

*Grzegorz Wierzbicki, Piotr Ostrowski, Mirosław Samulski, Filip Bujakowski*

**WPLYW BUDOWY GEOLOGICZNEJ  
NA WARUNKI PRZEBIEGU EKSTREMALNYCH  
WEZBRAŃ NA PRZYKŁADZIE POWODZI 2010  
W DOLINIE WISŁY ŚRODKOWEJ I DOLNEJ**

---

***THE IMPACT OF GEOLOGICAL SETTING INTO  
A DYNAMICS OF EXTREME FLOODS – A CASE STUDY  
OF THE 2010 FLOOD EVENT IN THE VISTULA VALLEY***

**Streszczenie**

W maju i czerwcu 2010 dwie ekstremalnie wysokie fale wezbraniowe, wywołane intensywnymi opadami deszczu w Karpatach, doprowadziły do pięciu awarii wałów przeciwpowodziowych w dolinie Wisły Środkowej i Dolnej. W artykule opisano przebieg i charakterystykę powodzi 2010 na podstawie danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB): sumy opadów, stany wody z trzech wodowskazów wyposażonych w system telemetrii i natężenie przepływu. Przeprowadzono badania terenowe wszystkich miejsc awarii wałów. Obejmowały one kartowanie z wykorzystaniem technologii GPS oraz rozpoznanie ukształtowania cokołu erozyjnego rzeki na podstawie sondowań geologicznych strefy korytowej. Wyniki badań terenowych zostały porównane z wynikami kartowania geologicznego koryta Wisły Środkowej przeprowadzonego przed 2007 przez innego autora. Powyższe dane - geologiczne, geomorfologiczne i hydrologiczne - zestawiono i poddano analizie we wspólnej bazie danych GIS. Stwierdzono związek przestrzenny każdej z 5-ciu awarii wałów przeciwpowodziowych z kulminacjami cokołu erozyjnego rzeki. W artykule przedstawiono także najważniejsze przyczyny analizowanych awarii hydrotechnicznych oraz zaprezentowano model sufozyjnego uszkodzenia wału przeciwpowodziowego w warunkach wysokiego spadku hydraulicznego. Przeanalizowano również wpływ elewacji cokołu erozyjnego na kierunki filtracji w dolinie rzecznej z uwzględnieniem budowy geologicznej i rzeźby równiny zalewowej.

**Słowa kluczowe:** awaria wału przeciwpowodziowego, sufozja, zniszczenie hydrauliczne, cokoł erozyjny, geomorfologia fluwialna

### **Summary**

*In May and June 2010 two extreme floodwaves induced by heavy rainfall in Carpathians Mts. have resulted in four levée breaches in mid-Vistula reach and one levée breach in lower reach of the Vistula valley. The basic outline of the flood was presented on the basis of data collected by Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMWM-NRI): total precipitation, stage hydrograms from three water gauges with telemetric system and discharge. The field research was conducted on: all levée breaches were mapped by GPS. Morphology of sub-alluvial basement in the low-Vistula reach was mapped by drilling in the river channel (in the islands, sandy bars and river banks). The data obtained from our field research were compared to results of geological mapping of the river channel carried out in mid-Vistula reach before 2007 by other author. Using GIS-data base we juxtaposed all these data what has revealed adjacent location of all levée breaches to protrusions of sub-alluvial basement. The model of levée breaches process caused by piping in the low-Vistula reach was presented. The influence of the sub-alluvial basements on the underseepage process was discussed with emphasis on geological setting and geomorphology of the floodplain.*

**Key words:** *levée breach, piping, sub-alluvial basement, fluvial geomorphology*

### **WSTĘP**

Ekstremalne wezbrania w dużych dolinach rzecznych zazwyczaj przynoszą znaczne straty materialne. Wynikają one z zalania, a niekiedy zniszczenia przez intensywną erozję lub akumulację fragmentów równiny zalewowej, które człowiek wykorzystuje gospodarczo dzięki utrzymaniu systemu wałów przeciwpowodziowych. W czasie wezbrań rzadko dochodzi do przelania się wody przez koronę wału. Najczęstszą bezpośrednią przyczyną powodzi są awarie wałów przeciwpowodziowych przy przepływach i stanach wody mniejszych, niż takie, dla których zaprojektowano te budowle. Podobna sytuacja wystąpiła w 2010 roku w dolinie Środkowej (między ujściem Sanu i Narwi) i Dolnej Wisły, gdzie doszło do 5 awarii wałów. Z uwagi na ogrom strat ekonomicznych szczególnie wymowne były przypadki awarii w Wilkowie i Świniarach.

Wśród głównych przyczyn awarii wałów najczęściej wymienia się dwie grupy czynników. Pierwsza z nich to zły stan techniczny wałów wynikający z zaniedbań odpowiedzialnych za ich utrzymanie instytucji, wynikających niejednokrotnie z niedoinwestowania oraz z działalności zwierząt takich jak bobry i krety. Druga to spowalnianie prędkości przepływu wody i jej spiętrzanie przez drzewa i krzewy porastające współczesne łóżysko (międzywale) rzeki.

W niniejszej pracy przyjęto odmienne założenia. Uznano, że ekstremalne wezbranie jest naturalnym procesem występującym w zlewni, więc jego przebieg modyfikują naturalne czynniki. Przebieg dawnych wezbrań jest zapisany w osadach i rzeźbie terenu równiny zalewowej. Analizując ten zapis można pro-

gnozować miejsca awarii wałów przeciwpowodziowych i przewidywać przestrzenny zakres powodzi [Falkowski 2007, Wierzbicki i in., 2012]. Zapis ten wskazuje ponadto, że dominującą rolę dla przebiegu dawnych wezbrań miała specyficzna cecha budowy geologicznej dużych dolin rzecznych Nizy Polskiego - elewacje cokołu erozyjnego rzeki, zwane też kulminacjami podłoża aluwiiów [Falkowski 2006, Falkowski i Ostrowski 2010]. Są one zbudowane najczęściej ze skał nieprzepuszczalnych dla wody, odpornych na erozję i zazwyczaj powstałych przed ukształtowaniem się doliny rzecznej.

Podstawowym celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie czy ww. cecha budowy geologicznej dolin rzecznych, tj. elewacje cokołu erozyjnego, miała wpływ na przebieg powodzi w 2010 roku w dolinie Środkowej i Dolnej Wisły.

### **TEREN I METODY BADAŃ**

Do badań wybrano 5 odcinków doliny Wisły (rys. 2, 3), które zostały dotknięte przez powódź w 2010 roku: 4 odcinki Wisły Środkowej między Annopolem a Puławami (km 300 - 357) i odcinek Dolnej Wisły pomiędzy Wyszogrodem a Płockiem (km 606 - 615). Według regionalizacji fizycznogeograficznej [Kondracki 2011] pierwsze 4 odcinki są położone w Małopolskim Przełomie Wisły, a piąty – w Kotlinie Warszawskiej. Koryto rzeki w Małopolskim Przełomie Wisły jest uregulowane w ograniczonym zakresie - lokalnie występują w nim ostrogi i tamy podłużne. Odcinek Wisły w Kotlinie Warszawskiej jest praktycznie nieuregulowany - jedynymi elementami zabudowy hydrotechnicznej są pojawiające się sporadycznie ostrogi. We wszystkich odcinkach wały przeciwpowodziowe zostały zbudowane stosunkowo późno - w pierwszej połowie XX wieku, a miejscami jeszcze później. [Łajczak i in. 2006].

W niniejszej pracy przeanalizowano dane operacyjne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) dotyczące sum opadów w zlewni Górnej Wisły oraz stany wody na 3 posterunkach wodowskazowych wyposażonych w system telemetrii: Zawichost (287,4 km), Puławy (374,9 km), Kępa Polska (606,5 km). Ponadto w bazie danych GIS dokonano szeregu analiz geoprzestrzennych.

Do najważniejszych należały:

1 – porównanie zarejestrowanej mapy topograficznej w skali 1:25 000 (rastrowa warstwa tematyczna) z wektorową warstwą tematyczną, obrazującą przebieg izolunii podłoża holocenijskich aluwiiów (dane importowano z bazy GIS obejmującej dolinę Wisły Środkowej [Falkowski 2006]),

2 – porównanie map topograficznych w skali 1:10 000 z ortofotomapą wykonaną na podstawie zdjęć lotniczych obejmujących fragment doliny Dolnej Wisły [Wierzbicki i in.2012],

3 - porównanie wyników badań terenowych zapisanych w postaci kilku wektorowych warstw informacyjnych.

Badania terenowe doliny Wisły Środkowej przeprowadzono w kwietniu 2011 roku. Obejmowały one głównie kartowanie geomorfologiczne, ze szczególnym uwzględnieniem miejsc uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych. Dzięki zastosowaniu technologii GPS, wyniki badań były na bieżąco wprowadzane do bazy danych GIS. Badania terenowe w dolinie Dolnej Wisły prowadzono w okresie od lipca 2011 do czerwca 2012 roku. Celem badań było rozpoznanie budowy geologicznej strefy korytowej rzeki poprzez określenie miąższości współczesnych (holoceńskich) aluwii i wyznaczenie rzędnej stropu ich podłoża. W odcinku między Kępą Polską a Troszynem (km 606,5 - 615,0) na łachach i wyspach oraz brzegach koryta wykonano w sumie 72 sondowania geologiczne do głębokości 12 m. Prace wykonywano zazwyczaj przy niskim stanie wody (często przy pomocy łodzi hybrydowej typu RIB), a lokalizację w terenie określano za pomocą technologii mobilnego GIS-u (palmtop z wbudowanym odbiornikiem GPS i oprogramowaniem ArcPad firmy ESRI). Badania te sfinansowane zostały z grantu wewnętrznego SGGW w Warszawie dla doktorantów i młodych naukowców – nr 505-10-052 80 051.

Kolejnym etapem badań były prace kameralne obejmujące wykonanie przekrojów geologicznych koryta rzeki oraz wykreślenie izohips, obrazujących uproszczoną morfologię cokołu erozyjnego rzeki - stropu podłoża współczesnych aluwii. Następnie z poziomu bazy danych GIS wykonano mapy tematyczne przedstawiające miejsca 5-ciu awarii wałów przeciwpowodziowych i morfologię stropu podłoża aluwii w strefach elewacji cokołu erozyjnego rzeki. Analizy przestrzenne materiałów archiwalnych i wyników badań terenowych oraz ich wizualizację wykonano przy pomocy oprogramowania ArcMap (ArcGIS 9.3 firmy ESRI).

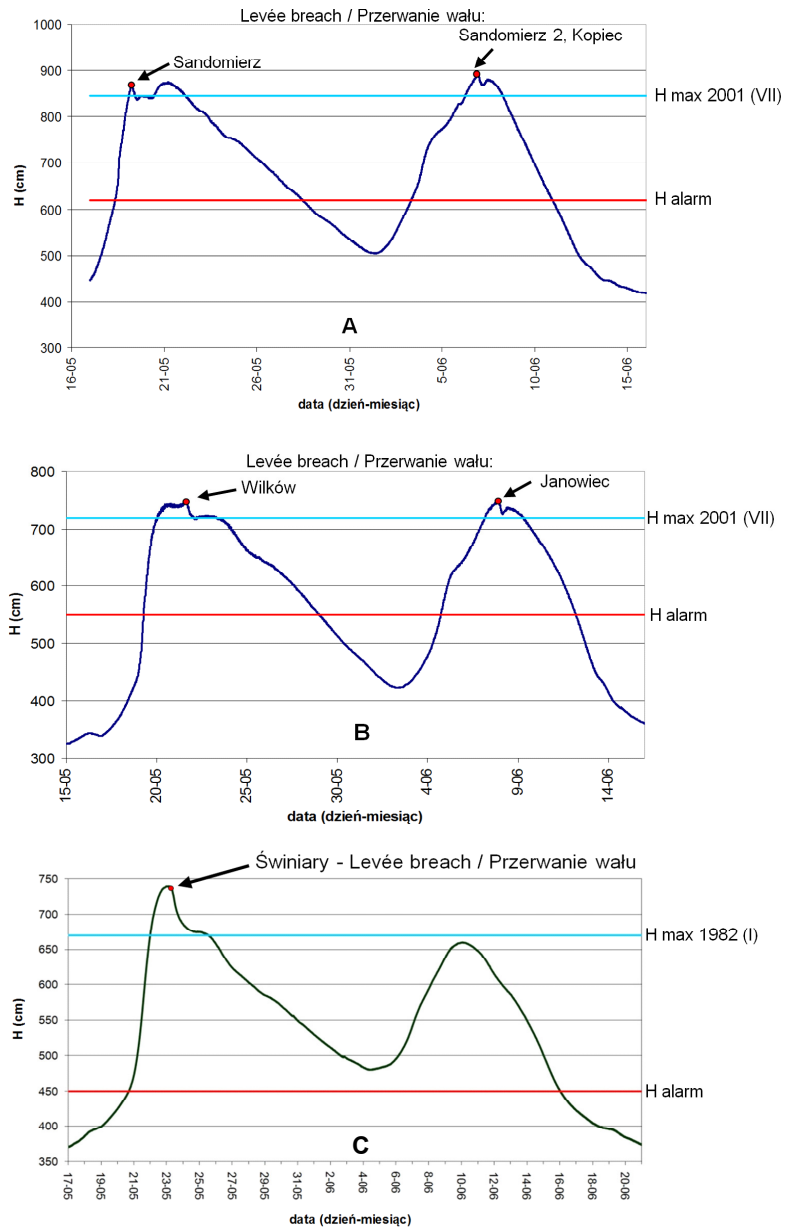
### **WYNIKI – POWÓDŹ I AWARIE WAŁÓW NA TLE BUDOWY GEOLOGICZNEJ**

Wisła w środkowym, a szczególnie w dolnym biegu jest rzeką tranzytową, więc bez uwzględnienia sytuacji hydrologicznej w górnej części jej zlewni trudno przedstawić przebieg wezbrania w analizowanych odcinkach doliny. W pierwszej połowie maja 2010 roku w zlewni Górnej Wisły wystąpiły duże opady deszczu, związane z przemieszczającymi się nad południową Polską układami niżowymi z frontami atmosferycznymi. Dobowe sumy opadów lokalnie przekroczyły 30 mm. Suma opadów dla całego okresu od 1 do 14 maja w zlewni Górnej Wisły przekroczyła 100 mm, a w jej zachodniej części zbliżyła się do 200 mm [Cebulak i in. 2011]. Intensywność tych zjawisk spowodowała, że w większości rzek zlewni Górnej Wisły zanotowano wysokie stany wód oraz wypełniony został deficyt wody w glebie, co znacznie zredukowało zdolności

retencyjne zlewni. Hydrologiczne warunki wyjściowe sprzyjały wystąpieniu ekstremalnego wezbrania przy kolejnych dużych opadach deszczu.

Od 15 maja obserwowano trwające kilka dni opady deszczu o silnym natężeniu. Były one efektem połączenia się 2 niżów (znad Alp i Morza Tyrreńskiego) i migracji nowo powstałego ośrodka niżowego znad Gór Dynarskich, przez Nizinę Węgierską i dalej nad Ukrainę, co spowodowało nad obszar Polski zwrotnikowe, gorące i wilgotne masy powietrza [Zawiślak i in. 2011]. Największe sumy opadów wystąpiły w Karpatach Zachodnich: w Beskidzie Śląskim na posterunku Ustroń-Równica w ciągu 4 dni (15-18 maja) zanotowano sumę 376 mm; na stacji synoptycznej w Bielsku-Białej suma opadów w tym okresie była równa 339 mm, co stanowiło 337% średniego miesięcznego opadu dla maja (1971-2000) i 36% rocznej sumy opadów. W trzeciej dekadzie maja w dalszym ciągu występowały opady deszczu, ale mniej intensywne – od kilku do 40 mm na dobę [Cebulak i in. 2011]. Na przełomie maja i czerwca dwa kolejne układy niskiego ciśnienia znad Niziny Węgierskiej i znad zachodniej Ukrainy przyniosły znowu bardzo obfite opady deszczu – najwyższe sumy notowano w zlewniach Dunajca, Wisłoki oraz Sanu i Wisłoka. Najwyższe miesięczne sumy opadów (w maju) osiągnęły 500% normy wieloletniej i wyniosły odpowiednio: 593,5 mm w Straconce (Beskid Mały), 591 mm w Ustroniu-Równicy (Beskid Śląski) i 522 mm Dolinie Pięciu Stawów Polskich (Tatry).

Wyżej opisana sytuacja synoptyczna spowodowała gwałtowne wzrosty stanu wody w rzekach całej zlewni Górnej Wisły. Woda z karpaccich potoków szybko spłynęła do koryta Wisły, gdzie uformowała się pierwsza fala wezbraniowa, która następnie przemieściła się w kierunku doliny Wisły Środkowej. W Zawichoście (rys. 1A) stan alarmowy został przekroczony 18 maja, a w Puławach (rys. 1B) dzień później i właśnie tego dnia doszło także do pierwszego przerwania wału w dolinie Wisły Środkowej (około 23 km poniżej Zawichostu, w Popowie (rys. 2B). Awarię tą można uznać za początek powodzi w tym odcinku rzeki. Poważniejsze straty materialne przyniosła jednak awaria z dnia 21 maja, kiedy w południe uszkodzeniu uległ fragment wału w Wilkowie (rys. 2C), zlokalizowany około 25 km powyżej wodowskazu w Puławach. Tego dnia zanotowano także kulminację fali w Zawichoście (godz. 07:00 czasu GMT,  $H=862$  cm,  $Q=5\,400$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) i w Puławach (godz. 17:00,  $H=750$ cm). Następnego dnia kulminacja fali osiągnęła Warszawę, a potem najwyżej położony fragment doliny Wisły Dolnej. Kolejnego dnia, tuż po północy zanotowano przejście kulminacji fali wezbraniowej na wodowskazie Kępa Polska (rys. 1C). Trwało ono około 7 godzin ( $H=740$ ,  $Q=6\,980$  m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) i zakończyło się awarią wału w Świniarach – 4 km poniżej Kępy Polskiej. Zdarzenie to przyniosło skutki równie katastrofalne jak w Wilkowie. Woda w miejscowościach położonych na równinie zalewowej osiągnęła wyższy poziom, niż w międzywałach, dlatego też w celu ograniczenia skutków powodzi wał został celowo przerwany także w Dobrzykowie leżącym 10 km poniżej miejsca awarii. Miało to umożliwić spływ wody z zawału w kierunku koryta.



**Rysunek 1.** Powódź 2010– stany wody na wodowskazach w dolinie Wisły Środkowej i Dolnej: A – Zawichost, B – Puławy, C – Kępa Polska

**Figure 1.** The 2010 flood on stage hydrograms in the Vistula valley:

A – Zawichost water gauge, B – Puławy water gauge, C – Kępa Polska water gauge

Druga fala wezbraniowa (powodziowa), będąca wynikiem kolejnej fali intensywnych opadów, zaznaczyła się przekroczeniem 3 czerwca stanu alarmowego na posterunku w Zawichoście i dzień później w Puławach. Spowodowała ona ponowną awarię tymczasowej zapory, wykonanej w miejscu przerwania wału w Popowie (rys. 2B). Dnia 6 czerwca o północy do identycznej sytuacji doszło w Wilkowie. Dzień później odnotowano przejście kulminacji drugiej fali w Zawichoście (godz. 1:00,  $H=891$ ,  $Q=6\ 000\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ). Dokładnie w tym samym czasie awarii uległ wał w położonej 15 km poniżej wodowskazu miejscowości Kopiec (rys. 2A). Kulminacja fali powodziowej ( $H=749$  cm) dnia 8 czerwca o północy osiągnęła Puławy. Trzy godziny wcześniej w położonym 20 km powyżej Puław Janowcu (rys. 2D) doszło do piątego przerwania wału przeciwpowodziowego. Dwa dni później kulminacja fali osiągnęła Kępę Polską w dolinie Wisły Dolnej.

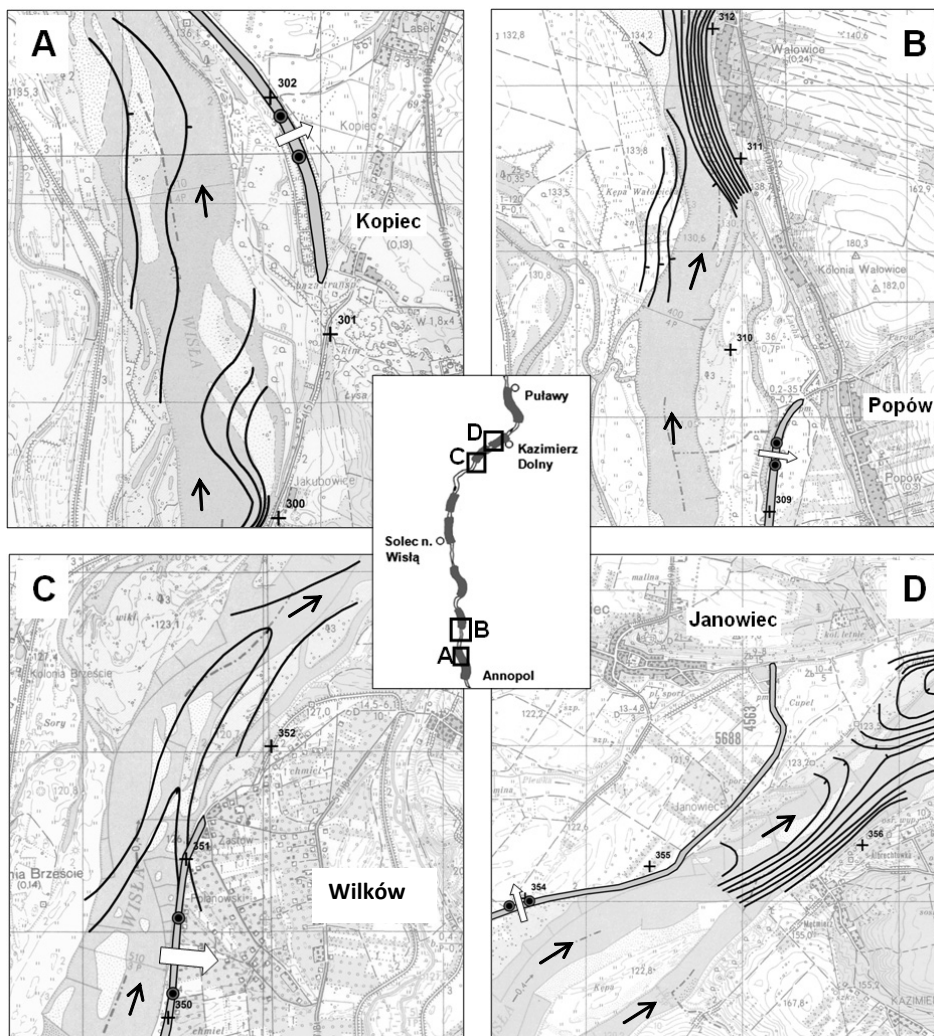
Stan alarmowy na posterunkach w Zawichoście i Puławach był przekroczony w sumie przez 10 dni w czasie przejścia pierwszej fali i przez 8 dni przy przejściu drugiej fali powodziowej. W Kępie Polskiej stan alarmowy był przekroczony bez przerwy przez 27 dni, z czego przez około 20 dni wody wezbraniowe przepływały przez przerwany wał na obszar zamieszkały i użytkowany rolniczo.

Wg klasyfikacji J. Punzeta, której kryterium jest prawdopodobieństwo wystąpienia przepływu kulminacyjnego (wyróżniającej powódzie wielkie, średnio wielkie i katastrofalnie wielkie) powódź 2010 w dolinie Środkowej i Dolnej Wisły zalicza się do katastrofalnie wielkich, bowiem przepływ osiągnął wartości przewyższające  $Q_{5\%}$  [Ostrowski i in. 2011], a w Kępie Polskiej przekroczył nawet  $Q_{2,5\%}=6\ 470\ \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (dane IMGW-PIB z wielolecia 1969-2010).

Stany wody także wskazują na to, że powódź 2010 była zdarzeniem ekstremalnym. W Zawichoście kulminacje obydwu fal powodziowych przekroczyły o 17 i 46 cm najwyższy stan w historii obserwacji wynoszący 845 cm, który zarejestrowano 28 lipca 2001 roku. W Puławach maksimum absolutne z lipca 2001 roku również zostało przekroczone o 30 i 29 cm, zaś kulminacja fali była tylko około 100 cm niższa od stanu wody w czasie historycznej powodzi z 1813 roku. W Kępie Polskiej powódź 2010 ustanowiła nowe maksimum absolutne osiągające wartość aż o 70 cm większą niż poprzednie, pochodzące z katastrofalnej powodzi zatorowej sprzed 30 lat ( $H=670$  cm z 10 stycznia 1982).

Pierwsza z analizowanych awarii wałów przeciwpowodziowych w dolinie Wisły Środkowej wystąpiła nieopodal wysokości miejscowości Kopiec (km 302) w strefie kulminacji cokołu erozyjnego ukształtowanego w postaci rozległego garbu (rys. 2A). Kolejna awaria wystąpiła w miejscowości Popów (km 309,5), około 2 km powyżej siodła, które tworzy ukształtowanie stropu podłoża aluwiiów (rys. 2B). W obu przypadkach zniszczone wały były zlokalizowane na prawym brzegu rzeki i chroniły stosunkowo wąski (do około 2 km szerokości) taras zalewowy, mający około 4 km długości. Taras ten sąsiedował bezpośrednio

ze stromymi zboczami przelomowej części doliny Wisły. Zalana powierzchnia nie była zamieszкана, co ograniczyło znacznie straty materialne.

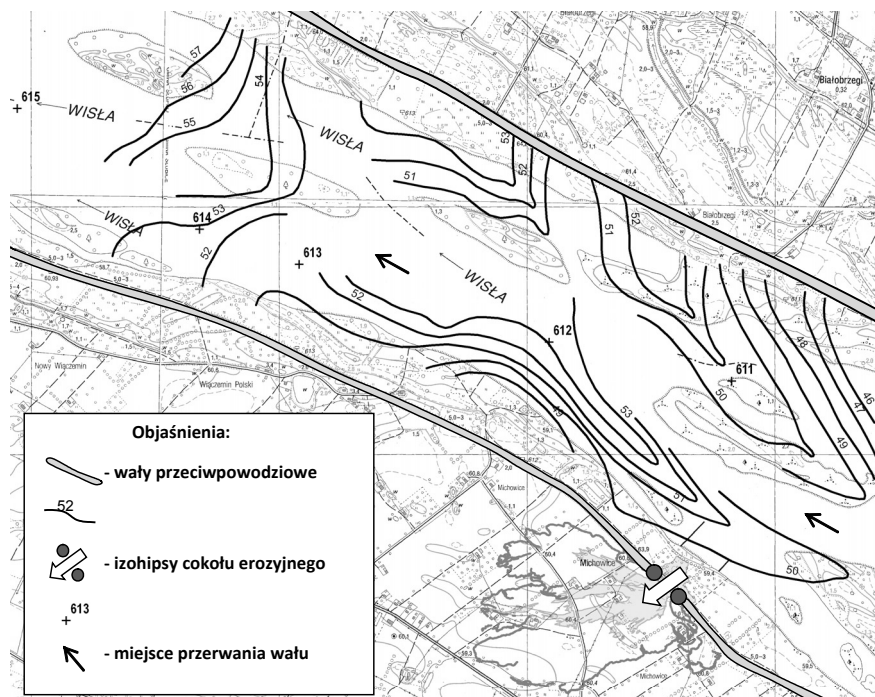


**Rysunek 2.** Miejsca awarii wałów przeciwpowodziowych i ukształtowanie cokołu erozyjnego rzeki w dolinie Wisły Środkowej: A – Kopiec, B – Popów, C – Wilków, D - Janowiec (Legenda na rys. 3)

**Figure 2.** Levéé breaches and morphology of sub-alluvial basement in mid-Vistula valley: A – Kopiec, B – Popów, C – Wilków, D – Janowiec (Legend on the Figure 3)



Znacznie poważniejsza była awaria wału w Zastowie Polanowskim (km 350,5) koło Wilkowa, w wyniku której zalana została niemalże cała powierzchnia gminy Wilków. Gmina ta obejmuje obszar bardzo szerokiej (ponad 5 km) równiny zalewowej u podnóża stromego i wysokiego (do 85 m) stoku, zwanego Skarpą Dobrską, który wznosi się ponad Małopolski Przełom Wisły i Kotlinę Chodelską ku Równinie Bełżyckiej. Awaria wału wystąpiła w miejscu, gdzie strop cokołu erozyjnego tworzy rynnę o spadku przeciwnym do biegu rzeki (rys. 2C). Kolejna z analizowanych awarii miała miejsce w okolicy Janowca (km 354), gdzie zalana została niezamieszkana lewobrzeżna część tarasu o szerokości około 2 km poniżej ujścia rzeki Chodelki będącej prawym dopływem Wisły. Awaria ta wystąpiła około 2 km powyżej siodła (rys. 2D), jakie tworzy cokoł erozyjny rzeki zlokalizowany w przełomowej części doliny między Janowcem i Kazimierzem Dolnym.



**Rysunek 3.** Miejsce awarii wału przeciwpowodziowego i ukształtowanie cokołu erozyjnego rzeki w dolinie Dolnej Wisły (Świniary)  
**Figure 3.** Levee breach and morphology of sub-alluvial basement in low-Vistula valley (Świniary)

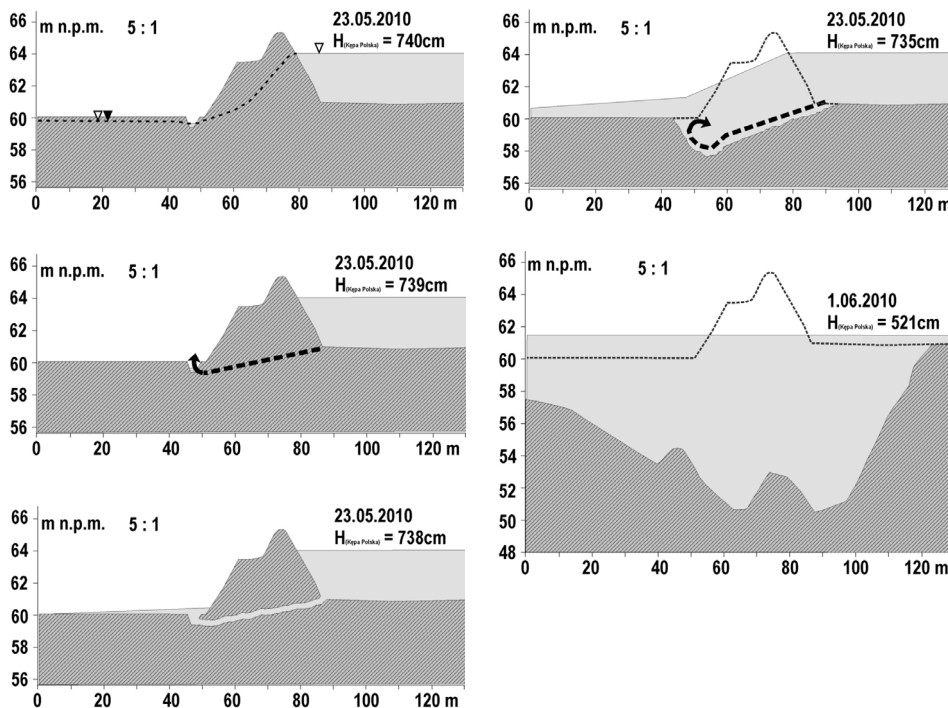
Ostatnia z analizowanych awarii miała miejsce w najniższej położonej części Kotliny Warszawskiej (dolny bieg Wisły). Dolina w tym odcinku charakteryzuje się znaczną szerokością i rozbudowanym systemem plejstocenijskich i holocenijskich tarasów. Zalany w wyniku awarii obszar, o szerokości ponad 4 km, długości ponad 10 km i powierzchnia 60 km<sup>2</sup>, był zamieszkały przez około 2500 osób i intensywnie wykorzystywany rolniczo, co spowodowało ogromne straty materialne. Awaria wału w Świniarach (km 611) wystąpiła w miejscu (rys. 3), gdzie strop cokołu erozyjnego tworzy wąską na 200 m, stanowiącą 1/5 szerokości koryta, rynną między podłużnymi garbami osiagającymi rzędną 50-53 m n.p.m. Ta wklęsła forma po około 2-3 km rozdziela się na 3 odnogi przed poprzecznym garbem. Garb ten przegradza niemal całe koryto i ukryty jest pod cienką warstwą aluwii, rzędna jego stropu przekracza 56 m n.p.m. Warto zauważyć, że w opisywanym fragmencie doliny cokoł erozyjny rzeki na odcinku około 4 km podnosi się o ponad 10 m, podczas gdy poziom wody w korycie (oraz poziom dna koryta) obniża się nieco ponad 0,5 m zgodnie ze spadkiem podłużnym rzeki wynoszącym około 0,14 ‰.

#### **DYSKUSJA – WPLYW BUDOWY GEOLOGICZNEJ NA AWARIE WAŁÓW**

Wyniki badań zaprezentowane w poprzednim rozdziale (rys. 2, 3) wskazują, że prawdopodobnie istnieje związek przestrzenny między miejscami uszkodzenia wałów przeciwpowodziowych a kulminacjami cokołu erozyjnego, nie wyjaśniają jednak mechanizmu samego procesu prowadzącego do zniszczenia wałów podczas ekstremalnego wezbrania. Wszystkie awarie wałów przeciwpowodziowych w dolinie Środkowej Wisły były efektem sufozji w warunkach wysokiego spadku hydraulicznego, czyli zjawiska opisywanego jako „zniszczenie hydrauliczne” [Jakimiuk 2010].

Podobnej przyczyny można upatrywać w awarii wału w Świniarach w Kotlinie Warszawskiej, gdzie w czasie zimy 2010/2011 długo utrzymywały się wysokie stany wody związane z występowaniem zjawisk lodowych, a 50 dni przed awarią zanotowano ekstremalnie wysokie wezbranie – stan wody znacznie przekroczył maksimum absolutne w Kępie Polskiej i zbliżony był do obserwowanego w czasie powodzi 2010 [Wierzbicki, Mazgajski 2011]. Tak wysokie stany wody w rzece ograniczonej wałami przeciwpowodziowymi powodują powstanie dużego spadku hydraulicznego w przekroju poprzecznym wału (rys. 4A). Długotrwałe lub wielokrotne w krótkich odstępach czasu oddziaływanie tego czynnika może prowadzić do filtracji pod stopą wału. Występowanie tego zjawiska stwierdzono w Świniarach jeszcze przed zimowym wezbraniem zatorowo-roztopowym i prognozowano tam potencjalną awarię podczas powodzi [Ministerstwo Środowiska 2010]. Filtracji w warunkach wysokiego spadku hydraulicznego może towarzyszyć proces sufozji (rys. 4B). Jeśli proces ten będzie zachodził z dużą intensywnością, to powstanie tunel sufozyjny (rys. 4C), co

prowadzi do poważnej awarii hydrotechnicznej - zapadnięcia korpusu wału przeciwpowodziowego. Następstwem takiej awarii jest intensywny przepływ poprzez „wyrwę” w wale i w konsekwencji powódź. W Świniarach przepływ wody przez uszkodzony wał miał charakter turbulentny, bowiem moc strumienia w miejscu przerwania była prawie 100 razy większa niż w korycie Wisły, a jednostkowa moc strumienia była prawie 1000 razy większa niż w korycie Wisły



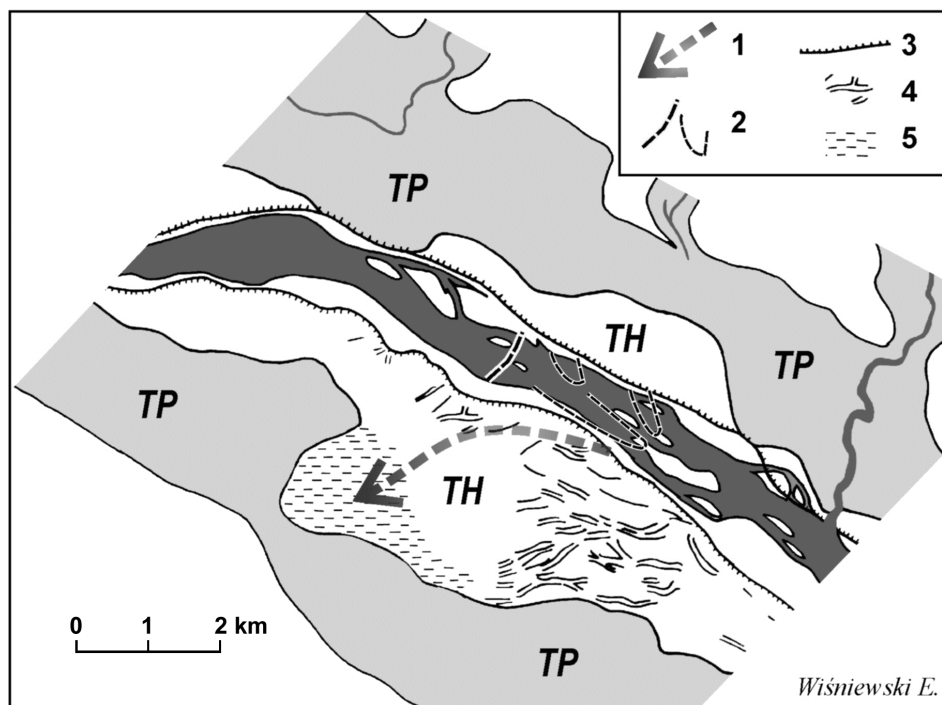
**Rysunek 4.** Model uszkodzenia wału przeciwpowodziowego w dolinie Dolnej Wisły (Świniary) w czasie powodzi 2010: A – spadek hydrauliczny około 10-15%, B – filtracja pod stopą wału i inicjacja sufozji, C – powstanie tunelu sufozyjnego, D – przerwanie wału, intensywna erozja głębna, E – rozmiary kotła eworsyjnego po przejściu pierwszej fali (na podstawie opracowania [Hydroprojekt, 2010])

**Figure 4.** The model describing levée breach process in low-Vistula valley (near Świniary village) during the 2010 flood: A – hydraulic gradient ca. 0,10-0,15, B – underseepage and initiation of piping under embankment toe, C – piping forms pipe under embankment toe, D – levée breach, scouring, E – scour pothole after the first floodwave passing by (on the basis of: [Hydroprojekt, 2010])

[Wierzbicki G. i in. 2012]. Skutkiem tych niezwykle intensywnych procesów hydrodynamicznych było powstanie form rzeźby typowych dla gwałtownego wtargnięcia wód wezbraniowych na równinę zalewową: kotła eworsyjnego, krewasy i glifu krewasowego [Wierzbicki i in. 2012]. O dynamice procesów erozyjnych (rys. 4D) świadczyć może fakt, że w miejscu przerwania wału w ciągu kilku dni przejścia pierwszej fali powodziowej powstał kocioł eworsyjny o głębokości ponad 10 m (rys. 4E).

Zaprezentowany powyżej model awarii wału w dolinie Dolnej Wisły oraz wspomniane wcześniej cztery awarie z doliny Wisły Środkowej nie były wywołane działaniem erozji bocznej wymuszonej morfologią cokołu erozyjnego rzeki [Falkowski T., 2007].

W przypadku wezbrań występujących w rzece z systemem wałów przeciwpowodziowych należy przyjąć inną koncepcję wpływu budowy geologicznej na ich przebieg. W rzece pozbawionej sztucznych obwałowań kulminacje podłoża aluwiiów prawdopodobnie indukują na powierzchni równiny zalewowej wzmożoną erozję i depozycję osadów wezbraniowych facji glifów krewasowych i wałów przykorytowych. Osady te akumulują się wzdłuż koryt rzecznych i zasypują powierzchnię równiny zalewowej tworząc tzw. „grzbiet aluwialny” (alluvial ridge) [Bridge 2003]. Proces ten powtarzał się w dolnej części Kotliny Warszawskiej w ciągu ostatniego tysiąca lat, podczas każdego wezbrania, prowadząc do rozwoju tarasu holoceniowego rzeki roztokowej, który przykrył starszą powierzchnię tarasu holoceniowego rzeki meandrującej [Chormański, Mycielska Dowgiałło 1996, Florek i in. 1987]. Pozostała (pozbawiona akumulacji tego typu osadów) część równiny zalewowej stała się obszarem depresyjnym w stosunku do współczesnego koryta rzeki (rys. 5). Wykonane w XX wieku obwałowania przeciwpowodziowe i melioracja równiny zalewowej sprawiają, że w czasie dużych wezbrań poziom wody na międzywału znajduje się ponad 7 m wyżej niż poziom terenu w depresyjnej części tarasu zalewowego. Infiltracji w takich warunkach hydrodynamicznych sprzyjają dobrze przepuszczalne dla wody osady facji glifu krewasowego [Gębica, Sokołowski 2001, Szymańska 2011]. Z tych względów Wisła w dolnej części Kotliny Warszawskiej podczas wezbrań staje się rzeką infiltrującą. W dolinie ma miejsce stosunkowo intensywny odpływ podziemny z międzywału w kierunku depresyjnej części równiny zalewowej (rys. 5), co sprzyja filtracji i sufozji pod stopą wału. Podobne zależności występują także w dolinie Wisły Środkowej. Zostaną one przedstawione przez autorów w postaci numerycznego modelu hydrogeologicznego i zaprezentowane w innym artykule.



**Rysunek 5.** Mapa geomorfologiczna doliny Dolnej Wisły: 1- droga infiltracji wód w czasie wezbrań, 2 – kulminacje cokołu erozyjnego, 3 – wały przeciwpowodziowe, 4 – krewasy i glify krewasowe, 5 – depresyjna część równiny zalewowej, TH – tarasy holoceni (równina zalewowa), TP – tarasy plejstoceni. Opracowano na podstawie: [Florek i in., 1987]

**Figure 5.** Geomorphological map of the low-Vistula valley: 1 – underseepage course during floods, 2 – protrusion of the sub-alluvial basement, 3 – artificial levee, 4 – crevasse channels and splays, 5 – floodplain depression, TH – Holocene terraces (floodplain), TP – Pleistocene terraces. On the basis of: [Florek et al., 1987]

## WNIOSKI

1. Powódź 2010 w dolinie Wisły Środkowej i Dolnej była następstwem rekordowo intensywnych opadów deszczu w zlewni Górnej Wisły. W świetle statystyki stanów wody i przepływów należy ją zaliczyć do ekstremalnych zjawisk hydrologicznych.

2. Prawdopodobnie istnieje związek przestrzenny między awariami wałów przeciwpowodziowych a kulminacjami cokołu erozyjnego rzeki.

3. Wpływ budowy geologicznej dolin rzecznych na przebieg powodzi objawia się w zróżnicowaniu przepuszczalności osadów budujących koryto i równinę zalewową (a nie tylko podłoże wału), które wymusza określone drogi filtracji prowadzące przy wysokich stanach wody do sufozji pod wałami przeciwpowodziowymi, a następnie do ich awarii przez „zniszczenie hydrauliczne”.

4. Brak opinii geomorfologów i geologów w dyskusji nad ochroną przeciwpowodziową w dużych dolinach rzecznych prowadzi do niepełnego, a nawet błędnego postrzegania problemu powodzi i jej uwarunkowań przyrodniczych.

## BIBLIOGRAFIA

- Bridge J.S., *Rivers and floodplains – forms, processes, and sedimentary record*. Blackwell, Oxford 2003, ss. 491.
- Cebulak E., Kilar P., Milanówka D., Mizera M., Pyrc R. *Wysokość, natężenie i przestrzenny rozkład opadów atmosferycznych* [w:] Maciejewski M., Ostojski M. S., Walczykiewicz T. [red.] *Dorzecze Wisły monografia powodzi maj czerwiec 2010*. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa, 2011, s.27-41.
- Chormański J., Mycielska-Dowgiałło E., *Ewolucja doliny Wisły od Kępy Polskiej do Płocka w okresie ostatniego zlodowacenia i holocenu* [w:] Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z. [red.] *Ekologiczne podstawy zagospodarowania dolin rzecznych (na przykładzie Wisły pod Płockiem)*, Towarzystwo Naukowe Warszawskie, Warszawa 1996, s.97-112.
- Falkowski T. *Naturalne czynniki stabilizujące wybrane odcinki strefy korytowej Wisły środkowej*. Wyd. SGGW, Warszawa, 2006, ss.128.
- Falkowski T. *The application of geomorphological analysis of the Vistula River, Poland in the evaluation of the safety of regulation structures*. Acta Geologica Polonica nr 57/3, 2007, s. 377-390.
- Falkowski T., Ostrowski P. *Rzeźba doliny Pilicy pomiędzy Inowłodzem a Domaniewicami i jej związek z budową geologiczną podłoża aluwiiów*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich nr 9/2010, s.53-63.
- Florek E., Florek W., Mycielska-Dowgiałło E., *Morphogenesis of the Vistula valley between Kępa Polska and Plock in the Late Glacial and Holocene* [w:] Starkel L. [red.] *Evolution of the Vistula river valley during the last 15 000 years*. Geographical Studies Special Issue nr 4 (2), 1987, s.189-205.
- Gębica P., Sokołowski T., *Sedimentological interpretation of crevasse splays formed during the extreme 1997 flood in the upper Vistula river valley (South Poland)*. Annales Societatis Geologorum Poloniae nr 71, 2001, s.53-62.
- Hydroprojekt. Opracowanie. *Przebieg powodzi 2010 w Dolinie Iłowsko-Dobrzykowskiej w m. Świniary i Dobrzyków*. Hydroprojekt Sp. z o.o., Biuro Regionalne we Włocławku, Włocławek, 2010, ss. 23.
- Jakimiuk S., *Przyczyny i skutki powodzi w 2010 r. na terenie woj. lubelskiego*. Konferencja „Uwarunkowania przebiegu skutków ekstremalnych zjawisk hydrologiczno-meteorologicznych w obszarach wiejskich” prezentacja PDF, Falenty, 2010, [online] <http://www.itep.edu.pl/>

- konferencje/ko20101201/7\_Przyczyny%20i%20skutki%20powodzi%202010.pdf [dostęp: 08.05.2012]
- Kondracki J. *Geografia Regionalna Polski*. PWN, Warszawa 2011, ss. 444.
- Łajczak A., Plit J., Soja R., Starkel L., Warowna J. *Changes of the Vistula river channel and floodplain in the last 200 years*. *Geographia Polonica* nr 79(2), 2006, s.65-87.
- Ministerstwo Środowiska RP. Odpowiedź sekretarza stanu – z upoważnienia ministra – na zapytanie nr 5740 w sprawie zagrożenia powodziowego na Wiśle w rejonie Wyszogrodu, Kępy Polskiej i Płocka. [online] <http://orka2.sejm.gov.pl/IZ6.nsf/main/5E4CD825> [dostęp 08.05.2012]
- Szmańda J., *Zapis warunków depozycji w uziarnieniu aluwiiów pozakorytowych*. *Landform Analysis* nr 18, 2011, ss.96 [online] <http://www.sgp.org.pl/la/lav18.htm>
- Ostrowski J., Zaniewska M., Wereski S. *Powodzie historyczne w środkowej i dolnej części dorzecza Wisły* [w:] Maciejewski M., Ostojski M. S., Walczykiwicz T. [red.] *Dorzecze Wisły monografia powodzi maj czerwiec 2010*. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa, 2011, s.83-86.
- Wierzbicki G., Mazgajski M. *Wezbraniowe zatorowe rzeki Wisły w Kotlinie Warszawskiej w lutym i marcu 2010 roku*. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska* nr 51, 2011, s.52-60.
- Wierzbicki G., Ostrowski P., Mazgajski M., Bujakowski F. *Using VHR multispectral remote sensing and LIDAR data to determine the geomorphological effects of overbank flow on a floodplain (the Vistula River, Poland)*. *Geomorphology*, 2012. [online] <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.06.020>
- Zawiślak T., Adamczyk Z., Bąkowski R. *Synoptyczne uwarunkowania powodzi* [w:] Maciejewski M., Ostojski M. S., Walczykiwicz T. [red.] *Dorzecze Wisły monografia powodzi maj czerwiec 2010*. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa, 2011, s.83-86

Mgr Grzegorz Wierzbicki  
e-mail: [grzegorz\\_wierzbicki@sggw.pl](mailto:grzegorz_wierzbicki@sggw.pl)

Dr inż. Piotr Ostrowski  
e-mail: [piotr\\_ostrowski@sggw.pl](mailto:piotr_ostrowski@sggw.pl)

Mgr Filip Bujakowski  
e-mail: [filip\\_bujakowski@sggw.pl](mailto:filip_bujakowski@sggw.pl)

Katedra Geoinżynierii  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
ul. Nowoursynowska 166  
02-787 Warszawa

Mgr Mirosław Samulski  
e-mail: [miroslaw.samulski@imgw.pl](mailto:miroslaw.samulski@imgw.pl)  
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej  
ul. Podleśna 61  
01-673 Warszawa

