

# Zaawansowane modelowanie numeryczne konstrukcji tuneli podziemnych

**Daniel Dymek,**  
**Sylwester Sławik**  
Keller Polska

**M**odelowanie numeryczne konstrukcji podziemnych, zwłaszcza głębokich tuneli, należy do stosunkowo skomplikowanych zagadnień projektowych. Próba odwzorowania przestrzennej pracy takich obiektów jest nie tylko trudna, ale i czasochłonna. W modelu konstrukcji należy uwzględnić szereg czynników, które wpływają na jej pracę, takich jak: etapowanie robót budowlanych, oddziaływanie gruntu i wody gruntowej, obciążenia zewnętrzne czy też współpraca poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Z uwagi na poziom skomplikowania tego typu przedsięwzięć, ograniczanie zakresu obliczeń statycznych wyłącznie do analitycznych może okazać się często niewystarczające lub nawet błędne, prowadząc do nierealnych predykcji w zakresie przemieszczeń, a co za tym idzie – sił wewnętrznych w poszczególnych elementach konstrukcyjnych. Odpowiednie zastosowanie zaawansowanych modeli numerycznych poprzez odwzorowanie pracy całej konstrukcji lub dużej jej części może skutkować m.in. sprawną i rzetelną weryfikacją założeń projektowych na poszczególnych etapach robót budowlanych w odniesieniu do prowadzonego monitoringu, możliwością wykonania precyzyjnych analiz wstecznych w przypadku nieoczekiwanych zdarzeń w trakcie reali-

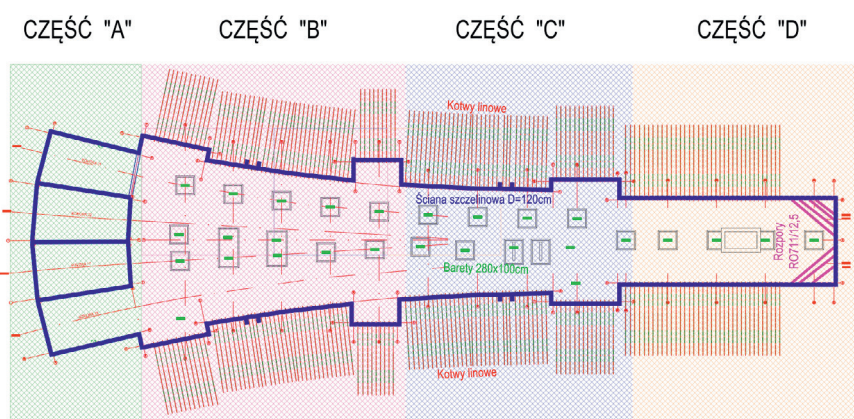
zacji, a ostatecznie potencjalnymi oszczędnościami dla inwestora.

Niestety tworzenie i analiza takich modeli niosą za sobą też wiele inżynierskich pułapek i wymagają odpowiedniego podejścia, interpretacji oraz kontroli rezultatów. Projektanci geotechniczni, konstrukcyjni i mostowi na co dzień mierzą się z szeregiem takich wyzwań. W przypadku konstrukcji tuneli podziemnych często jest to problematyka z pogranicza zagadnień geotechnicznych i konstrukcyjnych, gdzie współpraca międzybranżowa jest szczególnie istotna. Zazwyczaj odrębne modele obliczeniowe z zakresu geotechniki i konstrukcji, w procesie iteracyjnym, muszą uzyskać zadawalającą zbieżność wyników, pomimo fundamentalnych różnic w podejściu do pewnych aspektów projektowych. Ogólna świadomość poszczególnych branż o możliwościach i ograniczeniach poszczególnych analiz pozwala sprawnie prowadzić prace projektowe w poczuciu wzajemnego poszanowania i zaufania.

Przykładami inwestycji z grupy tuneli podziemnych, w której zastosowano zaawansowane modelowanie numeryczne, są przystanek osobowy Łódź Koziny (rys. 1) oraz komory technologiczne (rys. 2) w ramach budowy udrożnienia Łódzkiego Węzła Kolejowego na odcinku Łódź Fabryczna – Łódź Kaliska/Łódź Żabieniec (potocznie LWK). Stacja Koziny jest jedną z trzech planowanych i realizowanych podziemnych stacji w ramach budowy LWK, których zadaniem jest usprawnienie dojazdu do centrum miasta. Zlokalizowano ją pomiędzy Al. Włókniarzy, ul. Kasprzaka i ul. Drewnowską. Stacja pełni charakter przystanku rozgałęźnego – od strony zachodniej do przystanku kierują się cztery tunele na różnych rzędnych i poziomach, a po stronie wschodniej „wychodzą” dwie nitki. Perony przystanku na najgłębszej kondygnacji będą znajdować się około 26 m pod poziomem otaczającego terenu. Jest to niewątpliwie najbardziej skomplikowana i największa budowla geotechniczna powstająca w ramach budowy LWK. Dla stacji Koziny zaprojektowano obudowę wykopu w technologii ścian szczelinowych. Obudowa jest zarówno tymczasowo kotwiona, jak i rozpierana docelowymi stropami żelbetowymi oraz stalowymi rozporami tymczasowymi. Zaprojektowano również kotwienie płyty fundamentowej w postaci ścian szczelinowych, baret (pracujących również jako słupy podpierające główny strop rozporowy nad kondygnacją „-3”) oraz mikropali stalowych w systemie samowierzącym. W niewielkiej odległości od stacji Koziny zostały zlokalizowane cztery komory technologiczne na potrzeby wiercenia tuneli TBM (ang. *tunnel boring machine*). Komory te służą jako miejsce do montażu maszyny na odpowiedniej rzędnej i pod

## Piśmiennictwo

1. Sieradzki B.: Przystanek Koziny – podziemne miasto w sercu Łodzi, „GDMT geoinżynieria drogi mosty tunele”, 3/2024.
2. User Manuals PLAXIS 2D/3D. SEEQUENT, 24.09.2025 r.



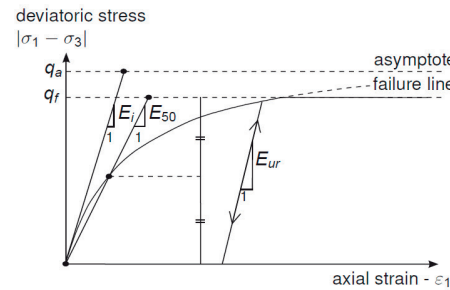
Rys. 1. Plan sytuacyjny stacji Koziny



Rys. 2. Plan sytuacyjny komory technologicznej K22

odpowiednim kątem, aby umożliwić jej prawidłowe drążenie tunelu oraz demontaż po wykonaniu zadania. W przypadku przedmiotowej inwestycji firma Keller Polska odpowiedzialna była za projektowanie oraz wykonanie robót geotechnicznych dla komory nadawczej K21 oraz odbiorczej K22. Komory zaprojektowano w technologii ścian szczelinowych. Obudowa jest rozpięta belkami żelbetowymi oraz rozporami tymczasowymi, a w przypadku komory K22 konieczne było zastosowanie kotew gruntowych w miejscu, w którym nastąpi wyciąganie poszczególnych części TBM na powierzchnię terenu. Płyta fundamentowa komór jest zakotwiona na wypór za pomocą ścian szczelinowych i lokalnie dodatkowo za pomocą baret. Z uwagi na niezwykle skomplikowany charakter stacji Koziny pod względem konstrukcyjnym, a także na znaczną różnorodność warunków gruntowych, obiekt podzielono projektowo na cztery części, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1. Dla części „A” wykonano jeden model numeryczny 3D obejmujący dwie z czterech komór, dla części „B” i „C” wykonano dwa modele 3D i pomocniczy model 2D, a dla części „D” – jeden model trójwymiarowy i pomocniczy model dwuwymiarowy. W przypadku komór technologicznych wykonano po jednym modelu przestrzennym dla każdej komory. Poniżej zamieszczono wybrane założenia zastosowane w modelach obliczeniowych:

- 1) Brak oddziaływania wody gruntowej na obudowę wykopu w fazach budowlanych – zwierciadło wody gruntowej będzie skutecznie obniżone poniżej poziomu dna wykopu w trakcie budowy obiektu, zarówno przed, jak i za ścianami szczelinowymi. Po zakończeniu realizacji konstrukcji przewidziano odbudowę zwierciadła do naturalnego poziomu oraz pełne parcie wody na obudowę wykopu i pełen wypór na spodzie płyty fundamentowej.
- 2) W przypadku elementów takich jak ściany szczelinowe, płyta fundamentowa i bary zdecydowano się na wykorzystanie elementów objętościowych. Mikropale zamodelowano jako elementy typu *embedded beam*. Kotwy gruntowe w przypadku komory K22 wprowadzono jako połączenie elementu *node-to-node anchor* (część wolna) i elementu typu *embedded beam* (buława). W przypadku modeli stacji Koziny kotwy gruntowe zamodelowano jako podparcia punktowe o odpowiedniej sprężystości, którą określono na podstawie pomocniczego modelu 2D. Zabieg ten umożliwił m.in. ograniczenie liczby elementów skończonych w modelu przestrzennym
- 3) Modele zostały odpowiednio przedłużone, aby uniknąć wpływu granic na wyniki symulacji. Siatkę elementów skończonych wygenerowano w taki sposób, aby umożliwić ocenę interakcji między podłożem gruntowym i konstrukcją. Odpowiednią interakcję



Rys. 3. Wykres zależności naprężenie-odkształcenie w modelu Hardening Soil

objętościowych elementów konstrukcyjnych z gruntem zapewniono poprzez zastosowanie elementów typu *interface*.

- 4) W miejscach przejść TBM przez ściany szczelinowe zamodelowano bloki *jet grouting*. Zadaniem niniejszych bloków jest zapewnienie szczelności komory podczas przebijania się maszyny oraz stworzenie dla niej „podpory” po wejściu w ośrodek gruntowy. Geometria oraz parametry materiałowe dostosowano do wymogów TBM. Z uwagi na drążenie metodą EPB (ang. *earth pressure balance*) przyjęto, że oddziaływanie maszyny na ścianę obudowy nie przekroczy wartości parcia gruntu.
- 5) W elementy objętościowe ścian szczelinowych oraz baret wprowadzono tzw. „elementy wirtualne” o obniżonej sztywności (bez wpływu na wynik obliczeń), celem łatwiejszego odczytu sił wewnętrznych.
- 6) Grunty rodzime zamodelowano za pomocą modelu Hardening Soil. Pod względem mechanicznym model ten charakteryzuje się m.in. podwyższonymi parametrami sztywności liniowej przy odciążeniu, realistyczną ścieżką naprężenia efektywnego w warunkach edometrycznych, barotropii oraz nieliniową sztywnością w obszarze granicznej powierzchni plastyczności. Model ten może być zastosowany zarówno w przypadku gruntów spoistych, jak i niespoistych, niezależnie od stopnia konsolidacji i zagęszczenia. Na rys. 3 zaprezentowano zależność naprężenie-odkształcenie słuszną dla modelu HS.

Podstawowe parametry modelu HS:

- $c$  – spójność efektywna,
- $\varphi$  – efektywny kąt tarcia wewnętrznego,
- $\psi$  – kąt dyatacji,
- $E_{50}^{ref}$  – sieczny moduł Younga (dla  $q_{50}$ ),
- $E_{50}^{ed}$  – styczny moduł edometryczny,
- $E_{ur}^{ed}$  – sieczny moduł Younga przy odciążeniu/obciążeniu wtórnym,
- $m$  – wykładnik (określający zależność między sztywnością a naprężeniem),
- $\nu_{ur}$  – współczynnik Poissona przy odciążeniu/obciążeniu wtórnym,
- $p^{ref}$  – średnie naprężenie referencyjne,
- $R_f$  – współczynnik definiujący odcięcie,
- $K_0^{NC}$  – docelowy współczynnik  $K_0$ .

W związku z tym, że moduły  $E_{50}$  oraz  $E_{ur}$  materiału są zależne od naprężenia w gruncie i jego parametrów wytrzymałościowych,

do ich oszacowania użyte są następujące równania:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m$$

- 7) Sztywne materiały konstrukcyjne zamodelowano za pomocą modelu Linear Elastic (liniowo sprężysty). Model ten został zatem zastosowany do ścian szczelinowych, płyty fundamentowej, stropów, belek, betonu podkładowego oraz w elementach przegubowych. Model liniowo sprężysty bazuje na prawie Hooke’a.

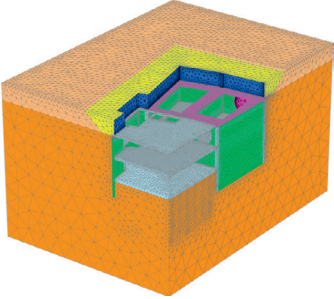
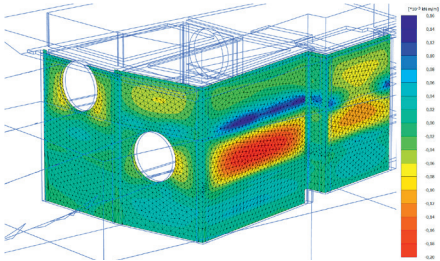
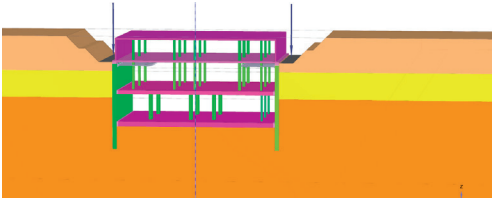
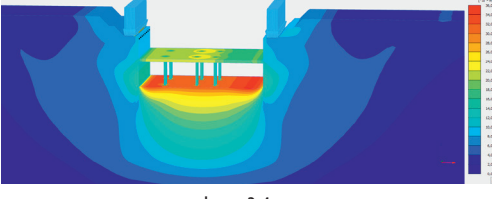
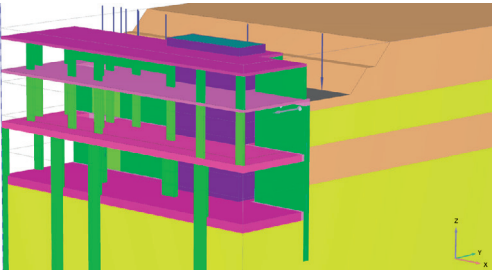
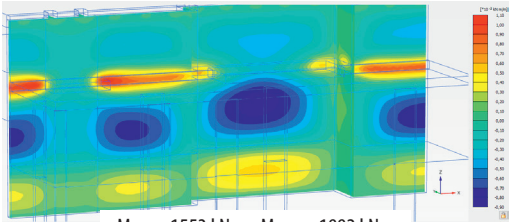
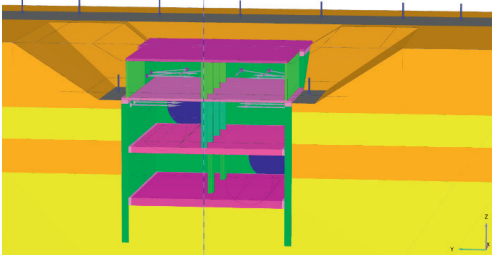
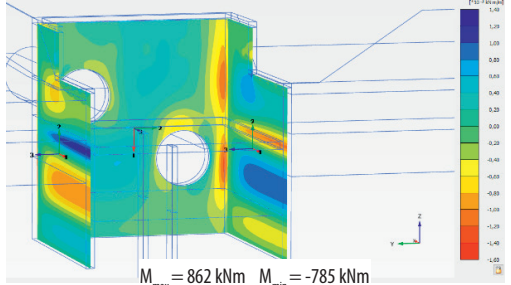
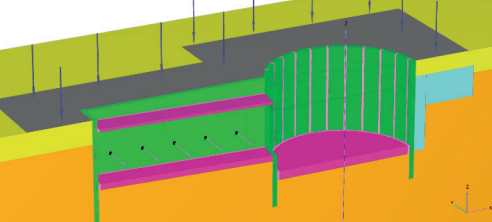
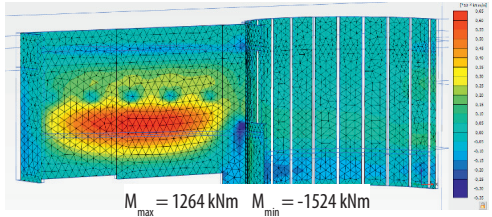
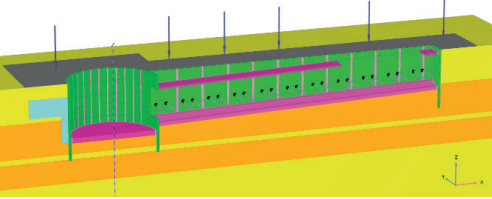
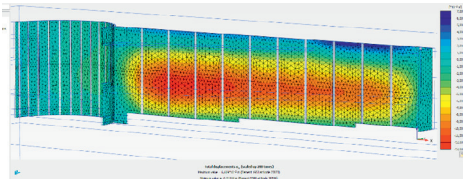
W tab. 1 zestawiono widok przestrzennych modeli numerycznych wraz z wybranymi wynikami.

W celu satysfakcjonującego odwzorowania pracy konstrukcji istotne jest nie tylko zastosowanie zaawansowanych modeli numerycznych. Projektant musi podjąć też szereg decyzji, dotyczących chociażby modelowania połączeń poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Dla samych ścian szczelinowych ważne jest też odpowiednie wykreowanie połączenia pomiędzy jej sekcjami realizacyjnymi i zbrojeniowymi, ponieważ z uwagi na ograniczenia technologiczne nie jest możliwe zachowanie ciągłości zbrojenia na długości ścian. Przerwy pomiędzy kosztami zbrojenio- wymi sięgają nawet 50 cm, a na stykach sekcji nie ma nawet ciągłości strukturalnej betonu, co może wpłynąć na rzeczywiste zachowanie obudowy. Modelowanie „pełnej” ściany o stałej sztywności może prowadzić przykładowo do uzyskania zaniżonych predykcji przemieszczeń i deformacji. W związku z powyższym zaleca się, aby w kluczowych miejscach obiektu, które mogą być szczególnie narażone na różnice przemieszczeń, stosować odpowiednie metody symulujące sekcijną budowę ścian szczelinowych. W przypadku projektu LWK zdecydowano, że takim miejscem są okrągłe obudowy komór K21 i K22. Jest to niewątpliwie szczególnie element konstrukcyjny, gdyż jego część jest projektowana dosłownie po to, by została zniszczona przez TBM. Z uwagi na zastosowanie obudowy na planie okręgu i zmobilizowanie znacznej obwodowej siły normalnej możliwe było zredukowanie niezbędnego zbrojenia do minimum i zrezygnowanie ze wszelkich rozpór na wysokości komory. W przypadku zastosowanych elementów objętościowych zdecydowano, że modelowanie przegubów można wykonać poprzez wprowadzenie w ścianę wąskich 50 cm lameli z materiału o obniżonej sztywności z modułem Younga  $E = 1,0$  GPa, które widoczne są zarówno na przedstawionych modelach, jak i w wynikach analiz.

Nawiązując z kolei do tezy, że modelowanie konstrukcji tuneli podziemnych dotyczy problematyki z pogranicza zagadnień geotechnicznych i konstrukcyjnych, niezwykle



Tab. 1. Zestawienie widoków modeli wraz z wybranymi wynikami

|                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>Widok modelu numerycznego sekcji „A”<br/>w fazie po wykonaniu kondygnacji „-1” i zasypaniu ścian</p>                                                                  |  <p>Momenty zginające w ścianach szczelinowych w fazie docelowej<br/>po odbudowie zwierciadła wody gruntowej</p>                                                      |
|  <p>Widok podstawowego modelu numerycznego sekcji „B” i „C” w fazie po wykonaniu kondygnacji „-1”</p>                                                                     |  <p><math>d_{\max} = 3,4 \text{ cm}</math><br/>Przemieszczenia całkowite w fazie wykupu docelowego</p>                                                                |
|  <p>Widok modelu numerycznego sekcji „B” i „C” w miejscu z klatką schodową<br/>oraz dwoma sekcjami teowymi ścian szczelinowych w fazie po wykonaniu kondygnacji „-1”</p> |  <p><math>M_{\max} = 1553 \text{ kNm}</math> <math>M_{\min} = -1882 \text{ kNm}</math><br/>Momenty zginające w ścianach szczelinowych w fazie wykupu docelowego</p> |
|  <p>Widok modelu numerycznego sekcji „D” w fazie po wykonaniu kondygnacji „-1”</p>                                                                                      |  <p><math>M_{\max} = 862 \text{ kNm}</math> <math>M_{\min} = -785 \text{ kNm}</math><br/>Momenty zginające w ścianach szczelinowych w fazie wykupu docelowego</p>   |
|  <p>Widok modelu numerycznego komory K21 w fazie po wykonaniu płyty fundamentowej</p>                                                                                   |  <p><math>M_{\max} = 1264 \text{ kNm}</math> <math>M_{\min} = -1524 \text{ kNm}</math><br/>Momenty zginające w ścianach szczelinowych w fazie wykupu docelowego</p> |
|  <p>Widok modelu numerycznego komory K22 w fazie po wykonaniu płyty fundamentowej</p>                                                                                   |  <p><math>d_{\max} = 1,6 \text{ cm}</math><br/>Przemieszczenia ścian szczelinowych w kierunku osi Y w fazie wykupu docelowego</p>                                   |

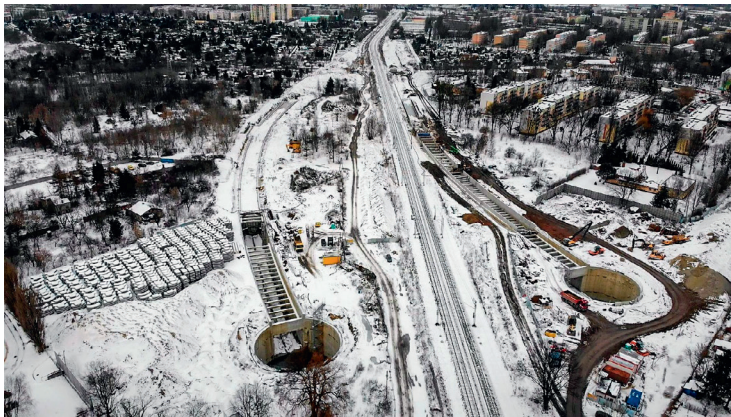




Fot. 1. Stacja Koziny z lotu ptaka



Fot. 2. Przebieg TBM przez stację Koziny



Fot. 3. Komora K22 (z lewej) i K21 (z prawej) z lotu ptaka



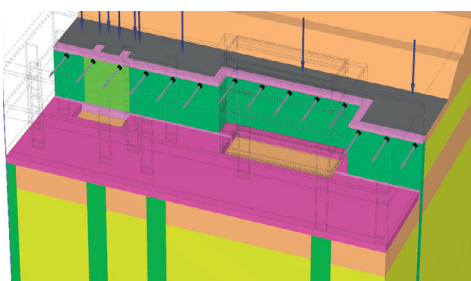
Fot. 4. Realizacja robót w komorze K22

► istotnym elementem modelu numerycznego jest odpowiednie połączenie ze sobą wszelkich elementów konstrukcji. W przypadku projektu LWK analizie sposobu łączenia podlegały m.in. węzły ściana szczelinowa – strop. Połączenie to można w modelu wykonstruować na wiele sposobów, w zależności od rodzaju stosowanych elementów. W przypadku elementów typu *plate* sytuacja jest częściowo uproszczona, gdyż sposób łączenia można zadać w sposób automatyczny – jako utwierdzenie, przegub lub brak łączenia. Można również zwalniać poszczególne stopnie swobody – np. umożliwić ruch tylko w jednym kierunku. Trudniejsza jest sytuacja, gdy zdecydowano się na modelowanie elementów objętościowych. Wówczas łączone ze sobą węzły poszczególnych objętości elementów konstrukcyjnych wchodzące w skład

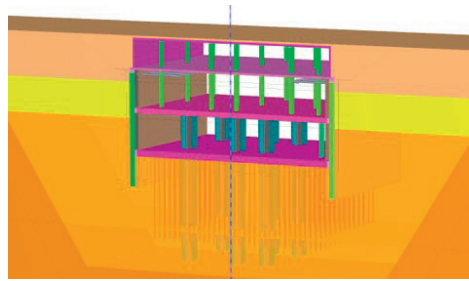
siatki elementów skończonych są ze sobą połączone na stałe i domyślnie „utwierdzone”. Projektanci stosują różne zabiegi symulujące połączenia przegubowe pomiędzy elementami objętościowymi. W przypadku modeli wykonanych na potrzeby projektu LWK zdecydowano się na zastosowanie materiału o obniżonej sztywności z modułem Younga  $E = 0,10 \cdot E_{\text{ściany}}$ . Wstawki te zastosowano na połączeniach strop – ściana jako opaska na krawędzi stropu lub jako oczep ściany. Sytuację tę przedstawiono na poniższym rysunku, gdzie materiał o obniżonej sztywności oznaczono jaśniejszym różowym kolorem. Dzięki takiemu rozwiązaniu nie udało się uzyskać pełnego przegubu, lecz sytuację pośrednią między utwierdzeniem a połączeniem przegubowym, co zasadniczo ma miejsce również w rzeczywistości.

Kolejnym kluczowym elementem analizy numerycznej wykonanej na potrzeby stacji Koziny była interpretacja sił w baretach. W fazach budowlanych miały one stanowić podpory dla stropów obiektu, w tym głównego stropu rozporowego. W fazie docelowej, po odbudowie zwierciadła wody gruntowej, są one jednak częścią systemu kotwienia płyty fundamentowej na wypór. W związku z powyższym bary były odpowiednio zwymiarowane na wyciąganie. Niezbędne zatem okazało się odpowiednie oszacowanie sił normalnych w baretach oraz mikropalach, stanowiących uzupełnienie systemu kotwiącego. Należy tutaj dodać, że bary zostały wykonane na samym początku realizacji robót, natomiast mikropale kotwiące były przewidziane do realizacji z dna wykopu fundamentowego, pod głównym stropem rozporającym, jako ostatni zakres robót geotechnicznych. Na rys. 5 zaprezentowano widok podstawowego modelu dla części „B” i „C” uwzględniający system kotwienia stacji Koziny.

Aby odpowiednio oszacować siły w baretach wprowadzonych do modelu jako elementy objętościowe, konieczne było poprawne zdefiniowanie elementów typu *interface*. Są to specjalne elementy kontaktowe stosowane pomiędzy elementami sztywnymi i gruntem, które określają współpracę pomiędzy nimi. Głównym parametrem charakteryzującym elementy *interface* jest współczynnik redukcji wytrzymało-

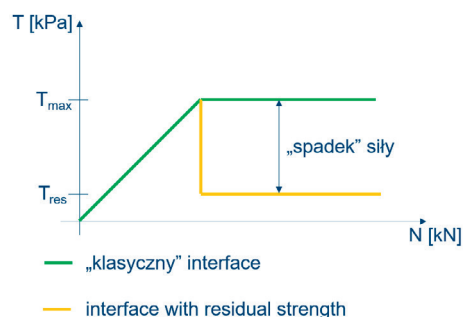


Rys. 4. Widok modelu z klatką schodową w części „B” i „C” w fazie wykonania stropu nad kondygnacją „-3”



Rys. 5. Widok modelu podstawowego w części „B” i „C” z widocznym systemem kotwienia płyty fundamentowej





Rys. 6. Zależność T/N elementów typu *interface*

Tab. 2. Porównanie wyników dla różnych rodzajów elementu typu *interface*

|                                                                                     |                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Mapa przemieszczeń pionowych wywołanych wyporem – klasyczny <i>interface</i></p> | <p>Mapa przemieszczeń pionowych wywołanych wyporem – <i>interface with residual strength</i></p> |
| <p>Rozkład tarcia na pobocznicę baret – klasyczny <i>interface</i></p>              | <p>Rozkład tarcia na pobocznicę baret – <i>interface with residual strength</i></p>              |
| <p>Siły normalne w mikropalach – klasyczny <i>interface</i></p>                     | <p>Siły normalne w mikropalach – <i>interface with residual strength</i></p>                     |
| <p>Siły normalne w baretach – klasyczny <i>interface</i></p>                        | <p>Siły normalne w baretach – <i>interface with residual strength</i></p>                        |

► ści  $R_{inter}$ . Wartość tę można ustawić jako 1,0 (połączenie sztywne) lub mniejszą od 1,0 a większą od 0 (tarcie pomiędzy elementami). Elementy te domyślnie pracują jako sprężysto-plastyczne, natomiast można im również określić zachowanie z obniżeniem wytrzymałości do wartości rezydualnej. Sposób pracy tych elementów przedstawiono na rys. 6.

Na przedstawionym wykresie można zauważyć, że przyrost siły normalnej w przypadku „klasycznego” elementu *interface* jest stały (maksymalny) po osiągnięciu granicznej wartości tarcia określonej przez parametry otaczającego gruntu. W przypadku charakterystyki *interface with residual strength* po osiągnięciu maksymalnej wartości tarcia następuje „ścięcie” elementu kontaktowego i utrzymywana jest stała, obniżona (rezydualna) wartość tarcia. Różnica przyrostu siły może być zatem znacząca w zależności od przyjętych parametrów zarówno gruntu jak i zakładanych wartości  $R_{inter}$ .

Proces modelowania i analizy systemu kotwienia odbywał się w sposób iteracyjny przy współpracy z projektantem konstrukcji, który dysponował pełnym modelem konstrukcyjnym stacji. Dzięki odpowiedniemu podejściu do zagadnienia wyporu udało się ustalić rozsądne parametry elementu *interface* i uzyskać siły normalne działające zarówno na baretę, jak i mikropale. W tab. 2 przedstawiono porównanie wybranych wyników analiz dla elementów *interface* modelowanych w sposób „klasyczny” i z wytrzymałością rezydualną.

Wynikiem zastosowania elementu *interface* z wytrzymałością rezydualną było przede wszystkim ograniczenie sił normalnych w baretach i przeniesienie ich na mikropale. Całkowita suma sił wyciągających wywołanych wyporem oczywiście pozostała niezmienna, natomiast zostały one rozłożone w sposób bardziej równomierny, zgodny z oczekiwaniami i obliczeniami modelu konstrukcyjnego stacji.

Geotechniczna analiza numeryczna dowolnego obiektu budowlanego może przynieść wymierne korzyści przekładające się przykładowo na wynik finansowy danej budowy. Niemniej jednak jest to podejście, które wymaga poświęcenia mnóstwa czasu na poprawne i optymalne wykonanie modelu obliczeniowego oraz przeprowadzenie iteracyjnych analiz. W modelach numerycznych na każdym kroku napotkać można

jakiś specyficzny problem, który wymaga indywidualnego podejścia. Co więcej, często można znaleźć się w sytuacji, w której istnieje kilka poprawnych rozwiązań. Projektant musi wybrać te, które wprowadzi ostatecznie w życie, prezentując w dokumentacji projektowej. W związku z powyższym zalecane jest ostrożne i przemyślane podejście do obli-

czeń numerycznych, których wyniki należy traktować jak inżynierski drogowskaz. Trzeba jednak przyznać, że postęp inżynierii i stosowanie coraz to odważniejszych rozwiązań wymuszają użycie zaawansowanych narzędzi, aby móc w odpowiedni sposób oszacować zachowanie projektowanej konstrukcji i uniknąć potencjalnych błędów. □