

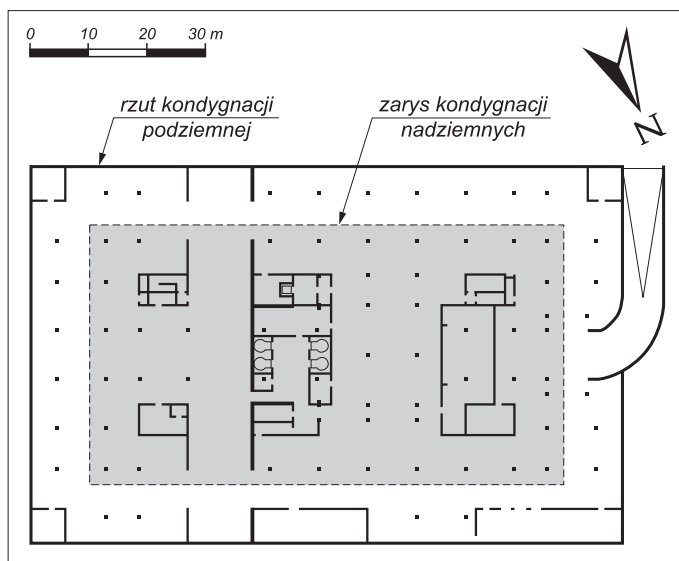
Prof. dr hab. inż. Andrzej Tejchman  
Dr inż. Tadeusz Brzozowski  
Katedra Geotechniki Politechniki Gdańskiej

## Analiza posadowienia budynków PLL LOT i PPPL w Warszawie

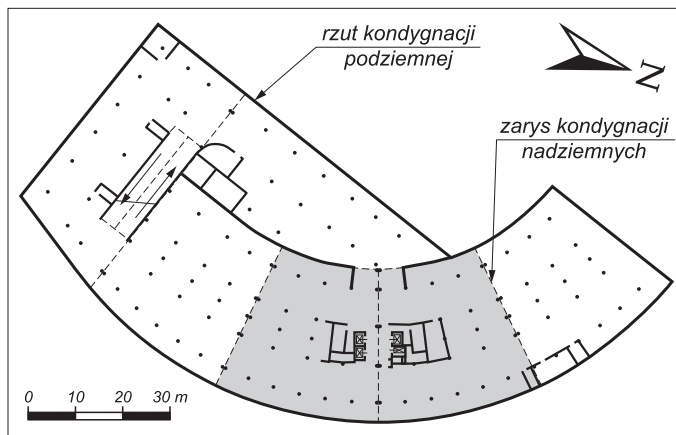
W Warszawie przy ul. 17 Stycznia kończy się obecnie budowa dwóch bardzo okazałych i architektonicznie interesujących budynków, których właścicielem i użytkownikiem są Polskie Linie Lotnicze LOT oraz Przedsiębiorstwo Państwowe Porty Lotnicze. Generalnym wykonawcą obu obiektów jest firma Budimex-Unibud z Warszawy (dyr. budowy mgr inż. A. Iwanicki).

Budynek LOT, o konstrukcji słupowej, ma 7 kondygnacji nadziemnych oraz jedną kondygnację podziemną z garażami. Obciążenia od kondygnacji nadziemnych przekazywane są przez siatkę 93 słupów na ciągłą płytę fundamentową posadowioną na rzędnej +24.8 m npm tj. minimum 3.2 m ppt. Budynek w planie ma wymiary 40.0 × 72.6 m (rys. 1).

Budynek PPPL, również o konstrukcji słupowej, posiada 11 kondygnacji nadziemnych oraz jedną rozbudowaną kondygnację podziemną z garażami. W rzucie poziomym cały obiekt ma kształt łukowy. Płyta fundamentowa pod częścią wysoką budynku oddylatowana jest od pozostałych płyt fundamentowych kondygnacji podziemnej. Obciążenia od kondygnacji nadziemnych przekazywane są przez siatkę słupów na płyty fundamentowe posadowione na rzędnej +24.8 m npm (około 3.5 m ppt) w części wysokiej i na rzędnej +25.6 m npm (około 2.7 m ppt) w części garażowej (rys. 2).



Rys. 1 Plan płyty fundamentowej i widok budynku LOT (fotografia z marca 2001 r.)



Rys. 2 Plan płyty fundamentowej i widok budynku PPPL (fotografia z marca 2001 r.)

W początkowej fazie projektowania, z uwagi na skomplikowane i trudne warunki gruntowe występujące w miejscu budowy, przewidywano posadowienie na palach. Przy dużym obciążeniu i jednocześnie dużej powierzchni obiektów konieczne byłoby zastosowanie bardzo dużej liczby pali, co pociągało za sobą znaczne koszty związane z częścią fundamentową obu budowli oraz wydłużało czas budowy.

Z inicjatywy Wykonawcy (a osobiście dyrektora budowy mgr inż. A. Iwanickiego) autorzy artykułu podjęli się analizy możliwości posadowienia bezpośredniego obu budynków i wykonania projektu takiego rozwiązania.

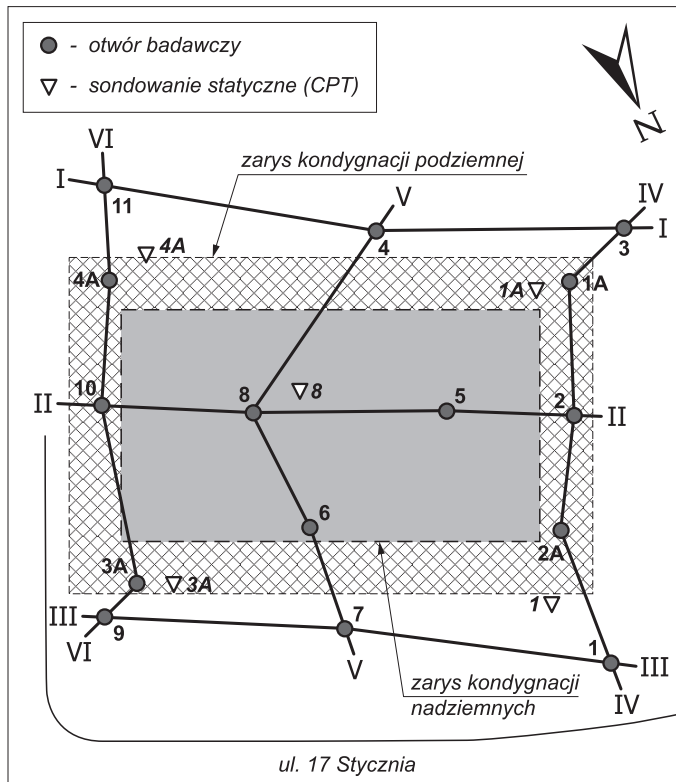
W artykule przedstawiono zaproponowane rozwiązanie oraz porównano wyniki obliczeń osiadań budynków z pomiarami geodezyjnymi. Wykazano, że nawet w bardzo trudnych warunkach gruntowych i dla dużych obiektów warto przeanalizować możliwości znacznie tańszych posadowień bezpośrednich, zamiast projektowania drogich i czasochłonnych fundamentów na palach.

### Charakterystyka warunków gruntowo wodnych

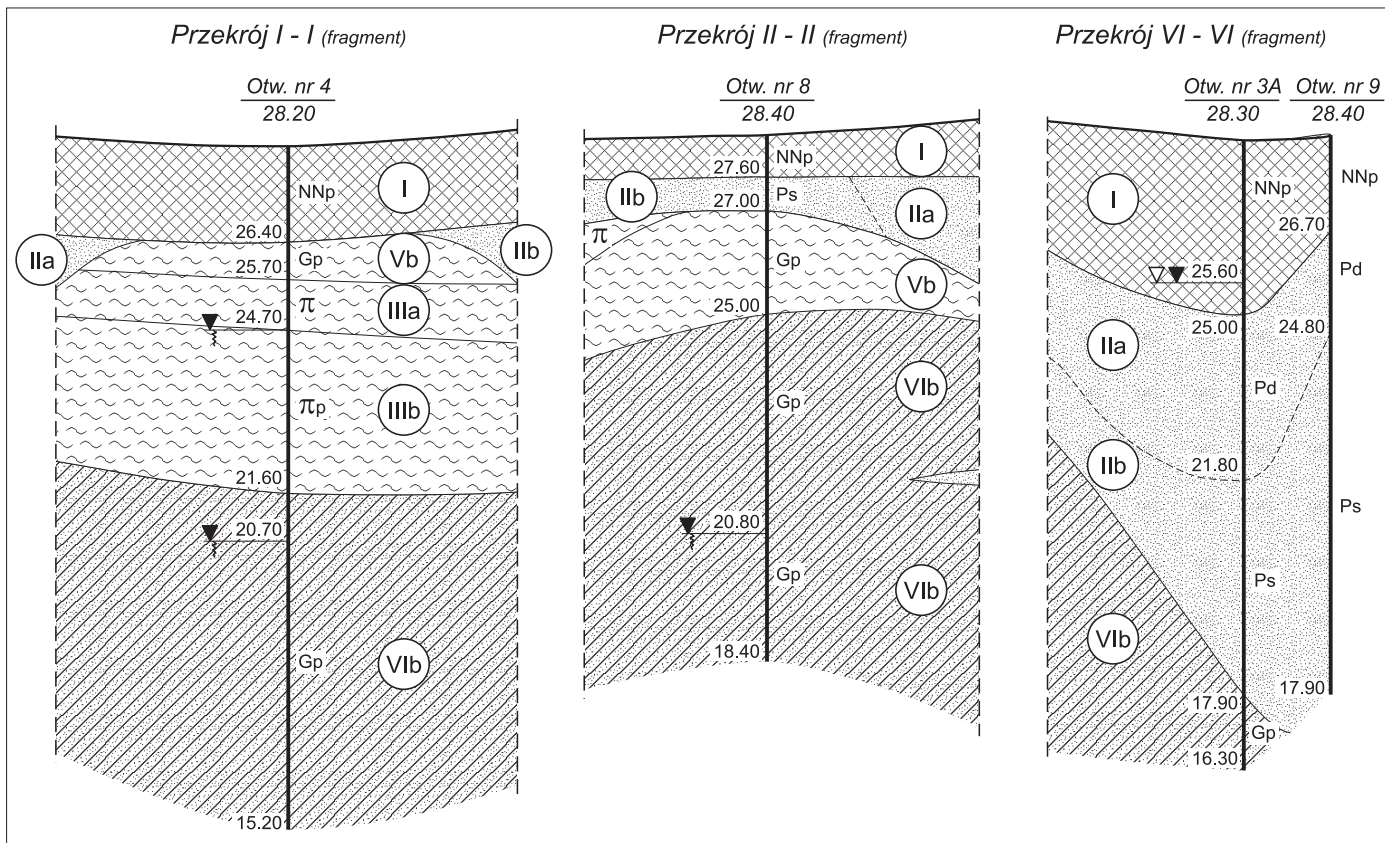
W rejonie projektowanych budynków występują bardzo zróżnicowane warunki hydrogeologiczne. W oparciu o wiercenia, badania polowe i laboratoryjne firmy SALGEO pod budynkiem LOT wydzielono 15 warstw a pod budynkiem PPPL 23 warstwy i podwarstwy gruntowe o genezie antropogenicznej, rzecznej zastoiskowej i polodowcowej różniące się rodzajem, stanem gruntu oraz parametrami fizyko-mechanicznymi. Parametry wytrzymałościowe, w tym moduły ścisłości badanych gruntów spoiowych określono metodą B na podstawie stabilizowanych wartości normowych.

**Budynek PLL LOT** – Poziom posadowienia budynku LOT-u przyjęto na rzędnej 24.8 m, co odpowiada zagłębieniu od 3.2 m do maksymalnie 4.3 m ppt. Do głębokości ok. 4÷6 m poniżej spodu płyty fundamentowej występują grunty bardzo zróżnicowane zarówno w układzie pionowym jak i poziomym. Poniżej do głębokości rozpoznania (tj około 10 m poniżej poziomu posadowienia) występują nośne polodowcowe gliny piaszczyste w stanie twardoplastycznym i półzwałym o modułach odkształcenia  $M_0 = 45 \div 65$  MPa (warstwy VIa i VIb). Utwory piaszczyste znacznej miąższości stwierdzono jedynie w północno-wschodnim narożniku płyty (otwór nr 9).

Na znacznym obszarze zachodniej części fundamentu występują słabsze grunty mineralne: pyły, piaski gliniaste i gliny w stanie plastycznym ( $I_L=0.35$ ) i obniżonych parametrach wytrzymałościowych (np. dla warstwy IIIb,  $\phi = 12^\circ$ ,  $c_u = 12$  kPa,  $M_0 = 21$  MPa).



Rys. 3 Usytuowanie wierceń badawczych i sondowań statycznych pod budynek LOT



Rys. 4 Warunki gruntowe (budynek LOT)



Ich występowanie stwierdzono w otworach nr 1A, 2, 2A, 4, 5, a ich miąższość pod płytą wynosi od ok. 3 m (otwór 4 i 5) do maksymalnie 6.5 m w otworze nr 1A przy zachodnim narożniku płyty. Pod centralną i wschodnią częścią płyty warunki gruntowe poprawiają się stopniowo, a twardoplastyczne gliny (np. dla otworu 7 i 8 oraz warstwy VIb:  $\phi = 20^\circ$ ,  $c_u = 35$  kPa,  $M_0 = 45$  MPa) przechodzą w nośne średnio zagęszczone piaski drobne i średnie (np. dla otworu 3A i 9 oraz warstw IIa i IIb,  $\phi = 31 \div 33^\circ$ ,  $M_0 = 64 \div 97$  MPa)

Poziom wód gruntowych napiętych warstwą glin piaszczystych (VIa i VIb) oraz występujących w płycie zalegających piaskach stabilizuje się na rzędnej około.  $25.8 \div 26.4$  m npm, tj. około 1 ÷ 1.5 m powyżej spodu płyty.

Zalecone do wykonania sondowania statyczne generalnie potwierdziły wyżej opisane warunki gruntowe. Jednak według wykonawcy sondowań (Poznańskie Biuro Projektów Dróg i Mostów) strefa najłagodniejszych gruntów zlokalizowana jest w okolicy środka płyty (CPT 8) oraz zachodniej jej części (CPT 4A). Dodatkowo, według sondowania statycznego w okolicy otworu 3A oraz 9 nie stwierdzono występowania średnio zagęszczonych piasków. Sondowanie CPT 3A wykazało w tym rejonie zaleganie glin piaszczystych w stanie twardoplastycznym.

**Budynek PPPL** – oddalony jest od budynku LOT o ok. 600 m. Poziom posadowienia płyty wysokiej części budynku PPPL przyjęto na rzędnej 24.8 m, co odpowiada zagłębieniu od 3.0 m do maksymalnie 4.2 m ppt. Płyta fundamentowa niskiej części garażowej posadowiona jest na rzędnej 25.6 m npm. Podobnie jak w przypadku budynku LOT-u podłoże zbudowane jest z bardzo zróżnicowanych utworów geologicznych.

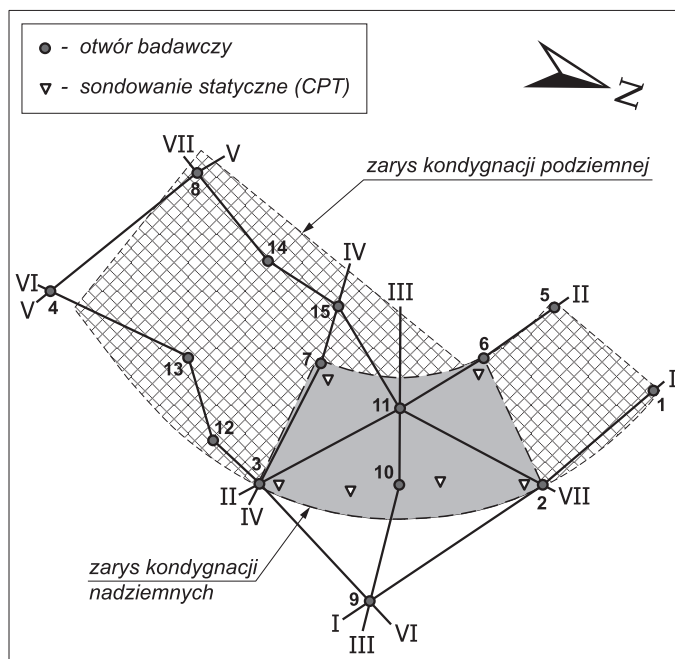
Do głębokości około 4 ÷ 6 m poniżej spodu płyty fundamentowej występują najbardziej zróżnicowane warunki gruntowe. Poniżej do głębokości około 18 m ppt występują nośne polodowcowe gliny piaszczyste w stanie twardoplastycznym lub półzwałtym o modułach odkształcenia  $M_0 = 60 \div 80$  MPa (warstwy VI1 i VI2), podścielone warstwą nieprzewierconych zagęszczonych piasków drobnych (otwory 10 i 11, warstwa VII,  $\phi = 32^\circ$ ,  $M_0 = 88$  MPa).

Pod płytą wysokiej części budynku zalegają grunty spoiste w stanie twardoplastycznym. Nie stwierdzono występowania w tym rejonie gruntów spoistych, w tym pyłów, w stanie miękko-plastycznym. Pod płytami niskich garaży, tj. poza obrysem wysokiej części budynku, stwierdzono lokalne występowanie gruntów słabych: gytii, torfów i namulów w stanie twardoplastycznym ( $I_L = 0.05$ ) i miękko-plastycznym ( $I_L = 0.6$ ), otwory nr 1, 2 i 8.

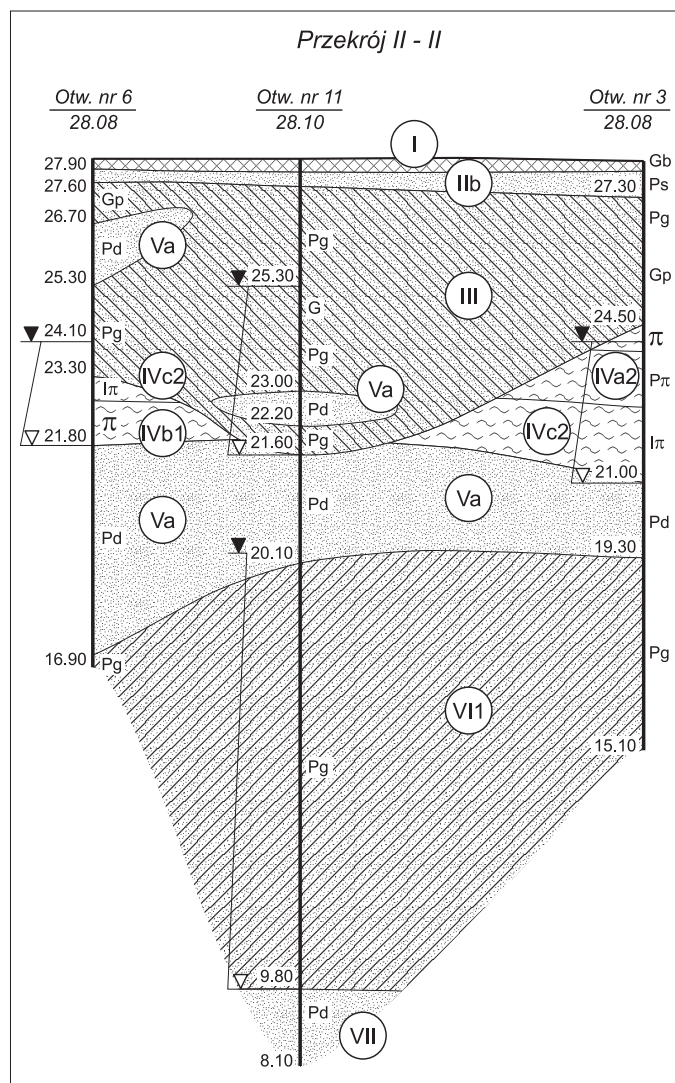
Wody gruntowe występujące w podłożu mają charakter napięty, a ich ustabilizowany poziom piezometryczny kształtuje się na poziomie spodu płyty fundamentowej, tj. na rzędnej około 24.5 ÷ 25.0 m npm.

Pod budynkiem PPL wykonano dodatkowo 4 badania presjometryczne do maksymalnej głębokości 8 m ppt tj., ok. 4.5 m poniżej poziomu posadowienia. Wykazały one zaskakująco niskie wartości modułów presjometrycznych  $E_p$  w zakresie od około 1.5 MPa dla gruntów w stanie plastycznym (otwór nr 1) do maksymalnie 12 MPa dla twardoplastycznego piasku gliniastego (otwór nr 4). Wartości te wskazują na około dwukrotnie większą ścisłość badanych gruntów, w stosunku do modułów ścisłości określonych pośrednio na podstawie PN-81/B-03020.

Zalecone do wykonania sondowania statyczne wykonane przez Poznańskie Biuro Projektów Dróg i Mostów generalnie potwierdziły wcześniej rozpoznane warunki gruntowe uściślając wartości modułów ścisłości podłoża. Moduły te przyjęto do obliczenia osiadań.



Rys. 5 Usytuowanie wiercni badawczych i sondowań statycznych pod budynek PPPL



Rys. 6 Fragment przekroju II-II (budynek PPPL)



## Analiza posadowienia na palach

**Budynek Polskich Linii Lotniczych LOT** – do analizy posadowienia na palach przyjęto dwa rodzaje pali:

- CFA o średnicy  $\phi$  500 mm,
- wiercone w rurach obsadowych wyciąganych głowicą pokrętną o średnicy  $\phi$  800 mm.

Obliczenia nośności wykonano według PN-83/B-02482 dla dwóch długości pali  $L = 11.0\text{m}$  oraz  $L = 16.0\text{m}$  przyjmując warunki gruntowe na podstawie sondowań statycznych (CPT) nr 1, 4A oraz nr 8.

Ogólną liczbę pali dla poszczególnych długości otrzymano dzieląc globalne obciążenie od budynku ( $Q \cong 570\text{MN}$ ) przez nośność pojedynczego pala.

Tablica 1

### Wyniki obliczeń nośności i liczby potrzebnych pali (PLL LOT)

Lp	Rodzaj pali	Średnica pali $\phi$ [mm]	Długość pali L [m]	Nośność pojedynczego pala wg PN-83/B-02482 N [kN]	Potrzebna liczba pali	Globalna długość pali [m]
1.	CFA	500	11.0	800	~ 720	7920
2.	CFA	500	16.0	1100	~ 520	8320
3.	wiercone	800	11.0	1600	~ 360	3960
4.	wiercone	800	16.0	2000	~ 290	4640

Długości podane w tabeli dotyczą długości roboczych pali licząc od spodu oczepu fundamentowego do stopy pala.

### Budynek Przedsiębiorstwa Państwowego „Porty Lotnicze”

- do analizy posadowienia na palach przyjęto dwa rodzaje pali:
- CFA o średnicy  $\phi$  500 mm,
  - wiercone w rurach obsadowych wyciąganych głowicą pokrętną o średnicy  $\phi$  800 mm.

Obliczenia nośności wykonano według PN-83/B-02482 dla dwóch długości pali  $L = 11.0\text{m}$  oraz  $L = 16.0\text{m}$  przyjmując warunki gruntowe na podstawie sondowań statycznych (CPT) nr 3 i 6.

Ogólną liczbę pali dla poszczególnych długości otrzymano dzieląc globalne obciążenie od budynku ( $Q \cong 340\text{MN}$ ) przez nośność pojedynczego pala.

Tablica 2

### Wyniki obliczeń nośności i liczby potrzebnych pali (PPPL)

Lp	Rodzaj pali	Średnica pali $\phi$ [mm]	Długość pali L [m]	Nośność pojedynczego pala wg PN-83/B-02482 N [kN]	Potrzebna liczba pali	Globalna długość pali [m]
1.	CFA	500	11.0	1000	~ 340	3740
2.	CFA	500	16.0	1300	~ 260	4160
3.	wiercone	800	11.0	1800	~ 190	2090
4.	wiercone	800	16.0	2300	~ 150	2400

Długości podane w tabeli dotyczą długości roboczych pali licząc od spodu oczepu fundamentowego do stopy pala.

Jak wynika z wykonanych przez autorów artykułu orientacyjnych obliczeń, oparcie płyt fundamentowych obu budynków na palach wymagałoby wykonania dużej liczby pali oraz dość znacznego czasu, szczególnie w odniesieniu do pali wierconych. Wpłynęłoby to również na zwiększenie kosztów inwestycji.

## Analiza posadowienia bezpośredniego

W celu sprawdzenia możliwości posadowienia bezpośredniego wykonano obliczenia możliwych osiadań obu budynków metodą odkształceń jednoosiowych według polskiej normy PN-81/B-03020 oraz dla sprawdzenia zmodyfikowaną metodą niemiecką według DIN 4019.

Obciążenia i naciski pod płytami fundamentowymi obliczono od obciążeń od słupów, ciężaru ścian zewnętrznych i pionów komunikacyjnych oraz ciężaru płyty o przyjętej wstępnie grubości i obciążen użytkowych.

Do obliczeń przyjęto średnie naciski pod fundamentami, biorąc pod uwagę możliwą pracę płyt. W celu uwzględnienia zmiennych warunków gruntowych oraz sztywności fundamentu płytę pod budynkiem LOT podzielono na 24 prostokątne pola. Dla każdego z 24 podfundamentów przyjęto obciążenie charakterystyczne  $q = 125\text{kPa}$ . W przypadku płyty fundamentowej budynku PPPL początkowo liczone osiadania z uwzględnieniem części garażowej dzieląc płytę na 29 pól. Jednak po wstępnych obliczeniach okazało się, że osiadania części garażowej są znikome. W związku z tym w końcowym etapie obliczeń uwzględniono tylko płytę fundamentową części wysokiej budynku podzieloną na 8 części (obciążenie  $q = 175\text{kPa}$ ). Wyniki obliczeń osiadań przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3

### Wyniki obliczeń osiadań, [mm]

Budynek PLL LOT		Budynek PPPL	
wg PN-81/B-03020	wg DIN 4019	wg PN-81/B-03020	wg DIN 4019
7 ÷ 34	29 ÷ 56	18 ÷ 27	29 ÷ 35

Na podstawie analizy warunków gruntowych oraz wykonanych obliczeń osiadań podjęto decyzję o możliwości posadowienia obu budynków bezpośrednio na płycie fundamentowej.

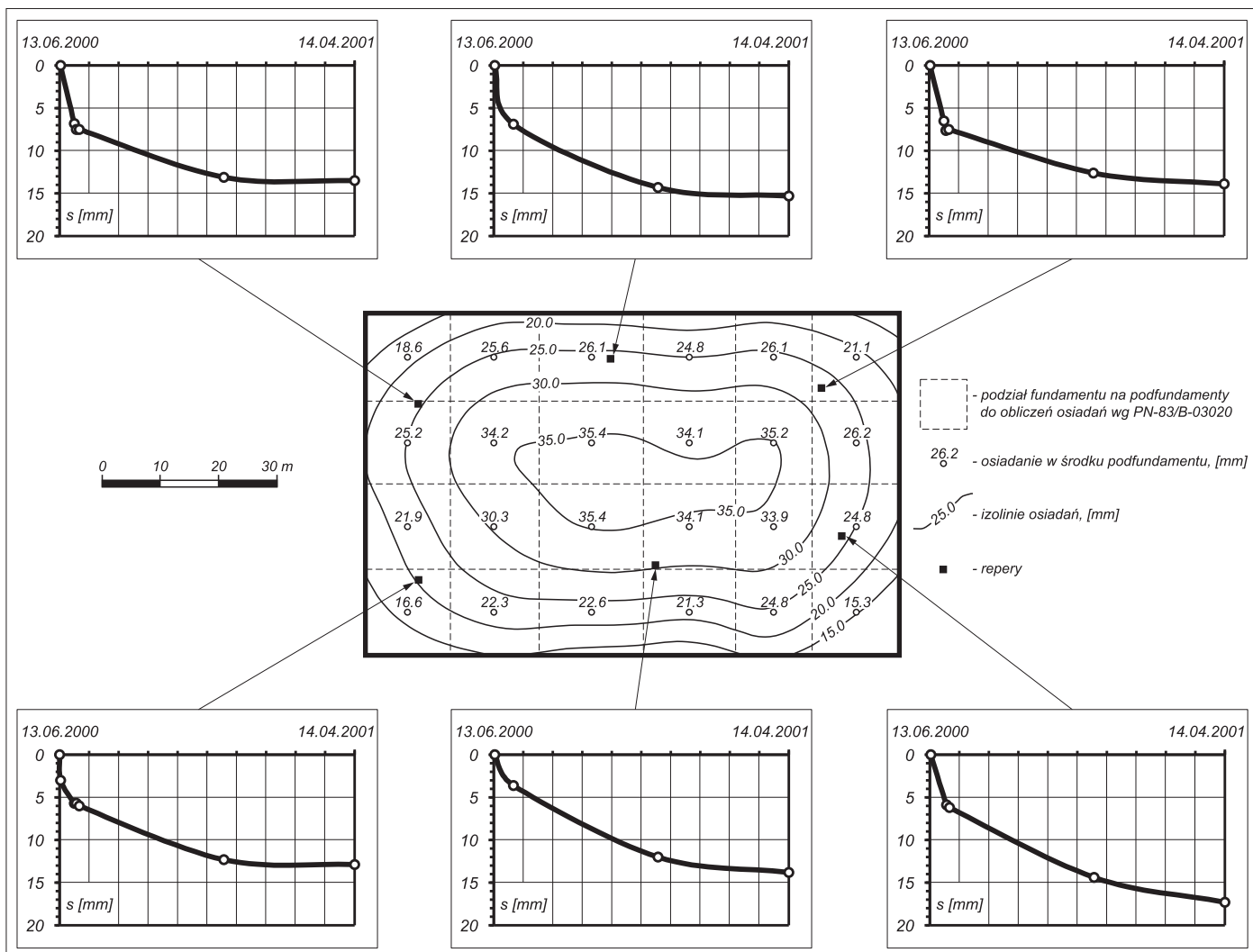
Zalecono zweryfikowanie parametrów podłoża, a w szczególności modułów ścisłości, poprzez wykonanie dodatkowych sondowań sondą wciskaną po 5 sztuk pod każdym budynkiem. Wyniki nowych sondowań wykorzystano następnie do zweryfikowania obliczeń osiadań i rozwiązań projektowych.

Ze względu na dużą zmienność warunków gruntowych i związaną z tym nierównomierność osiadań zwrócono również uwagę na konieczność częściowego wzmocnienia podłoża pod budynkiem LOT-u. Wykonane badania uzupełniające wykazały występowanie pod częścią budynku gruntów pylastych w stanie plastycznym potwierdzając konieczność wykonania wzmocnienia.

## Projekt posadowienia

Projekt dla budynku PLL LOT obejmował zwymiarowanie płyty fundamentowej oraz określenie wielkości sił wewnętrznych w płycie (obliczenia sił wewnętrznych wykonał mgr inż. Tomasz Majewski, projekt konstrukcyjny budynku wraz z projektem zbrojenia płyty wykonała firma Proinvest z Warszawy).

Do obliczeń płyty fundamentowej przyjęto jednoparametry model podłoża gruntowego. Współczynniki sprężystości podłoża określono na podstawie powtórnych obliczeń osiadań fundamentu metodą odkształceń jednoosiowych (rys. 7), które wykonano dla poprawionych wartości modułów ścisłości.



Rys. 7 Porównanie osiadań obliczonych metodą odkształceń jednoosiowych z pomiarami geodezyjnymi (budynek PLL LOT)

W ostatecznym rozwiązaniu przyjęto jednakową grubość płyty na całej powierzchni równą 120 cm.

W związku ze znacznym zróżnicowaniem warunków gruntowych pod budynkiem, a szczególnie występowaniem pyłów i pyłów piaszczystych w stanie plastycznym ( $I_L = 0.35$ ) w części centralnej i zachodniej projektowanego obiektu wskazano na konieczność wzmocnienia tego rejonu za pomocą kolumn żwirowych.

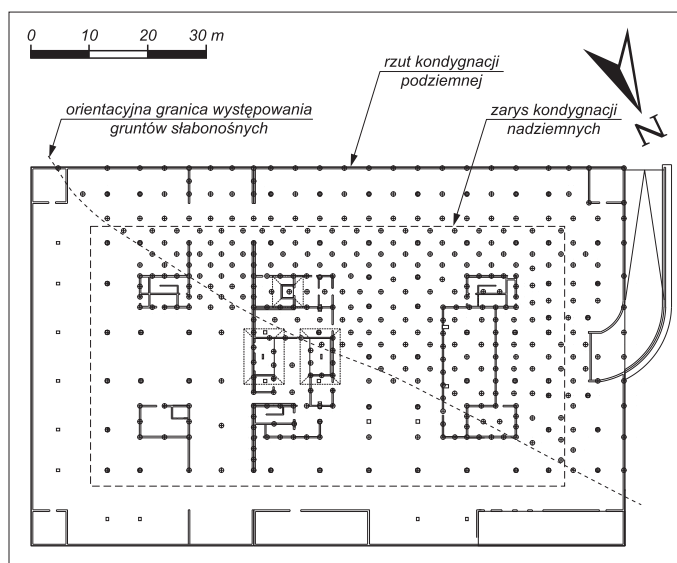
Projekt wykonawczy oraz wzmocnienie wykonała firma Keller Polska. Zastosowano kolumny żwirowe typu KSS o średnicy trzonu 600 mm, długości średniej 6.0 m i rozstawie  $2 \div 5$  m.

Kolumny tego typu wykonuje się wibratorem wgłębnym z rdzeniowym podawaniem kruszywa, bez stosowania płuczki wodnej. Stosowana technologia umożliwia dopasowanie potrzebnej długości kolumn bezpośrednio na budowie, w zależności od położenia stropu warstwy wytrzymałej.

Na rys. 8 przedstawiono schemat rozmieszczenia kolumn pod płytą projektowanego budynku. Jako pierwsze zostały wykonane kolumny pod słupami oraz wzdłuż ścian budynku a następnie, jako dogęszczające, kolumny pomiędzy ścianami i słupami.

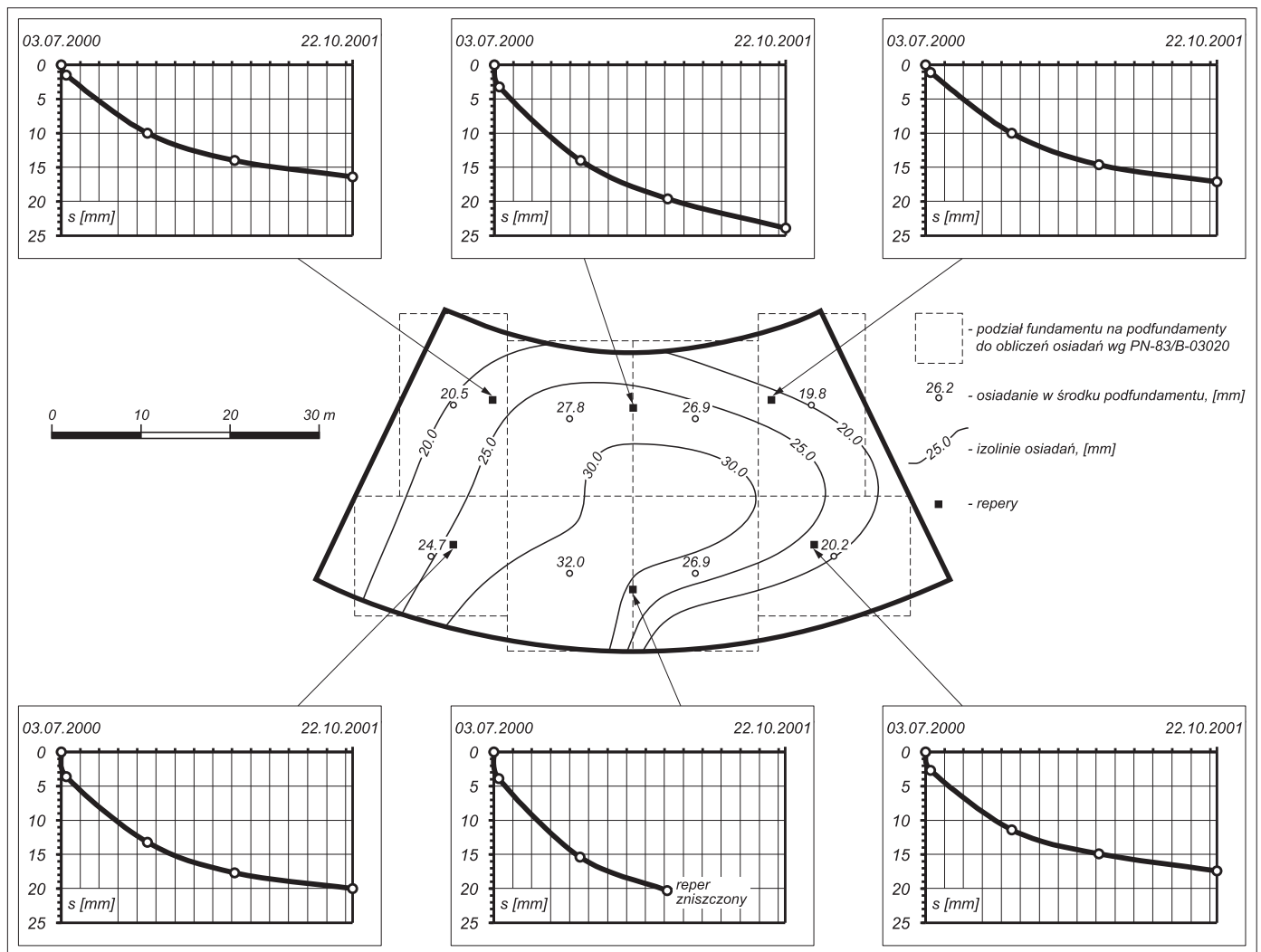
W projekcie konstrukcyjnym płyty podano również uwagi odnoszące się do konieczności obniżenia zwierciadła wody gruntowej na czas prowadzenia robót fundamentowych oraz zalecenia do prowadzenia robót ziemnych związane z bezpiecznym sposobem posadowienia budynku.

Sz szczególnie ważne było niedopuszczenie do zawilgocenia powierzchni dna wykopu fundamentowego z uwagi na występowanie gruntów pylastych w poziomie posadowienia budynku.



Rys. 8 Plan rozmieszczenia kolumn żwirowych (budynek PLL LOT)





Rys. 9 Porównanie osiadań obliczonych metodą odkształceń jednoosiowych z pomiarami geodezyjnymi (budynek PPPL)

Projekt dla budynku **PPPL** obejmował taki sam zakres obliczeń, jak w przypadku budynku LOT-u (obliczenia sił wewnętrznych wykonał mgr inż. Tomasz Majewski, projekt konstrukcyjny budynku wraz z projektem zbrojenia płyty wykonała firma Budimex Projekt z Warszawy).

W rozwiązaniu konstrukcyjnym, z uwagi na duże wartości obciążeń, przyjęto grubość płyty równą 150 cm. W związku z jej dużą sztywnością oraz trochę lepszymi warunkami gruntowymi, zrezygnowano z dodatkowego wzmocnienia podłoża w miejscu budowy obiektu. Na rys. 9 przedstawiono osiadania obiektu, na podstawie których obliczono współczynniki sprężystości podłoża. W projekcie płyty, podobnie jak dla budynku LOT-u podano szereg zaleceń wykonawczych.

### Pomiary osiadań budynków

Zgodnie z zalecenie projektowym prowadzono pomiary osiadań obu budynków dla kolejnych etapów budowy. Repery pomiarowe założono w płytach fundamentowych. Na rysunkach 7 i 9 pokazano miejsca ich założenia.

Pierwsze pomiary wykonano z chwilą zakończenia betonowania płyt fundamentowych to jest około połowy czerwca 2000 r. dla budynku LOT-u oraz początek lipca 2000 r. dla budynku PPPL. Ostatnie pomiary (którymi dysponowali autorzy artykułu) zostały przeprowadzone w październiku 2001 r. gdy budowa obu obiektów praktycznie została zakończona, a więc na podłoże przekazane zostało pełne obciążenie od ciężaru

własnego konstrukcji. Pomiary geodezyjne przez cały okres budowy bardzo precyzyjnie wykonywał dyplomowany geodeta p. Tomasz Gaca.

Analiza wykresów przemieszczeń reperów pomiarowych w funkcji czasu dla LOT-u wskazuje, że następuje już stabilizacja osiadań budynku. Porównując pomiary z osiadaniami obliczonymi metodą odkształceń jednoosiowych można odnieść wrażenie, że wyniki obliczeń osiadań zostały przeszacowane. Obliczenia zostały jednak wykonane dla parametrów podłoża bez kolumn żwirowych.

W przypadku budynku PPPL, pod którym nie wykonywano wzmocnienia kolumnami żwirowymi, stabilizacja osiadań jeszcze nie nastąpiła. Ekstrapolacja wykresów przemieszczeń reperów w czasie można wykazuje, że osiadania ustabilizują się w okresie około jednego roku. Biorąc pod uwagę przyrost przemieszczeń należy stwierdzić bardzo dobrą zgodność osiadań obliczonych z pomierzonymi.

W okresie eksploatacyjnym przewiduje się dalsze prowadzenie pomiarów geodezyjnych. Z uwagi na posadowienie budynków częściowo na gruntach spoiстых może nastąpić nieznaczny przyrost osiadania (szczególnie jeśli chodzi o budynek PPPL) nie mający znaczenia dla bezpieczeństwa i eksploatacji wykonanych obiektów.





Rys. 10 Widok budynku PLL LOT (październik 2001)



Rys. 11 Widok budynku PPPL (październik 2001)

### Wnioski

Występowanie w podłożu gruntów słabonośnych nie zawsze musi prowadzić do wyboru posadowienia głębokiego nawet przy znacznych obciążeniach przekazywanych przez budowlę na grunt. Niejednokrotnie wykonanie specjalistycznej ekspertyzy spowodować może znaczne obniżenie kosztów wykonania fundamentów budowli.

Zaprezentowane przykłady posadowienia pokazują, że zamiast kilku kilometrów pali pod budowlą wystarczy fundament na stosunkowo sztywnej płycie oraz w przypadku znacznego skomplikowania warunków geotechnicznych przy ewentualnym wzmocnieniu podłoża.

Do oceny osiadań podłoża z powodzeniem stosować można metody najprostsze takie jak zastosowana tu metoda odkształceń jednoosiowych według polskiej normy PN-81/B-03020. Porównanie wyników obliczeń osiadań z pomiarami geodezyjnymi przemieszczeń wykazało bardzo dobre zgodności.

Model podłoża gruntowego przyjmowany do schematu statycznego również, głównie z powodu braku wystarczająco wiarygodnych parametrów gruntowych, nie musi być zbyt skomplikowany. Wystarczy prosty model jednoparametrowy.

Należy zaznaczyć, że do posadowienia bezpośredniego budynków potrzebne jest dobre wykonawstwo jakie w obu omawianych przypadkach zapewniła firma Budimex-Unibud z Warszawy.