

OBLICZENIA STATECZNOŚCI ZAPORY W NIELISZU W ODNIESIENIU DO EUROKODU 7¹

Simon Rabarijoely

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystykę zapory w Nieliszu, dokonano porównania parametrów geotechnicznych podłoża tej zapory według Larssona i Marchettiego oraz obliczono warunki stateczności zapory ze względu na przebicie hydrauliczne (HYD) według Eurokodu 7 i stateczności ogólnej zapory przy różnych poziomach piętrzenia za pomocą programu Slope/W.

Słowa kluczowe: stateczność skarpy, Eurokod 7

WSTĘP

Podczas realizacji każdej nowej inwestycji budowlanej należy zmierzyć się z problemem właściwego doboru parametrów podłoża, na którym ona powstanie. Jest to o tyle ważne, gdyż właściwe rozpoznanie podłoża gruntowego pozwala uniknąć błędów, zarówno podczas projektowania, jak i wykonywania obiektu. Badania prowadzące do rozpoznania warunków występujących w podłożu można podzielić na terenowe i laboratoryjne. Obie grupy mają swoje zalety i wady, lecz uzupełniają się nawzajem. Zaletą badań polowych jest przede wszystkim wykonanie pomiarów w warunkach *in situ* oraz uzyskanie prawie ciągłego profilu gruntowego przy zachowaniu naturalnego stanu naprężeń i wilgotności.

Celem tego artykułu jest ocena stateczności zapory zbiornika w Nieliszu pod kątem wytycznych wynikających z Eurokodu 7. W artykule skoncentrowano się na stanie granicznym dotyczącym zagrożenia przebiciem hydraulicznym (HYD) oraz na stateczności ogólnej zapory przy różnych poziomach piętrzenia. Obliczenia zostały wykonane

¹ Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2014 z dwóch projektów badawczych NCN: N N506 218039 i Grant Umowa nr UMO-2011/03/D/ST8/04309.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Simon Rabarijoely, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: simon_rabarijoely@sggw.pl

zgodnie z wytycznymi Eurokodu 7 oraz zawartymi w nim metodami obliczeniowymi i współczynnikami bezpieczeństwa. Odmianą częścią pracy było sprawdzenie, jak zmieniają się parametry geotechniczne na podstawie różnych założeń.

OBLICZENIA STATECZNOŚCI WEDŁUG EUROKODU 7

Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne [PN-EN 1997-1:2008] jest obszernym dokumentem obejmującym zagadnienia badań podłoża, projektowania geotechnicznego fundamentów i budowli ziemnych, kontroli i monitorowania obiektów. Rozdział 1 obejmuje zasady ogólne, czyli wszelkie reguły, definicje i symbole zawarte w normie, rozdział 2 – podstawy projektowania geotechnicznego, m.in. sytuacje obliczeniowe i projekt geotechniczny. Kolejny, 3 rozdział dotyczy badań geotechnicznych i oceny podłoża oraz dokumentacji badań. Rozdział 4 zajmuje się kontrolą wykonawstwa i monitorowania konstrukcji podczas budowy i użytkowania. Pozostałe rozdziały (5–12) dotyczą projektowania różnych rodzajów konstrukcji i zabiegów z nimi związanych, takich jak: nasypy i wzmacnianie gruntu, odwodnienia, fundamenty bezpośrednie, palowe, kotwy, konstrukcje oporowe, oraz stateczności.

Kończącą część dokumentu stanowią załączniki, dzielące się na normatywne (A) i informacyjne (B–J). W załączniku A znajdują się wartości współczynników końcowych i korelacyjnych do stanów granicznych nośności. Dodatkowe zalecenia informacyjne w pozostałych załącznikach obejmują m.in.: zasady metod obliczeniowych, przykładowe określanie parcia gruntu na ściany oporowe, przykładowe metody określenia nośności podłoża fundamentów bezpośrednich oraz metody oceny osiadań, graniczne wartości odkształceń konstrukcji i przemieszczeń fundamentu.

Kategorie geotechniczne

Kategoria geotechniczna obiektu to, zgodnie z EN 1997-1:2008, kategoria zagrożenia bezpieczeństwa, wynikająca ze stopnia skomplikowania projektowanej konstrukcji, jej posadowienia i obciążeń oraz ze złożoności warunków geotechnicznych. Kategoria determinuje tryb i zakres badań podłoża, wymagania dotyczące projektowania oraz kontroli wykonawstwa i eksploatacji obiektu, konieczności monitorowania geotechnicznego itp.

Eurokod 7, cz. 1, p. 2.1, w ślad za Rozporządzeniem Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 24.09.1998 roku w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych, wyróżnia trzy kategorie:

- prostą (pierwsza kategoria geotechniczna): małe i proste budowle z pomijalnym ryzykiem dla życia i mienia,
- normalną (druga kategoria geotechniczna): typowe konstrukcje i przeciętne warunki gruntowe,
- skomplikowaną (trzecia kategoria geotechniczna): złożone budowle, zlokalizowane na terenach o skomplikowanych warunkach geotechnicznych, których budowa jest związana ze znaczącym ryzykiem dla życia i mienia.

Stany graniczne

Zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 projektowanie konstrukcji geotechnicznych obejmuje sprawdzenie stanów granicznych: nośności (ULS) oraz użyteczności (SLS). Eurokod 7 wyróżnia 5 stanów granicznych nośności [PN-EN 1997-1]:

- EQU: globalna utrata stateczności obiektu (w stanie tym wytrzymałość gruntu nie wpływa na nośność),
- STR: utrata nośności lub nadmierne odkształcenia konstrukcji lub jej elementów (np. wypiętrzenie gruntów w dnie wykopu), w którym na nośność znacząco wpływa wytrzymałość materiału konstrukcji,
- GEO: zniszczenia lub nadmierne odkształcenia podłoża, na przykład osuwisko naturalnego zbocza lub nasypu drogowego posadowionego na słabym gruncie,
- UPL: utrata równowagi budowli lub podłoża wskutek wyporu wody,
- HYD: zniszczenie spowodowane ciśnieniem spływowym, na przykład przebicie hydrauliczne w podłożu.

Do projektowania wykorzystywane są wartości charakterystyczne i obliczeniowe parametrów geotechnicznych.

CHARAKTERYSTYKA ZBIORNIKA WODNEGO NIELISZ

Lokalizacja

Zbiornik wodny Nielisz leży w województwie lubelskim, w powiecie zamojskim, w miejscowościach Nielisz i Kulików. Zlokalizowany jest w pobliżu drogi nr 837, na odcinku z Zamościa do Żółkiewki, w odległości 23 km na północ od Zamościa.

Pod względem geograficznym zbiornik Nielisz znajduje się w Kotlinie Zamojskiej, inaczej zwanej Padołem Zamojskim, który jest jednym z mezoregionów Wyżyny Lubelskiej. Jest to rozległe obniżenie ograniczone wyraźnymi krawędziami wzniesień: od północy Działami Grabowieckimi i Wyniosłością Giełczewską, a od południa garbu Roztocza. W poprzek tego regionu przepływa rzeka Wieprz, której dopływami są: rzeka Łabuńka we wschodniej części i rzeka Por w części zachodniej [Lechowicz i in. 1996, Mirecki i Kowalski 2007].

Dane techniczne

Zbiornik wodny Nielisz powstawał w latach 1994–1998. Składa się z dwóch części: zbiornika głównego na rzece Wieprz i zbiornika wstępnego na rzece Por. Zbiornik pełni następujące funkcje: redukuje fale powodziowe, wyrównuje przepływy niskie poniżej przekroju piętrzenia, a poza tym można go wykorzystywać pod względem rybackim i rekreacyjnym oraz energetycznym [Geoproblem 1992, Geoteko 1994, 1995, Ładniak 1996, Bortkiewicz i Szmagaj 1996].

Podstawowe parametry zbiornika:

– normalny poziom piętrzenia	NPP = 197,50 m n.p.m.
– maksymalny poziom piętrzenia	max PP = 198,50 m n.p.m.
– minimalny poziom piętrzenia	min PP = 195,00 m n.p.m.
– pojemność całkowita	$V_c = 19,48$ mln m ³
– pojemność użyteczna	$V_u = 14,77$ mln m ³
– pojemność martwa	$V_m = 4,71$ mln m ³
– powierzchnia zalewu przy NPP	$F_c = 888$ ha
– powierzchnia zalewu przy min PP	$F_m = 377$ ha
– powierzchnia odsłaniana	$F_o = 511$ ha

Zbiornik główny:

– normalny poziom piętrzenia	NPP = 197,50 m n.p.m.
– maksymalny poziom piętrzenia	max PP = 198,50 m n.p.m.
– minimalny poziom piętrzenia	min PP = 195,00 m n.p.m.
– pojemność całkowita	$V_c = 18,30$ mln m ³
– pojemność użyteczna	$V_u = 13,61$ mln m ³
– pojemność martwa	$V_m = 4,69$ mln m ³
– powierzchnia zalewu przy NPP	$F_c = 709$ ha
– powierzchnia zalewu przy min PP	$F_m = 377$ ha
– powierzchnia odsłaniana	$F_o = 332$ ha

Zbiornik wstępny na rzece Por

– normalny poziom piętrzenia	NPP = 197,95 m n.p.m.
– maksymalny poziom piętrzenia	max PP = 198,50 m n.p.m.
– minimalny poziom piętrzenia	min PP = 195,00 m n.p.m.
– pojemność całkowita	$V_c = 1,18$ mln m ³

Zapora czołowa i zapora zbiornika wstępnego

Nasyt zapory czołowej jest zbudowany z piasków drobnych o zapyleniu do 15% (p_n), zagęszczonych do wskaźnika zagęszczenia $I_s = 0,97$. Uszczelnieniem nasypu od strony wody górnej jest ekran z geomembrany PEHD, grubości 1,5 mm, łączony metodą zgrzewania. Ekran ten jest zakotwiony w koronie zapory, a w czaszy zbiornika przechodzi w fartuch kończący się w odległości 70 m od podnóża skarpy. Na ekranie wykonano półmetrową obsybkę z piasku zagęszczonego, która została przykryta geowłókniną i narzutem kamiennym z piaskowców kwarcytowych. Drenaż zapory wykonano za pomocą rowu podskarpowego o głębokości 2,0 m (dno rowu na rzędnej 192,50 m n.p.m.) wypełnionego do wysokości 1,0 m kamieniami z piaskowca kwarcytowego otoczonego geowłókniną. Od rowu co 30 m odchodzą poziome sączki wypełnione kamieniami frakcji 10–15 cm w geowłókninie. Sączki mają wyloty do rowu drenażowego o rzędnej dna 191,0 m n.p.m. przy wylocie do rzeki Wieprz. Naturalnym uszczelnieniem w podłożu nasypu są grunty słabo przepuszczalne gliniasto-pylaste, jednak tworzące nieciągłą warstwę, poprzedzielaną torfami i namułami pylastymi (rys. 1) [Geoproblem 1992, Geoteko 1994, 1995, Ładniak 1996, Bortkiewicz i Szmagaj 1996].



Rys. 1. Położenie zapory czołowej zbiornika Nielisz

Fig. 1. Location of main dam at Nielisz reservoir

METODYKA BADAŃ

Aparatura kontrolno-pomiarowa (AKP)

Zapora wraz z urządzeniami upustowymi zaliczona została, według klasyfikacji CUGW z 1973 roku, do III klasy ważności. Pomimo niskiej klasy ważności, która wynika z wysokości piętrzenia, zapora jest starannie monitorowana ze względu na posadowienie na odkształcalnym podłożu (grunty mineralne o niskich parametrach wytrzymałościowych oraz grunty organiczne) oraz ze względu na to, że w przekroju piętrzenia występują starorzecza i zastoiska.

W korpusie zapory czołowej zlokalizowano 12 poprzecznych przekrojów pomiarowych, a na przyczółkowych zboczach doliny – po dwa przekroje. We wszystkich przekrojach znajdują się po dwie wiązki piezometrów utworzone przez piezometry z ujęciem w korpusie zapory (tzw. płytkie) i w podłożu zapory (tzw. głębokie).

Oprócz piezometrów zainstalowano również repery: powierzchniowe, czyli metalowe głowice umieszczone w betonowych słupkach posadowionych na głębokości poniżej głębokości przemarzania (poniżej 1,0 m) oraz powierzchniowe z celownikiem, gdzie głowica trzpienia reperu wyposażona jest w kulkę łożyska i tarczę celowniczą, i osadzo-

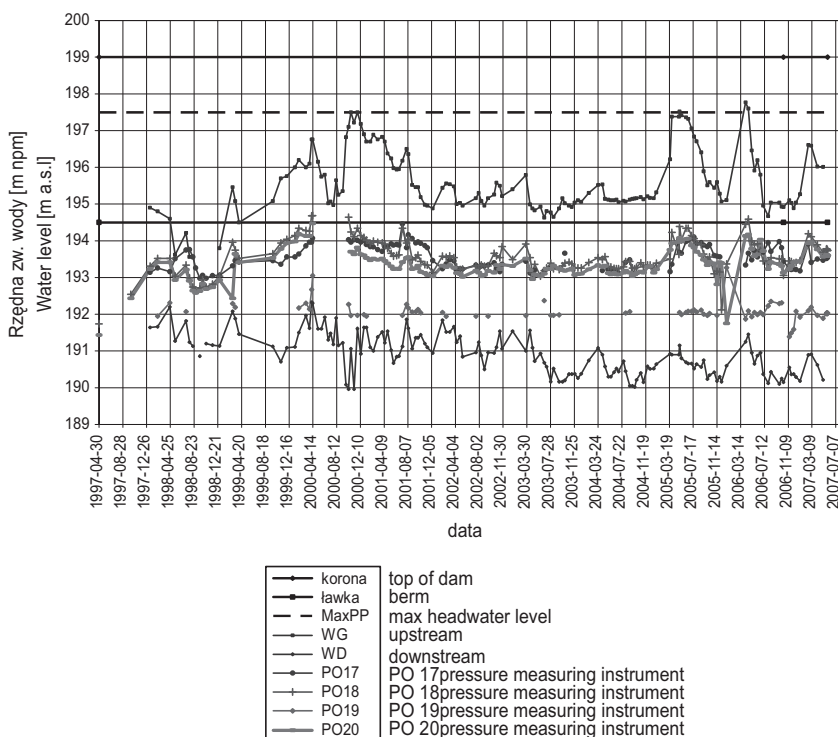
na w betonowych słupkach posadowionych poniżej 1,0 m [Geoproblem 1992, Geoteko 1994, 1995, Ładniak 1996, Bortkiewicz i Szmagaj 1996, Mirecki i Kowalski 2007].

Od czasu zainstalowania piezometrów w korpusie zapory (od 1997 roku) pomiarów zwierciadła wody dokonywano za pomocą tradycyjnej świstawki hydrogeologicznej. Obecnie prowadzi się pomiary przy użyciu gwizdka elektronicznego.

W okresie rozruchu pomiary zwierciadła wody w piezometrach wykonywane były według harmonogramu podanego w instrukcji pierwszego napełniania. Po przekazaniu zbiornika do eksploatacji pomiary AKP będą prowadzone według schematu normalnej eksploatacji zbiornika, to znaczy: poziom WG i WD raz na dobę o stałej porze dnia, piezometry raz na dwa tygodnie, repery raz na 3 miesiące, a repery z celownikiem co 6 miesięcy.

WYNIKI BADAŃ

W okresach specjalnych, jak przejście fali powodziowej, repery będą mierzone bezpośrednio po przejściu fali powodziowej, piezometry – raz na dobę, a poziom WG i WD – co najmniej dwa razy na dobę. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg położenia zwierciadła wody gruntowej w podłożu zapory w przekroju VI–VI (hm 4+50).



Rys. 2. Przebieg położenia zwierciadła wody gruntowej w podłożu zapory Nielisz w przekroju VI–VI (hm 4+50) [Mirecki i Kowalski 2007]

Fig. 2. The groundwater table in the subsoil of the Nielisz dam in cross section VI–VI (hm 4+50) [Mirecki i Kowalski 2007]

Obliczenia stateczności zapory ze względu na przebicie hydrauliczne

W sytuacji obliczeniowej zostanie sprawdzony stan graniczny związany z zagrożeniem wyparciem hydraulicznym (HYD). Rozpatrując stan graniczny zniszczenia gruntu wywołanego ciśnieniem spływowym (HYD) [EN 1997-1:2008, rozdział 10.3], należy wykazać w każdym znaczącym profilu gruntu, że wartość obliczeniowa siły ciśnienia spływowego ($S_{dst,d}$) w słupie gruntu jest mniejsza lub równa ciężarowi tego słupa z uwzględnieniem wyporu ($W'_{stb,d}$) [PN-EN 1997-1:2008]:

$$S_{dst,d} \leq W'_{stb,d} \quad (1)$$

Podczas obliczeń wykorzystuje się wartości odpowiednich współczynników częściowych:

$\gamma_{G,dst} = 1,35$ – oddziaływanie stałe, destabilizujące,

$\gamma_{G,stb} = 0,90$ – oddziaływanie stałe, stabilizujące,

$\gamma_{Q,dst} = 1,50$ – oddziaływanie zmienne, destabilizujące.

Tradycyjny sposób obliczania współczynnika bezpieczeństwa (F), opracowany przez Terzaghiego i Pecka, daje duże wartości, co zwiększa bezpieczeństwo. Wystarczające dla bezpieczeństwa jest otrzymanie współczynnika $F > 2$. Niektórzy badacze twierdzą, że należy przyjmować wartość $F > 4$. Zalecane wartości współczynnika F to 1,5–4,0.

Obliczenia przeprowadzono, przyjmując następujące założenia:

- słup wody działającej podczas normalnego poziomu piętrzenia NPP jest różnicą między tym poziomem (197,50 m n.p.m.) a średnią rzędną u podnóża skarpy od WD (194,0 m n.p.m.): $H = 3,50$ m, $\gamma_w = 9,81$ kN·m⁻³,
- średnią wysokość nasypu w przekroju hm 4+50 przyjęto jako równą różnicy rzędnej korony zapory (199,00 m n.p.m.) i rzędnej stropu podłoża rodzimego (192,50 m n.p.m.): $D_1 = 6,50$ m,
- gęstość objętościową gruntu korpusu zapory przyjęto jak dla zagęszczonych piasków średnich: $\gamma_k = 19,0$ kN·m⁻³,
- miąższość warstwy szczelnej przyjęto jako równą różnicy rzędnych 192,50 m n.p.m. i 188,50 m n.p.m.: $D_2 = 4,0$ m,
- gęstość objętościową warstwy nieprzepuszczalnej przyjęto jako gęstość namułu organicznego: $\gamma_p = 15,0$ kN·m⁻³.

Oddziaływania

Średnia wysokość ciśnienia słupa wody u podstawy gruntu – aby ocenić wysokość ciśnienia słupa wody, należy przyjąć przybliżone założenie, że połowa całkowitej wartości ciśnienia słupa wody jest tracona:

$$h_a = \frac{H}{2} = \frac{3,5 \text{ m}}{2} = 1,75 \text{ m}$$

Średni gradient hydrauliczny wzdłuż kolumny gruntu:

$$i_k = \frac{h_a}{D} = \frac{1,75 \text{ m}}{10,5 \text{ m}} = 0,167$$

$$D = D_1 + D_2 = 6,5 \text{ m} + 4,0 \text{ m} = 10,5 \text{ m}$$

Początkowe ciśnienie wody w porach gruntu:

$$u_0 = \gamma_w \cdot D = 9,81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 10,5 \text{ m} = 103,0 \text{ kPa}$$

Przyrost ciśnienia wody w porach:

$$\Delta u = \gamma_w \cdot h_a = 9,81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 1,75 \text{ m} = 17,17 \text{ kPa}$$

Całkowite ciśnienie wody w porach:

$$u = u_0 + \Delta u = 103,0 \text{ kPa} + 17,17 \text{ kPa} = 120,17 \text{ kPa}$$

Całkowite naprężenie pionowe:

$$\sigma_v = \gamma_k \cdot D_1 + \gamma_p \cdot D_2 = 19 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 6,5 \text{ m} + 15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 4,0 \text{ m} = 183,5 \text{ kPa}$$

Efektywne naprężenie pionowe:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u_0 = 183,50 \text{ kPa} - 103,0 \text{ kPa} = 80,5 \text{ kPa}$$

Ciężar gruntu tworzącego kolumnę gruntową:

$$\begin{aligned} W_k &= \gamma_k \cdot D_1 + \gamma_p \cdot D_2 = 19 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 6,5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} + 15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 4,0 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = \\ &= 183,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

Ciężar gruntu z uwzględnieniem wyporu:

$$\begin{aligned} W'_k &= (\gamma_k - \gamma_w) \cdot D_1 + (\gamma_p - \gamma_w) \cdot D_2 = (19 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} - 9,81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot 6,5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} + \\ &+ (15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} - 9,81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot 4,0 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} = 80,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

Siła filtracji (wartość charakterystyczna):

$$S_k = \gamma_w \cdot i_k \cdot D = 9,81 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 0,167 \cdot 10,5 \text{ m} = 17,17 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

Efekt oddziaływań

Obliczenie stopnia stabilizacji z wykorzystaniem obliczonej wartości siły filtracji (S_k) i ciężaru gruntu z uwzględnieniem wyporu (W'_k):

- obliczenie wartości siły destabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,dst} = \gamma_{G,dst} \cdot S_k = 1,35 \cdot 17,17 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 23,18 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- obliczenie wartości siły stabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,stab} = \gamma_{G,stab} \cdot W'_k = 0,90 \cdot 80,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 72,45 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- stopień wykorzystania

$$\Lambda_{HYD} = \frac{E_{d,dst}}{E_{d,stab}} \cdot 100\% = \frac{23,18}{74,45} \cdot 100\% = 32,0\%$$

Wyniki obliczeń sprawdzających stan graniczny są nie do przyjęcia, jeżeli

$$\Lambda_{HYD} > 100\%$$

Obliczenie stopnia stabilizacji z wykorzystaniem obliczonej wartości ciśnienia wody w porach (u) i całkowitego naprężenia pionowego (σ_v):

- obliczenie wartości siły destabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,dst} = \gamma_{G,dst} \cdot u = 1,35 \cdot 120,17 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 162,23 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- obliczenie wartości siły stabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,stab} = \gamma_{G,stab} \cdot \sigma_v = 0,90 \cdot 183,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 165,15 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- stopień wykorzystania

$$\Lambda_{HYD} = \frac{E_{d,dst}}{E_{d,stab}} \cdot 100\% = \frac{162,23}{165,15} \cdot 100\% = 98,2\%$$

Obliczenie stopnia stabilizacji z wykorzystaniem obliczonej wartości przyrostu ciśnienia wody w porach (Δu) i efektywnego naprężenia pionowego (σ'_v):

- obliczenie wartości siły destabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,dst} = \gamma_{G,dst} \cdot \Delta u = 1,35 \cdot 17,17 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 23,18 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- obliczenie wartości siły stabilizującej (wartość obliczeniowa)

$$E_{d,stab} = \gamma_{G,stab} \cdot \sigma'_v = 0,90 \cdot 80,50 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1} = 72,45 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

- stopień wykorzystania

$$\Lambda_{\text{HYD}} = \frac{E_{d,dst}}{E_{d,stab}} \cdot 100\% = \frac{23,18}{74,45} \cdot 100\% = 32,0\%$$

Sposób obliczenia współczynnika bezpieczeństwa podany przez Terzaghiego i Pecka:

$$F = \frac{W'_k}{S_k} = \frac{80,50}{17,17} = 4,69$$

Wyniki obliczeń są nie do przyjęcia, kiedy wartość współczynnika $F < 1,5-2,0$.

Obliczenia stateczności ogólnej zapory przy różnych poziomach piętrzenia i analiza otrzymanych wyników

Obecnie w analizie stateczności stosuje się programy numeryczne, które obliczają współczynnik ogólnej stateczności (F) jako stosunek oddziaływań stanowiących opory przed utratą stateczności (R) i oddziaływań prowadzących do niestateczności konstrukcji (E), tzn. $F = \frac{R}{E}$. Stateczność ogólna zapory może być sprawdzona za pomocą

współczynnika F i współczynnika pomocniczego $ODF = \frac{F}{\gamma_G \cdot \gamma_{Rc}}$, gdzie γ_G i γ_{Rc} są współczynnikami częściowymi odpowiednio trwale działających niekorzystnych oddziaływań oraz oporów dla skarp i ogólnej stateczności.

Zalecane wartości współczynników częściowych to:

- $\gamma_G = 1,35$ w podejściach DA1 (kombinacja 1) i DA2,
- $\gamma_G = 1,00$ w podejściach DA1 (kombinacja 2) i DA3,
- $\gamma_{Rc} = 1,00$ w podejściach DA1 i DA3,
- $\gamma_{Rc} = 1,10$ w podejściu DA2.

Przy uwzględnieniu zalecanych współczynników częściowych współczynnik pomocniczy (ODF) można wyrazić w stosunku do współczynnika ogólnej stateczności (F) następująco:

- w podejściu DA2: $ODF = \frac{F}{1,35 \cdot 1,10} = \frac{F}{1,485}$ (2)

- w podejściach DA3 i DA1 (kombinacja 2): $ODF = F$ (3)

- w podejściu DA1 (kombinacja 1): $ODF = \frac{F}{1,35}$ (4)

W bardziej zaawansowanych analizach stateczności, np. metodą elementów skończonych (MES), współczynniki stateczności (F) i pomocniczy (ODF) obliczane są zwykle za pomocą redukcji wytrzymałości na ścinanie (τ_{fu}) lub redukcji parametrów φ_u i c_u .

Warunki i zasady analizy stateczności podane są w normie PN-EN 1997-1 za pomocą równań:

$$E_d \leq R_d \quad \text{lub} \quad ODF = 1 \quad (5)$$

gdzie: E_d – wartość obliczeniowa wpływu oddziaływań powodujących utratę stateczności,

R_d – wartość obliczeniowa odpowiadających im oporów.

Prowadzą one do wartości współczynników stateczności ogólnej bezpieczniejszych lub identycznych jak w metodach dotychczas stosowanych (np. zakładających cylindryczną powierzchnię poślizgu), zależnie od przyjętych podejść obliczeniowych [Frank i in. 2004]:

- podejścia DA1 (kombinacja 2) i DA3
 $OFS = \gamma_M = 1,25$ (analiza w naprężeniach efektywnych)
 $OFS = \gamma_M = 1,40$ (analiza w naprężeniach całkowitych)
- podejście DA1 (kombinacja 1)
 $OFS = \gamma_G = 1,35$
- podejście DA2
 $OFS = \gamma_G \cdot \gamma_{Re} = 1,35 \cdot 1,10 = 1,485$

gdzie: OFS – współczynnik stateczności z metody tradycyjnej.

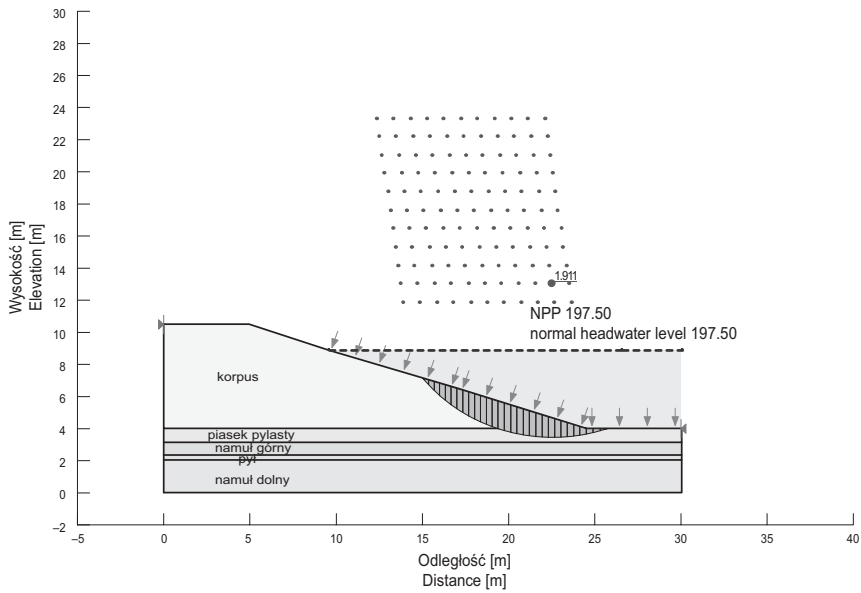
Obliczenia stateczności ogólnej zapory wykonano przy użyciu programu SLOPE/W kanadyjskiej firmy GEO-SLOPE. Stateczność policzono w trzech przypadkach:

- przy minimalnym poziomie piętrzenia (195,00 m n.p.m.),
- przy normalnym poziomie piętrzenia (197,50 m n.p.m.),
- przy maksymalnym poziomie piętrzenia (198,50 m n.p.m.).

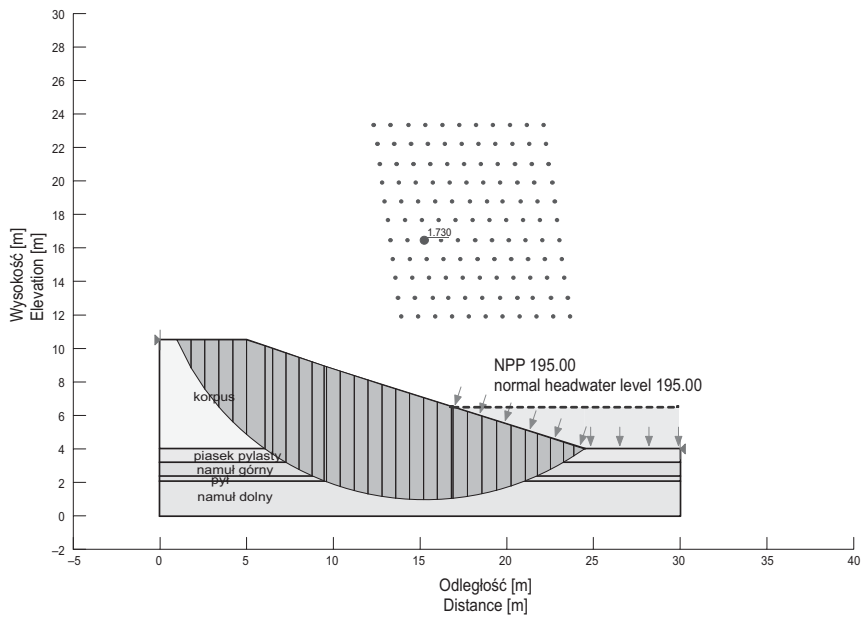
Do obliczeń przyjęto średnie wartości parametrów geotechnicznych:

- dla korpusu zapory
 $\gamma = 19 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\varphi_u = 33^\circ$, $C_u = 0$
- dla podłoża zapory
 $\gamma = 17,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\varphi_u = 26^\circ$, $C_u = 0$ (piasek pylasty)
 $\gamma = 15,0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\varphi_u = 5^\circ$, $C_u = 15 \text{ kPa}$ (namuł górny)
 $\gamma = 15,0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\varphi_u = 5^\circ$, $C_u = 21 \text{ kPa}$ (pył)
 $\gamma = 15,0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\varphi_u = 5^\circ$, $C_u = 17 \text{ kPa}$ (namuł dolny)

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys. 3. Stateczność zapory w Nieliszu przy NPP (197,50 m n.p.m.)
 Fig. 3. The stability of the Nielisz dam at reservoir level (197.50 m)



Rys. 4. Stateczność zapory w Nieliszu przy min PP (195,00 m n.p.m.)
 Fig. 4. The stability of the Nielisz dam at reservoir level (195.00 m)

Stateczność policzono czterema metodami: Felleniusa, Bishopa, Janbu i Morgensterna-Price'a.

Obliczenia stateczności przy normalnym poziomie piętrzenia (197,50 m n.p.m.) – minimalne współczynniki stateczności (F): metoda Morgensterna-Price'a $F = 1,911$, metoda Bishopa $F = 1,926$, metoda Janbu $F = 1,802$, metoda Felleniusa $F = 0,776$.

Obliczenia stateczności przy minimalnym poziomie piętrzenia (195,00 m n.p.m.) – minimalne współczynniki stateczności (F): metoda Morgensterna-Price'a $F = 1,730$, metoda Bishopa $F = 1,773$, metoda Janbu $F = 1,563$, metoda Felleniusa $F = 1,470$.

Wyniki obliczeń współczynnika stateczności (F) dla każdego poziomu piętrzenia wody w zaporze podsumowano w tabeli 1. Uwzględniono w niej również wartości współczynnika pomocniczego (ODF) według Eurokodu 7 obliczanego ze wzorów (2), (3) i (4).

Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń współczynnika stateczności

Table 1. Comparison of the results of safety factor calculations

Metoda obliczeń Calculation method	Według SLOPE/W By SLOPE/W			Według EC7 By EC7					
	współczynnik stateczności F factor of safety F			współczynnik pomocniczy ODF over-design factor ODF					
	max PP	NPP	min PP	max PP		NPP		min PP	
				DA1 i DA3	DA2	DA1 i DA3	DA2	DA1 i DA3	DA2
Morgenstern-Price	1,95	1,91	1,73	1,44	1,31	1,42	1,29	1,28	1,17
Bishop	1,96	1,93	1,77	1,45	1,32	1,43	1,30	1,31	1,19
Janbu	1,84	1,80	1,56	1,36	1,24	1,34	1,21	1,16	1,05

PODSUMOWANIE

Stateczność zapory w Nieliszu ze względu na przebicie hydrauliczne jest zachowana. Współczynnik bezpieczeństwa $F = 4,69$ przekracza wymaganą wartość ($F > 1,5-2,0$) dosyć znacznie.

Zapora jest stateczna, gdy współczynnik $F > 1$. Z obliczeń wynika, że nawet po uwzględnieniu współczynników częściowych γ_G i γ_{Rc} stateczność zapory jest zachowana przy każdym poziomie piętrzenia, każdą metodą, oprócz metody szwedzkiej, której wartości znacznie odbiegają od wartości obliczonych trzema pozostałymi metodami (tab. 1). Największe wartości współczynników F daje metoda Bishopa, najmniejsze zaś metoda Janbu (wykluczając metodę szwedzką). Wartości współczynników maleją wraz z obniżaniem poziomu piętrzenia wody. Największą wartość współczynnika bezpieczeństwa (F) odnotowano przy maksymalnym poziomie piętrzenia. Mniejsza wartość tego współczynnika przy normalnym i minimalnym poziomie piętrzenia jest zapewne spowodowana tym, że zmniejszona jest wartość siły utrzymującej od parcia wody.

PIŚMIENNICTWO

- Bortkiewicz A., Szmągaj J., 1996. Zbiornik Nielisz. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”, Warszawa, 291–302.
- Frank R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvas M., Krebs Ovesen N., Orr T., Schuppener B., 2004. Designers' Guide to EN 1997-1, Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. Thomas Telford, London.
- Geoproblem 1992. Dokumentacja geologiczno-inżynierska do PT budowy zapory ziemnej stopnia Nielisz w Nieliszu. Etap II. Zamość.
- Geoteko 1994. Badania geotechniczne w celu określenia warunków umożliwiających przyspieszenie realizacji zapory czołowej zbiornika wodnego Nielisz. Wesola k. Warszawy.
- Geoteko 1995. Okresowe badania geotechniczne przed rozpoczęciem realizacji II etapu budowy zapory czołowej zbiornika wodnego Nielisz. Wesola k. Warszawy.
- Lechowicz Z., Mirecki J., Wolski W., 1996. Zbiornik Nielisz. Etapowa budowa zapory. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”. Warszawa, 303–314.
- Ładniak H., 1996. Zbiornik Nielisz. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”. Warszawa, 363–368.
- Mirecki J., Kowalski M., 2007. Dokumentacja „Analiza i ocena wyników pomiarów AKP zbiornika Nielisz w okresie przeprowadzania rozruchu”. Geoteko, Warszawa.
- PN-EN 1997-1 Eurokod 7: Projektowanie Geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z 24 września 1998 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadawiania obiektów budowlanych. Dz.U. nr 126, poz. 839.
- Sierant M., Tchórz T., 1996. Zbiornik Nielisz. Problemy realizacji inwestycji. Konferencja Naukowa „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”. Warszawa, 369–374.

ASSESSMENT OF EMBANKMENT STABILITY BY GEOTECHNICAL SOUNDINGS BASED ON EUROCODE 7

Abstract. This paper presents the characteristics of the Nielisz dam, a comparison of geotechnical parameters of the embankment subsoil by Larsson and Marchetti and calculated conditions: stability of the dam due to hydraulic conditions (HYD) according to Eurocode 7 and the overall stability of the embankment at different water levels in the reservoir using Slope/W (the Geo-slope program).

Key words: slope stability, Eurocode 7

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 17.12.2012