

WYKORZYSTANIE METOD NUMERYCZNYCH DO PROJEKTOWANIA KONSTRUKCJI OPOROWEJ W GRUNTACH MINERALNYCH

Simon Rabarijoely✉, Łukasz Stolec, Jacek Bąkowski

Inżynierii Lądowej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia obiekt inżynierski posadowiony na gruntach mineralnych. Pokazano w nim sposób projektowania ścian szczelinowych oraz ich wykorzystania jako konstrukcji oporowej. Konstrukcja ta stanowiła zabezpieczenie wykopu drogi ekspresowej S8 – Trasy Armii Krajowej w Warszawie. Celem artykułu jest analiza stateczności obudowy głębokiego wykopu. Uwzględniając kolejne fazy realizacji inwestycji, oszacowano przemieszczenia ściany szczelinowych metodą numeryczną za pomocą programu komputerowego Plaxis. Wyniki obliczonych przemieszczeń pionowych i poziomych oraz wypiętrzenia dna wykopu pokazano w postaci izolinii oraz poddano krytycznej dyskusji.

Słowa kluczowe: ściana oporowa, grunt spoisty, analiza numeryczna, MES

WSTĘP

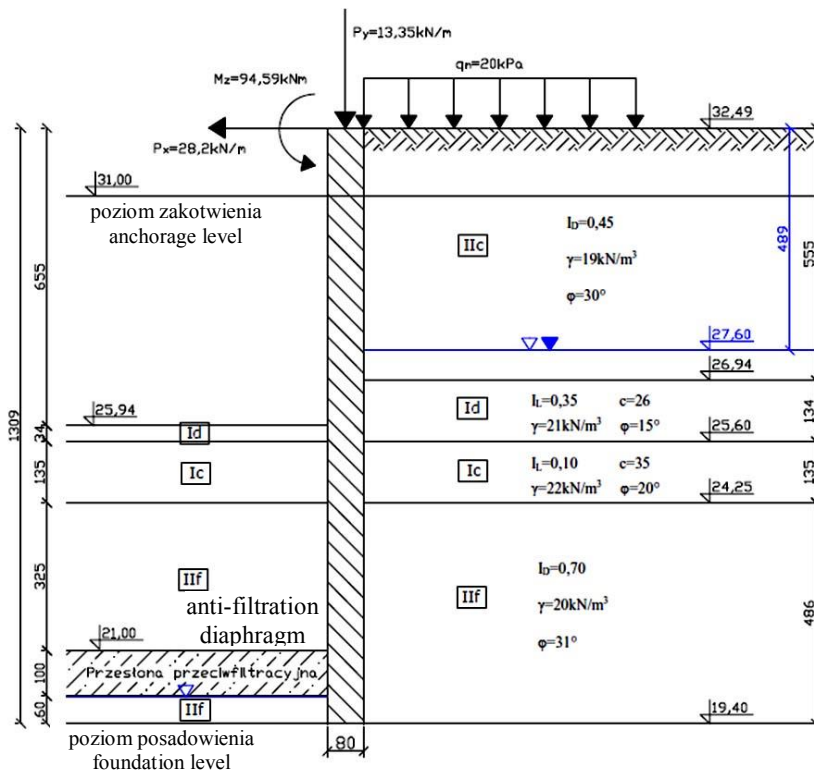
Powszechnie stosowanym rozwiązaniem obecnie stają się ściany szczelinowe, które w połączeniu ze stropami oraz z płytą fundamentową tworzą obudowę wykopu lub fundament skrzyniowy. Stanowią one niejednokrotnie jedyną alternatywę dla klasycznych metod fundamentowania w przypadku, gdy nie można zastosować tradycyjnego wykopu ze względu na ograniczoną powierzchnię (Gryczmański, 1995; Jarominiak, 2000; Siemińska-Lewandowska, 2001, 2006; Grzegorzewicz, 2005). Ściany szczelinowe mają szerokie zastosowanie jako obudowy głębokich wykopów, przegrody szczelne, fundamenty wysokich budynków z podziemnymi o kilku kondygnacjach, są coraz częściej stosowane w budownictwie komunikacyjnym przy budowie tuneli oraz dróg przebiegających poniżej powierzchni terenu. Główną zaletą tego typu konstrukcji jest to, że umożliwiają realizację głęboko posadowionych fundamentów bez konieczności

wykonywania szerokoprzestrzennych wykopów. Nie wymagają one dużych placów budowy, mogą być wykonywane w bliskim sąsiedztwie istniejących obiektów. Wszystkie wymienione czynniki sprawiają, że ściany szczelinowe stanowią dobre i często jedyne możliwe do realizacji rozwiązanie w dużych miastach o gęstej zabudowie.

MATERIAŁ I METODY

Do analizy ściany szczelinowej przyjęto segment SR-02 o długości 20 m (rys. 1) położony między osiami 2 i 3 (km 8+430 do km 8+450). Ściany szczelinowe na tym odcinku mają grubość 80 cm i są posadowione na głębokości ok. 13 m. W podłożu zalegają grunty piaszczyste (głównie piaski drobne i pylaste) z przewarstwieniami gruntów spoistych w postaci pyłów i glin piaszczystych. Obliczenia wykonano dla ścian strony lewej, ponieważ w tym obszarze występują bardziej zróżnicowane warunki

a



b



Rys. 1. Trasa S8 – odcinek Radiowo: a – schemat obliczeniowy; b – prace przy wykonaniu płyty dennej (Stolec, 2010)
Fig. 1. Route S8 – Radiowo section: a – calculation scheme; b – work on making the bottom plate (Stolec, 2010)

gruntowe (wspomniane przewarstwienia gruntów spoistych). Poziom wody gruntowej znajduje się na głębokości ok. 5,8 m p.p.t. (Profil Grupa ARCADIS Polska, 2005; Keller Polska Sp. z o.o. – Specjalistyczne techniki fundamentowania, 2008). Z uwagi na skomplikowany schemat statyczny analizę przemieszczeń ścian szczelinowych przeprowadzono za

pomocą programu Plaxis, wersja 8.5.0.1133, licencja dla Katedry Geotechniki SGGW (Brinkgreve, Swolfs i Engine, 2002). Program działa z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) oraz modelu gruntu z warunkiem Coulomba–Mohra (tab. 1, 2, 3, 4). Przemieszczenia wyznaczono z uwzględnieniem poszczególnych faz realizacji obiektu.

Tabela 1. Parametry gruntowe do „interfejsu” i do modelu Mohra–Coulomba

Table 1. Soil parameters for interfaces and for Mohr–Coulomb model

| Warstwa Layer | Warunek odpływu Flow condition | γ_{unsat} [kN·m ⁻³] | γ_{sat} [kN·m ⁻³] | k_x [m·24 h ⁻¹] | k_y [m·24 h ⁻¹] | ν [-] | E_{ref} [kN·m ⁻²] | c'_{ref}, c_u [kN·m ⁻²] | ϕ'_{ref}, ϕ_u [°] | Ψ [°] |
|------------------|---|---|---|----------------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------------|--|------------------------------|---------------|
| Iic | z odpływem drained | 19,0 | 189,0 | 8,640 | 8,640 | 0,30 | 42 000,0 | 0,1 | 30,0 | 0,0 |
| Id | bez odpływu undrained | 21,0 | 20,0 | 0,0864 | 0,0864 | 0,25 | 20 000,0 | 26,0 | 15,0 | 0,0 |
| Ic | bez odpływu undrained | 22,0 | 21,0 | 0,0860 | 0,0860 | 0,30 | 36 000,0 | 35,0 | 20,0 | 0,0 |
| IIf | z odpływem drained | 20,0 | 19,0 | 8,640 | 8,640 | 0,30 | 65 000,0 | 0,1 | 31,0 | 0,0 |
| Zasyпка Fill | z odpływem drained | 18,0 | 17,0 | 8,640 | 8,640 | 0,30 | 65 000,0 | 0,1 | 35,0 | 0,0 |

Tabela 2. Zastawienie danych materiałowych – płyty

Table 2. List of data set materials – foundation slabs

| Rodzaj konstrukcji Construction type | Materiał Material | EA [kN·m ⁻¹] | EI [kNm ² ·m ⁻¹] | W [kN·m ⁻³] | ν [-] | Mp [kNm·m ⁻¹] | Np [kN·m ⁻¹] |
|---|----------------------|-------------------------------|--|------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Ściana Wall | sprężysty elastic | $2,56 \cdot 10^7$ | $1,364 \cdot 10^6$ | 20,0 | 0,20 | $1,0 \cdot 10^{15}$ | $1,0 \cdot 10^{15}$ |
| Płyta denna Bottom plate | sprężysty elastic | $2,56 \cdot 10^7$ | $1,364 \cdot 10^6$ | 20,0 | 0,20 | $1,0 \cdot 10^{15}$ | $1,0 \cdot 10^{15}$ |
| Przesłona Diaphragm | sprężysty elastic | $1,0 \cdot 10^7$ | $8,34 \cdot 10^5$ | 20,0 | 0,20 | $1,0 \cdot 10^{15}$ | $1,0 \cdot 10^{15}$ |

Tabela 3. Zastawienie danych materiałowych – kotwy

Table 3. List of data set materials – anchors

| Rodzaj konstrukcji Construction type | EA [kN·m ⁻¹] | $ F_{max,comp} $ [kN·m ⁻¹] | $ F_{max,tens} $ [kN·m ⁻¹] |
|---|-------------------------------|---|---|
| Cięgno Tie | 1,3333·10 ⁵ | 6,6667·10 ¹⁴ | 6,6667·10 ¹⁴ |

Tabela 4. Zastawienie danych materiałowych – buława

Table 4. List of data set materials – lower anchor bolt

| Rodzaj konstrukcji Construction type | Materiał Material | EA [kN·m ⁻¹] | Np [kN·m ⁻¹] |
|---|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Buława Lower anchor bolt | sprężysty elastic | 1,0·10 ⁵ | 1,0·10 ¹⁰ |

Obliczenia w programie Plaxis przeprowadzono z uwzględnieniem wszystkich etapów robót. Zostały one podzielone na następujące fazy:

- faza 1 – wykonanie ścian szczelinowych oraz wieńca żelbetowego,
- faza 2 – wykonanie przesłony przeciwfiltracyjnej,
- faza 3 – wykonanie wykopu do poziomu zakotwienia oraz wykonanie kotwi gruntowych,
- faza 4 – odwodnienie gruntu ograniczonego ścianami szczelinowymi i przesłoną przeciwfiltracyjną,
- faza 5 – wykonanie wykopu do poziomu projektowanego,
- faza 6 – wykonanie płyty dennej,
- faza 7 – wykonanie 2,5 m zasyпки z gruntu niespoistego, w której zostaną wykonane stały drenaż oraz konstrukcja nawierzchni drogowej.

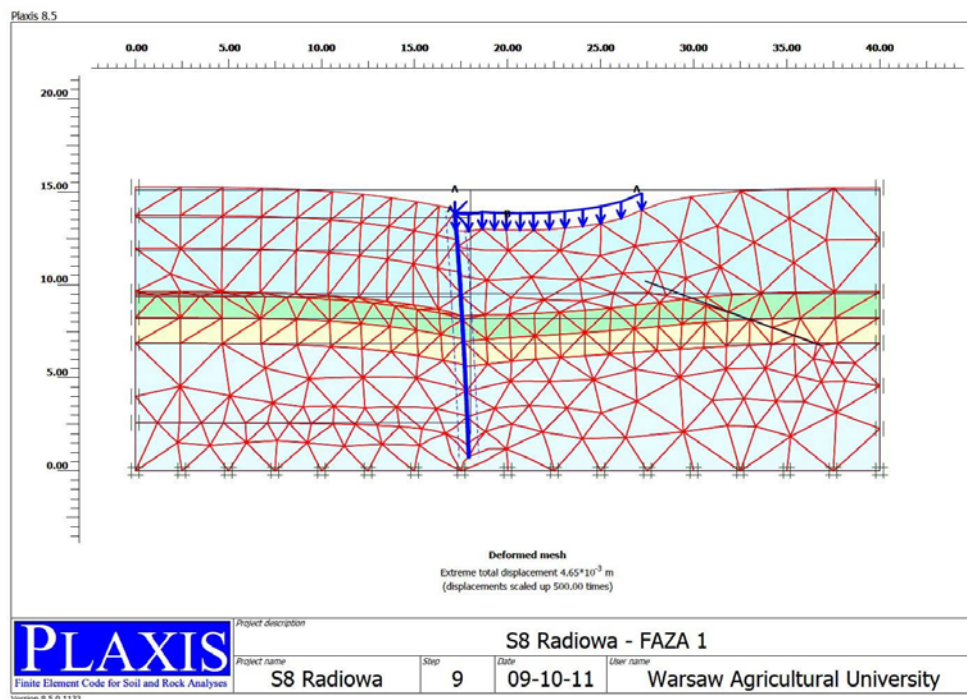
Według danych projektowych całkowita długość zakotwienia wynosi 20 m, nośność kotew jest równa 600 kN, a kąt nachylenia względem poziomu wynosi 20°. Z powodu braku dokładniejszych danych przyjęto w obliczeniach komputerowych długość buławy nośnej równą 10 m oraz długość cięgna kotwy równą 10 m (w sumie 20 m). Nośność cięgna (EA) na potrzeby programu Plaxis przyjęto na poziomie 2,6·10⁷ kN·m⁻¹. Ze względu na skomplikowanie schematu statycznego analizę przemieszczeń ścian szczelinowych przeprowadzono za pomocą programu komputerowego Plaxis. Założono izotropowość warstwy $k_x = k_y$, parametry wytrzymałościowe przedstawione w tabeli 1 są parametrami zarówno z odpływem,

jak i bez odpływu w zależności od rodzaju gruntów (grunty niespoiste lub spoiste). Rozkład ciśnienia wody w porach w gruncie na tym obiekcie wyniósł 82,0 kPa (rzędna 19,40–27,60).

ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

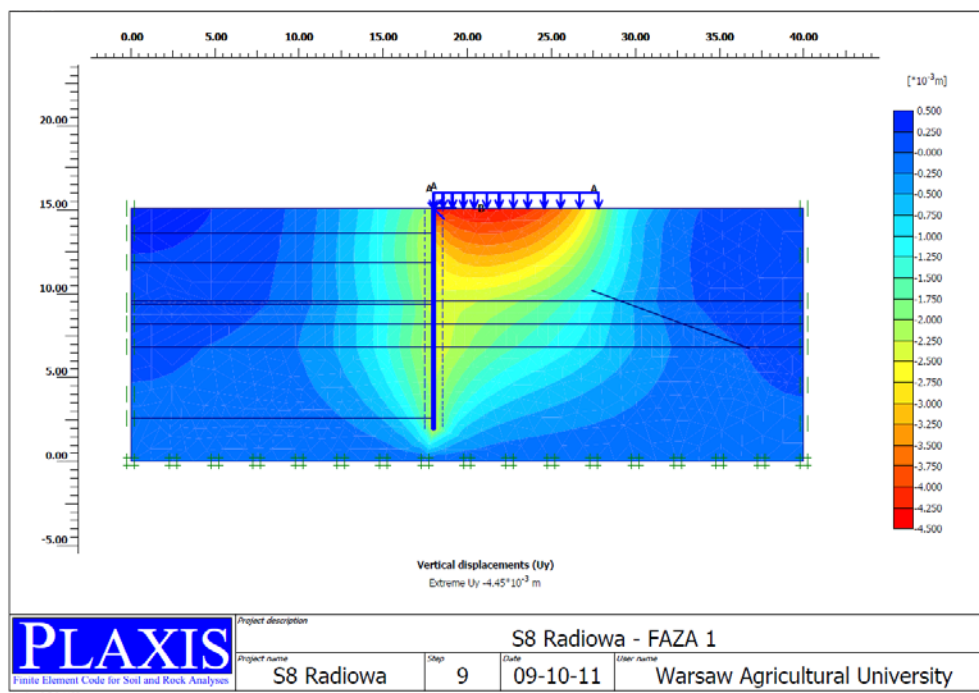
Wyniki obliczeń oraz zestawienie przyjętych w obliczeniach parametrów gruntu i materiałów dla ściany, płyty dennej oraz kotwi gruntowych przedstawiono na rysunkach 2–13.

Na podstawie obliczeń wykonanych programem Plaxis stwierdzono, że największe przemieszczenia ściany szczelinowej występują w koronie ściany. Przemieszczenia w poziomie posadowienia są natomiast na tyle niewielkie (nie przekraczają 5 mm), że mogą zostać pominięte. W pierwszej fazie robót, tzn. po wykonaniu ścian i wieńca, przemieszczenia korony ściany są nieznaczne i osiągają wartości: 1,61 mm przemieszczenie poziome oraz 4,45 mm pionowe. Wykonanie przesłony przeciwfiltracyjnej (faza 2) nie wpływa znacząco na zachowanie się ściany. Przyrost przemieszczeń nie przekracza 1 mm. Dopiero wykonanie wykopu do poziomu zakotwienia (faza 4) sprawia, że wartość przemieszczeń poziomych wzrasta do 4,43 mm, a pionowych do 6,79 mm. Największy wpływ na przyrost przemieszczeń ściany ma wykonanie wykopu do poziomu posadowienia płyty fundamentowej (faza 5). Przemieszczenia poziome w kierunku wykopu osiągają wartość 17,10 mm, a pionowe 16,93 mm.



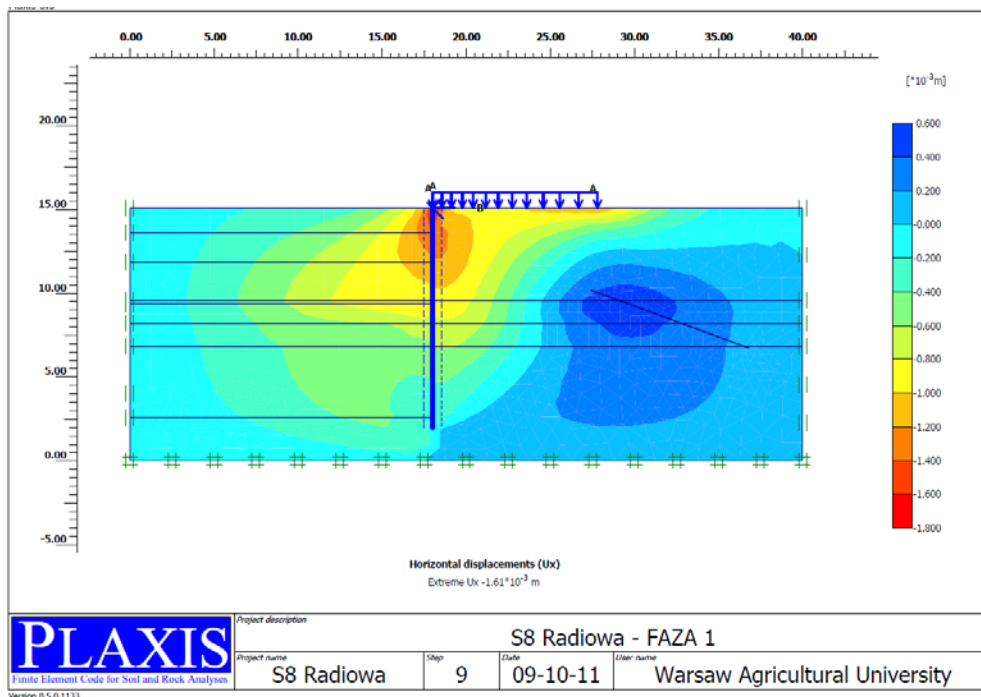
Rys. 2. Przemieszczenie węzłowe – faza 1

Fig. 2. Nodal displacement – stage 1



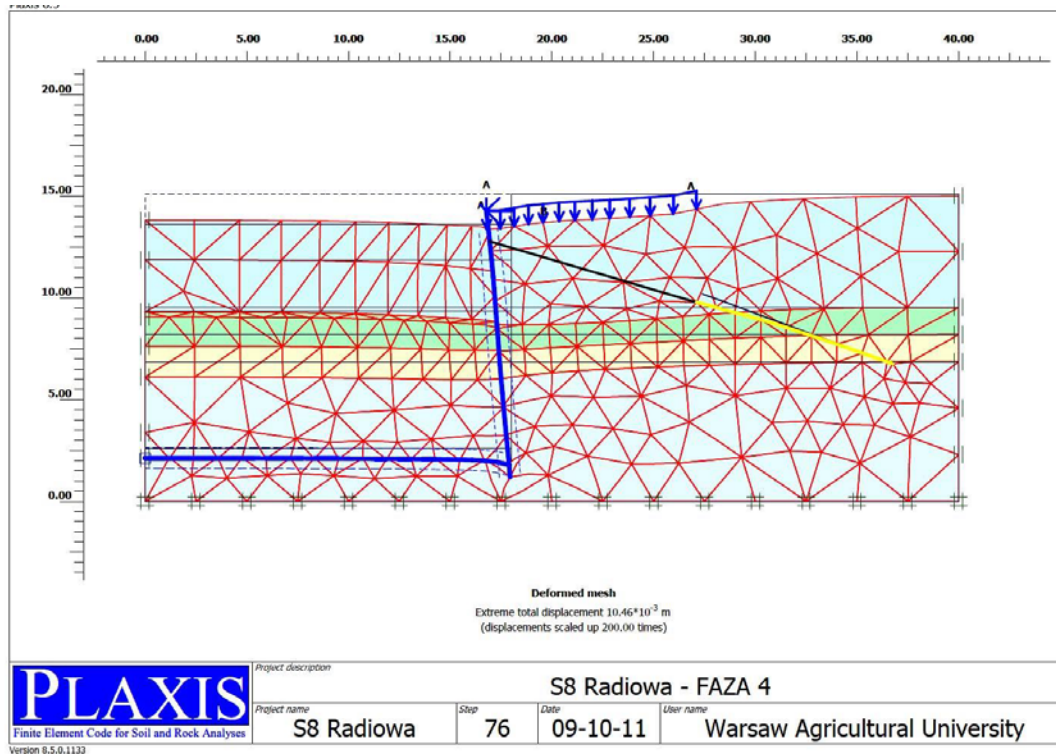
Rys. 3. Przemieszczenie pionowe – faza 1

Fig. 3. Vertical displacement – stage 1



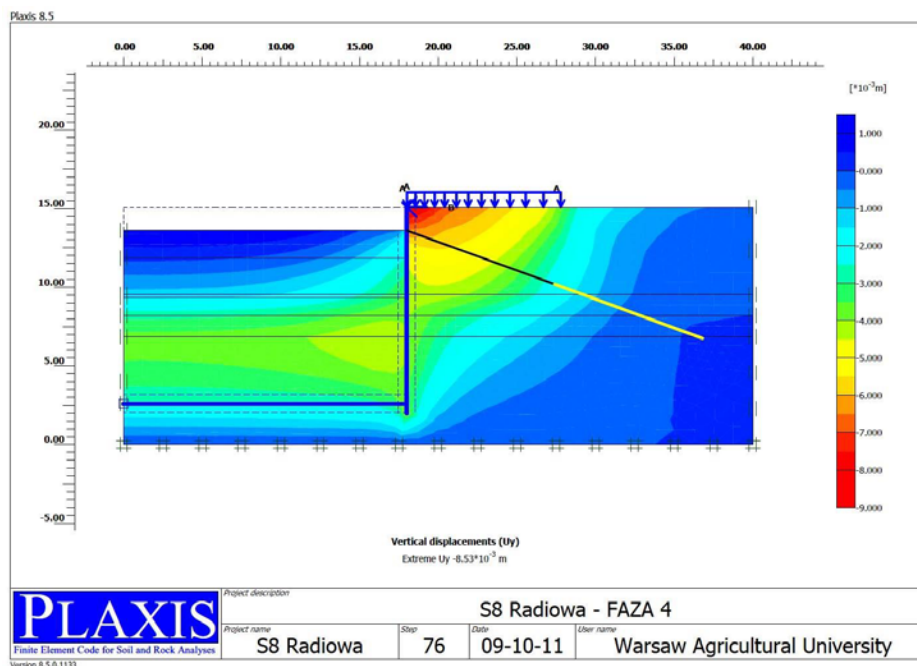
Rys. 4. Przemieszczenie poziome – faza 1

Fig. 4. Horizontal displacement – stage 1



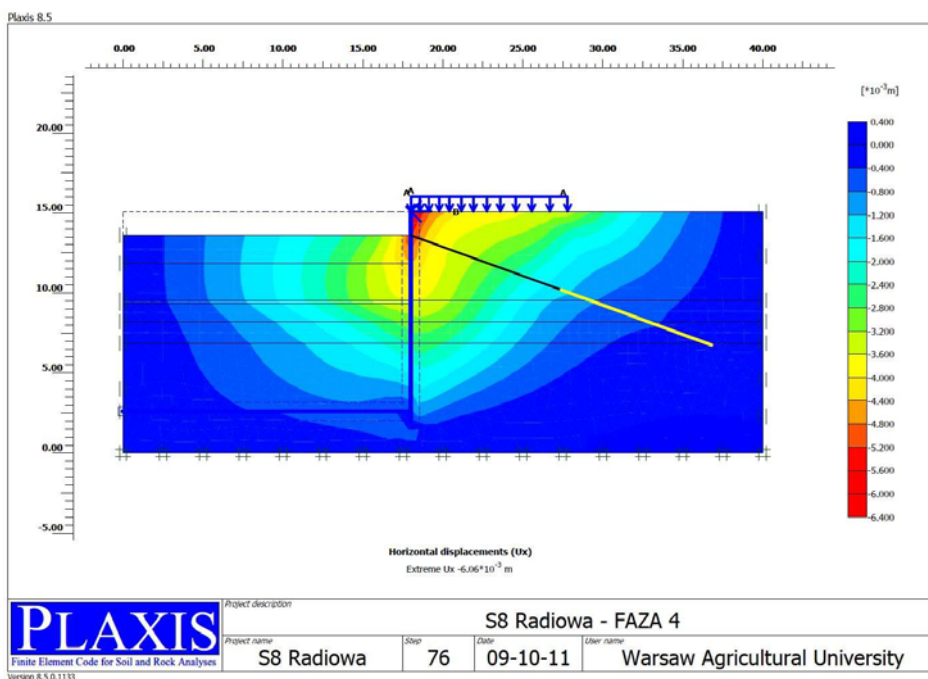
Rys. 5. Przemieszczenie węzłowe – faza 4

Fig. 5. Nodal displacement – stage 4



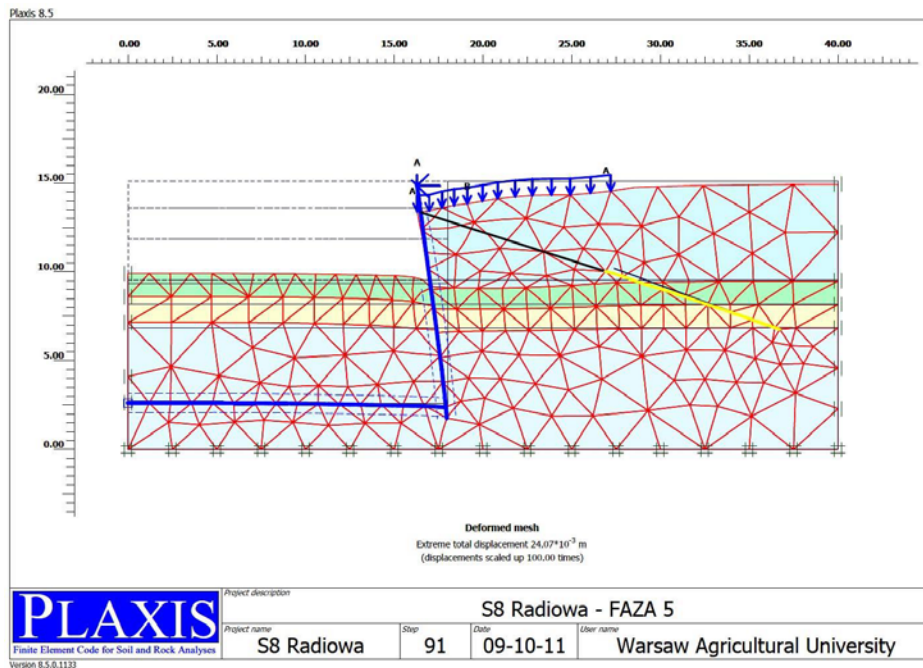
Rys. 6. Przemieszczenie pionowe – faza 4

Fig. 6. Vertical displacement – stage 4



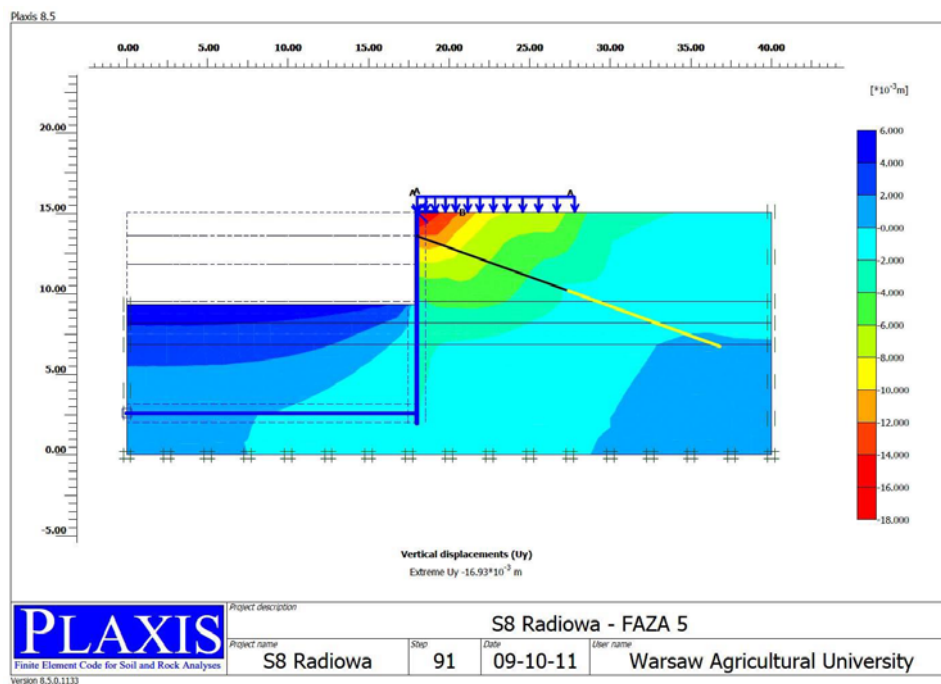
Rys. 7. Przemieszczenie poziome – faza 4

Fig. 7. Horizontal displacement – stage 4



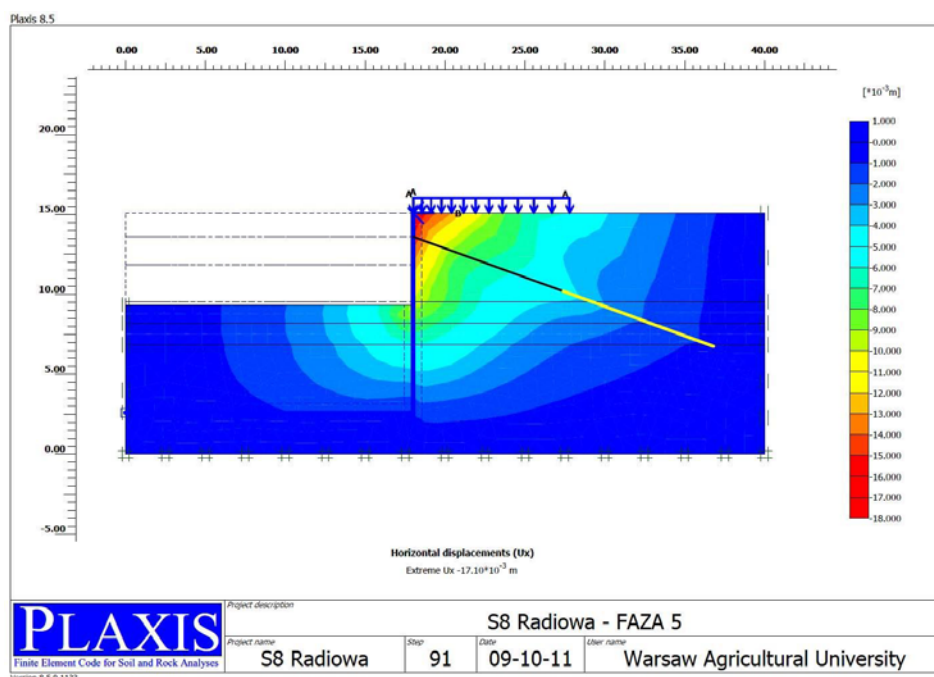
Rys. 8. Przesunięcie węzłowe – faza 5

Fig. 8. Nodal displacement – stage 5



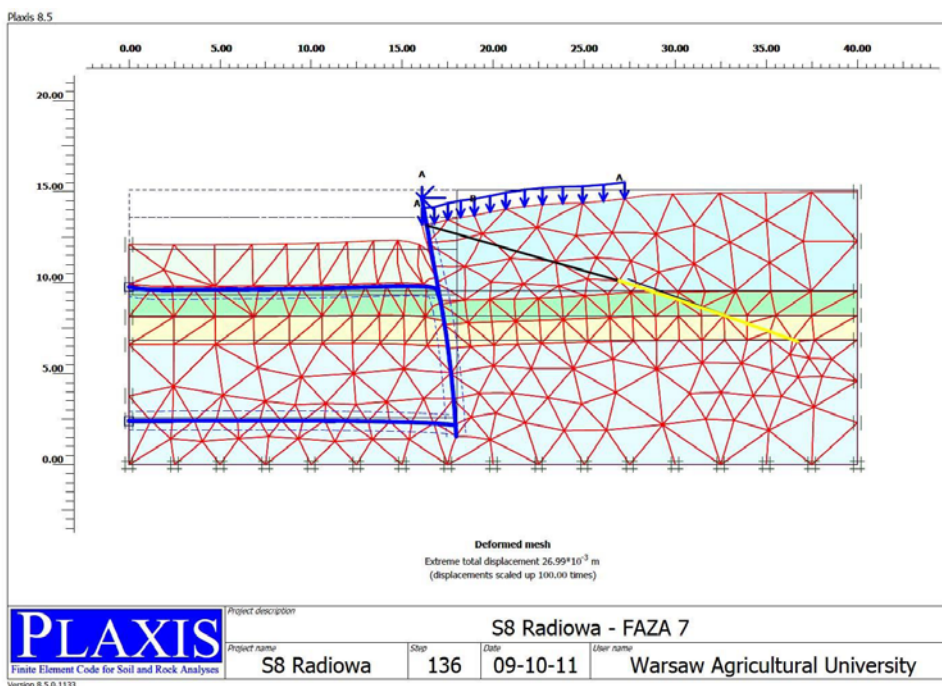
Rys. 9. Przesunięcie pionowe – faza 5

Fig. 9. Vertical displacement – stage 5



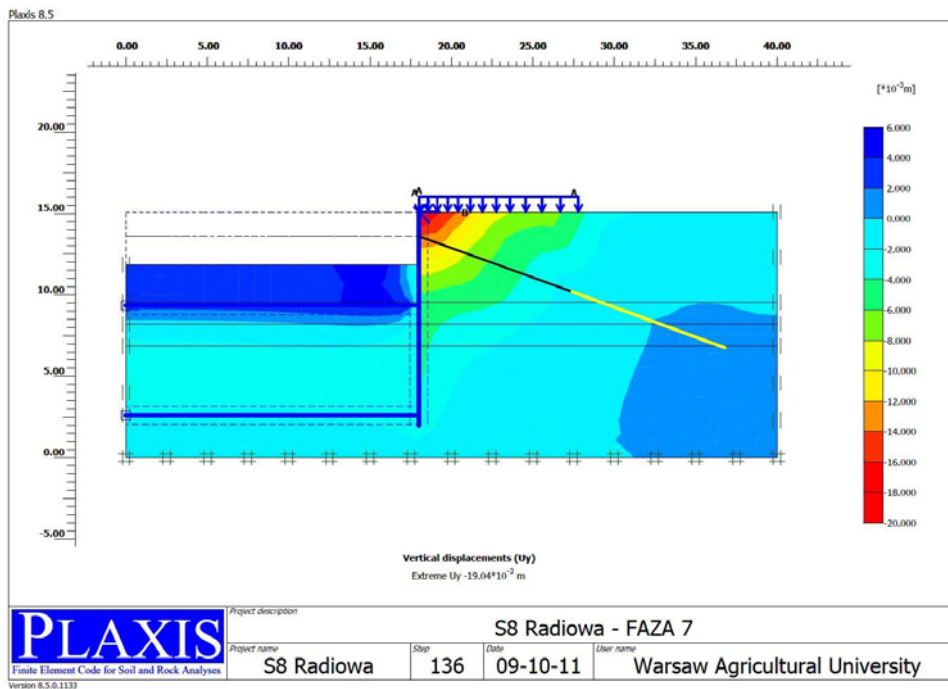
Rys. 10. Przeszczenie poziome – faza 5

Fig. 10. Horizontal displacement – stage 5



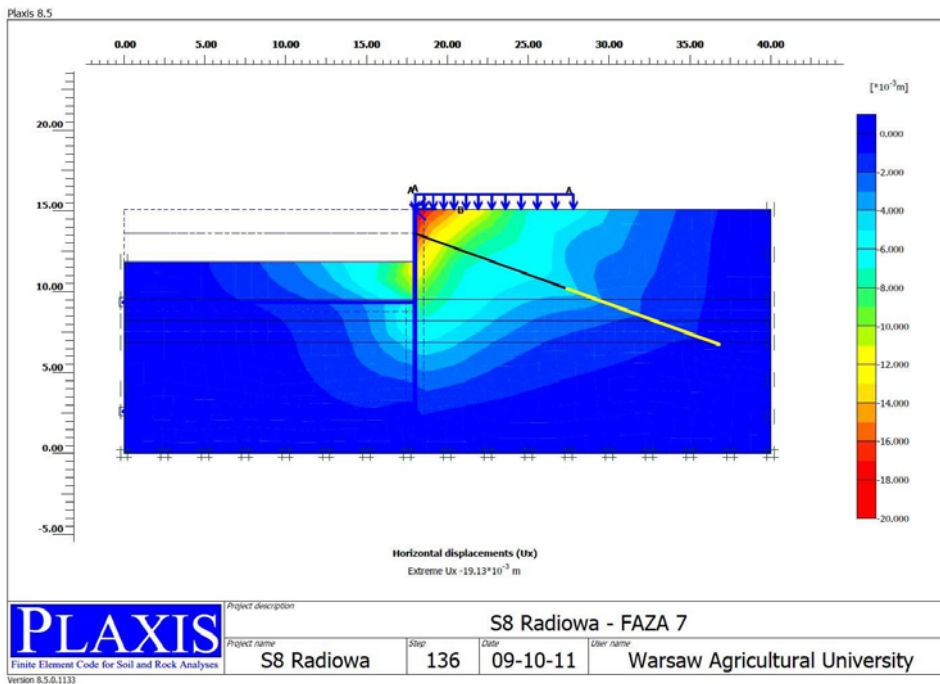
Rys. 11. Przeszczenie węzłowe – faza 7

Fig. 11. Nodal displacement – stage 7



Rys. 12. Przemieszczenie pionowe – faza 7

Fig. 12. Vertical displacement – stage 7



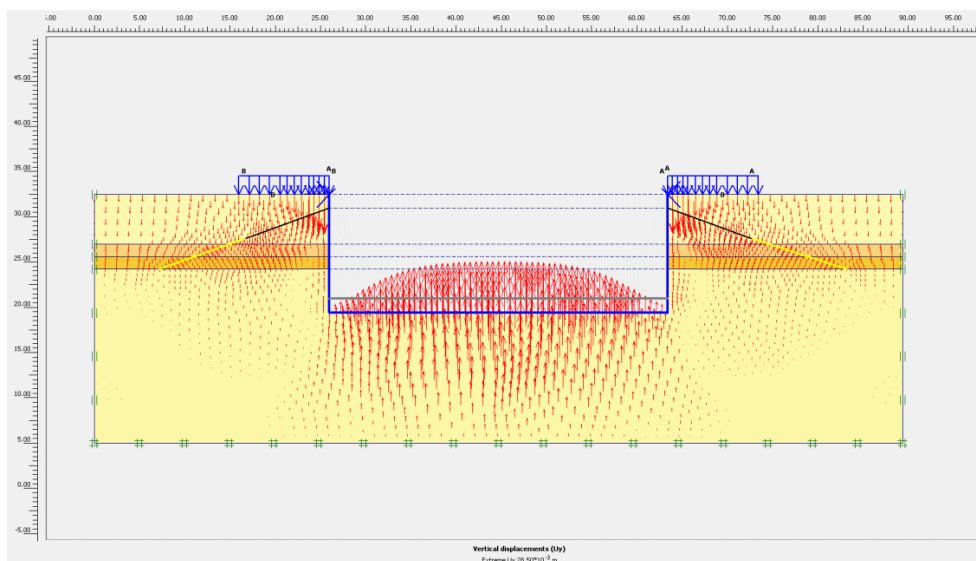
Rys. 13. Przemieszczenie poziome – faza 7

Fig. 13. Horizontal displacement – stage 7

Wyniki symulacji numerycznej w zakresie wpływu zmienności modułu sprężystości na wielkość wypiętrzania gruntu w dnie wykopu w fazie jego głębienia do docelowej głębokości pokazano na rysunkach 14–16 dla trzech wariantów zmienności modułu sprężystości (tzn. wariant 1: $E_{ref} = 65$ MPa,

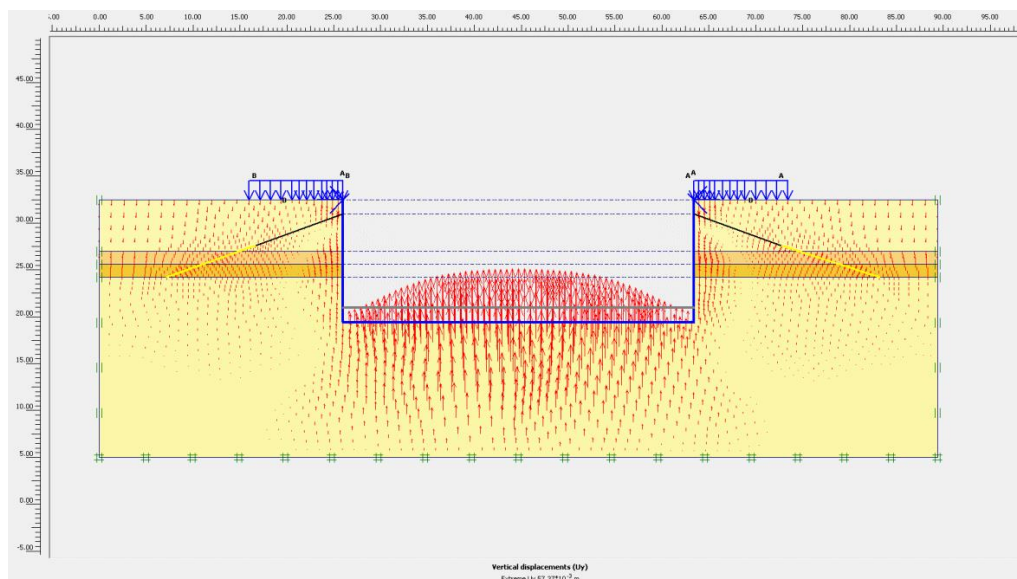
wariant 2: $0,5 E_{ref} = 32,5$ MPa oraz wariant 3: $2 E_{ref} = 130$ MPa).

Uzyskane wyniki symulacji numerycznej obrazującej wypiętrzania (przesunięcia pionowe) dna wykopu dla trzech wariantów wyniosły odpowiednio $28,50 \cdot 10^{-3}$, $57,37 \cdot 10^{-3}$ oraz $24,29 \cdot 10^{-3}$ m.



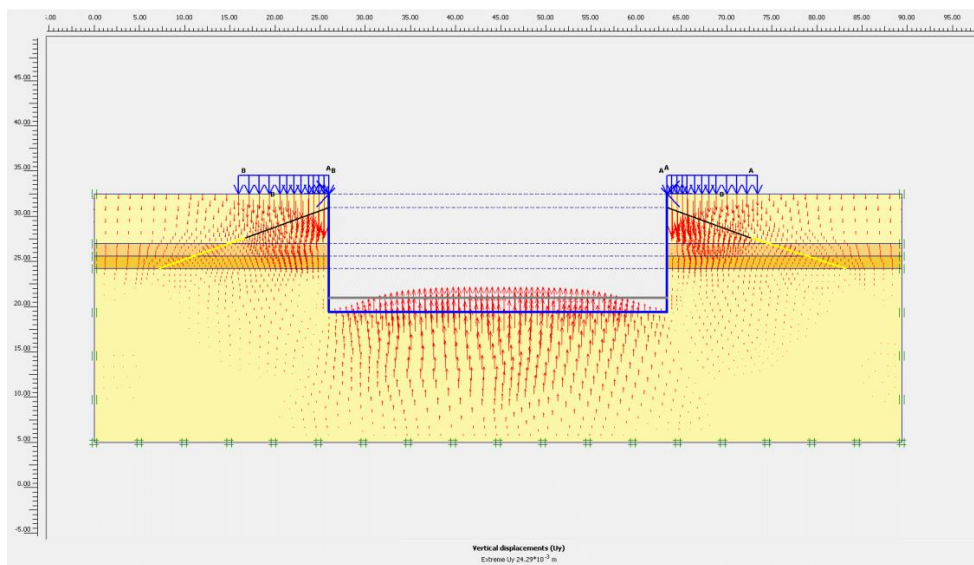
Rys. 14. Przesunięcie pionowe dna wykopu (wariant $E_{ref} = 65$ MPa)

Fig. 14. Re-uptift of the excavation bottom (variant $E_{ref} = 65$ MPa)



Rys. 15. Przesunięcie pionowe dna wykopu (wariant $E_{ref} = 32,5$ MPa)

Fig. 15. Re-uptift of the excavation bottom (variant $E_{ref} = 32.5$ MPa)



Rys. 16. Przemieszczenie pionowe dna wykopu (wariant $E_{ref} = 130$ MPa)

Fig. 16. Re-uplift of the excavation bottom (variant $E_{ref} = 130$ MPa)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza zachowania się ścian szczelinowych w kolejnych fazach budowy, którą wykonano za pomocą programu komputerowego Plaxis, wykazała, że największe przemieszczenia konstrukcji występują w koronie ściany. Największy przyrost wartości przemieszczeń stwierdzono w fazie głębienia wykopu do poziomu posadowienia płyty fundamentowej. Przemieszczenia poziome i pionowe osiągają wartości graniczne (ok. 25 mm). Wartości przemieszczeń ściany w poziomie posadowienia są minimalne. Nie stwierdzono możliwości nadmiernego osiadania ścian szczelinowych.

Występujące w podłożu gruntowym piaski o stopniu zagęszczenia $I_D = 0,7$ stanowią dobrą podstawę do posadowienia ścian szczelinowych. W dalszym ciągu badań należy dokonać wyboru bardziej złożonych modeli gruntu. W tym celu wymagane są dodatkowe badania laboratoryjne i *in situ* uwzględniające analizę ekonomiczną oraz ciągły monitoring danego obiektu.

PIŚMIENICTWO

Brinkgreve, R. B. J., Swolfs, W. M. i Engine, E. (2002). *Plaxis users manual*. Rotterdam: Balkema.

Gryczmański, M. (1995). Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów. *Studia z zakresu Inżynierii*, 40. Warszawa: Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN.

Grzegorzewicz, K. (2005). Projektowanie i wykonywanie ścian szczelinowych. *Geoinżynieria Drogi, Mosty, Tunele*, 3, 43–51.

Jarominiak, A. (2000). *Lekkie konstrukcje oporowe*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.

Keller Polska Sp. z o.o. – Specjalistyczne techniki fundamentowania (2008). *Projekt uszczelnienia gruntu pod wykopem metodą iniekcji strumieniowej na budowie Drogi Ekspresowej S8 – Trasa Armii Krajowej od węzła „Konotopa” do węzła „Prymasa Tysiąclecia”*. Odcinek Radio-wa od km 8+400 do km 9+305. Ożarów Mazowiecki.

PN-83/B-03010. Ściany oporowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.

Profil Grupa ARCADIS Polska (2005). *Dokumentacja geologiczno-inżynierska. Projekt drogowy. Droga ekspresowa S8 – Trasa Armii Krajowej od węzła „Konotopa” do węzła „Prymasa Tysiąclecia”*. Warszawa.

Siemińska-Lewandowska, A. (2001). Przemieszczenia kotwionych ścian szczelinowych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Budownictwo*, 139, 3–155.

Siemińska-Lewandowska, A. (2006). Projektowanie ścian głębokich wykopów: teoria i praktyka. *Geoinżynieria: Drogi, Mosty, Tunele*, 2, 16–22.

THE USE OF NUMERICAL METHODS TO DESIGN A RETAINING WALL STRUCTURE ON COHESIVE SOILS

ABSTRACT

This paper discusses an example of using diaphragm walls as a retaining structure that provides protection for an excavation of the S8 expressway. The way of their design is presented, which differs from the methods used for classic retaining walls or sheet piling. The purpose of the paper is to analyse the stability of the deep excavation housing on the S8 express road named Trasa Armii Krajowej in Warsaw. The calculations used the Plaxis software program. Taking into account subsequent stages of the investment, wall displacement was estimated.

Key words: retaining wall, cohesive soil, numerical analysis, FEM