

Zastosowanie mieszania wglębnego i iniekcji strumieniowej do wzmocnienia podłoża pod budynkiem basenu

Michał Topolnicki¹, Jerzy Świniański¹, Krzysztof Baran¹,
Władysław Zaborowski², Rafał Zaborowski²

¹ Keller Polska Sp. z o.o., Specjalistyczne Techniki Fundamentowania, o/Gdynia

² DEXBUD Sp. z o.o., Pracownia Projektowa, Gdańsk

Streszczenie Przedstawiono jeden z pierwszych przykładów zastosowania w Europie nowoczesnej technologii wglębnego mieszania gruntu na mokro (wet Deep Soil Mixing) w celu posadowienia budynku basenu na uwarstwionym podłożu zawierającym grunt organiczny. Technologia wet DSM, wprowadzona w Polsce przez firmę Keller, polega na mechanicznym mieszaniu in situ gruntu z zaczynem cementowym i pozwala na formowanie kolumn z cementogruntu w układzie dostosowanym do wymagań statycznych. Ponadto zastosowano iniekcję strumieniową (jet grouting) do podchwycenia starych fundamentów oraz posadzki w części budynku posadowionej pierwotnie w sposób bezpośredni.

1. Wprowadzenie

W jednym z polskich kurortów rozpoczęto przed kilkoma laty budowę basenu wraz z zapleczem odnowy, który w założeniu miał również spełniać wymagania stawiane wyczynowym pływalniom sportowym. Budynek wraz zapleczem oraz nieckę basenu sportowego i dziecięcego posadowiono w sposób bezpośredni, z częściową wymianą słabych gruntów zalegających pod powierzchnią terenu. Po wykonaniu stanu surowego zaobserwowano w wielu miejscach zarysowania i pęknięcie ścian, nierównomierne osiadania oraz rozszczelnienie niecki basenu. Budowę wstrzymano i wykonano dodatkowe badania geotechniczne. Stwierdzono występowanie pod fundamentami warstw torfu o miąższości do 1,5 m, który nie zostały wymieniony. Podjęte działania naprawcze polegały na całkowitym przeprojektowaniu budynku i jego posadowienia, przy założeniu wykorzystania części istniejącego obiektu. Niecki obydwu basenów oraz część hali rozebrano.

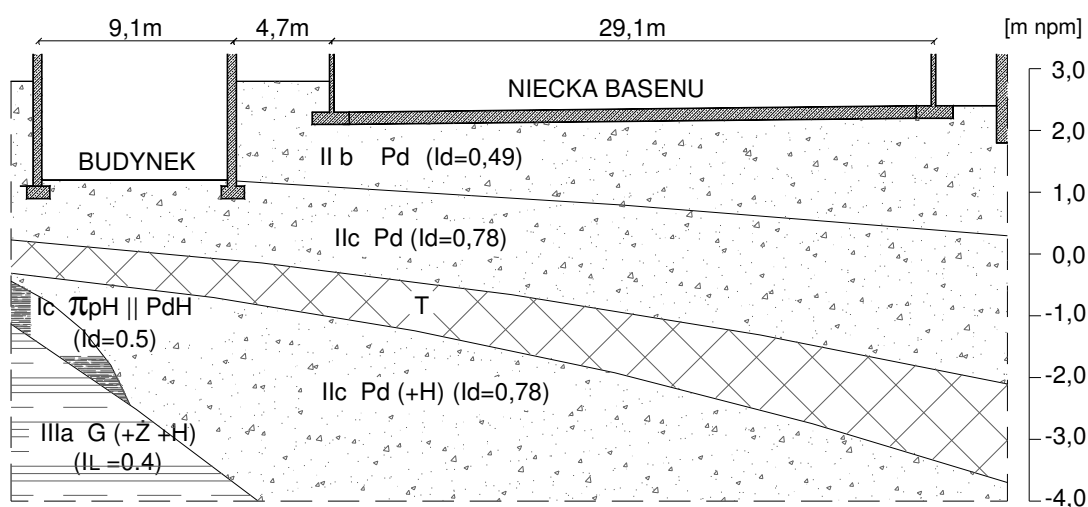
Firma Keller Polska zaproponowała posadowienie nowych płyt fundamentowych na podłożu wzmocnionym za pomocą technologii wglębnego mieszania gruntu DSM na mokro (wet Deep Soil Mixing) oraz podchwycenie istniejących fundamentów za pomocą technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete® (jet grouting).

2. Charakterystyka warunków gruntowych

Wstępne rozpoznanie geologiczne z roku 1996 wskazywało na obecność w podłożu podpowierzchniowych nasypów niekontrolowanych, jak również dwóch warstw torfu przewarstwionych piaskami. W ramach robót makroniwelacyjnych i fundamentowych usunięto nasypy niekontrolowane oraz górną warstwę torfu o miąższości do około 0,5 m,

zalegającą na głębokości od 0,5 do 1,5 m poniżej poziomu posadowienia obiektu, który dla niecki basenu i części niepodpiwniczonej przyjęto na rzędnej +1,5 m n.p.m. a w części podpiwniczonej budynku na rzędnej +0,8 m n.p.m. Na obwodzie i wewnątrz budynku zainstalowano studnie odwadniające, których zadaniem było obniżenie zwierciadła wody gruntowej w czasie wykonywania wymiany gruntu oraz robót fundamentowych.

Drugą warstwę torfu o miąższości od 0,8 m do 1,5 m, której strop znajdował się na rzędnej od 0,0 do -2,0 m n.p.m. a spąg na poziomie od -0,8 do -3,5 m n.p.m., pozostawiono w podłożu. Przyczyny tej decyzji nie są dokładnie znane. Na podstawie badań geotechnicznych wykonanych w roku 2000, a więc już po wykonaniu pierwszego stanu surowego budynku, stwierdzono że druga warstwa torfu występuje niemal pod całym obiektem (rys. 1).



Rys.1 Przykładowy przekrój geotechniczny po ukończeniu pierwszego etapu robót

3. Nowy sposób posadowienia budynku

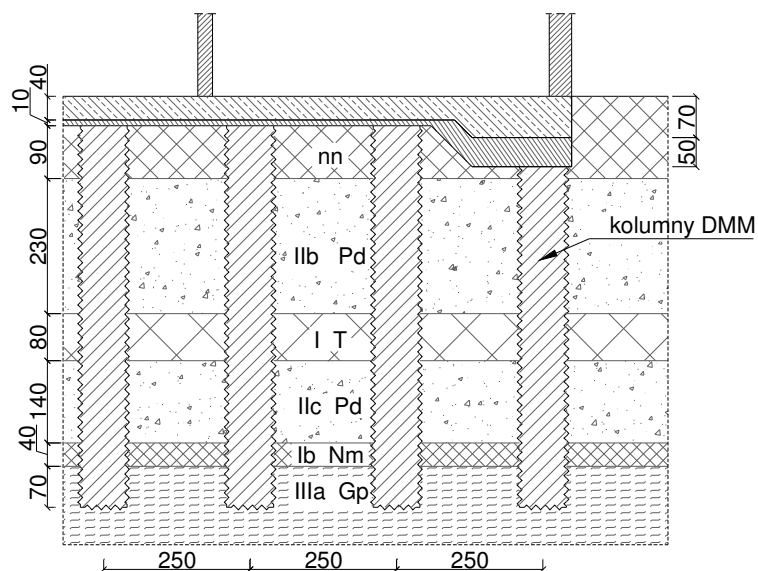
Zły stan techniczny budynku, spowodowany dotychczasowymi odkształceniami konstrukcji, oraz obawa o dalsze niekontrolowane osiadania wrażliwych na deformacje basenów i pomieszczeń zabiegowych wywołały konieczność przeprowadzenia gruntownej naprawy całego obiektu, zgodnie z projektem wykonanym przez Pracownię DEXBUD [5]. W ramach naprawy przewidziano rozbiórkę części budynku oraz zmianę całego układu konstrukcyjnego.

W projekcie posadowienia, opracowanym we współpracy z DEXBUD założono, że nowe fundamenty oraz płyty fundamentowe basenów zostaną posadowione na kolumnach z cementogruntu wykonanych w technologii wgłębnego mieszania gruntu DSM. Zachowane fundamenty oraz posadzki piwnic podchwycono za pomocą iniekcji strumieniowej Soilcrete®.

Technologia wgłębnego mieszania gruntu na mokro [3], ujęta również w wytycznych IBDiM na temat wzmacniania podłoża gruntowego [4], doprowadza do radykalnego poprawienia właściwości mechanicznych istniejącego podłoża gruntowego, które po mechanicznym wymieszaniu z zaczynem cementowym przybiera formę tzw. cementogruntu. Kolumny DSM są pod względem właściwości podobne do szerzej znanych kolumn

wykonanych metodą iniekcji strumieniowej, gdzie wykorzystuje się hydrauliczną zasadę odpajania i mieszania gruntu.

Wgłębne mieszanie in situ gruntu na mokro systemem Kellera (DSM - wet) polega na wprowadzeniu w podłoże mieszadła o specjalnej konstrukcji, składającego się z żerdzi wiertniczej, belek poprzecznych i końcówki spiralnego świdra. Wiercenie odbywa się bez wstrząsów i jest wspomagane wypływem zaczynu cementowego z tzw. monitora, znajdującego się na końcu żerdzi wiertniczej. Po osiągnięciu głębokości założonej w projekcie następuje faza formowania kolumn DSM. W tym czasie obracane i podciągane do góry mieszadło zapewnia równomierne wymieszanie zaczynu z gruntem. Skład i ilość pompowanego zaczynu dostosowuje się do wymaganych właściwości cementogruntu. Technologia DSM jest przyjazna dla środowiska ze względu na stosowanie nieszkodliwych materiałów oraz wyróżnia się mniejszymi ilościami urobku w porównaniu do pali wierconych CFA lub iniekcji strumieniowej. Schemat podparcia płyty kolumnami DSM w rejonie otworu nr 46 przedstawiono na rys. 2.



Rys.2 Posadowienie płyty fundamentowej na kolumnach DSM (geologia wg otworu nr 46).

Przy projektowaniu wzmocnienia podłoża za pomocą technologii DSM oraz iniekcji strumieniowej wymaga się spełnienia warunków stanu granicznego nośności, tj. wewnętrznej i zewnętrznej nośności kolumn cementowo-gruntowych, oraz spełnienia kryteriów użytkowania związanych z ograniczeniem osiadania.

W gruntach uwarstwionych, zwłaszcza zawierających grunty organiczne, o wymiarowaniu kolumn DSM decyduje najczęściej warunek nośności wewnętrznej trzonu kolumny. W opisywanym przypadku założono osiągnięcie przez materiał kolumny DSM wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe równej $R_{28}=1,5$ MPa. Przy uwzględnieniu stosunkowo wysokiego ogólnego współczynnika bezpieczeństwa $\eta=3,0$ z uwagi na możliwą niejednorodność cementogruntu oznacza to, że maksymalna dopuszczalna siła charakterystyczna działająca na pojedynczą kolumnę o średnicy $D=0,8$ m może wynosić 251 kN.

Nośność zewnętrzną kolumn, przemieszczenia i rozkład obciążeń pod płytą fundamentową niecki basenu określono w następujący sposób.

W pierwszym etapie obliczono nośność kolumn DSM na podstawie zaleceń normy palowej PN-83/B-02482 jak dla pali wierconych, wykorzystując program NP89. Nośność zewnętrzna kolumny DSM o długości od 4,5 m do 7,5 m i średnicy 80 cm wynosiła od 400 kN do 580 kN, zależnie od długości trzonu i warunków gruntowych. Osiedzenia płyty fundamentowej basenu na kolumnach DSM obliczono przy założeniu sztywnej płyty i wykorzystaniu modelu opracowanego przez Priebe, wykorzystując autorski program GRETA [1]. Prognozowane osiadanie płyty basenu wynosiło od 3 do 8 mm zależnie od warunków gruntowych oraz lokalnie, w najsilniej obciążonym miejscu, około 12 mm. Na podstawie wyników powyższych obliczeń określono podatność sprężystą kolumn DSM wykorzystaną do wymiarowania płyty fundamentowej i określenia sił działających na poszczególne kolumny.

W drugim etapie zwymiarowano płytę fundamentową za pomocą programu ROBOT z pominięciem udziału gruntu między kolumnami DSM w przenoszeniu obciążenia. Kolumny pod płytą modelowano podporami idealnie sprężystymi. W ten sposób wyznaczono najniekorzystniejszy rozkład sił wewnętrznych w płycie fundamentowej oraz maksymalne siły w kolumnach DSM.

W trzecim etapie zweryfikowano obliczenia sił wewnętrznych w płycie fundamentowej oraz prognozę przemieszczeń za pomocą specjalistycznego programu PLAXIS [2] do obliczeń geotechnicznych. W analizie wykonanej dla układu płaskiego uwzględniono zróżnicowaną budowę podłoża gruntowego oraz sprężysto-plastyczny charakter podparcia płyty na kolumnach i gruncie. Kolumny DSM w układzie płaskim modelowano „ścianami” o szerokości 0,8 m i zastępczej sztywności. Stwierdzono, że uwzględnienie w obliczeniach oddziaływania gruntu pod płytą fundamentową redukuje naprężenia i siły w kolumnach DSM o ok. 10% do 20% w stosunku do schematu uproszczonego „płyta na podporach sprężystych” (tab. 1). Maksymalne siły w kolumnach występują po ścianą zewnętrzną basenu dla końcowego schematu obciążenia, uwzględniającego wszystkie obciążenia stałe, użytkowe i technologiczne (np. kolumna nr 32 w tab. 1).

Tab. 1 Porównanie obciążeń na kolumny DSM

Numer kolumny wg projektu	Obliczenia programem ROBOT	Obliczenia programem PLAXIS		
	Charakterystyczna siła na kolumnę *	Charakterystyczna siła na kolumnę *	Charakterystyczna siła na kolumnę **	Naprężenie w kolumnie
-	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]
32	263	250,6	230,7	461,4
83	180,8	179,3	141,6	283,2
100	176,6	186,5	151,2	302,4
117	173,3	178,2	156,0	312,0

* bez udziału gruntu między kolumnami w przenoszeniu obciążeń od płyty fundamentowej,

** z uwzględnieniem udziału gruntu między kolumnami w przenoszeniu obciążeń pod płytą.

Dla stanu budowlanego i końcowego stanu użytkowego określono również prognozowane osiadanie płyty fundamentowej basenu przy następujących założeniach:

- W stanie budowlanym na płytę fundamentową działają: ciężar płyty, ciężar ścian zewnętrznych oraz obciążenia od słupów usytuowanych wzdłuż ścian zewnętrznych. Pominięto ciężar samej niecki basenowej.
- W stanie końcowym uwzględniono pełne obciążenie płyty fundamentowej ciężarem konstrukcji i niecki basenowej, obciążeniem użytkowym i technologicznym.

Wyniki obliczeń zestawiono w tab. 2.

Tab. 2 Prognozowane osiadanie płyty fundamentowej w stanie budowlanym i użytkowym obliczone programem PLAXIS [2] i GRETA [1]

Lokalizacja	Program PLAXIS - osiadanie [mm]		Program GRETA
	Stan budowlany - bez niecki basenowej	Stan końcowy - pełne obciążenie płyty	Średnie osiadanie [mm] - dla pełnego obciążenia płyty
krawędź płyty	4,3	5,6	3 – 12 mm
środek płyty	0,8	4,3	

4. Przebieg robót

Prace wzmocniające rozpoczęto w grudniu 2001. W ciągu 2 tygodni wykonano 339 szt. kolumn DSM Ø 800 mm o długościach od 4,5 m do 7,9 m i łącznej długości 1993 mb.

Podczas robót rejestrowano automatycznie następujące parametry formowania kolumn DSM: długość kolumny, prędkość obrotową żerdzi wiertniczej, posuw w trakcie wiercenia i mieszania gruntu, liczba cykli mieszania, przepływ i objętość podawanego zaczynu oraz czas wykonania kolumny.

Po 7 dniach od wykonania kolumn przystąpiono do prac fundamentowych. Głowice kolumn DSM ścinano lub rozkuwano do poziomu spodu chudego betonu. Ewentualne ubytki i przegłębienia w głowicach kolumn uzupełniono betonem B10. Następnie zagęszczono powierzchniowo grunt pomiędzy kolumnami i ułożono beton podkładowy pod płytę fundamentową.

Po wzmocnieniu podłoża kolumnami DSM przystąpiono do podchwycenia pozostawionych fundamentów i posadzek remontowanego budynku za pomocą technologii iniekcji strumieniowej Soilcrete. Pod zewnętrzne ławy fundamentowe wykonano 43 półkolumny Soilcrete, o promieniu 70 cm i długości od 3,8 m do 5,6 m. Pod ławy wewnętrzne i płyty posadzek wykonano 96 kolumn o średnicy 80 i 100 cm. Łączna długość iniekcji strumieniowej wyniosła 691 mb. W trakcie robót prowadzono obserwację przemieszczeń podchwytywanego budynku. Maksymalne osiadania wynosiły 2 mm.

Do wykonania kolumn DSM i Soilcrete użyto cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R. Urobek powstający w podczas iniekcji, po doziarnieniu kruszywem, wykorzystano jako podbudowę pod płyty fundamentowe.

5. Badania kolumn DSM

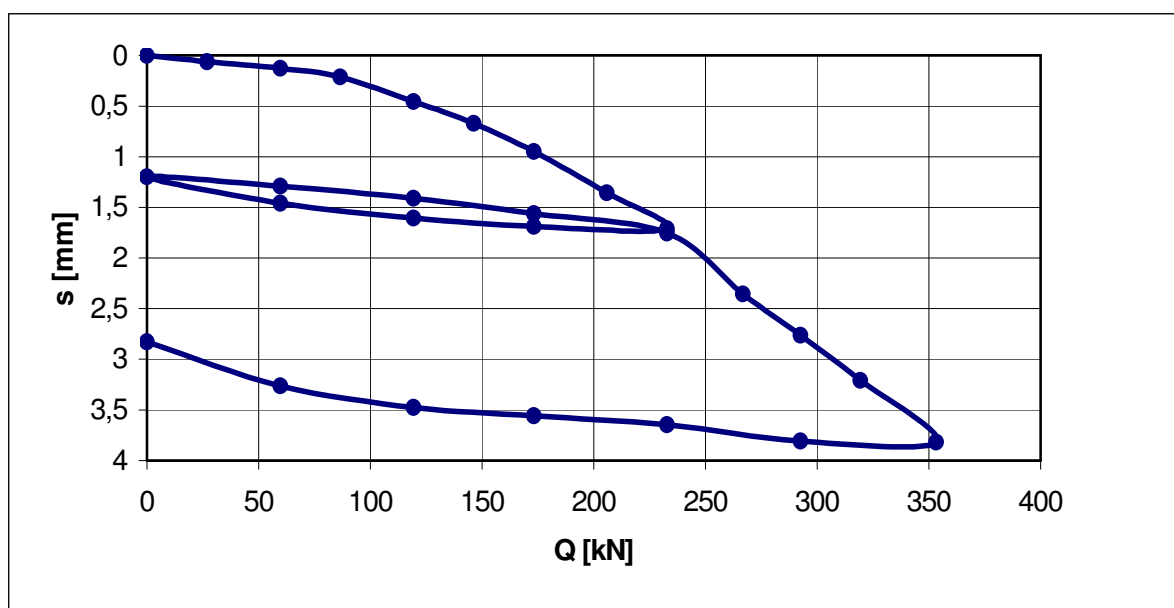
Badania kolumn DSM miały na celu sprawdzenie rzeczywistej nośności wewnętrznej i zewnętrznej, jak również określenie podatności kolumn na podstawie zaobserwowanej charakterystyki obciążenie – osiadanie.

W celu sprawdzenia wytrzymałości materiału pobrano w czasie robót ze świeżych kolumn DSM, wykonanych w różnych warunkach gruntowych, normowe próbki cementogruntu jak dla badań betonu, w 4 seriach po 3 próbki każda. Średnie wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe uzyskane dla każdej serii próbek po 28 dniach od daty pobrania wynosiły: 15.3, 6.2, 3.6 oraz 5.1 MPa i przekraczały zakładaną w projekcie wytrzymałość cementogruntu.

Nośność zewnętrzną oraz charakterystykę obciążenie-osiadanie pojedynczej kolumny sprawdzono za pomocą dwóch statycznych próbnych obciążeń wytypowanych kolumn DSM. Oba próbne obciążenia wykonano w systemie kotwionym. Główną belkę oporową stanowiły dwa połączone dwuteowniki 500. Belkę oporową zakotwiono na obydwu końcach do dwóch specjalnie wykonanych kolumn kotwiących Soilcrete o długości 7,5 m i średnicy 70 cm, zbrojonych żerdzią stalową typu TITAN 30/11. Wyniki próbnych obciążeń przedstawiono w tablicy 3 oraz na rysunku 3.

Tab. 3 Zestawienie wyników próbnych obciążeń kolumn DSM.

Nr kolumny DSM	Długość kolumny	Obciążenie maksymalne charakteryst Q_{max}^n (150%)	Osiadanie całkowite s_{qmax} przy Q_{max}^n	Nośność zewn. kol. z próbnego obciążenia $k \cdot N_c^o = 0,9 \cdot Q_{max}^n$	Obciążenie projektowe charakteryst Q^n (100 %)	Osiadanie całkowite s_{qn} przy Q^n	Podatność kolumn K_p
[-]	[m]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[MN/m]
36	6,95	353,3	3,83	318	232,8	1,72	134
315	6,05	353,3	3,82	318	232,8	1,71	135



Rys. 3. Próbnne obciążenie kolumny DSM nr 315.

Wyniki obu próbnych obciążeń potwierdziły osiągnięcie zakładanej nośności zewnętrznej oraz oczekiwanej charakterystyki podatności badanych kolumn DSM.

6. Obserwacje kontrolne osiadania obiektu

W celu dodatkowego sprawdzenia wzmocnienia gruntu oraz kontroli osiadania budynku i niecki basenu zainstalowano 9 reperów pomiarowych (6 kontrolnych i 3 referencyjne) oraz 20 punktów kontrolnych na górnej powierzchni ścian basenów. Pomiarów rozpoczęto na początku czerwca 2002. Po upływie pięciu miesięcy od pomiaru zerowego, tj. po zakończeniu stanu surowego i wyposażeniu obiektu, osiadania 6 reperów kontrolnych na obwodzie budynku wynosiły od 0,3 mm do 1,9 mm (średnio 1,0 mm) przy dokładności odczytu 0,1 mm i średnim błędzie pomiarów niwelacyjnych wynoszącym do 1 mm.

Obserwacje punktów kontrolnych usytuowanych na zewnętrznych ścianach niecki basenów, wykonane po próbnym napełnieniu basenów wodą, wykazały osiadania 20 punktów pomiarowych w zakresie od 0,2 mm do 1,6 mm, przy średniej wartości 0,92 mm i odchyleniu standardowym 0,44 mm.

Wyniki dotychczasowych pomiarów kontrolnych wskazują na spełnienie z zapasem założeń projektowych odnośnie dopuszczalnych przemieszczeń w fazie eksploatacji obiektu.

7. Zakończenie

Przedstawiony przykład połączenia dwóch nowoczesnych technologii wzmocnienia podłoża, tj. wglębnego mieszania gruntu (DSM) i iniekcji strumieniowej (Soilcrete®), pozwolił na rozwiązanie problemu naprawy i posadowienia wrażliwego na osiadania obiektu w złożonych warunkach gruntowych, bez konieczności głębokiej wymiany gruntów lub zastosowania palowania.

Wykorzystanie kolumn DSM o stosunkowo dużej średnicy, których koszt jednostkowy jest niższy od porównywalnych pali wierconych lub mikropali, pozwoliło na przestrzenne i wielopunktowe wzmocnienie podłoża pod budynkiem i płytą basenu. Takie rozwiązanie wzmocnienia gruntu jest nie tylko tanie w wykonaniu, ale również korzystne z punktu widzenia wymiarowania konstrukcji płyt fundamentowych, szczególnie w porównaniu do zastosowania mniejszej liczby pali o dużej nośności i sztywności, usytuowanych w większym rozstawie.

Literatura

- [1] Program GRETA do obliczeń osiadania fundamentów na wzmocnionym podłożu wg metody Priebego, opracowany w firmie Keller Grundbau.
- [2] Program PAXIS do obliczeń geotechnicznych metodą elementów skończonych, autorstwa PALXIS BV w Delft w Holandii.
- [3] Topolnicki M. (2003): Ground improvement, Charter 10: In-situ soil mixing, Ed. M.P. Moseley and K. Kirsch, Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman&Hall, CRC Press, Inc. (w druku)
- [4] Wytyczne wzmocnienia podłoża gruntowego w budownictwie drogowym, Wydawnictwo IBDiM, Warszawa, 2002.
- [5] W. Zaborowski, R. Zaborowski: Projekt modernizacji basenu sportowo-rehabilitacyjnego, DEXBUD Sp. o.o., 2001.