

## Rozwój i określenie przyczyn osuwiska na skarpie zbiornika wodnego po odkrywkowej kopalni siarki „Piaseczno”

Jerzy Flisiak<sup>1</sup>, Zbigniew Frankowski<sup>2</sup>, Andrzej Haładus<sup>1</sup>, Edyta Majer<sup>2</sup>,  
Michał Kowalski<sup>1</sup>, Paweł Pietrzykowski<sup>2</sup>, Stanisław Rybicki<sup>1</sup>



J. Flisiak      Z. Frankowski      A. Haładus      E. Majer      M. Kowalski      P. Pietrzykowski      S. Rybicki

**Development and causes of the landslide in a water reservoir escarpment, the former "Piaseczno" sulphur open-cast mine.**  
Prz. Geol., 62: 190–197.

*Abstract.* The landslide in the southern part of the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir was activated on 11<sup>th</sup> May 2011. The reservoir is a former open-cast sulphur mine and the landslide occurred in its internal dump. The volume of moved soil was estimated at 1 mln m<sup>3</sup>. The paper presents the development of the landslide that firstly occurred in the lower part of the escarpment and next moved to the upper parts far from the reservoir's boundaries. The landslide movement can be described as a regressive flow of saturated soil mass. The paper also discusses the research on the subject of the landslides and the stability analyses, as well as the influence of various factors.

**Keywords:** internal dump landslide, escarpment stability, open-cast sulphur mine

Wyrobiska poeksploatacyjne kopalni odkrywkowych są likwidowane najczęściej przez utworzenie w nich zbiornika wodnego. Wypełnianie takiego wyrobiska wodą stwarza problemy z utrzymaniem stateczności jego skarp. Szczególnie wrażliwe na zaburzenia stateczności są skarpy uformowane z gruntów zwałowiska wewnętrznego, wypełniającego część likwidowanej odkrywki kopalni. Grunty zwałowe, jako mieszanina gruntów z nadkładu złoża, są rozluźnione i słabo zagęszczone, charakteryzują się też obniżoną wytrzymałością na ścinanie w stosunku do gruntów rodzimych (Rybicki, 1986; Rybicki & Woźniak, 1994). Drugą ważną ich cechą jest brak jednorodności wykształcenia litologiczno-facjalnego. Losowa zmienność w zaleganiu gruntów różnego typu (grunty niespoiste, spoiste oraz ich mieszaniny) w zwałowisku wewnętrznym wynika z technologicznych procesów jego formowania. Utrudnia to ocenę budowy geologicznej zwałowiska i właściwości fizyczno-mechanicznych jego poszczególnych części, a w konsekwencji prognostyczną analizę stateczności skarp w warunkach zalewania wyrobiska poeksploatacyjnego wodą. Trudności te pogłębia postępująca w czasie zmiana parametrów fizyczno-mechanicznych gruntu zwałowego (zwłaszcza spoistego) związana głównie z jego zagęszczaniem się pod wpływem własnego ciężaru i powodowana dodatkowymi czynnikami, takimi jak procesy wietrzeniowe, wzrost zawilgocenia i rozmakanie po opadach atmosferycznych oraz podsiąkanie wody (Rybicki i in., 1995; Woźniak, 2009a, b;

Rybicki & Woźniak, 2010). Dlatego też każdy przypadek osuwiska skarpy poeksploatacyjnego zbiornika wodnego wymaga wnikliwego rozpoznania warunków i przyczyn jego powstania, zarówno ze względów poznawczych, jak i praktycznych. Osuwiska takie mają na ogół gwałtowny przebieg, duże rozmiary i są przyczyną uszkodzeń infrastruktury w pobliżu wyrobiska (Wichter, 2007), a także, jak w przypadku osuwiska na zachodniej skarpie zbiornika wodnego po odkrywce kopalni siarki „Piaseczno”, powodują zagrożenie życia ludzkiego.

### WYROBISKO POEKSPLOATACYJNE KOPALNI SIARKI „PIASECZNO” – WARUNKI GEOLOGICZNO-GÓRNICZE I HYDROGEOLOGICZNE

Wyrobisko poeksploatacyjne kopalni siarki „Piaseczno” w okolicach Tarnobrzega położone jest na terasie lewego brzegu Wisły, w odległości ok. 1,5 km od koryta rzeki. Zachodnią część wyrobiska wypełniają grunty zwałowiska wewnętrznego, wschodnią zajmuje zbiornik wodny o powierzchni ok. 62 ha i maksymalnej głębokości ok. 30 m (ryc. 1).

W profilu geologicznym w rejonie wyrobiska najwyższą pozycję zajmują czwartorzędowe (plejstocen, holocen) utwory piaszczysto-żwirowe z wkładkami glin lub utworów pylastych. Przypowierzchniowa seria tych gruntów to

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; flisiak@agh.edu.pl, haladus@agh.edu.pl, kowalski@agh.edu.pl, srybicki@agh.edu.pl.

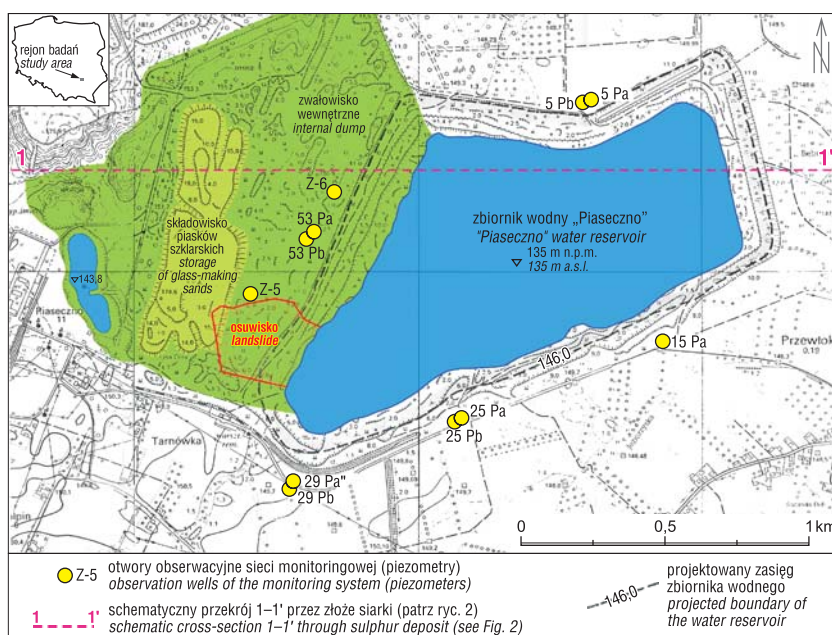
<sup>2</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; zbigniew.frankowski@pgi.gov.pl, edyta.majer@pgi.gov.pl, pawel.pietrzykowski@pgi.gov.pl.

holoceńskie utwory rzeczno-zastoiskowe (piaski humusowe, mułki, gliny). Miąższość utworów czwartorzędowych dochodzi niekiedy do 25 m, a przeciętnie wynosi 5–10 m. Poniżej występują utwory miocenu – ły krakowieckie (zwięzłe ły, iłowce) o miąższości 10–15 m, a pod nimi wapienie siarkonośne, wapienie płonne i gipsy tzw. serii chemicznej o miąższości 4–18 m. Serię chemiczną podścielają warstwy baranowskie, wykształcone jako piaski i słabo scementowane piaskowce o miąższości do 40 m. Utwory miocenu spoczywają na starszym podłożu zbudowanym z łupków kambryjskich (ryc. 2). Skarpy okalające zbiornik wodny wyrobiska „Piaseczno” są wyprofilowane w większości w rodzimych utworach czwartorzędowych oraz w miocennych iłach krakowieckich, a także w serii wapieni siarkonośnych. Zachodnia skarpa zbiornika wodnego jest zbudowana z gruntów zwałowiska wewnętrznego, będących mieszaniną utworów z nadkładu złoża siarki.

Skarpy zbiornika wodnego w gruntach rodzimych mają wysokość 5–25 m, najczęściej 7–12 m. Ich nachylenie wynosi odpowiednio: w utworach czwartorzędowych 25–32°, w miocennych iłach krakowieckich 12–34°, a w wapieniach serii chemicznej 20–65°. Półki między skarpami sprawiają, że ogólne nachylenie skarpy (zespołu skarpy) w gruntach rodzimych wynosi 4–13°.

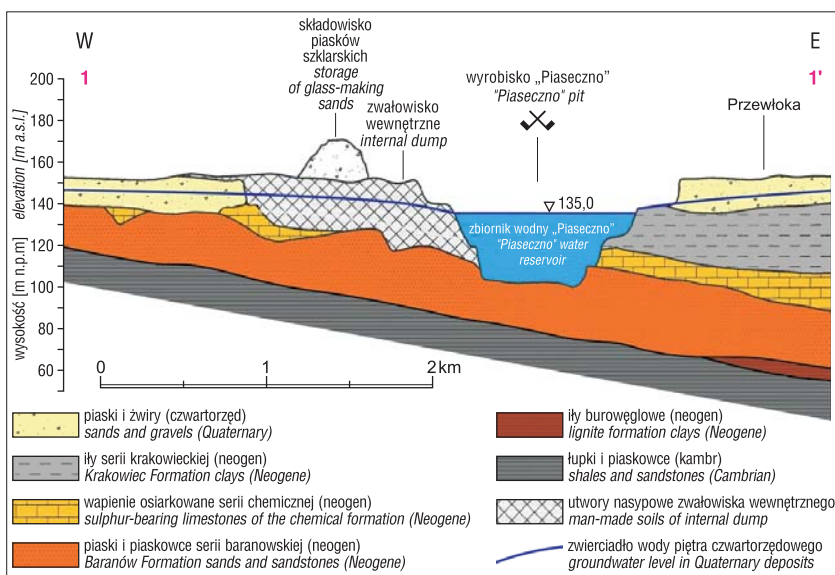
Skarpy w gruntach zwałowych są ukształtowane odpowiednio pod kątem: 18–36° w górnym piętrze zwału (wysokość skarpy to 7,8–9,6 m), 9,2–13,7° w północnej części dolnego piętra zwału i 21,1–35° w jego południowej części, w rejonie powstałego osuwiska. Skarpa piętra dolnego miała wysokość 23–27,5 m w północnej części, a 10–18 m w części południowej. Ogólny kąt nachylenia skarpy w gruntach zwałowych wynosił 7,5°, jednak w miejscu powstania osuwiska był większy i sięgał 10–11°.

Po zakończeniu eksploatacji siarki w 1971 r. oraz piasków baranowskich w 1980 r. w zbiorniku wodnym kopalni „Piaseczno” zwierciadło wody utrzymywano do stycznia 1996 r. na rzędnej 114 m n.p.m., a w październiku tego roku osiągnęło ono poziom 122 m n.p.m. Wyrobisko poeksploatacyjne kopalni „Piaseczno” odwadniane jest za pomocą pomp powierzchniowych. W dalszym otoczeniu, w odległości 1–1,2 km od wyrobiska, zwierciadło wód poziomów czwartorzędowego i neogeńskiego utrzymuje się na rzędnej 145 m n.p.m. (ryc. 3). Efektem prowadzonego odwodnienia jest stały dopływ wód do wyrobiska, głównie od strony zachodniej (spadek hydrauliczny  $I$  wynosi 0,05–0,1). Można przy-



Ryc. 1. Mapa lokalizacyjna zwałowiska wewnętrznego oraz zbiornika wodnego „Piaseczno” („Dokumentacja geologiczno-inżynierska...”, 2011)

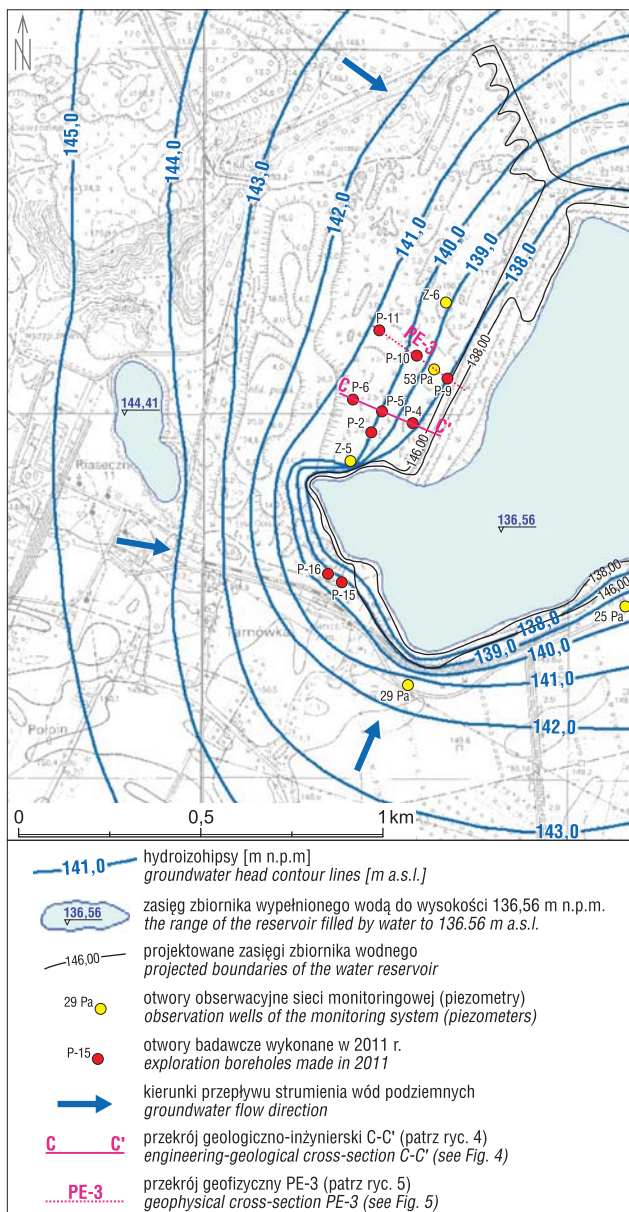
Fig. 1. Locality map of internal dump and "Piaseczno" water reservoir („Dokumentacja geologiczno-inżynierska...”, 2011)



Ryc. 2. Schematyczny przekrój 1–1' przez złożę siarki w rejonie nieczynnej odkrywkowej kopalni „Piaseczno” (lokalizacja na ryc. 1)

Fig. 2. Schematic cross-section 1–1' through sulphur deposit in the area of closed open-cast mine "Piaseczno" (for location see Fig. 1)

puszczać, że jest to przyczyną długotrwałych procesów sufozji, zwłaszcza w słabo zagęszczonych gruntach zwałowiska wewnętrznego, oraz dodatkowego rozluźnienia ich struktury, przede wszystkim w strefach zwałowiska zbudowanych z gruntów piaszczystych. Dalsze podnoszenie zwierciadła wody w zbiorniku po 2009 r. było związane z likwidacją odkrywki „Machów” i zakończeniem jej odwodnienia. Spowodowało to, że w 2011 r. zwierciadło wody w zbiorniku „Piaseczno” utrzymywało się na rzędnej 135 m n.p.m. i przy tym stanie wody w maju 2011 r. powstało osuwisko w południowej części zachodniego zbocza zbiornika. Należy podkreślić, że z uwagi na ogólne



Ryc. 3. Położenie zwierciadła wody w zbiorniku wodnym „Piaseczno” i jego otoczeniu w 2011 r.

Fig. 3. Groundwater level in the "Piaseczno" water reservoir and its surrounding in 2011

pochylenie warstw gruntu i złoże wapieni siarkonośnych z zachodu na wschód spąg zwałowiska znajduje się na rzędnych 115–119 m n.p.m. w pobliżu krawędzi lustra wody w zbiorniku i 120–126 m n.p.m. w pewnej odległości od tej krawędzi (ryc. 2). Podniesienie lustra wody w zbiorniku od 122 m n.p.m. do 135 m n.p.m. doprowadziło więc do pełnego zawodnienia gruntów zwałowych. W rejonie powstałego osuwiska przeważają piaski drobne i średnie (z wkładkami gruntu spoistego), które zalegają na warstwie utworów określanych jako ility, ility krakowieckie lub ility margliste, o miąższości 1,5–4 m, pozostawionej w trakcie eksploatacji złoże na wapieniach siarkonośnych lub wapieniach płonnych („Dokumentacja geologiczno-inżynierska...”, 2011). Strop iłłów zalega na rzędnej 126 m n.p.m. w zachodniej części rejonu osuwiska i 121 m n.p.m. we wschodniej przy granicy zbiornika. Gdy zwierciadło wody w zbiorniku było położone na rzędnej 122 m n.p.m., strop

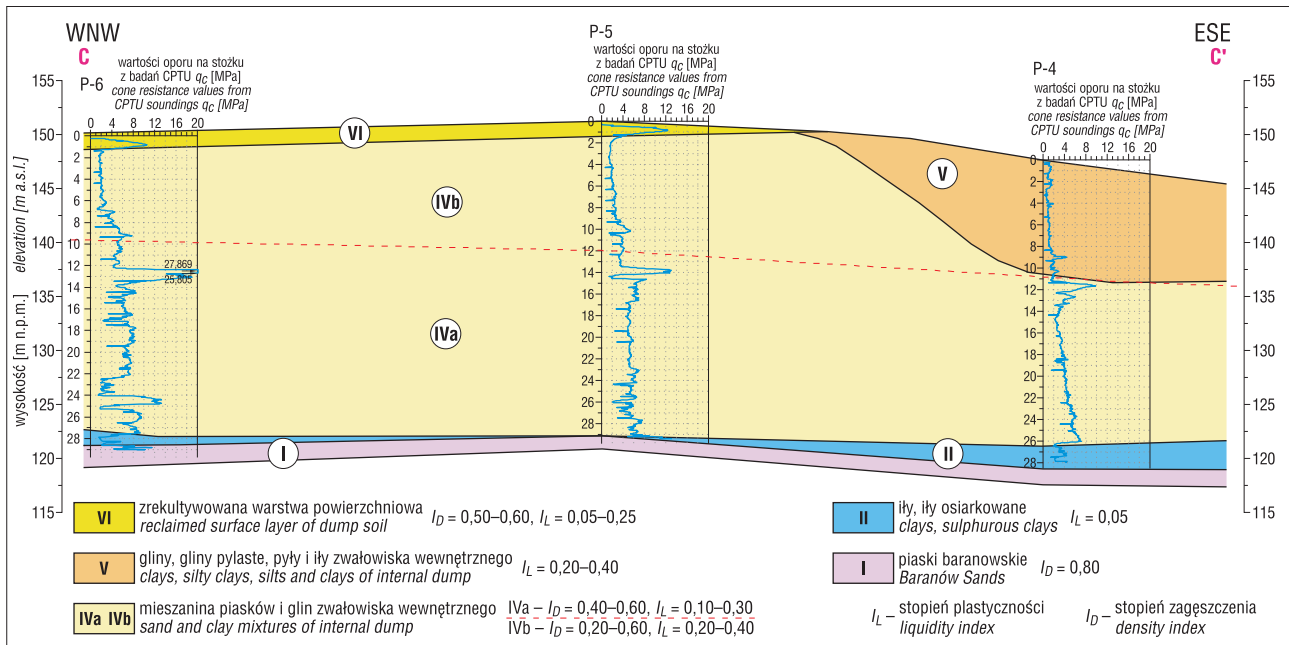
iłłów znajdował się prawie na całej długości powyżej tego zwierciadła, a po podniesieniu zwierciadła wody w zbiorniku do rzędnej 135 m n.p.m. został w pełni zawodniony.

### BUDOWA GEOLOGICZNA I WŁAŚCIWOŚCI GRUNTÓW ZACHODNIEJ SKARPY ZBIORNIKA WODNEGO

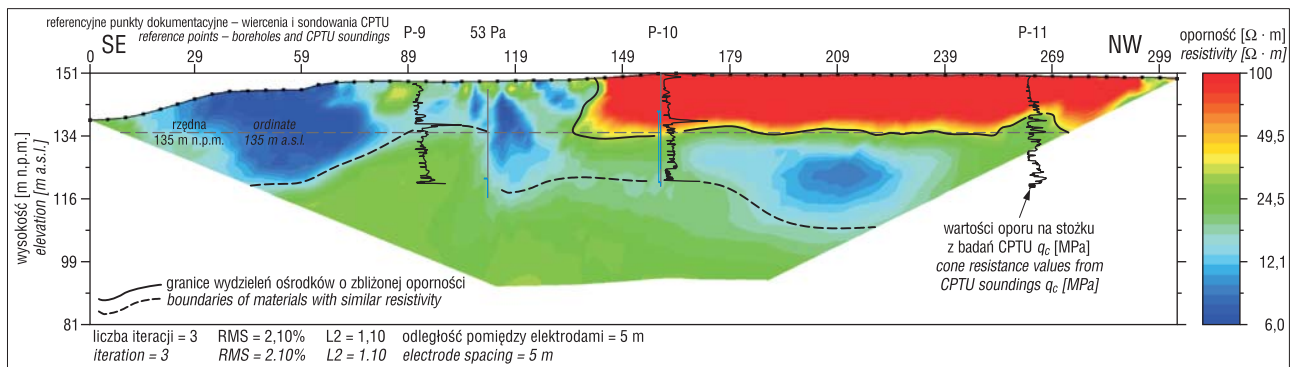
W skład gruntów zwałowych zachodniej części wyrobiska wchodzić utworów czwartorzędowe i neogeńskie, które stanowiły nadkład złoże siarki. Ze stosunku miąższości, a także ze składu litologicznego gruntów rodzimych nadkładu złoże wynika, że grunty niespoiste (piaski drobne i średnie, podrzędnie żwiry i pospółki, często zailone) i spoiste, głównie z serii iłłów krakowieckich (gliny pylaste, gliny piaszczyste, ility pylaste), stanowią po ok. 50%. Lokalnie tworzą one mieszaniny bryłek gruntu spoistego z gruntem piaszczystym, a najczęściej występują w postaci różnej wielkości skupień (gniazd, przewarstwień itp.) samego gruntu piaszczystego albo ilasto-gliniastego. Rozmieszczenie gruntów jest przypadkowe. Jak już wspomniano, wiąże się to z procesem urabiania i zwałowania gruntów nadkładowych w czasie eksploatacji górniczej. Wyniki wcześniejszego rozpoznania wierceniami, ja również wyniki badań geofizycznych, sondowań CPTU i wierceń prowadzonych po powstaniu osuwiska wskazują, że w jego rejonie i ogólnie na zachodniej skarpie zbiornika w dolnych partiach przeważają grunty piaszczyste, a w górnych spoiste. Taki układ gruntów zwałowych występuje zwłaszcza w przylegającej do zbiornika strefie skarpy zachodniej o szerokości 150–350 m (ryc. 4–6).

Właściwości fizyczno-mechaniczne gruntów zwałowiska wewnętrznego na skarpie zachodniej określono przed powstaniem osuwiska i już po nim, na podstawie wyników zarówno badań próbek gruntowych pobranych z wierceń, jak i sondowań CPTU (po powstaniu osuwiska). Spoiste partie gruntu zwałowego, zależnie od składu, zawilgocenia i położenia w zwale, miały różny stan konsystencji, od półzwarego do miękkoplastycznego, najczęściej jednak twardoplastyczny powyżej zwierciadła wody w zwale i plastyczny poniżej zwierciadła. Na podstawie wyników badań określono parametry wytrzymałości na ścinanie gruntów w zwale. W pierwszym przypadku wynosiły one: kąta tarcia wewnętrznego  $\varphi = 15,4^\circ$  (11,8–24,4°), spójność  $c = 31,3$  kPa (14,7–49 kPa), a w drugim  $\varphi = 8^\circ$  (4–9,9°) i  $c = 21,6$  kPa (14,7–24,5 kPa).

Niespoiste partie gruntu zwałowego, zgodnie z wynikami sondowań CPTU, powyżej zwierciadła wody w zwale znajdowały się głównie w stanie luźnym (opór stożka sondy  $q_c \cong 1\text{--}5$  MPa), poniżej zaś częściej w stanie średniozagęszczonym ( $q_c \cong 4\text{--}7$  MPa) lub na granicy ze stanem luźnym. W przypadku gruntów luźnych (stopień zagęszczenia gruntu  $I_D = 0,2$ ) i średniozagęszczonych ( $I_D = 0,45$ ) wartości wskaźnika zagęszczenia obliczone według wzoru [4.33] podanego w pracy Pisarczyka (1999) wynoszą odpowiednio  $I_s = 0,89$  i  $I_s = 0,93$ . Słabo zagęszczony grunt zwałowy w zachodniej skarpie zbiornika jest więc szczególnie podatny na deformacje filtracyjne wynikające ze zmian położenia zwierciadła wody. Związek słabego zagęszczenia gruntów zwałowych z ich podatnością na deformacje filtracyjne w skarpach zbiorników wodnych podkreślany jest także w literaturze naukowej dotyczącej zwłaszcza



**Ryc. 4.** Przekrój geologiczno-inżynierski C-C' prostopadły do zachodniej skarpy zbiornika wodnego „Piaseczno” (lokalizacja na ryc. 3)  
**Fig. 4.** Engineering and geological cross-section C-C' perpendicular to the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir (for location see Fig. 3)



**Ryc. 5.** Przekrój geofizyczny PE-3 prostopadły do zachodniej skarpy zbiornika wodnego „Piaseczno” („Dokumentacja geologiczna...”, 2011; lokalizacja na ryc. 3)  
**Fig. 5.** Geophysical cross-section PE-3 perpendicular to the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir („Dokumentacja geologiczna...”, 2011; for location see Fig. 3)

przykładów osuwisk zwałów w pokopalnianych zbiornikach wodnych wschodnich Niemiec i wyników eksperymentów laboratoryjnych (Krajewski, 1972; Dmitruk i in., 1998; Wichter, 2007).

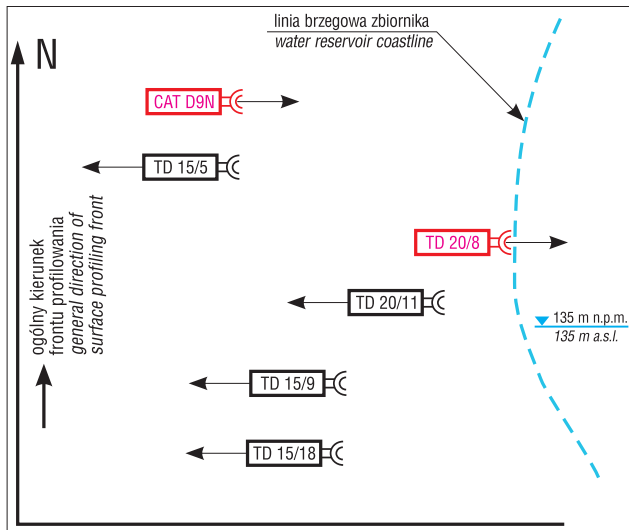
## ROZWÓJ I WARUNKI POWSTANIA OSUWISKA

Osuwisko na południowym krańcu zachodniej skarpy zbiornika wodnego „Piaseczno” powstało 11 maja 2011 r. w trakcie profilowania górnej, nadwodnej skarpy, która pierwotnie była nachylona pod kątem ok. 26°. Zwierciadło wody w zbiorniku znajdowało się wówczas na poziomie 135,03 m n.p.m. Nachylenie skarpy wynosiło już ok. 8°, a szerokość strefy profilowanej 100–200 m (ryc. 6).

Profilowanie wykonywano w celu utworzenia półki abrazyjnej, aby zapewnić stabilność skarpy podczas planowanego podniesienia lustra wody w zbiorniku do rzędnej ok. 146 m n.p.m. Prace w rejonie powstałego osuwiska prowadzono za pomocą sześciu ciężkich spycharek, które przemieszczały grunt w kierunku zbiornika. Ich



**Ryc. 6.** Zachodnia skarpa zbiornika wodnego „Piaseczno” w czasie profilowania, przed powstaniem osuwiska. Fot. T. Burchard  
**Fig. 6.** Western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir before the landslide activation. Photo by T. Burchard



**Ryc. 7.** Rozmieszczenie spycharek profilujących zachodnią skarpę zbiornika wodnego „Piaseczno” w chwili powstania osuwiska  
**Fig. 7.** The array of bulldozers profiling the western escarpment of "Piaseczno" water reservoir at the moment of landslide activation

rozmieszczenie w chwili powstania osuwiska przedstawiono na rycinie 7. Według naocznych świadków osuwisko zostało zainicjowane nagłym zapadaniem się ziemi pod spycharką TD 20/8, która znajdowała się najbliżej brzegu zbiornika wodnego. Zjawisko było gwałtowne i spycharka wraz z jej operatorem przemieściła się pod wodę do zbiornika, który w tym rejonie miał głębokość ok. 25–30 m.

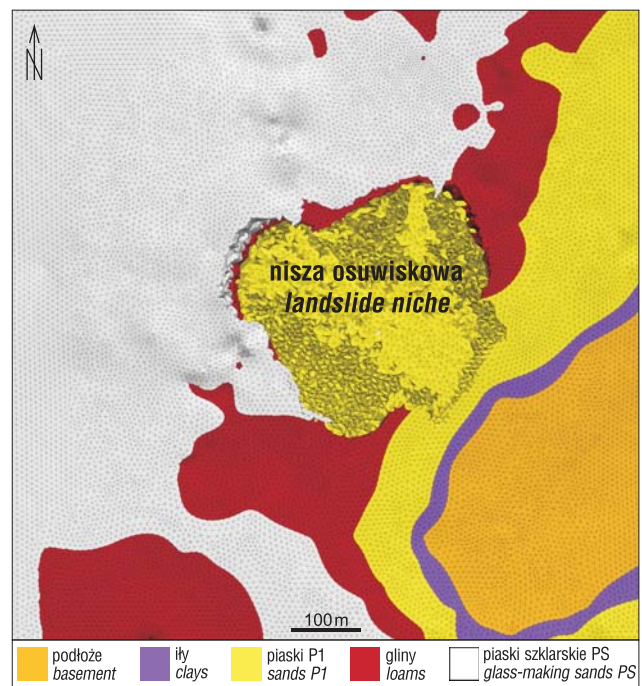
Szybki rozwój osuwiska w górę i na boki skarpy spowodował, że także spycharka CAT D9N zapadła się wraz z gruntem pod wodę, lecz jej operator zdążył się uratować. Pozostałe cztery spycharki, które wjeżdżały na skarpę, zdołały opuścić rejon zagrożenia. Proces osuwiskowy trwał kilkanaście minut, objął powierzchnię blisko 6 ha i wciął się na ok. 300 m w głąb skarpy (ryc. 8, 9 – patrz str. 215). Objętość osuniętego do wody gruntu wyniosła 0,8–1 mln m<sup>3</sup>, co spowodowało podniesienie zwierciadła wody w zbiorniku o 0,56 m. Ogólny kąt nachylenia skarpy po powstaniu osuwiska zmniejszył się do 4–5°, a koluwia znalazły się poniżej zwierciadła wody. Widok fragmentu skarpy zachodniej po powstaniu osuwiska przedstawiono na rycinie 10.

### ANALIZA STATECZNOŚCI SKARPY I OKREŚLENIE PRZYCZYN POWSTANIA OSUWISKA

W celu wyjaśnienia przyczyn powstania osuwiska przeprowadzono odwrotną analizę stateczności zbocza w dwóch przekrojach przez osuwisko dla płaskiego stanu odkształcenia (program SLOPE/W) oraz obliczenia przestrzenne (program FLAC3D). Do stworzenia modelu przestrzennego wykorzystano wyniki skaningu laserowego osuwiska i jego otoczenia (ryc. 11). Geometrię skarpy określono na podstawie wcześniejszych pomiarów geodezyjnych, natomiast budowę geologiczną na podstawie wyników wierceń archiwalnych i późniejszych badań w sąsiedztwie powstałego osuwiska. Do wstępnych obliczeń współczynnika stateczności ( $F$ ) przyjęto wyprowadzone na podstawie wyników badań archiwalnych wartości parametrów geotechnicznych poszczególnych rodzajów gruntu zwałowego (tab. 1).



**Ryc. 10.** Osuwisko powstałe na zachodniej skarpie zbiornika wodnego „Piaseczno”. Fot. z arch. Kopalnia Siarki „Machów” S.A.  
**Fig. 10.** The landslide on western escarpment of "Piaseczno" water reservoir. Photo from Kopalnia Siarki "Machów" S.A. archive



**Ryc. 11.** Końcowy kształt niszy osuwiska powstałego na zachodniej skarpie zbiornika wodnego „Piaseczno” uzyskany na podstawie przestrzennej analizy stateczności w programie FLAC3D  
**Fig. 11.** The final shape of landslide niche on the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir, obtained from stability analyses in FLAC3D software

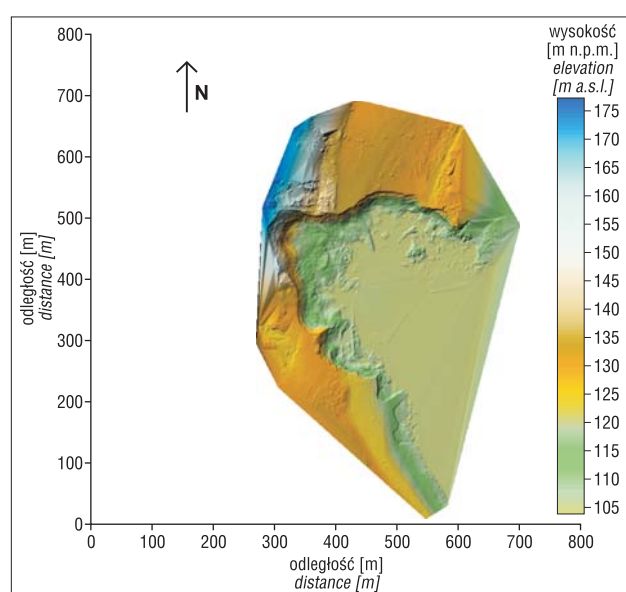
W wyniku obliczeń wykonanych z uwzględnieniem różnych przebiegów powierzchni poślizgu uzyskano współczynnik stateczności wyraźnie większy od jedności ( $F = 1,3–2,2$ ). Aby uzyskać stan graniczny skarpy w miejscu powstania osuwiska, dokonano redukcji spójności warstwy iłw zalegających w spągu gruntów zwałowych z 25 kPa do 10 kPa i pozostawiono kąt tarcia wewnętrznego wynoszący 5,5°. Przy takich parametrach współczynnik stateczności dolnej części skarpy w obydwu przekrojach był zbliżony do jedności ( $F = 1,01–1,15$ ), jednak w przypadku obliczeń,

**Tab. 1.** Wartości parametrów wydzielonych warstw geologiczno-inżynierskich zachodniej skarpy zbiornika wodnego „Piaseczno” w rejonie powstałego osuwiska**Table 1.** Parameters of the engineering-geological layers on the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir in the landslide area

Rodzaj gruntu Type of soil	Ciężar objętościowy / Unit weight $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Kąt tarcia wewnętrznego Angle of internal friction $\phi$ [°]	Spójność / Cohesion $c$ [kPa]
Podłoże / Basement	20,0	32,0	0,00
Iły / Clays	19,5	5,5	25,0
Namuły / Mud clays	15,0	2,0	10,0
Piaski P1 / Sands P1	18,0	8,5	15,0
Gliny / Loams	18,0	8,5	15,0
Piaski P2 / Sands P2	18,0	8,5	15,0
Piaski szklarskie PS / Glass-making sands PS	18,0	33,0	2,0
Woda / Water	9,8	–	–

w których uwzględniono zasięg powierzchni poślizgu wyznaczony przez powstałe osuwisko, był on wciąż wyraźniej większy od jedności ( $F = 1,5-1,8$ ). Osuwisko utworzyło się w dwóch krótkotrwałych fazach. W pierwszej proces osuwiskowy objął najbardziej zagrożone, dolne części skarpy, a zwłaszcza te poniżej zwierciadła wody, przy czym osunięte pod wodę koluwia prawie całkowicie utraciły swoją wytrzymałość. Zmiana pierwotnej geometrii skarpy spowodowała wystąpienie stanu granicznego w jej dalszych górnych częściach, bardziej oddalonych od granic zbiornika wodnego, i zainicjowanie następnej fazy ruchu osuwiskowego. Z obliczeń wynika, że po zmianie geometrii skarpy spowodowanej pierwszą fazą zsuwu gruntu współczynnik stateczności wyprowadzony z uwzględnieniem zasięgu rzeczywistej powierzchni poślizgu wyznaczonej przez osuwisko wyniósł w obydwu przekrojach (zależnie od przyjętej metody obliczeń) 0,99–1,06. Odstęp czasowy między pierwszą i drugą fazą ruchu osuwiskowego musiał być niewielki, co potwierdzają świadkowie tego zdarzenia, a cały ruch osuwiskowy miał charakter zbliżony do szybkiego regresywnego spływu nawodnionej masy gruntu.

Analizę stateczności skarpy za pomocą programu FLAC3D poprzedzono stworzeniem przestrzennego modelu numerycznego obszaru osuwiska oraz jego bezpośredniego otoczenia, a uwzględnione warunki odpowiadały tym sprzed powstania osuwiska. Wykorzystano dane ze skaningu laserowego osuwiska i terenu przyległego oraz dane z pomiarów geodezyjnych i rozpoznania geologicznego (przebieg powierzchni wydzielonych warstw geologiczno-inżynierskich). Nie wdając się bliżej w opis procedury obliczeń, można jedynie stwierdzić, że polegała ona na zmianie, w kolejnych krokach, wyjściowych wartości parametrów wytrzymałościowych gruntów, aż do osiągnięcia stanu granicznego (wskaźnik stateczności bliski jedności). Umożliwiło to wyznaczenie kształtu powierzchni poślizgu i zasięgu osuwiska w modelu zgodnie z rzeczywistością. Uzyskano to po obniżeniu parametrów wytrzymałościowych warstwy ilów ( $c = 8$  kPa,  $\phi = 4^\circ$ ) w stosunku do wartości przyjętych w modelach płaskich ( $c = 10$  kPa,  $\phi = 5,5^\circ$ ). Z obliczeń przestrzennych, podobnie jak z płaskich, wynika, że w procesie osuwiskowym wyodrębnić można dwie wyraźne fazy rozwoju osuwiska. Proces osuwiskowy rozpoczął się w dolnej części skarpy, a następnie obejmował

**Ryc. 12.** Widok osuwiska na skarpie zachodniej zbiornika wodnego „Piaseczno” uzyskany przy pomocy skaningu laserowego**Fig. 12.** View on the landslide on the western escarpment of the "Piaseczno" water reservoir, obtained from laser scanning

coraz wyższe jej partie. Końcowy kształt niszy osuwiskowej w modelu numerycznym przedstawiono na rycinie 12. Jest on bardzo zbliżony do rzeczywistego (ryc. 10, 11), co świadczy o poprawności obliczeń i wiarygodności utworzonego modelu.

Opisane wyniki analizy stateczności, a także całość wyników badań dotyczących budowy geologicznej i właściwości gruntów zwałowych dają podstawy do oceny przyczyn powstania osuwiska. Mogą one stanowić swego rodzaju ostrzeżenie, istotne przy projektowaniu likwidacji innych wyrobisk poeksploatacyjnych kopalni odkrywkowych rekultywowanych przez wykonanie zbiornika wodnego.

Na powstanie osuwiska w części skarpy zachodniej zbiornika wodnego po odkrywcze kopalni siarki „Piaseczno” miały wpływ następujące czynniki:

- Większe ogólne nachylenie skarpy zachodniej w miejscu powstania osuwiska (ok.  $10-11^\circ$ ) niż w pozostałych jej miejscach (przeciętnie ok.  $7,5^\circ$ ).
- Obecność w spągu gruntów zwałowych ciągłej warstwy ilów krakowieckich (ewentualnie ilasto-marglistego

residuum serii siarkonośnej, nachylonej konsekwentnie pod kątem 1–3° w kierunku zbiornika) o miąższości 1,5–4 m; takiej ciągłej warstwy ilów nie stwierdzono w innych częściach skarpy zachodniej, gdzie grunty zwałowe zalegały na piaskach baranowskich lub miejscami na wapieniach.

3. Stosunkowo luźna struktura i słabe zagęszczenie gruntu zwałowego w porównaniu do skarp zbiornika zbudowanych z gruntów rodzimych.

4. Prawdopodobne strefowe rozluźnienie piaszczystych partii gruntu zwałowego spowodowane wieloletnimi procesami sufozji w wyniku napływu wód gruntowych do zbiornika od strony skarpy zachodniej. Zmienna przepuszczalność gruntu zwałowego zbudowanego z gruntów niespoistych i spoistych mogła też doprowadzić do powstania strefowych zamkniętych lub częściowo zamkniętych nagromadzeń wód blisko skarpy, sprzyjających upłynnieniu koluwiów w chwili inicjacji ruchu osuwiskowego. Zjawisko gwałtownego wypływu wody z niszy osuwiskowej obserwowali świadkowie zdarzenia („Dokumentacja geologiczno-inżynierska...”, 2011).

5. Drgania i vibracje gruntu wywołane jednoczesną pracą sześciu ciężkich spycharek profilujących skarpe i przemieszczających rozluźnione grunty w kierunku zbiornika wodnego. Zwierciadło wody pod powierzchnią gruntu, po którym poruszały się spycharki, znajdowało się na głębokości ok. 2,5–5 m (odpowiednio w zasięgu 20–50 m od zbiornika), blisko krawędzi lustra wody w zbiorniku. Drgania gruntu pod spycharkami mogły więc objąć także strefę poniżej lustra wody i ułatwić jego upłynnienie.

6. Chwilowy wzrost ciśnienia porowego wody w gruntach zwałowych wskutek względnie gwałtownego osiadanania gruntu i załamania jego struktury wywołanego podniesieniem się zwierciadła wody w zbiorniku i w skarpie. Zawodnienie takiego gruntu powoduje zmianę konsystencji i proces zagęszczania (osiadania) pod obciążeniem, który może osiągnąć ok. 10% miąższości warstwy. Wskazują na to zarówno wyniki badań i obserwacji terenowych na zwałowiskach, jak i wyniki eksperymentów laboratoryjnych (Rybicki, 1986; Rybicki & Woźniak, 1994).

Wpływ każdego z wymienionych czynników na powstanie deformacji osuwiskowych jest trudny do oszacowania. Niemniej można uznać, że mechanizm osuwiska polegał na początkowej utracie stateczności skarpy wskutek upłynnienia gruntu w strefie bliskiej krawędzi wody w zbiorniku, co wywołało zmianę geometrii skarpy i w następstwie poślizg nawodnionej masy gruntowej po powierzchni warstwy ilastej zalegającej w spągu gruntów zwałowych.

Potwierdzeniem tezy o roli strefowego upłynnienia gruntu zwałowego w powstaniu opisywanych deformacji osuwiskowych są wyniki badań i obserwacji osuwisk skarp zwałowisk wewnętrznych w zbiornikach wodnych po kopalniach odkrywkowych węgla brunatnego we wschodnich Niemczech przedstawione przez Wichtera (2007). Opisał on warunki i przebieg wielu osuwisk skarp zwałów wewnętrznych, zbudowanych głównie z gruntów piaszczystych, w trakcie wypełniania wodą wyrobisk poeksploatacyjnych. Osuwiska te, o objętości 0,5–12,5 mln m<sup>3</sup>, miały gwałtowny przebieg, trwały zazwyczaj kilka–kilkanaście minut i sięgały do 750 m w głąb skarpy. Końcowy kąt nachylenia skarpy po powstaniu osuwiska był zazwyczaj mniejszy od 8°, często wynosił 3–5°. Proces osuwiskowy

zaczynał się w dolnej części skarpy przy granicy ze zbiornikiem i propagował gwałtownie w skarpe, podobnie jak to miało miejsce w zbiorniku „Piaseczno”. Przyczyn upłynnienia gruntu i powstawania deformacji osuwiskowych upatrywano głównie w bardzo luźnym lub luźnym stanie zagęszczenia piasku w skarpach zwałowisk wewnętrznych, który po podniesieniu się zwierciadła wody tracił ponadto pozorną spójność przy pełnym nasyceniu wodą. To powodowało też lokalne załamania (zniszczenie) struktury gruntu i jego osiadanania w procesie zagęszczania się przy zawodnieniu. Pewną rolę w upłynnieniu gruntu przypisuje się także ciśnieniu pęcherzyków powietrza wypychanego do góry przy podnoszeniu się zwierciadła wody w gruncie zwałowym powyżej zwierciadła wody w zbiorniku, co powodowało redukcję naprężeń efektywnych i spadek wytrzymałości gruntu. Świadczenie obserwowali wydzielanie się dużych pęcherzyków powietrza i towarzyszący temu charakterystyczny szum, który poprzedził ruch osuwiskowy. Zauważono przy tym, że osuwiska powstawały już wtedy, gdy zwierciadło wody w skarpie zwału wewnętrznego osiągało ok. 20% jego wysokości. Wichter (2007) stwierdził, że działania zapobiegające powstawaniu osuwisk skarp zwałów wewnętrznych w poeksploatacyjnych zbiornikach wodnych powinny polegać na zagęszczaniu gruntu w strefie przylegającej do zbiornika wodnego (np. konsolidacja dynamiczna, wibroflotacja, zagęszczanie metodą wybuchów itp.), najlepiej jeszcze przed podniesieniem zwierciadła wody w zbiorniku. Podobne działania, czyli zagęszczenie gruntu zwałowego metodą mikrowybuchów, prowadzone są obecnie na skarpie zachodniej zbiornika „Piaseczno”, na północ od powstałego osuwiska, na tej części skarpy, która teraz jest stateczna.

## WNIOSKI

1. Rekultywacja wyrobisk końcowych większości kopalń odkrywkowych przez tworzenie w nich zbiorników wodnych wymusza zwracanie uwagi na stateczność tych odcinków skarp zbiorników, które są zbudowane z gruntów zwałowisk wewnętrznych. Są to bowiem najbardziej narażone na utratę stateczności odcinki skarp, ze względu na znacznie obniżoną wytrzymałość i duże rozluźnienie gruntu zwałowego w stosunku do gruntów rodzimych.

2. Utrata stateczności skarp poeksploatacyjnych zbiorników wodnych następuje głównie w trakcie napełniania zbiornika wodą dostarczaną z zewnątrz lub/i z naturalnych dopływów wody z horyzontów wodonośnych okalających wyrobisko poeksploatacyjne.

3. Szczególnie niebezpieczne są początkowe etapy napełniania wodą, ponieważ nawodnieniu podlegają dolne części skarpy zbudowanej z gruntów zwałowych. Przykład zbiornika wodnego „Piaseczno”, jak również przykłady z Niemiec sugerują, że niebezpieczeństwo utraty stateczności takich skarp występuje zwłaszcza wtedy, gdy podtopione wodą zostanie 20–50% wysokości skarpy.

4. Niekorzystne dla stateczności skarp są też sytuacje, gdy poziom wody w tworzonym zbiorniku jest przez dłuższy czas niższy niż w jego bezpośrednim otoczeniu. Może to w niektórych przypadkach prowadzić do wystąpienia procesów sufozji w piaszczystych partiach gruntu zwałowego i dalsze jego rozluźnianie, a w każdym przypadku

generuje ciśnienie hydrodynamiczne na szkielet gruntowy i wywołuje pogorszenie warunków stateczności. Dlatego dla stateczności korzystne jest co najmniej utrzymywanie jednakowego poziomu wody w napełnianym zbiorniku i w jego otoczeniu. Wymaga to z reguły przejściowego odwadniania otoczenia zbiornika.

5. Przykład zbiornika wodnego „Piaseczno” oraz inne przykłady omawiane w literaturze wskazują, że osuwiska skarp zwałowisk wewnętrznych zbudowanych z gruntów niespoistych (piaski, żwiry) lub mieszanych piaszczysto-spoistych powstające podczas napełniania zbiornika mają głównie charakter gwałtownie przebiegających spływów nawodnionych gruntów, rozpoczynających się w dolnych partiach skarpy, bez wyraźnych wcześniejszych oznak deformacji. Impulsem do zapoczątkowania ruchu osuwiskowego zdają się być zmiany strukturalne (osiadanie) w gruncie zwałowym w stanie luźnym wywołane wzniosem zwierciadła wody i towarzyszący temu chwilowy wzrost ciśnienia porowego w zagęszczającym się gruncie. Powoduje to przejściowy spadek naprężeń efektywnych i zmniejsza wytrzymałość gruntu. Drugim istotnym czynnikiem jest obniżenie wytrzymałości nawadnianego spoistego gruntu zwałowego wskutek zmian jego wilgotności i stanu konsystencji, a w przypadku gruntów niespoistych likwidacja pozornej spójności wskutek ich pełnej saturacji.

6. W prognostycznej analizie stateczności skarpy napełnianych zbiorników wodnych, gdy proces osuwiskowy jest zapoczątkowany utratą stateczności dolnej partii skarpy, należy (w celu oceny możliwego końcowego zasięgu osuwiska) uwzględnić zmianę lub etapowe zmiany geometrii skarpy, traktując osunięte do zbiornika wodnego części skarpy (koluwia) jako materiał praktycznie pozbawiony wytrzymałości.

7. Projektując geometrię skarpy zwałowiska wewnętrznego przyszłego zbiornika wodnego w wyrobisku poeksploatacyjnym, trzeba zakładać, że jego ogólne nachylenie (po zalaniu wodą) nie powinno przekraczać ok. 8°, a jak wskazują wspomniane przypadki – powinno wynosić 4–6°. Chcąc zwiększyć nachylenie skarpy, należy zagęścić grunt zwałowy, zwłaszcza w rejonie jej czoła, przylegającego do zbiornika wodnego.

Autorzy dziękują anonimowym Recenzentom za cenne uwagi, które przyczyniły się do nadania pracy ostatecznej formy.

## LITERATURA

- BIELEC B., BURCHARD T., FLOREK P., HAŁADUS A., KANIA J., KIREJCZYK J., KULMA R., PANTULA Z. & SZCZEPAŃSKA J. 2006 – Dokumentacja określająca warunki hydrogeologiczne w rejonie likwidowanego wyrobiska byłej Kopalni Siarki „Piaseczno” – stan prognozowany w związku z przewidywaną zmianą poziomu odwadniania i po jego całkowitym zakończeniu. PUP Sigma BP Sp. z o.o., Tarnobrzeg.
- DMITRUK S., HAWRYSZ M. & BATOG A. 1998 – Stateczność zboczy w fazie likwidacji kopalni odkrywkowej. [W:] XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Zakopane–Kościelisko, 16–20 marca 1998. Wyd. Kat. Geomech. Górn. Geotech. Akad. Górn.-Hutn., Kraków: 61–70.
- Dokumentacja geologiczno-inżynierska w celu ustalenia przyczyn powstania osuwiska na zachodniej skarpie zbiornika „Piaseczno” uformowanej w gruntach zwałowiska wewnętrznego byłej Kopalni Siarki „Piaseczno”, 2011, Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa: 1–117.
- KRAJEWSKI R. 1972 – Geologia inżynierska. [W:] Poradnik górnik, t. 1, dz. 4. Wyd. Śląsk, Katowice: 293–364.
- PISARCZYK S.J. 1999 – Mechanika gruntów. Ofic. Wyd. Polit. Warszaw., Warszawa: 1–226.
- RYBICKI S. 1986 – Structure and physico-mechanical properties of dump soils. [W:] Proceedings of the 5<sup>th</sup> International IAEG Congress, Buenos Aires. Balkema, Rotterdam–Boston: 1019–1027.
- RYBICKI S. & WOŹNIAK H. 1994 – Shear strength of dump soils with reference to water saturation. [W:] Proceedings of the 7<sup>th</sup> International IAEG Congress, Lisboa. Balkema, Rotterdam–Brookfield: 2847–2851.
- RYBICKI S. & WOŹNIAK H. 2010 – Struktura i geotechniczne właściwości wybranych gruntów antropogenicznych. Prz. Geol., 58: 926–932.
- RYBICKI S., WOŹNIAK H. & LENDUSZKO P. 1995 – Filtracja wody przez spoiste grunty zwałowe oraz ich zdolności izolacyjne na przykładzie odkrywkowej kopalni siarki w Machowie. Prz. Geol., 43: 302–304.
- WICHTER L. 2007 – Stabilisation of old lignite pit dumps in Eastern Germany. Bull. Eng. Geol. Env., 66: 45–51.
- WOŹNIAK H. 2009a – Właściwości deformacyjne i filtracyjne zwałowanych gruntów spoistych z wybranych kopalń odkrywkowych w aspekcie ich budowlanego wykorzystania. Wyd. Geol., Geofiz. Ochr. Środ., Akad. Górn.-Hutn., Kraków: 1–114.
- WOŹNIAK H. 2009b – Osiadanie gruntów zwałowanych w świetle badań modelowych. IGSMiE PAN Stud., Rozpr., Monogr., 149: 1–162.

Praca wpłynęła do redakcji 9.05.2013 r.  
Akceptowano do druku 14.01.2014 r.



**Rozwój i określenie przyczyn osuwiska na skarpie zbiornika wodnego po odkrywkowej kopalni siarki „Piaseczno”(patrz str. 190)**  
**Development and causes of the landslide in a water reservoir escarpment, the former "Piaseczno" sulphur open-cast mine (seep. 190)**



**Ryc. 8.** Górna krawędź osuwiska powstałego na zachodniej skarpie zbiornika wodnego „Piaseczno” w okolicach Tarnobrzega  
**Fig. 8.** Upper edge of the landslide on western escarpment of "Piaseczno" water reservoir near Tarnobrzeg



**Ryc. 9.** Zbiornik wodny „Piaseczno” – nisza osuwiskowa. Obie fot. Z. Frankowski  
**Fig. 9.** "Piaseczno" water reservoir – landslide niche. Both photos by Z. Frankowski