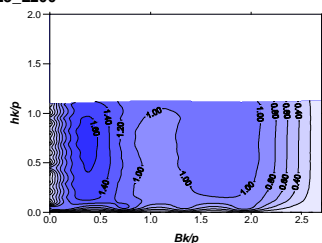
S23_L145



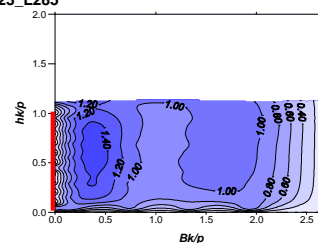
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 23 - przelew B

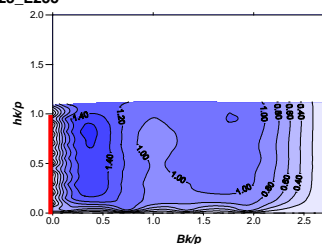
S23_L200



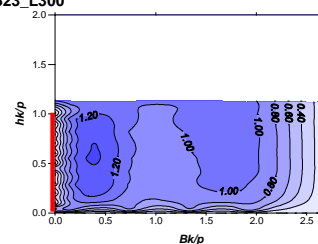
S23_L285



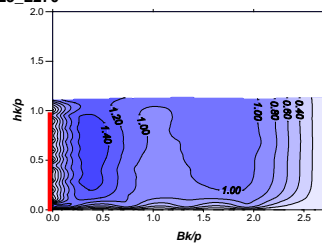
S23_L255



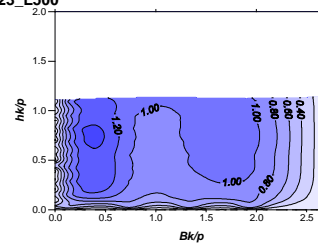
S23_L300



S23_L270



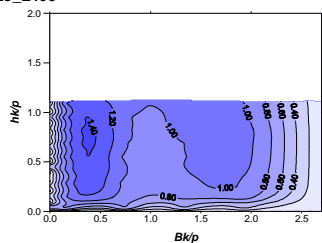
S23_L500



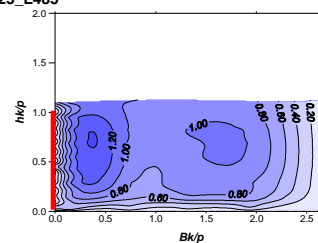
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 23 - przelew C

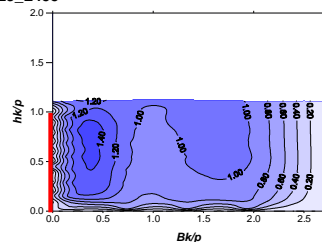
S23_L400



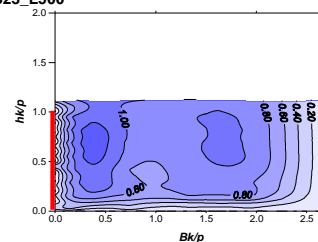
S23_L485



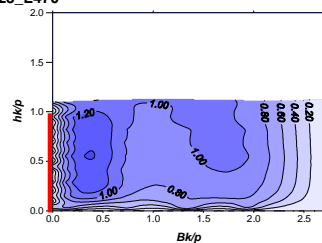
S23_L455



S23_L500



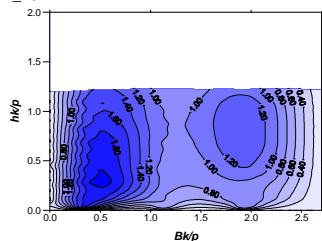
S23_L470



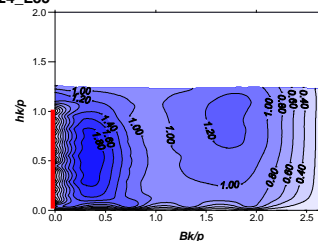
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 24 - przelew A

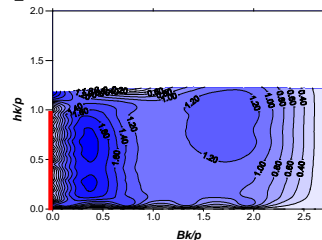
S24_L0



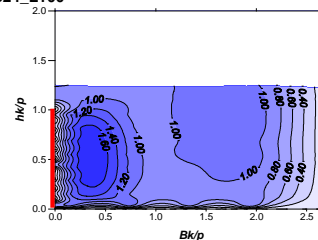
S24_L85



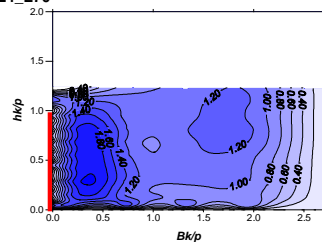
S24_L55



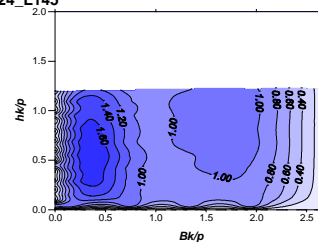
S24_L100



S24_L70



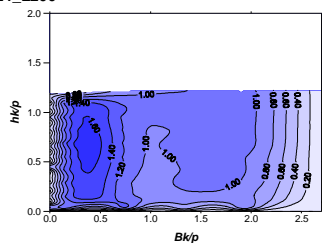
S24_L145



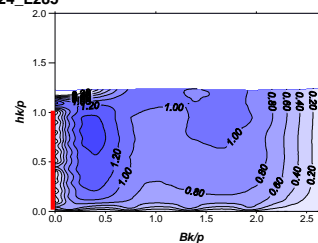
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 24 - przelew B

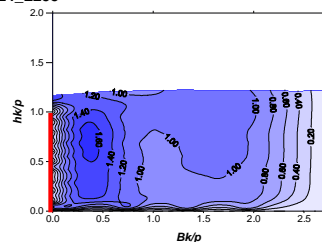
S24_L200



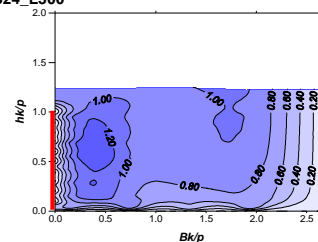
S24_L285



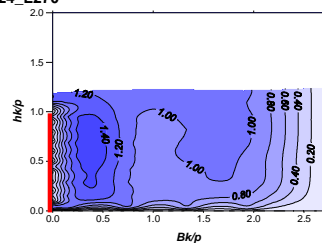
S24_L255



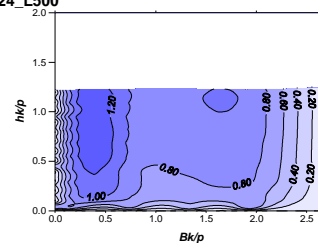
S24_L300



S24_L270



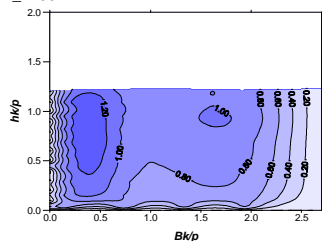
S24_L500



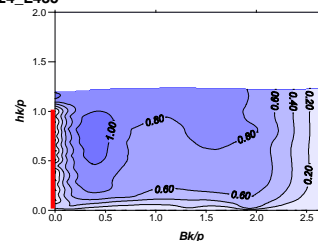
Pola prędkości podłużnej VL/V0

Seria 24 - przelew C

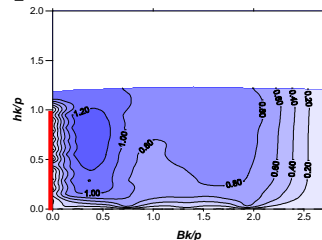
S24_L400



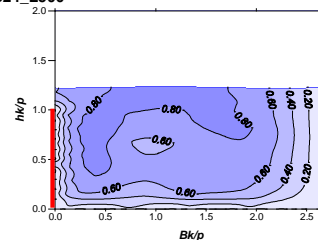
S24_L485



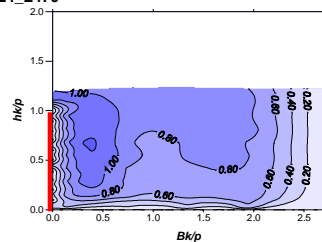
S24_L455



S24_L500



S24_L470

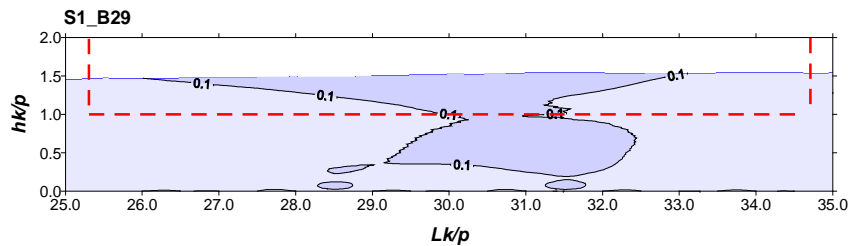
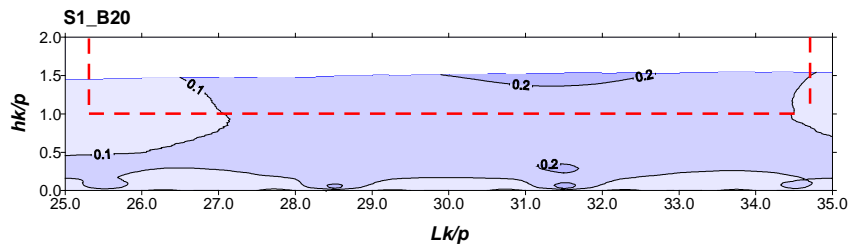
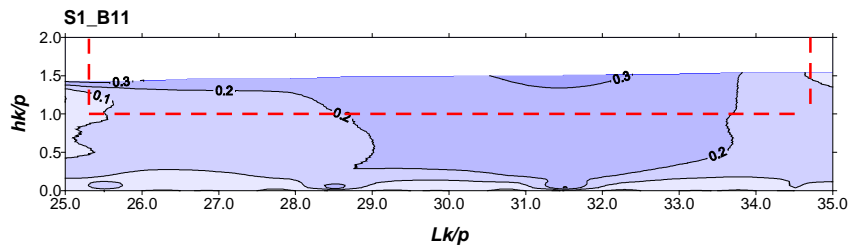
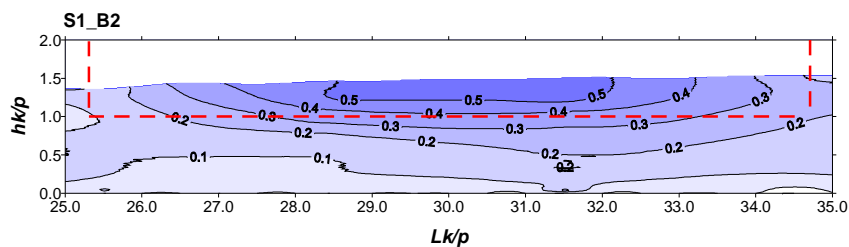


Wyniki pomiarów na modelu hydraulicznym

Rozkłady prędkości poprzecznej v_B/v_0

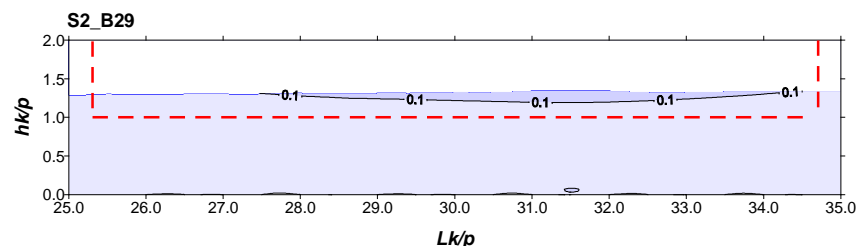
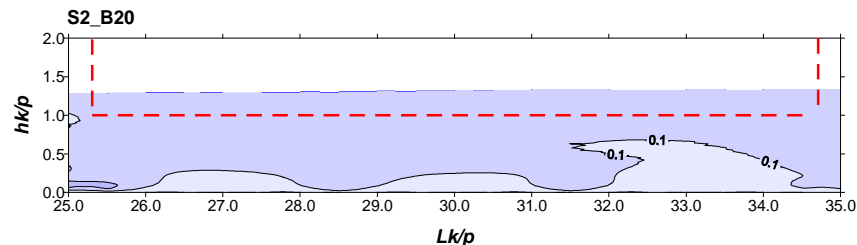
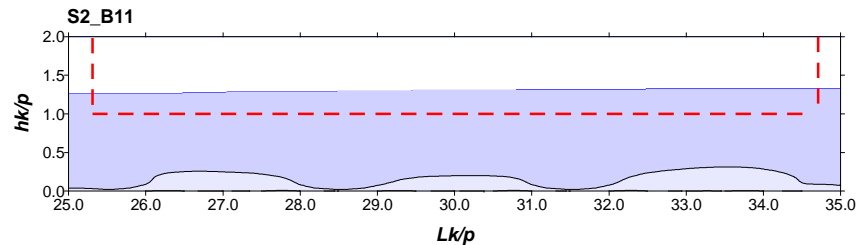
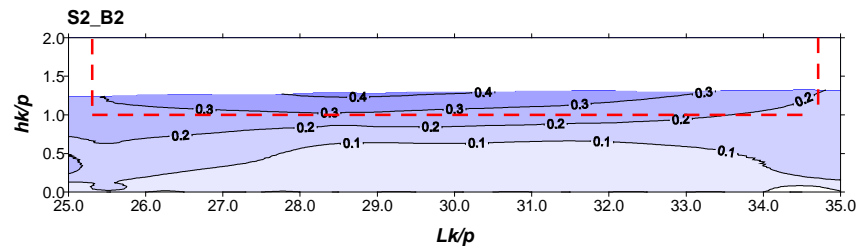
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 1 - przelew B



Pola prędkości poprzecznej VB/V0

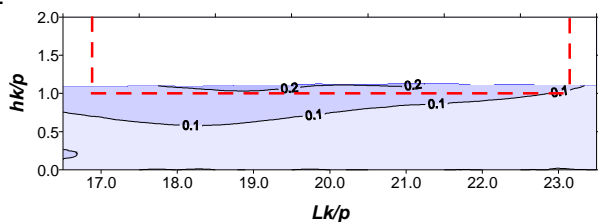
Seria 2 - przelew B



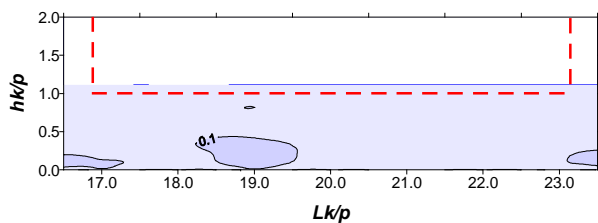
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 3 - przelew B

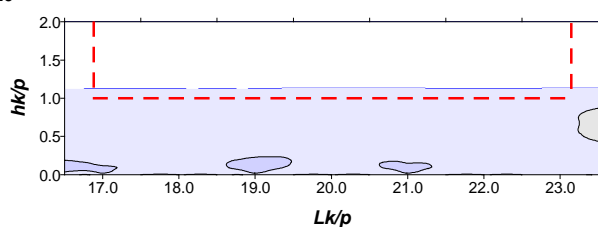
S3_B2



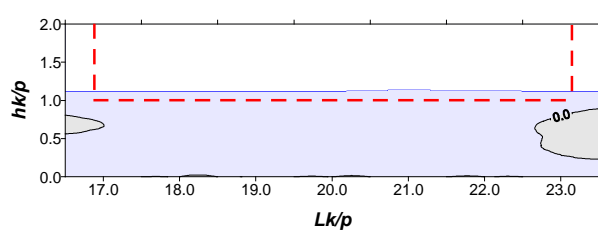
S3_B11



S3_B20



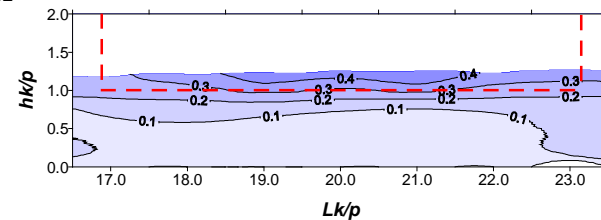
S3_B29



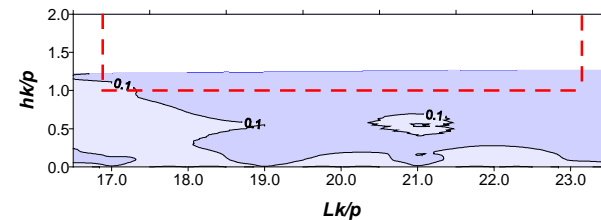
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 4 - przelew B

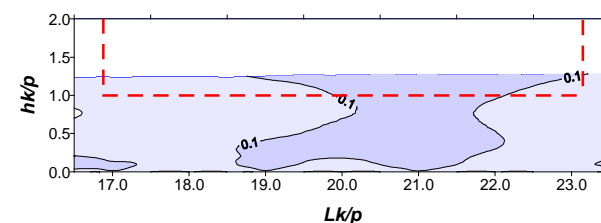
S4_B2



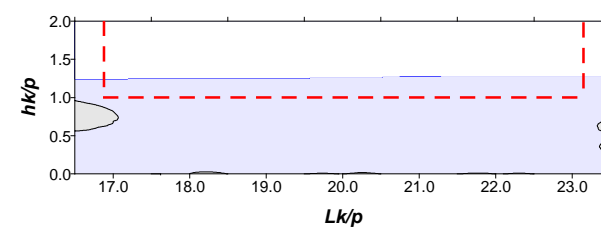
S4_B11



S4_B20



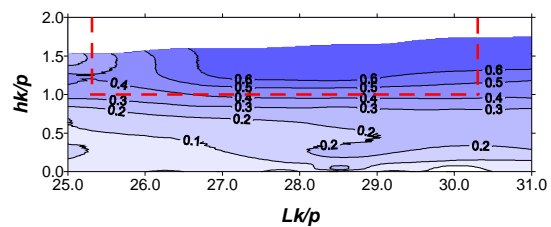
S4_B29



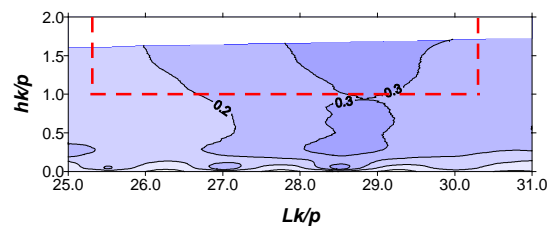
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 5 - przelew B

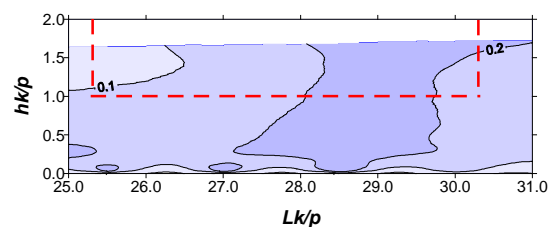
S5_B2



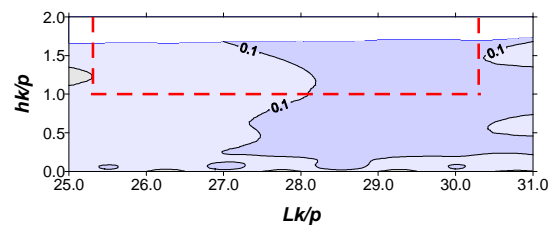
S5_B11



S5_B20



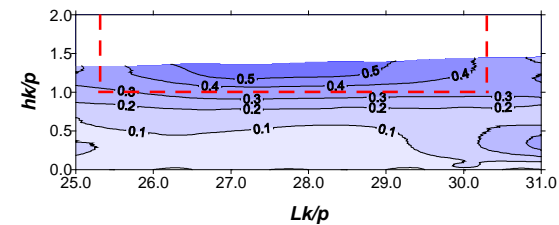
S5_B29



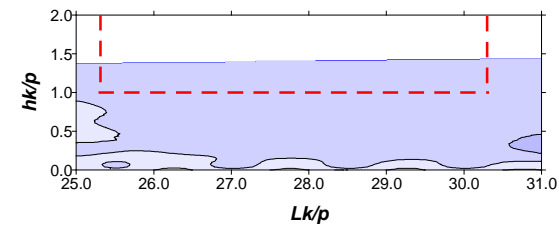
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 6 - przelew B

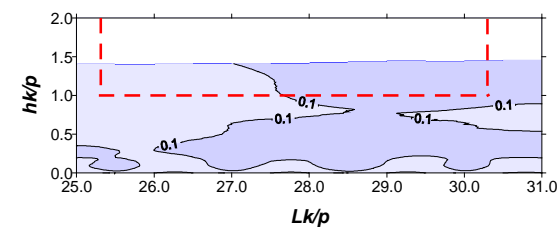
S6_B2



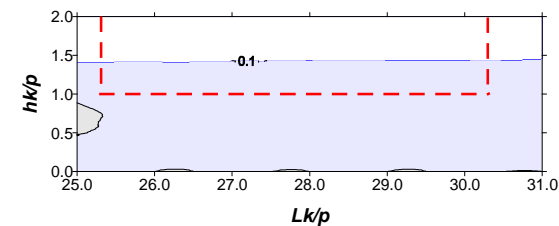
S6_B11



S6_B20



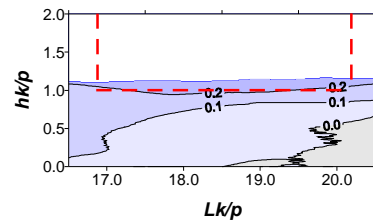
S6_B29



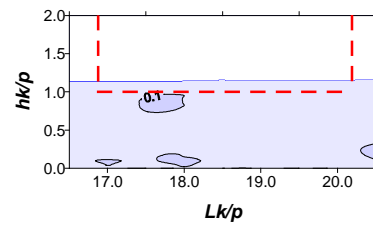
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 7 - przelew B

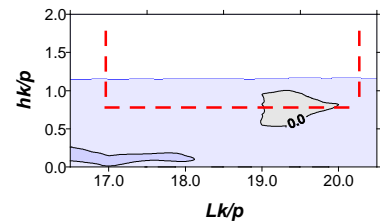
S7_B2



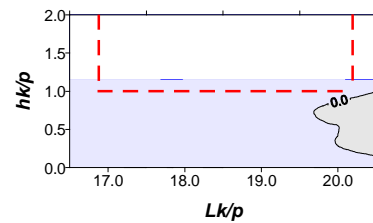
S7_B11



S7_B20



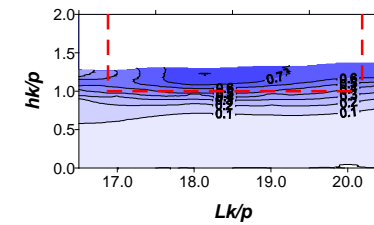
S7_B29



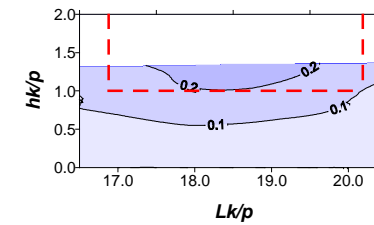
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 8 - przelew B

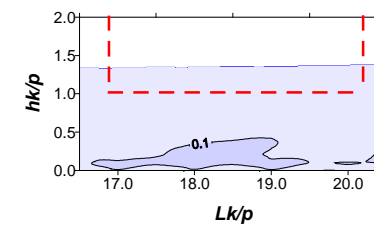
S8_B2



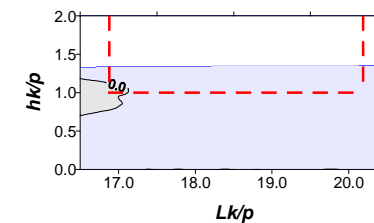
S8_B11



S8_B20

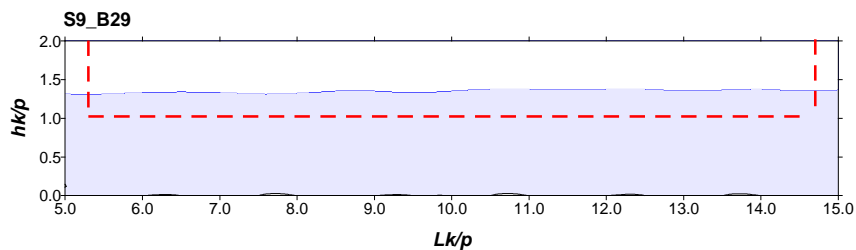
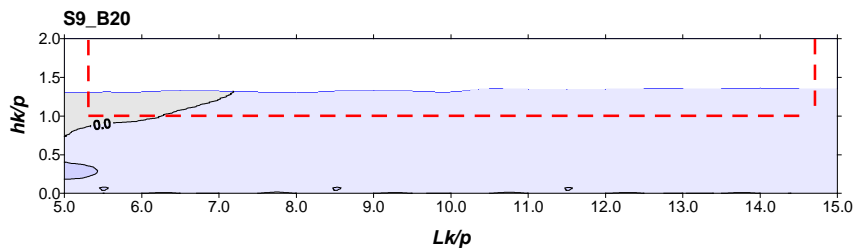
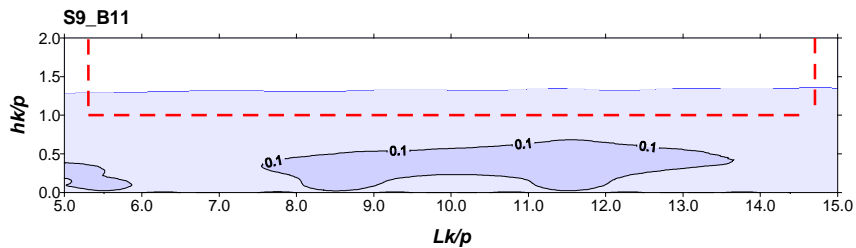
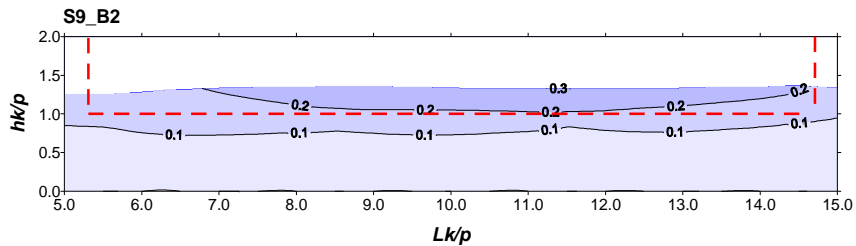


S8_B29



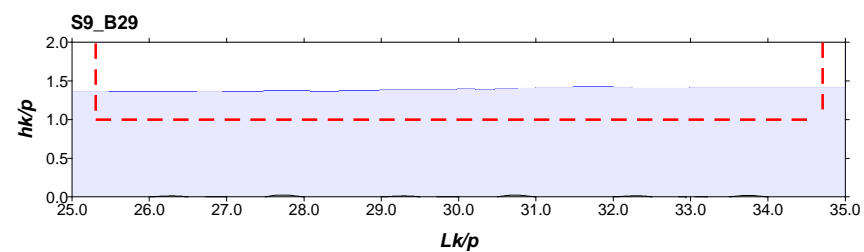
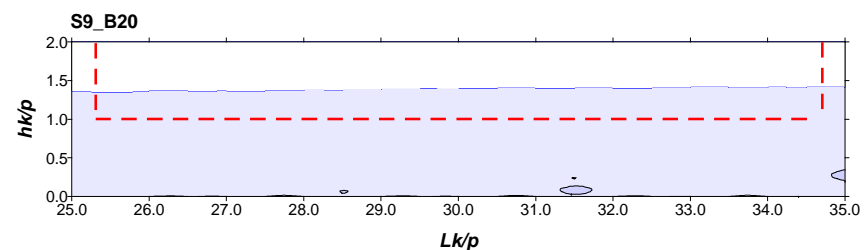
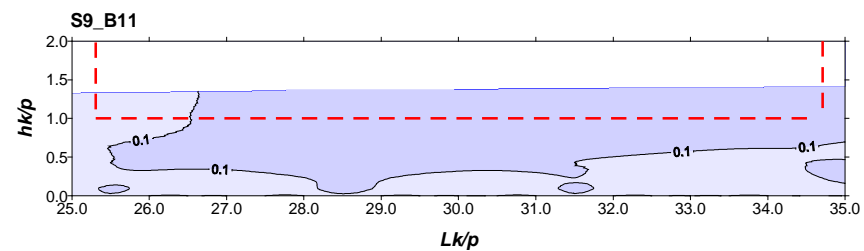
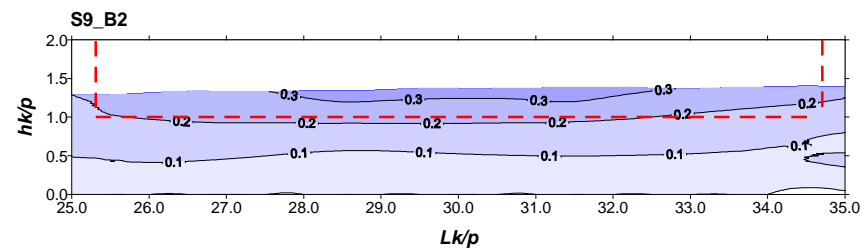
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 9 - przelew A



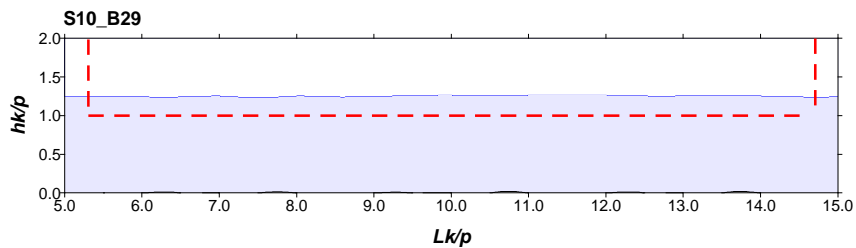
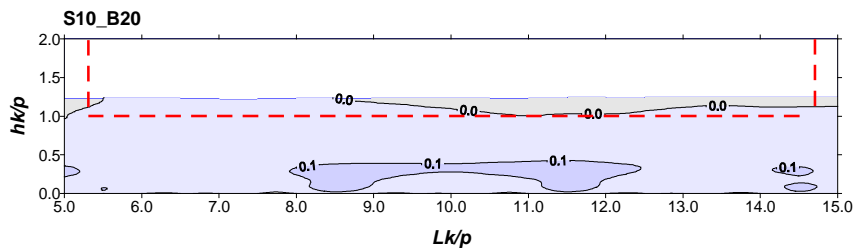
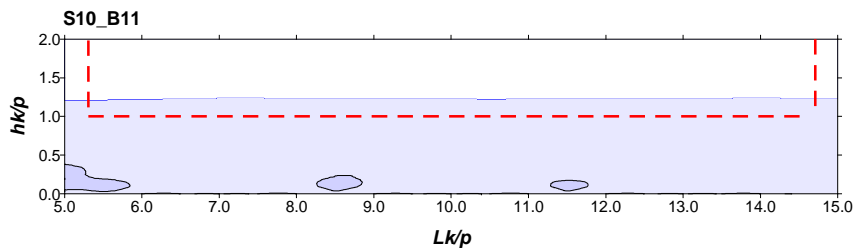
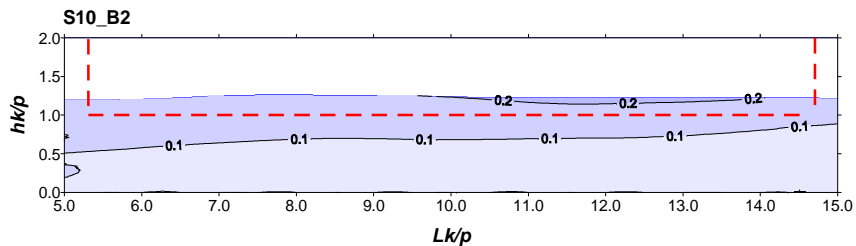
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 9 - przelew B



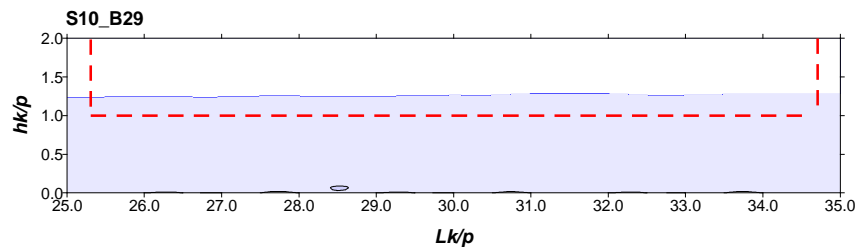
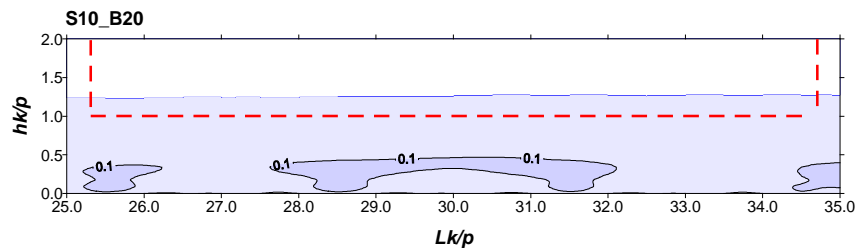
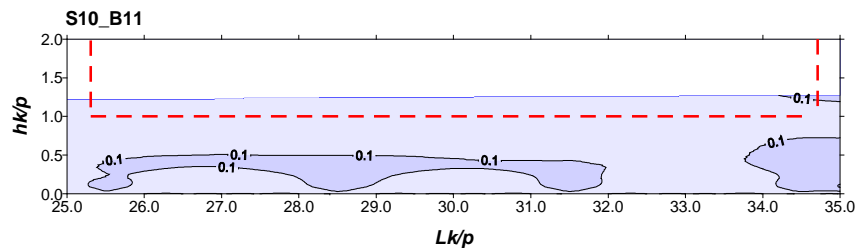
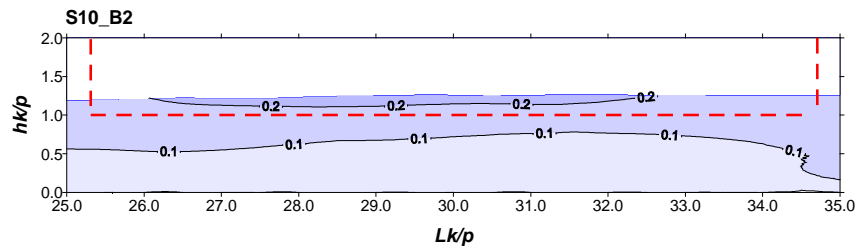
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 10 - przelew A



Pola prędkości poprzecznej VB/V0

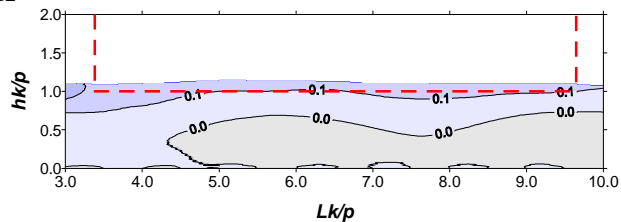
Seria 10 - przelew B



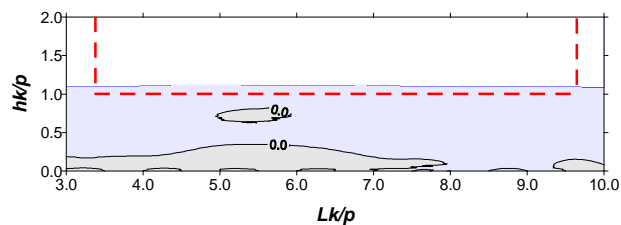
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 11 - przelew A

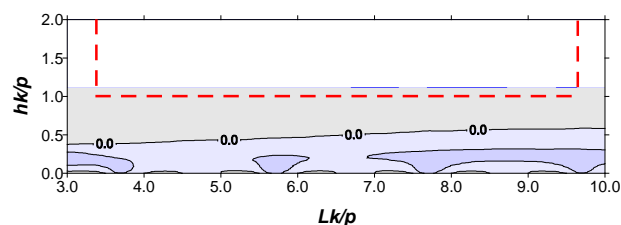
S11_B2



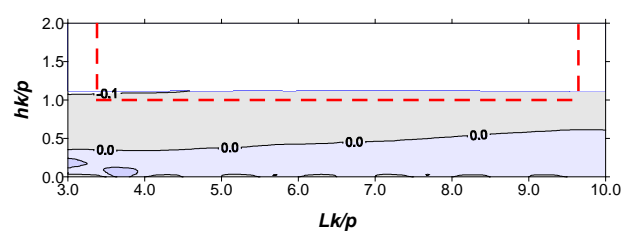
S11_B11



S11_B20



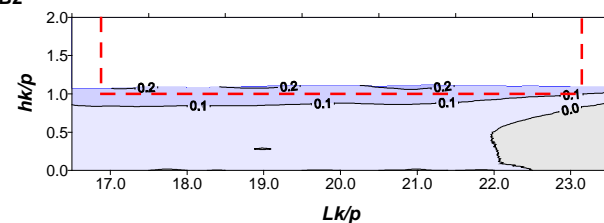
S11_B29



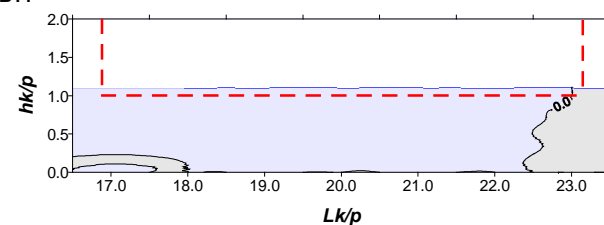
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 11 - przelew B

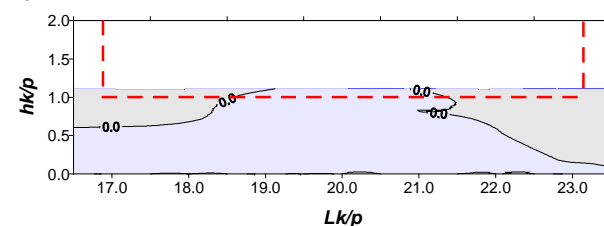
S11_B2



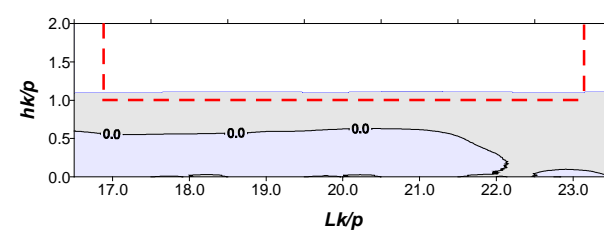
S11_B11



S11_B20



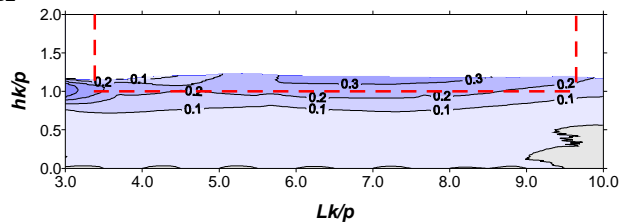
S11_B29



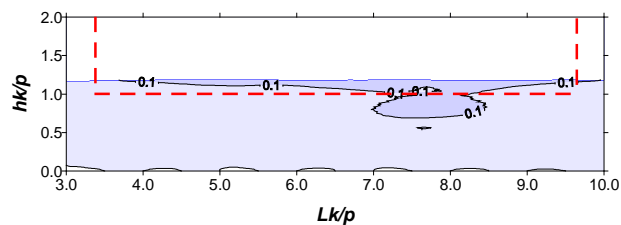
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 12 - przelew A

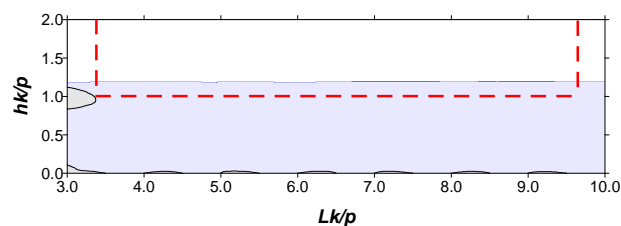
S12_B2



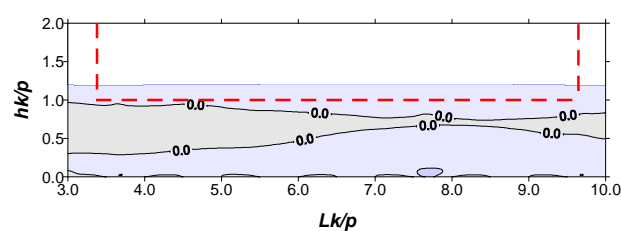
S12_B11



S12_B20



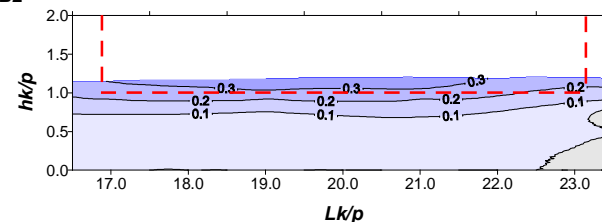
S12_B29



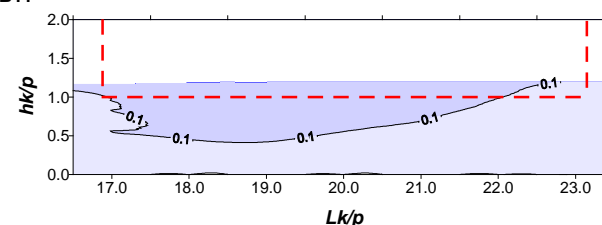
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 12 - przelew B

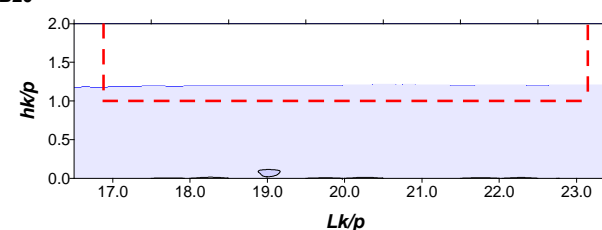
S12_B2



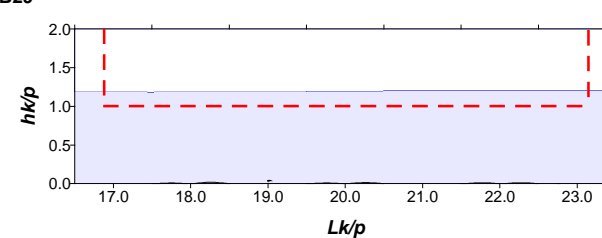
S12_B11



S12_B20



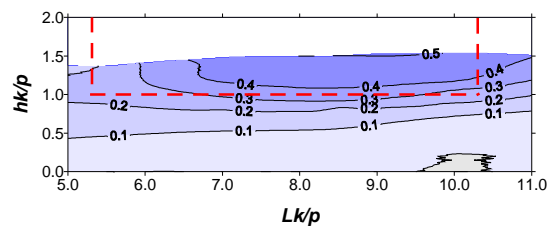
S12_B29



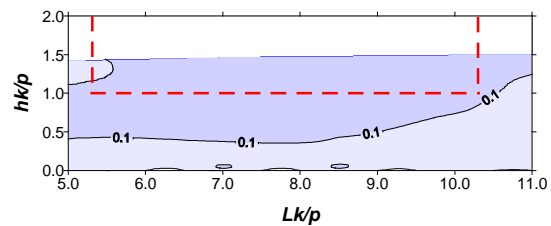
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 13 - przelew A

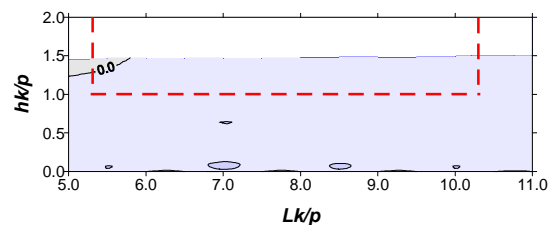
S13_B2



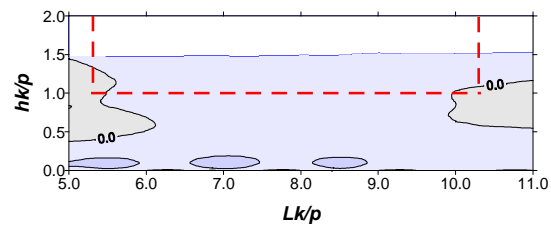
S13_B11



S13_B20



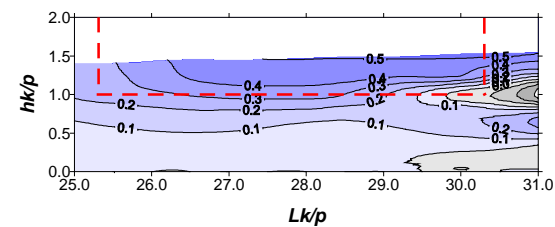
S13_B29



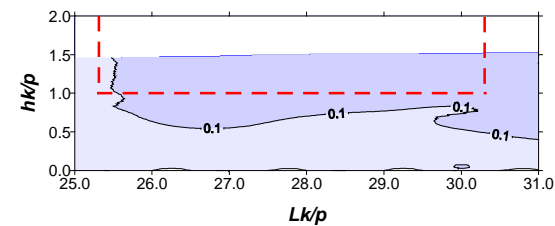
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 13 - przelew B

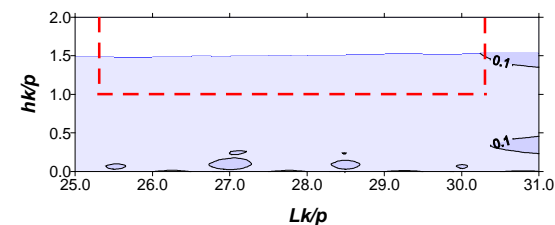
S13_B2



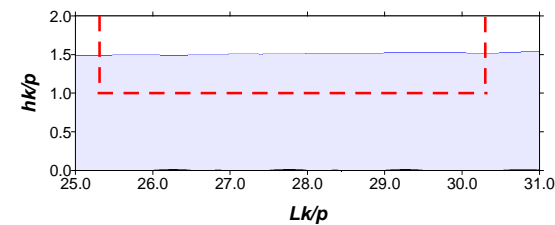
S13_B11



S13_B20



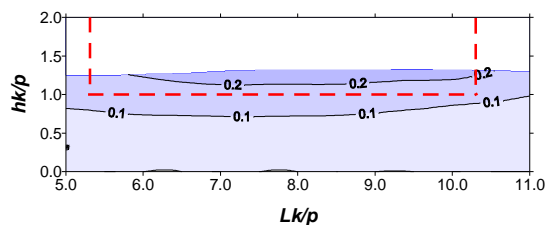
S13_B29



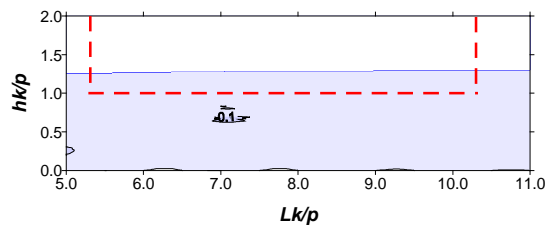
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 14 - przelew A

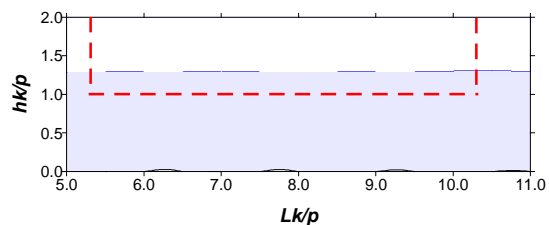
S14_B2



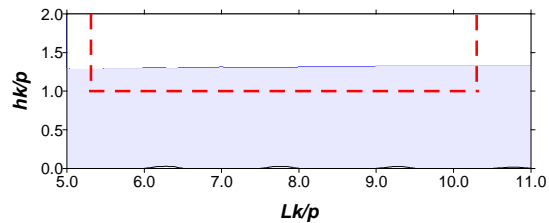
S14_B11



S14_B20



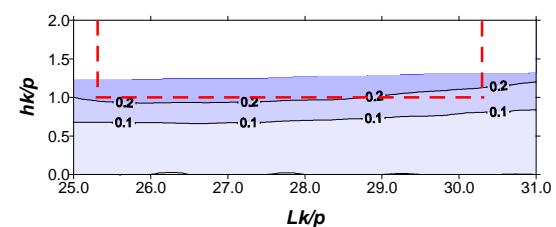
S14_B29



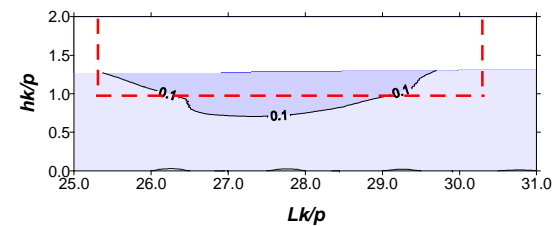
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 14 - przelew B

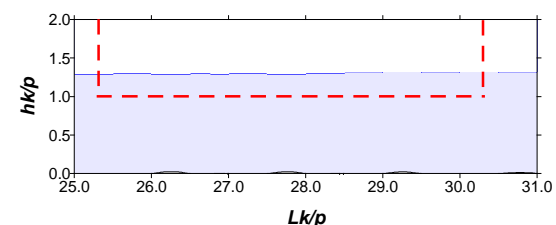
S14_B2



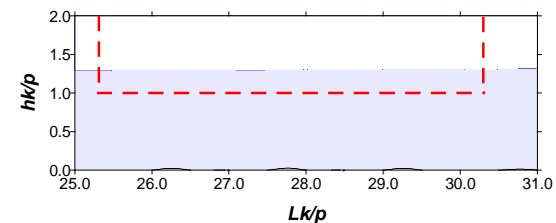
S14_B11



S14_B20



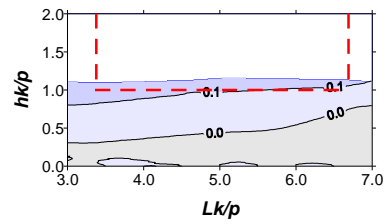
S14_B29



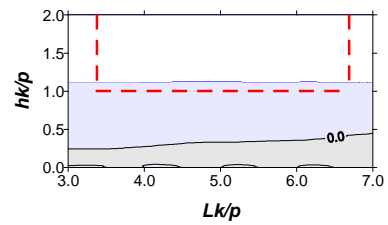
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 15 - przelew A

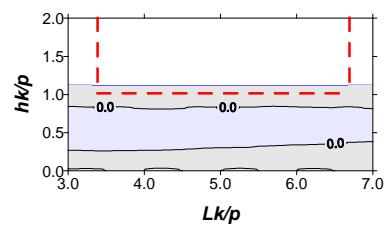
S15_B2



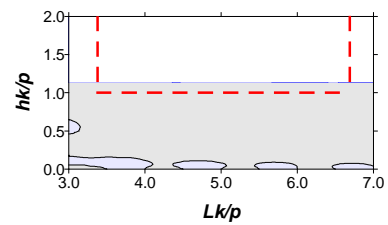
S15_B11



S15_B20



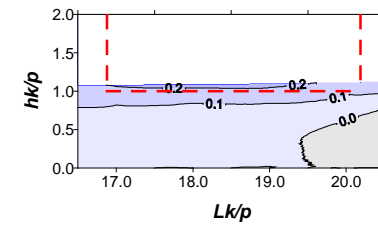
S15_B29



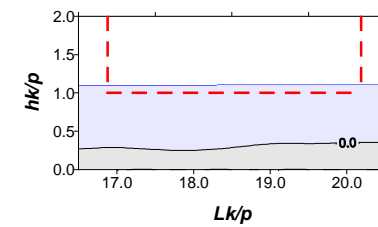
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 15 - przelew B

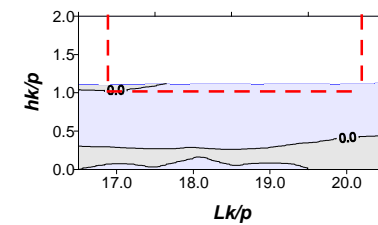
S15_B2



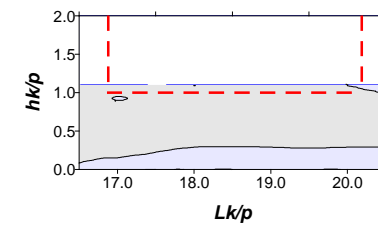
S15_B11



S15_B20

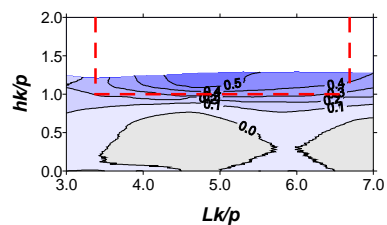


S15_B29

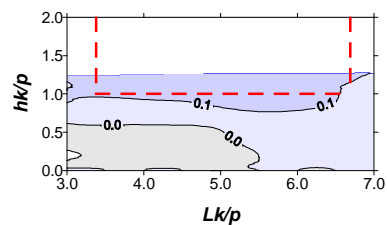


Pola prędkości poprzecznej VB/V0
 Seria 16 - przelew A

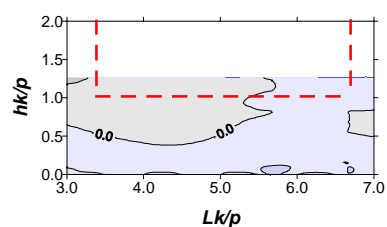
S16_B2



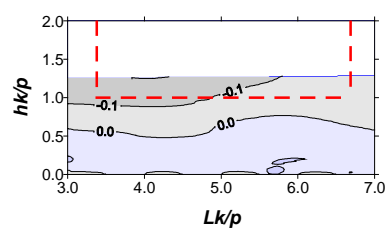
S16_B11



S16_B20

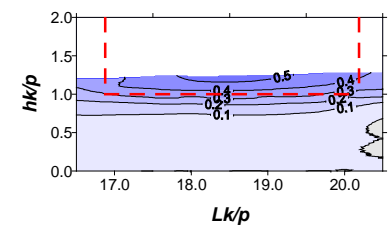


S16_B29

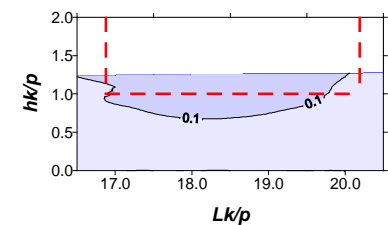


Pola prędkości poprzecznej VB/V0
 Seria 16 - przelew B

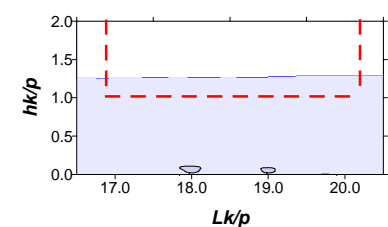
S16_B2



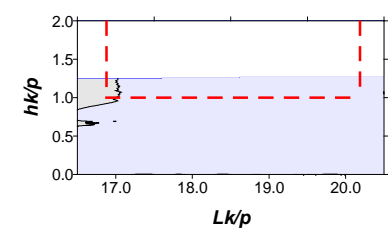
S16_B11



S16_B20

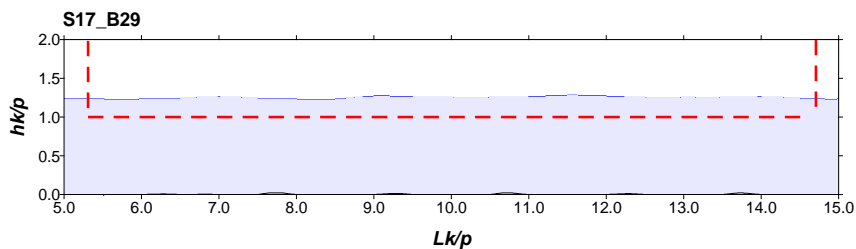
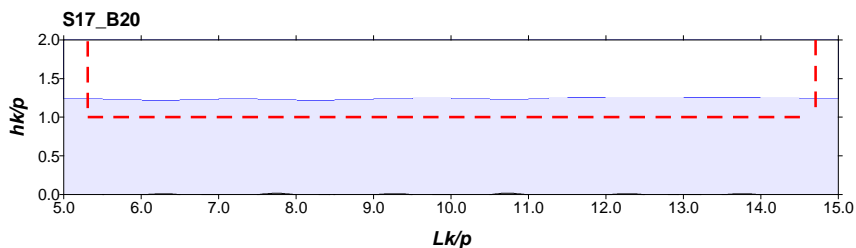
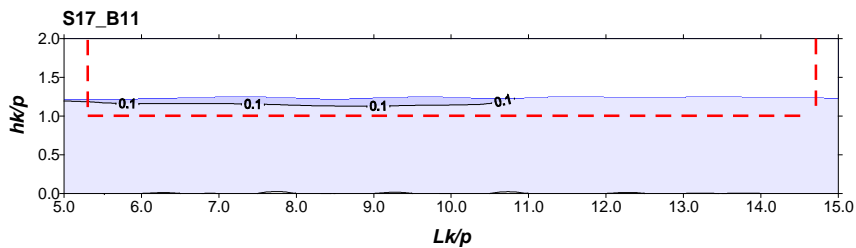
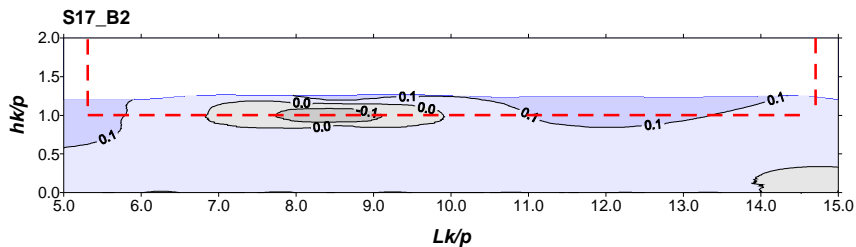


S16_B29



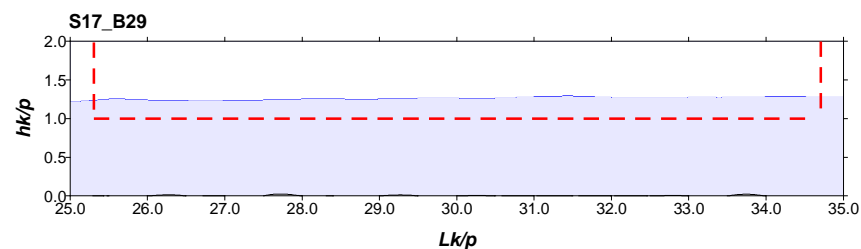
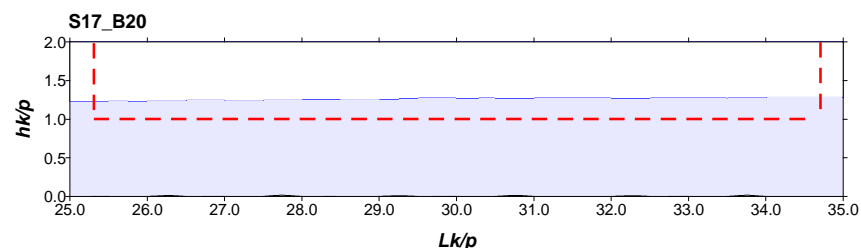
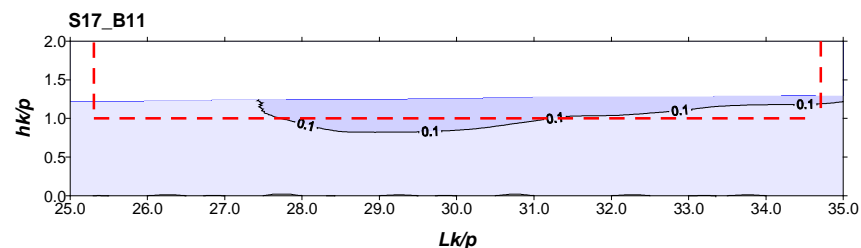
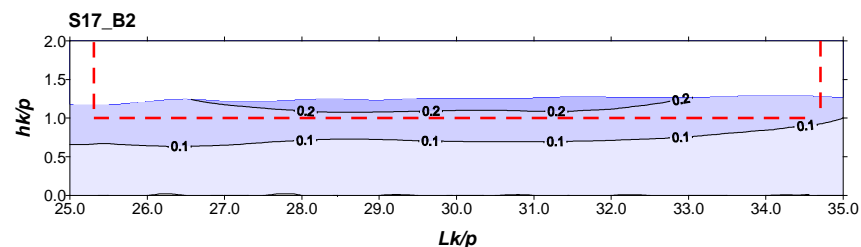
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 17 - przelew A



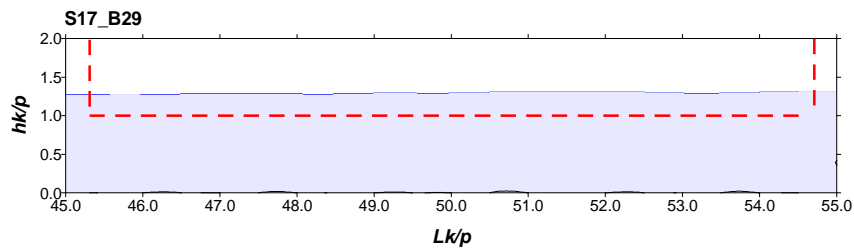
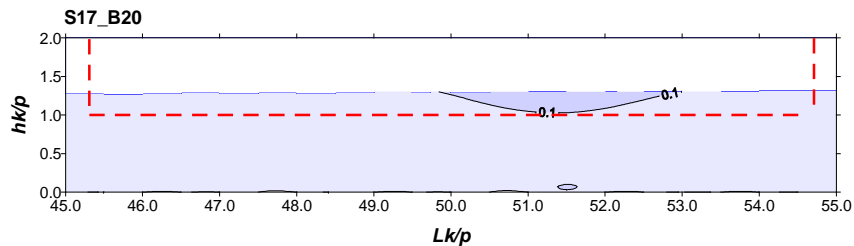
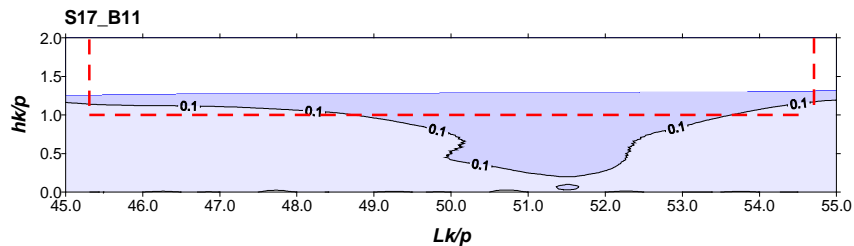
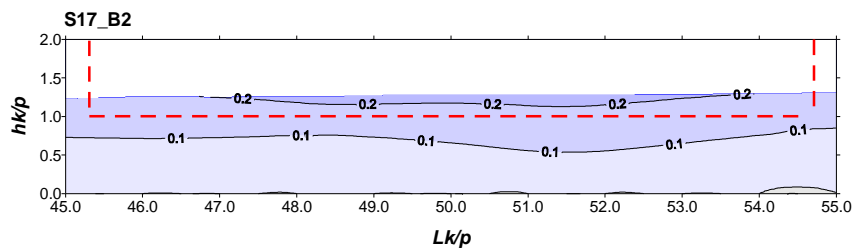
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 17 - przelew B



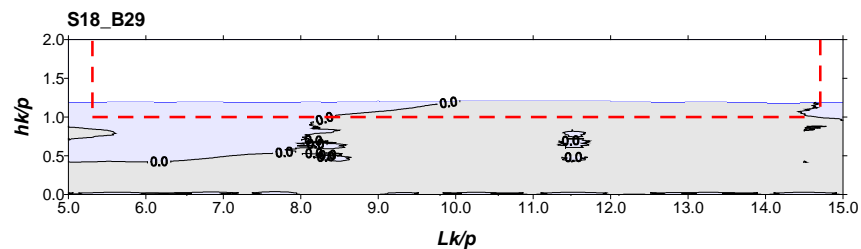
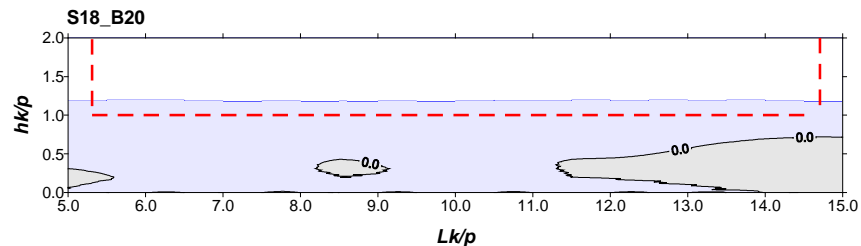
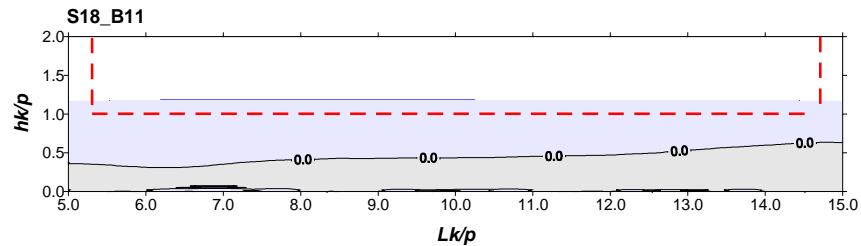
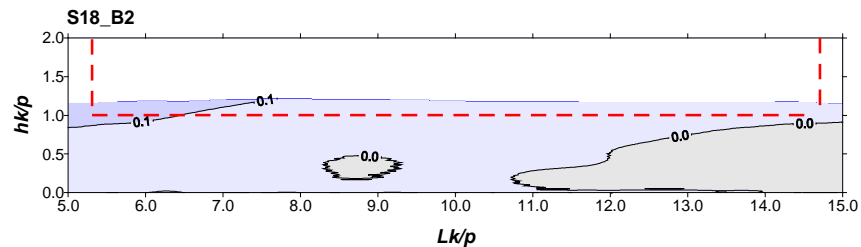
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 17 - przelew C



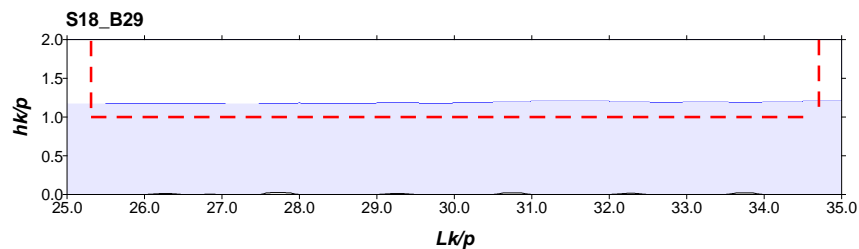
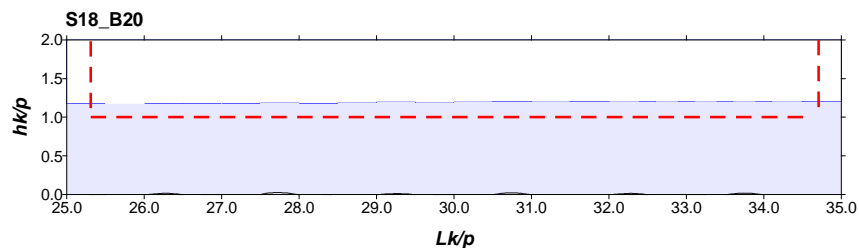
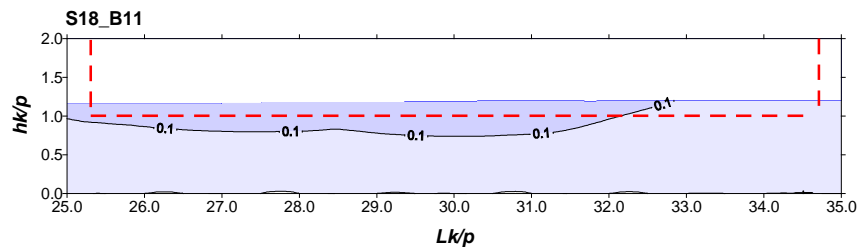
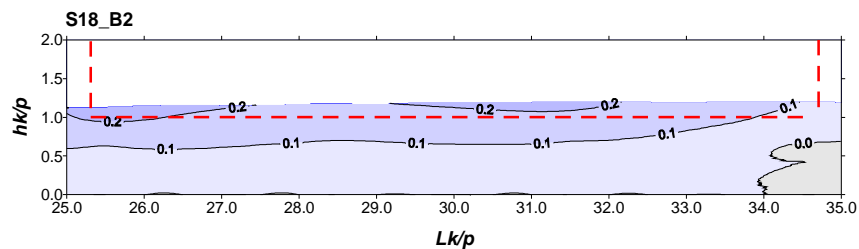
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 18 - przelew A



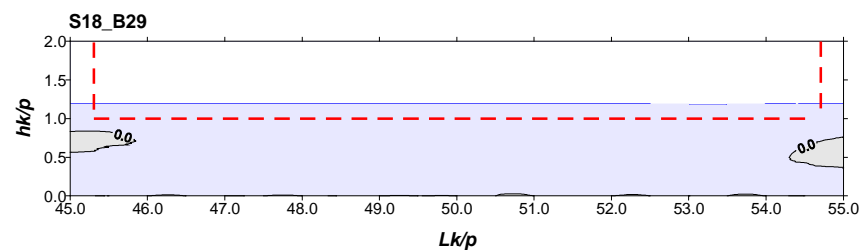
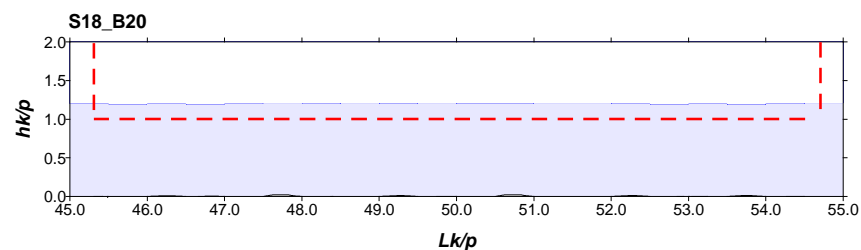
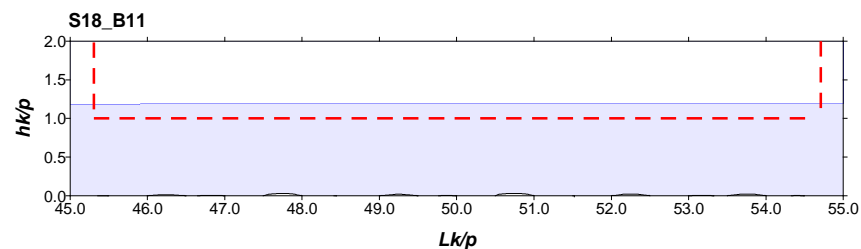
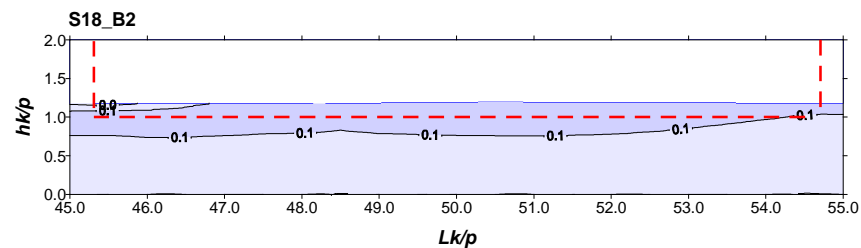
Pla prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 18 - przelew B



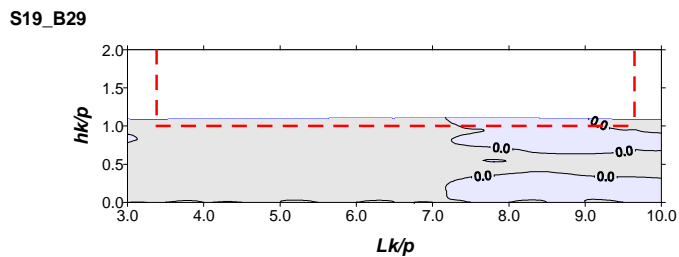
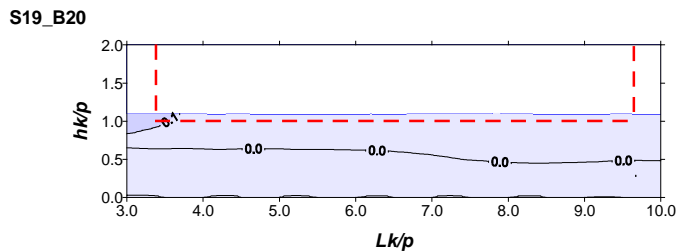
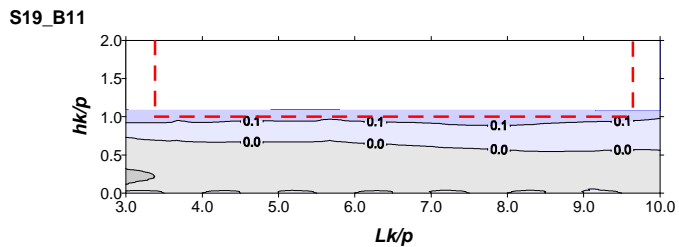
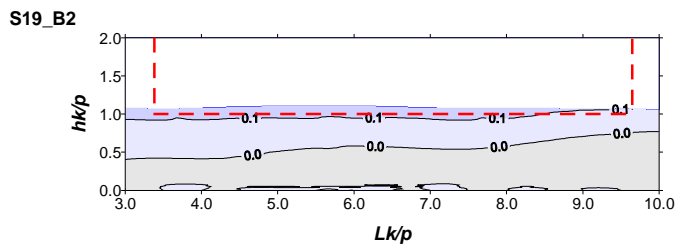
Pla prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 18 - przelew C



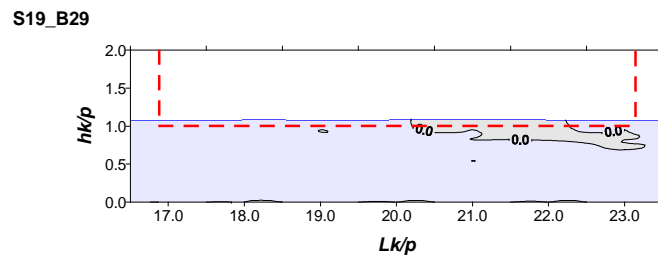
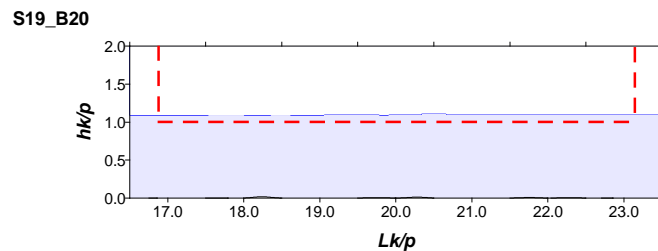
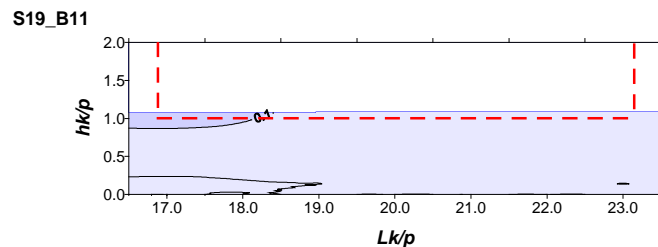
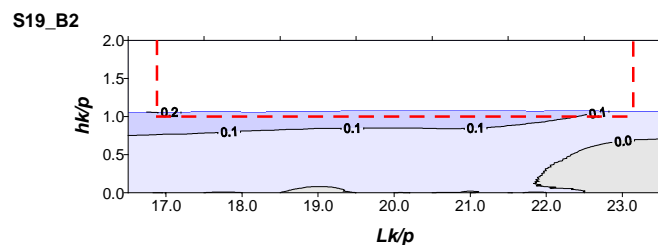
Pola prędkości poprzecznej VB/0

Seria 19 - przelew A



Pola prędkości poprzecznej VB/V0

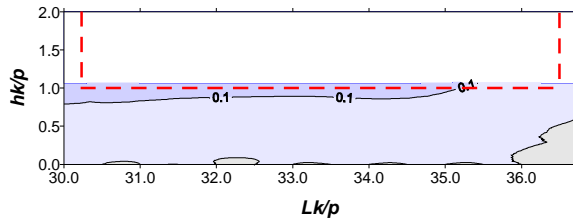
Seria 19 - przelew B



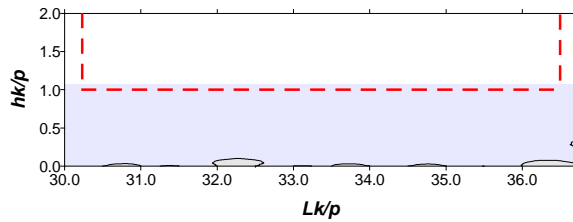
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 19 - przelew C

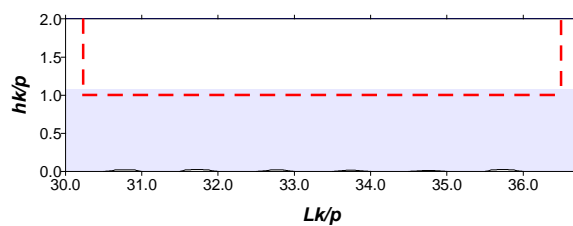
S19_B2



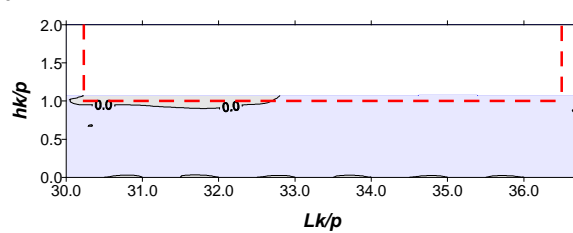
S19_B11



S19_B20



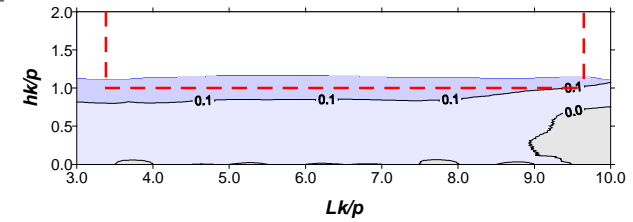
S19_B29



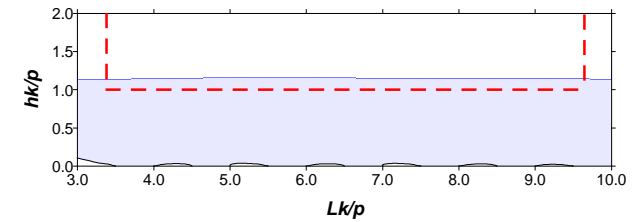
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 20 - przelew A

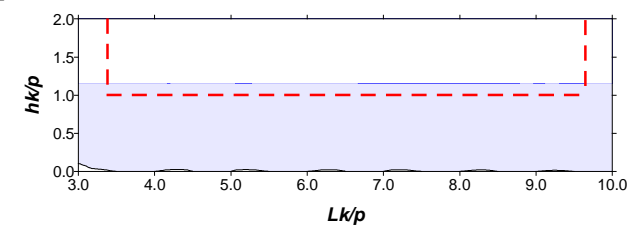
S20_B2



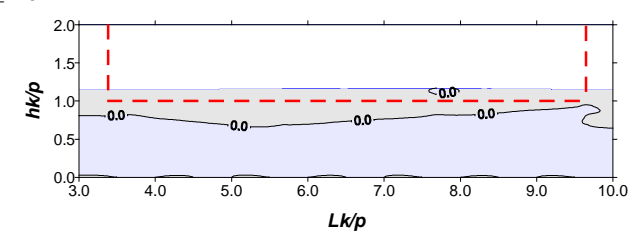
S20_B11



S20_B20



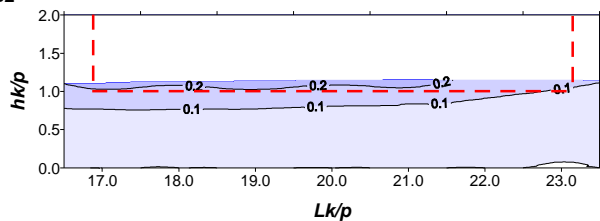
S20_B29



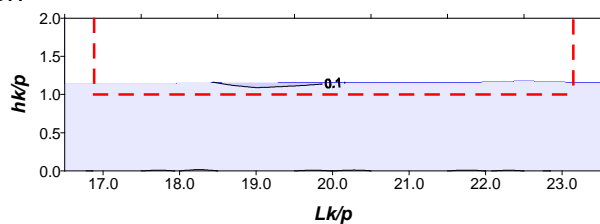
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 20 - przelew B

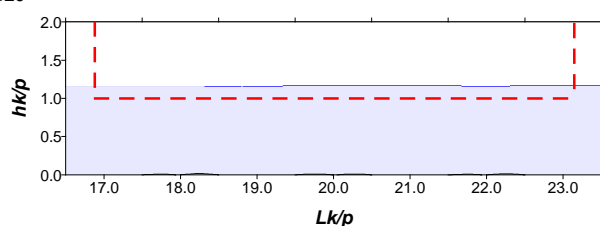
S20_B2



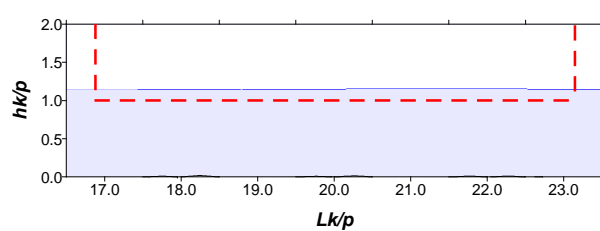
S20_B11



S20_B20



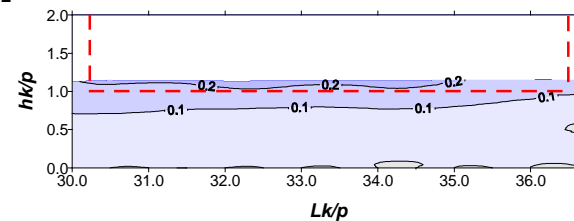
S20_B29



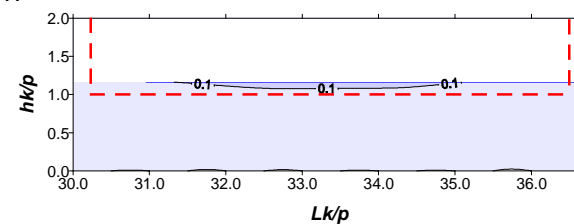
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria20 - przelew C

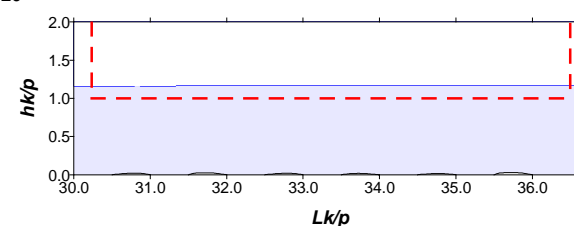
S20_B2



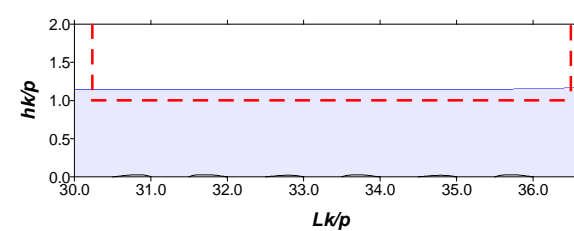
S20_B11



S20_B20



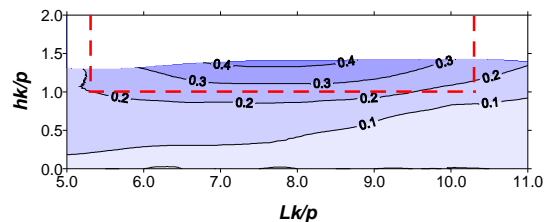
S20_B29



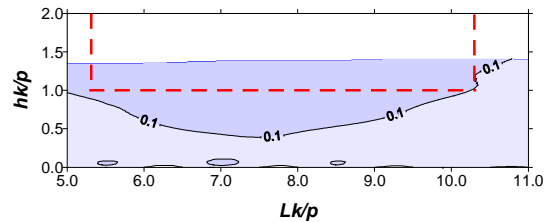
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 21 - przelew A

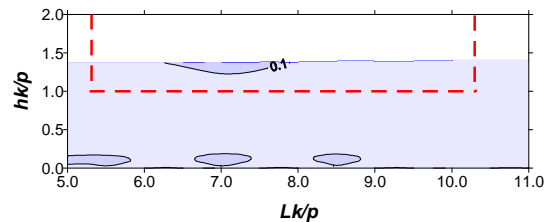
S21_B2



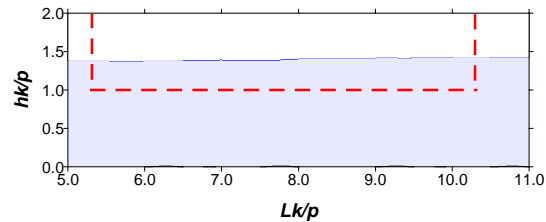
S21_B11



S21_B20



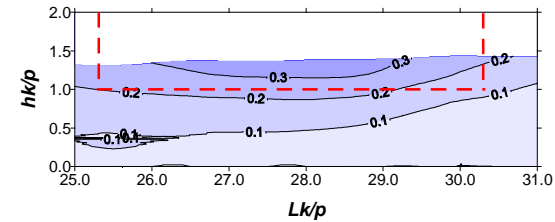
S21_B29



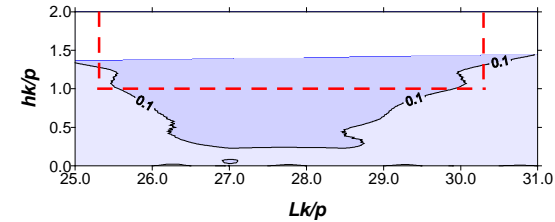
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 21 - przelew B

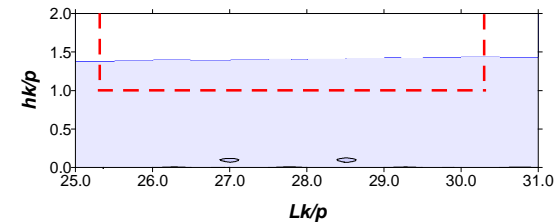
S21_B2



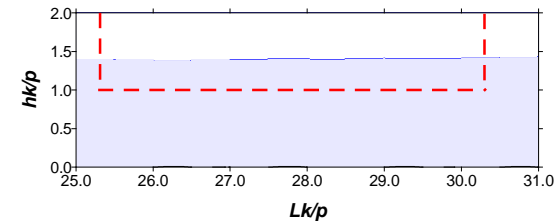
S21_B11



S21_B20



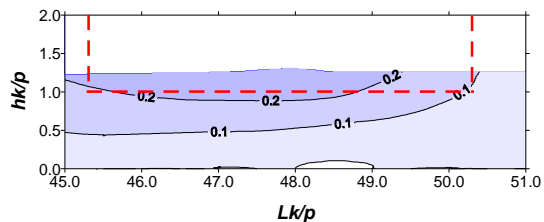
S21_B29



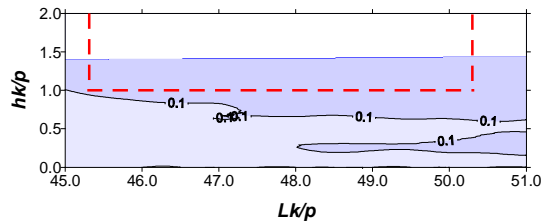
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 21 - przelew C

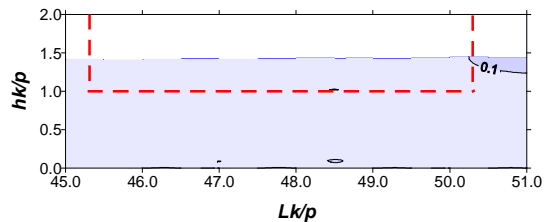
S21_B2



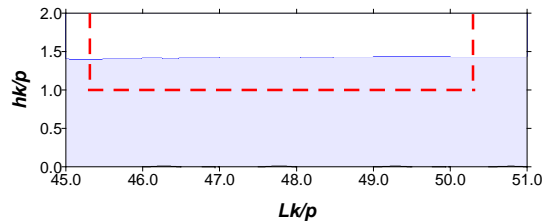
S21_B11



S21_B20



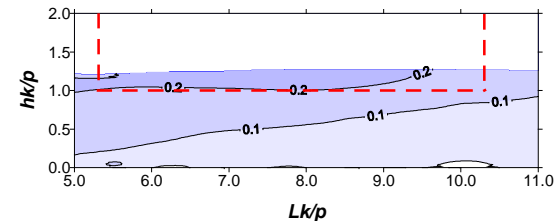
S21_B29



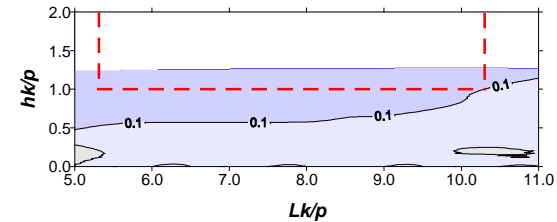
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 22 - przelew A

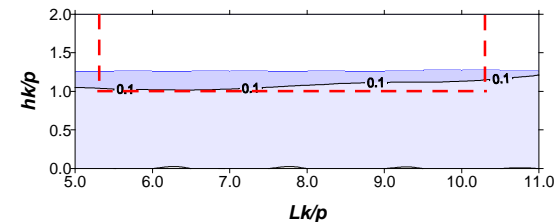
S22_B2



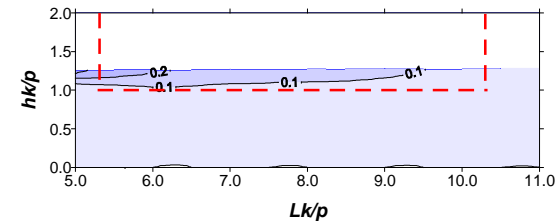
S22_B11



S22_B20



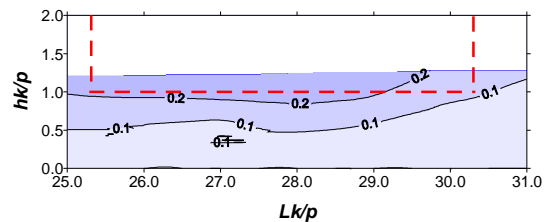
S22_B29



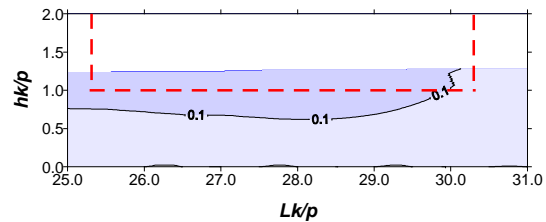
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 22 - przelew B

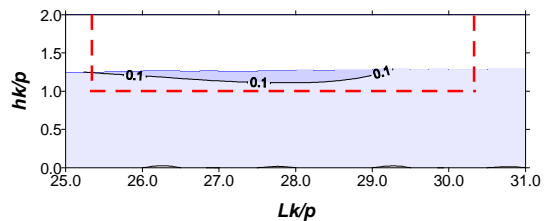
S22_B2



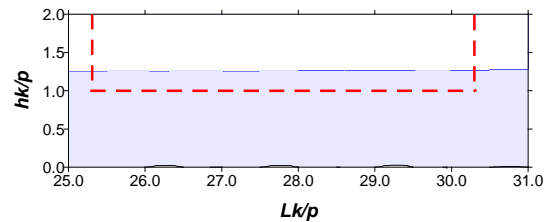
S22_B11



S22_B20



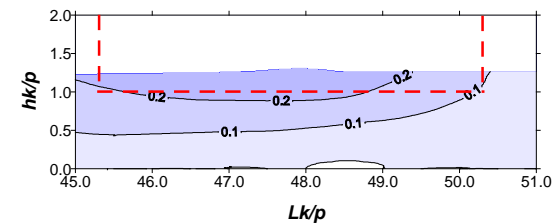
S22_B29



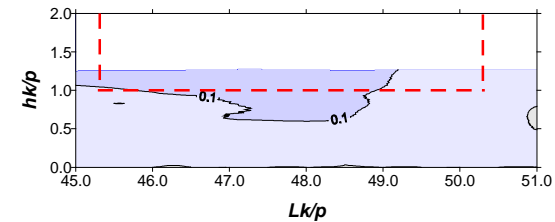
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 22 - przelew C

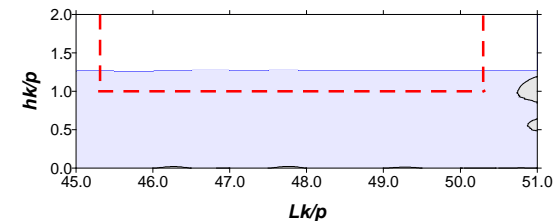
S22_B2



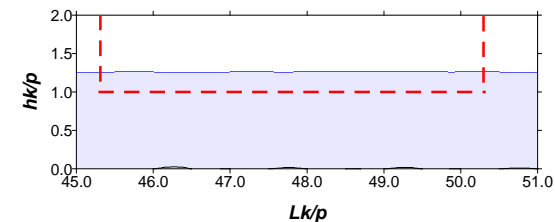
S22_B11



S22_B20



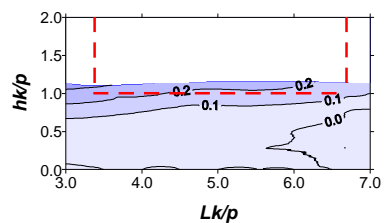
S22_B29



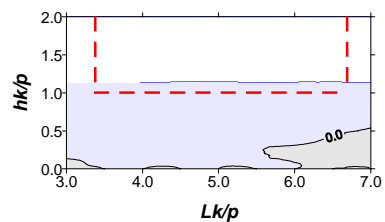
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 23 - przelew A

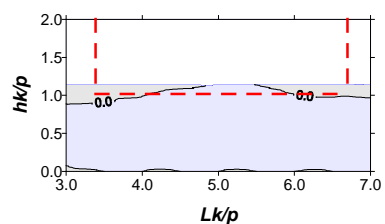
S23_B2



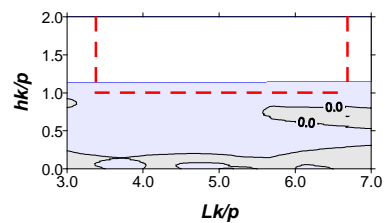
S23_B11



S23_B20



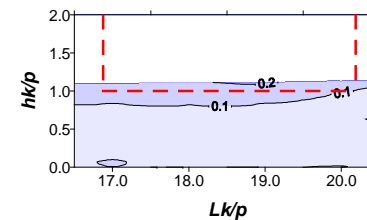
S23_B29



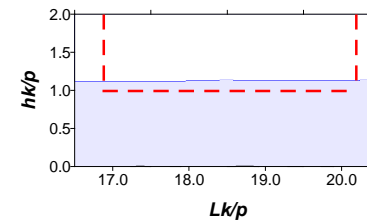
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 23 - przelew B

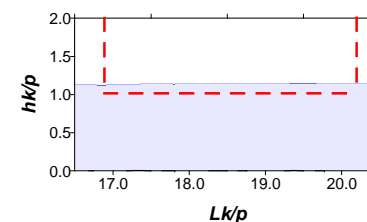
S23_B2



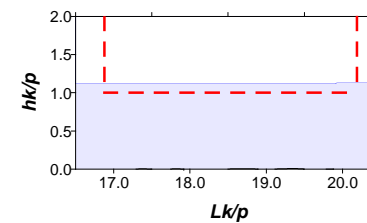
S23_B11



S23_B20



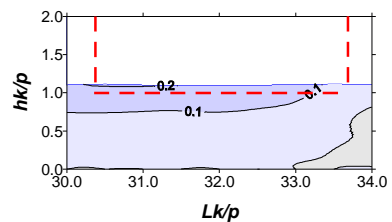
S23_B29



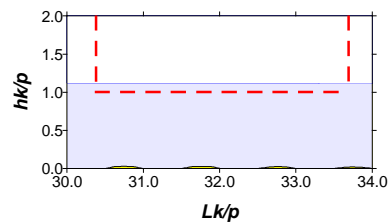
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 23 - przelew C

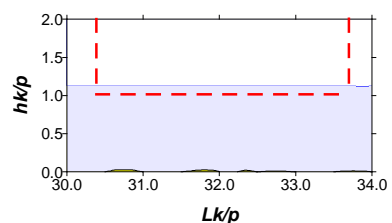
S23_B2



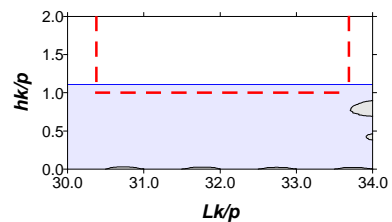
S23_B11



S23_B20



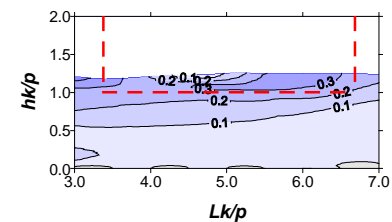
S23_B29



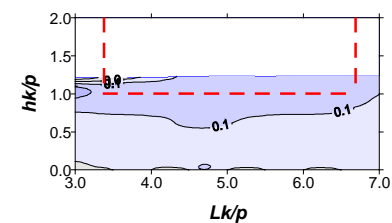
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 24 - przelew A

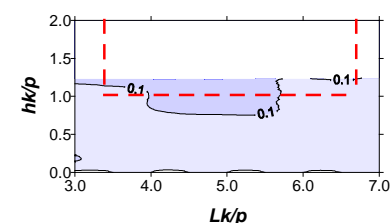
S24_B2



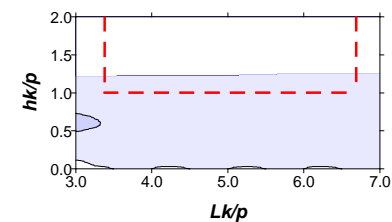
S24_B11



S24_B20



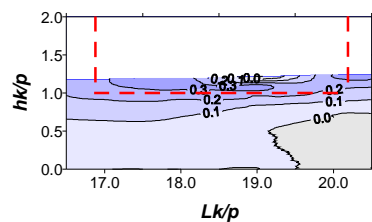
S24_B29



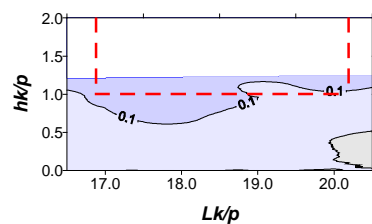
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 24 - przelew B

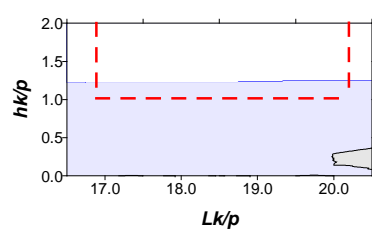
S24_B2



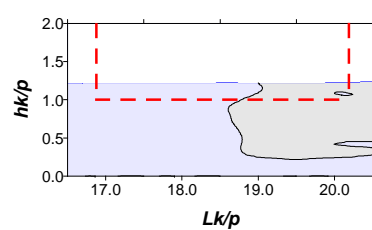
S24_B11



S24_B20



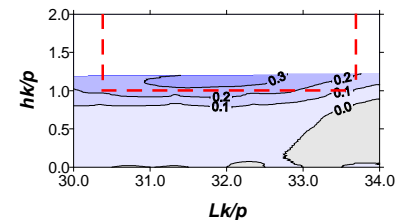
S24_B29



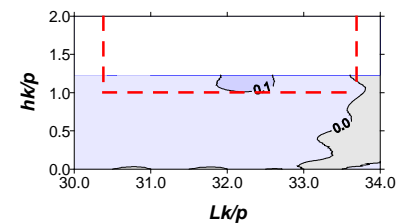
Pola prędkości poprzecznej VB/V0

Seria 24 - przelew C

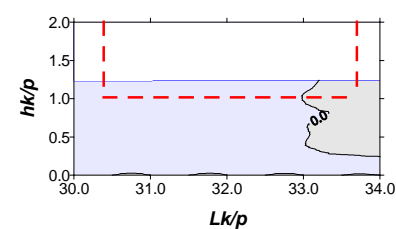
S24_B2



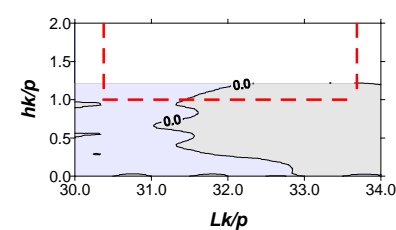
S24_B11



S24_B20



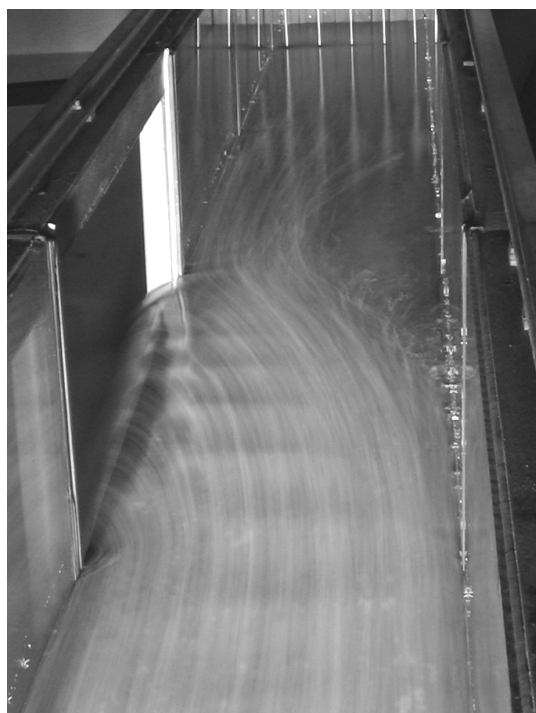
S24_B29



Fotograficzna dokumentacja badań



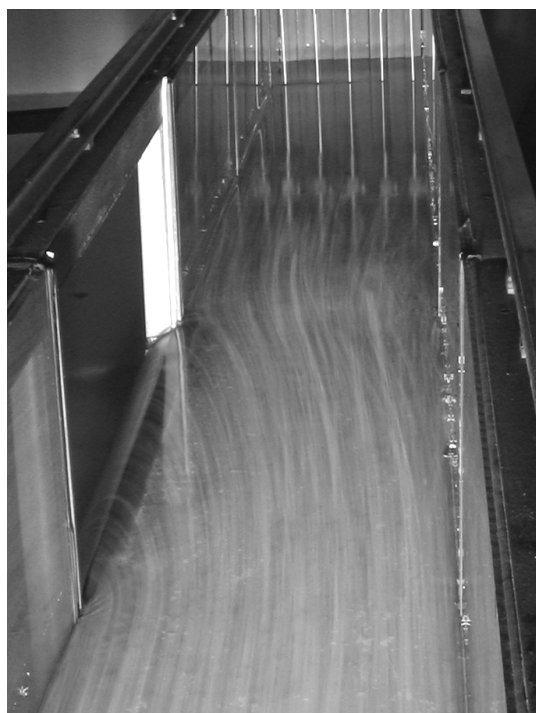
Seria1 – przelew B



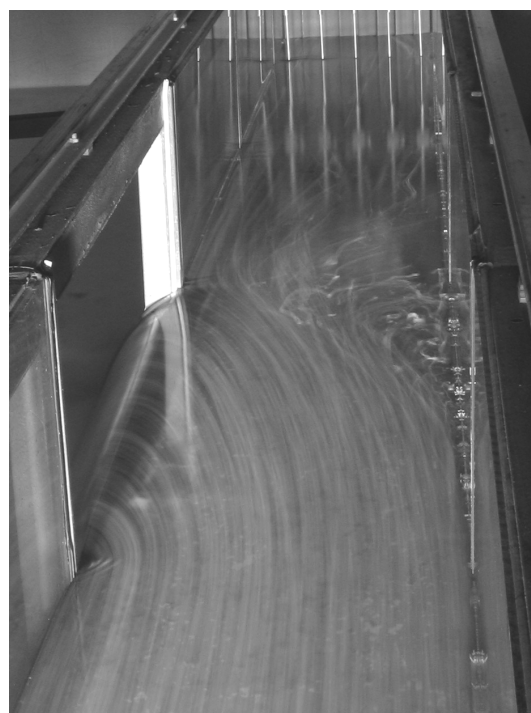
Seria3 – przelew B



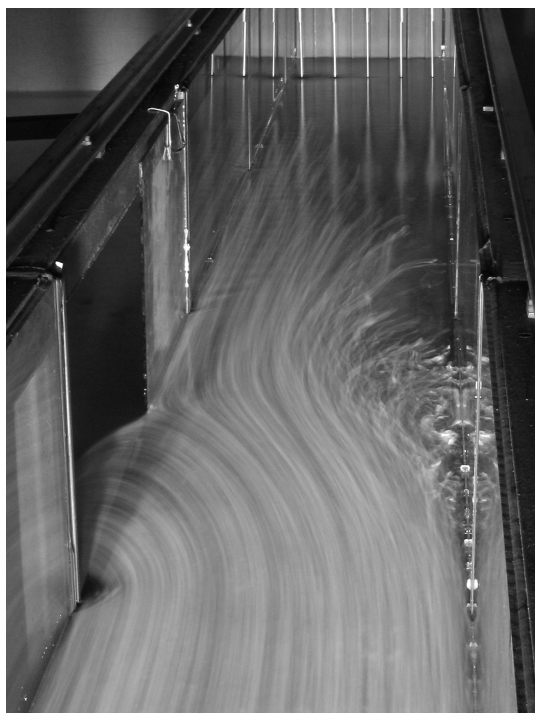
Seria2 – przelew B



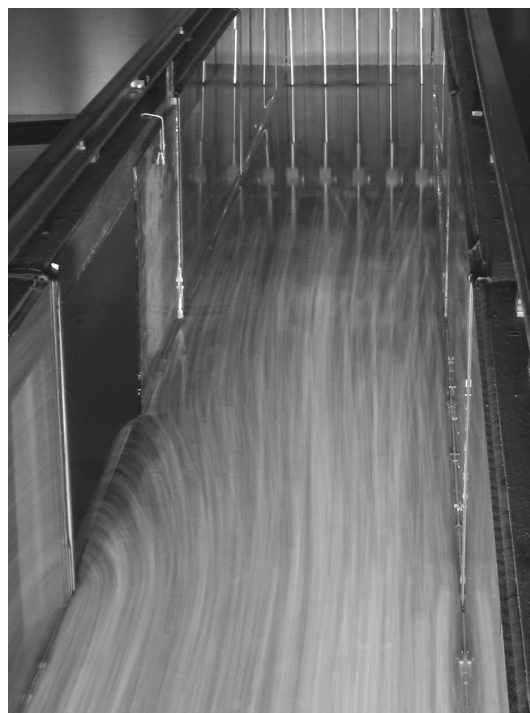
Seria4 – przelew B



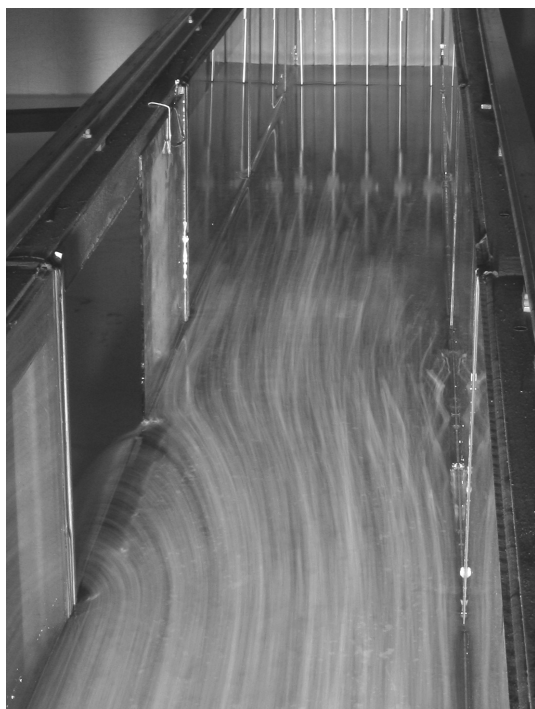
Seria5 – przelew B



Seria7 – przelew B



Seria6 – przelew B



Seria8 – przelew B



Seria9 – przelew A



Seria10 – przelew A



Seria9 – przelew B



Seria 10 – przelew B



Seria 11 – przelew A



Seria12 – przelew A



Seria11 – przelew B



Seria12 – przelew B



Seria13 – przelew A



Seria14 – przelew A



Seria13 – przelew B



Seria14 – przelew B



Seria15 – przelew A



Seria16 – przelew A



Seria15 – przelew B



Seria 16 – przelew B



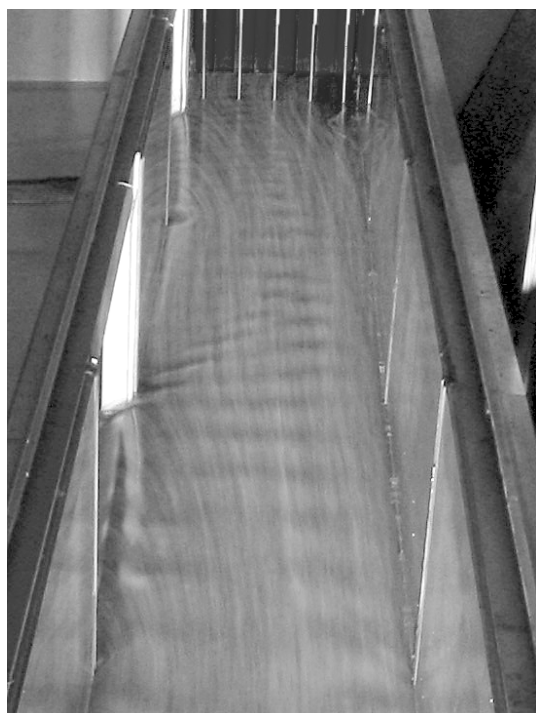
Seria17 – przelew A



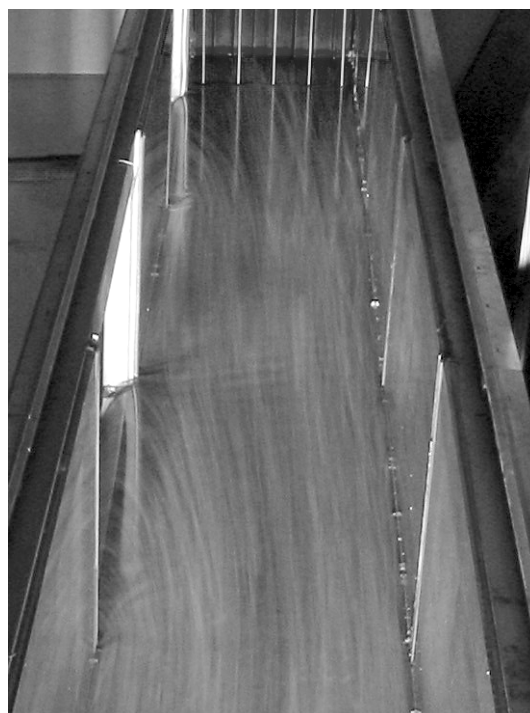
Seria18 – przelew B



Seria17 – przelewy B i C



Seria 18 – przelewy B i C



Seria19 – przelew A



Seria20 przelew A



Seria 19 – przelew B i C



Seria 20 – przelew B i C



Seria21 – przelew A



Seria22 – przelew A



Seria 21 – przelew B i C



Seria 22 – przelew B i C



Seria23 – przelew A



Seria24 – przelew A



Seria 23 – przelew B i C



Seria 24 – przelew B i C

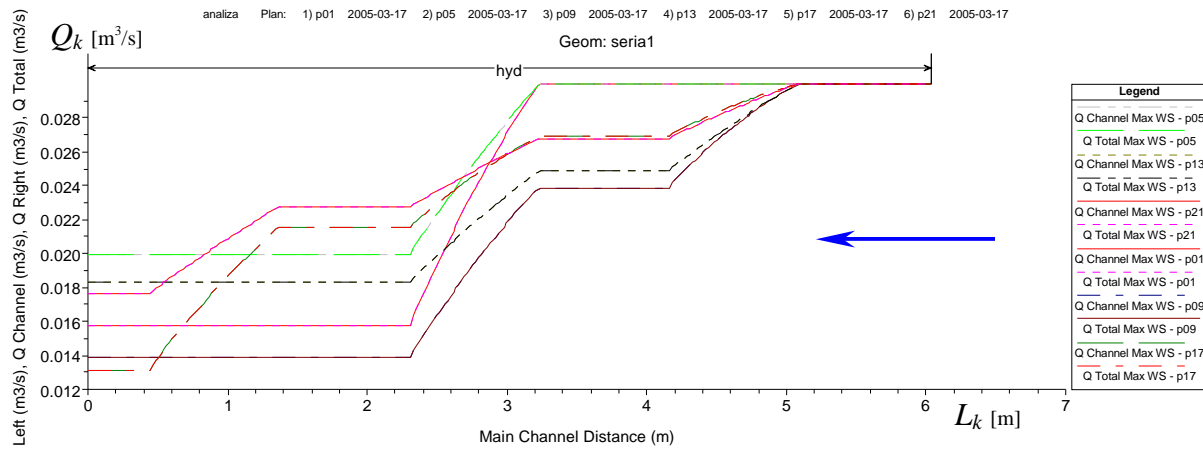


Zestawienie wyników obliczeń
przeprowadzonych przy użyciu programu Hec-Ras

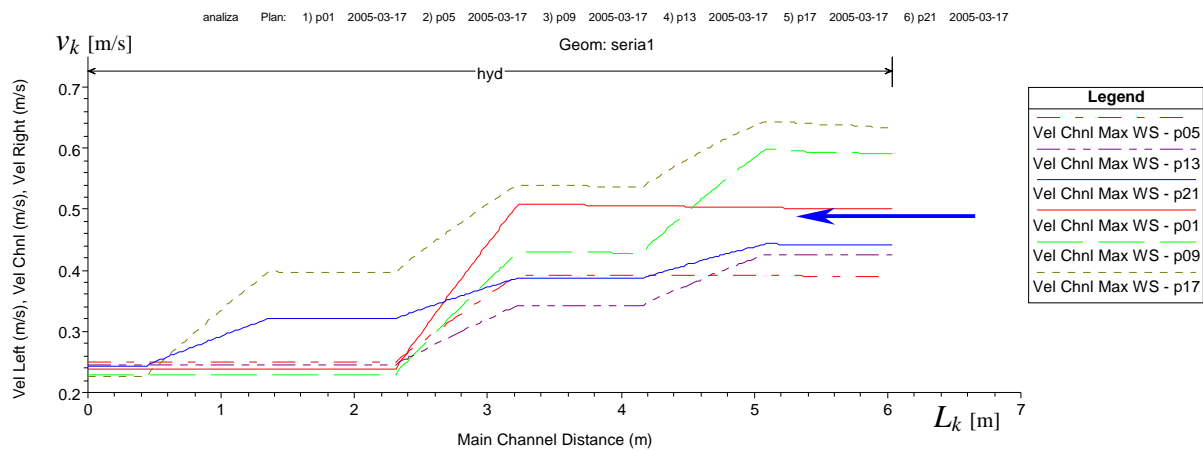


Porównanie wyników symulacji dla serii: 1, 5, 9, 13, 17 i 21

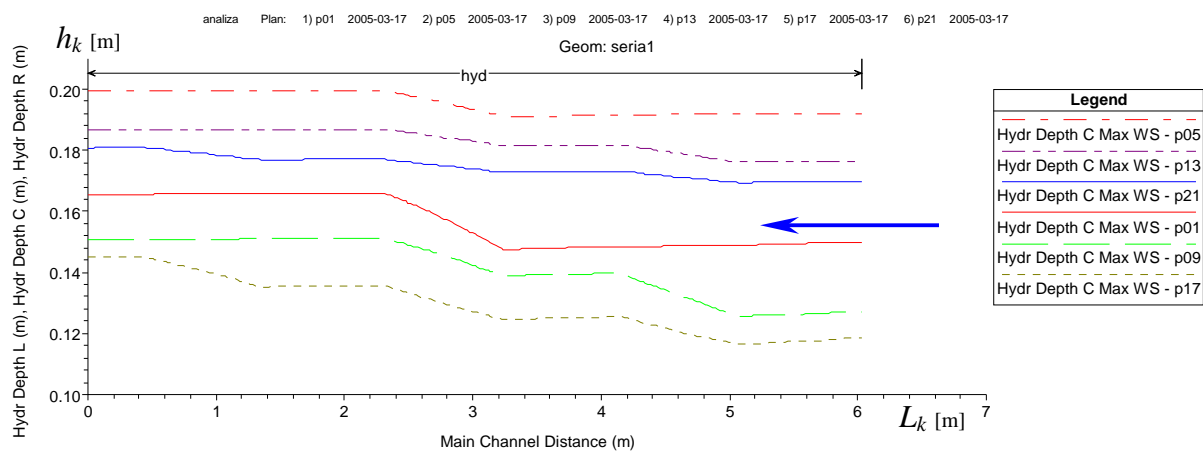
Natężenie przepływu w korycie głównym



Prędkość przepływu w korycie głównym

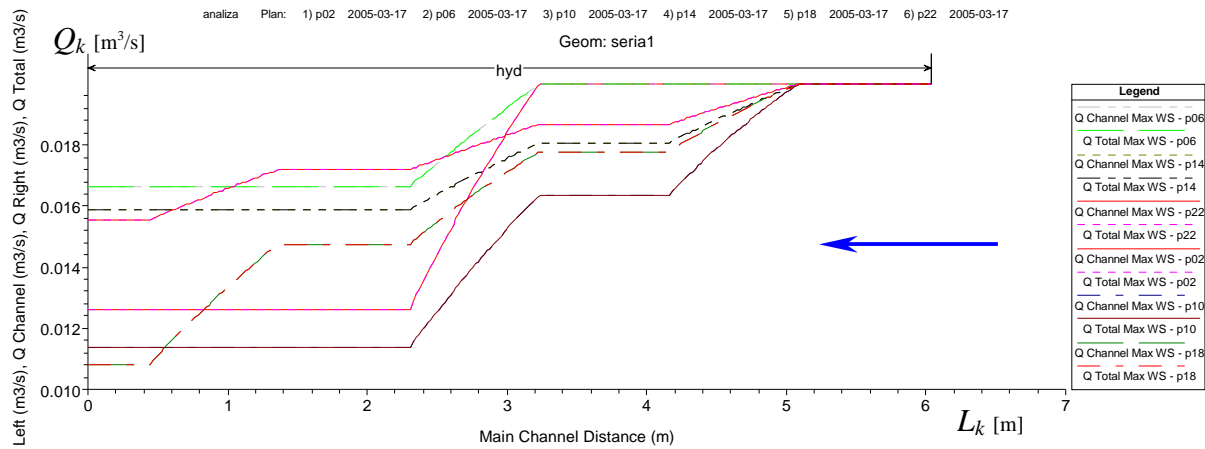


Głębokość w korycie głównym

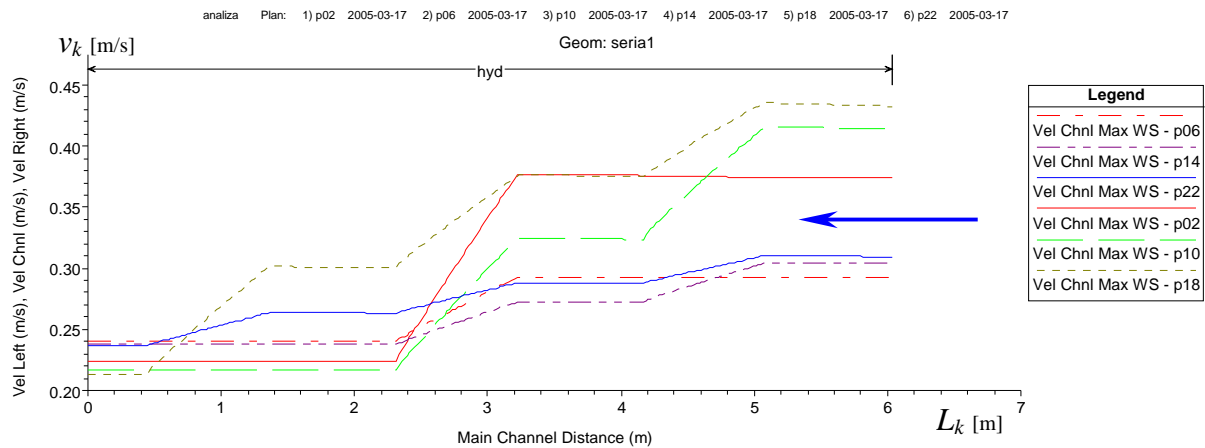


Porównanie wyników symulacji dla serii: 2, 6, 10, 14, 18 i 22

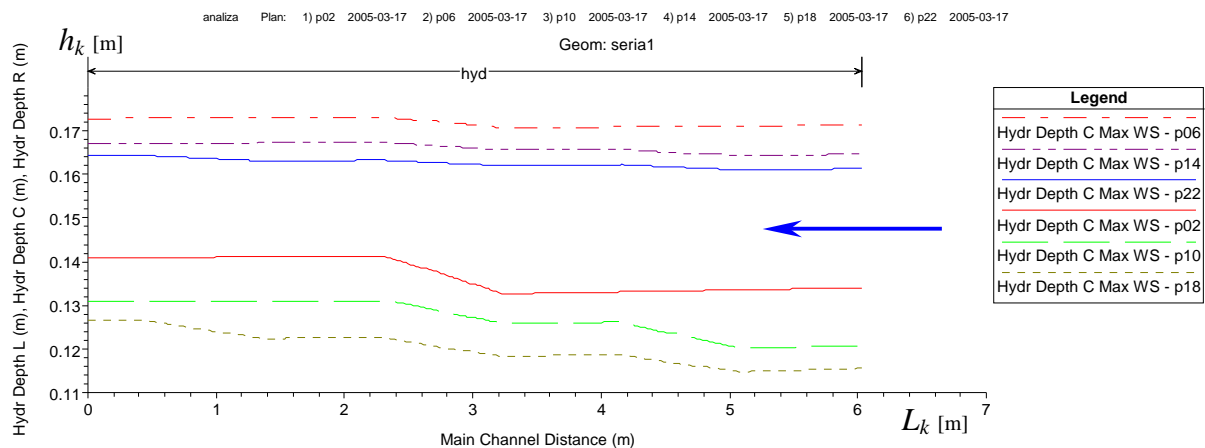
Natężenie przepływu w korycie głównym



Prędkość przepływu w korycie głównym

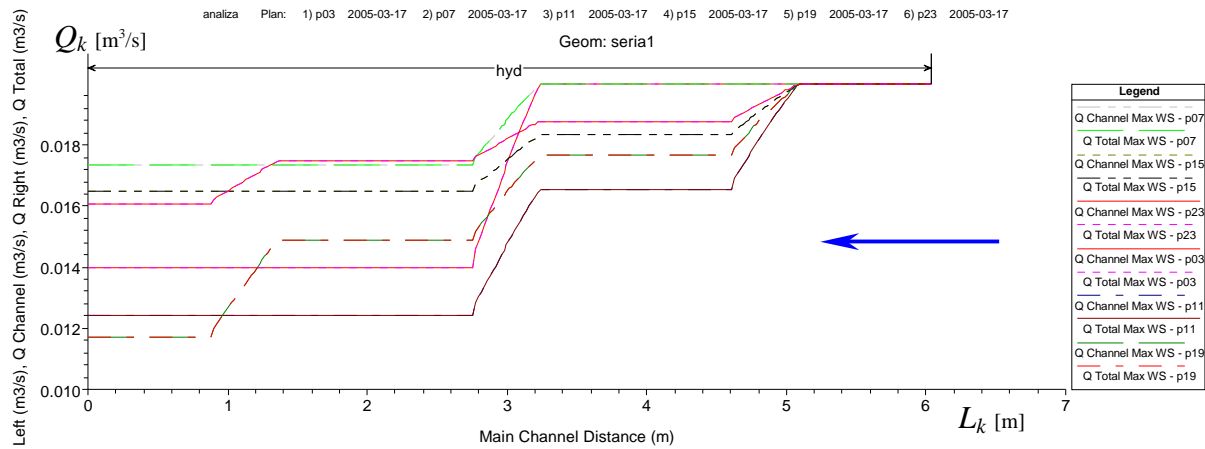


Głębokość w korycie głównym

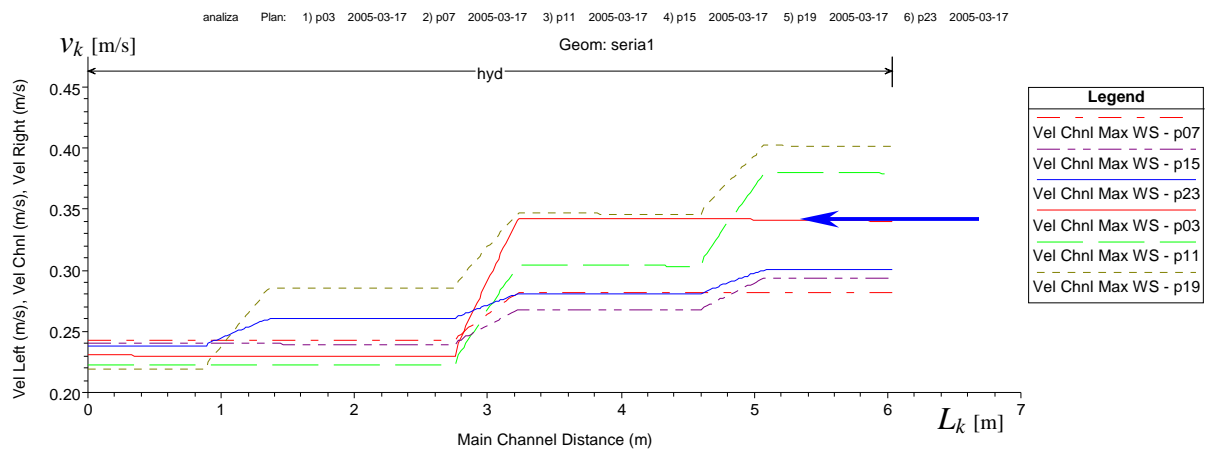


Porównanie wyników symulacji dla serii: 3, 7, 11, 15, 19 i 23

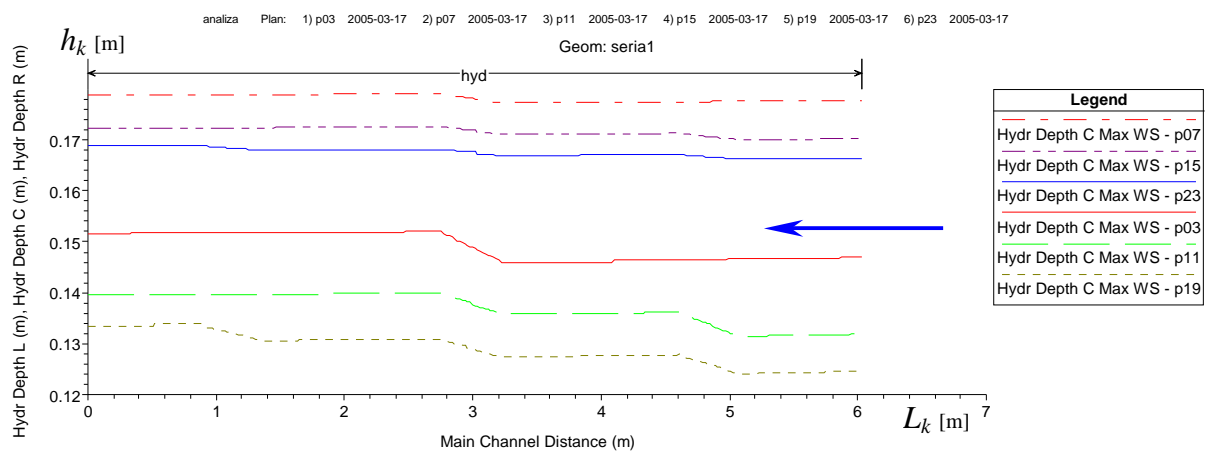
Natężenie przepływu w korycie głównym



Prędkość przepływu w korycie głównym

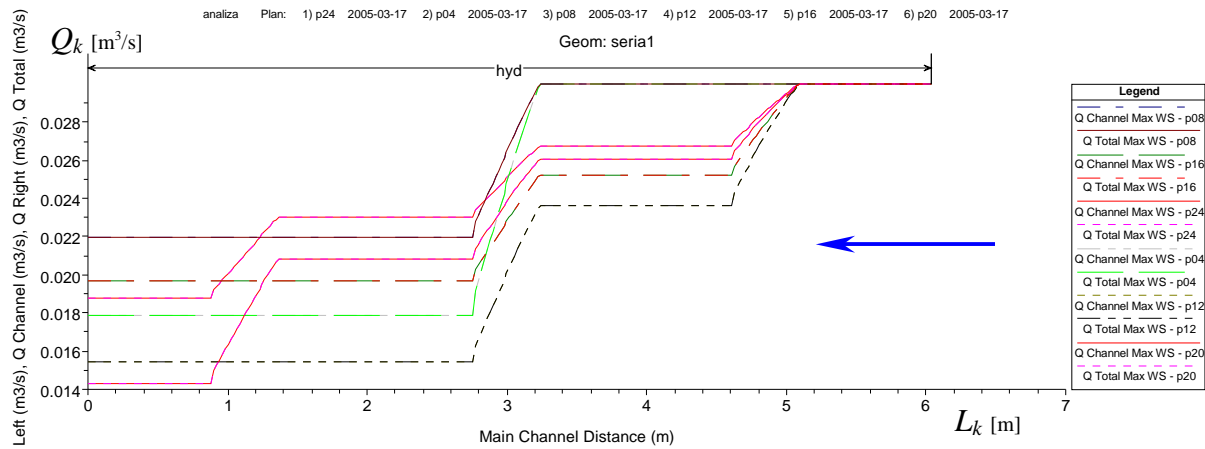


Głębokość w korycie głównym

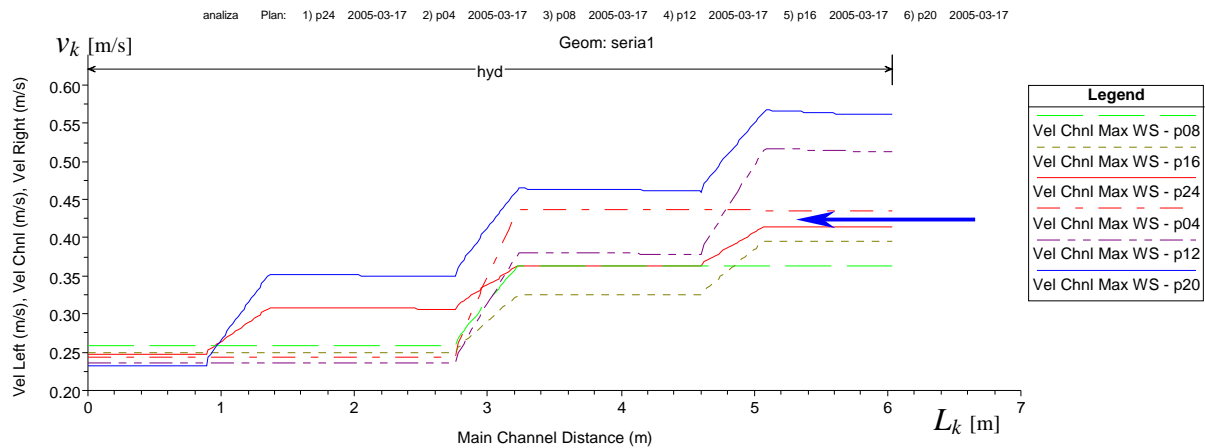


Porównanie wyników symulacji dla serii: 4, 8, 12, 16, 20 i 24

Natężenie przepływu w korycie głównym



Prędkość przepływu w korycie głównym



Głębokość w korycie głównym

