



# Przeptywy środowiskowe

Hydrauliczne metody wyznaczania przepływu środowiskowego



**Dr hab. inż. Leszek Książek, prof. URK**

Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki

Warszawa, 28 listopad 2023 r.

## 1. Wprowadzenie

---

### Stan obecny

Prawo Wodne z 20.07.2017 r. (Dz.U. 2017 poz. 1566, art. 403, 409) - **przepływ nienaruszalny** jednym z podstawowych elementów wydawanych pozwoleń wodnoprawnych.

Przepływ nienaruszalny - ilość wody [ $m^3s^{-1}$ ], która powinna być utrzymywana jako minimum w danym przekroju poprzecznym rzeki ze względów biologicznych i społecznych (Kostrzewa); ilość wody wyrażona, którą należy pozostawić w danym przekroju poprzecznym rzeki ze względów ochrony środowiska naturalnego (Florkowski), graniczna wartość przepływu rzecznoego, poniżej której przepływy wody w rzekach nie powinny być zmniejszane na skutek działalności człowieka (poradnik IMGW).

### Stan przyszły

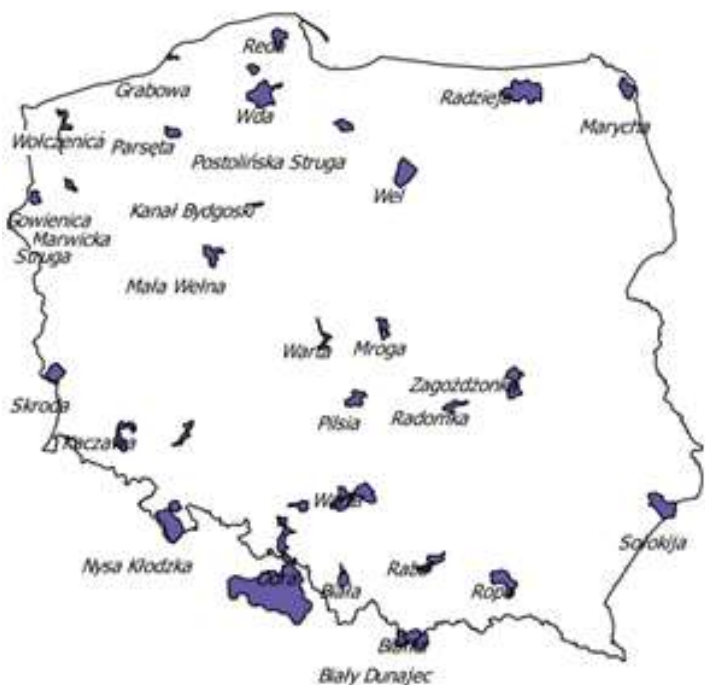
**Przepływy środowiskowe** mają w kolejnym (III) cyklu planistycznym zastąpić przepływy nienaruszalne.

Obliczenia przepływu środowiskowego w Polsce prowadzone były w zlewniach o powierzchni od  $3,62 \text{ km}^2$  do  $28\,000 \text{ km}^2$  [Piniewski i in. 2010, Wałęga i in, 2015, Młyński i in., 2015].

# 1. Wprowadzenie



Wdrożenie metody szacowania przepływów środowiskowych w Polsce



Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Uniwersytet  
 Przyrodniczy w Poznaniu, Uniwersytet Przyrodniczy we  
 Wrocławiu, SGGW w Warszawie, Politechnika Gdańska

# Rzeka Skawa



Przestrzenne zróżnicowanie warunków przepływu wody



zróżnicowanie warunków siedliskowych

Siedlisko (mesohabitat) to miejsce gdzie organizmy wodne prowadzą kolejne etapy życia

## 1. Wprowadzenie

**Przepływ środowiskowy** - przepływ [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ] zapewniający zaspokojenie potrzeb wodnych zarówno ekosystemów wodnych jak i od wód zależnych.

Część naturalnych przepływów, która powinna być pozostawiona w cieku oraz na terenach zalewowych w celu utrzymania wysokich walorów ekosystemów wodnych i od wody zależnych [Tharme 2003]:

- **przepływ korytowy,**
- **przepływ pozakorytowy**

Przepływy środowiskowe są zmienne w ciągu roku w zależności od struktur i faz rozwoju życia biologicznego.

Rzeki z tarłem jesiennym ryb łososiowatych

Miesiąc	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Ryby	zimowanie		tarło wiosenne				żerowanie			tarło jesienne		
Makrozoobentos						wzrost wiosenny				wzrost jesienny		



## 1. Wprowadzenie

---

**Metody hydrologiczne** - najprostsze oraz łatwe w użyciu (ok. 30% wszystkich metod), gdzie wielkość EF uzależniona jest od przepływu charakterystycznego,

**Metody hydrauliczne** - wykorzystują zależności ilościowe i jakościowe pomiędzy siedliskami dla ryb i przepływem (ok. 11 % metod),

**Metody symulacji siedlisk** (ok. 28% metod) - wynikiem są zależności siedlisko-przepływ dla organizmów z uwzględnieniem czasu (interakcji pomiędzy strumieniem wody a budową koryta),

**Metody holistyczne** (ok. 8 % metod) - strategie, które wykorzystują parametry hydrologiczne, hydrauliczne, ekologiczne, hydromorfologiczne, jakości wody oraz socjalne; zakładają wybór ekosystemów/gatunków, których potrzeby wodne będą brane pod uwagę,

### Inne.

Kryteria wyboru metody określania przepływu środowiskowego obejmują: reżim przepływu (obecność budowli piętrzącej, swobodny bieg rzeki), typ rzeki (np. naturalna, silnie zmieniona lub sztuczna), dostępność informacji, ograniczenia czasowe oraz finansowe a także wymagania prawne, w ramach których należy ustalić przepływ środowiskowy [Piniewski i in. 2010, 2011]

# 1. Wprowadzenie

## Metody hydrologiczne

- Kostrzewy;  $Q_n = k \cdot SNQ$
- Tennant'a; 10% SSQ - krótkoterminowe przeżycie ryb, 30% SSQ – odpowiedni stan siedlisk, 60% SSQ – optymalne zachowanie siedlisk
- Tessman; uwzględnia naturalną zmienność przepływów w ciągu roku; relacja przepływów średnich miesięcznych ( $SSQ_{mc}$ ) do średnich dla wielolecia SSQ,
- Kostrzewy wg kryterium rybacko wędkarskiego;  $minSNQ_m$  w bioperiodach tarła, rozrodu, wzrostu oraz  $minNNQ_{m_{XII-II}}$
- małopolska;  $Q_n = 0,5(NNQ_m + SNQ_m) + K(SNQ_m - NNQ_m)$
- NFOŚiGW;  $Q_n = SNQ$
- krzywych czasu przewyższenia przepływu;  $Q_n = Q_{95\%}$ ,  $Q_n = Q_{90\%}$ ,  $Q_n = Q_{50\%}$
- przepływów minimalnych średnich 7-dniowych o okresie powtarzalności 10 lat
- dynamiczne; 30% przepływu dobowego,
- KZGW; bioperiody: tarło wiosenne, żerowisko, tarło jesienne oraz zimowanie; zlewnia kontrolowana  $Q_{EF} = p_b \cdot SNQ_{bio}$ , zlewnia niekontrolowana  $Q_{EF} = p \cdot SNQ$

# 1. Wprowadzenie

---

## Metody hydrauliczne

**Metoda obwodu zwilżonego (WPM, Wetted Perimeter Method)**

**Metoda korytarza migracji (CRA, Critical Riffle Analysis)**

**Metoda wymagań siedliskowych**



# 1. Wprowadzenie

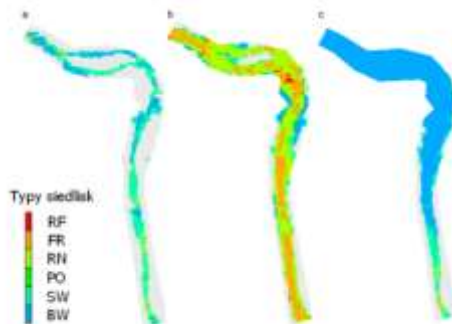
## Metody symulacji siedlisk

**PHABSIM Physical Habitat Simulation;**  
zależność powierzchni użytecznego  
siedliska od przepływu

**MesoHABSIM Instream Habitat Simulation at River Scale (w  
skali zlewni)**

**MEM Mesohabitat Evaluation Model**

**Computer Aided Simulation Model for Instream Flow and  
Riparia CASiMiR**



Rys. 2. Przestrzenny rozkład typów siedlisk dla przepływu a -  $Q = 2,64 \text{ m}^3/\text{s}$  bez efektu pojemności wody, b -  $Q = 136 \text{ m}^3/\text{s}$  bez efektu pojemności, c -  $Q = 2,64 \text{ m}^3/\text{s}$  z efektem pojemności wody za zbiornika (rozważenia w tekście)

Książek L, Bartnik W., 2009, Wykorzystanie warunków hydraulicznych do oceny typów siedlisk w korycie rzeczonym. Nauk Przyr Technol, 3:1-8

# 1. Wprowadzenie

---

## Metody holistyczne

**DRIFT (Downstream Response to Imposed Flow Transformations) wymagany przepływ dla środowiska rzeki**



Źródło: [www.drift-eflows.com](http://www.drift-eflows.com)

**BBM (Building Block Methodology)**

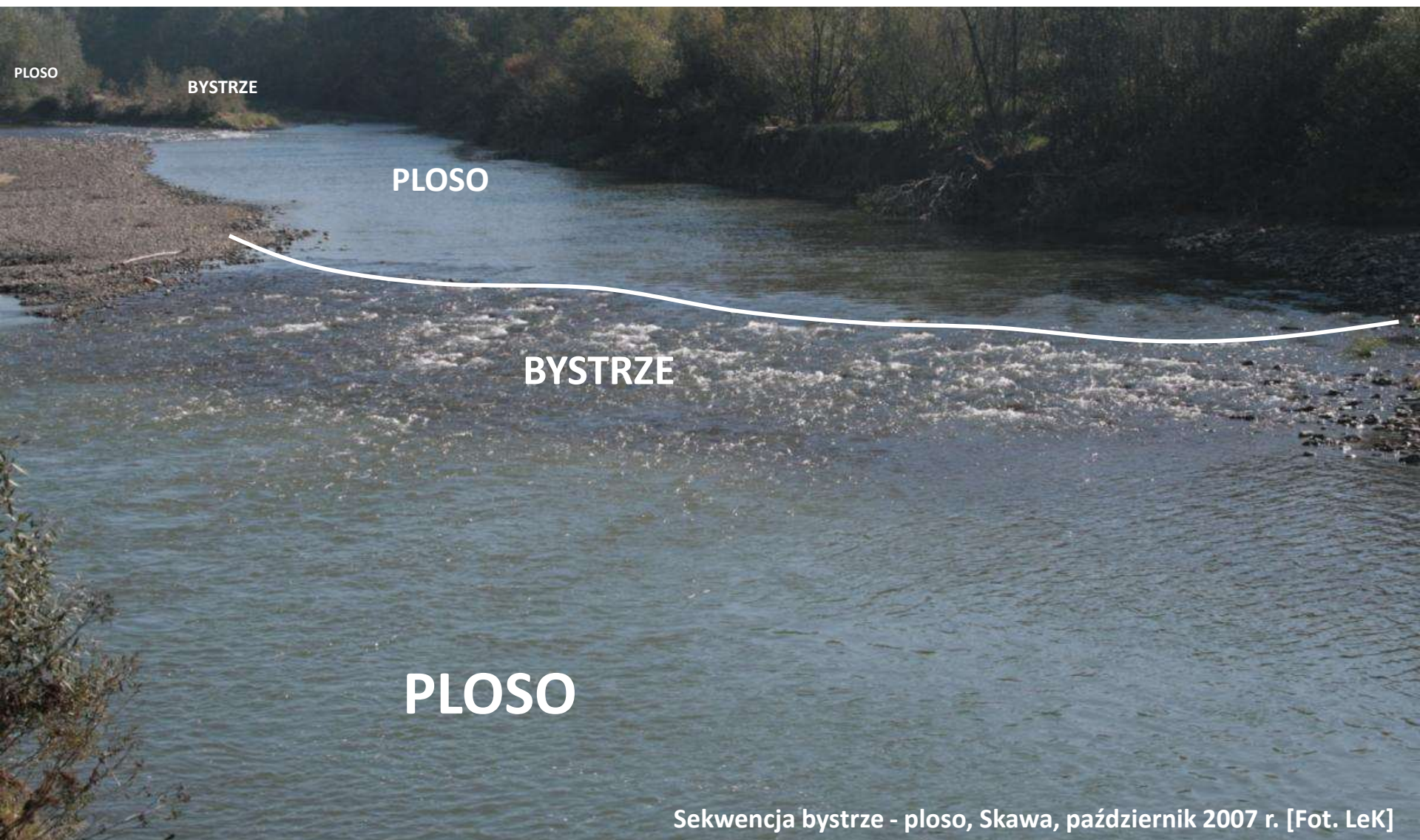
## 2. Metody hydrauliczne

---

Metody hydrauliczne - analizie poddaje się wpływ zwiększania się przepływu na siedliska dla organizmów wodnych na etapach kluczowych dla ich życia: migracja, rozród, żerowanie.

Metoda hydrauliczna opiera się na relacjach pomiędzy parametrami hydraulicznymi, np. obwód zwilżony lub głębokość średnia/maksymalna, a wielkością przepływu w rzece.

## 2. Metody hydrauliczne



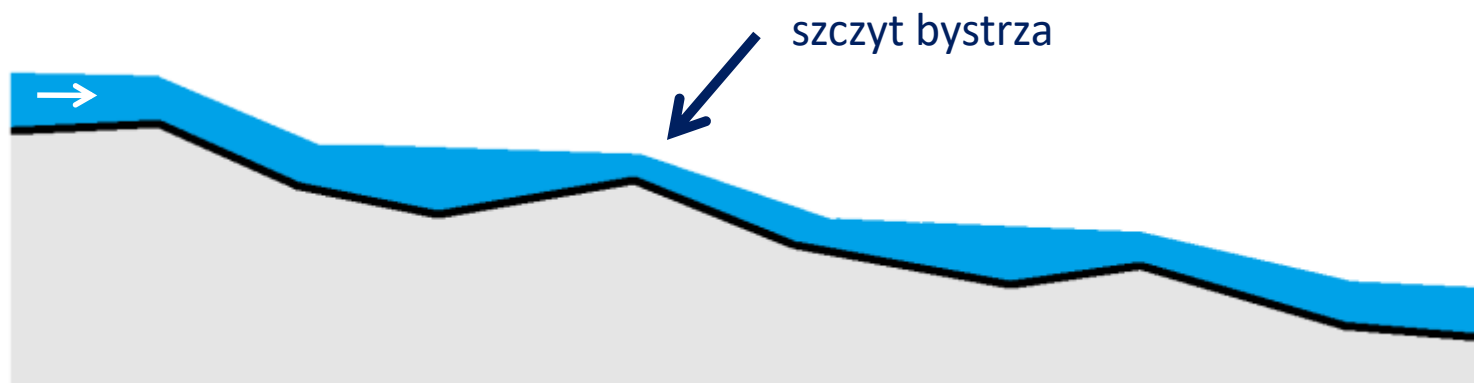
Sekwencja bystrze - plosa, Skawa, październik 2007 r. [Fot. LeK]

## 2. Metody hydrauliczne

Parametry hydrauliczne wykorzystywane do obliczania przepływu środowiskowego mierzymy w charakterystycznych dla układu pionowego przekrojach poprzecznych.

Dla zachowania ciągłości przepływu przekrojem krytycznym jest przekrój w punkcie załamania układu pionowego dna zlokalizowanego na bystrzu.

Przepływ środowiskowy na bystrzu pozwala na zachowanie wystarczających warunków przepływu dla pozostałych siedlisk.



## 2. Metody hydrauliczne

Równanie przepływu wody w korytach otwartych

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot I_e^{1/2} \cdot F$$

$Q$  – natężenie przepływu [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

$I$  – spadek hydrauliczny ( $I=I_e$ )

$n$  – współczynnik szorstkości

$R_h$  – promień hydrauliczny  $R_h=F/O_z$

$F$  – pole powierzchni przekroju poprzecznego

$O_z$  – obwód zwilżony



## 2. Metody hydrauliczne

### 2.1 Metoda obwodu zwilżonego

Najpopularniejszą metodą jest **metoda obwodu zwilżonego** (wetted perimeter method): zależność pomiędzy obwodem zwilżonym w danym przekroju cieku a wielkością przepływu w odniesieniu do wymagań biologicznych (powierzchnia bystrza jako siedliska dla bezkręgowców).

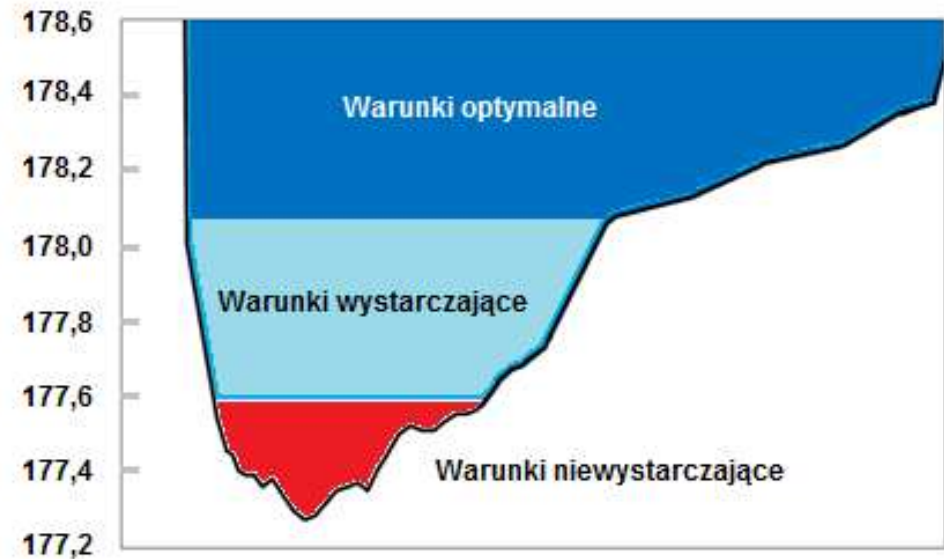
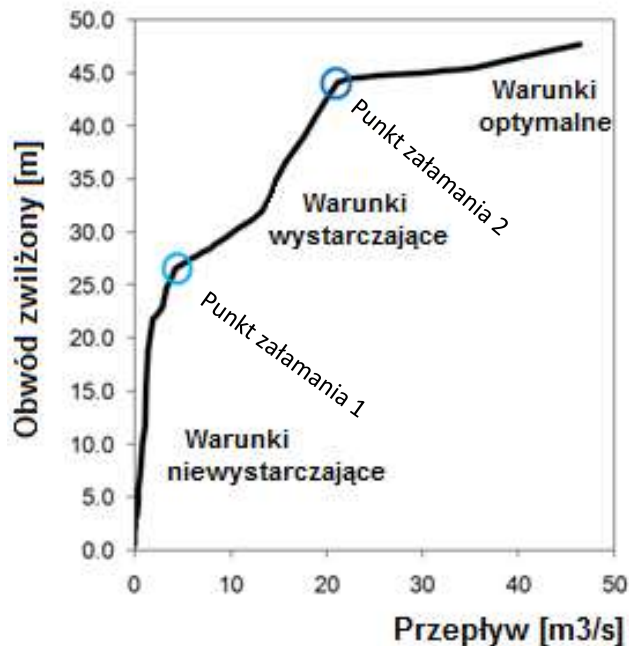
Obwód zwilżony definiuje się jako długość drogi kontaktu pomiędzy przekrojem poprzecznym a wodą ( $R_h \approx h$ ,  $O_z \approx b$ ).



## 2. Metody hydrauliczne

### 2.1 Metoda obwodu zwilżonego

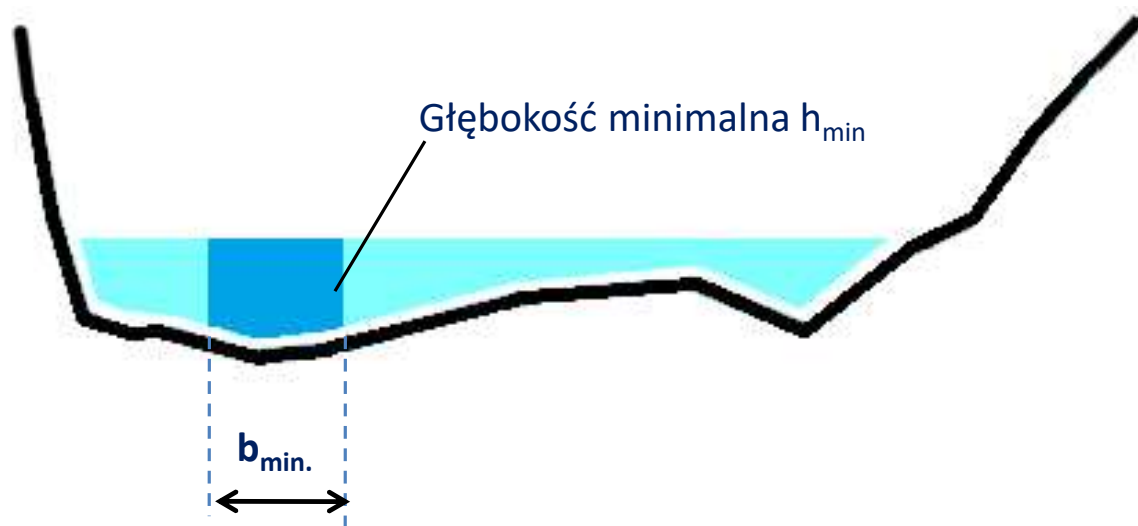
Identyfikacja punktów charakterystycznych zależności  $O_z=f(Q)$



Bovee K.D., Milhous R., 1978, Hydraulic simulation in instream flow studies: Theory and techniques, Instream Flow Inf. Paper 5, US Fisheries and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33, Fort Collins, Gippel, Ch.J., Stewardson, M.J. 1998. Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows, Regulated Rivers: Research & Management 14: 53-67

## 2. Metody hydrauliczne

### 2.2 Metoda hydrauliczna głębokości i szerokości krytycznej



Warunki siedliskowe dla  
pstrąga potokowego

Migracja

Głębokość (m)  
 $h_{migr. min}$

0.4

Warunek szerokości strugi wody

SSQ [ $m^3s^{-1}$ ]

$b_{SSQ}$  [m]

$0,25 \times b_{SSQ}$  [m]

## 2. Metody hydrauliczne

### 2.3 Metoda wymagań siedliskowych ichtiofauny

Parametry przepływu wody odpowiadające warunkom siedliskowym.

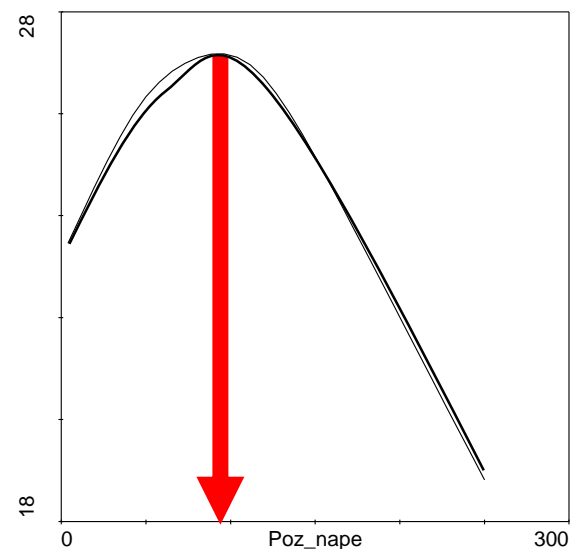
Gatunek referencyjny: pstrąg potokowy (*Salmo trutta fario*)

Warunki siedliskowe dla pstrąga potokowego

Rozmnażanie (tarło)

Głębokość (m) $h_{\text{rozm. min.}} - h_{\text{rozm. max}}$	Prędkość ( $\text{ms}^{-1}$ ) $v_{\text{rozm. min.}} - v_{\text{rozm. max}}$
0.15 - 0.5	0.15 - 0.5

Uogólniony model - BMWP\_PL



## PRZYKŁAD OBLICZENIOWY



#### Odcinek badawczy - lokalizacja

Dorzecze: Wisła

RZGW: Kraków

Region wodny: Górna Wisła

**JCWP: Raba od zbiornika Dobczyce  
do Młynówki**

Kilometraż początku odcinka: 48+470

Powierzchnia zlewni odc.: 927,7 km<sup>2</sup>

Odcinek badawczy: L = 1690 m



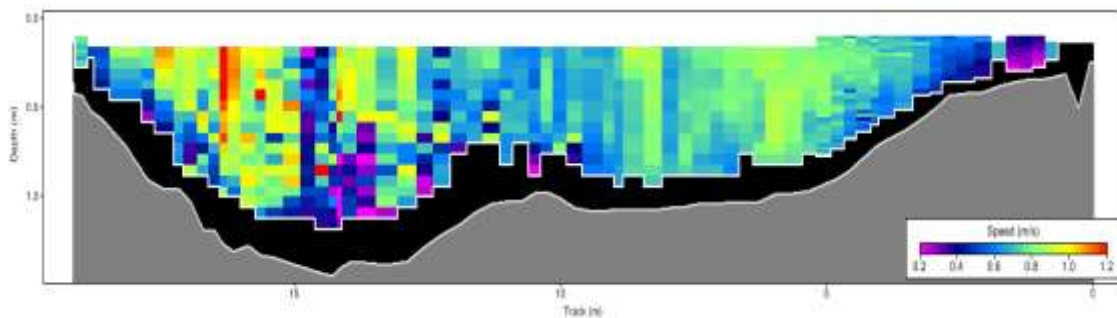


### 3. Pomiary terenowe

Przekrój poprzeczny (GPS RTK), pomiar natężenia przepływu (ADCP)



Fot. A.Woś



Data pomiaru: 05.09.2017 r.;  $Q = 4,21 \text{ m}^3/\text{s}$

**Zakres pomiarów terenowych:**

- natężenie przepływu,
- układ zwierciadła wody,
- przekrój poprzeczny,

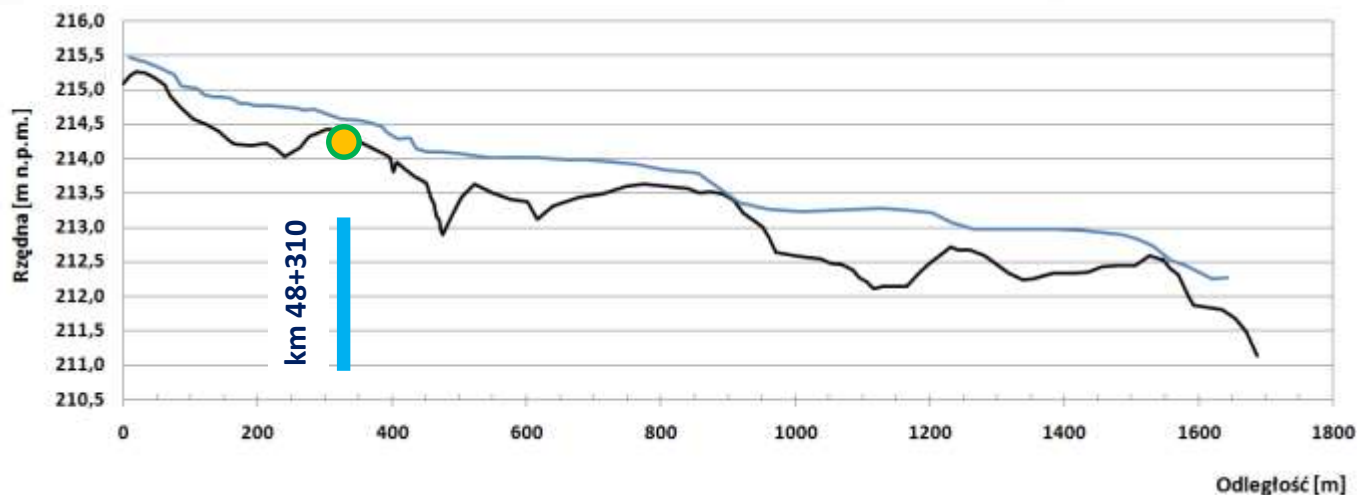


Fot. A.Woś



## Profil podłużny

## 3. Pomiary terenowe



## Układ zwierciadła wody

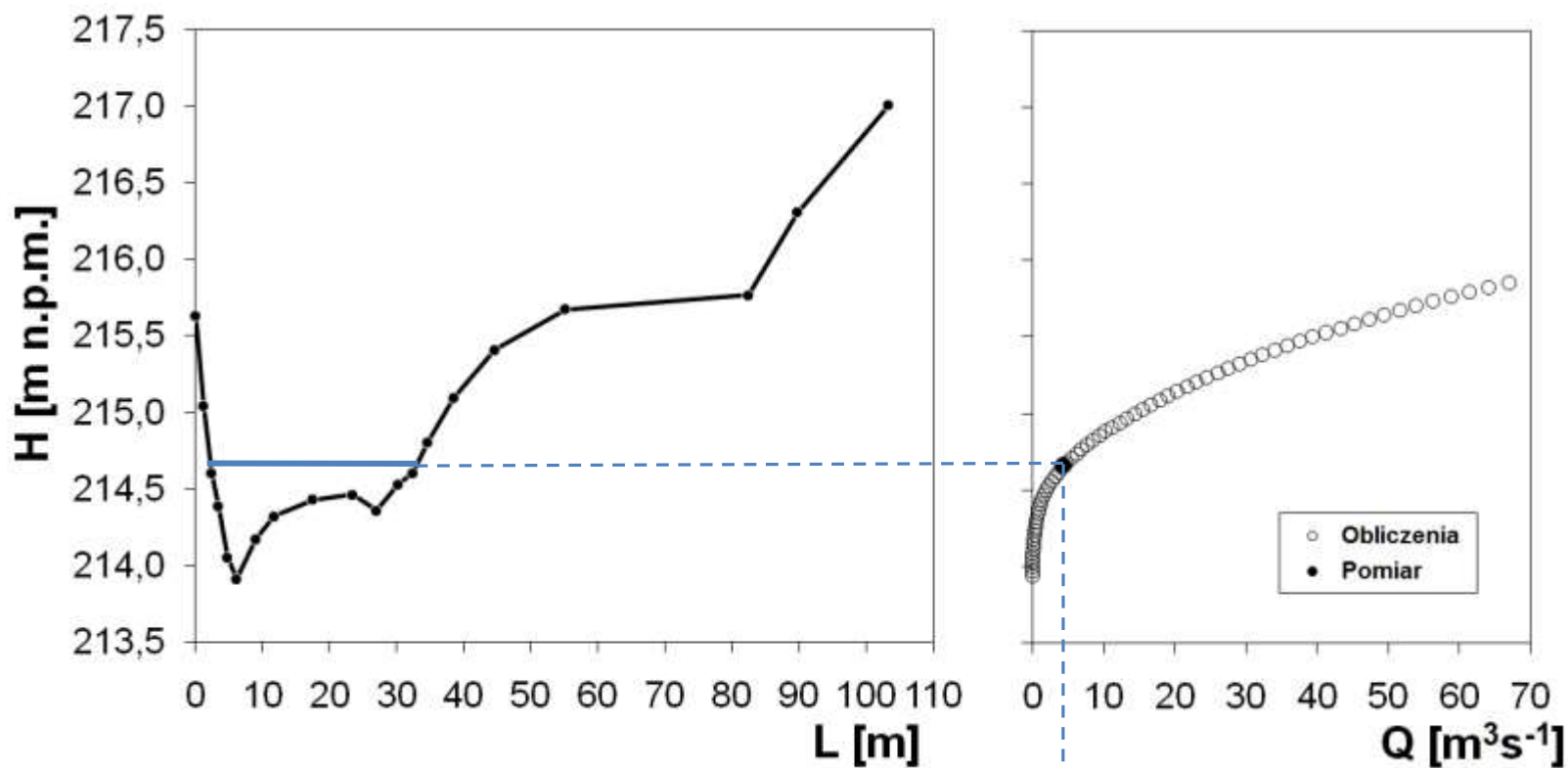
Przekrój	Kilometraż [km]	Rzędna zwierciadła wody [m n.p.m.]
1	48+470	215,46
2	48+335	214,87
<b>3</b>	<b>48+310</b>	<b>214,64</b>
4	48+120	214,41
5	47+875	214,03
6	47+610	213,52
7	47+285	213,12
8	46+985	212,74

Parametry przepływy, Raba km 48+310

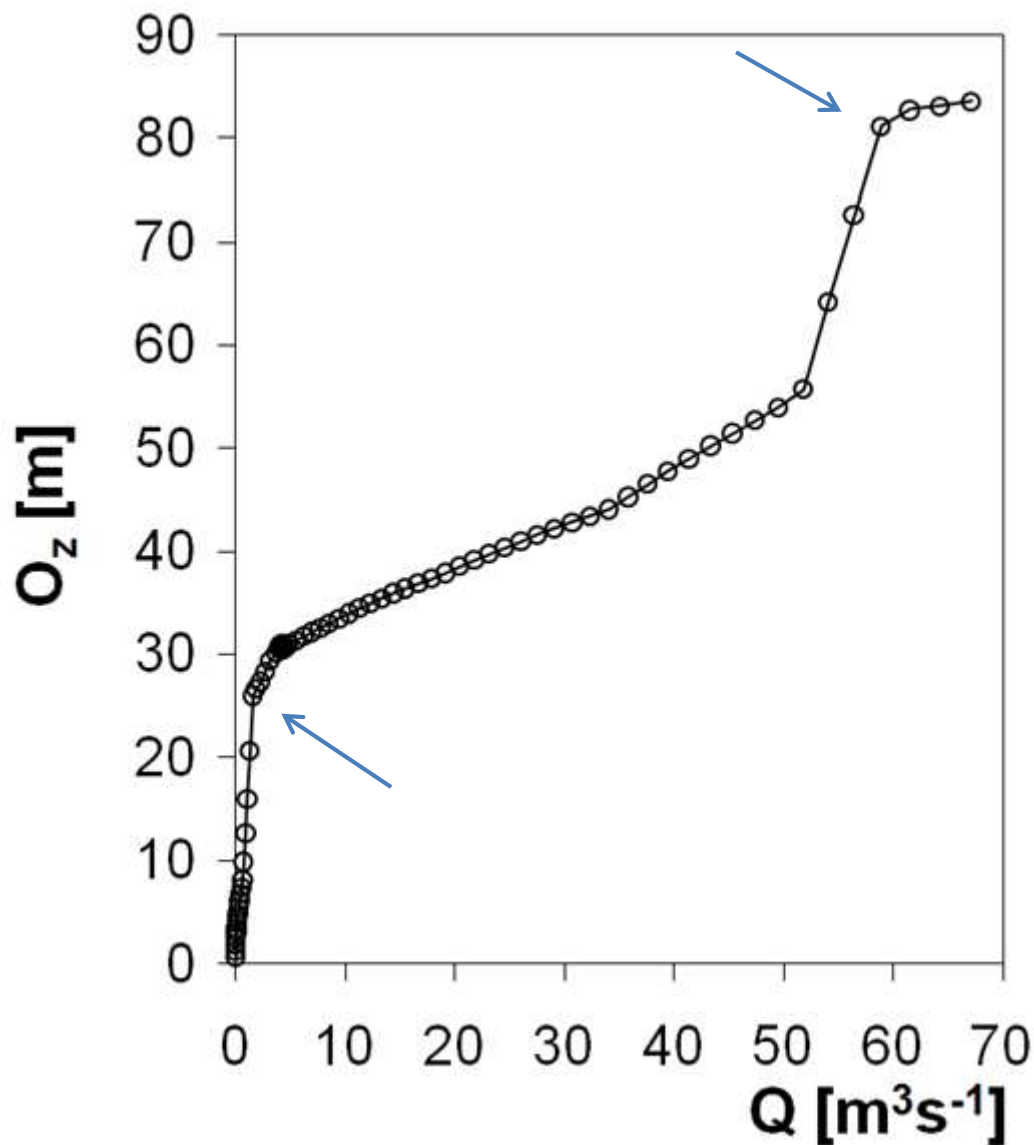
$I_{\text{śr}}$ [-]	$Q$ [m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	$R_h$ [m]	$F$ [m <sup>2</sup> ]	$O_z$ [m]	$n_{\text{śr}}$ [ms <sup>-1/3</sup> ]
0,0029	4,21	0,29	8,89	30,6	0,058

## 3. Pomiary terenowe

### Kalibracja krzywej przepływu, Raba km 48+310



$$Q_{05.09.2017} = 4,21 \text{ m}^3/\text{s}$$



### 4.1. Metoda obwodu zwilżonego

#### Zależność obwodu zwilżonego od przepływu, Raba km 48+310

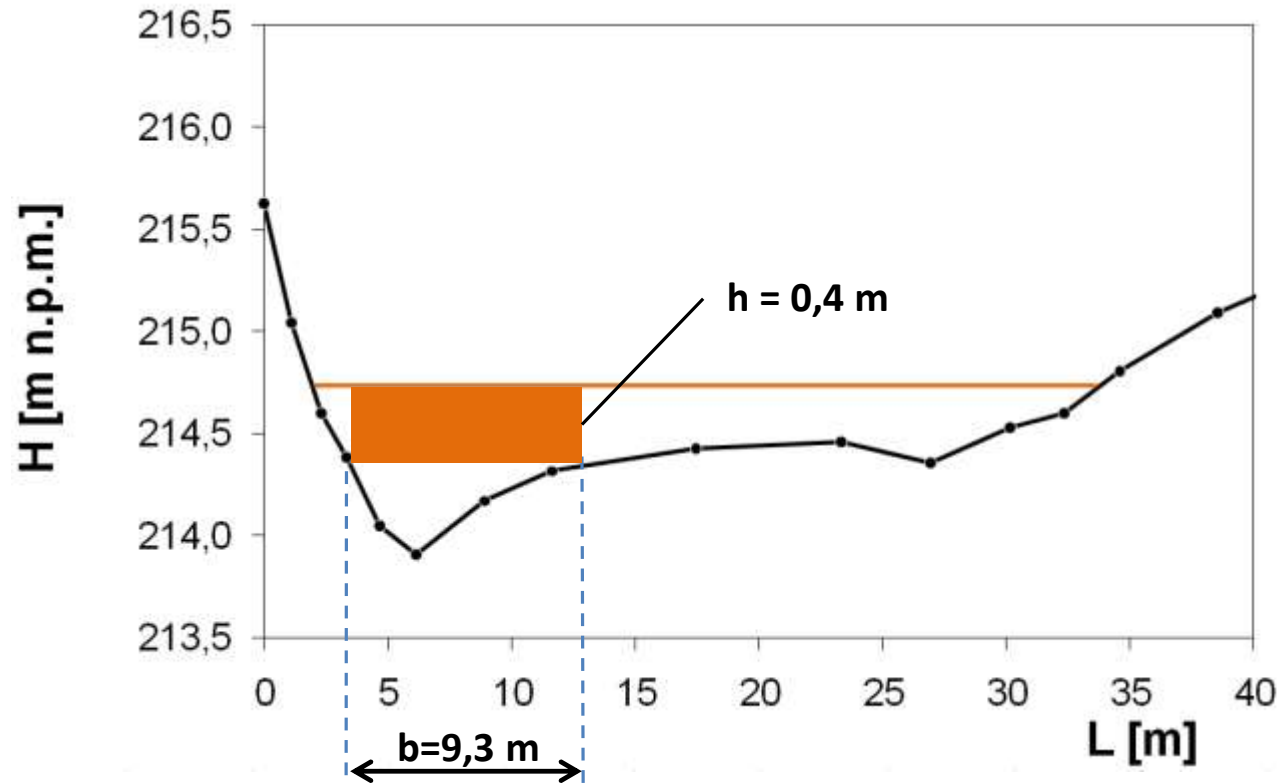
- **Punkt załamania 1;  $Q=1,53 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$**  ( $3,09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) przepływ, poniżej którego warunki siedliskowe dla bezkręgowców wodnych są niewystarczające
- **Punkt załamania 2;  $Q=58,83 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$**  przepływ, powyżej którego warunki siedliskowe są optymalne

Przepływy charakterystyczne i gwarantowane [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

NNQ	SNQ	SSQ	Q90%
0,30	3,53	11,45	3,34

## 4.2. Metoda głębokości i szerokości krytycznej

Parametry hydrauliczne przepływu wody, Raba km 48+310



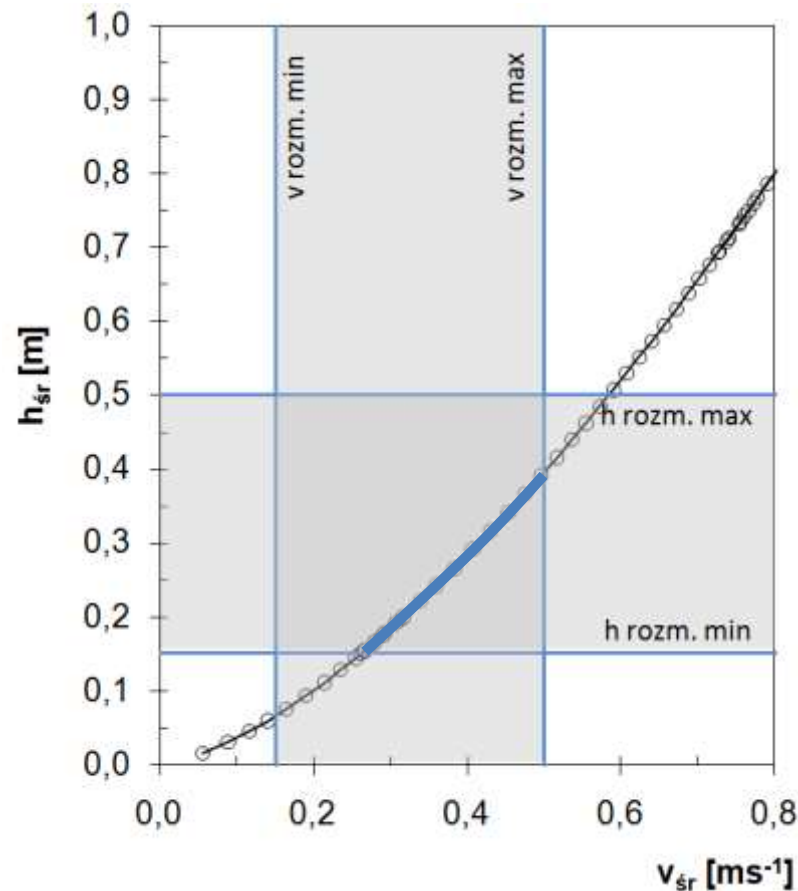
$Q_{\text{migr.}}$		
$h = 0,40$ m		
$Q$ [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]	$b$ [m]	$b$ [% $b_{\text{SSQ}}$ ]
6,38	31,9	86,1

Warunek szerokości strugi wody

SSQ [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]	$b_{\text{SSQ}}$ [m]	$0,25 \times b_{\text{SSQ}}$ [m]
11,45	37,1	9,3

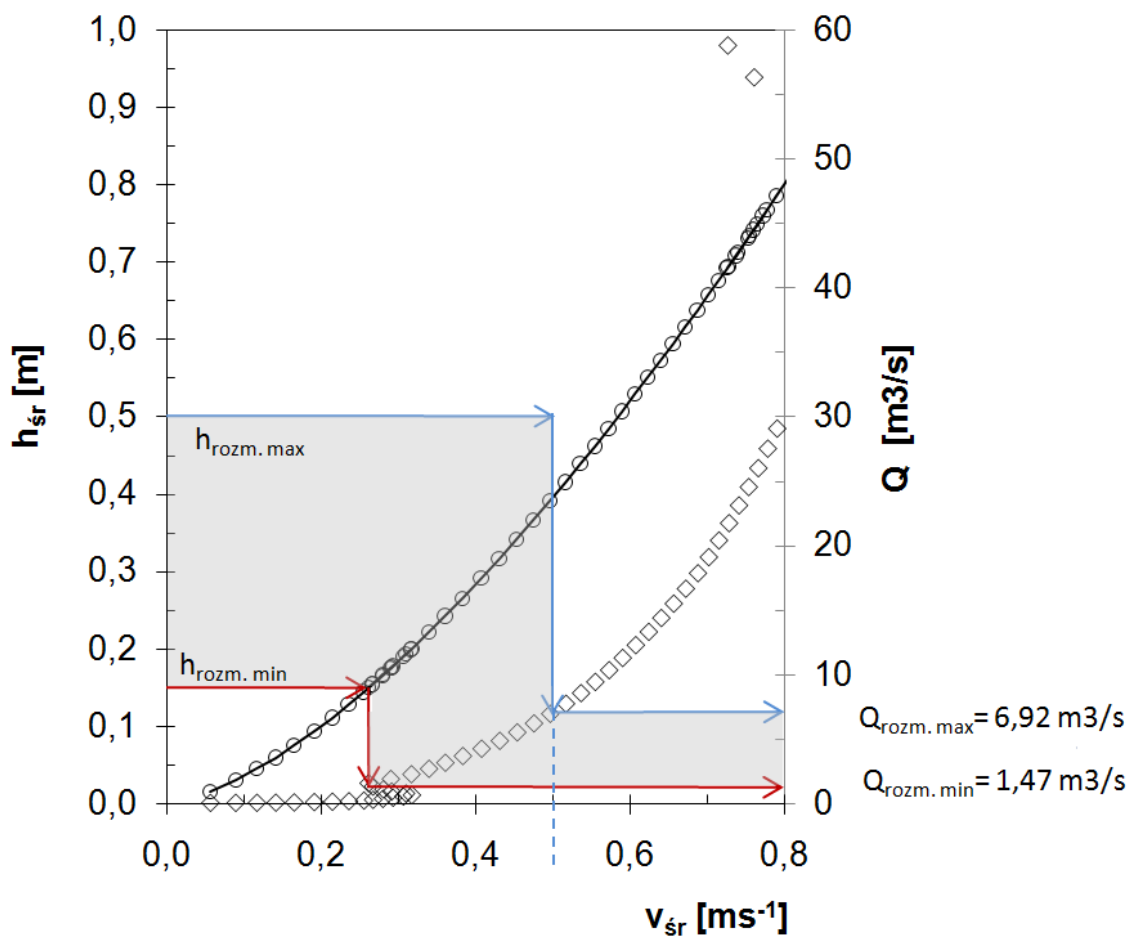
### 4.3. Metoda hydrauliczna wymagań siedliskowych ichtiofauny

Parametry przepływu wody odpowiadające warunkom siedliskowym dla pstrąga potokowego: rozmnażanie (tarło)



Parametry hydrauliczne przepływu wody, Raba km 48+310

### 4.3. Metoda hydrauliczna wymagań siedliskowych ichtiofauny



Przepływ dla zakresów wartości głębokości i prędkości, Raba km 48+310



## Zestawienie wyników, Raba km 48+310

## 4. Wyniki obliczeń

Potrzeby organizmów wodnych w różnych fazach rozwoju (bioperiody) [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

Przepływy kształtujące  
powierzchnię bystrza (metoda  
obwodu zwilżonego)

$Q_1$

1,53

Zakres przepływów dla tarła  
(metoda wymagań  
siedliskowych)

$Q_{\text{rozm. min}}$

1,47

$Q_{\text{rozm. max}}$

6,92

Minimalny przepływ dla  
migracji (metoda głębokości i  
szerokości krytycznej)

$Q_{\text{migr}}$

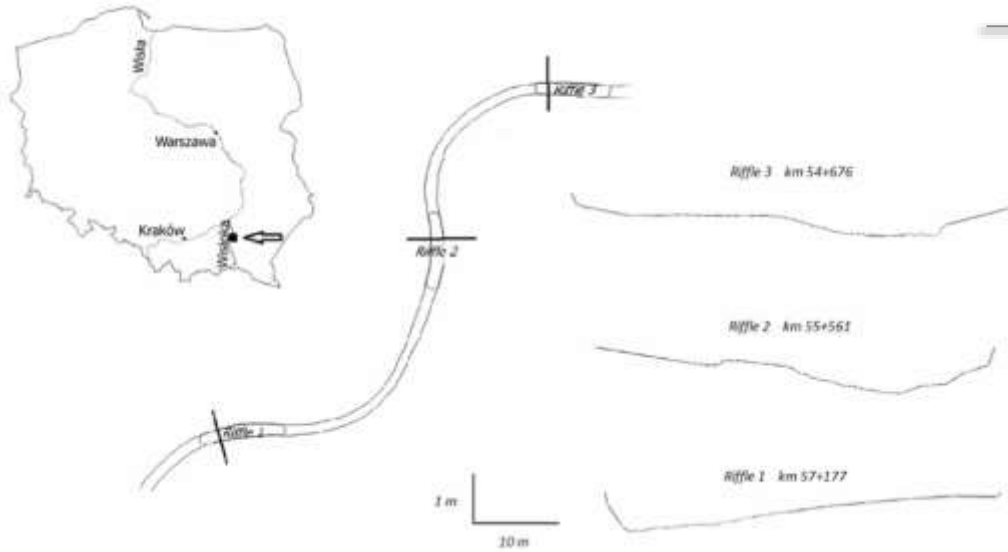
6,38

Miesiąc	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Ryby	zimowanie		tarło wiosenne				żerowanie			tarło jesienne		
Makrozoobentos					wzrost wiosenny			wzrost jesienny				

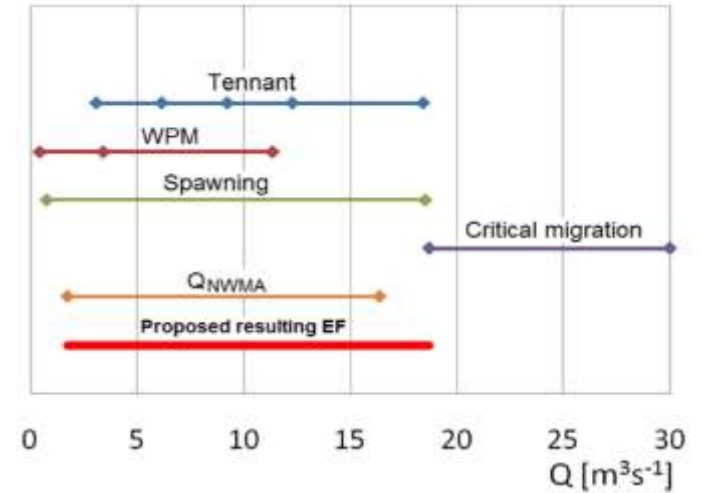
Przepływy charakterystyczne i gwarantowane [ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]

NNQ	SNQ	SSQ	Q50%	Q90%
0,30	3,53	11,45	7,26	3,34

## Rzeka Wisłoka

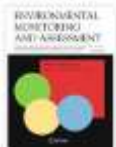
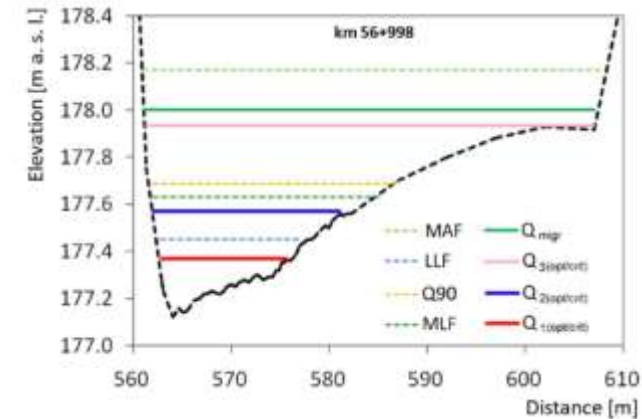


## 5.1. Przepływ środowiskowy



**Table 5** Environmental flow values from hydraulic methods: WPM and Habitat requirements method; b - percent of MAF flow width

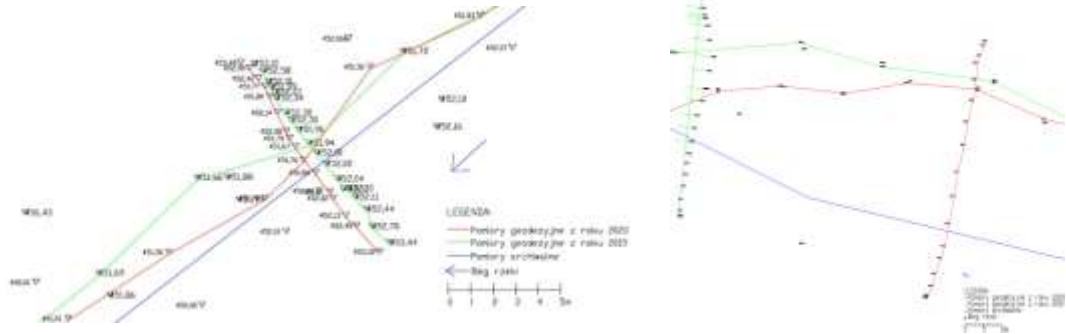
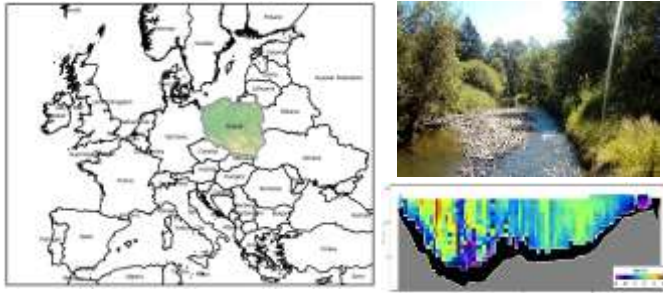
	Wetted Perimeter Method						Habitat requirements method				
	$Q_{1(crit)}$		$Q_{2(opt/crit)}$		$Q_{3(opt)}$		$Q_{spaw}$		$Q_{migr}$		
	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	b (%)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	b (%)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	b (%)	Q <sub>min</sub> -Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	b <sub>min</sub> - b <sub>max</sub> (%)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	b (%)	
Riffle 1	0.72	29	3.36	43	15.77	96	1.00-25.61	30-99	18.71	97.2	
Riffle 2	0.45	31	3.9	74	11.38	97	0.56-12.50	32-97	8.27	89.5	
Riffle 3	0.15	24	3.02	80	7.01	97	0.71-17.43	29-98	12.22	96.8	
Mean	0.44	28	3.43	66	11.39	97	0.76-18.51	31-98			



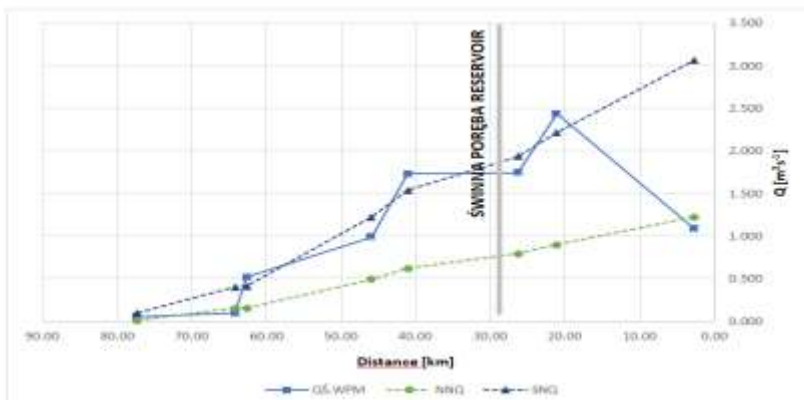
Książek, L., Woś, A., Florek, J., Wyrębek M., Młyński D., Wałęga A., 2019, Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisłoka River, Poland: case study. *Environ Monit Assess* 191, 254, 1-17, doi:10.1007/s10661-019-7402-7

## Rzeka Skawa

## 5.2. Przepływ środowiskowy – zmiany w czasie i przestrzeni



The riffle crests shift was noticed, i.e. upstream up to 73 m and downstream up to 15 m (average 19 m). In one case, the riffle crest retained its location.

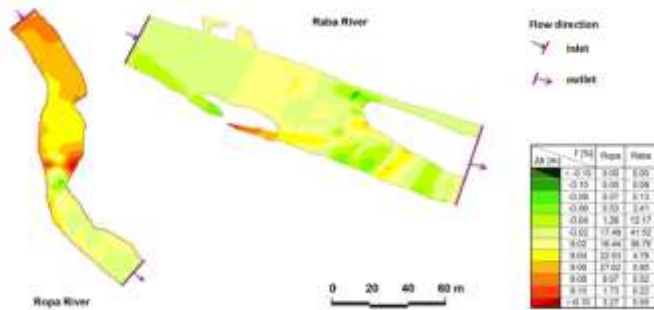
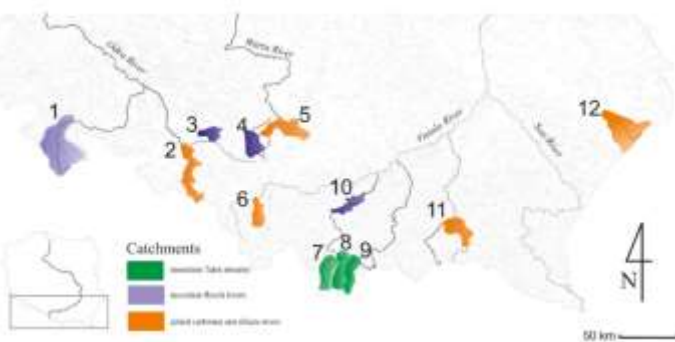


In the upper and middle course of The Skawa River (900 km<sup>2</sup>) the relationship  $EF_{WPM} = f(A)$  is described by the equation  $EF_{WPM} = 0.0027 \cdot A - 0.2128$ , ( $R^2 = 0.95$ ). In lower course, the relation  $EF_{WPM} = f(A)$  changes in to a decreasing trend.

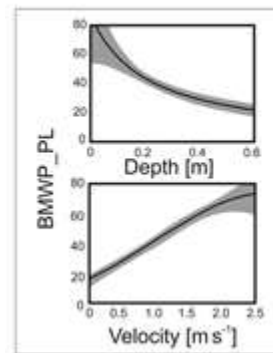
N o	Location	$EF_{WPM_{19}}$	$EF_{WPM_{20}}$	$EF_{WPM_{20}} / EF_{WPM_{19}}$
		[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]		[-]
1	Jordanów	0,054	0,052	96,7%
2	Bystra	0,075	0,093	124,0%
3	Osielec	0,666	0,514	77,2%
4	Maków Podh.	-	0,988	-
5	Zembrzyce	1,967	1,728	87,8%
6	Jaroszowice	1,488	1,743	117,1%
7	Wadowice	2,036	2,436	119,6%
8	Graboszyce	1,569	-	-
9	Zator	1,058	1,091	103,2%

The ratio of  $EF_{WPM2020} / EF_{WPM2019}$  values is in the range 77.2% , 124.0% (103.7% on average)

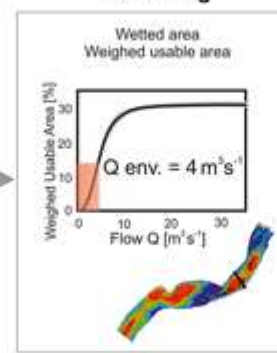
## 5.3. Przepływ środowiskowy – zmiany morfologiczne



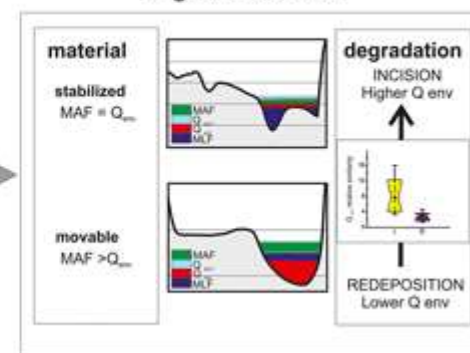
Habitat modelling (GAM)



Hydraulic and hydrologic modelling



Environmental flow variation of gravel bed river

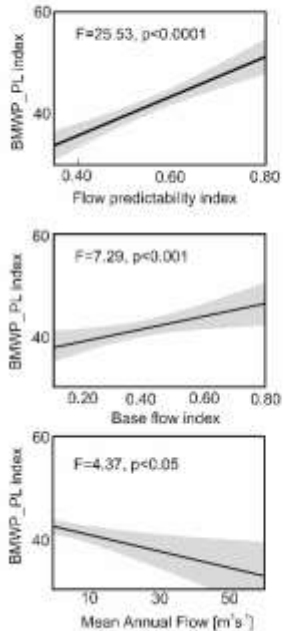


**Analiza wpływu wcięcia rzeki na przepływ środowiskowy** na podstawie wskaźnika makrobezkręgowców Biological Monitoringu Biologicznego PL (BMWP\_PL). Zakres badań: 240 zespołów makrobezkręgowców z 12 rzek o zróżnicowanym składzie granulometrycznym dna i reżimem hydrologicznym w południowej Polsce, 151 466 bezkręgowców należących do 92 rodzin.

Wcięcie rzeki znacząco zwiększyło wartości przepływu środowiskowego w stosunku do odcinków rzeki z przewagą procesów akumulacji. Obszar optymalnego siedliska dla makrobezkręgowców zmniejsza się wraz z intensywnością wcięcia koryta. W silnie wciętych rzekach wartości przepływu środowiskowego są zbliżone do średniego rocznego przepływu, co wskazuje, że większy przepływ potrzebny jest do uzyskania dobrych warunków dla makrobezkręgowców.

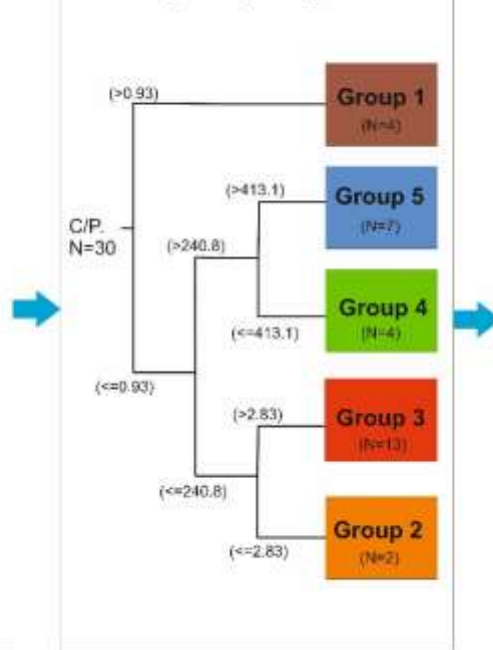
## 5.4. Przepływ środowiskowy

Hydrological factors vs BMWP\_PL

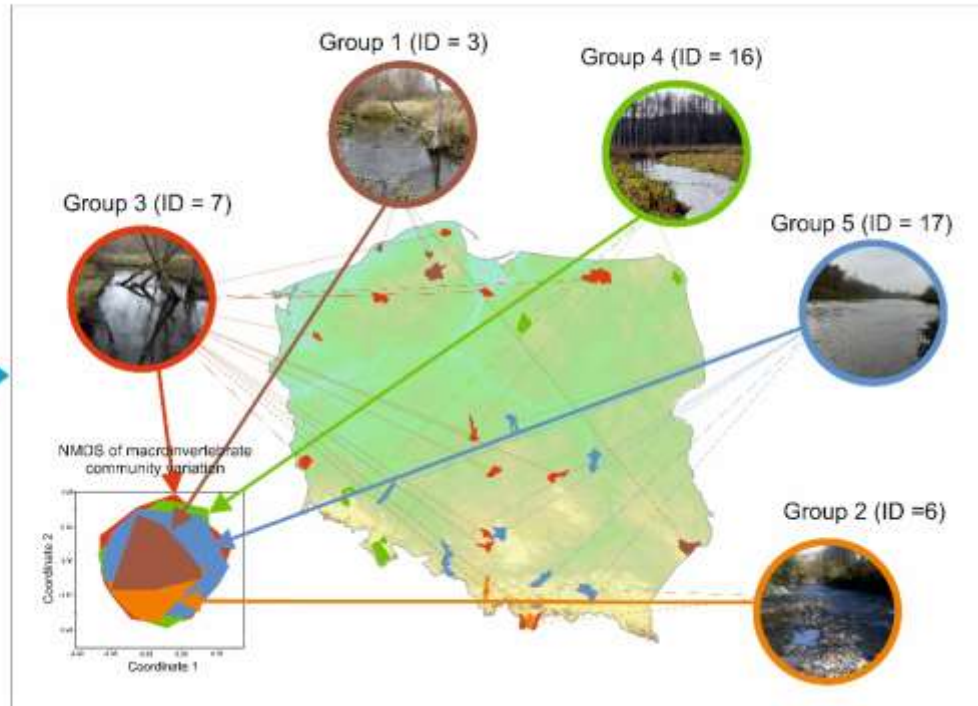


CART classification tree

BMWP\_PL + Hydrological factors



The catchment area regionalization



Głównymi celami badania było określenie wpływu zmienności reżimu przepływu i warunków siedliskowych na zbiorowiska makrobezkręgowców oraz regionalizacja zlewni pod względem wartości indeksu BMWP-PL, z uwzględnieniem sezonowości przepływu i warunków siedliskowych (30 zlewni).





## 6. Podsumowanie

---

### Wnioski metodyczne:

- Cztery główne metody : hydrologiczne, hydrauliczne, symulacji siedliska oraz holistyczne. Pierwsze dwie opierają się na założeniu, że funkcjonowanie siedlisk/ekosystemów wodnych, ulega pogorszeniu w miarę zmniejszania dostępności wody w rzece. Metoda symulacji siedliska zakłada istnienie "optymalnego" przepływu w rzece, który może utrzymać ekologię rzeki w równowadze. W metodach holistycznych przepływy środowiskowe są „projektowane” tak, aby najlepiej imitować zmienność reżimu hydrologicznego.
- Z punktu widzenia opracowywania planów gospodarowania wodą szczególnie popularne są metody hydrologiczne.
- Metody hydrologiczne mają istotne ograniczenia, np. mogą być stosowane tylko w ciekach, dla których dysponuje się ciągami przepływów, są wrażliwe na dane hydrologiczne i zakładają, że wszystkie organizmy wodne potrzebują tej samej ilości wody do przeżycia; uwzględniają dynamikę przepływu, jednak tylko pośrednio uwzględniają potrzeby organizmów wodnych.

## 5. Podsumowanie

---

### **Wnioski metodyczne:**

- W przypadku cieków niekontrolowanych, a także jako metody wspierające wykorzystać należy metody hydrauliczne, które wykorzystują zależności ilościowe i jakościowe pomiędzy siedliskami dla ryb i przepływem,
  - metody hydrauliczne pozwalają określić potrzebny przepływ dla wymagań organizmów wodnych w kolejnych etapach ich rozwoju,
  - metody hydrauliczne są ściśle związane z morfologią koryta,
  - do weryfikacji wyników przydatne są charakterystyki hydrologiczne.

### **Wnioski praktyczne:**

- zakres pomiarów terenowych obejmuje natężenie przepływu, przekrój poprzeczny, profil podłużny zwierciadła wody,
- kalibrację wyników obliczeń przeprowadza się w oparciu o wyniki pomiarów terenowych.



**Dziękuję za uwagę**

**[leszek.ksiazek@urk.edu.pl](mailto:leszek.ksiazek@urk.edu.pl)**