

Kryteria doboru wzorów dynamicznych do analizy nośności pali w budownictwie hydrotechnicznym

Dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, prof. nadzw. PG, mgr inż. Marcin Blockus
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

ZAKRES ANALIZ

Dobór odpowiedniej formuły określającej dynamiczną nośność pala jest czynnością pracochłonną, ale łatwą do wykonania przy zastosowaniu procedur komputerowych. Mimo wad i ograniczeń – wzory dynamiczne wykorzystywane są nadal w wielu krajach [6, 9]. Przykłady zastosowania wzorów dynamicznych wraz z interpretacją dla warunków krajowych można znaleźć w licznych opracowaniach [4, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

Niezaprzeczalną zaletą jest niski koszt ich zastosowania. Zgodnie z powszechną praktyką, dla każdego z pali wbijanych tworzony jest dziennik wbijania, zawierający rejestrację wpędów w zależności od zagłębienia. Dokument ten, w połączeniu z charakterystyką młota, jest wystarczający do określenia nośności większością wzorów dynamicznych. Bieżąca kontrola nośności jest szczególnie ważna w przypadku konstrukcji hydrotechnicznych, jak nabrzeża, pirsy i estakady. Obiekty tego rodzaju są najczęściej posadowione w trudnych warunkach geotechnicznych. Dodatkowym problemem jest często niepełne rozpoznanie geotechniczne (na dużych odległościach), spowodowane trudnościami w wykonaniu wierceń i sondowań na wodzie. Nowe techniki pomiarowe, umożliwiające pomiar przekazywanej energii wbijania i szczegółowy pomiar przemieszczeń głowicy pala, otwierają nowe możliwości stosowania wzorów dynamicznych i ich miarodajnej korelacji do rzeczywistej krzywej osiadania, uzyskanej z badań statycznych. Określenie poprawności doboru odpowiedniego wzoru dynamicznego możliwe jest na podstawie porównania wyników teoretycznych obliczeń nośności pali wzorami dynamicznymi z nośnościami określonymi na podstawie obciążeń statycznych.

W wykonanych obliczeniach posłużono się specjalnie opracowaną aplikacją, umożliwiającą wyznaczanie nośności pali 32 wzorami dynamicznymi (tabl. 1). Analizą objęto 187 przypadków wbijania pali wykonanych pod posadowienie nabrzeży w Porcie Gdańsk: nabrzeże Obrońców Westerplatte i nabrzeże Szczecińskie. W obydwu obiektach warunki geotechniczne oraz sposób pracy pali w docelowej konstrukcji były bardzo zbliżone. Opis posadowienia analizowanych budowli przedstawiono w dalszej części artykułu.

W artykule odniesiono się do przypadku, który często występuje przy realizacji budowli hydrotechnicznych. Zakres próbnych obciążeń i maksymalne obciążenie w czasie badań realizowane jest jako $1,5 N_d$ wg PN-83/B-02482 [18]. Taki zakres obciążeń, w przypadku wbijania pali w zagęszczone grunty niespoiste, pozwala często jedynie na ocenę części rzeczywistej zależności obciążenie – osiadanie. Podobna sytuacja występuje w analizowanych nabrzeżach (rys. 1, 2 i 3).

Powstaje problem oceny rzeczywistych nośności granicznych, zapasu bezpieczeństwa dla tego rodzaju pali oraz niedoszacowania ich możliwości przenoszenia obciążeń w obliczeniach za pomocą tzw. wzorów statycznych. Odpowiedzi na tego rodzaju wątpliwości należy szukać w korelacji z wynikami próbnych obciążeń. Ma to szczególne znaczenie dla opracowania przyszłych metod obliczeniowych, które należy umieścić w Załączniku Krajowym do Eurokodu 7 [19].

Tabl. 1. Zestawienie wzorów dynamicznych najczęściej stosowanych w praktyce inżynierskiej [1, 2, 3, 7, 8, 13]

Lp.	Autor (nazwa)	Wzór	F_d
1	Eytelwein, 1820	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c} \left(\frac{Q}{Q+G} \right) + (Q+G)$	4-6
2	Wzór holenderski, wzór Rittera, Haagsma	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c} \left(\frac{Q}{Q+G} \right)$	4-6
3	Weissbach, 1850	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{2 \cdot Q \cdot h \cdot L}{E_s \cdot F}} \right]$	2-4
4	Sanders, 1851	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c}$	6-10
5	Redtenbacher, 1859	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{2 \cdot Q^2 \cdot h \cdot L}{(Q+G) \cdot E_s \cdot F}} \right]$	-
6	Rankine, 1864	$N_D = \frac{2 \cdot E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{Q \cdot h \cdot L}{E_s \cdot F}} \right]$	4-6
7	Morrison, 1869	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c} \left(1 - \frac{h_0}{h} \right)$	4-5
8	Wellington, 1888, Engineering News Record (ENR)	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c + 0,5 \cdot c_s}$	4-6
9	Brix	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c} \cdot \frac{Q \cdot G}{(Q+G)^2}$	2
10	Brix-Abaque	$N_D = \frac{Q \cdot h}{c} \cdot \frac{4 \cdot Q \cdot G}{(Q+G)^2}$	5-10

Ciąg dalszy tabl. 1.

11	Godrich, 1901	$N_D = Q \cdot h \frac{0,276}{c}$	2-3
12	Stern, 1908	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{2 \cdot L}{E_s \cdot F} \left[Q \cdot h \frac{Q+a^2G}{Q+G} + c(Q+G) \right]} \right]$	1,5-2
13	Benabeng, 1911	$N_D = \frac{Q \cdot h}{2 \cdot c}$	3-4
14	Kreüger, 1915	$N_D = \frac{Q \cdot h (Q+0,25 \cdot G)}{(c+1 \text{ cm}) \cdot (Q+G)}$	1-1,5
15	Vierendel, 1920	$N_D = \frac{3}{4} \cdot \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{8}{3} \cdot \frac{Q^2 \cdot h}{(Q+G)} \cdot \frac{L}{E_s \cdot F}} \right]$	-
16	Hiley, 1925	$N_D = \frac{Q \cdot h \cdot f \cdot (Q+a^2G)}{(c+k) \cdot (Q+G)}$	2-3
17	Terzaghi, 1929, wzór holenderski zmodyfikowany	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{2 \cdot Q \cdot h}{Q+G} \cdot (Q+a^2G) \cdot \frac{L}{E_s \cdot F}} \right]$	2-3
18	Raush, 1930	$N_D = \frac{Q \cdot h \cdot (Q+a^2G)}{(c+0,5c_s) \cdot (Q+G)}$	2-4
19	Hueckel, 1936	$N_D = \frac{Q \cdot h \cdot (Q+a^2G)}{c \cdot (Q+G)}$	3-4
20	Converse, 1937, Pacific Coast Formula (PCF)	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{2 \cdot L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \left[Q \cdot h \frac{Q+a^2G}{Q+G} \right] \frac{L}{E_s \cdot F}} \right]$	-
21	Schenk, 1951	$N_D = \frac{c}{\tan \phi_s} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \tan \phi_s}{c^2} \cdot \frac{Q+a^2G}{Q+G} \cdot Q \cdot h} \right]$	2-3
22	Janbu, 1953	$N_D = \frac{E_s \cdot F}{L} \left[-c + \sqrt{c^2 + \frac{2 \cdot L \cdot f \cdot Q \cdot h}{E_s \cdot F \left(1,5 + 0,3 \frac{G}{Q} \right)}} \right]$	-
23	Sørensen, Hansen, 1957 (wzór duński)	$N_D = Q \cdot h \frac{f}{c + \sqrt{\frac{f \cdot Q \cdot h \cdot L}{2 \cdot F \cdot E_s}}}$	2
24	Cornfield, 1961	$N_D = (Q \cdot h) \cdot 0,847 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,078c) \cdot (60,96 h^{-1} + 1) \cdot (4267,2 - L)$	-
25	Hellman, 1967 (wzór szwedzki)	$N_D = \frac{Q \cdot h \cdot 0,8 \cdot f}{c + 0,5c_s} \left(1 - 0,1 \frac{Q}{G} \right)$	2-3
26	Hueckel, 1969 (wzór polski)	$N_D = \frac{0,7 \cdot Q \cdot h}{(1,05 + 1,1)c + (0,1 + 0,5)c_s} \cdot \frac{Q + 0,15 \cdot G}{Q + G}$	1-2
27	Gersewanow (1917)	$N_D = \frac{M \cdot F}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot a}{M \cdot F \cdot c} \cdot Q \cdot h} \right]$	-
28	PN-69/B-02482	$N_D = 0,7 \cdot \frac{Q + 0,15 \cdot G}{Q + G} \cdot \frac{Q \cdot h}{(c+k)}$	1,5-2,5
29	PN-83/B-02482	$N_D = \frac{Q \cdot h}{(c+k)}$	1,5-3
30	Wzór Delmaga	$N_D = \frac{Q \cdot h}{(c+k)} \cdot \left(\frac{Q}{Q+G} \right)$	1,5-3
31	Engineering News Formula (ENF)	$N_D = \frac{2 \cdot Q \cdot h}{c + 0,25 \text{ cm}}$	4-6
32	Boston Building Code (BBC)	$N_D = \frac{1,7 \cdot Q \cdot h}{c + 0,1 \sqrt{\frac{Q}{G}}}$	4-6

Objaśnienia:

E – energia, z jaką młot uderza w głowicę pała [kJ] (kNm),

Q – ciężar bijaka (lub ruchomej części młota) [kN],

G – ciężar pała [kN],

h – wysokość spadu młota [m],

c – trwałe osiadanie pała pod wpływem „ostatniego” uderzenia młota, czyli postępu pała, tzw. wpęd [m], obliczony jako średnia z ostatnich 5 (przy bijakach wolnospadowych) lub 20 (przy innych bijakach) uderzeń lub średnia z ostatnich 30 cm wbijania (według PN-83/B-02482),

a – znamień uderzenia (współczynnik restytucji), zależny od sprężystości uderzenia [-],

f – współczynnik skuteczności pracy określony w sposób empiryczny [-],

k – sprężyste odkształcenia pała [m],

c_s – sprężyste odkształcenia gruntu w trakcie uderzenia [m],

F_d – współczynnik bezpieczeństwa, zalecany dla danego wzoru dynamicznego (współczynnik korygujący) [-].

L – długość pała [m],

E_s – moduł sprężystości materiału pała [GPa],

F – powierzchnia przekroju pała [m²],

W przypadku gdy nie określono w materiale źródłowym wartości współczynnika bezpieczeństwa F_d (tabl. 1), w obliczeniach przyjęto jego wartość równą 1.

OPIS KONSTRUKCJI I WARUNKÓW GEOTECHNICZNYCH POSADOWIENIA ANALIZOWANYCH NABRZEŻY

Nabrzeże Obrońców Westerplatte

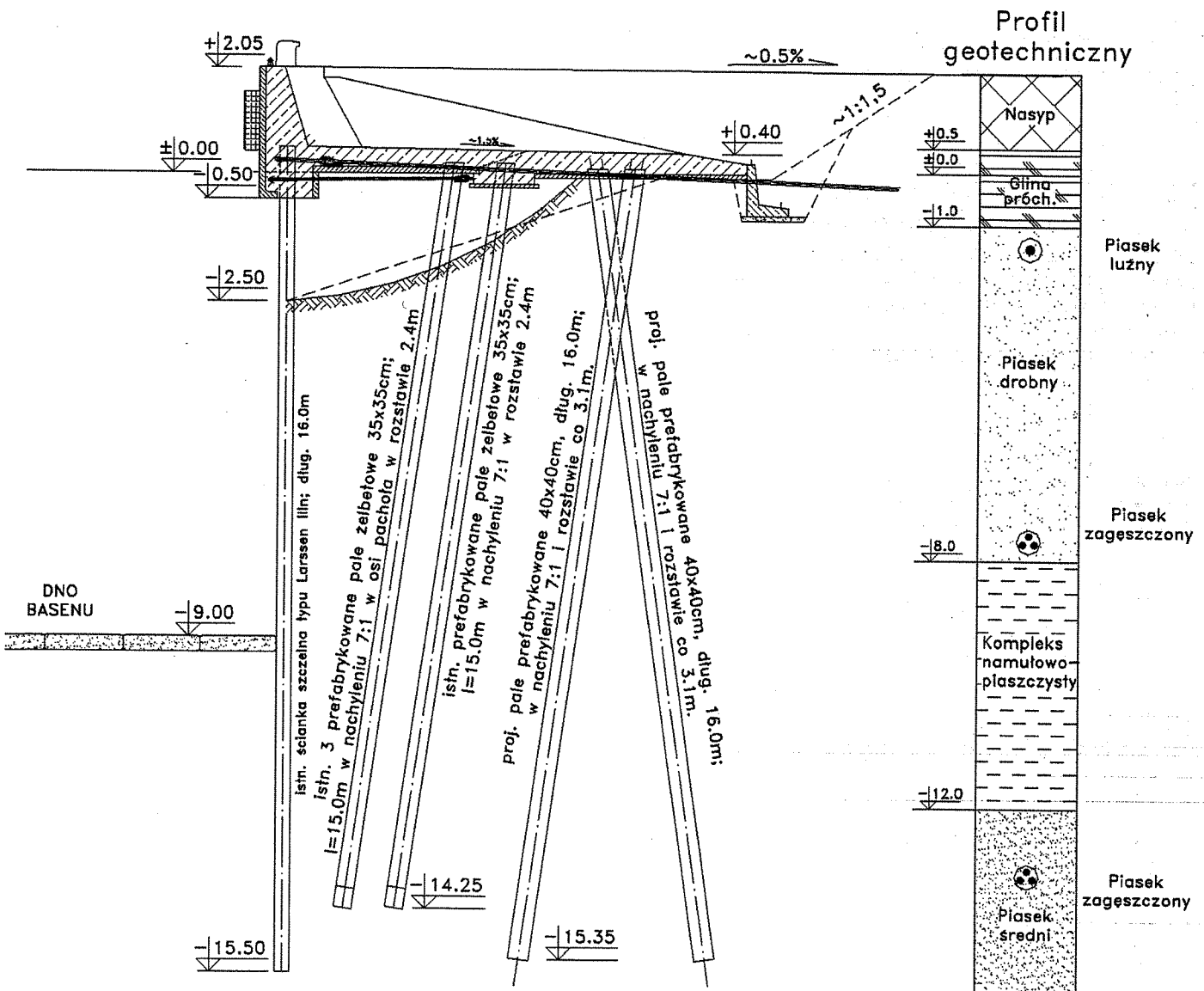
Prace palowe wykonane przy rozpatrywanym nabrzeżu wykonano w celu dostosowania nabrzeża do przyjmowania zwiększonych obciążeń oraz w związku z zaistniałą awarią rozszczelnienia ścianki szczelnej. Po modernizacji nowa płyta nabrzeża posadowiona jest częściowo na istniejących i nowo wykonanych palach wbijanych prefabrykowanych, a częściowo na ścianie szczelnej. Projektowana przebudowa nabrzeża objęła odcinek o długości około 86 m. W celu wzmocnienia nabrzeża zaprojektowano wykonanie dodatkowych pali prefabrykowanych 40x40 cm o długości $L = 16,0$ m, umieszczonych za główną płytą przebudowywanego nabrzeża. Nowe pale wykonano w układzie kołowym, w związku z czym część pali będzie pracować na wciskanie, a część na wyciąganie. Przewidywane obciążenie

obliczeniowe pali wciskanych wynosiło $Q_c = 780$ kN, a pali wyciąganych $Q_w = 250$ kN. Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcji nabrzeża z naniesionym profilem geotechnicznym.

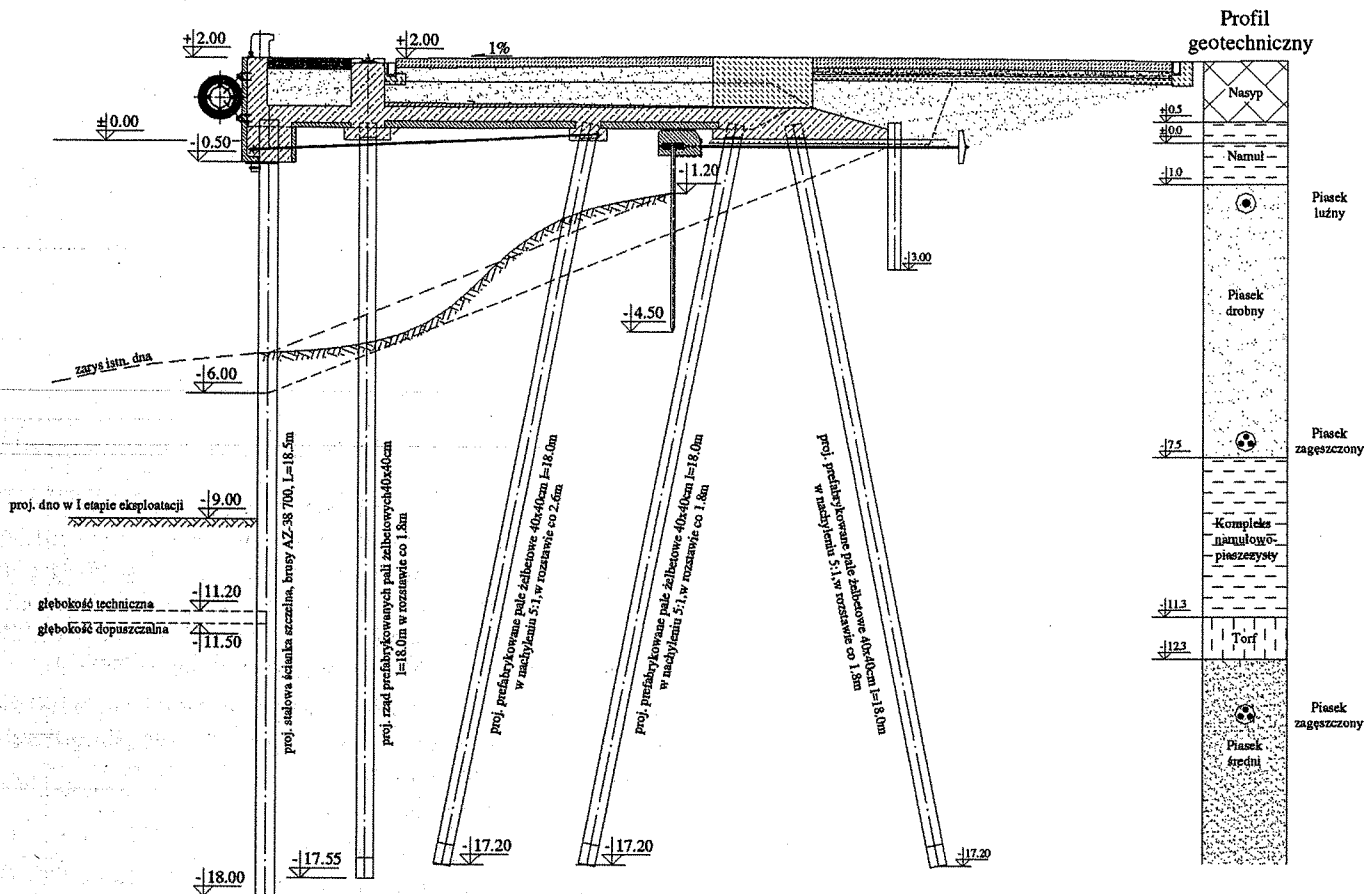
Budowa geologiczna i stratygrafia warstw gruntu powstała w wyniku akumulacyjnego oddziaływania Wisły. W podłożu gruntowym, pod warstwą niekontrolowanych nasypów występują osady holoceniskie w postaci utworów deltowych – glin próchnicznych, namulów i piasków. Gliny próchnicze zalegają tuż pod nasypami. Poniżej zalega kompleks namulowo-piaszczysty, który sięga do głębokości od $-11,7$ m n.p.m. do $-13,5$ m n.p.m. Głębiej występują piaski drobne zagęszczone ($I_D = 0,80$), które stanowią warstwę nośną dla zaprojektowanych pali. Pale wbite zostały do rzędnej $-15,35$ m n.p.m., a więc wprowadzone były w warstwę piasków zagęszczonych na około 3,0 m.

Nabrzeże Szczecińskie

Przebudowa nabrzeża Szczecińskiego polegała na wydłużeniu linii cumowniczo-odbojowej w kierunku zachodnim. W wy-



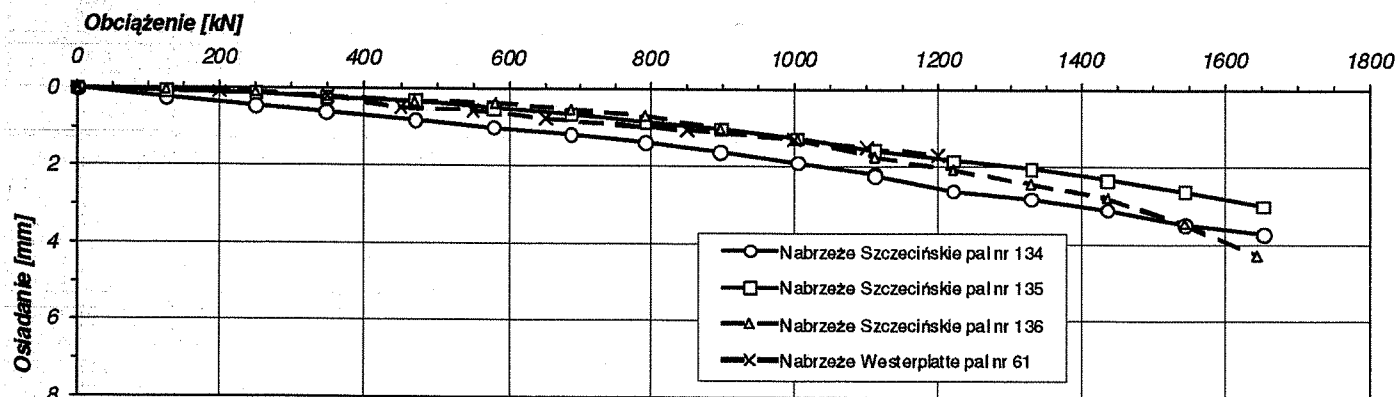
Rys. 1. Schemat konstrukcji nabrzeża Obrońców Westerplatte w Porcie Gdańsk [21]



Rys. 2. Schemat konstrukcji nabrzeża Szczecińskiego w Porcie Gdańsk po przebudowie [20]

konanej konstrukcji można wyróżnić dwa odcinki o odmiennych rozwiązaniach funkcjonalnych. Pierwszy odcinek, bezpośrednio przylegający do istniejącej części przeładunkowej o długości 42 m, to nabrzeże płytowe typu ciężkiego, umożliwiające ruch szynowych urządzeń przeładunkowych. Nabrzeże posadowiono na 4 rzędach pali prefabrykowanych 40x40 cm o długości 18 m i na stalowej ścianie szczelnej. Drugi odcinek to obudowa brzozy o długości 50 m w postaci nabrzeża oczepowego kotwionego do kozła palowego (rys. 2). Przewidywane obciążenie obliczeniowe pali wciskanych wynosi $Q_c = 1000$ kN, a pali wyciąganych $Q_w = 520$ kN.

Budowa geotechniczna podłoża gruntowego, podobnie jak w pierwszym z analizowanych nabrzeży, jest typowa dla rejonu Portu Gdańsk. Rzędna istniejącego terenu wynosi około 1,80 – 1,90 m n.p.m. W części lądowej wierzchnią warstwę stanowią nasypy piaszczysto-gruzowe o miąższości około 2,0 m, podścielone namułami sięgającymi do -1,0 m n.p.m. Poniżej występują piaski średnie i drobne średnio zagęszczone, które sięgają do rzędnej około -8.0 m n.p.m. Pomiędzy rzędnymi -8 ÷ -12 m n.p.m. zalega przewarstwienie namułu, pod którym występuje warstwa torfu sięgająca do -13 m n.p.m. Ostrza projektowanych pali (-17,2 m n.p.m.) wprowadzono w piaski śred-



Rys. 3. Wykresy próbnych obciążeń statycznych pali nr 134, 135, 136 (nabrzeże Szczecińskie) i nr 61 (nabrzeże Westerplatte)

nio zagęszczone, znajdujące się bezpośrednio pod gruntami organicznymi. Warstwa ta zalega do głębokości około – 21 m n.p.m. i przechodzi frakcyjnie w piaski grube. Dno w rejonie nabrzeża stanowi warstwa namułów półpłynnych o miąższości od 0,5 m do 2,0 m, układ warstw geotechnicznych jest analogiczny jak w części lądowej.

Obydwa obiekty położone są przy brzegu Martwej Wisły w odległości około 3 km od siebie. Sposób posadowienia oraz warunki geotechniczne analizowanych obiektów są do siebie zbliżone. Przy realizacji nabrzeży zastosowano różny sprzęt do pograżania pali w gruncie. W przypadku nabrzeża Obrońców Westerplatte zastosowano palownicę Hitachi 125 z młotem hydraulicznym o ciężarze bijaka 60 kN, natomiast na nabrzeżu Szczecińskim do wbijania pali wykorzystano kafar Fundex 9 z młotem spalinyowym Delmag D-30.

PROGRAM BADANIA NOŚNOŚCI PALI

Uwzględniając zasady oceny nośności pali według PN-83/B-02482 [18] oraz możliwości i doświadczenie wykonawców robót palowych (firmy Aarsleff i Hydrobudowa Gdańsk), wykonano badania wbijanych pali. W ramach oceny nośności wykonano cztery badania statyczne pali na wciskanie (trzy na nabrzeżu Szczecińskim i jedno na nabrzeżu Obrońców Westerplatte). W tabl. 2 zestawiono podstawowe dane uzyskane w trakcie badań, natomiast wykresy próbnych obciążeń przedstawiono na rys. 3. We wszystkich przypadkach próbne obciążenia wykazały bardzo dobrą pracę pali zarówno w odniesieniu do nośności, jak i wielkości osiadań.

Ocena nośności pali wzorami dynamicznymi

Zgodnie z przyjętą metodyką wykonano obliczenia nośności za pomocą wzorów dynamicznych. Dla każdego z analizowanych pali wyznaczono charakterystyczną wartość nośności N_D , porównując ją z nośnością określoną na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego. Wartość współczynnika korelacyjnego p^* określono analogicznie z PN-83/B-02482 [18], porównując z sobą uzyskane nośności dynamiczne (N_D) z nośnością obliczeniową pala, wyznaczoną z badań statycznych ($k \cdot N_c^0 = 1320$ kN dla pali nr 134 – 136 i $k \cdot N_c^0 = 960$ kN dla pala nr 61):

$$p^* = \frac{N_D}{k \cdot N_c^0} \quad (1)$$

Obciążenia statyczne wykonano na wybranych palach reprezentatywnych dla budowy geotechnicznej danego rejonu. Każdy z analizowanych wzorami dynamicznymi pali przypisano do obszaru o zbliżonej budowie geologicznej, powiązanej z referencyjnym palem obciążanym statycznie. Wyniki obliczeń dla każdego z obszarów obliczeniowych zestawiono w tabl. 3.

Kolumny 3, 5, 7 i 9 zawierają wyniki nośności pali określone wzorami dynamicznymi dla analizowanych grup pali o liczebności N równej odpowiednio:

dla nabrzeża Szczecińskiego:

- $N = 28$ (pale lądowe nr 11 – 48),
- $N = 29$ (pale lądowe nr 10 – 57),
- $N = 60$ (pale nawodne nr 10 – 57),

Tabl. 2. Wyniki próbnych obciążeń pali i interpretacji wg PN-83/B-02482 [18]

Parametry pala	Rodzaj obciążenia	Q	Osiadanie pala [mm]	
		[kN]	$s_{całkow.}$ [mm]	s_{trwale} [mm]
Nabrzeże Obrońców Westerplatte				
Pal nr 61 40 × 40 cm L = 16,0 m	Q_{12} , obciążenie pośrednie	780,0	0,92	0,31
	Q_{max} , obciążenie maksymalne	1200,0	1,74	0,59
	$k \cdot N_c^0$, nośność obliczeniowa pala	960,0	~1,33	
Nabrzeże Szczecińskie				
Pal nr 136 40 × 40 cm L = 18,0 m	Q_{12} , obciążenie pośrednie	1110,3	2,34	0,26
	Q_{max} , obciążenie maksymalne	1651,8	4,35	0,77
	$k \cdot N_c^0$, nośność obliczeniowa pala	1320,0	~3,17	
Pal nr 135 40 × 40 cm L = 18,0 m	Q_{12} , obciążenie pośrednie	1110,3	1,49	0,28
	Q_{max} , obciążenie maksymalne	1651,8	2,92	0,59
	$k \cdot N_c^0$, nośność obliczeniowa pala	1320,0	~2,03	
Pal nr 134 40 × 40 cm L = 18,0 m	Q_{12} , obciążenie pośrednie	1110,3	2,18	0,33
	Q_{max} , obciążenie maksymalne	1651,8	3,71	1,06
	$k \cdot N_c^0$, nośność obliczeniowa pala	1320,0	~2,80	

Tabl. 3. Zestawienie wyników obliczeń wzorami dynamicznymi nośności pali prefabrykowanych w analizowanych grupach i odpowiadających im współczynników korelacji z obciążeniem statycznym

Lp.	Autor (nazwa)	Nabrzeże Szczecińskie (młot Delmag D-30)						Nabrzeże Westerplatte (młot Hitachi 125)	
		pale ładowe				pale nawodne		pale ładowe	
		pale nr 11 – 48 ($N=28$)		pale nr 10 – 57 ($N=29$)		pale nr 58 – 133 ($N=60$)		pale nr 1 – 60 ($N=60$)	
		N_D [kN]	p^*	N_D [kN]	p^*	N_D [kN]	p^*	N_D [kN]	p^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Eytelwein, 1820	3016	2,28	3848	2,92	2119	1,61	7394	7,70
2	Wzór holenderski	2917	2,21	3749	2,84	2020	1,53	7273	7,58
3	Weissbach, 1850	3497	2,65	3674	2,78	3172	2,40	4651	4,84
4	Sanders, 1851	9626	7,29	12371	9,37	6667	5,05	14667	15,28
5	Redtenbacher, 1859	1613	1,22	1758	1,33	1369	1,04	3028	3,15
6	Rankine, 1864	6993	5,30	7348	5,57	6345	4,81	9302	9,69
7	Morrison, 1869	5615	4,25	7216	5,47	3889	2,95	6333	6,60
8	Wellington, 1888	5341	4,05	6091	4,61	4286	3,25	8000	8,33
9	Brix	2033	1,54	2613	1,98	1408	1,07	3666	3,82
10	Brix-Abaque	8132	6,16	10451	7,92	5632	4,27	14666	15,28
11	Godrich, 1901	2657	2,01	3414	2,59	1840	1,39	4048	4,22
12	Stern, 1908	2442	1,85	2599	1,97	2165	1,64	3704	3,86
13	Benabenq, 1911	4813	3,65	6186	4,69	3333	2,53	7333	7,64
14	Kretzger, 1915	1250	0,95	1331	1,01	1116	0,85	2414	2,51
15	Vierendel, 1920	1471	1,11	1586	1,20	1272	0,96	2717	2,83
16	Hiley, 1925	2219	1,68	2531	1,92	1781	1,35	4064	4,23
17	Terzaghi, 1929	2413	1,83	2576	1,95	2125	1,61	3677	3,83
18	Raush, 1930	2959	2,24	3374	2,56	2374	1,80	5419	5,64
19	Hueckel, 1936	5332	4,04	6853	5,19	3693	2,80	9935	10,35
20	Converse, 1937	758	0,57	829	0,63	639	0,48	1185	1,23
21	Schenk, 1951	3422	2,59	3810	2,89	2804	2,12	5355	5,58
22	Janbu, 1953	1754	1,33	1903	1,44	1501	1,14	2705	2,82
23	Sørensen, Hansen	2487	1,88	2693	2,04	2157	1,63	3378	3,52
24	Cornfield, 1961	1136	0,86	1144	0,87	1121	0,85	2025	2,11
25	Hellman, 1967	3065	2,32	3496	2,65	2460	1,86	4328	4,51
26	Hueckel, 1969	1765	1,34	2084	1,58	1351	1,02	3725	3,88
27	Gersewanow (1917)	1063	0,81	1220	0,92	867	0,66	1338	1,39
28	PN-69/B-02482	1055	0,80	1153	0,87	901	0,68	2200	2,29
29	PN-83/B-02482	3696	2,80	4040	3,06	3158	2,39	5500	5,73
30	Wzór Delmaga	1120	0,85	1224	0,93	957	0,73	2727	2,84
31	ENF	5769	4,37	6654	5,04	4557	3,45	8656	9,02
32	BBC	5594	4,24	6755	5,12	4162	3,15	6536	6,81
Średnia		3344	2,53	3955	3,00	2601	1,971	5373	5,60
Odchylenie standardowe σ		2209	1,67	2805	2,13	1604	1,22	3367	3,51
Współczynnik zmienności v		0,66		0,71		0,62		0,63	

Tabl. 4. Zestawienie wyników obliczeń wzorami dynamicznymi nośności pali prefabrykowanych objętych badaniami statycznymi (pale nr 134-136 i 61)

Lp.	Autor (nazwa)	Nabrżeże Szczecińskie (młot Delmag D-30)						Nabrżeże Westerplatte (młot Hitachi 125)	
		pale lądowe				pal nawodny		pal lądowy	
		pal nr 134		pal nr 135		pal nr 136		pal nr 61	
		N_d [kN]	p^*	N_d [kN]	p^*	N_d [kN]	p^*	N_d [kN]	p^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Eytelwein, 1820	2682	2,03	3924	2,97	2303	1,74	10832	11,28
2	Wzór holenderski	2588	1,96	3830	2,90	2209	1,67	10711	11,16
3	Weissbach, 1850	3355	2,54	3654	2,77	3209	2,43	4991	5,20
4	Sanders, 1851	8108	6,14	12000	9,09	6923	5,24	21600	22,50
5	Redtenbacher, 1859	1560	1,18	1801	1,36	1451	1,10	3328	3,47
6	Rankine, 1864	6710	5,08	7308	5,54	6419	4,86	9983	10,40
7	Morrison, 1869	4730	3,58	7000	5,30	4038	3,06	9600	10,00
8	Wellington, 1888	4839	3,67	6000	4,55	4390	3,33	9818	10,23
9	Brix	1762	1,33	2608	1,98	1504	1,14	5400	5,63
10	Brix-Abaque	7047	5,34	10430	7,90	6017	4,56	21599	22,50
11	Godrich, 1901	2238	1,70	3312	2,51	1911	1,45	5962	6,21
12	Stern, 1908	2346	1,78	2609	1,98	2221	1,68	4013	4,18
13	Benabenq, 1911	4054	3,07	6000	4,55	3462	2,62	10800	11,25
14	Kretiger, 1915	1220	0,92	1355	1,03	1159	0,88	2687	2,80
15	Vierendel, 1920	1432	1,08	1626	1,23	1343	1,02	2954	3,08
16	Hiley, 1925	2048	1,55	2539	1,92	1858	1,41	4988	5,20
17	Terzaghi, 1929	2314	1,75	2587	1,96	2185	1,66	3994	4,16
18	Raush, 1930	2730	2,07	3386	2,57	2477	1,88	6650	6,93
19	Hueckel, 1936	4575	3,47	6771	5,13	3906	2,96	14631	15,24
20	Converse, 1937	714	0,54	831	0,63	661	0,50	1323	1,38
21	Schenk, 1951	3227	2,44	3882	2,94	2946	2,23	6093	6,35
22	Janbu, 1953	1667	1,26	1915	1,45	1555	1,18	2995	3,12
23	Sørensen, Hansen	2337	1,77	2669	2,02	2192	1,66	3779	3,94
24	Cornfield, 1961	1130	0,86	1143	0,87	1123	0,85	2070	2,16
25	Hellman, 1967	2767	2,10	3431	2,60	2511	1,90	5311	5,53
26	Hueckel, 1969	1615	1,22	2113	1,60	1437	1,09	4814	5,01
27	Gersewanow (1917)	967	0,73	1200	0,91	886	0,67	1648	1,72
28	PN-69/B-02482	1017	0,77	1180	0,89	948	0,72	2541	2,65
29	PN-83/B-02482	3448	2,61	4000	3,03	3214	2,43	6353	6,62
30	Wzór Delmaga	1101	0,83	1277	0,97	1026	0,78	3150	3,28
31	ENF	5187	3,93	6545	4,96	4675	3,54	10800	11,25
32	BBC	4811	3,64	6472	4,90	4237	3,21	8167	8,51
Średnia		3010	2,28	3919	2,97	2700	2,05	6987	7,28
Odchylenie standardowe σ		1893	1,43	2731	2,07	1653	1,25	5081	5,29
Współczynnik zmienności v		0,63		0,70		0,61		0,73	

Tabl. 5. Porównanie wyznaczonych współczynników korelacyjnych p^* z zalecanymi w literaturze współczynnikami korygującymi F_d

Lp.	Autor (nazwa)	Wartości współczynnika p^*				Zalecane według literatury wartości współczynników korygujących F_d	
		nabrzeże Szczecińskie		nabrzeże Westerplatte		F_d min	F_d max
		pale lądowe	pale nawodne	pale lądowe			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Eytelwein, 1820	2,03	2,97	1,74	11,28	4	6
2	Wzór holenderski	1,96	2,90	1,67	11,16	4	6
3	Weissbach, 1850	2,54	2,77	2,43	5,20	2	4
4	Sanders, 1851	6,14	9,09	5,24	22,50	6	10
5	Redtenbacher, 1859	1,18	1,36	1,10	3,47	1	
6	Rankine, 1864	5,08	5,54	4,86	10,40	4	6
7	Morrison, 1869	3,58	5,30	3,06	10,00	4	5
8	Wellington, 1888	3,67	4,55	3,33	10,23	4	6
9	Brix	1,33	1,98	1,14	5,63	2	
10	Brix-Abaque	5,34	7,90	4,56	22,50	5	10
11	Godrich, 1901	1,70	2,51	1,45	6,21	2	3
12	Stern, 1908	1,78	1,98	1,68	4,18	1,5	2
13	Benabenq, 1911	3,07	4,55	2,62	11,25	3	4
14	Kreüger, 1915	0,92	1,03	0,88	2,80	1	1,5
15	Vierendel, 1920	1,08	1,23	1,02	3,08	1	
16	Hiley, 1925	1,55	1,92	1,41	5,20	2	3
17	Terzaghi, 1929	1,75	1,96	1,66	4,16	2	3
18	Raush, 1930	2,07	2,57	1,88	6,93	2	4
19	Hueckel, 1936	3,47	5,13	2,96	15,24	3	4
20	Converse, 1937	0,54	0,63	0,50	1,38	1	
21	Schenk, 1951	2,44	2,94	2,23	6,35	2	3
22	Janbu, 1953	1,26	1,45	1,18	3,12	1	
23	Sørensen, Hansen	1,77	2,02	1,66	3,94	2	
24	Cornfield, 1961	0,86	0,87	0,85	2,16	1	
25	Hellman, 1967	2,10	2,60	1,90	5,53	2	3
26	Hueckel, 1969	1,22	1,60	1,09	5,01	1	2
27	Gersewanow (1917)	0,73	0,91	0,67	1,72	1	
28	PN-69/B-02482	0,77	0,89	0,72	2,65	1,5	2,5
29	PN-83/B-02482	2,61	3,03	2,43	6,62	1,5	3
30	Wzór Delmaga	0,83	0,97	0,78	3,28	1,5	3
31	ENF	3,93	4,96	3,54	11,25	4	6
32	BBC	3,64	4,90	3,21	8,51	4	6
Średnia		2,28	2,97	2,05	7,28		
Odchylenie standardowe σ		1,43	2,07	1,25	5,29		
Współczynnik zmienności v		0,63	0,70	0,61	0,73		

dla nabrzeża Westerplatte:

– $N = 60$ (pale lądowe nr 1 – 60).

Dla każdej z grup wyznaczono zgodnie z równaniem (1) współczynniki korelacji p^* oraz określono ich parametry statystyczne (średnią, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności).

Uzyskane wyniki wskazują na bardzo dużą rozbieżność charakterystycznych nośności pali określonych wzorami dynamicznymi. Współczynniki zmienności v wahają się od 0,62 do 0,71, natomiast odchylenie standardowe σ równe jest od 1604 kN do 3367 kN.

Podobną analizę wykonano także dla poszczególnych pali objętych badaniami statycznymi (tabl. 4). Wyniki obliczeń wykazują dużą rozbieżność. Współczynniki zmienności v wahają się od 0,63 do 0,73, natomiast odchylenie standardowe σ równe jest od 1653 kN do 5081 kN.

W tabl. 5 porównano wartości współczynników korelacji wyznaczonych zgodnie z równaniem (1), tj. bez uwzględnienia współczynników korygujących.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Stosowanie wzorów dynamicznych w budownictwie hydrotechnicznym jest bardzo częste, szczególnie dla konstrukcji nabrzeży oraz pirsów.

W literaturze wielokrotnie zwracano uwagę na zachowanie jasno określonych kryteriów i warunków stosowalności wzorów dynamicznych.

Omówione warunki gruntowe, zastosowane pale, warunki wbijania i wykorzystywany sprzęt są typowe dla konstrukcji stosowanych w budownictwie hydrotechnicznym morskim i śródlądowym.

Obliczenia porównawcze według szerokiego zakresu wzorów dynamicznych ujawniły, że nawet dla jednej budowy można otrzymać bardzo różne wyniki.

Należy zwrócić uwagę na rodzaj młota i jego sprawność oraz pomiar rzeczywistej energii przekazywanej na pal w trakcie uderzenia. Jest to szczególnie trudne w przypadku młotów spalinyowych. W wyniku intensywnego użytkowania urządzenia – rzeczywiste parametry energetyczne młota mogą znacząco odbiegać od danych podawanych przez producenta.

Ograniczenia dotyczące stosowalności wzorów dynamicznych, zawarte w zaleceniach inżynierskich, mają podstawowe znaczenie dla uzyskania wiarygodnych wyników praktycznych.

Duża liczba cytowanych w tabl. 1 wzorów oraz znaczne rozbieżności wyników obliczeń skłaniają do wytypowania wzorów, które dają miarodajne oceny praktyczne. Wieloletnie doświadczenia krajowe [4, 5, 11] wskazują, że w warunkach polskich wystarczająco zadowalające wyniki oceny uzyskiwano za pomocą wzoru Delmaga dla pali Vibro-Fundex oraz wzoru Sørensen-Hansena dla żelbetowych prefabrykowanych pali wbijanych.

Podstawą miarodajnej oceny nośności pali wbijanych nadal powinno być stosowanie próbnych obciążeń statycznych oraz badań dynamicznych [17, 18, 19] w korelacji z dobrze rozpoznanymi warunkami geotechnicznymi.

LITERATURA

1. Bendel L.: *Ingenieurgeologie – Ein Handbuch für Studium und Praxis*, Teil II, Springer-Verlag, Wien 1948.
2. Dembicki E.: *Fundamentowanie*. Tom 2. Arkady, Warszawa 1988.
3. FDOT 1991 – Florida Department of Transportation 1991: *Standard Specification for Road and Bridge Construction*. Tallahassee, Florida.
4. Gwizdała K., Kowalski J. R.: *Prefabrykowane pale wbijane*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Geotechniki, Gdańsk 2005.
5. Gwizdała K., Tejchman A., Blockus M.: *Kontrolne badania dynamiczne pali prefabrykowanych w czasie ich wykonawstwa*, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie budowlane: Zapobieganie – diagnostyka – naprawy – rekonstrukcje”. Szczecin – Międzyzdroje, 17-20 maja 2005.
6. Holeyman A., Skov R.: *Implementation of dynamic testing, driving formulae, monitoring and quality control in the pile design*, Survey report on the present-day design methods for axially loaded piles, European practice, ERTC 3 report, Amsterdam June 1999.
7. Mazurkiewicz B.: *Powstawanie i rozchodzenie się fal naprężeń w palu podczas wbijania*. *Archiwum Hydrotechniki*. Tom XIX, zeszyt 3/1972.
8. Olson R. E., Flaate K. S.: *Pile Driving Formulas for Friction Piles in Sands*. *Journal of the Mechanics and Foundation Division*. Vol. 93, No. SM6, November 1967.
9. Skov R.: *European Pile Testing Practice*. Report on 1997 Pile Symposium in Brussels, Proceedings, International Seminar on Pile Testing and Analysis, September 12, 1997, Hamburg, Germany.
10. Tejchman A., Gwizdała K.: *Dynamic and static analysis and in situ investigation of Vibro-Fundex piles*. Proc. 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, June 1-4, 1993, St. Louis, Missouri.
11. Tejchman A., Gwizdała K., Kurałowicz Z., Brzozowski T., Krasieński A.: *Dynamiczna i statyczna analiza nośności pali Vibro-Fundex*. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 8/1994.
12. Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*. Wyd. III. WKiŁ, Warszawa 1987.
13. Zadroga B.: *Określanie nośności pali metodami dynamicznymi*. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 4/1990.
14. Zadroga B.: *Analiza trudności napotkanych przy wbijaniu pali*. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 1/1991.
15. Zadroga B.: *Wpływ czasu na wzrost nośności pali wbijanych w grunty spoiste*. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/1992.
16. Zadroga B., Gwizdała K.: *Determination of bearing capacity of piles using modified Delmag dynamic formula*. Proc. 4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, September 21-24, 1992, The Hague, Netherlands.
17. PN-69/B-02482: *Nośność pali i fundamentów na palach*.
18. PN-83/B-02482: *Nośność pali i fundamentów palowych*.
19. EN 1997 (2004). *Eurocode 7. Geotechnical Design*.
20. *Projekt budowlany konstrukcji Nabrzeża Szczecińskiego Przeładunkowego w Porcie Gdańskim*, proj. nr. 244/2004/38, Aquaprojekt, Gdańsk, 07.2004.
21. *Projekt budowlano-wykonawczy, Baza promowa Westerplatte w Gdańsku*, proj. nr 262/2002/9, Aquaprojekt, Gdańsk, 06.2002.