

**IDENTYFIKACJA  
POTENCJALNYCH ZAGROŻEŃ GEOTECHNICZNYCH  
NA PODSTAWIE  
PRZESTRZENNEGO MODELU ZWIERCIADŁA WODY  
W WIELKOWYMIAROWEJ BUDOWLI HYDROTECHNICZNEJ**

**Identification of potential geotechnical threat  
base of spatial underground water model  
on large scale hydrotechnical building**

**Janusz NOWAK & Michał STRZELECKI**

*KGHM Cuprum sp. z o.o., Centrum Badawczo-Rozwojowe,  
Zakład Studiów i Analiz Geologicznych;  
pl. Jana Pawła II 1, 50-136 Wrocław;  
e-mail: jnowak@cuprum.wroc.pl, mstrzelecki@cuprum.wroc.pl*

**Treść:** Budowle hydrotechniczne są obiektami monitorowanymi, szczególnie w aspekcie środowiskowym oraz geotechnicznym. Monitoring prowadzony jest w całym okresie eksploatacji obiektu, a także przez pewien czas po jej zakończeniu. Pełne dokumentowanie zdarzeń hydrogeologicznych oraz geotechnicznych stwarza możliwość weryfikacji obliczeń numerycznych opartych na przestrzennych modelach procesów geotechnicznych. W pracy zaprezentowano przestrzenny model zwierciadła wód podziemnych w wielkoprzestrzennej budowli hydrotechnicznej. Wykorzystując w niej wielkości parametrów hydrogeologicznych obiektu uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań geotechnicznych oraz hydrogeologicznych, pokazano, jak przyjęcie założeń dotyczących infiltracji wpływa na przestrzenny model przepływu wód podziemnych w obrębie składowiska odpadów oraz w jaki sposób filtracja wód podziemnych może mieć wpływ na zagrożenia tego obiektu. Wykazano konieczność prowadzenia dalszych prac w zakresie symulacji komputerowej złożonych procesów geotechnicznych z uwagi na właściwą ocenę bezpieczeństwa składowiska odpadów.

**Słowa kluczowe:** budowla hydrotechniczna, modelowanie hydrogeologiczne, zagrożenia geotechniczne

**Abstract:** Hydrotechnical buildings are objects monitored, particularly in environmental and geotechnical aspects. Monitoring is led in whole period of exploitation of object, as well as time its completion. Full documentation of hydrogeological and geotechnical events makes capability of verification of numerical accounts, based on spatial models of geotechnical processes. The paper presents spatial underground water model of large scale hydrotechnical building. The hydrogeological parameters, from geotechnical and hydrogeological investigations, were applied. The influence of taking infiltration principles on underground water moving model was shown in storage area and the way of water infiltrations influence on menaces of this object. Necessity next analyses with computers simulations were shown for complicated geotechnical processes and right estimate safety of waste storage.

**Key words:** hydrotechnical building, hydrogeological modeling, geotechnical hazards

## WPROWADZENIE

Podjęcie ważnych decyzji w zakresie projektowania i utrzymania obiektów inżynierskich, mających wpływ na ich bezpieczeństwo oraz odporność na stany ekstremalne, w dużym stopniu zależy od właściwego modelowania procesu przepływu wody przez ośrodek porowaty. Modelowanie tego typu zagadnień jest istotnym elementem mechaniki ciała porowatego. Pozwala ono na analizę ewolucji stanu naprężenia i odkształcenia oraz analizę stateczności konstrukcji geotechnicznej z uwzględnieniem wpływu sił pochodzących od ciężaru własnego obiektu oraz sił pochodzących z ewolucji ciśnienia porowego wynikającego z procesu filtracji.

Jednym z najbardziej istotnych elementów właściwego modelowania procesów jest znajomość geometrii badanego obszaru, co w przypadku zagadnień geologicznych sprowadza się do utworzenia przestrzennego odwzorowania poszczególnych warstw geologicznych, uskoku, przestrzennego obrazu warstw wodonośnych, przestrzennego modelu zwierciadła wód podziemnych. Przestrzennym odwzorowaniem geometrii dowolnego obszaru jest numeryczny model rzeźby terenu oraz numeryczny model budowy geologicznej, a w szczególności trójwymiarowy model zwierciadła wód podziemnych.

Problem może być rozpatrywany jako losowy lub deterministyczny. Mimo często skomplikowanej struktury rozpatrywanego ośrodka, gdy występuje niejednorodność i anizotropowość ośrodka o charakterze losowym (Nowak 2007), wystarczającym odwzorowaniem procesów rzeczywistych w zakresie przepływu filtracyjnego jest model deterministyczny.

Dlatego też podjęto decyzję o budowie deterministycznego przestrzennego modelu przepływu filtracyjnego, który w dalszym etapie prac może stanowić punkt wyjścia do budowy modelu opisującego proces pełzania zbiornika w czasie i analizę jego stateczności.

## WYKORZYSTANIE DANYCH Z BADAŃ I SYSTEMU MONITORINGU SKŁADOWISKA

Budowle hydrotechniczne o dużym znaczeniu inżynierskim są obiektami monitorowanymi, przy czym zakres prowadzonych pomiarów jest bardzo szeroki i obejmuje procesy odbywające się na powierzchni terenu oraz pod ziemią. Monitoring taki prowadzony jest w całym okresie eksploatacji obiektu, a także przez pewien czas po jej zakończeniu. Pełne dokumentowanie zdarzeń hydrogeologicznych oraz geotechnicznych stwarza możliwość właściwego sformułowania warunków brzegowych rozwiązywanego zagadnienia numerycznego oraz dokładnej weryfikacji uzyskanych obliczeń symulacji komputerowej.

## PRZESTRZENNY MODEL NUMERYCZNY PRZEPIYU FILTRACYJNEGO

Przepływ wód podziemnych w obszarze składowiska oszacowano za pomocą obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych.

Celem budowanego modelu było określenie trójwymiarowego kształtu zwierciadła swobodnego wód podziemnych zasilanych z powierzchni składowiska wodami zrzucanymi

wraz z odpadami przemysłowymi na powierzchnię składowiska. Część wód dostarczanych na powierzchnię zbiornika wnika (z różną intensywnością infiltracji) w głąb zbiornika, a pozostała część jest odprowadzana odpowiednio zbudowanym systemem hydraulicznym.

Do symulacji procesu filtracji wybrano program Flex PDE 5, produkt firmy PDE Solutions Inc. powiązanej z zapleczem naukowym Cambridge, umożliwiający rozwiązywanie wielu złożonych zagadnień fizyki matematycznej metodą elementów skończonych (model 1D, 2D i 3D), w tym oczywiście zagadnień przepływu filtracyjnego. W wyniku obliczeń numerycznych uzyskujemy jako wynik pole skalarne wysokości hydraulicznej  $H(x, y)$ , które pozwala określić następnie pole wektorowe prędkości filtracji, obliczyć wielkości wydatków systemów odwadniających, określić warunki stateczności filtracyjnej dla założonych warunków brzegowych przepływu.

Uzyskane wyniki obliczeń wysokości hydraulicznej w odniesieniu do przyjętych wersji obliczeń były następnie wyeksportowane z programu obliczeniowego Flex PDE 5 do programu Bentley MicroStation z nakładką InRoads, co pozwoliło na wygenerowanie numerycznego modelu obliczonego zwierciadła swobodnego.

W narzędziach GIS został utworzony, w stosunku do określonego momentu czasu, numeryczny model zwierciadła swobodnego na podstawie wyników pomiaru wysokości poziomu piezometrycznego wody w piezometrach. Porównanie wielkości  $H$  obliczeniowej i z pomiarów piezometrycznych, dla przyjętych w obliczeniach wartości infiltracji, umożliwiło określenie, w jakim stopniu symulacja komputerowa wpisuje się w uzyskany z pomiarów kształt zwierciadła swobodnego. Znaczne różnice położenia obu powierzchni w określonych podobszarach składowiska określały zmiany wielkości infiltracji w modelu obliczeniowym. W ten sposób powtarzano obliczenia w odniesieniu do przyjętych nowych wartości infiltracji i porównywano powierzchnię  $H$  z pomiaru i obliczeń. Kalibracja modelu obliczeniowego odbywała się więc poprzez modyfikację prędkości infiltracji wody do zwierciadła swobodnego. Proces kalibracji zakończono, gdy dokładność dopasowania obu powierzchni mieściła się we wstępnie założonych granicach błędu.

Uzyskane wyniki obliczeń powierzchni swobodnej pozwalają określić numerycznie nieznaną brzeg w modelu 3D przepływu filtracyjnego.

Rozważany przypadek obliczeń przepływu swobodnego wykonano, bazując na teorii Boussinesqa w trójwymiarowej przestrzeni  $x, y, z$ . Płaszczyzna pozioma przechodząca przez punkt  $x, y, z_0$ , stanowiąca powierzchnię, względem której obliczano wielkości wysokości hydraulicznej  $H$ , znajduje się na granicy warstwy przepuszczalnej i nieprzepuszczalnej.

Ekwiwalentne równanie liniowe, nazwane zlinearyzowanym równaniem Boussinesqa, dla przypadku przepływu ustalonego sprowadza się do postaci:

$$k_x \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial H}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left( H \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \varepsilon = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- $H$  – wysokość hydrauliczna mierzona względem dowolnej powierzchni odniesienia (w naszym przypadku m n.p.m.),
- $k_x, k_y$  – współczynniki filtracji w kierunku osi  $x$  i  $y$ ,
- $\varepsilon$  – prędkość infiltracji.

Nieliniowe równanie Boussinesqa (1) jest modelem matematycznym przyjętym do obliczeń zwierciadła swobodnego filtracji w obszarze zbiornika i jego otoczenia (Strzelecki *et al.* 2007).

Obliczone zwierciadło swobodne jest poszukiwanym brzegiem zwierciadła swobodnego w odniesieniu do trójwymiarowego modelu przepływu filtracyjnego spełniającego równanie hydrodynamiki wód podziemnych w przypadku ośrodka anizotropowego

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

gdzie:

- $H$  – wysokość hydrauliczna mierzona względem dowolnej powierzchni odniesienia (w naszym przypadku m.n.p.m.),  
 $k_x, k_y, k_z$  – współczynniki filtracji w kierunku osi  $x, y$  i  $z$ ,

## PARAMETRY FIZYCZNE, WARUNKI BRZEGOWE I WERSJE ROZWIĄZANIA

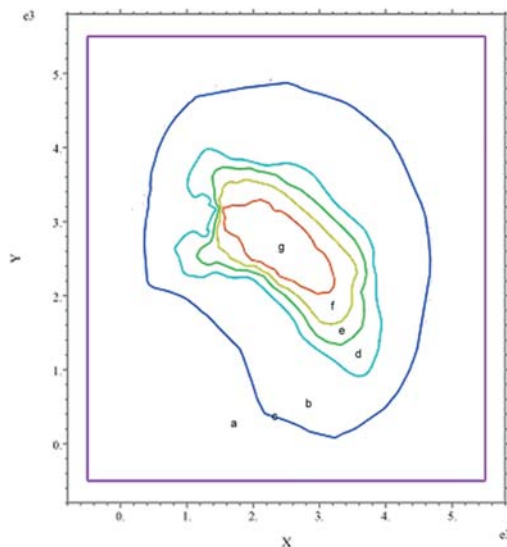
Właściwości filtracyjne osadów są wynikiem technologii budowy składowiska „do wewnątrz” (Nowak 2007). Zrzut odpadów odbywa się na plażę z poziomu obwałowania. Mieszanka odpadów z wodą, przepływając w kierunku najniższego położenia składowiska, ulega sedymentacji, przy czym ziarna grubsze osiadają bliżej wałów, a ziarna drobniejsze – bliżej najniższego poziomu. Na podstawie zebranych danych (Nowak *et al.* 2008), (Kisielewicz *et al.* 2007) przyjęto średnie wartości współczynnika filtracji skokowo zgodnie z figurą 1, przy czym obszar przepływu podzielono na siedem regionów, w odniesieniu do których przyjęto różną wartość średniego współczynnika filtracji w kierunku poziomym (Tab. 1).

**Tabela (Table) 1**

Przyjęte wartości współczynnika filtracji  $k_x$

*Permeability  $k_x$*

Region <i>Region</i>	Współczynnik filtracji $k_x$ [m/s] <i>Permeability <math>k_x</math> [m/s]</i>
Region a	1e-5
Region b	1e-6
Region c	1e-4
Region d	5e-6
Region e	1e-7
Region f	1e-8
Region g	1e-9



**Fig. 1.** Geometria obszaru obliczeń w rzucie z góry. Objaśnienia: a, b, ..., g – region a, region b, ..., region g

**Fig. 1.** Geometry of calculating area (top view). Explanations: a, b, ..., g – region a, region b, ..., region g

Szczegółowe informacje piezometryczne pochodzą z przedpola składowiska i części plaży. Z powodu braku informacji z części centralnej składowiska, przyjęto dwie wersje obliczeń.

### Wersja I

Zwierciadło swobodne styka się z akwenem, nie występuje więc obszar aeracji pomiędzy zwierciadłem swobodnym wody a akwenem – brak w tym obszarze strefy infiltracji.

### Wersja II

Zwierciadło wody na całym obszarze jest zwierciadłem swobodnym – poniżej akwenu występuje obszar aeracji i woda dostaje się do zwierciadła swobodnego w wyniku infiltracji. Kształt uzyskanego zwierciadła swobodnego kalibrowano poprzez dobór intensywności infiltracji w poszczególnych regionach oraz wydatku odbieranego przez drenáže opaskowe (drenaż w zaporze podstawowej oraz rów opaskowy usytuowany poza składowiskiem). Nie uwzględniono również w tym przypadku drenáže opaskowych ułożonych w korpusie składowiska.

W artykule zaprezentowano wyniki obliczeń numerycznych drugiej wersji, zakładającej istnienie strefy aeracji pomiędzy akwenem a zwierciadłem swobodnym.

## WYNIKI OBLICZEŃ PRZEPIYU

Siatka elementów skończonych została wygenerowana automatycznie. System utworzył siatkę składającą się z 379 556 węzłów i 189 514 elementów trójkątnych. Błąd maksymalny obliczeń  $H$  wyniósł 0.00308 m. Wygenerowaną siatkę elementów skończonych zaprezentowano na figurze 2.

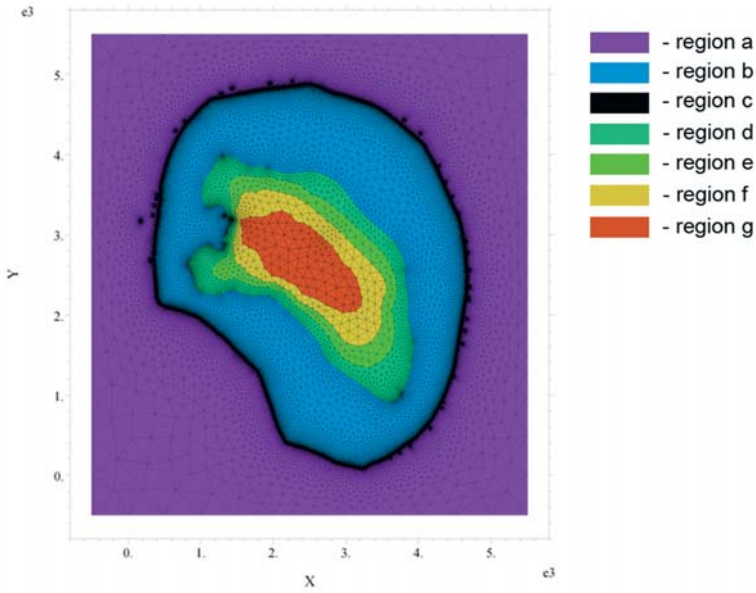


Fig. 2. Siatka elementów skończonych

Fig. 2. Fining element mesh

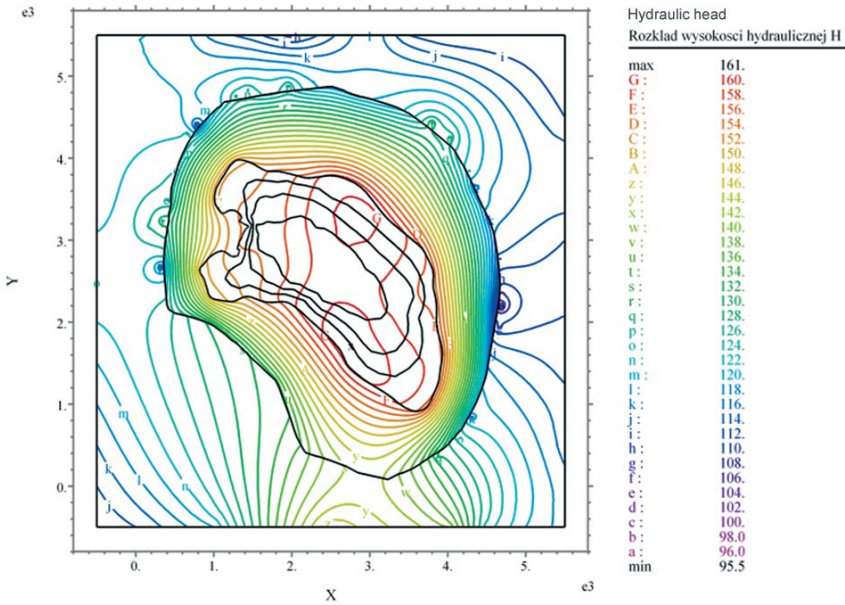


Fig. 3. Izolinie zwierciadła swobodnego

Fig. 3. Water table isolines

Program wykonał obliczenia dla kilku wartości współczynników infiltracji  $\epsilon$ , dobieranych w procesie kalibracji modelu w taki sposób, aby powierzchnia zwierciadła swobodnego była najbliższa powierzchni uzyskanej z pomiarów piezometrycznych dla wybranego momentu czasowego.

Izolinie położenia zwierciadła wody przedstawiono na figurze 3.

Na figurze 3 przyjęto odległości pomiędzy izoliniami powierzchni zwierciadła wody wynoszące 2 m.

## **PROSPEKCJA POTENCJALNYCH ZAGROŻEŃ WYNIKAJĄCYCH Z ANALIZY MODELU ORAZ JEGO WYKORZYSTANIE**

W przyszłości planuje się zbudować trójwymiarowy model reologiczny składowiska z możliwością analiz i prognoz stanu naprężenia i odkształcenia składowiska.

Zbudowany model powinien umożliwić:

- analizę pełzania składowiska i otaczającego go terenu,
- określenie potencjału plastyczności w celu oceny wpływu filtracji wody i ciężaru własnego na stateczność składowiska,
- wykonanie prognoz bezpiecznego podwyższania składowiska (analiza stateczności filtracyjnej i uplastycznienia masywu składowiska w jego części lub w całości).

Procesy sedymentacji i rozfrakcjonowania ziarnowego powodują, że w różnych strefach budowli hydrotechnicznej (Fig. 1) w warstwach poniżej dna powstają obszary o zróżnicowanych parametrach filtracyjnych. Zazwyczaj ich zbadanie *in situ* nie jest możliwe. Wynika to z faktu występowania wody nadosadowej i utrzymania zwierciadła wody na wymaganym poziomie lub jej skażenia chemicznego (Nowak 2007). Opracowany model umożliwia przeprowadzenie symulacji rozkładu wytypowanych stref filtracyjnych lub ich zmian o charakterze ciągłym na podstawie ograniczonej ilości pomiarów parametrów filtracyjnych lub na podstawie rejestrowanych wskazań poziomów w piezometrach i systemach odwadniających.

W podobny sposób można przeanalizować nie tylko przepuszczalność korpusu budowli, ale również jej podłoża.

Interesująca z punktu widzenia stateczności obiektu może być symulacja warunków brzegowych związanych z określeniem krytycznych poziomów zwierciadła wody i odległości od korony budowli. Uwzględnić tutaj należy zarówno strefy zawodnienia gruntów, aeracji, jak i ich możliwych zmian dynamicznych oraz statycznych.

Interesująca może być również analiza korelacji rozbieżności między poziomami zwierciadła wody pomierzonym i uzyskanym z modelu. Może wskazać ona błędy w systemie monitoringu wód i konieczność jego optymalizacji oraz zmian lokalizacyjnych punktów pomiarowych lub czasokresów wykonywania pomiarów. Rozkład linii wody uzyskany za pomocą obliczeń modelowych jest bardziej korzystny z punktu widzenia wpływu na stateczność. Należy przyjąć, że interpretacja przez model dyskretnych danych pomierzonych bardziej odpowiada warunkom rzeczywistym.

Duże obiekty hydrotechniczne stanowią potencjalne źródło zagrożeń dla przyległych obszarów. Jest ono tym większe, im większy jest obiekt pod względem kubatury lub wysokości. Zagrożenie takie wystąpić może nie tylko w warunkach katastrofy, ale również migracji wód w warstwach podłoża i jego otoczenia. Wypieranie podłoża w pewnej odległości od budowli, szczególnie w warstwach wrażliwych na zmienne warunki wodne, może zakończyć się katastrofą w części budowli lub uaktywnieniem uprzywilejowanych kanałów filtracji i zalaniem obszarów na dużej przestrzeni, czego ostateczne skutki są często trudne do przewidzenia.

Z punktu widzenia inżynierskiego opracowanie modelu i jego wykorzystanie do przeprowadzenia wielowariantowych symulacji może mieć nieocenione znaczenie dla projektanta obiektu i odpowiedzialnych służb eksploatacyjnych.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone obliczenia numeryczne zarówno w zakresie modelu matematycznego filtracji ustalonej, bazującej na nieliniowym modelu Boussinesqa, jak i w zakresie aproksymacji (model DTM) i interpolacji (model GRID) pozwalają stwierdzić, że zaproponowana metodyka obliczeń metodą elementów skończonych prowadzi do dobrego przybliżenia rzeczywistości i jest właściwym krokiem w kierunku budowy w pełni trójwymiarowego modelu matematycznego przepływu filtracyjnego w obszarze składowiska i otaczającego go terenu. Model taki może stanowić ważny element monitoringu filtracji w obszarze składowiska i może być istotnym elementem określenia stanu naprężenia i odkształcenia wewnątrz składowiska, procesów reologicznych w jego obszarze oraz stateczności obiektu.

Prace nad opracowaniem modelu są trudne, wymagają znacznych nakładów czasu, stworzenia baz danych oraz wykorzystania innych programów wspomagających. Pomimo tego jego rola w pracach symulacyjnych, inżynierskich i eksploatacji jest znacząca. Model powinien być wykorzystany nie tylko przez hydrogeologów zajmujących się gospodarką wodną budowli hydrotechnicznej, ale szczególnie przez geotechników i konstruktorów zajmujących się projektowaniem i obsługą geotechniczną obiektu.

Wykonany model stanowi podstawę do przeprowadzenia dalszych prac zmierzających do ulepszenia przestrzennego numerycznego zwierciadła swobodnego wód podziemnych w badanym ośrodku. Stanowi on jednocześnie punkt wyjścia do rozważań nad bezpieczeństwem dalszej eksploatacji zbiornika. Kolejnym etapem prac jest sprawdzenie, jak zmieni się kształt zwierciadła swobodnego wód podziemnych przy zmianie warunków brzegowych, współczynników filtracji i czy nie wpłynie to niekorzystnie na stateczność zapory oraz całego zbiornika. Model daje możliwość przeprowadzania symulacji i prognozowania warunków hydrogeologicznych w przyszłości. Ze względu na bardzo duży zbiór danych z pomiarów piezometrycznych należy przeprowadzić ich wnikliwą weryfikację i odrzucić pomiary znacząco odbiegające od pozostałych. Wpłynie to na skrócenie procesu kalibracji modelu matematycznego z modelem z pomiarów i będzie lepszym odzwierciedleniem warunków rzeczywistych. Dodatkowo należy zoptymalizować system monitoringu wód podziemnych w taki sposób, aby dane wprowadzane do systemu komputerowego obciążone były jak najmniejszym błędem.



Przedstawiony model jest bardzo przydatny przy projektowaniu oraz podczas eksploatacji tego typu budowli hydrotechnicznych. Może być pomocny w pracach inżynierów, geologów i hydrogeologów.

## LITERATURA

- Nowak J., 2007. Możliwości zwiększenia masy odpadów przemysłowych deponowanych w składowiskach na przykładzie popiołów. *Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud*, 2, Wyd. KGHM Cuprum Spółka z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, 2, 5.
- Kisielewicz Z., 2007. *Charakterystyka drenażu składowiska Żelazny Most wg stanu na rok 2006*. CBPM CUPRUM Sp. z o.o., Grupa Kapitałowa KGHM Polska Miedź SA, Wrocław.
- Nowak J., Butra J., Kudełko J., Pyra J., Strzelecki T., Konsencjusz D., Strzelecki M., Barańska-Buslik A., Kisielewicz Z. & Niedbał M., 2008. *Badania skuteczności procesu uszczelniania dna składowiska Żelazny Most*. Raport roczny za okres 01.07.2007 – 30.06.2008 r.
- Strzelecki T., Kostecki S. & Żak S., 2007. *Modelowanie przepływów przez ośrodki porowate*. DWN, Wrocław, 4.

## Summary

One of the most important elements of proper modeling of the processes is knowledge of tested area geometry (Fig. 1), what in geological problems boil to the creation of spatial mapping of: particular geological strata, dislocations, spatial image of aquifer, spatial model of underground water level. Spatial mapping of any area geometry is numeric model (Fig. 2) of relief and numeric model of geological building, and especially three-dimensional model of underground water level (Fig. 3). Such a model could be used to conduct many analytic and prognostic works in the range of additional safety of constructions. It might concern an evaluation of additional drainage systems application (Tab. 1) as well as the other engineering solving for increasing of construction safety or its parts. The above analysis can show sensibility of used solutions as well as to indicate circumstances and the time of effects, if it should works for longer. In case of perspective activity, mentioned model could let on carrying out their correctness in following projects. Simultaneously, basing on prognosis, it is possible to make an optimization of existing monitoring net as well as for expanding objects.