

Palisady – rozwiązania, realizacje i problemy

prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała, dr hab. inż. Adam Krasieński
Politechnika Gdańska

Wprowadzenie

Z teoretycznego punktu widzenia, przy aktualnym stanie wiedzy inżynierskiej oraz dostępności programów komputerowych, obliczenie statyczne obudowy głębokiego wykopu (określenie przemieszczeń, sił wewnętrznych w konstrukcji oraz sił w rozporach lub zakotwieniach) wydaje się zadaniem stosunkowo łatwym (A. Siemińska-Lewandowska, 2010, A. Krasieński, 2006).

Od strony praktycznej, dużo większe znaczenie ma prawidłowe rozpoznanie podłoża gruntowego i miarodajne określenie przyjmowanych do obliczeń parametrów geotechnicznych gruntów. Jest to szczególnie istotne, gdy w projektowaniu wykorzystuje się numeryczne metody obliczeniowe. Kolejne ważne kwestie dotyczą wykonawstwa. Prawidłowo wykonane obliczenia statyczne i dobrze opracowany projekt nie zawsze są gwarancją sukcesu w realizacji inwestycji. Często dopiero podczas wykonywania głębokiego wykopu ujawniają się nieprzewidziane komplikacje i problemy, które najczęściej mają podłoże geotechniczne lub hydrogeologiczne. Przyczyną może być niewystarczający zakres badań geotechnicznych i hydrogeologicznych, jak również trudności w pełnej ocenie zjawisk, jakie mogą zaistnieć w miejscu i podczas budowy. Dodatkowym powodem mogą być błędy wykonawstwa.

Zasygnalizowane zagadnienia i problemy dotyczą wszystkich rodzajów obudów głębokich wykopów. W artykule zostaną one przedstawione głównie w odniesieniu do obudów palowych.

Rozwiązania konstrukcyjne palisad

Palisady są jedną z kilku możliwych rodzajów konstrukcji obudów ścian głębokich wykopów, do których należą również ścianki szczelne, obudowy berlińskie, ściany szczelinowe i rozwiązania kombinowane. Dobór odpowiedniej do danego projektu konstrukcji obudowy wykopu uzależniony jest od warunków gruntowo-wodnych, możliwości technicznych w zakresie wykonawstwa oraz czynników ekonomicznych. Palisady mają tę zaletę, że nadają się do zastosowania w niemal wszystkich warunkach. Dodatkowo – fakt, iż ich

Rys. 1. Możliwe konfiguracje pali w palisadach (Marcinków, 2006).

Głębokie wykopy wykonywane w gęstej zabudowie miejskiej są coraz częstszym elementem polskiej praktyki budowlanej. Jest to wynikiem konieczności budowy parkingów podziemnych dla nowo powstających budynków w centrach miast. Realizacja inwestycji z kondygnacjami podziemnymi już sama w sobie jest przedsięwzięciem złożonym i odpowiedzialnym, a czynnikiem stwarzającym często dodatkowe utrudnienia są niekorzystne warunki geotechniczne i wysoki poziom wody gruntowej

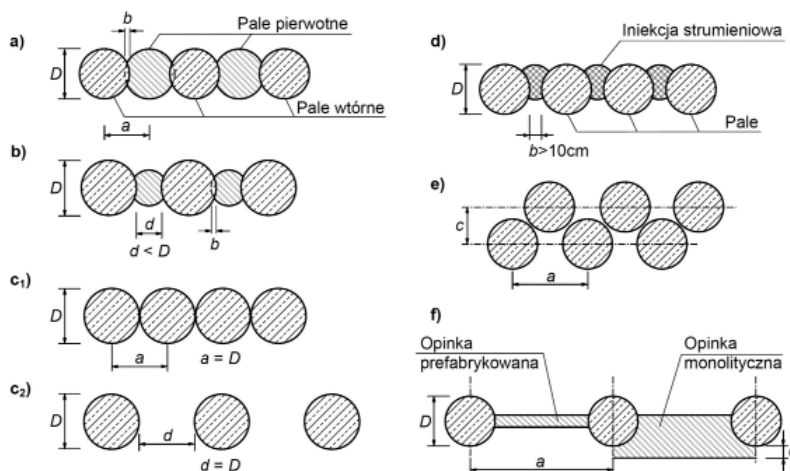
wykonawstwo nie wymaga z reguły specjalistycznego sprzętu (poza typowymi palownicami) sprawia, że stały się najpopularniejszymi metodami podpierania ścian wykopów o umiarkowanych zagłębieniach (do około 8 m głębokości). Przy większych głębokościach korzystniejsze i popularniejsze są ściany szczelinowe.

Od strony technologicznej ściany palowe można podzielić na:

- wykonywane z pali wierconych w rurach osłonowych lub w technologii CFA,
- wykonywane z pali przemieszczeniowych wkręcanych („Omega”, SDP, FDP, CFP, „Lambda”),
- wykonywane z kolumn w technologii iniekcji strumieniowej i DSM,
- wykonywane z pali wbijanych (pale prefabrykowane, brusy żelbetowe, rury i kształtowniki stalowe).

Od strony rozwiązań konstrukcyjnych pale lub kolumny można rozmieszczać w różnych konfiguracjach (rys. 1):

- jako przecinające się, złożone z pali pierwotnych i wtórnych, różniących się zbrojeniem i długością (np. pierwotne – niezbrojone i krótsze, wtórne – zbrojone i dłuższe) (rys. 1a),
- jako poprzesuwane z dodatkowym uszczelnieniem (rys. 1b,d),
- jako stykające się lub rozsunięte o prześwicie $d \leq D$ (D – średnica pala) (rys. 1c),
- jako rozsunięte z doszczelnieniem, np. metodą iniekcji strumieniowej (jet-grouting) (rys. 1d),



- e) jako przesunięte w dwóch rzędach, o wzajemnym przesunięciu równym c (rys. 1e),
f) jako rozsunięte z opinką, np. monolityczną żelbetową, prefabrykowaną lub stalową (rys. 1f).

Przytoczone rozwiązania uzależnione są od warunków gruntowo-wodnych, głębokości wykopów oraz wymagań dotyczących szczelności obudowy.

Palisady charakteryzują się najczęściej następującymi parametrami:

- głębokości wykopów: 3 do 8 m,
- długości pali (w większości pale CFA): 8 do 14 m,
- średnice pali: 400 do 800 mm, a w przypadku rur stalowych – 400 do 600 mm.

Pod względem schematu statycznego, ściany palowe projektuje się jako:

- a) wspornikowe – najczęściej spotykane,
- b) rozpierane w jednym lub w kilku poziomach (najczęściej nie więcej niż w dwóch poziomach),
- c) kotwione w jednym lub w kilku poziomach (j. w.),
- d) podpierane przyporami ukośnymi stalowymi lub pionowymi palowymi – najrzadziej spotykane.

Fakt, że najczęściej spotykane palisady mają schemat wspornikowy wynika z tego, że są one zwykle stosowane do podpierania ścian wykopów o głębokości nieprzekraczającej 5 m. Nieodzownym elementem konstrukcji większości palisad jest oczepek żelbetowy, łączący wzajemnie głowice wszystkich pali i usztywniający dzięki temu całą konstrukcję.

Przykłady zastosowań praktycznych

W niniejszej części przedstawiono kilka przykładów typowych zastosowań palisad do obudów wykopów, wykonywanych przy realizacji różnego rodzaju inwestycji budowlanych na terenie Trójmiasta (Gdańsk, Sopot, Gdynia). Obudowy palisadowe, z których wybrane przedstawiono na fot. od 1 do 6, zastosowano między innymi przy realizacji następujących obiektów:

- a) budynku mieszkalnego w Gdyni (fot. 1),
- b) hotelu „Radisson BLU” w Gdańsku,
- c) zespołu budynków mieszkalnych „Brama Brętowska” w Gdańsku (fot. 2),
- d) budynków wysokich „Quatro Towers” w Gdańsku (fot. 3),
- e) palisady przy budowie budynku biurowego w Sopocie,

Fot. 3. Palisada przy realizacji budynków „Quatro Towers” w Gdańsku (fot. K. Gwidziało)



Fot. 1a

Głębokość wykopu: 4,5 m
Średnica pali: 500 mm
Długość pali: 10 m
Schemat: palisada wspornikowa z przyporami
Brak wody gruntowej w zasięgu wykopu



Fot. 1b



Fot. 2a

Głębokość wykopu: 3 do 6 m
Średnica pali: 500 mm
Długość pali: 6 do 10,5 m
Schemat: palisada kotwiona jednokrotnie, lokalnie kotwiona dwukrotnie
Woda gruntowa: 12,5 ppt. (poza zasięgiem wykopu)



Fot. 2b

Fot. 1. Palisada przy realizacji budynku mieszkalnego w Gdyni (wyk. i fot. Fundament Specjal)

Fot. 2. Palisada przy realizacji zabudowy mieszkalnej „Brama Brętowska” w Gdańsku (wyk. i fot. Fundament Specjal)



Fot. 3a

Głębokość wykopu: 6,5 do 8 m
Palisada ażurowa z pali CFA: średnica pali – 500 mm, długość pali – 8 do 12 m, rozstaw osiowy pali – 1,2 m
Schemat statyczny: palisada wspornikowa, palisada jednokrotnie kotwiona
Objekt: 4 budynki 19-kondygnacyjne, 2 kondygnacje podziemne
Posadowienie: fundament płytowo-palowy



Fot. 3b



Palisada ażurowa z pali CFA
 Odcinek 1: średnica pali – 430 mm, długość – 4,5 do 7,5 m, rozstaw osiowy – 0,6 m
 Odcinek 2: średnica pali – 630 mm, długość – 8,5 do 11 m, rozstaw osiowy – 0,8 m
 Odcinek 3: średnica pali – 800 mm, długość – 12 do 13 m, rozstaw osiowy – 0,9 i 1 m
 Głębokość wykopu: od 3 do ok. 5,7 m



Palisada z pali CFA
 Średnica pali: 500 mm
 Długość pali: 9,5–12 m
 Głębokość wykopu: ok. 6,5 m
 Schemat statyczny: jednokrotnie zakotwiona



- Fot. 4.** Palisada na budowie dojazdu „Drogi Zielonej” do tunelu pod torami kolejowymi w Gdańsku (wyk. Keller Polska i Stabilator, fot. lewe Stabilator, fot. prawe K. Gwizdała)
- Fot. 5.** Palisada przy realizacji centrum handlowego przy dworcu kolejowym w Gdańsku Wrzeszczu (fot. K. Gwizdała)

- f) palisady iniekcyjnej wspartej systemem kotew gruntowych,
 g) dojazdu „Drogi Zielonej” do tunelu po torami kolejowymi w Gdańsku (fot. 4),
 h) centrum handlowego przy dworcu w Gdańsku Wrzeszczu (fot. 5),
 i) żelbetowej ścianki szczelnej nabrzeża w Porcie Gdańskim (fot. 6).

Zaprezentowane przykłady potwierdzają duże różnorodności ścian palowych i możliwości ich zastosowań jako obudów wykopów o umiarkowanej głębokości. Podkreślają również takie walory palisad, jak prostota wykonawstwa, możliwość wykorzystywania różnych materiałów i technologii oraz dostosowania układów geometrycznych i konstrukcyjnych do lokalnych warunków terenowych i geotechnicznych.

Do zalet palisad można dodatkowo zaliczyć:

- relatywnie niski koszt wykonania,
- bezwibracyjną i bezwstrząsową technologię wykonania, nie stwarzającą zagrożenia dla obiektów sąsiednich,

- możliwość wykonania w bliskiej odległości od ścian istniejących budynków (około 30–40 cm),
- możliwość wykorzystania palisad jednocześnie jako ścian podziemnych i fundamentów budynków.

Do wad należy natomiast zaliczyć:

- brak możliwości odzysku materiałów przy zastosowaniach tymczasowych,
- trudności z uzyskaniem szczelności przy wysokim poziomie wody gruntowej (konieczność stosowania uszczelnień np. z iniekcji strumieniowej lub chemicznej),
- potencjalne niebezpieczeństwo znacznych odchyłek geometrycznych podczas wykonawstwa.

Problemy wykonawcze

Przytoczone wyżej przykłady z praktyki dotyczyły przypadków zrealizowanych w stosunkowo korzystnych warunkach gruntowo-wodnych, w których zarówno wykonawstwo palisad, jak i wykopów, nie sprawiło większych problemów. Komplikacje pojawiają się wówczas, gdy w podłożu gruntowym na niewielkiej głębokości znajduje się woda gruntowa i występuje niebezpieczeństwo napływu tej wody do wnętrza wykopu. Na rys. 2.

zaprezentowano dwa charakterystyczne przypadki wykopów obudowanych, wykonanych w nawodnionym podłożu, zbudowanym z dwóch warstw gruntów różniących się stopniem wodoprzepuszczalności.

Oba przypadki pozornie nie różnią się znacząco. Na początku należy zwrócić uwagę, że opór filtracji koncentruje się na warstwie o mniejszym współczynniku filtracji k . Przy dużej różnicy w wartościach współczynników k_1 i k_2 (np. 2–3 rzędów), warstwę o większym współczynniku można praktycznie pominąć w analizie, uzyskując dodatkowo wariant bardziej niekorzystny. Spośród obu analizowanych przypadków, dużo bardziej niekorzystna i trudniejsza w rozwiązaniu sytuacja występuje w przypadku b), pomimo mniejszej różnicy poziomów wody ΔH_w .

W przypadku a) nie powinno być problemu z napływem wody przez dno wykopu ze względu na długą drogę filtracji wody przez warstwę nr 2. Może pojawić się jednak problem z napływem wody przez ściany obudowy, szczególnie w warstwie nr 1. Z tego względu, palisada w tym przypadku powinna być wykonana w odpowiedniej technologii i z dużą



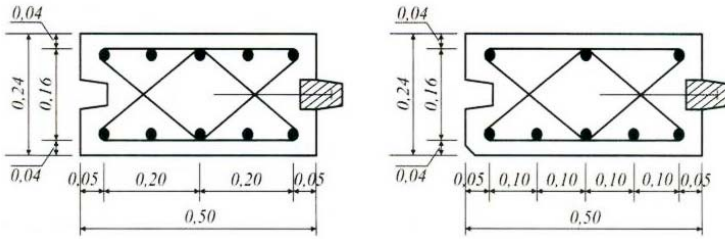
Fot. 6a



Fot. 6b

Fot. 6. Prefabrykаты żelbetowej ścianki szczelnej nabrzeża w Porcie Gdańskim (fot. K. Gwizdała)

wprawdzie wykopu w obudowie z palisady, ale obrazuje bardzo niekorzystny przypadek awarii, polegającej na intensywnym napływie wody przez dno wykopu do jego wnętrza. Wykop uległ całkowitemu zalaniu, z widocznym nawet przelewaniem się wody przez koronę ścianki szczelnej. Awaria nastąpiła w wyniku silnego naporu wody artezyskiej i przebicia hydraulicznego warstwy gruntu słabo przepuszczalnego, zalegającego w strefie poniżej dna wykopu.



"Morskie Budowle Hydrotechniczne" (Mazurkiewicz, 2008)

dokładnością tak, aby była możliwie jak najbardziej szczelna. Drobne nieszczelności można zwykle usunąć w trakcie głębienia wykopu. Duże i liczne nieszczelności stanowią problem trudny do rozwiązania (przykład w dalszej części artykułu).

Problemy z wodą artezyską mogą zostać wywołane nawet pozornie niegroźnymi działaniami ludzkimi. Na fot. 8 przedstawiono przykład, w którym przebicie hydrauliczne pojawiło się w miejscu wykonania sondowania statycznego CPT. Okazało się, że wyeliminowanie napływu wody przez stosunkowo niewielki otwór w gruncie wcale nie było za-

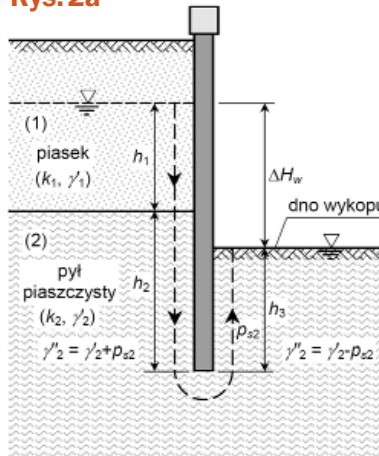
W przypadku b) nie będzie z kolei większego problemu z napływem wody przez ściany wykopu ze względu na małą wodoprzepuszczalność warstwy nr 1, natomiast może wystąpić duży problem z napływem od strony dna, a przede wszystkim ze statecznością dna wykopu na przebicie lub wyparcie hydrauliczne. Sytuacji nie poprawi tu zwiększenie zagłębienia obudowy. Rozwiązaniem może być zmniejszenie naporu wody w warstwie nr 2 przez zainstalowanie studni i pomp (na zewnątrz lub wewnątrz wykopu), uszczelnienie dna za pomocą np. iniekcji strumieniowej w warstwie nr 2 lub wzmocnienie dna wykopu przez wykonanie korka betonowego (z ewentualnym jego zakotwieniem np. mikropaliami).

W celu uniknięcia kłopotów w rozpatrywanych i podobnych przypadkach, zalecane jest wykonanie na etapie projektu odpowiednich obliczeń, według np. uproszczonej procedury przedstawionej na rys. 2.

Na podobnego rodzaju problemy dotyczące głębokich wykopów w złożonych warunkach gruntowo-wodnych zwraca się uwagę między innymi w Eurokodzie 7, a także w różnego rodzaju pozycjach literatury fachowej (np. Wiłun, 2007 i poprzednie edycje). Mimo to zdarza się w praktyce inżynierskiej, że wiele zagadnień i kwestii jest pomijanych i lekceważonych, co skutkuje różnego rodzaju komplikacjami i sytuacjami awaryjnymi, pojawiającymi się podczas realizacji robót budowlanych.

Przykład przedstawiony na fot. 7 nie dotyczy

Rys. 2a



Obliczenia:

$$L = h_1 + h_2 + h_3; \quad L_1 = h_1; \quad L_2 = h_2 + h_3$$

$$p_{s2} = \gamma_w h_2 = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{L_2} = \gamma_w \Delta H_w / (L_2 \cdot \frac{k_2}{k_1} + L_2)$$

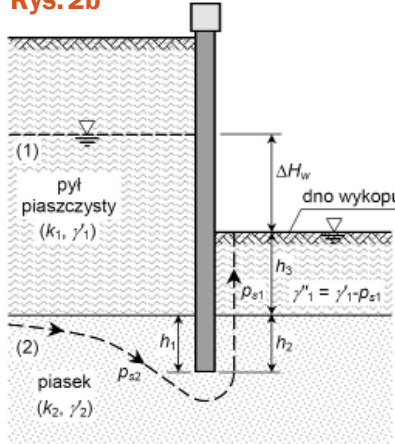
Współczynnik bezpieczeństwa:

$$F = \frac{\gamma_2}{p_{s2}} \geq 2$$

Gdy: $k_2 \ll k_1$, np. $k_2 = k_1 \cdot 10^{-3}$

$$\frac{k_2}{k_1} \approx 0 \rightarrow p_{s2} = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{L_2} = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{h_2 + h_3}$$

Rys. 2b



Obliczenia:

$$L \approx 3h_1 + h_2 + h_3; \quad L_1 = h_3; \quad L_2 \approx 3h_1 + h_2$$

$$p_{s1} = \gamma_w h_1 = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{L_1} = \gamma_w \Delta H_w / (L_2 \cdot \frac{k_1}{k_2} + L_1)$$

Współczynnik bezpieczeństwa:

$$F = \frac{\gamma_1}{p_{s1}} \geq 2$$

Gdy: $k_2 \gg k_1$, np. $k_2 = k_1 \cdot 10^3$

$$\frac{k_1}{k_2} \approx 0 \rightarrow p_{s1} = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{L_1} = \gamma_w \frac{\Delta H_w}{h_3}$$

Rys. 2. Przypadki wykopu w nawodnionym podłożu dwuwarstwowym

daniem łatwym. Na szczęście, otwór po sondowaniu znajdował się na zewnątrz wykopu obudowanego ściankami szczelnymi.

Na fot. 9 przedstawiono z kolei przykład sytuacji awaryjnej w głębokim wykopie osłoniętym palisadą z pali CFA, uszczelnioną kolumnami z iniekcji strumieniowej. Problem w tym przypadku był bardzo złożony i dotyczył tym razem napływu wody do wnętrza wykopu przez nieszczelności w ścianach obudowy. Wykop znajdował się na terenie zabytkowej dzielnicy Gdańska (Gwizdała, Krasieński, 2014). Na powstanie nieszczelności w palisadzie złożyło się kilka trudnych do przewidzenia czynników. Dwa najważniejsze z nich związane były z pozostałościami starych pali drewnianych w podłożu gruntowym (fot. 9a) oraz obecnością w tym podłożu cienkiego przewarstwienia gruntu kamienistego (bruk morenowy), w którym działanie uszczelniające iniekcji strumieniowej okazało się mało skuteczne. Zaistniała awaria była bardzo trudna do opanowania i wymagała kosztownych oraz żmudnych zabiegów naprawczych.

Podsumowanie

Przedstawione w artykule przykłady praktycznych zastosowań potwierdzają duże walory ścian palowych jako obudów głębokich wykopów, przydatne szczególnie w gęstej zabudowie miejskiej. Pokazują również szeroki zakres rozwiązań konstrukcyjnych i wariantów technologicznych możliwych do zastosowania w palisadach.

Jak w wielu innych konstrukcjach i robotach geotechnicznych, tak i w przypadku palisad od czasu do czasu trafiają się problemy. Jak wynika z artykułu, są one najczęściej związane z wysokim poziomem wody gruntowej, często połączonym z niekorzystną budową podłoża gruntowego. Dokładają się do tego czasami błędy projektowe i niedociągnięcia wykonawcze.

Doświadczenia autorów wskazują, że – paradoksalnie – problemy i awarie zdarzają się najczęściej przy realizacji niedużych inwestycji, z wykopami o głębokości do kil-

ku metrów. Prawdopodobnie przy większych inwestycjach i głębszych wykopach bardziej zwraca się uwagę na kwestie bezpieczeństwa, zarówno w procesie projektowania, jak i wykonawstwa. Czynniki ekonomiczne, w takich przypadkach, odgrywają nadal ważną rolę, ale drugorzędną.

Każdy przypadek wykopu głębokiego należy niewątpliwie rozpatrywać indywidualnie, z uwzględnieniem specyfiki lokalnych warunków terenowych, geotechnicznych i hydrogeologicznych, a także, jak się okazuje, uwarunkowań historycznych, szczególnie przy realizacjach na terenach zurbanizowanych. ■

Literatura

- [1] Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011.
- [2] Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.
- [3] Gwizdała K., Krasieński A.: Głębokie wykopy, rozwiązania praktyczne i obliczenia. IV Konferencja Geoinżynieria w budownictwie, Kraków, 5–6 listopada 2014.
- [4] Gwizdała K.: Palisady – rozwiązania konstrukcyjne, projektowanie. Seminarium IBDiM i PZWFS – Warszawa, 5 marca 2015 – Fundamenty Palowe 2015.
- [5] Krasieński A.: Analiza pracy i przemieszczeń rozpieranej i kotwionej obudowy wykopu. Inżynieria i Budownictwo, nr 12/2006, str. 664-668.
- [6] Marcinków E.: Ściany palowe. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2006, str. 297-301.
- [7] Siemińska-Lewandowska A.: Głębokie wykopy. Projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2010.
- [8] Wilun Z.: Zarys geotechniki. Wydawnictwo WKŁ sp. z o.o, Warszawa, 2007.
- [9] Morskie budowle hydrotechniczne. Zalecenia do projektowania i wykonywania Z 1 – Z 45, Opracowanie zbiorowe pod redakcją prof. B. Mazurkiewicza, Wydanie V, Gdańsk 2008.
- [10] PN-EN 1997-1:2007, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne- Część 1: Zasady ogólne.

Fot. 7. Wykop w ściankach szczelnych całkowicie wypełniony wodą artestyjską napływającą przez dno wykopu



Fot. 8. Wypływ wody artestyjskiej przez otwór po sondowaniu statycznym CPT



Fot. 9. Przykład obudowy z nieszczelnej palisady, z trudnym do opanowania napływem wody do wnętrza wykopu (a – widoczne wtrącenia z dawnych pali drewnianych)

