POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

OPINIA TECHNICZNA

dotycząca aktualnej stateczności przyczółków Mostu Siennickiego oraz możliwości spowolnienia lub zatrzymania procesu ich przemieszczania się w kierunku rzeki
w ramach umowy pt.
Usługi doradcze w zakresie badań w celu opracowania rozwiązań technicznych
w zakresie spowolnienia przemieszczania się przyczółków Mostu Siennickiego w kierunku rzeki Martwej Wisły.
Umowa Nr WILIŚ/2/BZ/002/2025 z 27.01.2025

ZLECENIODAWCA: **Gmina Miasto Gdańsk**
Dyrekcja Rozbudowy Miasta Gdańska z siedzibą w Gdańsku, 80-560 Gdańsk, ul. Żaglowa 11.

JEDNOSTKA WYKONUJĄCA: **Politechnika Gdańska**
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Konstrukcji Inżynierskich
Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej
ul. Narutowicz 11/12, 80-233 Gdańsk

ZESPÓŁ AUTORSKI:

dr hab. inż. Marcin Cudny, prof. PG
Certyfikat Polskiego Komitetu Geotechniki nr 203/2007

mgr inż. Katarzyna Lisewska

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG – prowadzący zadanie
upr. bud. nr 5506/Gd/93 w spec.: konstrukcje budowlane w zakresie mostów
upr. bud. nr POM/0135/POOK/11 do proj. w spec.: konstrukcyjno-budowlanej bez ograniczeń
Rzeczoznawca bud. – projektowanie w zakresie mostów RZE/X/0009/12

Gdańsk, 24.03.2025

Spis treści

1. PODSTAWA OPRACOWANIA 3
2. CEL OPRACOWANIA 3
3. DOTYCHCZASOWE PRACE I WNIOSKI 3
3.1 Rys historyczny 3
3.2 Most Siennicki – stan atualny 5
4. BADANIA POPRZEDZAJĄCE ANALIZĘ 12
4.1 Badania geotechniczne 12
4.2 Inspekcja podwodna pali 13
5. NUMERYCZNA ANALIZA PRZYCZÓŁKÓW 13
5.1 Założenia 13
5.2 Model przyczółka zachodniego 17
5.3 Model przyczółka wschodniego 20
5.4 Wyniki obliczeń 20
6. WNIOSKI 24
MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE 25

1. PODSTAWA OPRACOWANIA

Podstawą opracowania jest umowa z Gminą Miasta Gdańska z siedzibą w Gdańsku, 80-803 Gdańsk, ul. Nowe Ogrody 8/12 NIP 583-00-11-969 - Dyrekcją Rozbudowy Miasta Gdańska z siedzibą w Gdańsku, 80-560 Gdańsk, ul. Żaglowa 11.

2. CEL OPRACOWANIA

Celem opracowania jest rozpoznanie możliwości technicznych spowolnienia lub zatrzymania procesu przemieszczania się przyczółków Mostu Siennickiego w kierunku rzeki

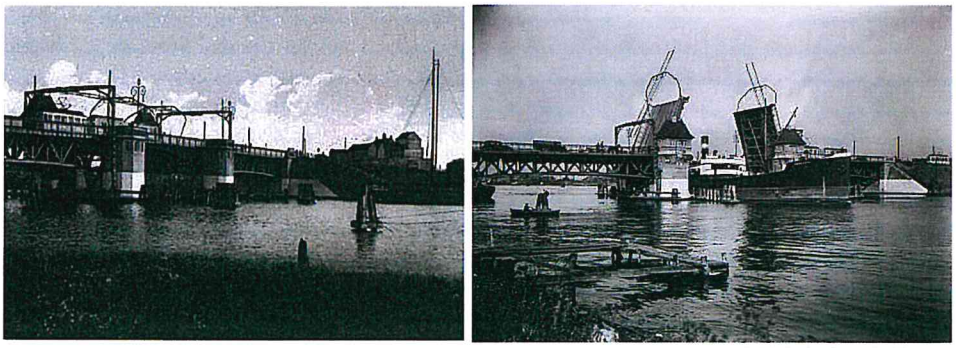
3. DOTYCHCZASOWE PRACE I WNIOSKI

3.1 Rys historyczny

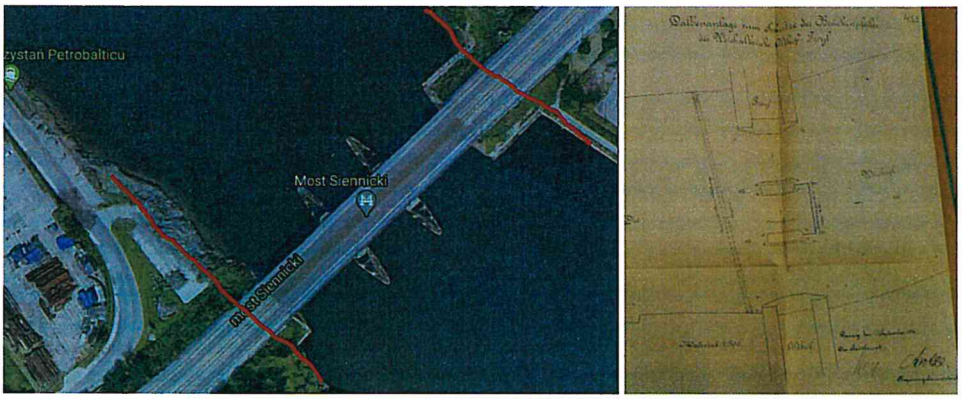
Most Siennicki został zbudowany w 1912 roku. Przeprawa składała się z kratownicowych przęseł skrajnych i zwodzonego przęsła nawigacyjnego (rys. 1). Na moście odbywał się ruch kołowy i tramwajowy. Historycznie przedmiotowa przeprawa składała się z dwóch części. Część brzegową wykonano jako klasyczne przęsła o konstrukcji kratownicowej z jazdą górą. Część środkową stanowiło stalowe przęsło zwodzone składające się z dwóch symetrycznych konstrukcji klapowych z przeciwwagą (rys. 1). Cała przeprawa liczyła około 95 m. Istotne dla oceny przyczółków jest ich umiejscowienie w planie. Niefortunnie postanowiono skrócić most zawężając rzekę w miejscu przeprawy (rys. 2). W rezultacie zbudowano przyczółki w sposób podobny do konstrukcji nabrzeża (rys. 3). Konstrukcja posadowienia znajduje się w obrębie koryta rzeki i przewiduje przejęcie obciążenia z nasypu i przyczółka przez ruszt palowy (rys. 3).

Nasyp nad częścią lądową posadowiono bezpośrednio. Część nadwodną nasypu oraz oddziaływanie poziome na przyczółek pochodzące od nasypu w części lądowej prawdopodobnie przejmowała ścianka szczelna zakotwiona do kozła palowego. Geotechniczne warunki posadowienia są złożone i niekorzystne ze względu na obecność gruntów organicznych oraz iłów plastycznych przewarstwionych piaskami. Warunki geotechniczne opisano szczegółowo w [1, 2, 10].

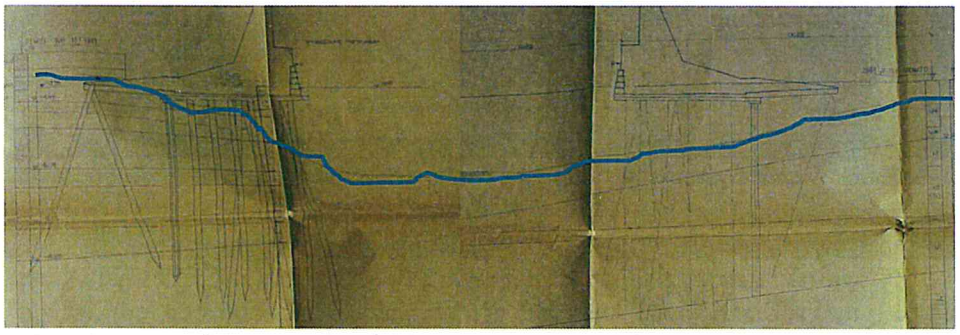
Poziom swobodnego zwierciadła wody gruntowej jest zmienny i zależy od wahań poziomu wody w rzece. Należy podkreślić, że przedstawiony na rys. 3 schemat palowania nie jest dokumentem oryginalnym i został technicznie potwierdzony jedynie w zakresie pierwszego rzędu pali od strony rzeki (ekspertyza nurkowa z 1984 roku oraz aktualna [11]). Nie natrafiono na oryginalne materiały archiwalne dokumentujące rzeczywisty schemat palowania.



Rys. 1. Historyczne zdjęcie Mostu Siennickiego. Widok na stronę zachodnią i poniżej na wschodnią [Domena Publiczna/Gedanopedia]

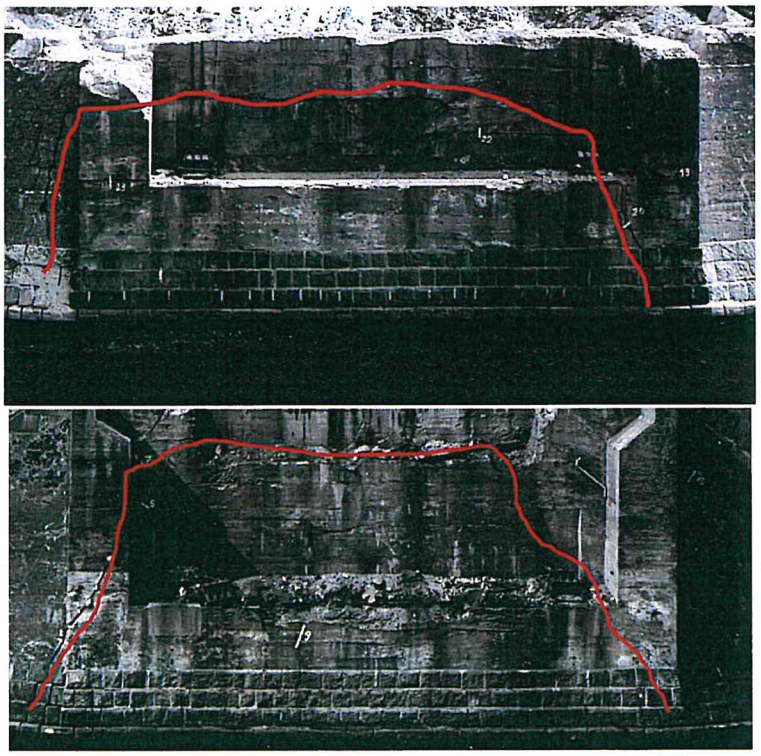


Rys. 2. Most Siennicki w planie z zaznaczoną linią brzegową rzeki (mapa google, szkic z archiwum państwowego w Gdańsku)



Rys. 3. Przyczółki Mostu Siennickiego z zaznaczoną linią dna rzeki Martwej Wisły (zasoby ZDiZ Gdańsk)

W marcu 1945 roku Niemcy próbowali wysadzić przęsła mostu i uszkodzili je na tyle skutecznie, że pomimo prób nigdy ich nie odbudowano. Wykonano wzmocnienie z wykorzystaniem tymczasowych podpór i mostu składanego Bayleya. Tak prowizorycznie wzmocnione przęsła funkcjonowały do 1986 roku. Bardzo prawdopodobne, że podczas wysadzania powstały pęknięcia na konstrukcjach przyczółków, pokazane na rys. 4 (istniejące do dzisiaj).



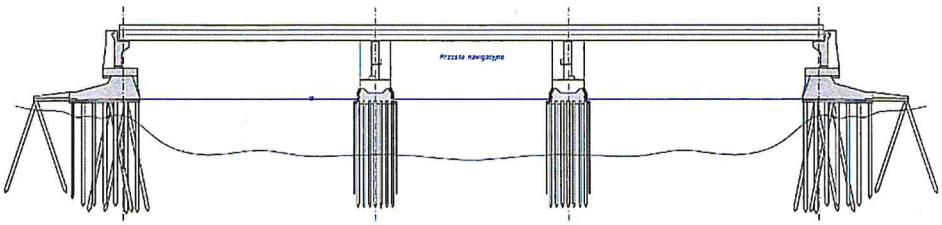
Rys. 4. Historyczne zdjęcia przyczółków (zachodni i poniżej wschodni) z zaznaczoną linią głównego pęknięcia. (źródło ZDiZ Gdańsk)

W roku 1984 podjęto prace nad budową nowych przęseł. Projekt wykonało BPBK w Gdańsku [1]. Założono w nim wykorzystanie istniejących przyczółków pomimo wątpliwości wskazywanych w [2]. Zastrzeżenia budziła stateczność przyczółków posadowionych na palach drewnianych. Ostatecznie zdemontowano stare przęsła i przystąpiono do oceny podpór pod kątem budowy nowych przęseł. Wyrażano zastrzeżenia co do stanu technicznego przyczółków biorąc pod uwagę fakt, iż pale w dużej części fundamentów przyczółków znajdują się w obszarze zmienności zwierciadła wody gruntowej i mogą podlegać erozji biologicznej. **Zakładano w tym czasie, że przebudowany most będzie mógł być użytkowany maksymalnie około 20 lat** i pomimo przytoczonych wątpliwości przystąpiono do budowy nowych przęseł z wykorzystaniem istniejących podpór. **Nie wykonano żadnych zabiegów wzmacniających posadowienie**. Przyczółki były mocno popękane. Charakter i przebieg pęknięć wskazywał jednoznacznie na nierównomierne osiadanie korpusów przyczółków w stosunku do ich skrzydeł (rys. 4).

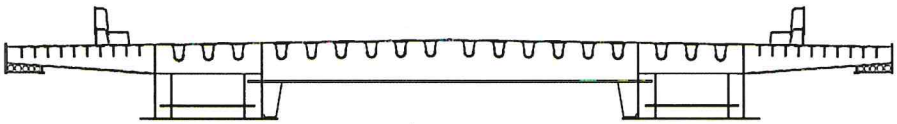
3.2 Most Siennicki – stan atualny

W związku z przebudową ul. Siennickiej podwyższono niweletę na przeprawie. Skutkowało to dodaniem około 2 m nasypu (w obudowie z murów oporowych)

i tym samym poważnym dociążeniem podstawy konstrukcji ziemnej posadowionej pośrednio na drewnianym ruszcie palowym (rys. 5). Wykorzystano istniejące przyczółki i filary przebudowując jedynie ich głowice. Nie wykonano żadnych prac wzmacniających podłoże gruntowe obciążone podwyższonym nasypem. Nowe przęsła mostu charakteryzują się jednakowym przekrojem poprzeczny na całej ich długości (rys. 6). Pomost stanowi stalowa płyta ortotropowa o grubości 18 mm wraz z żebrami zamkniętymi pod jezdnią i otwartymi pod chodnikami. Dźwigary główne wykonano w postaci skrzynek stalowych o grubości półki dolnej 26 mm oraz grubości środników 18 mm. Wysokość skrzynki wynosi ok. 1,4 m a szerokość ok. 2,1 m. Poprzecznice wykonano jako blachownicowe dwuteowniki o wysokości ok. 1,7 m. Dokładne wymiary poszczególnych blach i ich grubości są zawarte w projekcie przęseł [1, 3], który jest zachowany w dobrym stanie.

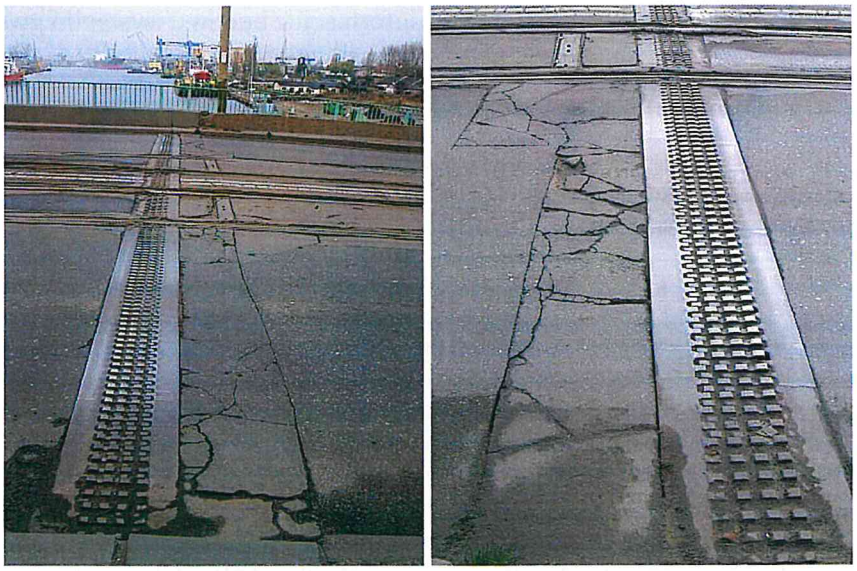


Rys. 5. Przekrój podłużny mostu Siennickiego z domniemanym układem pali drewnianych [1]



Rys. 6. Przekrój poprzeczny przęsła mostu Siennickiego [1]

W roku 1989 oddano przebudowany Most Siennicki do użytkowania. Już wtedy przyczółki zaczęły się przemieszczać w kierunku rzeki. Świadczą o tym zdjęcia zakleszczonych dylatacji (rys. 7). Można przypuszczać, że przyczółki utrzymały stateczność dzięki zaparciu się górą o przęsło mostu. Nie dotyczy to jednak dolnej części fundamentów przyczółków, które cały czas przemieszczają się w kierunku rzeki zwiększając zginanie rusztu palowego, który nie był pierwotnie projektowany na tego rodzaju obciążenie.



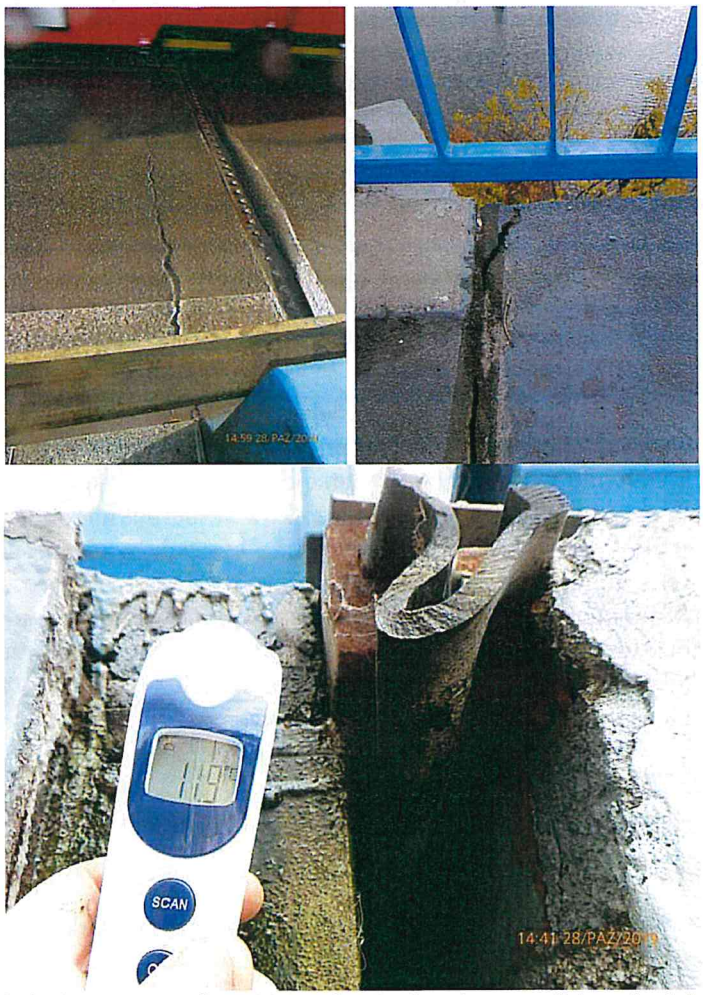
Rys. 7. Pierwotna dylatacja na moście (materiały archiwalne ZDiZ Gdańsk). Widoczne całkowite zakleszczenie przy temperaturze powietrza poniżej 10°C (12.11.2004)

W roku 2015 wykonano remont nawierzchni na moście [3]. Elementem prac była wymiana nawierzchni. Nie przeprowadzono wówczas krytycznej oceny sytuacji i rozebrano zakleszczone dylatacje wraz ze ściankami żwirowymi, umożliwiając tym samym dalszy ruch przyczółków w kierunku rzeki. Cztery lata po wykonaniu nowych dylatacji zlecono ocenę sytuacji z uwagi na ich zły stan [4]. W ocenie tej ujawniono i opisano przyczyny nieprawidłowości. W tym czasie stwierdzono na podstawie pomiarów, że sumaryczne przemieszczenia przyczółków od 1988 roku wynoszą ok. 160 do 180 mm w kierunku rzeki i sytuacja nie wygląda na ustabilizowaną. Przebieg deformacji w czasie można przedstawić w następującym chronologicznym ciągu wydarzeń:

- 1912 – budowa mostu;
- 1912 – 1945 brak informacji o kłopotach z przyczółkami;
- 1945 – uszkodzenie przęseł przez saperów niemieckich;
- 1947 – 1986 funkcjonowanie tymczasowej przeprawy. Brak informacji o ruchach przyczółków;
- 1989 – oddanie do użytku nowego mostu. Dociążenie stref przyczółkowych przez dodanie 2 m dodatkowego nasypu (naziomu);
- 2004 – dylatacje na moście są zakleszczone. Można oszacować przemieszczenie przyczółków na ~50 mm w kierunku rzeki. Nie wiadomo, kiedy nastąpiło zakleszczenie dylatacji;
- 2015 – remont nawierzchni i uwolnienie zakleszczonych przyczółków. Można oszacować, że w tym czasie przyczółki po uwolnieniu przesunęły

się w kierunku rzeki o ~80 mm (wg informacji z budowy wystąpiło gwałtowne uwolnienie naprężeń, potwierdzone hukiem);

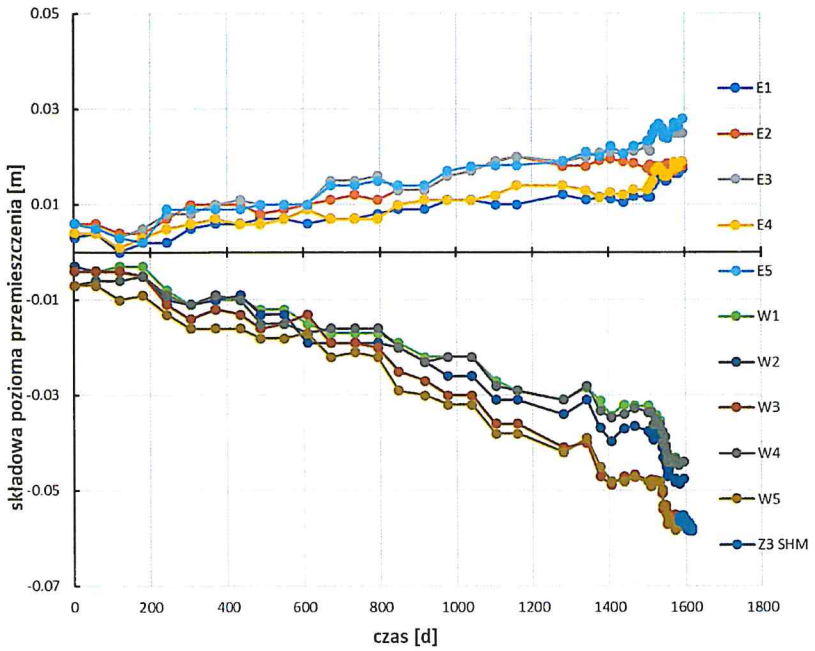
- 2015 – Montaż nowej dylatacji;
- 2019 – Stwierdzono zakleszczenie nowych dylatacji (rys. 8). Można oszacować, że w tym czasie przyczółki przesunęły się w kierunku rzeki o dodatkowe ~40 mm;



Rys. 8. Pęknięcia po remoncie w 2015 roku. Po lewej przyczółek zachodni. Po prawej przyczółek wschodni. Poniżej zakleszczone urządzenie dylatacyjne przy temperaturze 11.9°C

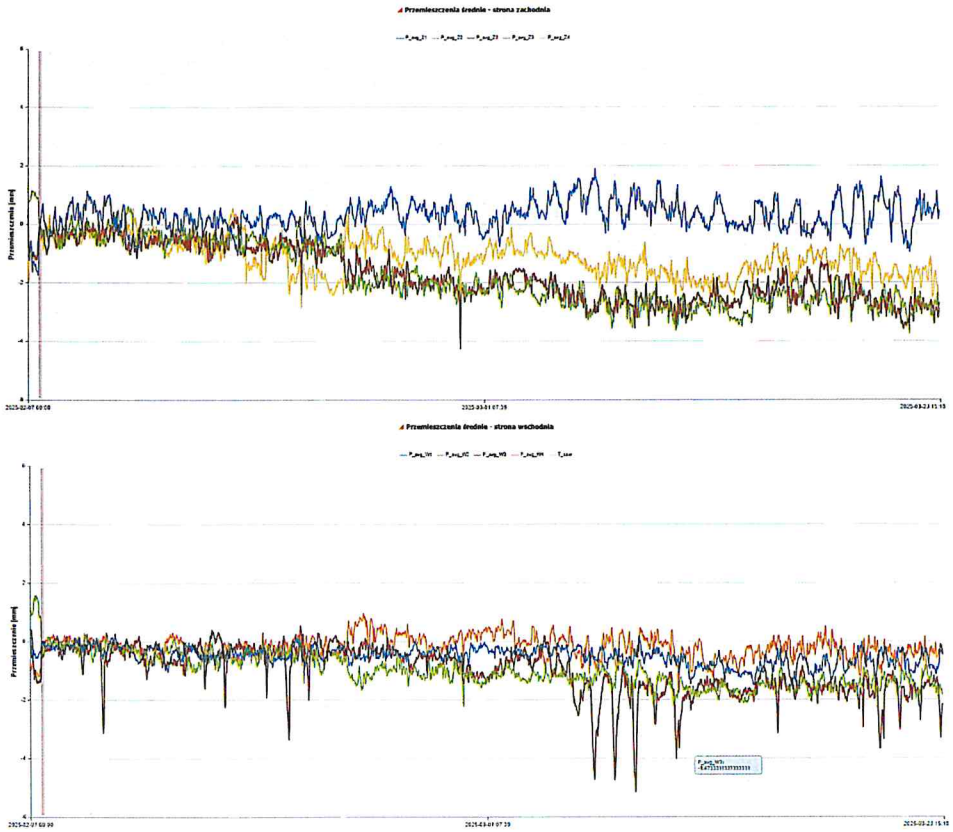
Sumaryczne przemieszczenie przyczółków w kierunku rzeki określono na podstawie pomiarów przesunięć punktów podparcia łożysk (rys. 9). Wynosiły one ok. 180 mm w kierunku rzeki na dzień 28.10.2019. Od tego czasu prowadzony jest monitoring geodezyjny położenia przyczółków, który wykazuje dalsze ich przemieszczanie się.

Rys. 9. Łożysko na przyczółku od strony Gdańska – górna woda. Przesunięcie przyczółka w stronę wody na łożysku wynosi ~182 mm



Rys. 10. Wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych na kierunku osi podłużnej mostu prowadzone od października 2020 – ostatni pomiar – 4.03.2025.

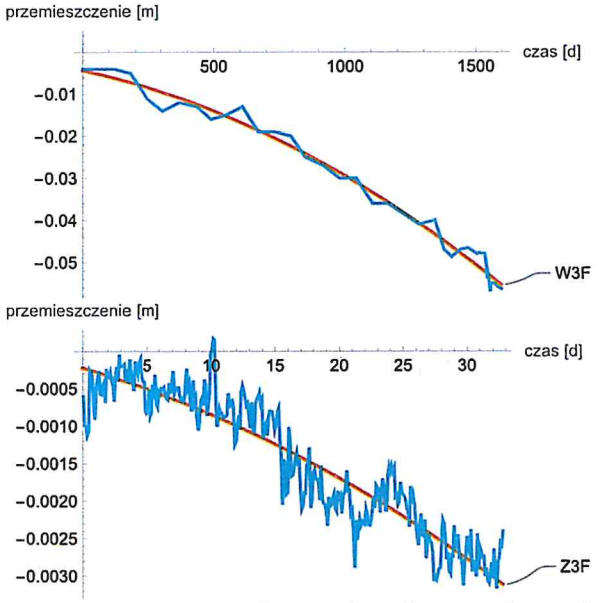
W roku 2020 zalecono zainstalowanie na przyczółkach reperów i prowadzenie obserwacji ruchów konstrukcji. Prowadzono pomiary geodezyjne co miesiąc. W roku 2024 zwiększono częstotliwość pomiarów z uwagi na wyraźną tendencję w przemieszczaniu się przyczółków do rzeki. Szczegółowe wyniki pomiarów wraz z ich oceną znajdują się w posiadaniu ZDiZ Gdańsk. Na rys 10 przedstawiono zbiorczy wynik monitoringu geodezyjnego. Część dodatnia wykresów odnosi się do przyczółka wschodniego (Stogi). Część ujemna odnosi się do przyczółka zachodniego (Gdańsk).



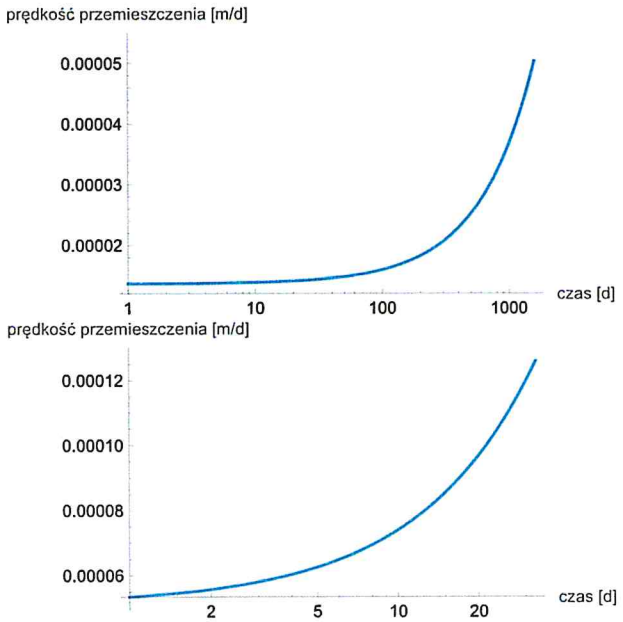
Rys. 11. Bezpośrednie wyniki ciągłych pomiarów przemieszczeń poziomych [8] na kierunku osi podłużnej mostu prowadzone od 07.02.25 – 23.03.25 (u góry przyczółek zachodni, poniżej wschodni)

W styczniu 2025 uruchomiono ciągły monitoring przemieszczeń przyczółków [8]. Wyniki wskazują na dalsze pogłębianie się niekorzystnego procesu przemieszczania, którego średnia prędkość utrzymuje się na stałym lub wyższym poziomie przy oscylacjach o intensywności związanej ze zmianami temperatury otoczenia. Dokładna interpretacja prędkości przemieszczenia jest utrudniona ze względu na stosunkowo krótki czas pomiarów ciągłych, jednakże należy zauważyć, że wpisuje się w nieliniowy trend stałego przyspieszania prędkości zaobserwowanego w dotychczasowych pomiarach geodezyjnych (np. nowy reper na przyczółku zachodnim Z3 SHM w miejscu dotychczasowego W3, przed-

stawiony na rys. 10). Na rys. 11 przedstawiono aktualne zestawienie wyników pomiarów ciągłych przemieszczenia przyczółków.



Rys. 12. Trend nieliniowy przemieszczenia z długoterminowych pomiarów geodezyjnych (wykres górny) oraz krótkoterminowych pomiarów ciągłych [8] (wykres dolny), przyczółek zachodni, odpowiednio repery W3, Z3



Rys. 13. Zmiany średniej prędkości przemieszczenia obliczonej z przyjętych trendów, przyczółek zachodni odpowiednio repery W3 (góra), Z3 (dół)

Analizę prędkości przemieszczenia zarówno z długoterminowych (1596 dni) pomiarów geodezyjnych jak i z krótkoterminowych (33 dni) pomiarów ciągłych [8] przeprowadzono w newralgicznej lokalizacji dolnej części przyczółka zachodniego, gdzie pomierzono największe przemieszczenie. W pomiarach długoterminowych jest to reper W3, natomiast w pomiarach krótkoterminowych, reper Z3. W celu eliminacji oscylacji wykresów przemieszczenia w czasie aproksymowano je trendem wielomianu drugiego stopnia, co przedstawiono na rys. 12. Następnie wyznaczoną funkcję trendu zróżniczkowano otrzymując wykresy zmiany prędkości w czasie, które zaprezentowano na rys. 13. Zmiany prędkości z pomiarów długoterminowych są kontynuowane w najnowszych pomiarach krótkoterminowych i wyniki przeprowadzonej analizy wskazują nawet na przyspieszenie prędkości przemieszczenia w ostatnim okresie.

4. BADANIA POPRZEDZAJĄCE ANALIZĘ

W celu stworzenia możliwie obiektywnego modelu obliczeniowego współpracy przyczółków Mostu Siennickiego z podłożem gruntowym wykonano następujące badania dodatkowe:

- Uzupełniające badania geotechniczne z poziomu nasypu dojazdowego.
- Badania podwodne, których celem było określenie położenia i stanu technicznego pali drewnianych, na których stoją przyczółki.

4.1 Badania geotechniczne

Zakres dodatkowych badań dotyczył odwiertów oraz sondowań wykonanych w koronie nasypów za korpusami przyczółków. Z odwiertów pobrano próbki NNS zalegających gruntów organicznych w celu wykonania badań laboratoryjnych – przede wszystkim badań ściśliwości w aparacie edometrycznym. Wyniki przeprowadzonych prac przedstawiono w opracowaniach [9,10].

W podłożu w rejonie przyczółków poniżej nawierzchni konstrukcyjnej jezdni znajduje się nasyp budowlany w stanie luźnym zbudowany z gruntów mineralnych z domieszką części organicznych oraz gruzu. Miąższość nasypu wynosi ok. 8.0m w przypadku podpory po stronie dzielnicy Stogi (przyczółek wschodni) do 12.0m po stronie Gdańska (przyczółek zachodni). Poniżej w podłożu zalegają grunty deltowe akumulacji rzecznej zdeponowane w postaci organicznych namułów z przewarstwieniami torfu oraz piaski rzeczne. Grunty holoceńskie zalegają średnio do głębokości ok. 26m ppt (licząc od nawierzchni korpusu nasypów). Dalej nawiercono warstwę glin pylastych prawdopodobnie z okresu czwartorzędu, natomiast głębiej grunty lodowcowe plejstoceńskie. Ściśliwe grunty organiczne występujące w stanie miękkoplastycznym lub plastycznym zawierają dużo frakcji piaszczystych.

Z przeprowadzonych badań wynika, że woda gruntowa występuje w postaci zwierciadła swobodnego w nasypach oraz utworach piaszczystych zalegających na stropie gruntów organicznych. Zwierciadło wody gruntowej

stabilizuje się na średniej rzędnej ok. -0.2 m n.p.m. Z obserwacji archiwalnych wynika, że zwierciadło wody podziemnej w tym rejonie może się wahać w granicach ±1.0 m i ma ścisły związek ze stanem wody w kanale Martwej Wisły.

Przeprowadzone badania pozwoliły na uzupełnienie danych niezbędnych do przyjęcia zarówno przebiegu warstw geotechnicznych jak i charakterystyki mechanicznej podłoża gruntowego w rejonie analizowanych przyczółków.

4.2 Inspekcja podwodna pali

W ramach prowadzonych prac dokonano inspekcji podwodnej konstrukcji pali, na których spoczywają przyczółki. Inspekcję przeprowadzono w dniach 3-5.02.2025 [11]. Dokonano przeglądu pali występujących w pierwszym rzędzie odwodnym przyczółków. Dokonano inwentaryzacji położenia pali oraz pobrano próbki rdzeniowe drewna do badań laboratoryjnych.

W wyniku inspekcji stwierdzono degradację biologiczną głowic pali pod przyczółkiem zachodnim. Stan techniczny drewnianych pali pod przyczółkiem wschodnim oceniono na dobry. Wykonano szkice poglądowe rozmieszczenia pali. W dniu 18.03.2025 na wniosek zespołu nurek przeprowadził badania uzupełniające, wykonując bardziej szczegółowe szkice rozmieszczenia pali w drugim i trzecim rzędzie. Nurek nie stwierdził występowania pali ukośnych, jednakże dostęp do pali drugiego i trzeciego rzędu był bardzo utrudniony i udało się go uzyskać jedynie w bocznych obszarach przyczółków. Ponadto pod przyczółkiem występuje prawdopodobnie co najmniej sześć rzędów pali do linii drewnianej ścianki szczelnej. Opracowując schemat palowania do modelu numerycznego oparto się ostatecznie zarówno na nieoryginalnym szkicu z kozłami palowymi jak i w przypadku rozstawu pali wynikami przeprowadzonych dodatkowych badań podwodnych.

5. NUMERYCZNA ANALIZA PRZYCZÓŁKÓW

5.1 Założenia

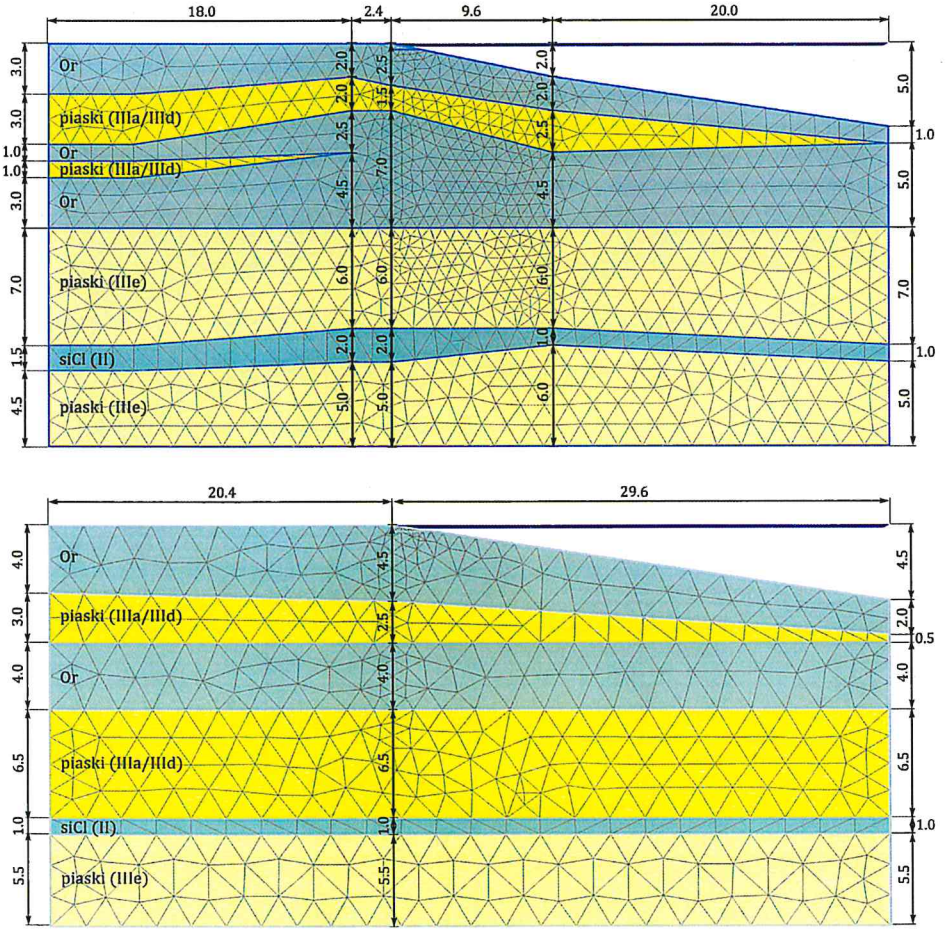
Model numeryczny opracowano jako zagadnienie początkowo-brzegowe równowagi statycznej w układzie przestrzennym. Obliczenia przyjętych zagadnień równowagi statycznej przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych (MES) w systemie Plaxis 3D. Model obejmował tylko środkowe pasmo podłużne przyczółków a nie ich całą szerokość. Szerokość pasma obliczeniowego powiązano z rozstawem elementów układu fundamentowego (zakotwienia z kozłem palowym oraz pali). Szerokość pasma przyjęto równą rozstawowi zakotwień wynoszącemu 3.75m. Rozstaw pali drewnianych o średnicy 0.5m przyjęto równy 1.25m (wartość większa od wskazanej w inspekcji podwodnej jako bardziej niekorzystna) przyjmując w paśmie 4 rzędy pali. Charakterystykę mechaniczną pali znajdujących się na brzegach modelu odpowiedni zredukowano wg zasad symetrii.

Przyczółki zamodelowano jako trójwymiarowy ośrodek ciągły natomiast pale za pomocą specjalnych elementów belkowych *embedded beams*. Drewnianą ściankę szczelną oraz płytę przejściową z przyczółków na nasyp zamodelowano za pomocą elementów powłokowych. Wszelkie styki elementów konstrukcyjnych z gruntem zamodelowano za pomocą elementów kontaktowych (*interface*). Obecność przęsła uwzględniono za pomocą obciążenia liniowego obliczonego na podstawie wartości reakcji na łożyska przyczółków od obciążenia stałego.

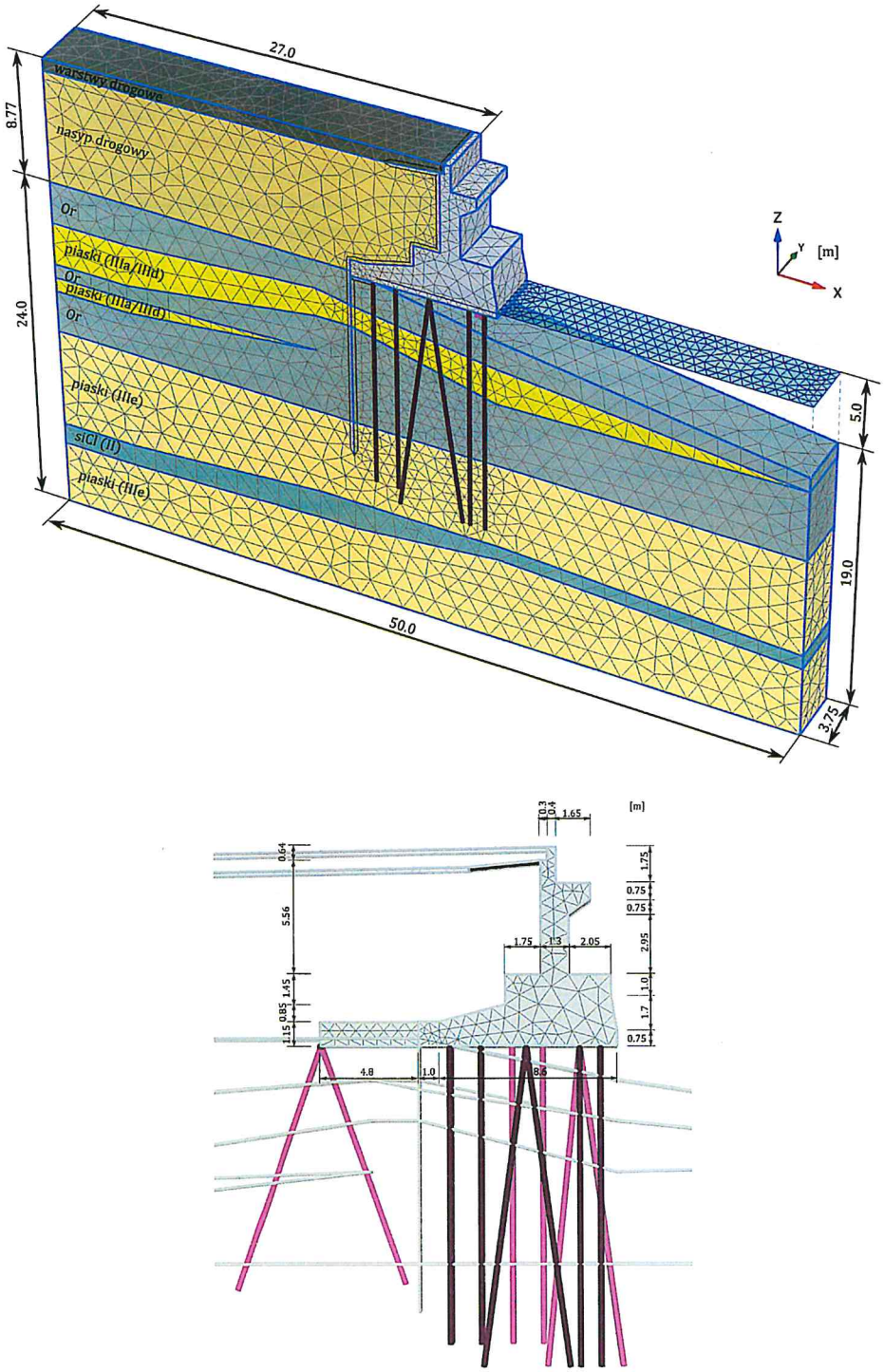
Charakterystykę mechaniczną wydzielonych warstw geotechnicznych przyjęto poprzez dobór odpowiednich modeli konstytutywnych gruntów. W przypadku warstw gruntów nasypowych przyjęto sprężysto-idealnie plastyczny model Mohra-Coulomba, natomiast w przypadku zalegających warstw gruntów naturalnych przyjęto modele sprężysto-plastyczne ze wzmocnieniem tj. *Hardening Soil* do gruntów ziarnistych i iłów oraz *Soft Soil* do gruntów organicznych. W przypadku elementów konstrukcyjnych (beton, drewno) zastosowano opis sprężysty. Parametry materiałowe do modeli konstytutywnych przyjęto na podstawie zestawu parametrów oszacowanych w badaniach dodatkowych [9,10], własnych interpretacji badań edometrycznych oraz własnych doświadczeń z analiz w podobnych warunkach gruntowych. Poniżej zestawiono parametry materiałowe przyjęte w obliczeniach:

- **Or**: grunty organiczne; model *Soft Soil*, parametry materiałowe: γ=16.0 kN/m^3; γ'=6.0 kN/m^3; ϕ'=27°; ψ=0°; c'=10 kPa; λ^*=0.07; κ^*=0.014; ν_{ur}=0.15; K_0=0.65; POP=10 kPa; k_x=k_y= k_z=0.001 m/d.
- **piaski (IIIa/IIId)**: model *Hardening Soil*, parametry materiałowe: γ=19.0 kN/m^3, γ'=9.0 kN/m^3; ϕ'=30°; ψ'=0°; c'=1 kPa; M_0^{ref}=40000 kPa; E_{50}^{ref}=40000 kPa, E_{ur}^{ref}=120000 kPa; m=0.5; ν_{ur}=0.20; p_{ref}=100 kPa; K_0=0.60; OCR=1.5; k_x=k_y= k_z=1.0 m/d.
- **piaski IIIe**: model *Hardening Soil*, parametry materiałowe: γ=20.0 kN/m^3, γ'=10.0 kN/m^3; ϕ'=33°; ψ'=3°; c'=1 kPa; M_0^{ref}=60000 kPa; E_{50}^{ref}=60000 kPa, E_{ur}^{ref}=180000 kPa; m=0.5; ν_{ur}=0.20; p_{ref}=100 kPa; K_0=0.60; OCR=1.3; k_x=k_y= k_z=1.0 m/d.
- **siCl (II)**: glina pylasta; model *Hardening Soil*, parametry materiałowe: γ=19.0 kN/m^3, γ'=19.0 kN/m^3; ϕ'=23°; ψ'=0°; c'=30 kPa; M_0^{ref}=20000 kPa; E_{50}^{ref}=20000 kPa, E_{ur}^{ref}=60000 kPa; m=0.8; ν_{ur}=0.20; p_{ref}=100 kPa; K_0=0.90; OCR=1.3; k_x=k_y= k_z=0.001 m/d.
- **warstwy drogowe**: model Mohra-Coulomba, parametry materiałowe: γ=21.0 kN/m^3; ϕ'=30°; ψ=0°; c'=20 kPa; E^{ref}_0=100000 kPa; ν=0.20; K_0=1.0; k_x=k_y= k_z=1.0 m/d.
- **nasyp drogowy**: model Mohra-Coulomba, parametry materiałowe: γ=20.0 kN/m^3; ϕ'=30°; ψ=0°; c'=3 kPa; E^{ref}_0=70000 kPa; ν=0.25; K_0=0.60; k_x=k_y= k_z=1.0 m/d.
- **beton**: model liniowo sprężysty, parametry materiałowe: γ=25.0 kN/m^3, E=3.0·10^7 kPa, ν=0.20.
- **elementy drewniane**: model liniowo sprężysty, parametry materiałowe: E=9.0·10^6 kPa, ν=0.20.

Układ i geometrię warstw geotechnicznych przyjętych na podstawie archiwalnych i dodatkowych badań podłoża w rejonie przyczółków przedstawiono na rys. 14. Układ ten dotyczył stanu początkowego, który przyjęto w celu inicjacji początkowego stanu naprężenia efektywnego dotyczącego sytuacji przed budową Mostu Siennickiego. Była to pierwsza faza obliczeniowa, po której kolejno wprowadzano kolejne elementy modelu numerycznego tj. pale drewniane, drewnianą podłogę, przyczółek z zakotwieniem, nasypy za przyczółkiem, ostateczną warstwę drogową i obciążenie od przęsła mostu.



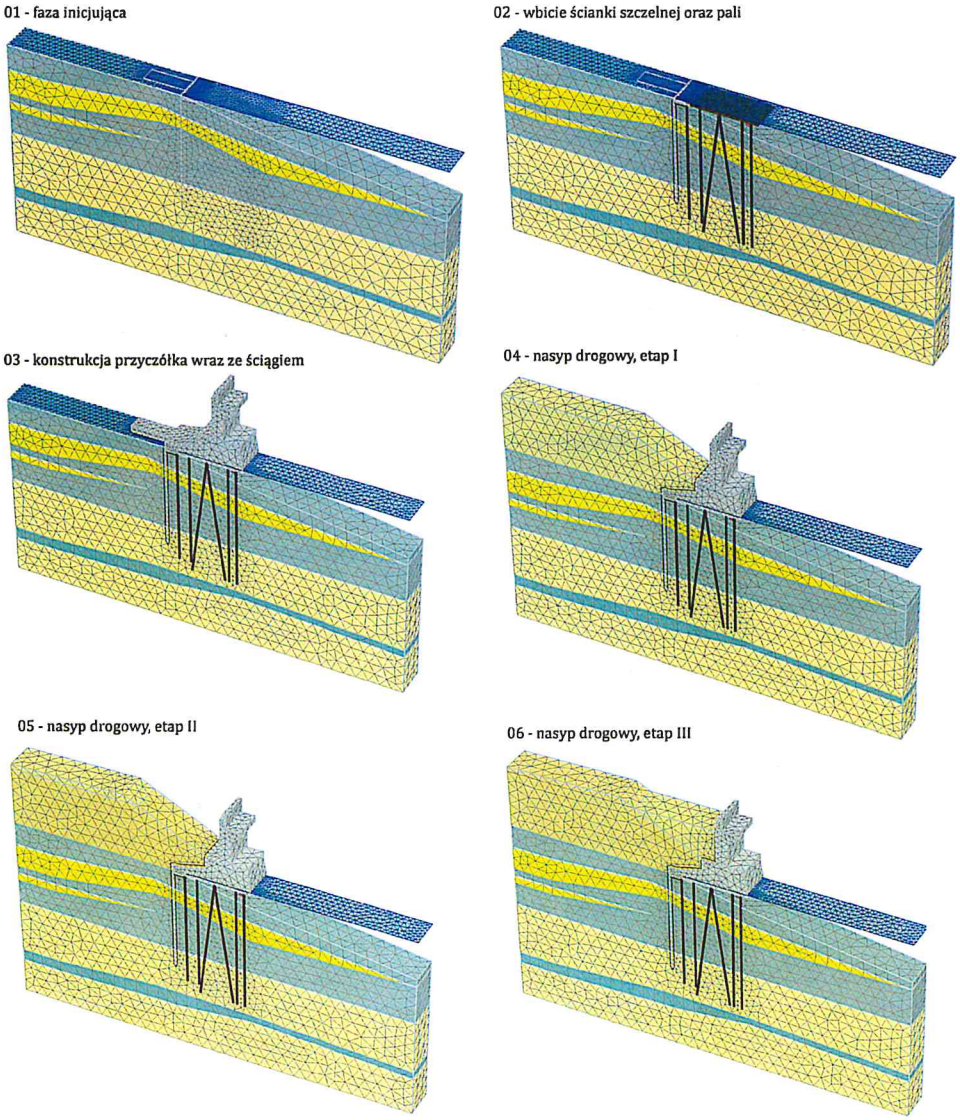
Rys. 14. Układ warstw geotechnicznych przyjętych w inicjacji naprężenia początkowego w przypadku przyczółka zachodniego (góra) i wschodniego (dół)



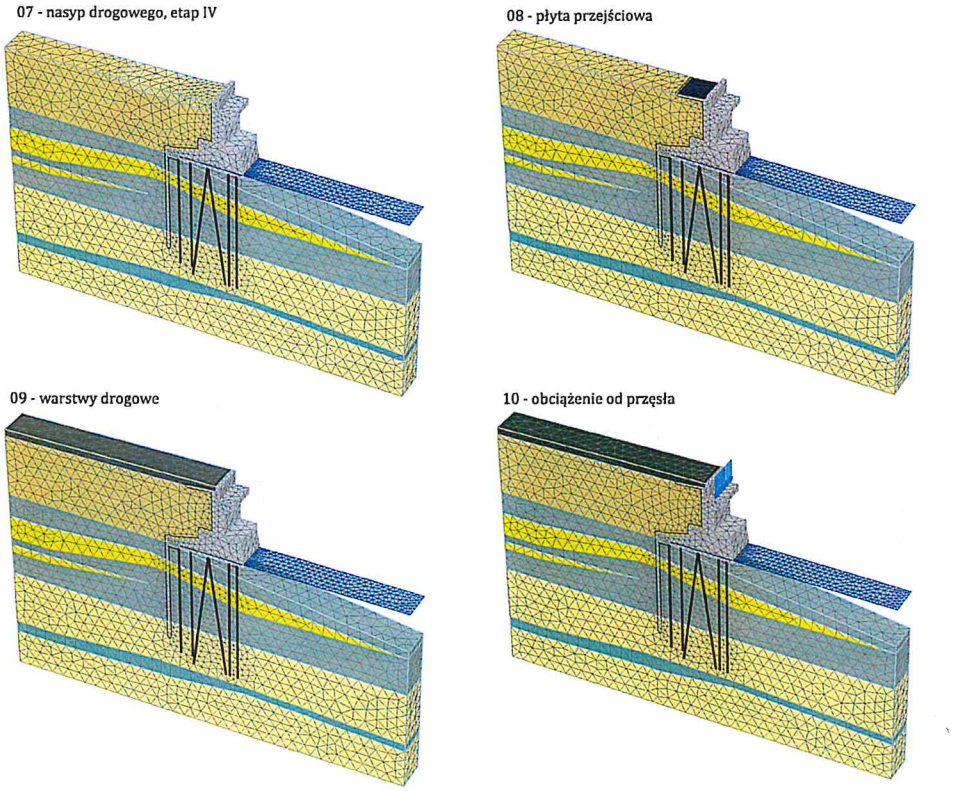
Rys. 15. Geometria i dyskretyzacja modelu przyczółka zachodniego – widok ogólny i szczegóły przyczółka z układem pali w analizowanym paśmie.

5.2 Model przyczółka zachodniego

Opracowany schemat modelu przyczółka zachodniego przedstawiono na rys. 15. Widoczny stan aktualny został otrzymany w modelowaniu w kolejnych fazach obliczeniowych, w których w przybliżony sposób odtworzono budowę i historię obciążenia przyczółka zachodniego. Fazy obliczeniowe były analogiczne zarówno w przypadku przyczółka zachodniego jak i wschodniego. Zostały one zilustrowane na przykładzie przyczółka zachodniego na rys. 16a i 16b.



Rys. 16a. Kolejne fazy obliczeniowe w odtworzeniu aktualnego stanu przyczółka zachodniego

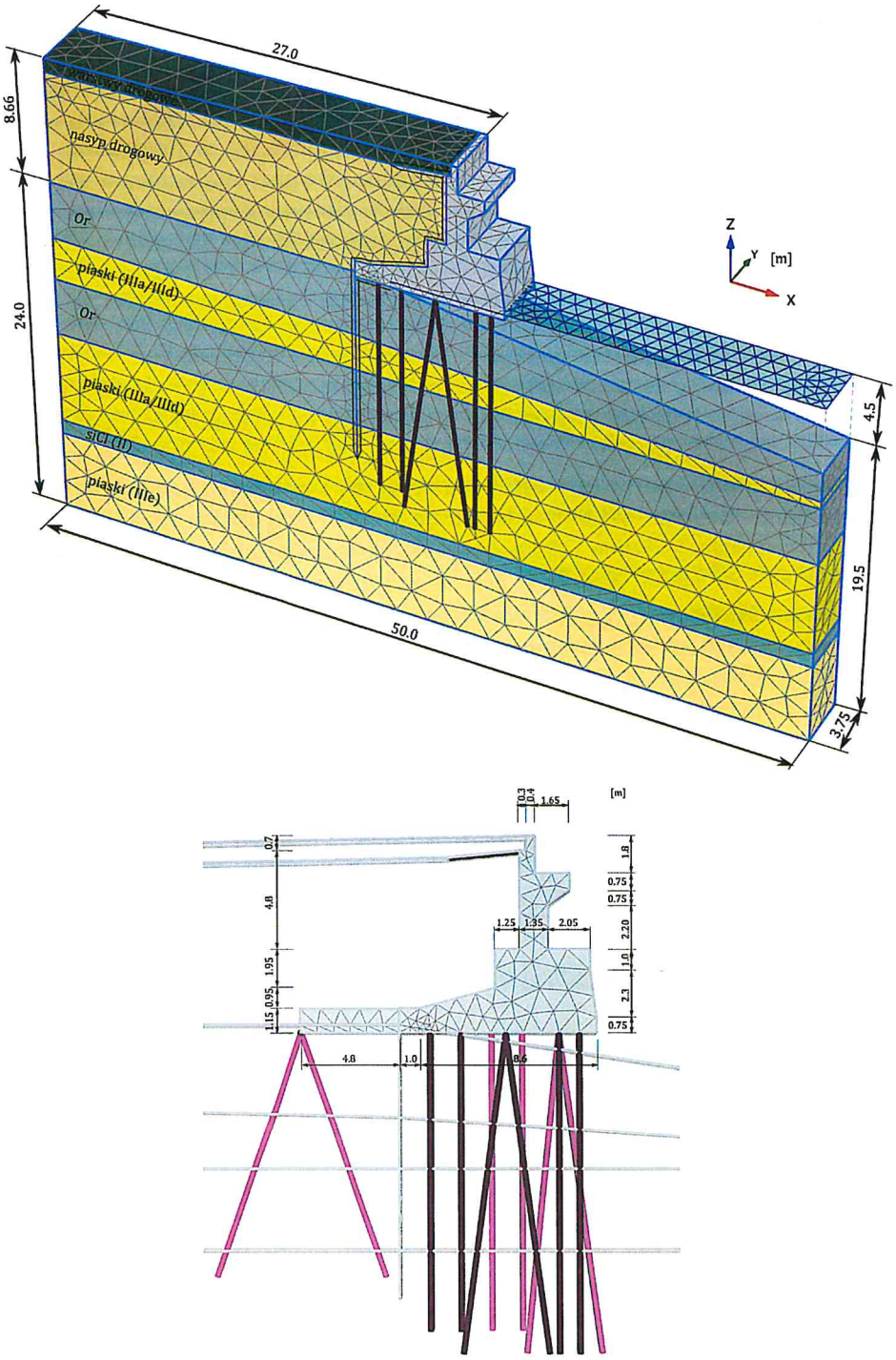


Rys. 16b. Kolejne fazy obliczeniowe w odtworzeniu aktualnego stanu przyczółka zachodniego (kontynuacja rys. 16a)

Ważnym wariantowym elementem modeli było oddziaływanie przęsła jako rozpory na ściankę żwirową przyczółków. Jest to element, który pojawia się w wyniku awarii, tj. zbyt dużych przemieszczeń przyczółków w stronę wody. Rozparcie to zamodelowano za pomocą poziomej podpory sprężystej, którą włączano wariantowo w różnych fazach degradacji układu fundamentowego.

Odtworzenie aktualnego stanu przyczółka zachodniego przy założeniu prawidłowej pracy wszystkich elementów konstrukcyjnych posadowienia (zakotwienie, pale, ścianka szczelna) uzyskano z zachowaniem równowagi i wysokich wartości współczynnika stateczności F>2.5 (metoda redukcji ϕ'-c'). W celu zamodelowania rzeczywistego stanu aktualnego związanego ze stanem awaryjnym, którego symptomem są nadmierne przemieszczenia poziome przyczółka zastosowano następujące zmiany: zerwanie zakotwienia poprzez wprowadzenie elementu kontaktowego o zerowej wytrzymałości na rozciąganie w połączeniu z przyczółkiem, eliminację pali pod przyczółkiem nachylonych w stronę rzeki, eliminację wszystkich kozłów palowych. Zmiany te wprowadzano wariantowo przy działaniu rozparcia na ściankę żwirową lub jego braku z jednoczesnym sprawdzaniem stateczności całego układu.

W ostatecznym etapie obliczeń sprawdzono zachowanie się przyczółka i jego stateczność przy usunięciu nasypu bezpośrednio za nim.



Rys. 17. Geometria i dyskretyzacja modelu przyczółka wschodniego – widok ogólny i szczegóły przyczółka z układem pali w analizowanym paśmie.

5.3 Model przyczółka wschodniego

Opracowany schemat modelu przyczółka wschodniego przedstawiono na rys. 17. Widoczny stan aktualny został otrzymany w modelowaniu w kolejnych fazach obliczeniowych, których przebieg jest analogiczny jak w przypadku przyczółka zachodniego (rys. 16a i 16b). Podobnie również realizowano sytuacje awaryjne poprzez opisane powyżej wariantowe eliminacje poszczególnych elementów konstrukcyjnych, które najprawdopodobniej uległy zniszczeniu lub degradacji związanej z użytkowaniem.

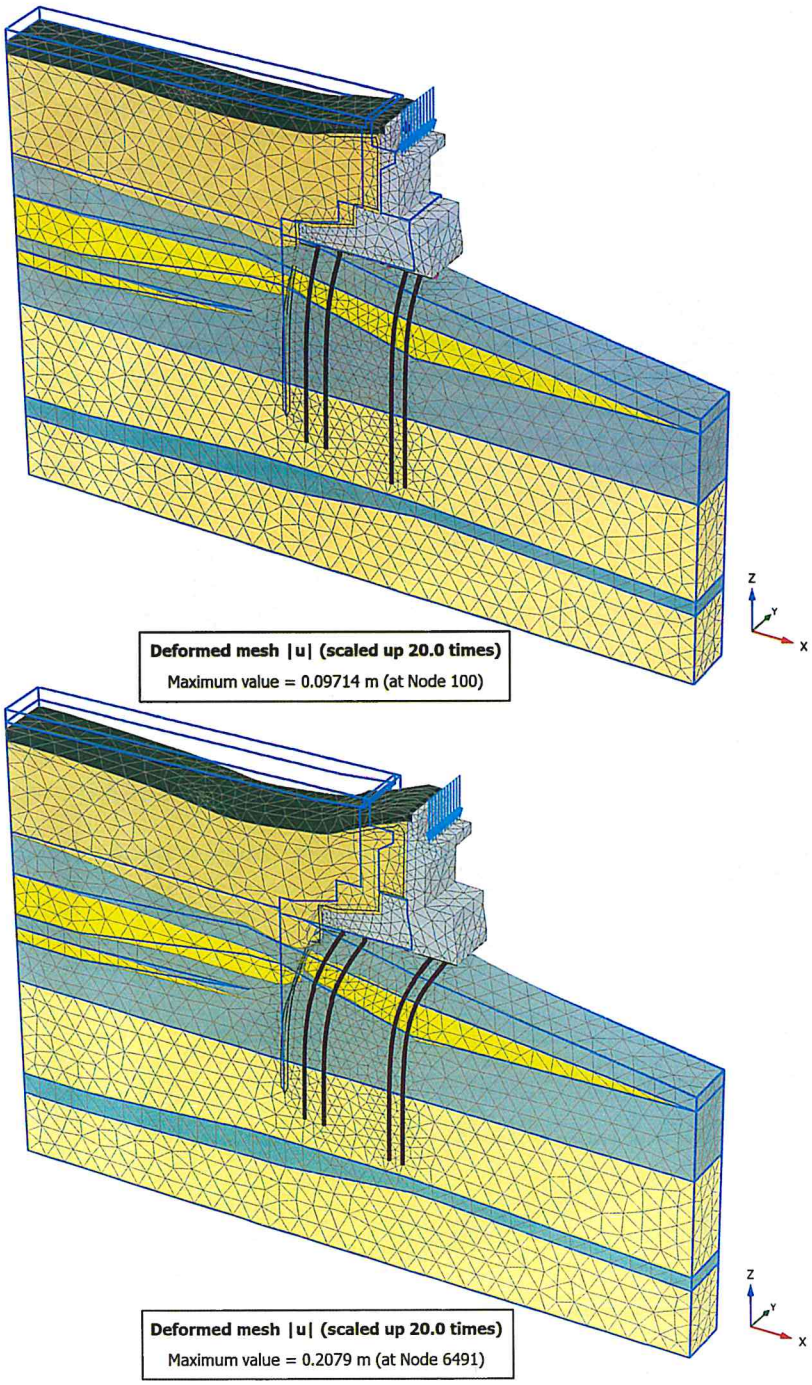
5.4 Wyniki obliczeń

Kluczowe wyniki obliczeń zostaną zaprezentowane na podstawie analizy numerycznej zachowania się przyczółka zachodniego, który jest najbardziej newralgicznym obiektem - zarówno w rzeczywistości jak i w przeprowadzonym modelowaniu numerycznym. Wyniki obliczeń na modelu przyczółka wschodniego są jakościowo bardzo podobne i charakteryzują się mniejszym odkształceniem obliczeniowym, jednakże, podobnie jak w przypadku przyczółka zachodniego, wskazują na stan awaryjny jak również prowadzą do podobnych wniosków dotyczących sposobu spowolnienia przemieszczenia.

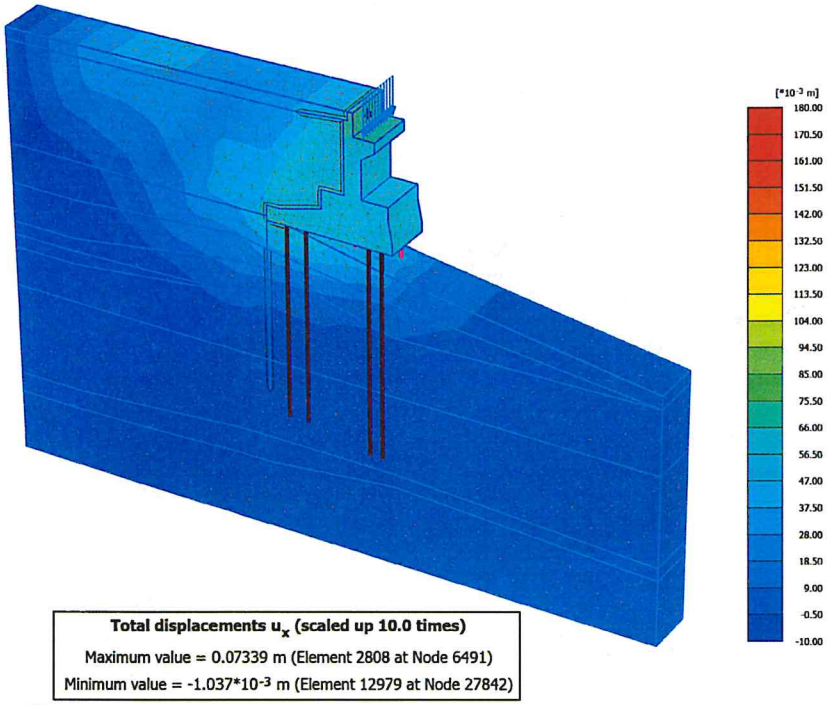
Po wprowadzeniu całkowitego obciążenia przyczółka zachodniego (nasyp, obciążenie od przęsła) oraz przy założeniu prawidłowej pracy wszystkich elementów konstrukcji posadowienia równowaga statyczna, przemieszczenie jak również zapas bezpieczeństwa obliczony w analizie stateczności metodą redukcji ϕ'-c' wskazują na pozorne bezpieczeństwo konstrukcji. W celu wywołania obserwowanego stanu awaryjnego wprowadzano w modelu kolejno następujące zmiany:

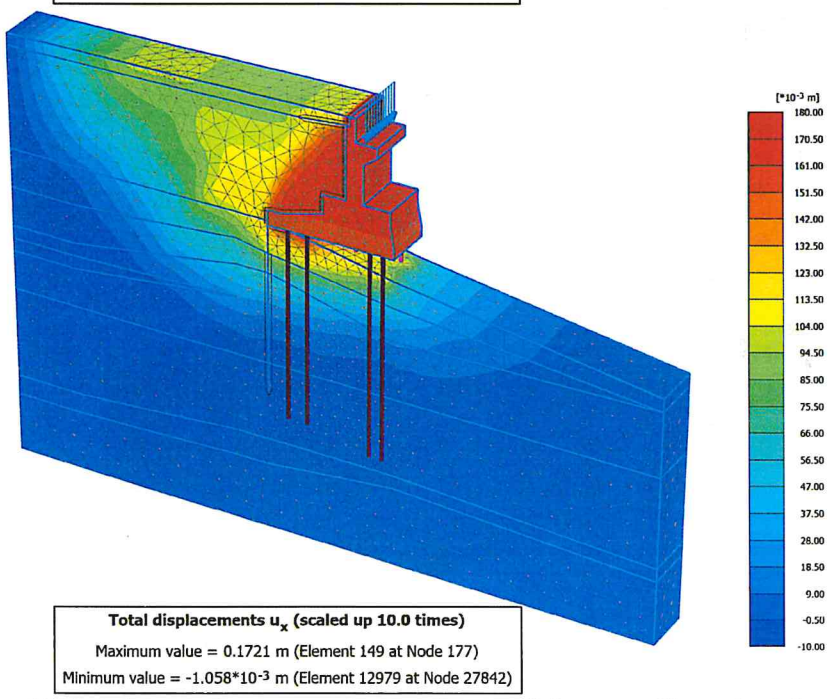
- przerwanie połączenia układu zakotwienia kozłem palowym za przyczółkiem,
- usunięcie dwóch najbardziej obciążonych pali nachylonych w kierunku wody,
- usunięcie kolejnych dwóch najbardziej obciążonych pali nachylonych w kierunku wody,
- usunięcie pozostałych pali z układów kozłowych (wyciąganych).

Zmiany te analizowano po fazie przerwania zakotwienia kozłem palowym w wariantowych schematach rozparcia przyczółka górą przęsłem mostu. Warunki równowagi statycznej nie zostały spełnione przy braku rozparcia oraz przy usunięciu wszystkich pali nachylonych w kierunku wody. Przemieszczenie obliczeniowe osiągnęło jednak wartość zbliżoną do oszacowanych z obserwacji dopiero po usunięciu całości najbardziej obciążonych układów kozłowych pod przyczółkiem. Porównanie wyników obliczeń przy usunięciu układów kozłowych w wariantach rozparcia przęsłem mostu lub przy jego braku przedstawiono na rys. 18 i 19.



Rys. 18. Przemieszczenie w analizie przyczółka zachodniego wywołane odcięciem ściągu oraz degradacją najbardziej obciążonych pali kozłowych w dwóch wariantach rozparcia. Góra – obecność rozparcia przęsłem bez zniszczenia ścianki żwirowej, dół – brak rozparcia związany z zarysowaniem ścianki żwirowej, stan krytyczny, w którym obliczone przemieszczenie odpowiada wartościom rzeczywistym.





Rys. 19. Składowa pozioma przemieszczenia w analizie przyczółka zachodniego wywołana odcięciem ściągu oraz degradacją najbardziej obciążonych pali kozłowych w dwóch wariantach rozparcia. Góra – obecność rozparcia przęsłem bez zniszczenia ścianki żwirowej, dół – brak rozparcia związany z zarysowaniem ścianki żwirowej, stan krytyczny, w którym obliczone przemieszczenie odpowiada wartościom rzeczywistym.

W schematach awarii elementów posadowienia z rozparciem przęsłem mostu należy podkreślić znaczną siłę w rozporze obliczoną do utrzymania równowagi statycznej (248, 463, 629kN na pasmo 3.75m w kolejnych fazach usuwania pali pod przyczółkiem). Siły te musiały doprowadzić do zarysowania i utraty nośności ścianki żwirowej, której funkcją nie było przejmowanie obciążenia od zakleszczonego przęsła mostu tylko znacznie mniejszego parcia gruntu za przyczółkiem. Schemat usunięcia zakotwienia oraz kozłów palowych bez rozparcia przęsłem należy zatem uznać jako najbardziej reprezentatywny obliczeniowo w aktualnej sytuacji przyczółków Mostu Siennickiego. W takim schemacie przeanalizowano efekt odciążenia przyczółków w celu spowolnienia awaryjnego procesu przemieszczenia poprzez usunięcie części nasypu za nimi:

- faza pierwsza – wykop do głębokości 2.0m pod nawierzchnią, jak w fazie 6 na rysunku 16a;
- faza druga – wykop do płyty fundamentowej, jak w fazie 5 na rysunku 16a.

Zarówno w pierwszej jak i w drugiej fazie przywrócona została równowaga statyczna, natomiast korpus przyczółka przemieścił się w czasie odciążenia w kierunku lądu. Wskazuje to na konieczność przeprowadzenia takiego odciążenia w celu przerwania dalszego postępu przemieszczania się przyczółków w kierunku wody.

6. WNIOSKI

Stan techniczny przyczółków Mostu Siennickiego należy uznać za awaryjny i nieakceptowalny. Objawy widoczne gołym okiem, pomiary i symulacje obliczeniowe wskazują na to, że konstrukcje przyczółków (szczególnie przyczółek zachodni) znacznie przemieściły się w kierunku rzeki. Niestety, wyłączenie Mostu Siennickiego z eksploatacji nie zatrzyma procesu przemieszczania się konstrukcji przyczółków w stronę rzeki. Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników pomiarów przemieszczenia przyczółków oraz wyników modelowania numerycznego zachowania się przyczółków w stanie wskazującym na osiągnięcie granicy równowagi statycznej można sformułować następujące wnioski:

1. W aktualnym stanie nie jest możliwe przywrócenie użytkowania Mostu Siennickiego nawet poprzez ruch pieszy – zarówno pomiary jak i obliczenia wskazują na postęp awaryjnego przemieszczania się przyczółków w stronę wody bez obciążenia użytkowego.
2. Przyczyną awarii nie jest brak nośności podłoża gruntowego tylko degradacja elementów konstrukcji posadowienia takich jak zakotwienie oraz drewniane pale pod przyczółkiem, które przejęły obciążenia, na które nie były pierwotnie zaprojektowane. Jest to hipoteza wynikająca z przeprowadzonych analiz. Możliwe są również inne, nierozpoznane przyczyny związane z zarysowaniem korpusu przyczółków (działania saperskie itp.).
3. Odciążenie przyczółków poprzez usunięcie części nasypu drogowego bezpośrednio za nimi jest potencjalną metodą spowolnienia lub zatrzymania postępującego awaryjnego odkształcenia.
4. W obliczeniach przeanalizowano warianty obecności lub braku rozparcia przyczółków górą na ściance żwirowej poprzez przęsło mostu. W rzeczywistości rozparcie może zachodzić pośrednio i w trakcie usuwania nasypu za przyczółkami możliwa jest gwałtowna utrata nośności mocno zarysowanej już ścianki żwirowej. Stwarza to zagrożenie utraty podparcia przęsła mostu. Zaleca się zatem zaprojektowanie i wykonanie tymczasowej podpory pionowej przęsła na czas odciążania przyczółków.
5. **Po odciążeniu i ustabilizowaniu się przyczółków, na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń i odniesienia ich do wyników modelowania, możliwe będzie przywrócenie ruchu pieszego na Moście Siennickim. Wymagane będzie wykonanie tymczasowych kładek nad usuniętymi nasypami.**

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE

1. Remont kapitalny mostu Siennickiego w Gdańsku – Projekt ustroju niosącego mostu, opracowanie technologiczne i rysunki warsztatowe, Biuro Projektów Budownictwa Komunalnego w Gdańsku, 1984,
2. Przebudowa infrastruktury tramwajowej w ul. Siennickiej i ul. Lenartowicza od ul. Elbląskiej do ul. Sucharskiego – 6.3. Most w ciągu ul. Siennickiej nad Martwą Wisłą, PROGREG Sp. z o.o., 2013
3. Ekspertyza techniczna i wytyczne projektowania remontu kapitalnego przyczółków Mostu Siennickiego w Gdańsku. K. Abramski z zespołem. Ośrodek Postępu Technicznego „Wdrożenie" S.A., Gdańsk 1988.
4. Materiały archiwalne ZDiZ Gdańsk
5. Geodezyjne pomiary Mostu Siennickiego w gdańsku. Geobor Sp z o.o. Gdańsk ul. Pileckiego 8. W okresie 28.11.19 do 18.02.2025
6. Opinia techniczna dotycząca uszkodzonych dylatacji Mostu Siennickiego w Gdańsku. Politechnika Gdańska, 2019.
7. Ekspertyza techniczna dotycząca aktualnej nośności mostu nad Martwą Wisłą w ciągu ul. Siennickiej w Gdańsku wraz z koncepcją przebudowy. K. Żółtowski z zespołem, Gdańska, 2020.
8. System monitorowania Mostu Siennickiego w Gdańsku (SHM monitor). Dostęp do pomiarów ciągłych on-line od 06.02.2025.
9. Raport z badań laboratoryjnych G-02B-2025, Badania geotechniczne w rejonie Mostu Siennickiego, Gdańsk Sineo Sp. z o.o., 04.03.2025.
10. Opinia Geotechniczna dla ustalenia warunków geotechnicznych podłoża gruntowego w rejonie przyczółków lądowych Mostu Siennickiego w Gdańsku, powiat m. Gdańsk, woj. Pomorskie, INGEO Sp. z o.o., 02.2025.
11. Raport z wykonania zadania: Wykonanie przeglądu podwodnej konstrukcji Mostu Siennickiego w Gdańsku, 03-05.02.2025. Zakład Usług Podwodnych i Technicznych, Denis Andrzej, Toruń.