

# Metody obliczania studni opuszczanych

## Calculation methods of sunk wells

dr hab. inż. Anna Szymczak-Graczyk, prof. UPP (ORCID: 0000-0002-1187-9087),  
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6393

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono metody obliczania studni opuszczanych, uwzględniając metody tradycyjne oraz współczesne numeryczne metody obliczeniowe. Omówione zostały najważniejsze zagadnienia, na które należy zwrócić uwagę przy projektowaniu studni, takie jak: zapewnienie studni pogrążalności, w przypadku posadowienia w gruntach nawodnionych, zagwarantowanie studni stateczności na wypór, zaprojektowanie pod względem wytrzymałościowym płaszcza studni, noża studni, korka betonowego studni oraz płyty dennej, jak również uwzględnienie technologii wykonywania studni.

**Słowa kluczowe:** studnie opuszczane, zbiorniki prostopadłościowe, zbiorniki cylindryczne, metody numeryczne.

**Abstract:** The paper presents methods of calculating sunk wells, taking into account traditional methods and modern numerical calculation methods. The most important issues to be paid attention to when designing a well are discussed, such as proper sinkability of the well, buoyancy stability of the well when it is implemented in wet soils, design with reference to the strength of the steining, design of the cutting edge, bottom plug and a bottom plate as well as taking into account well completion technology.

**Keywords:** sunk wells, rectangular tanks, cylindrical tanks, numerical methods.

## 1. Wprowadzenie

Żelbetowe studnie opuszczane są obiektami projektowanymi i realizowanymi od dziesięcioleci. Obecnie wraz ze wzrostem urbanizacji terenów miejskich i podmiejskich studnie opuszczane jako konstrukcje podziemne są czasami jedynym rozwiązaniem dla magazynowania np. wód deszczowych. Na zwiększenie liczby realizacji tych obiektów wpływa także szereg prac rewitalizacyjnych obejmujących istniejące sieci kanalizacyjne. Wówczas w gęstej zabudowie trudno wykonać jakiś inny obiekt do gromadzenia wody niż obiekt podziemny, dodatkowo nie można wykonać takiego zbiornika w tradycyjnym wykopie, dlatego też realizacja studni metodą zagłębiania jest jak najbardziej odpowiednia. Do wyboru rozwiązania z wykorzystaniem studni opuszczanych mogą skłaniać trudne warunki gruntowo-wodne w rejonie posadowienia studni lub ograniczona przestrzeń możliwa do zajęcia w trakcie budowy, uniemożliwiająca wykonanie wykopu szerokoprzestrzennego. Do niewątpliwych zalet stosowania studni opuszczanych należy zaliczyć stosunkowo małą objętość robót ziemnych i możliwość ich wykonania bez konieczności obniżania poziomu wód gruntowych.

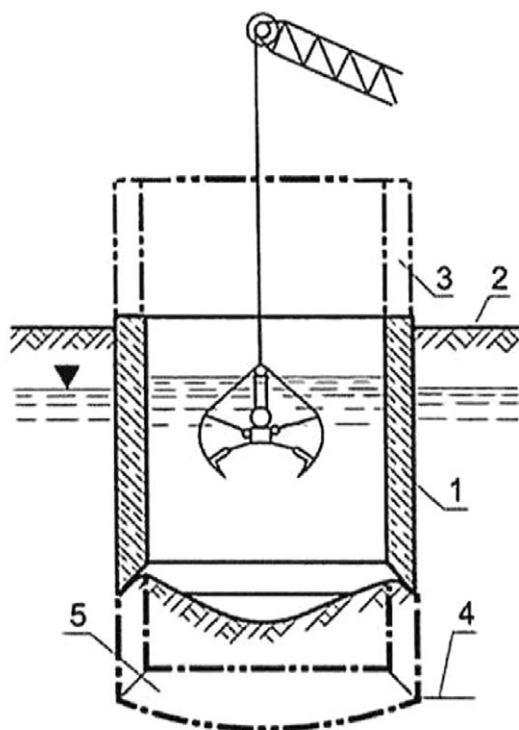
Studnia opuszczana to konstrukcja złożona ze ścian zakończonych nożem, korka betonowego, płyty dennej oraz w niektórych przypadkach płyty stropowej. Są to obiekty o przekroju kołowym lub prostokątnym, rzadziej owalnym lub wielokątnym. Pod wpływem własnego ciężaru, przy jednoczesnym wybieraniu gruntu z wnętrza zagłębiają się one w grunt [1]. W przypadku studni opuszczanych poza zaprojektowaniem pod względem wytrzymałościowym

wynikającym z obciążeń stałych, zmiennych i wyjątkowych należy brać pod uwagę zagadnienia takie jak: zapewnienie pogrążalności studni, stateczności studni na wypłynięcie oraz technologię wykonywania.

Studnie opuszczane jako ustroje monolityczne charakteryzują się pracą przestrzenną oraz zmianami schematów statycznych podczas ich realizacji. Zatem wszelkie uproszczenia obliczeniowe stosowane przy używaniu metod numerycznych w sposób tradycyjny mogą prowadzić do otrzymania niewłaściwych wyników. Najkorzystniejszym rozwiązaniem jest stosowanie metod obliczeniowych, które biorą pod uwagę wszelkie parametry zarówno materiałowe, działające obciążenia, jak i technologię wykonywania. Studnię w czasie jej wykonywania pokazano na rysunku 1.

## 2. Metody obliczania studni opuszczanych

Sposób wykonywania studni opuszczanych, metodą „tnij i opuszczaj” oraz późniejszy sposób eksploatacji powoduje, że studnia o przekroju kołowym lub prostokątnym stanowi rurę z końcami swobodnymi, a po wykonaniu korka dennego dolny koniec rury przechodzi w swobodnie podparty, a więc powstaje zbiornik cylindryczny lub prostopadłościenny [1, 3]. Studnie w standardowych warunkach wykonywania i użytkowania pracują jako obiekty ściskane, co nie powoduje utrudnień obliczeniowych. Dopiero konieczność uwzględnienia ściskania i zginania występującego w studniach o dużych wymiarach lub w przypadku przechyłu studni powoduje większe problemy obliczeniowe. Metody numeryczne, takie jak: metoda elementów skończonych lub



**Rys. 1.** Studnia w czasie głębienia: 1 – płaszcz studni, 2 – poziom terenu, 3 – nadbudowa studni po opuszczeniu pierwszego segmentu, 4 – poziom posadowienia studni, 5 – dno studni wykonane po całkowitym opuszczeniu [2]

metoda różnic skończonych stosowane są od wielu lat zarówno do obliczeń tradycyjnych jak i w oprogramowaniu komputerowym. Najistotniejsze jest, aby obliczenia prowadzone były metodami uwzględniającymi przestrzenny charakter konstrukcji studni opuszczanych jak również zmieniające się w trakcie wykonawstwa i eksploatacji schematy statyczne. Wykorzystywanie podczas obliczeń statycznych uproszczeń polegających na myślowym wycinaniu z konstrukcji ram poziomych i wyznaczeniu dla nich momentów zginających lub rozpatrywaniu ustroju studni jako złożonego z pojedynczych płyt, może prowadzić do niewłaściwego wyliczenia wartości sił przekrojowych zarówno przeszacowania, jak i niedoszacowania. Opisy projektowania metodami uproszczonymi znaleźć można w publikacjach wydanych przed laty [4–16]. Przykłady rozwiązań oraz tablice do projektowania podano np. [10, 17–21]. W krajowej literaturze przedmiotu w ostatnich latach ukazało się kilka publikacji dotyczących studni opuszczanych [1, 3, 22–24]. Współcześnie obliczenia 3D metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania są powszechne i nie powinny stanowić dla projektantów trudności.

### 3. Zasady projektowania studni opuszczanych

Studnie są obiektami budowlanymi podziemnymi zatem działają na nie następujące obciążenia:

- parcie czynne gruntu działające na płaszcz studni podczas opuszczania,
  - parcie spoczynkowe działające na dolny fragment płaszczu studni do wysokości odsadki podczas opuszczania oraz na całą studnię w czasie eksploatacji,
  - odpór gruntu w przypadku przechyłu studni podczas opuszczania, działający na część płaszczu,
  - parcie wody gruntowej działające na ściany i dno studni,
  - wypór wody gruntowej,
  - odpór gruntu pod dnem studni, od całkowitego ciężaru budowli (bez pomniejszania o tarcie na bocznej powierzchni studni i o wypór wody gruntowej),
  - tarcie płaszczu studni o grunt na etapie opuszczania (siła tarcia skierowana pionowo w górę, którą trzeba pokonać przy opuszczaniu studni) lub przy działaniu wyporu (siła tarcia skierowana pionowo w dół, przeciwdziałająca sile wyporu),
  - obciążenie termiczne wynikające z temperatury lub zmian temperatury magazynowanych ścieków w obiektach (zbiornikach) stosowanych w oczyszczalniach ścieków [1, 3].
- Parametry geotechniczne, takie jak: kąt tarcia wewnętrznego, spójność gruntu, ciężar objętościowy należy przyjmować zgodnie z EC7 [25].

Głównymi zagadnieniami, na które należy zwrócić uwagę przy projektowaniu studni opuszczanych są:

- zapewnienie pogrążalności studni,
- zagwarantowanie studni stateczności na wypłynięcie w przypadku posadowienia w gruntach nawodnionych,
- zaprojektowanie pod względem wytrzymałościowym płaszczu studni, noża studni, korka betonowego studni oraz żelbetowej płyty dennej [1, 3].

Aby zapewnić pogrążalność studni, ciężar studni, z uwzględnieniem sił wyporu w gruntach nawodnionych, musi być większy od sił tarcia na pobocznicę, co wyraża się wzorem (1):

$$Q - W > T \quad (1)$$

gdzie:

$Q$  – całkowity ciężar opuszczanego segmentu studni w trakcie opuszczania [kN],

$W$  – ciężar wody wypartej przez ściany studni (wypór wody) [kN],

$T$  – całkowita siła tarcia płaszczu opuszczanego segmentu studni o grunt [kN] [1, 3].

Stateczność na wypłynięcie należy sprawdzać po odpompowaniu wody z wnętrza zbiornika, przy pustym zbiorniku bez dodatkowych urządzeń wewnątrz zwiększających ciężar.

Rozpatrując stan graniczny wyparcia hydraulicznego (UPL) zgodnie z EC7, należy sprawdzić, czy wartość obliczeniowa kombinacji oddziaływań destabilizujących pionowych stałych i zmiennych  $V_{dst,d}$  jest mniejsza lub równa sumie obliczeniowej wartości stabilizujących pionowych oddziaływań stałych  $G_{stb,d}$  i obliczeniowej wartości dodatkowego

oporu przeciwdziałającego wyparciu  $R_{dr}$ , co wyraża się wzorem (2):

$$V_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (2)$$

gdzie:

$V_{dst,d}$  – wartość obliczeniowa destabilizujących oddziaływań pionowych na konstrukcję,

$G_{stb,d}$  – wartość obliczeniowa stałych, pionowych oddziaływań stabilizujących do sprawdzania wyparcia,

$R_d$  – wartość obliczeniowa dodatkowego oporu przeciw wyparciu; dodatkowy opór przeciwdziałający wyparciu można również traktować jako stabilizujące pionowe oddziaływanie stałe  $G_{stb,d}$  [25].

Obliczenia potrzebnego zbrojenia elementów studni opuszczanych należy wykonywać na podstawie normy Eurokod 2 [26] natomiast minimalną klasę betonu należy określić biorąc pod uwagę klasę ekspozycji według PN-EN 206-1:2003 [27].

Płaszcz studni będący w fazie opuszczania najczęściej oblicza się jako wydzielone poziome elementy, które rozpatruje się jako pierścień lub zamkniętą ramę, na którą działa parcie gruntu. Schemat statyczny płaszcza podczas opuszczania to swobodne krawędzie górą i dołem. Po całkowitym opuszczeniu studni i wykonaniu korka dennego warunek nośności sprawdza się, traktując studnię jako zbiornik cylindryczny lub prostopadłościenny, w których dolna krawędź jest swobodnie podparta natomiast górna swobodna.

Nóż studni należy sprawdzać na zginanie w płaszczyźnie pionowej, traktując go jako wspornik utwierdzony. W obliczeniach noża na zginanie zakłada się, że studnia jest opuszczona na pełną głębokość i rozpatruje się dwie możliwości działania sił powodujących zginanie. W pierwszej zakłada się, że nóż nie jest oparty na gruncie (jest podkopany) i podlega zginaniu wskutek parcia gruntu z zewnątrz, w drugiej przyjmuje się, że nóż jest zagłębiony w gruncie i działa na niego odpór pionowy i pozioma składowa oporu dla pochylonej części noża. Dodatkowo należy obliczać nóż na zginanie w płaszczyźnie poziomej, spowodowane parciem gruntu rozłożonym równomiernie na zewnętrznym obwodzie studni oraz odporem gruntu przyłożonym równomiernie od wewnątrz studni, działającym na skośną powierzchnię noża.

Betonowy korek wykonywany jest po opuszczeniu studni na wymaganą głębokość. W przypadku wykonywania w gruntach nawodnionych betonowanie odbywa się pod wodą. Zadaniem korka jest przeniesienie całkowitych sił parcia hydrostatycznego, które będzie działało na dno po odpompowaniu wody z wnętrza studni. Obliczanie potrzebnej grubości korka, przy założeniu, że studnia pod własnym ciężarem się już nie opuszcza wykonuje się przyjmując obliczeniowe obciążenie działające na korek jako równomierne obciążenie parciem hydrostatycznym działającym od dołu pomniejszonym o ciężar korka.

Żelbetową płytę denną spoczywającą na korku betonowym oblicza się dla obciążenia odporem gruntu od całkowitego ciężaru budowli wraz z urządzeniami i przy uwzględnieniu obciążeń użytkowych, bez uwzględniania sił tarcia na pobocznicę płaszcza studni oraz wyporu wody [1, 3].

#### 4. Technologia wykonywania studni opuszczanych i jej wpływ na przyjmowane do obliczeń schematy statyczne

Przy znacznej wysokości płaszcza studni, tj. przy dużych głębokościach studni, najczęściej wykonuje się betonowanie i opuszczanie w dwóch lub trzech segmentach o wysokości segmentu około 3–4 m (rys. 1). W obliczeniach statycznych powinno się uwzględnić poszczególne fazy realizacji. Dla studni realizowanej dwuetapowo przebieg jej wykonywania ma poniższe fazy.

- Faza 0 – roboty wstępne obejmujące przygotowanie zaplecza i terenu oraz wykonanie dolnego segmentu studni, który zostanie opuszczony w pierwszej kolejności. W dolnym segmencie studni po jej opuszczeniu następuje „wstępne” obciążenie konstrukcji. Powstają jej odkształcenia, jak również występują siły przekrojowe wywołane działającym obciążeniem i dopiero po tym etapie przystępuje się do formowania górnej części konstrukcji.
- Faza I – stan opuszczania pierwszego segmentu studni. Na płaszcz studni przekazywane jest obciążenie w postaci parcia gruntu, obliczonego z uwzględnieniem nawodnienia gruntu oraz obciążenia naziomu. Krawędź dolna zakończona nożem oraz górna są swobodne.
- Faza II – stan dalszego opuszczania studni z dobetonowaną górną częścią płaszcza. Uwzględniając odkształcenia i siły przekrojowe powstałe w fazie I, jako obciążenie w fazie II należy przyjąć parcie gruntu. Krawędzie poziome studni są swobodne.
- Faza III – studnia jest całkowicie opuszczona z zabetonowanym korkiem dennym i wypompowaną z wnętrza wodą. Obciążenie jest identyczne jak w fazie II, zwiększone o parcie wody, działające z zewnątrz, przy czym dolna krawędź studni jest swobodnie podparta, natomiast górna swobodna [1, 3].

#### 5. Podsumowanie

Studnie opuszczane są konstrukcjami wyjątkowymi z uwagi na etapowość ich realizacji i konieczność uwzględnienia tej etapowości podczas prowadzenia obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Zmiana schematów statycznych podczas wykonywania konstrukcji powoduje konieczność jej obliczania w wielu wariantach i kombinacjach oddziaływań. I co rzadko spotykane w projektowaniu konstrukcji podczas etapu wykonywania otrzymujemy większe wartości sił przekrojowych niż podczas późniejszego użytkowania obiektu. Najbardziej zbliżone do właściwych wyniki obliczeń





**Rys. 2.** Prace budowlane przy opuszczaniu studni w Suchym Lesie, k. Poznań; pierwszy segment studni został już opuszczony, w prze-wie technologicznej zastosowano taśmę z blachy ocynkowanej [1]



**Rys. 3.** Prace budowlane przy opuszczaniu studni „A” w Sobocie, k. Poznań; opuszczany drugi segment studni [1]



**Rys. 4.** Prace budowlane przy opuszczaniu studni w Koninie; początek pogrążania studni [1]

uzyskuje się analizując studnie trójwymiarowo korzystając z metod numerycznych i specjalistycznego oprogramowania. Przykładowe studnie opuszczane podczas ich wykonywania pokazano na rysunkach 2–4.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Szymczak-Graczyk A., Żelbetowe studnie opuszczane. Kształtowanie, obliczenia, wykonawstwo, przykłady realizacji, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2021, ISBN 978-83-67112-02-4
- [2] Płaskowski Z., Roman M., Konstrukcje budowlane pompowisk ścieków, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1968
- [3] Szymczak-Graczyk A., Selected aspects of the design and construction of reinforced concrete sunk wells, Acta Scientiarum Polonorum Architectura 21(3)2022, str. 43–54, DOI: 10.22630/ASPA.2022.21.3.21
- [4] Mikołajczak H., Gołaś J., Obliczenia konstrukcji studni fundamentowych stosowanych w stacjach pomp, Roczniki AR Poznań 59/1972
- [5] Rossiński B. (red.), Budownictwo betonowe, tom IX, Fundamenty, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1966
- [6] Rossiński B. (red.), Fundamenty. Projektowanie i wykonawstwo, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1976
- [7] Czarnota-Bojarski R., Lewandowski J., Fundamenty budowli lądowych, Przykłady obliczeń, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1978
- [8] Mołoniewicz W., Sędzikowski T., Bonikowski T., Małe oczyszczalnie ścieków, Projektowanie i wykonawstwo, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1979
- [9] Buczkowski W., Czwojdziański Z., Obliczenia statyczne studni opuszczanych z uwzględnieniem etapów ich realizacji, Budownictwo Przemysłowe 3/1985
- [10] Buczkowski W., Prostokątne studnie opuszczane – tabele do obliczeń statycznych płyt ściennych, Budownictwo Przemysłowe 5–6/1988
- [11] Buczkowski W., Tablice do projektowania jednokomorowych otwartych zbiorników prostopadłościennych, Wydawnictwo AR Poznań, 1989
- [12] Buczkowski W. Niektóre zagadnienia obliczenia studni opuszczanych prostokątnych obciążonych liniowo w części nożowej, Inżynieria i Budownictwo 8/1991
- [13] Buczkowski W., Praca statyczna równomiernie obciążonego pierścienia prostokątnego, swobodnie podpartego wzdłuż krawędzi otworu, Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu 224/1991
- [14] Buczkowski W., Tablice do projektowania studni opuszczanych o przekroju prostokątnym: jedno-, dwu-, trzy- i czterokomorowych, Skrypt Akademii Rolniczej w Poznaniu, 1992
- [15] Buczkowski W., Czwojdziański Z., Staszewski R., Wpływ rozpór na pracę statyczną wielkowymiarowych studni opuszczanych, Inżynieria i Budownictwo 8/1991
- [16] Buczkowski W., Mikołajczak H., Sroka Z., Wosiewicz B., Pakiet programów do obliczeń statycznych studni opuszczanych stosowanych w pompowniach melioracyjnych, Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie 1/1989
- [17] Timoszenko S., Woinowsky-Krieger S., Teoria płyt i powłok, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1962
- [18] Stigla K., Wippel H., Platten, Verlag von Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1973
- [19] Szadurskij W. L., Tablice dla rasczeta uprugich prjamougolnych плит. Stroizdat, Moskwa, 1976
- [20] Ulickij J. J. i inni, Żelazobetonnyje konstrukcii. Gosudarstwennoje Izdatelstwo Techničeskoj Literatury, Kijew, 1959
- [21] Bareš R., Berechnungstafeln für Platten und Wandscheiben, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1979
- [22] Halicka A., Franczak D., Projektowanie zbiorników żelbetowych. Zbiorniki na cieczy, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013
- [23] Halicka A., Franczak-Balmas D., Żelbetowe zbiorniki na cieczy i materiały sypkie. Współczesne zasady projektowania z przykładami, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2020
- [24] Pisarczyk S., Fundamentowanie dla inżynierów budownictwa wodnego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019
- [25] PN-EN 1997-1:2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne
- [26] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [27] PN-EN 206+A1:2016-12: Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność