

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA MODELU FILTRACJI DO PROGNOZY ODDZIAŁYWANIA GŁĘBOKO POSADOWIONEGO BUDYNKU NA ZMIANĘ POŁOŻENIA ZWIERCIADŁA WODY GRUNTOWEJ W PODŁOŻU

AN EXAMPLE OF THE APPLICATION OF A FILTRATION MODEL TO THE PREDICTION OF THE INFLUENCE OF A DEEP-FOUNDED BUILDING ON GROUNDWATER LEVEL CHANGES

MARIUSZ KOWALÓW¹, MARTA CHRYSĆINA¹, MAŁGORZATA WRÓBEL-HEN¹

Abstrakt. Większość obecnie budowanych obiektów wielokubaturowych wyposaża się ze względów ekonomicznych w kondygnacje podziemne użytkowe lub z przeznaczeniem na miejsca parkingowe. Bardzo ważnym jest, aby już na etapie projektowania zaplanować optymalny, ekonomiczny i bezpieczny system odwadniania, a także zaprojektować rozwiązania techniczne mające na celu eliminację oddziaływań części podziemnej obiektu na zmiany stanów wód podziemnych w jego sąsiedztwie. Zastosowanie matematycznych modeli filtracji wód podziemnych pozwala na przeprowadzenie prognozy oddziaływania procesu odwodnienia wykopu, a także ustalenia wpływu nowo budowanych obiektów na zmianę stosunków wodnych na danym obszarze, zarówno w czasie budowy, jak i w okresie eksploatacji obiektu. W artykule przedstawiono przypadek wykorzystania modelu filtracji wód podziemnych w programie SPRING do budowy obiektu handlowego, zlokalizowanego w ścisłym centrum Budapesztu. Projekt obejmuje budowę dużego obiektu z garażem podziemnym. Wykorzystując model filtracji, dokonano oceny zmian pola przepływu wód podziemnych, będących skutkiem wykonania obiektu oraz prowadzenia odwodnienia wykopu fundamentowego. Wykonano także prognozę zmiany poziomów zwierciadła wód gruntowych wokół obiektu z uwzględnieniem oddziaływania fali powodziowej w Dunaju na teren inwestycji. Na podstawie wyników obliczeń modelowych zaproponowano stosowne rozwiązania inżynierskie w celu ograniczenia wpływu na obiekty sąsiadujące oraz potencjalne zmiany stosunków wodnych w obszarze planowanej inwestycji.

Słowa kluczowe: modelowanie filtracji, oddziaływanie obiektu, zwierciadło wód gruntowych.

Abstract. Nowadays, for economical aspect, most of large cubature objects are constructed with underground storeys or car park areas. During the planning phase, it is important to design an optimal, economical and safe dewatering system and technical solutions aimed to eliminate the influence of underground structure on groundwater levels in the neighbourhood. Mathematical modelling of groundwater filtration allows creating a prognosis of excavation dewatering process and influence of new buildings on groundwater levels in subject areas during both execution and operation of structure. The paper presents an example of groundwater filtration modelling for a shopping mall in the centre of Budapest, using SPRING software. The project includes the construction of a large building with an underground story for cars. With filtration models, it was possible to assess the changes in groundwater flow fields caused by projected structure and its excavation dewatering system and the prognosis of groundwater levels around the building, taking into consideration the influence of the flood wave from the Danube on groundwater filtration in the investment area. Based on modelling results the suitable technical solutions were proposed, which allow limiting the effect on the surrounding buildings and the potential changes of water levels in the investment area.

Key words: filtration modelling, influence of buildings, groundwater level.

¹ Geotechnical Consulting Office Spółka z o.o. Sp. k., ul. Jagiellońska 90/5, 70-437 Szczecin; e-mail: m.kowalow@gco-consult.com, m.chryscina@gco-consult.com, m.wrobel@gco-consult.com.

WSTĘP

W przypadku analizy budowy obiektów wielkogabarytowych w ścisłych centrach miejskich z reguły należy wykazać, w jaki sposób planowany obiekt może oddziaływać na otoczenie. Nadrzędnym celem opracowania modelu przepływu wód podziemnych jest konieczność stworzenia solidnego instrumentu do prognozowania skutków oddziaływania czynników wpływających na zmiany filtracji wód podziemnych. W omawianym przypadku do czynników tych należy zaliczyć w szczególności obudowę wykopu budowlanego, zakotwionego w gruntach nieprzepuszczalnych, który po zakończeniu budowy całkowicie odetnie przepływ, uwzględnionych w modelu, zasobów wód podziemnych pod planowanym obiektem.

MODELOWANIE MATEMATYCZNE FILTRACJI WÓD PODZIEMNYCH Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU SPRING

W literaturze można znaleźć wiele rozwiązań problemu filtracji wód zarówno metodami analitycznymi (dla prostych przypadków), jak i za pomocą rozwiązań numerycznych modeli matematycznych (Kowalów, 2000).

Pośród dostępnych metod rozwiązania zagadnienia filtracji autorzy zastosowali program SPRING (König i in., 2008), dający duże możliwości obliczeniowe, zwłaszcza w zakresie weryfikacji danych gruntowych pochodzących z badań terenowych. Pakiet programowy SPRING opiera się na równaniu filtracji w ośrodku anizotropowym. Rozwiązanie przybliżone uzyskuje się, wykorzystując metodę elementów skończonych (MES). Program wymaga wprowadzenia geometrii analizowanego obszaru, parametrów gruntowych, określenia zasilania obszaru filtracji przez opad (infiltracja) oraz zasilania na granicy modelu. Dla obszaru rozwiązania generuje się siatkę obliczeniową metodą elementów skończonych.

Jako rozwiązanie otrzymuje się wartości składowych prędkości przepływu w węzłach siatki, a dla przepływu ustalonego dodatkowo linie prądu.

Program SPRING umożliwia rozwiązywanie równania ciągłości i prawa Darcy'ego metodą elementów skończonych. W modelu uwzględniono porowatość ośrodka i jego niejednorodność. Program może być zastosowany do ustalonych i nieustalonych warunków przepływu wód w gruncie.

Przy tarowaniu modelu uwzględniano przyjęte warunki brzegowe, początkowe oraz parametry modelu. Program umożliwia między innymi:

- obliczanie czasu i drogi przepływu dla dowolnie wybranych punktów dyskretyzowanego obszaru;
- uwzględnienie w obliczeniach wpływu cieków powierzchniowych i ich kontaktu z wodami podziemnymi;
- wizualizację obliczeń w postaci kolorowej grafiki liniowo-powierzchniowej (trójwymiarowy obraz blokowy).

MODEL FILTRACJI WYKONANY DLA OBIEKTU W BUDAPESZCIE

W artykule przedstawiono nieopisywany wcześniej w literaturze model filtracji, sporządzony w ramach przygotowywania przez GCO dokumentacji do pozwolenia na budowę obiektu w Budapeszcie dla prywatnego inwestora (GCO, 2010).

Wykalibrowany model posłużył do wykonania obliczeń prognozowanych oddziaływań na stosunki wodne w stanie budowy i eksploatacji obiektu.

Obliczenia wykonano dla warunków ustalonych (stany średnie), a także dla warunków nieustalonych (przejście fali powodziowej w Dunaju) (Kowalów, 1998).

Oddziaływania obiektu przedstawiono dla stanów średnich i wysokich (przejście fali powodziowej w Dunaju) w postaci różnic stanów wód podziemnych w odniesieniu do sytuacji wyjściowej (stany średnie/ wysokie bez obiektu).

GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA, HYDROGEOLOGIA W REJONIE PLANOWANEJ INWESTYCJI

Teren badań, a zrazem teren inwestycji, jest położony po wschodniej stronie doliny Dunaju w dzielnicy Óbuda, ok. 140 m od odnogi rzeki. Rzędne terenu w rejonie planowanej inwestycji wynoszą ok. 103–106 m n.p.m.

Mięszczość żwirów waha się w granicach od 3–12 m (UGB, 1972). W rejonie inwestycji mięszczość ta wynosi ok. 6–9 m (głębokość zalegania ok. 6–16 m p.p.t. – tzn. ok. 89–98 m n.p.m.).

Na terenie inwestycji wody podziemne pozostają w kontakcie hydraulicznym z wodami Dunaju. W dolinie Dunaju w wyniku spiętrzenia stanów wody w rzece stany wód podziemnych ulegają znacznemu wzniesieniu (od ok. 2,5 do 5 m) (UWB, 2010).

Współczynniki filtracji w rejonie inwestycji zostały określone na podstawie długotrwałych próbnych pompowań w węźle głównym i pomiarach w piezometrach sąsiednich (GCO, 2010).

Obliczony na podstawie metody Dupuit-Thiema współczynnik filtracji żwirów wynosi około $k = 10^{-3}$ m/s. Przy średniej mięszczości warstwy wynoszącej ok. 10 m przewodność hydrauliczna wynosi ok. $T = 10^{-2}$ m²/s.

Filtracja na terenie inwestycji odbywa się z kierunku NW–SE do rzeki.

MODEL HYDROGEOLOGICZNY

Warstwę wodonośną stanowią Żwiry Dunajskie i piaski, które podścielane są przez warstwy ilów o znacznej mięszczości. Ograniczenie dolne modelu dopasowano do układu izolacji spągu warstwy żwirów. Mięszczość warstwy wodonośnej waha się w granicach 4–24 m, średnia mięszczość w modelu wynosi ok. 12 m. Jako daną wyjściową do kalibracji przyjęto współczynnik filtracji 10^{-3} m/s.

SIATKA MODELU

Program SPRING, wykorzystany do opracowania modelu, umożliwia przestrzenną dyskretyzację siatki na elementy trójkątne i czworokątne różnej wielkości. Dzięki temu, w zależności od położenia i oddziaływania czynników wpływających na hydraulikę wód gruntowych, można wybrać odpowiednio większą lub mniejszą rozdzielczość. Wykonany model składa się z 46739 elementów i 46629 węzłów. Długość boków elementów wynosi od ok. 6 m – w rejonie projektu, do 12 m – na pozostałym obszarze.

Granice modelu o powierzchni ok. 7 km² wyznaczono na podstawie mapy hydroizohips dla stanów średnich z uwzględnieniem topografii terenu (digitalny model ukształtowania powierzchni w siatce 5 × 5 m). Od wschodu granicę stanowi Dunaj (warunek brzegowy I rodzaju). Od zachodu granicę przyjęto na rzędnej ok. 105 m n.p.m. (częściowo potencjał jako warunek brzegowy I rodzaju a częściowo stały

dopływ – jako warunek brzegowy II rodzaju). Na północy i południu przyjęto granice prostopadłe do układu hydroizohips (warunek brzegowy: $q=0$, *no-flow*) (fig. 1).

KALIBRACJA MODELU

Celem kalibracji stacjonarnej jest iteracyjne dopasowanie parametru w obrębie sensownie wyznaczonych granic tak, aby osiągnąć możliwie najlepszą zgodność obliczonych poziomów wody podziemnej z poziomami zmierzonymi. W tym celu konieczne jest, aby wykorzystane poziomy wód podziemnych odpowiadały stanom średnim.

Dla modelowanego obszaru dysponowano łącznie 14 pomiarami poziomu wody podziemnej. Dodatkowo uwzględniono również archiwalne układy hydroizohips w rejonie projektowanego budynku.

Dopasowanie obliczonych i pomierzonych stanów wód wykonano przy pomocy metody gradientów, przy czym ite-

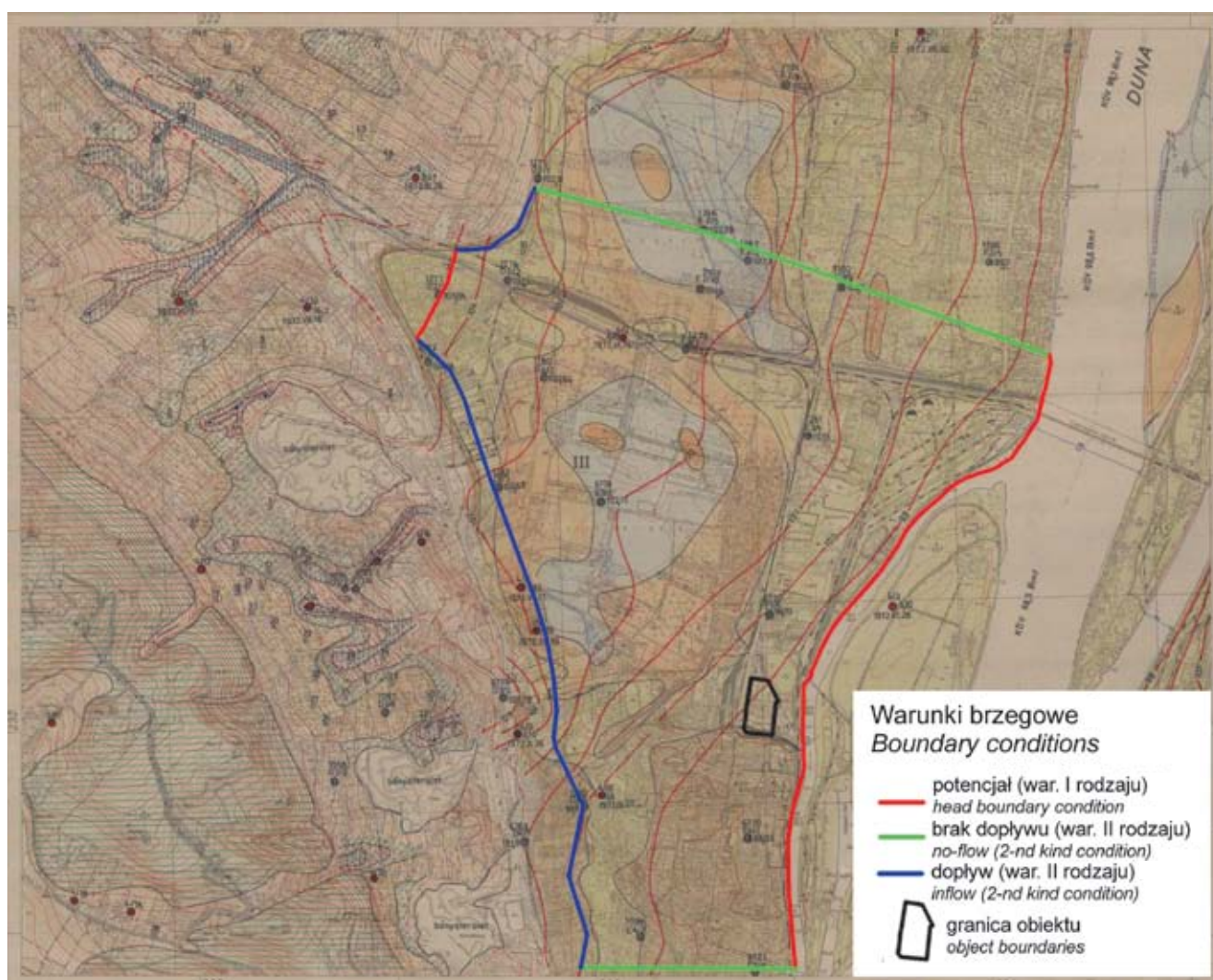


Fig. 1. Warunki brzegowe modelu

Boundary conditions of the model

racyjnie zmieniano wartości współczynnika k przy pomocy pomierzonych i obliczonych gradientów zgodnie z formułą:

$$k_{n+1} = (I/I^*) \cdot k_n$$

gdzie:

k – współczynnik filtracji w danym elemencie

I – gradient obliczony w modelu

I^* – gradient wyznaczony na podstawie pomiarów w terenie

n – krok iteracji

Ponadto tak dopasowywano dopływ z rejonu granicy zachodniej, aby obraz układu współczynników k i hydrozhips były najbardziej zbliżone do rzeczywistego.

Po przeprowadzeniu kalibracji modelu, średnie odchylenie pomiędzy zmierzonymi i obliczonymi poziomami wody gruntowej w wykopie wynosiło 0,22 m (wg metody

błędów średnich kwadratowych). Ze względu na ograniczony zakres danych, odnośnie pomierzonych wartości stanów wód podziemnych oraz ze względu na niedokładność modelu ukształtowania powierzchni terenu, uzyskaną w wyniku kalibracji wartość odchylenia dla rozpatrywanego problemu można uznać za wystarczająco dokładną.

Obliczona w wyniku kalibracji średnia wartość współczynnika filtracji wynosi 0,0012 m/s (fig. 2).

OBLICZENIA PROGNOSTYCZNE

Obliczenia dla stanów średnich

Celem oszacowania oddziaływań obiektu w trakcie budowy, w siatce modelu „umieszczono” obiekt o powierzchni wykopu ok. 25 500 m². Wzdłuż krawędzi wykopu założono ścianę szczelinową zakotwioną w łożach o bardzo niskim współczynniku filtracji rzędu $k = 10^{-10}$ m/s.

W wyniku obliczeń ustalono, że wystąpi maksymalne spiętrzenie stanów wód podziemnych w strefie napływu wynoszące ok. 0,4 m w stosunku do stanów wyjściowych, a zasięg spiętrzenia wyniesie ok. 400 m. W strefie odpływu wystąpi obniżenie maksymalne rzędu ok. 0,25 m a zasięg oddziaływania wyniesie do 80 m (fig. 3).

Zastosowanie lewara w przypadku stanów średnich w znacznym stopniu umożliwi redukcję oddziaływań (fig. 4).

Obliczenia dla stanów wysokich

W celu uwzględnienia stanów wysokich, analizie poddano dane węgierskiego urzędu meteorologicznego, uwzględniające dane dotyczące stanów wysokich w Dunaju w okresie od 1910 do 2010 r.

Średnie stany wysokie w Dunaju wynoszą 98,97 m n.p.m. Stan 100-letni (najwyższy w okresie pomiarowym) pomierzono w 2006 r. Woda w rzece uległa spiętrzeniu o 8,54 m (103,6 m n.p.m.) powyżej stanu średniego. W wyniku analizy danych do obliczeń niestacjonarnych wybrano okres 21.03–16.05.2006.

W wyniku obliczeń ustalono, że wystąpi maksymalne spiętrzenie stanów wód podziemnych pomiędzy obiektem a Dunajem wynoszące ok. 1,5 m. W strefie odpływu (zachodnia strona obiektu) wystąpi

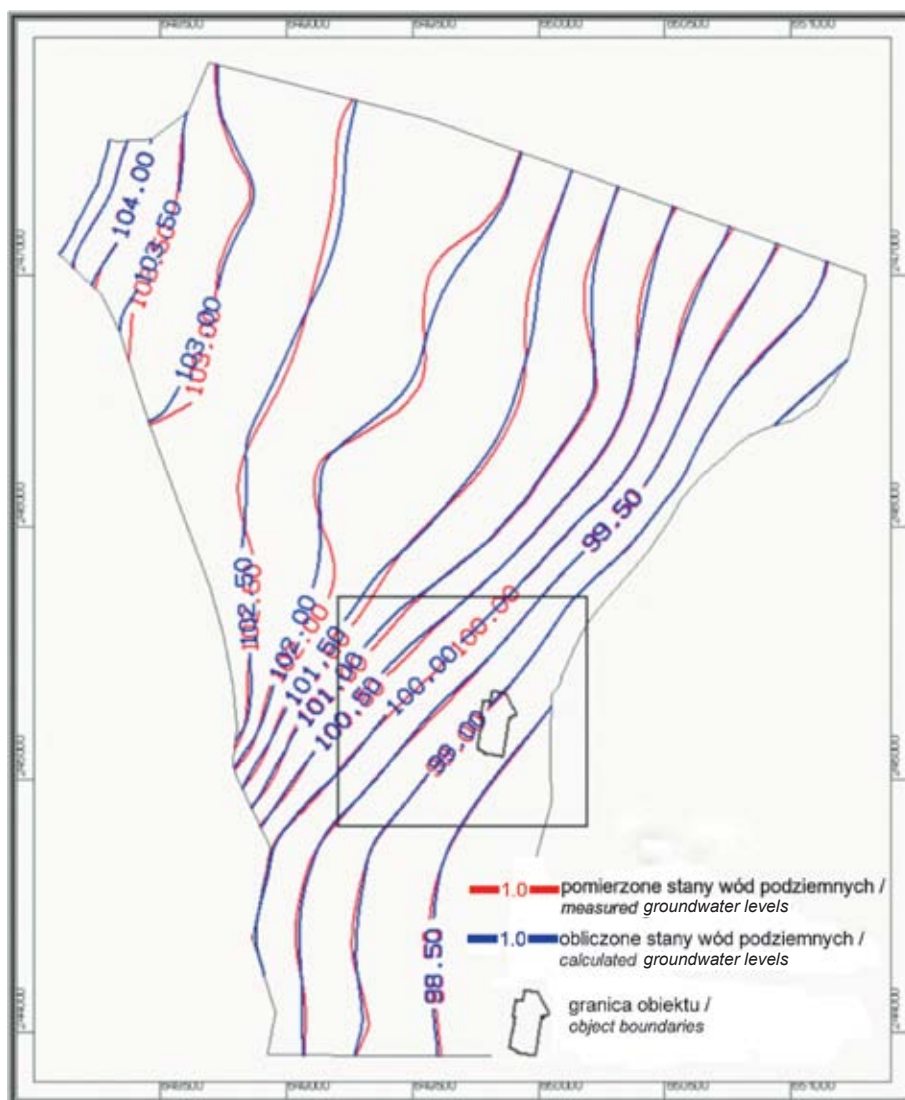


Fig. 2. Obliczone i pomierzone stany wód podziemnych

Calculated and measured groundwater level

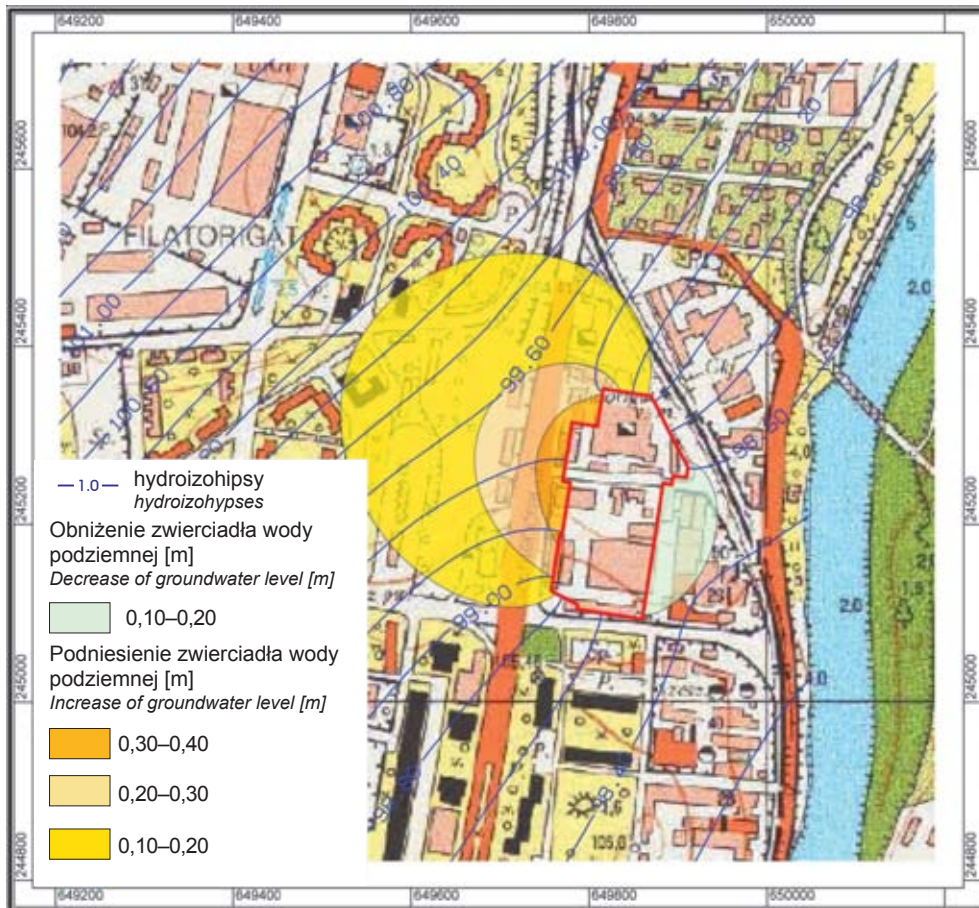


Fig. 3. Zasięg oddziaływania obiektu na poziom zwierciadła wód gruntowych (ZWG) w trakcie budowy

Horizontal extent of the building on groundwater level during constructions works

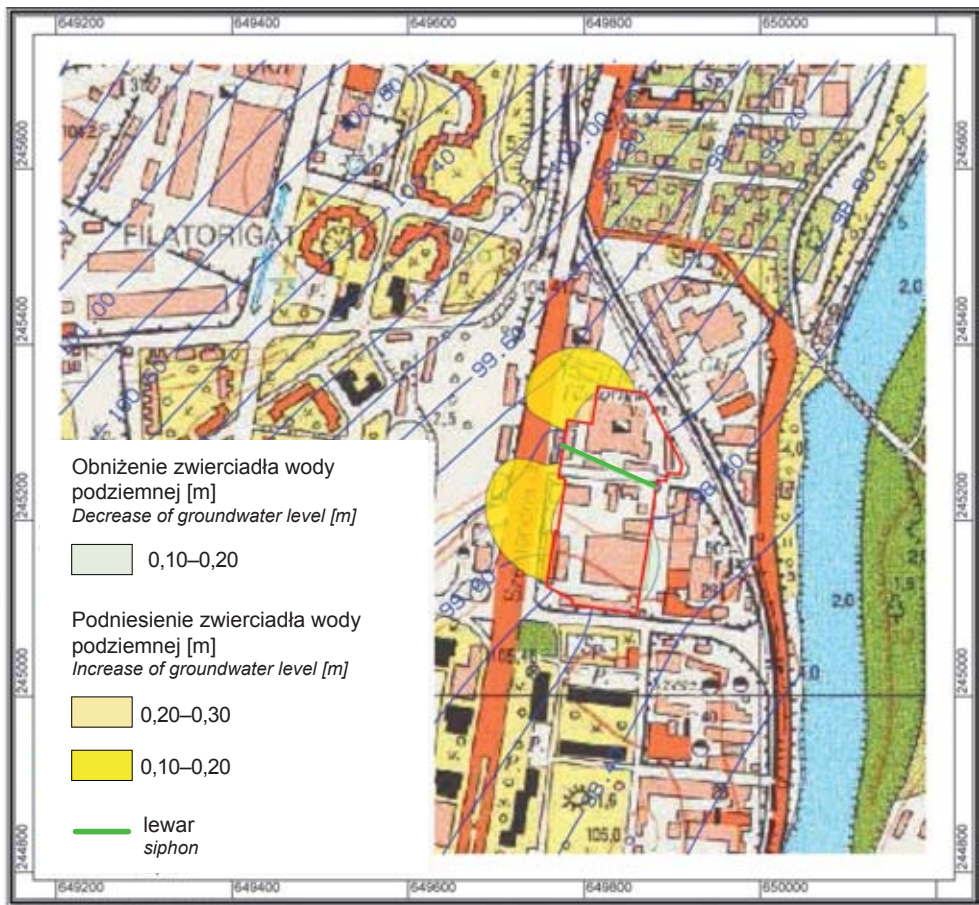


Fig. 4. Zasięg oddziaływania obiektu na poziom ZWG w trakcie budowy z zastosowaniem lewara

Horizontal extent of the building on groundwater table using siphon during constructions works

obniżenie o ok. 0,4 m w stosunku do stanów wyjściowych (wysokich) (fig. 5).

Potencjalne zastosowanie lewara w przypadku stanów wysokich mogłoby tylko nieznacznie zredukować te oddziaływania (spiętrzenie 1,2 m, obniżenie 0,1 m). Natomiast ewentualne wykonanie „okien hydraulicznych” w ścianie zabezpieczającej wykop budowlany umożliwiłoby znaczną redukcję oddziaływań w przypadku stanów wysokich (powódź w Dunaju), umożliwiając filtrację wody pod obiektem. Wykonanie ściany np. z pali wierconych i skrócenie ich lub przewiercenie w części niezbrojonej powyżej poziomu zalegania gruntów spoistych, umożliwi po zakończeniu fazy budowy „otworzenie” obszarów pozwalających na przepływ wody pod obiektem. Takie rozwiązanie umożliwi redukcję spiętrzenia o ok. 0,5 m.

PODSUMOWANIE

W ramach przygotowywania dokumentacji do pozwolenia na budowę dla obiektu w Budapeszcie wykonano badania hydrogeologiczne oraz analizy stanów wód gruntowych i warunków filtracji. Analizy te wspomagano, wykonując model komputerowy filtracji wód gruntowych dla warunków ustalonych i niestalonych. Z pomocą modelu określono pole przepływu, prędkości oraz wydatki. Z wykalibrowanym modelem można

było wykonać prognozę zmiany warunków filtracji w czasie budowy oraz po jej zakończeniu. Wykazano, iż po wykonaniu obiektu oddziaływanie na zmiany stanów wód będą mieściły się w granicach wahań stanów podziemnych tj. ok. $\pm 1,5$ m.

Zastosowanie modeli filtracji wód podziemnych jest istotnym i pomocnym narzędziem w procesie przygotowania i realizacji projektów budowlanych.

LITERATURA

- GEOTECHNICAL CONSULTING OFFICE (GCO), 2010 – Hydrogeologisches Gutachten für das geplante EKZ Bogdani in Budapest, Ungarn, GCO10015/02, 29.07.2010. Archiwum GCO.
- KOWALÓW M., 1998 – Einfluss von Wasserstandveränderungen eines Vorfluters auf die Grundwasserverhältnisse einer nahegelegenen Deponie. *Geotechnik*, **21**, 2: 103–107.
- KOWALÓW M., 2000 – Wpływ zabezpieczeń inżynierskich na zmiany hydraulicznych warunków filtracji ze składowisk odpadów. *Pr. Nauk. PSz.*, **552**, 6.
- KÖNIG C., DELTA H INGENIEURGESELLSCHAFT MBH, 2008 – Dokumentacja programu SPRING, Dortmund.
- URZĄD GEOLOGICZNY BUDAPESZT (UGB), 1972 – Mapy hydrogeologiczne nr 3–7.
- URZĄD WODNY BUDAPESZT (UWB), 2010 – Stany wód powierzchniowych 1910–12.07.2010.

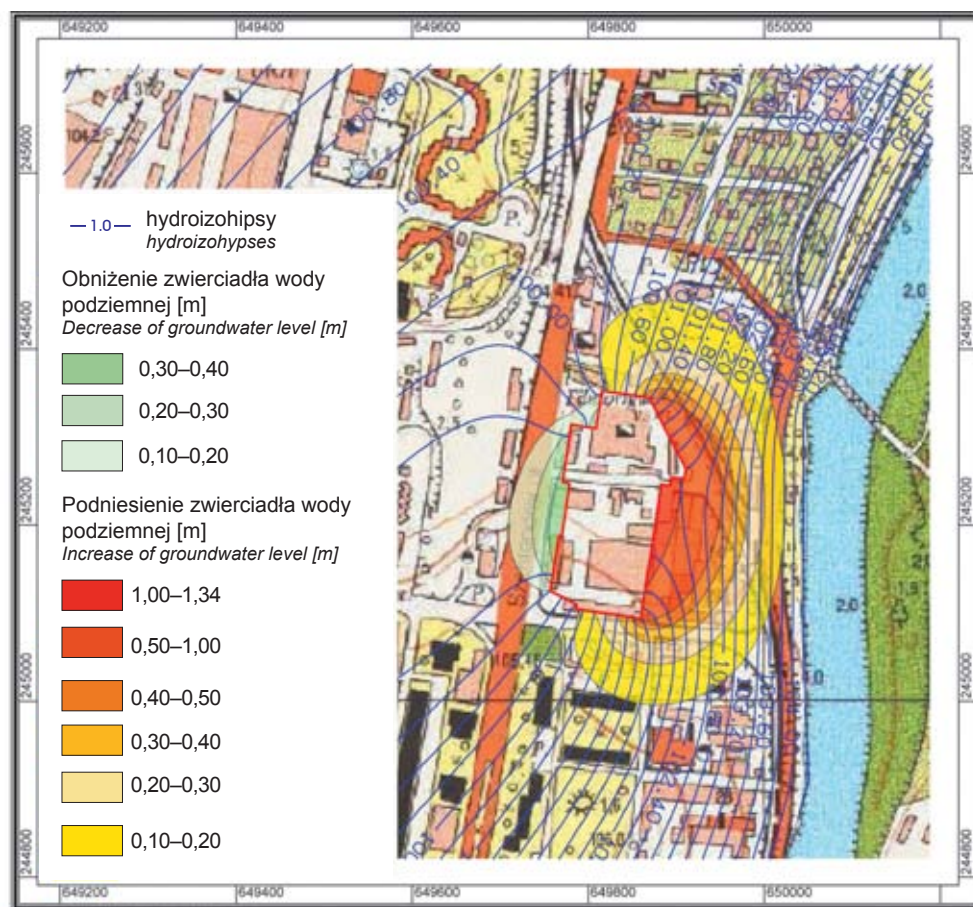


Fig. 5. Oddziaływanie obiektu na poziom ZWG w okresie przejścia fali powodziowej

Building influence on the groundwater table during the flood wave surge

SUMMARY

The paper presents an analysis of groundwater level changes around a structure and the influence of Danube flood wave on groundwater level fluctuations in a shopping mall area in the centre of Budapest. As there are groundwater level changes, possible negative environmental effects on the surrounding buildings are also pointed out in the article.

The paper presents the practical use of SPRING software to create a mathematical model of groundwater flow in the investment area.

The model allows both evaluating different construction design solutions, which may reduce the influence of the investment on groundwater level changes, and analysing the effect of Danube flood wave on groundwater conditions in the investment area.

GCO analysis of the influence of underground parts of the buildings on filtration conditions allows a multiple selection of efficient design solutions, which protects, *e.g.* surrounding buildings, against flooding the underground storeys as a result of groundwater level rise. The filtration model, created before the investment starts, may efficiently protect the Investor against the claims of owners of neighbouring buildings in case of flooding or excessive settlement of the building caused by groundwater level fluctuations around it. It also allows for early prevention of construction failures using appropriate construction solutions.

The presented considerations indicate that the influence of the building on the groundwater level will be not bigger than 1,5 m.

