

**Centrum Informatyczne TASK  
Politechnika Gdańska  
Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk (IO PAN)**

**INFOBAZY 2014  
VII KRAJOWA KONFERENCJA NAUKOWA**

**INSPIRACJA - INTEGRACJA - IMPLEMENTACJA**



Politechnika Wroclawska

**Gdańsk - Sopot, 8-10 września 2014**

# ANALIZA PRZESTRZENNA POLA PRZEMIESZCZEŃ NA PODSTAWIE MONITORINGU GEODEZYJNEGO

*Barbara Namysłowska-Wilczyńska, Janusz Wynalek*  
*Politechnika Wrocławska*



## WPROWADZENIE

Geostatystyka umożliwia przestrzenną analizę danych pomiarowych.

W pracy metody geostatystyczne zastosowano do analiz geodezyjnych przemieszczeń, obiektu wielkoobszarowego, dla którego prowadzony jest monitoring geodezyjny, na przykładzie zbiornika unieszkodliwiania odpadów poflotacyjnych.

Wydobycie złóż surowców mineralnych, np. rud miedzi w LGOM Lubin-Sieroszowice i związany z tym nieustanny proces składowania i unieszkodliwiania odpadów wydobywczych w zbiorniku poflotacyjnym „Żelazny Most” oraz postępująca, wraz z eksploatacją górniczą, nadbudowa korony zapór zbiornika, powodują konieczność zapewnienia bezpiecznych warunków funkcjonowania budowli, tj. prowadzenia m.in. stałego geodezyjnego monitoringu przemieszczeń tego obiektu hydrotechnicznego.



# WPROWADZENIE

Niezmiernie ważnym zagadnieniem staje się konieczność przeprowadzenia analizy przestrzennej zmienności przemieszczeń (poziomych i pionowych) punktów kontrolowanych, zlokalizowanych w podłożu gruntowym i na stopniach korony oraz w obszarze przedpola zapory, co wydaje się być to bardzo istotne dla oceny stanu bezpieczeństwa ważnych budowli hydrotechnicznych.

Analiza przestrzenna pozwala na szacowanie, modelowanie i prognozowanie przemieszczeń punktów kontrolowanych.



## CEL BADAŃ

- ✓ Scharakteryzowanie przestrzennej zmienności przemieszczeń poziomych i pionowych punktów kontrolowanych na Zaporze Wschodniej obiektu hydrotechnicznego „Żelazny Most”, w jego rozprzestrzenieniu poziomym, wraz z wysokością korony zapory i na przestrzeni czasu monitorowania obiektu (1977-2009), na tle istniejących warunków geologiczno-inżynierskich;
- ✓ Wyznaczenie kierunków największych i najmniejszych zmian przemieszczeń;
- ✓ Oszacowanie dokładności ocen (krigingowych i interpolowanych) przemieszczeń;
- ✓ Wskazanie optymalnej metody szacowania średnich  $Z^*$  przemieszczeń;
- ✓ Prognoza obszarowo-czasowa przemieszczeń.



# OBIEKT BADAŃ



Przedpole i korona analizowanego obiektu hydrotechnicznego.



# PRZEDMIOT I ZAKRES ANALIZ PRZESTRZENNYCH

Przedmiotem analiz przestrzenno-czasowych były dane pochodzące z geodezyjnego monitoringu przemieszczeń zbiornika, dotyczące badanej zapory z następujących lat: 1990, 1995, 2000, 2003, 2005 - 2009.

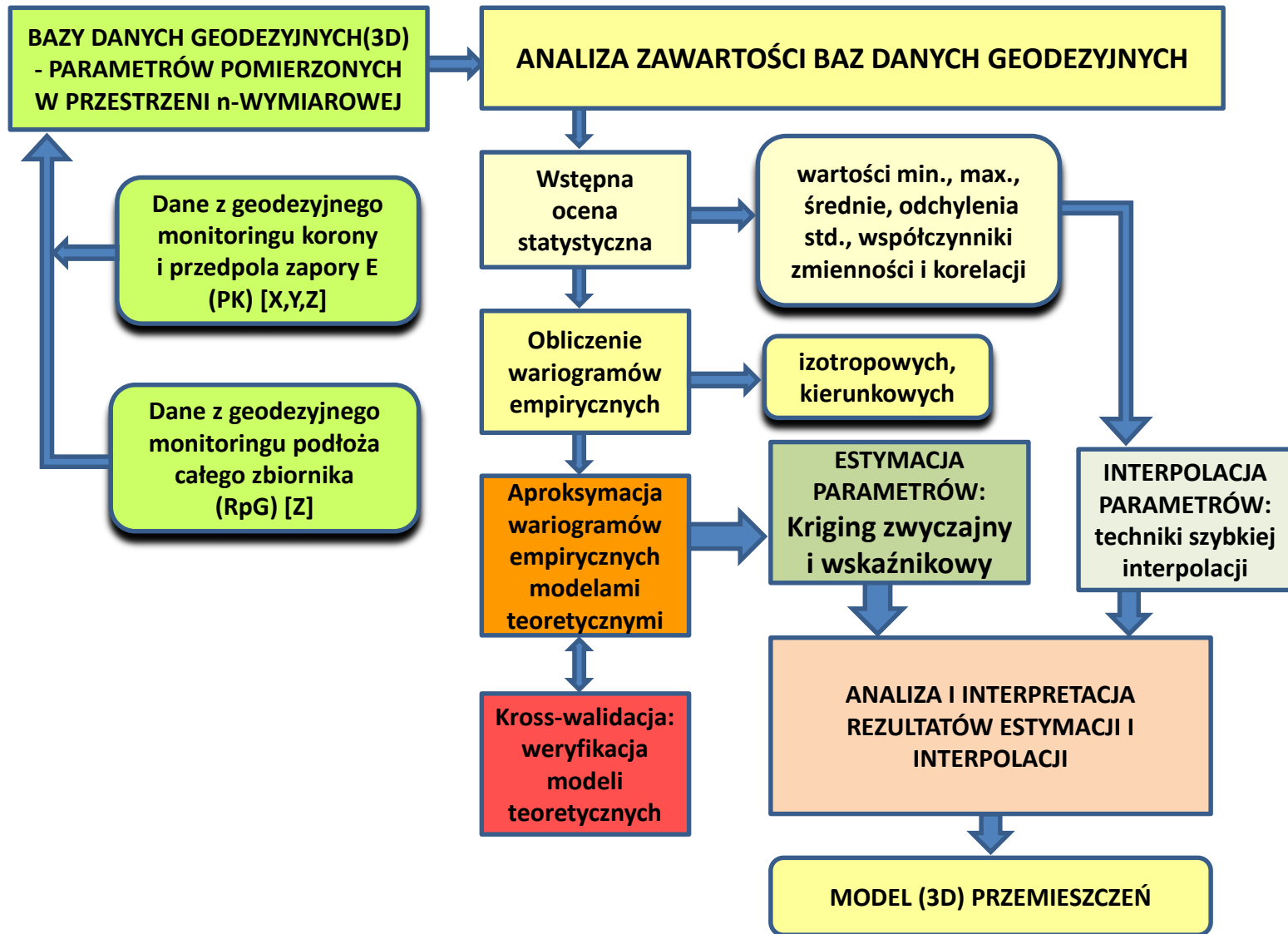
Analizowano 4 rodzaje parametrów przemieszczeń:

- przemieszczenia poziome całkowite  $u_{x_c}$  - wzdłuż osi  $X$  (N-S),
- przemieszczenia poziome całkowite  $u_{y_c}$  - wzdłuż osi  $Y$  (W-E),
- przemieszczenia poziome całkowite  $u_c$  - wypadkowe,
- przemieszczenia pionowe całkowite  $u_{z_c}$  - wzdłuż osi  $Z$ .



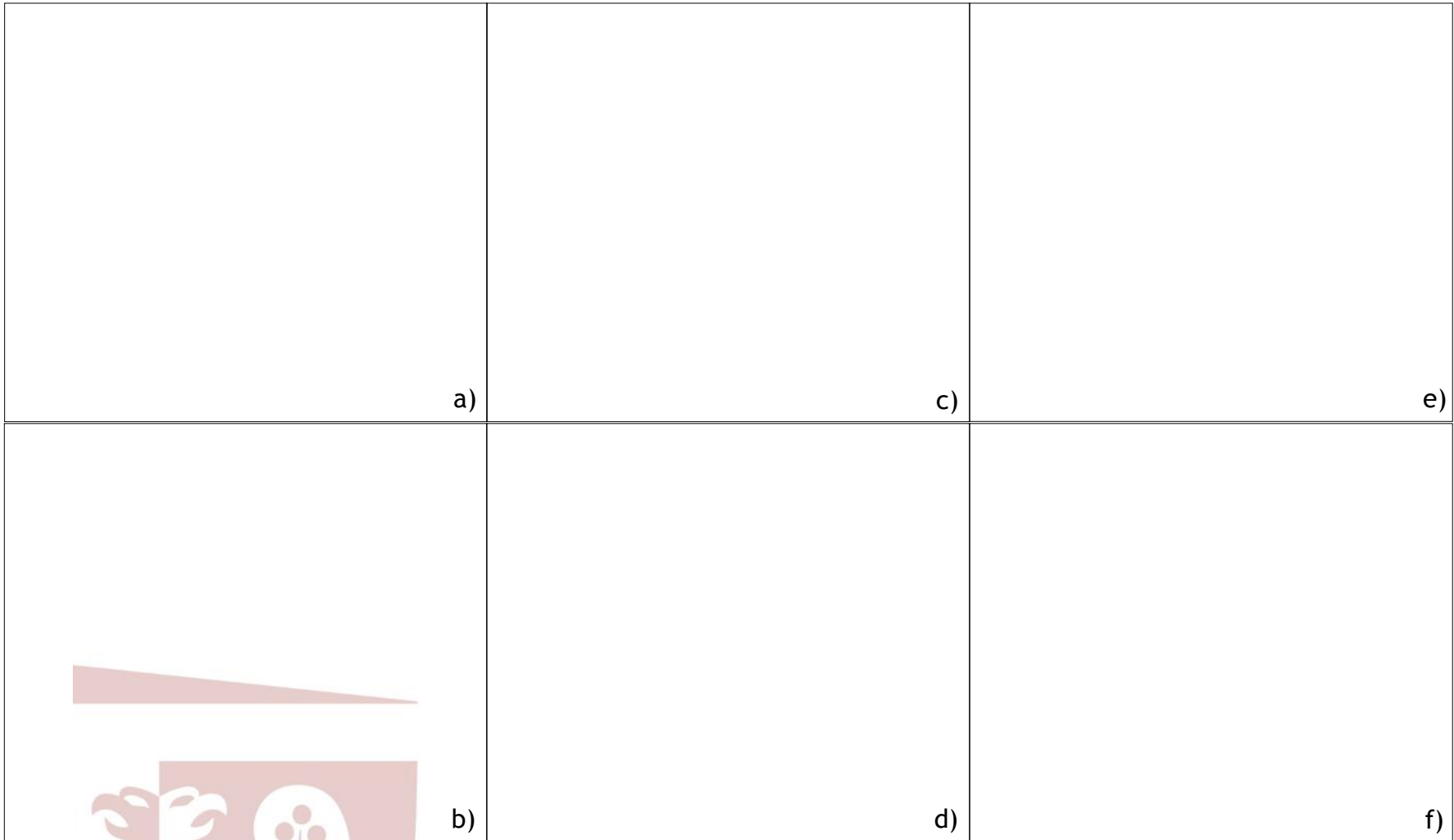
# METODYKA BADAWCZA

## SCHEMAT ANALIZ STATYSTYCZNYCH





# OCENA PODSTAWOWYCH STATYSTYK i POSTACI HISTOGRAMÓW PRZEMIESZCZEŃ



(a, b) - Rozkłady przemieszczeń poziomych  $u_{xc}$  i  $u_{yc}$ ; (a) - skośność:  $g_1=+1,008$ , (b) -  $g_1=+2,007$ ; (c, d) - rezultaty dopasowania modelu Gaussa do przebiegów histogramów przemieszczeń  $u_{xc}$  i  $u_{yc}$ ; (e, f) - modele teoretyczne histogramów na tle rozkładów przemieszczeń  $u_{xc}$  i  $u_{yc}$ ; (2007 r.).

# ANALIZA STRUKTURALNA ZMIENNOŚCI PRZEMIESZCZEŃ

1. Izotropowe wariogramy przemieszczeń poziomych wypadkowych  $u_c$  ( $u_{x_c} + u_{y_c}$ ) i pionowych  $u_{z_c}$ , z dopasowanymi modelami teoretycznymi; lata: 1995, 2005 i 2007.



# ANALIZA STRUKTURALNA ZMIENNOŚCI PRZEMIESZCZEŃ

## 2. Parametry geostatystyczne modeli teoretycznych wariogramów izotropowych przemieszczeń - 2007 r.

Analizowany parametr 2007 rok	Efekt samorodków $C_0$	Częstkowa wariancja $C'$	Całkowita wariancja progowa $C=C_0+C'$	Zasięg oddziaływania $a$ [m]	Typ modelu
Przemieszczenie całkowite poziome $u_x$ [j.u.]	325,415	227,564 257,448 187,151	997,578	508,85 508,85 508,85	wykładniczy, Bessel-J, Cauchy, efekt samorodków
Przemieszczenie całkowite poziome $u_y$ [j.u.]	3115,24	15219,50 1100,21	19434,95	356.56 1203.92	wykładniczy, sferyczny, efekt samorodków
Przemieszczenie całkowite - wypadkowe $u_c$ ( $u_x + u_y$ ) [j.u.]	3942,40	13536,80	17479,20	508,85	wykładniczy, efekt samorodków
Przemieszczenie całkowite pionowe $u_z$ [j.u.]	15514,40	12027,80	27542,20	508,85	Cauchy, efekt samorodków

# KROSS-WALIDACJA

1. Weryfikacja modeli teoretycznych izotropowych wariogramów przemieszczeń  $u_c$  ( $u_{x_c}+u_{y_c}$ ) i  $u_{z_c}$ ; błędy oceny w punktach PK (2007 r.)



# KROSS-WALIDACJA

## 2. Wyniki weryfikacji modeli teoretycznych izotropowych wariogramów przemieszczeń $u_{xc}$ , $u_{yc}$ , $u_c$ i $u_{zc}$ ; błędy oceny w punktach PK - 2007 r.

Analizowany parametr	Liczebność $n$	Dane testowe_2007 rok (ustalone sąsiedztwo krigingowe)			
		Średnia błędu	Wariancja błędu	Średnia błędu standaryzowanego	Wariancja błędu standaryzowanego
Przemieszcze nie całkowite poziome $u_{xc}$ [j.u.]	165	0.379	401.965	0.008	0.823
Przemieszczenie całkowite poziome $u_{yc}$ [j.u.]	165	1.733	3862.659	0.010	0.551
Przemieszczenie całkowite wypadkowe $u_c(u_{xc}+ u_{yc})$ [j.u.]	165	2.330	3863.930	0.013	0.554
Przemieszczenie całkowite pionowe $u_{zc}$ [j.u.]	165	-2.729	9196.064	-0.009	0.475

# KROSS-WALIDACJA

3. Wyniki kross-walidacji; badanie korelacji między wartościami przemieszczeń oryginalnych  $Z$  i estymowanych  $Z^*$  na przestrzeni lat: 1990-2009.

Analizowany parametr	Współczynniki korelacji $r$ pomiędzy wartościami oryginalnymi (pomiarowymi) $Z$ przemieszczeń i wartościami estymowanymi $Z^*$ w analizowanych latach								
	1990 rok	1995 rok	2000 rok	2003 rok	2005 rok	2006 rok	2007 rok	2008 rok	2009 rok
Przemieszczenie całkowite - poziome $u_x$ [j.u.]	0,53	0,61	0,47	0,60	0,67	0,73	0,67	0,73	0,75
Przemieszczenie całkowite - poziome $u_y$ [j.u.]	0,61	0,86	0,67	0,71	0,79	0,85	0,86	0,88	0,89
Przemieszczenie całkowite - wypadkowe $u_c (u_x + u_y)$ [j.u.]	0,33	0,82	0,71	0,69	0,78	0,82	0,84	0,86	0,88
Przemieszczenie całkowite - pionowe $u_z$ [j.u.]	0,55	0,81	0,64	0,69	0,73	0,76	0,77	0,81	0,86



# BADANIA ANIZOTROPII ZMIENNOŚCI PRZEMIESZCZEŃ

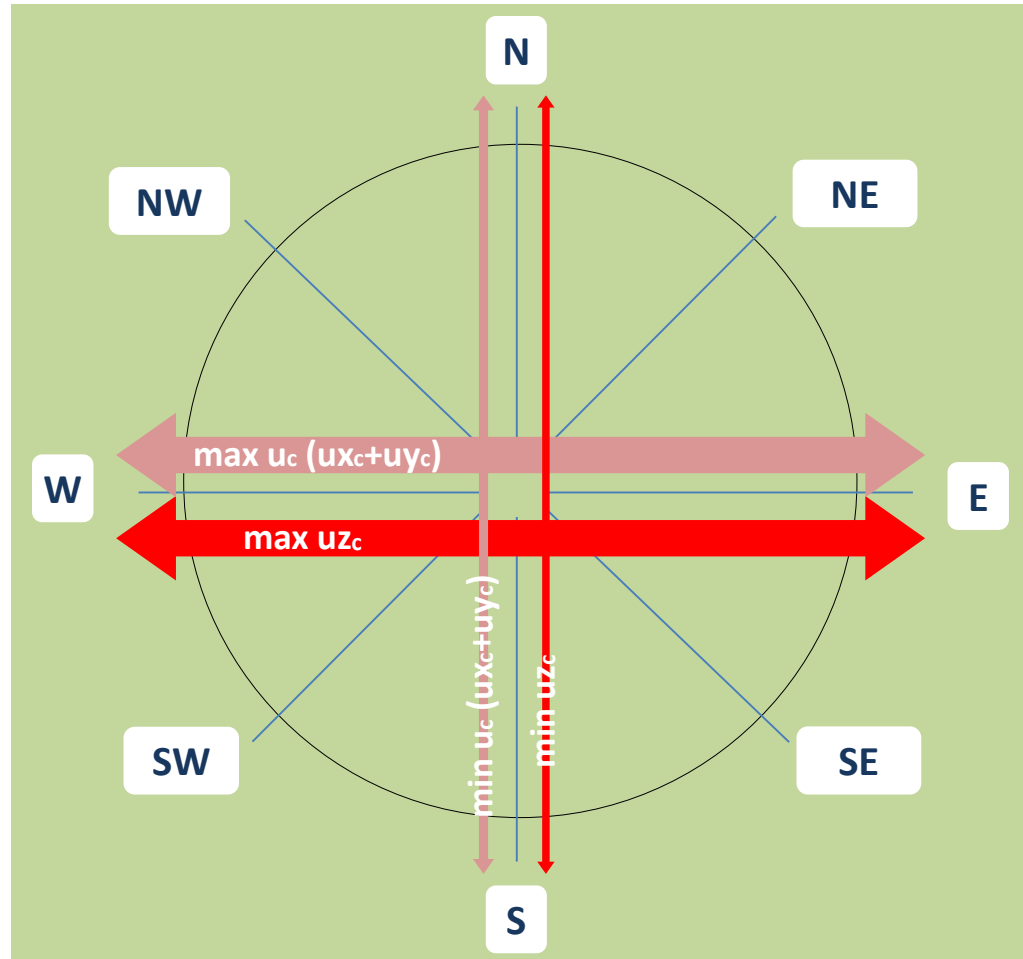
Róże wariogramów kierunkowych:

kierunki największej (linia W-E) i najmniejszej (linia N-S) zmienności przemieszczeń całkowitych poziomych wypadkowych  $u_c$  ( $u_{xc}+u_{yc}$ ) i pionowych  $u_{zc}$  - 1995 rok.



# BADANIA ANIZOTROPII ZMIENNOŚCI PRZEMIESZCZEŃ

Kierunki największych i najmniejszych zmian przemieszczeń całkowitych poziomych wypadkowych  $u_c$  ( $u_{xc} + u_{yc}$ ) i pionowych  $u_{zc}$ , określone na podstawie róż wariogramów kierunkowych; lata: 1995 i 2007.



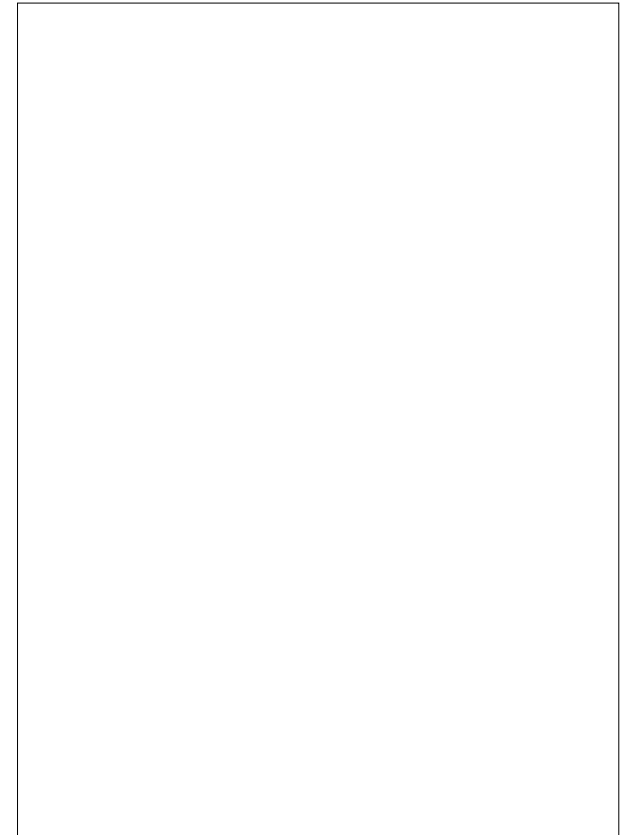
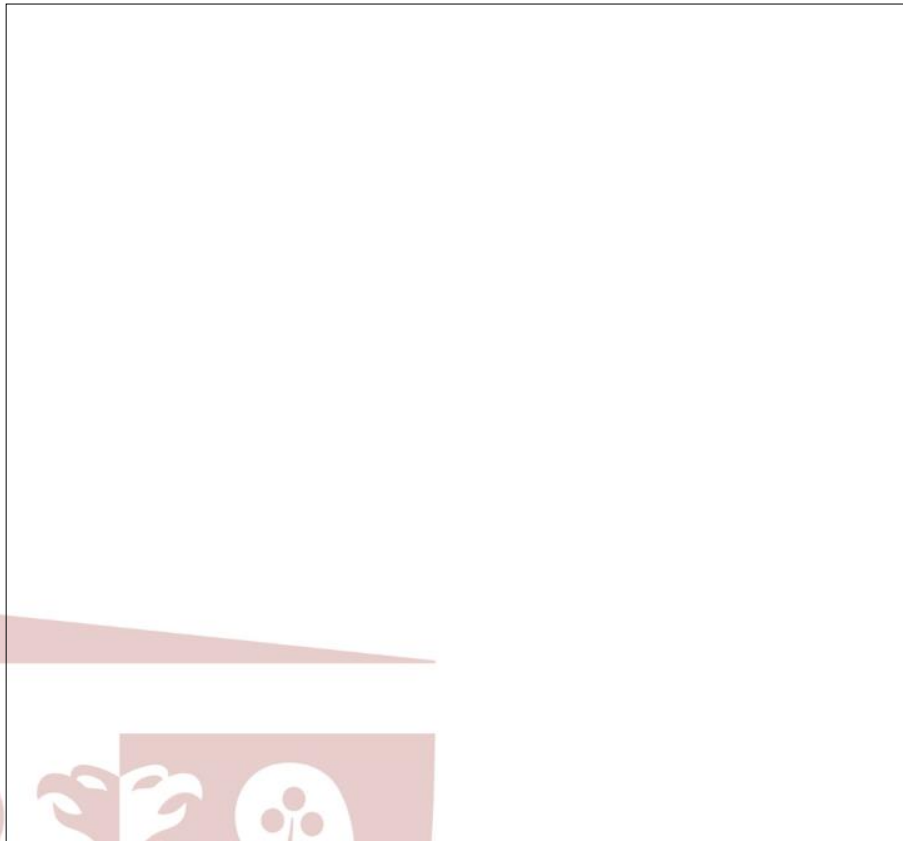
Gdańsk - Sopot, 8-10 września 2014



# METODY SZACOWANIA ŚREDNICH PRZEMIESZCZEŃ

Zapora zbiornika:

zastosowana identyczna siatka elementarna (3D) dla użytych technik szacowania i interpolacji przemieszczeń punktów kontrolowanych (PK) na obiekcie.



# METODY SZACOWANIA ŚREDNICH PRZEMIESZCZEŃ

Siatka elementarna (3D) w płaszczyźnie XOY - 2007 r.



# METODY SZACOWANIA ŚREDNICH PRZEMIESZCZEŃ

Siatka elementarna (3D) w płaszczyznach: XOZ i YOZ - 2007 r.



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

## Geostatystyczny model (3D) przemieszczeń

Ocena skali zmienności przestrzennej przemieszczeń pionowych  $uz_c$  dla różnych poziomów wysokościowych punktów PK na obiekcie - 136, 146, 150 i 160 m n.p.m.; 2007 r.



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

## Geostatystyczny model (3D) przemieszczeń

Ocena skali zmienności przestrzennej przemieszczeń poziomych  $u_{xc}$ ,  $u_{yc}$ ,  $u_c$  i pionowych  $u_{zc}$  dla różnych poziomów wysokościowych punktów PK na obiekcie - 136, 146, 150, 160 m n.p.m. ; 2007 r.

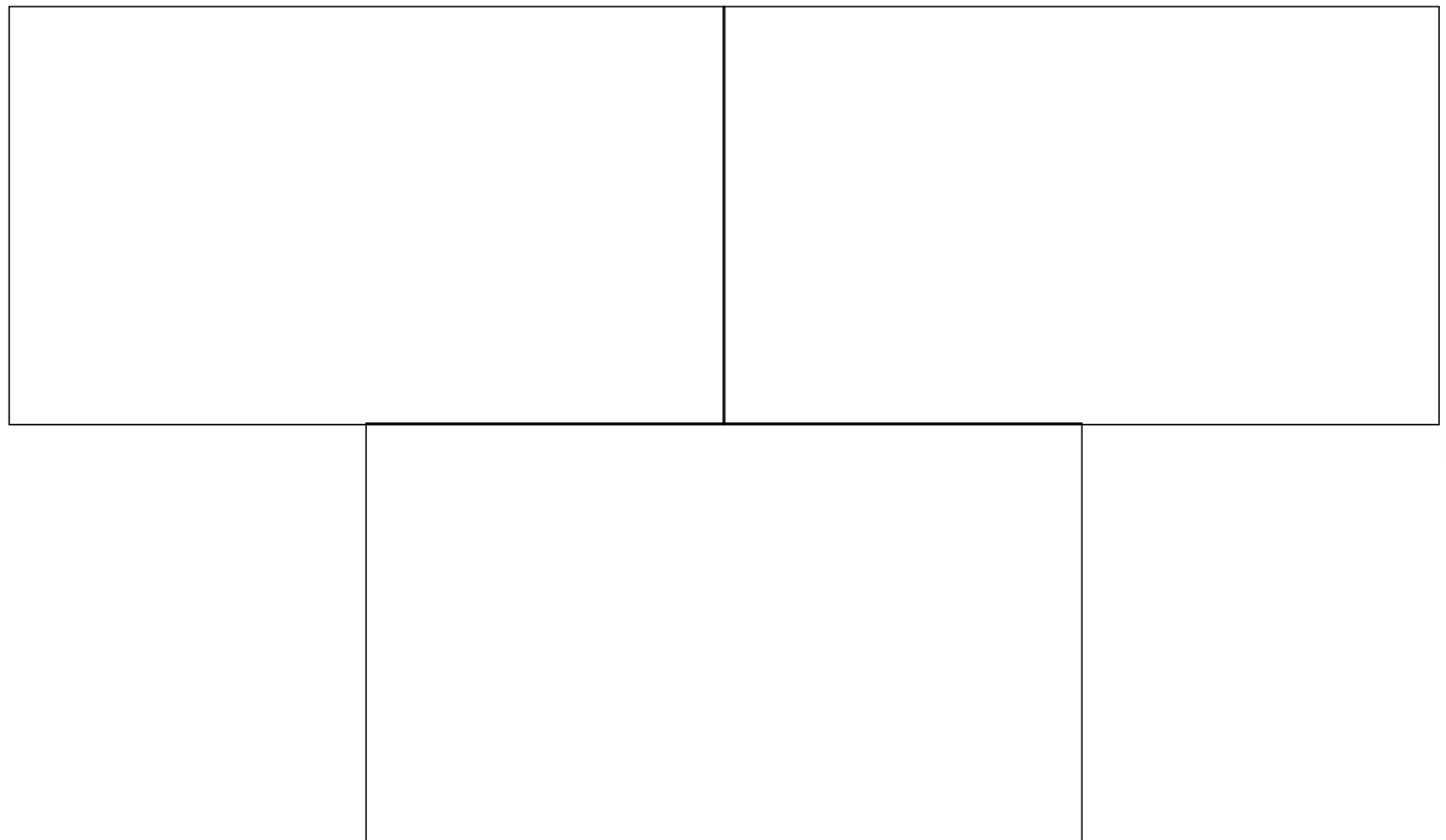
Analizowany parametr	Zmienność parametru na wybranych poziomach wysokościowych położenia punktów PK na obiekcie - 2007 r.			
	136,00 m n.p.m.	146,00 m n.p.m.	150,00 m n.p.m.	160,00 m n.p.m.
Przemieszczenie całkowite poziome $u_{xc}$ [j.u.]	+66,03 -34,99	+65,61 -33,82	+65,21 -33,28	+63,75 -31,80
Przemieszczenie całkowite poziome $u_{yc}$ [j.u.]	+353,21 -109,52	+347,85 -101,20	+343,35 -97,81	+328,69 -89,47
Przemieszczenie całkowite wypadkowe $u_c$ ( $u_{xc} + u_{yc}$ ) [j.u.]	+343,68 +9,53	+339,38 +10,14	+335,83 +10,42	+324,14 +11,20
Przemieszczenie całkowite pionowe $u_{zc}$ [j.u.]	-25,42 -336,55	-29,02 -342,200	-30,67 -343,40	-35,16 -343,87



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

## Geostatystyczny model (3D) przemieszczeń

Ocena skali zmienności czasowej przemieszczeń pionowych  $uz_c$  dla poziomu wysokościowego punktów PK na obiekcie - 136 m.n.p.m., lata: 2005, 2006, 2007.



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

## Geostatystyczny model (3D) przemieszczeń

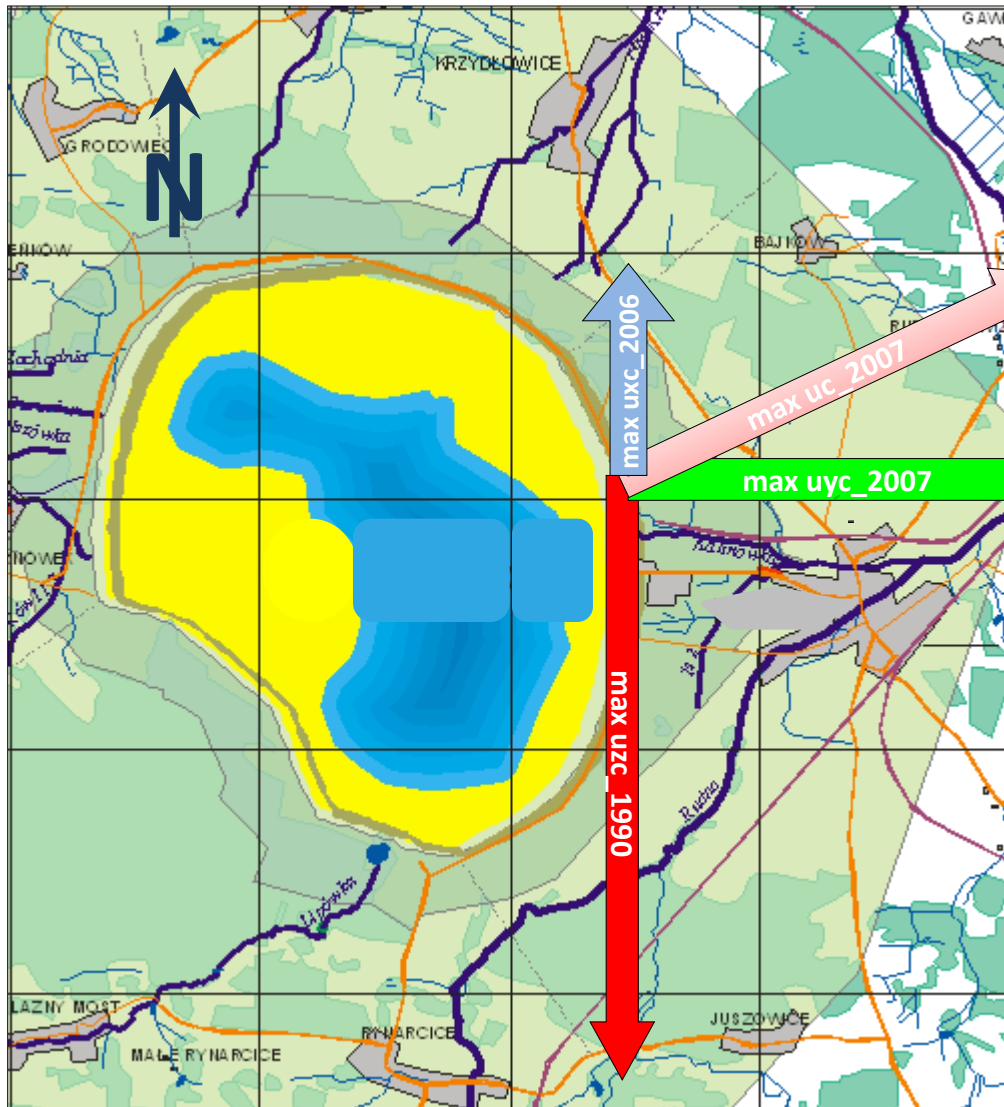
Ocena skali zmienności czasowej przemieszczeń poziomych  $u_c$  ( $u_{x_c}+u_{y_c}$ ) i pionowych  $u_{z_c}$  dla poziomu wysokościowego punktów PK na obiekcie - 136 m n.p.m.; lata: 1990-2007.

Analizowany parametr	Zmienność parametru w analizowanych latach dla poziomu wysokościowego położenia punktów PK na obiekcie - 136 m n.p.m.						
	1990 r.	1995 r.	2000 r.	2003 r.	2005 r.	2006 r.	2007 r.
Przemieszczenie całkowite poziome wypadkowe $u_c$ ( $u_{x_c}+u_{y_c}$ ) [j.u.]	+21,18 +16,10	+82,19 +0,44	+153,84 +8,86	+173,40 +10,57	+254,99 +5,89	+317,89 +12,13	+343,68 +9,53
Przemieszczenie całkowite pionowe $u_{z_c}$ [j.u.]	-50,05 -481,24	+17,29 -255,37	-65,43 -188,59	-39,14 -204,85	-24,19 -229,21	-29,13 -251,56	-25,42 -336,75



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

Największe zmiany przemieszczeń w czasie, określone na podstawie rezultatów estymacji wartości średnich  $Z^*$ , z wykorzystaniem krzygu zwykłego blokowego.



SKALA  
PRZEMIESZCZEŃ:  
→  
100 mm



# ANALIZY PRZESTRZENNO-CZASOWE

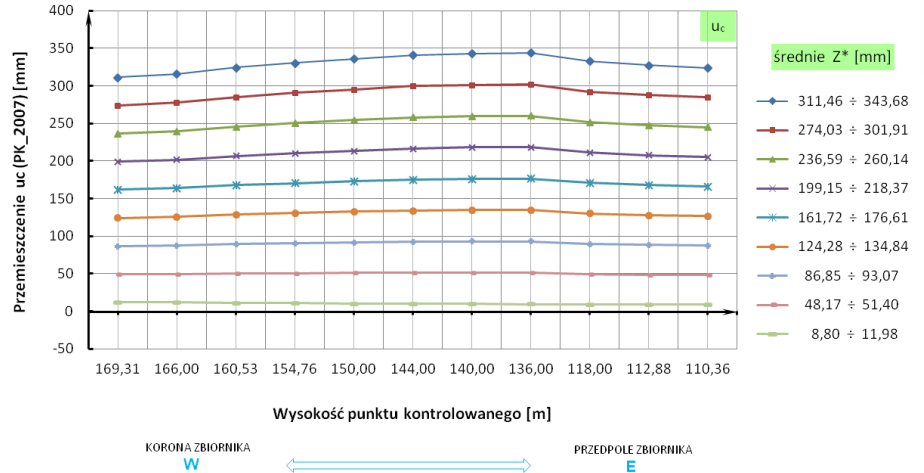
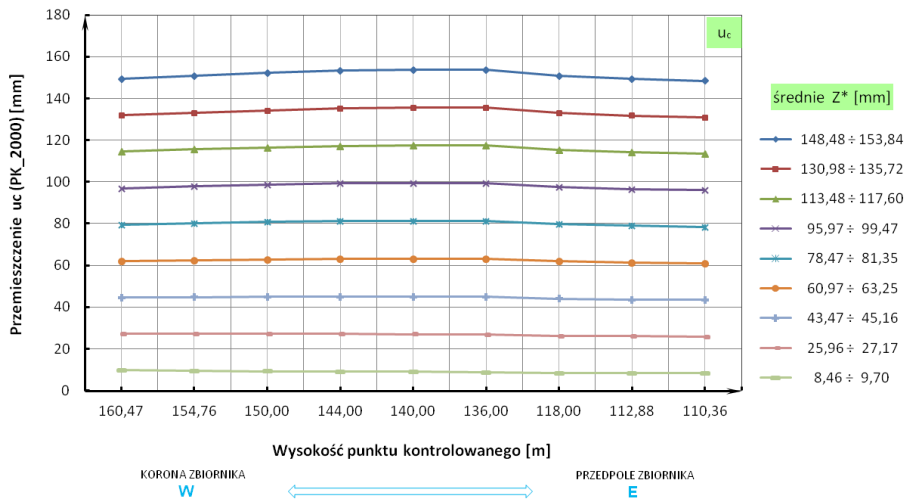
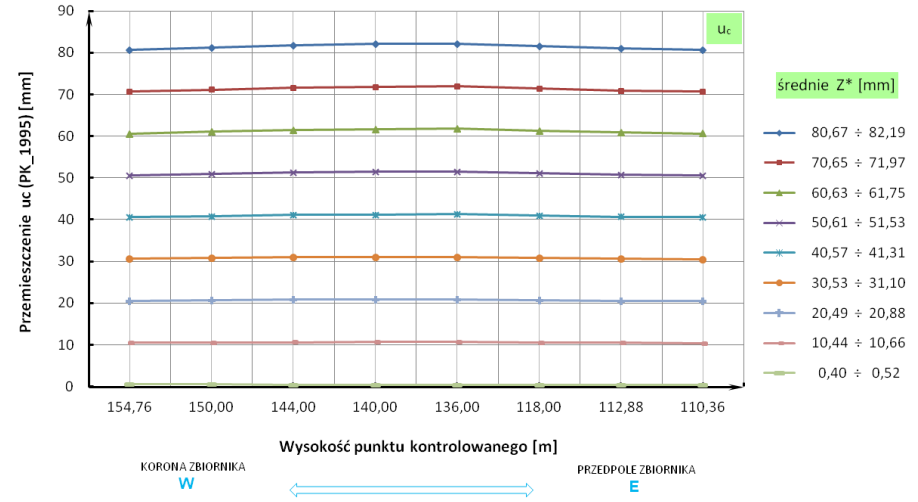
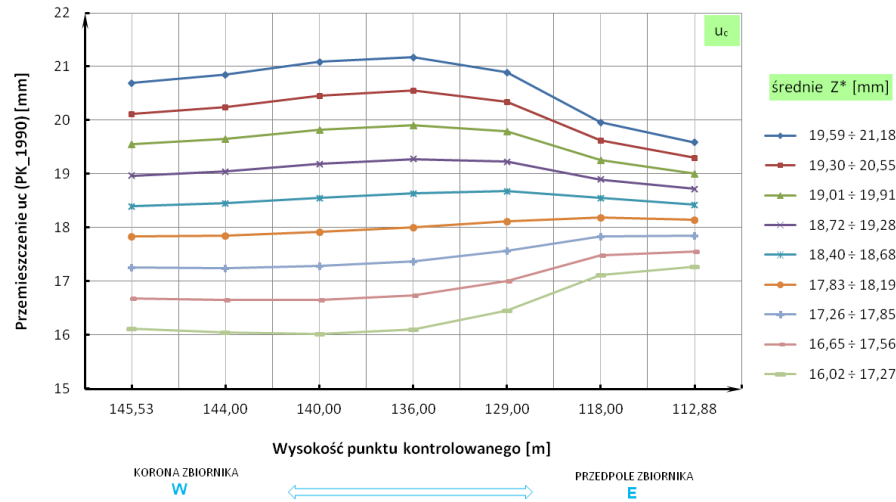
## Geostatystyczny model (3D) przemieszczeń

Ocena skali dokładności szacowania średnich estymowanych  $Z^*$  przemieszczeń poziomych wypadkowych  $u_c$  ( $u_{x_c} + u_{y_c}$ ) i pionowych  $u_{z_c}$ , w postaci standardowych odchyłeń estymacji  $\sigma_k$ , dla wysokości punktów PK na obiekcie -136 m n.p.m.; lata: 1990 i 1995.



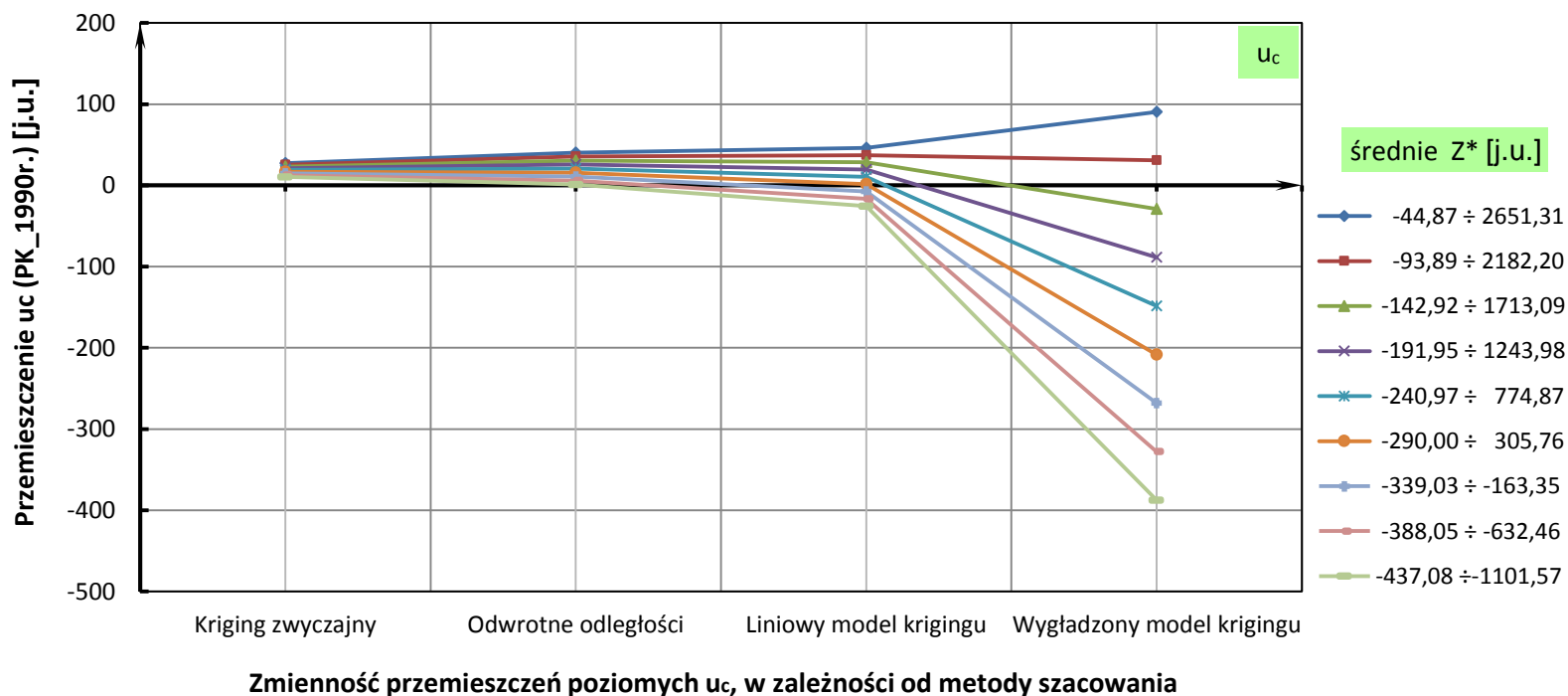
# WIZUALIZACJA WYNIKÓW ESTYMACJI I INTERPOLACJI

## 1. Rozkłady średnich estymowanych $Z^*$ przemieszczeń poziomych wypadkowych $u_c$ ( $u_{xc}+u_{yc}$ ), w zależności od wysokości punktów PK na zaporze; lata: 1990, 1995, 2000 i 2007.



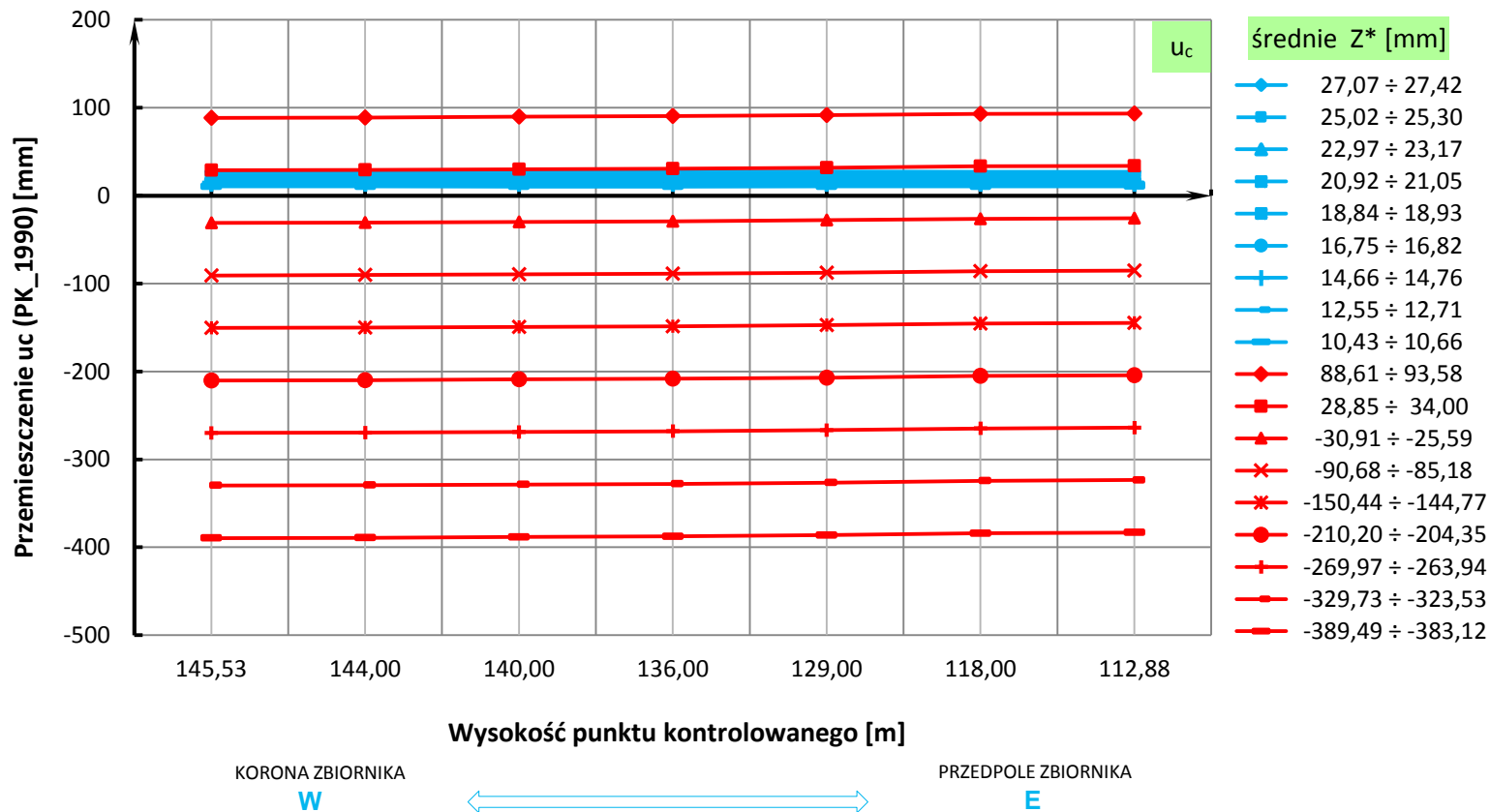
# WIZUALIZACJA WYNIKÓW ESTYMACJI I INTERPOLACJI

2. Rozkłady średnich  $Z^*$  przemieszczeń poziomych wypadkowych  $u_c$  ( $u_{x_c} + u_{y_c}$ ), dla punktów PK usytuowanych na wysokości 136 m n.p.m. na zaporze (1990 r.), na tle zastosowanych technik szacowania.



# WIZUALIZACJA WYNIKÓW ESTYMACJI I INTERPOLACJI

3. Rozkłady średnich estymowanych  $Z^*$  poziomych przemieszczeń wypadkowych  $u_c$  ( $u_{x_c} + u_{y_c}$ ), wyznaczonych metodą **krigingu zwyczajnego - blokowego (kolor niebieski)** i wartości interpolowanych  $Z^*$ , obliczonych techniką **wygładzonego modelu krigingu (kolor czerwony)**, w zależności od wysokości punktów PK na zaporze (1990 r.).



## PODSUMOWANIE

Efektem przeprowadzonych badań obejmujących analizę strukturalną, modelowanie i szacowanie jest bogata charakterystyka kartograficzna przemieszczeń badanego obiektu hydrotechnicznego, co umożliwiło opracowanie modelu statystycznego (3D) zmienności przemieszczeń.

Rezultatem użycia krigingu zwyczajnego (blokowego) jest wydzielenie wyraźnych granic stref przemieszczeń poziomych  $u_{xc}$  - wzdłuż osi X (N-S) i  $u_{yc}$  - wzdłuż osi Y (W-E) oraz pionowych  $u_{zc}$  - wzdłuż osi Z (osiadań i wypiętrzeń) na zaporze obiektu. Strefy te zaznaczające się na mapach rastrowych mogą być interpretowane jako obszary lokalnych deformacji, istotnych ze względu na bezpieczeństwo budowli.

Natomiast techniki szybkiej interpolacji pozwalają na rozpoznanie ogólnego tła przemieszczeń, bez oceny dokładności oszacowania wartości interpolowanych.



## PODSUMOWANIE

Porównanie wartości  $Z$ , pochodzących z monitoringu geodezyjnego, z wartościami estymowanymi i interpolowanymi  $Z^*$ , obliczonych w 25 punktach PK, metodą krigingu zwyczajnego i techniką kwadratów odwrotnych odległości, pokazuje, iż szacowanie przemieszczeń z użyciem pierwszej metody, daje na ogół mniejsze odchylenia wartości  $Z^*$  od monitorowanych wartości  $Z$ .

Stosując wygładzony model krigingu uzyskano największe rozbieżności średnich interpolowanych  $Z^*$ , w stosunku do przemieszczeń oryginalnych  $Z$ .

Przemieszczenia punktów kontrolowanych PK wyraźnie koncentrują się w środkowej części korony zapory. Stosunkowo nieznaczne wypiętrzenia zaznaczają się w jej części N i S.

Zastosowane techniki stanowią skuteczne narzędzia w analizach przestrzennych przemieszczeń, szczególnie w odniesieniu do dużych obiektów hydrotechnicznych i rozległych obszarów podlegających w skali makroregionu wpływom antropogenicznym (wywołanym eksploatacją górnictwem).



Dziękuję za uwagę



## V. METODYKA BADAWCZA

1. Opracowanie baz danych w układzie 3D w 2 wariantach obliczeń: współrzędne X, Y, Z - wysokość; współrzędne X, Y, T - oś czasu - lata monitoringu geodezyjnego (1978 ÷ 2009), obejmującego przemieszczenia punktów kontrolowanych PK (na koronie i przedpolu zapory).
2. Analiza danych oryginalnych przemieszczeń, pochodzących z geodezyjnego monitoringu punktów kontrolowanych (PK).
3. Ocena podstawowych statystyk i analiza histogramów rozkładów monitorowanych przemieszczeń.
4. Analiza strukturalna:
  - obliczenie empirycznych wariogramów izotropowych przemieszczeń i kierunkowych wzdłuż osi czasu (T) i ich aproksymacja, za pomocą analitycznych funkcji teoretycznych (modeli geostatystycznych).
  - wyznaczenie kierunków największych i najmniejszych zmian przemieszczeń.
5. Kross-walidacja - weryfikacja przyjętych modeli teoretycznych wariogramów izotropowych, z oszacowaniem błędów oceny, w punktach pomiarowych PK.





## V. METODYKA BADAWCZA

6. Szacowanie (estymacja, interpolacja) i prognozowanie wartości  $Z^*$  przemieszczeń, z wykorzystaniem:

a) **krigingu zwyczajnego, blokowego**:

Parametry przestrzennej siatki elementarnej (3D):

- wymiary bloku elementarnego: 50m x 100m x 1m - PK na zaporze E.

przy przyjęciu ustalonego „sąsiedztwa krigingowego” (obszaru wyszukiwania punktów pomiarowych); regularna dyskretyzacja bloku: 10 x 10 x 5;

- liczba bloków elementarnych: dla punktów PK: oś X-52, oś Y-82, oś Z-60.

- całkowita liczba centrów bloków elementarnych w estymacji (3D):  $n = 255840$  (PK).

b) **technik szybkiej interpolacji (quick interpolation)**: kwadratów odwrotnych odległości (power inverse distances), liniowego modelu krigingu (linear model kriging) i wygładzonego modelu krigingu (spline model kriging), z przyjęciem identycznej siatki (3D), jak w krigingu .

7. Sporządzenie map rastrowych rozkładów przemieszczeń szacowanych i prognozowanych wartości  $Z^*$  dla wybranego roku.



## V. METODYKA BADAWCZA

8. Ocena skali zmienności przestrzennej i czasowej przemieszczeń (dla różnych poziomów wysokościowych punktów PK na obiekcie i na przestrzeni lat 1990 ÷ 2009).
9. Oszacowanie efektywności metod szacowania średnich przemieszczeń z wyznaczeniem średnich błędów estymacji i interpolacji.
11. Ocena warunków gruntowych (terenu naturalnego, rodzimego) podłoża korony i przedpola zapory wzdłuż wybranych linii przekrojowych, na podstawie profili i przekrojów geologiczno-inżynierskich (dane z otworów wiertniczych i sondowań).



## V. METODYKA BADAWCZA

### Funkcja wariogramu

Wariancja przyrostów, definiuje podstawową i charakterystyczną funkcję geostatystyki, zwaną *wariogramem*. Funkcja ta ujmuje zależność między średnim zróżnicowaniem wartości parametrów a ich odległością między punktami pomiarów. Postać teoretyczną wariogramu przedstawia równanie:

$$2\gamma(h) = D^2[Z_{(x_i+h)} - Z_{(x_i)}] = E[Z_{(x_i+h)} - Z_{(x_i)}]^2$$

gdzie:

$D, E$  - operator wariancji i wartości oczekiwanej,  
 $2\gamma(h)$  - wariogram,  $\gamma(h)$  - semiwariogram ( półwariogram ),  
 $Z_{(x_i+h)} - Z_{(x_i)}$  - wartości zmiennej zregionalizowanej w punktach odległych o  $h$ .

Wygodniejsza w użyciu połowa wartości wariogramu nosi nazwę *semiwariogramu*, którego postać dla dyskretnej i regularnej sieci pomiarowej określa się z klasycznej formuły G. Matherona:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (Z_{\vec{h}+i} - Z_i)^2$$

gdzie:

$Z_i, Z_{\vec{h}+i}$  - wartości parametru w punktach oddalonych o wektor  $\vec{h}$   
 $n_h$  - liczba par punktów pomiarowych odległych o wektor  $\vec{h}$