

I/953

**Wpływ tunelowania tarczami zmechanizowanymi na
przemieszczenia powierzchni terenu; monitorowanie; ocena
ryzyka i kosztów w świetle II linii metra w Warszawie**



dr hab. inż. Anna Siemińska – Lewandowska

Warszawa, sierpień 2006

Wpływ tunelowania tarczami zmechanizowanymi na przemieszczenia powierzchni terenu; monitorowanie; ocena ryzyka i kosztów w świetle II linii metra w Warszawie

1. Wstęp

Drażnienie tuneli tarczami zmechanizowanymi wpływa na ruchy powierzchni terenu i w konsekwencji na zabudowę i podziemną oraz naziemną infrastrukturę techniczną.

Skutki pochodzą tarczy (osiadania) zależą od:

- warunków geotechnicznych i hydrogeologicznych (rodzaj i stan gruntu, parametry wytrzymałościowe i deformacyjne, osiadania wywołane np. odwadnianiem),
- parametrów technicznych tunelu – średnica, zagłębienie, tunel pojedynczy lub dwa tunele jednotorowe.
- typu stosowanej tarczy, (objętość tzw. niekontrolowanego ubytku urobku – dopuszczalna 1% , bezpieczna 0,5 %)
- rodzaju obudowy tunelu,
- technologii robót – czas trwania robót, iniekcje uszczelniające za obudową, iniekcje kompensacyjne i inne.

W celu ograniczenia negatywnego wpływu robót tunelowych należy:

- przeprowadzić wnikliwe rozpoznanie geotechniczne,
- ocenić analitycznie możliwość rozwoju niecki osiadań i prognozować maksymalne przemieszczenia terenu.
- opracować i wdrożyć system obserwacji powierzchni terenu, budynków i podłoża w strefie oddziaływania pochodzą tarczy.
- ocenić wpływ tunelowania tarczą na budynki i infrastrukturę techniczną znajdujące się z tunelem.

2. Ocena rozwoju niecki osiadań, prognoza przemieszczeń

Jak dotąd nie sformułowano ścisłego rozwiązania matematycznego opisującego równanie niecki osiadań nad tunelem drążonym metodami górnictwymi i tarczami zarówno ręcznymi jak i zmechanizowanymi. Wiadomo, na podstawie badań w skali naturalnej, że kształt i zasięg tej niecki w przekroju poprzecznym i wzdłużnym zależy od wielu czynników, które wymieniono we wstępie. Na podstawie wieloletnich pomiarów i obserwacji rzeczywistych obiektów prowadzonych między innymi przez Pecka (1969), Potts'a (1977), Mair'a (1983), Attewell'a (1986), O'Reilly (1991) i ostatnio Verruijt'a (2004) opracowano szereg metod empirycznych ułatwiających wstępną ocenę wartości osiadań nad tunelem i ich rozkładu. Najczęściej stosowane wzory empiryczne zawierają parametr i określający odległość osi tunelu od punktu przegięcia krzywej rozkładu normalnego, definiującej kształt niecki osiadań (rys. 1). Rozkład osiadań opisany krzywą rozkładu normalnego pierwszy opisał Peck następującym wzorem:

$$w = w_{\max} \exp \frac{-y^2}{2i^2}$$

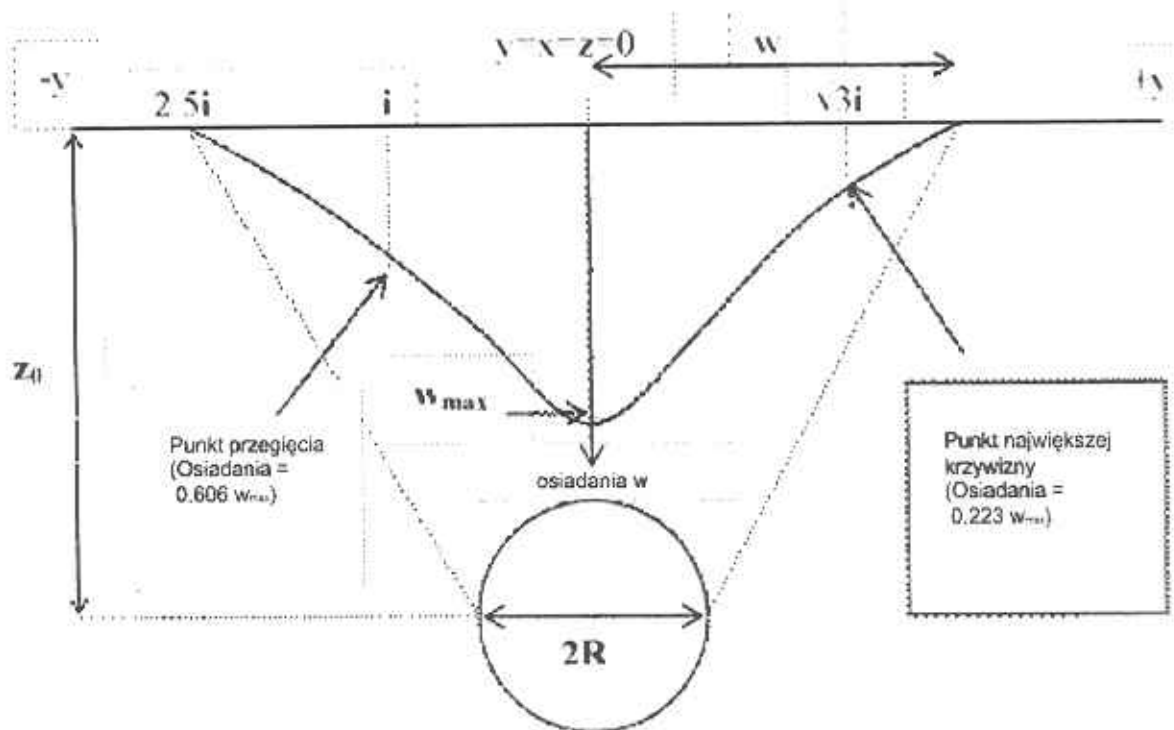
gdzie:

w - powierzchnia osiadań nad tunelem w przekroju poprzecznym

w_{\max} - maksymalne osiadanie w osi tunelu tzn. w punkcie $x = 0$

i - położenie punktu przegięcia krzywej osiadań

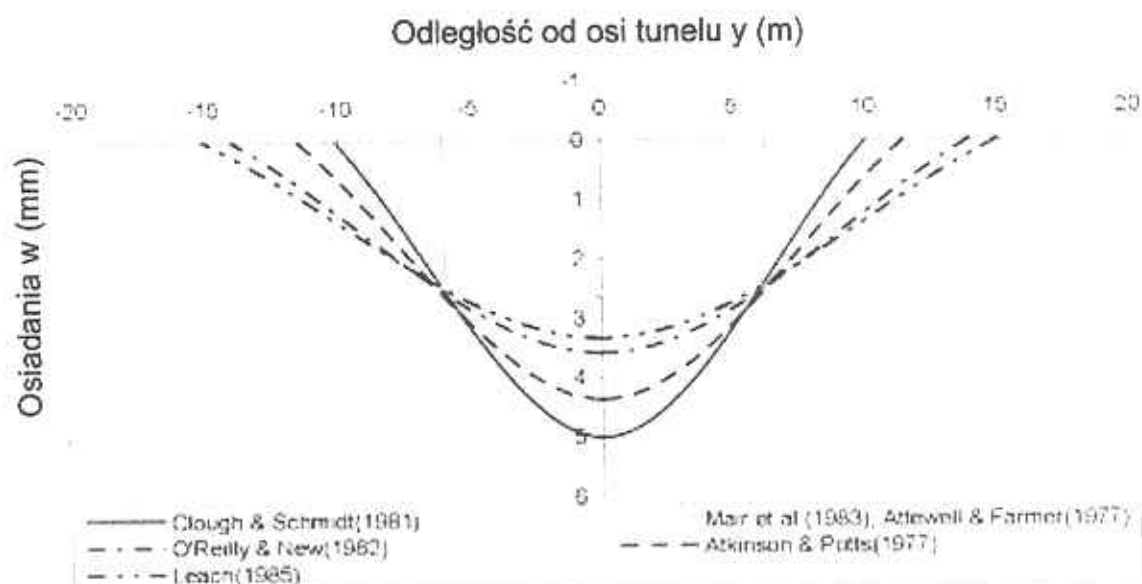
Maksymalne osiadanie w osi pionowej tunelu zależy od średnicy tunelu oraz od parametru i określanego doświadczalnie.



Rys. 1 Krzywa empiryczna, opracowana na podstawie wyników obserwacji i badań w skali naturalnej [6].

Wynikiem obserwacji jest też tabela [6] podająca wartości i określone w zróżnicowanych warunkach geotechnicznych. Na rys. 2 przedstawiono szereg wykresów wyznaczonych metodami empirycznymi, obrazujących przebieg niecki osiadań wyznaczonej dla pojedynczego tunelu o średnicy 4,0 m drążonego tarczą zmechanizowaną na głębokości 30 m. Założono, że niekontrolowana utrata urobku nie przekracza 1 %. Jak widać, maksymalne osiadania wahają się od 3 mm do 5 mm, a szerokość niecki od 10 do 15 m, w zależności od przyjętej wartości parametru i , która przez różnych badaczy została określona następująco:

- $i = 0,43z_0 + 1,1$ m – grunty spoiste (O'Reilly)
- $i = 0,28z_0 - 0,1$ m – grunty niespoiste (O'Reilly)
- $i = 0,50z_0$ - (Mair)
- $i = 0,25(z_0 + R)$ – luźny piasek (Atkinson)
- $i = (0,57 + 0,45z_0) \pm 1,0$ m grunty nieskonsolidowane (Leach)

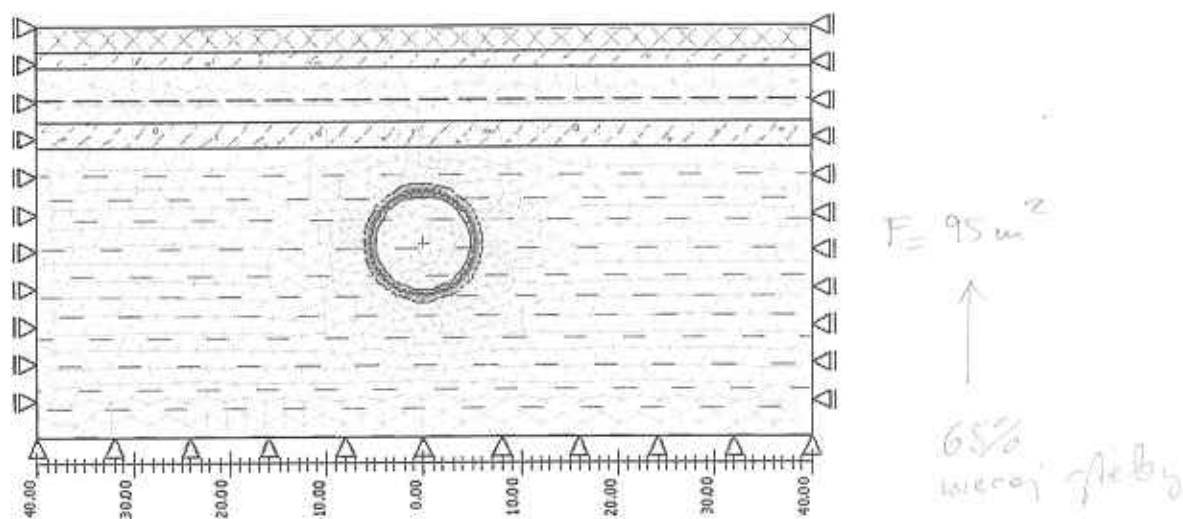


Rys. 2 Kształt i zasięg niecki osiadań dla różnych wartości parametru i [6].

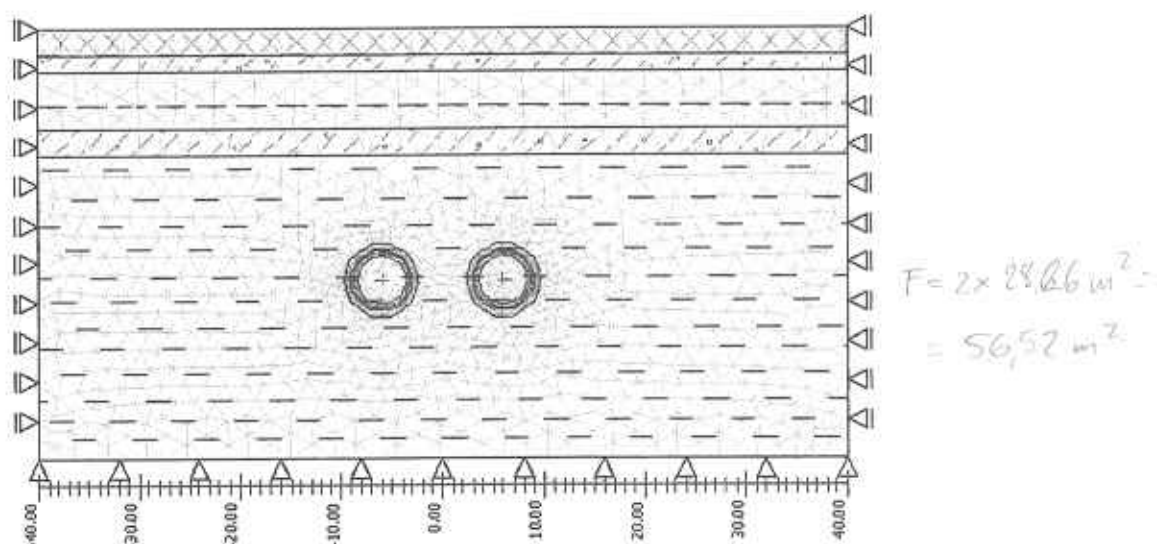
Jednym z problemów jaki pojawi się przy budowie II linii metra w Warszawie tarczą zmechanizowaną będzie prognoza przemieszczeń powierzchni terenu, wybór metody wyznaczania kształtu oraz zasięgu niecki oraz maksymalnych osiadań. Jak pokazują doświadczenia światowe, można korzystać z metod empirycznych, co oznacza konieczność określenia niezbędnych parametrów na podstawie własnych lub podobnych obserwacji w terenie. Można też (jak np. w Amsterdamie [9] czy w Singapurze [10]) zastosować metodę elementów skończonych, tworząc model obszaru objętego oddziaływaniem robót tunelowych. To z kolei wymaga:

- wykonania szczegółowego rozpoznania geologiczno - inżynierskiego wraz z wyznaczeniem w laboratorium i metodami *in situ* parametrów wytrzymałościowych gruntów, a przede wszystkim deformacyjnych tzn. modułów odkształcenia i ścisłości, co jak wynika z dotychczasowych działań jest stosunkowo trudne w złożonych geotechnicznie warunkach warszawskich (uwaga ta dotyczy głównie prekonsolidowanych gruntów spoistych czwartorzędowych i trzeciorzędowych, pęczniejących ilów płoceńskich),
- oceny współczynników parcia gruntu, a głównie współczynnika parcia spoczynkowego K_0 ,
- doboru właściwego modelu konstytutywnego gruntu i wyznaczenia jego parametrów,
- odpowiedniego, specjalistycznego oprogramowania oraz sprzętu komputerowego umożliwiającego analizę zagadnienia w 2D i 3D, a także z uwzględnieniem rozwoju niecki osiadań w czasie,
- dysponowania przeszkoloną kadrą informatyczną.

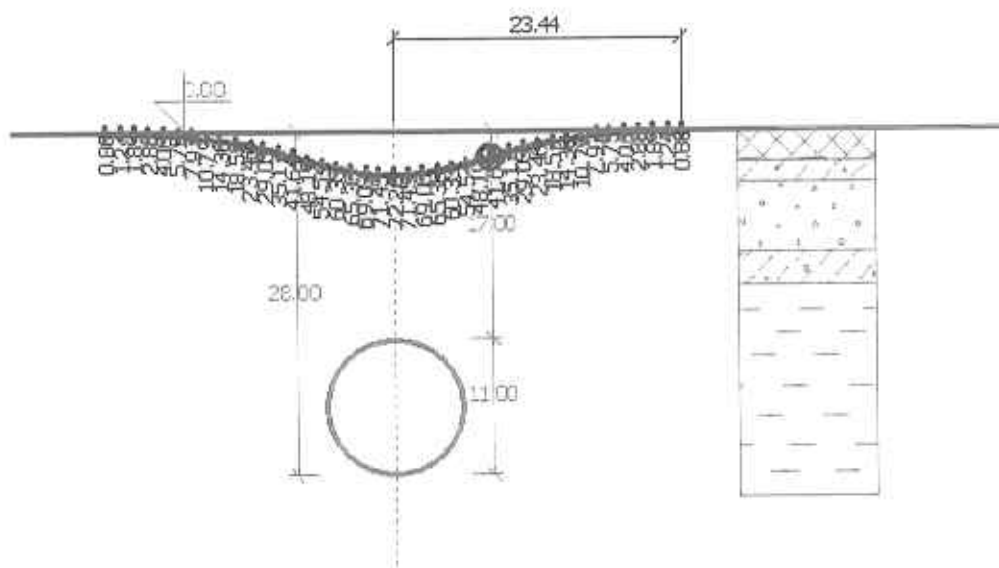
Na rys. 3 - 10 przedstawiono przykładowe obliczenia osiadań wykonane metodą elementów skończonych w Zakładzie Geotechniki i Budowli Podziemnych Instytutu Dróg i Mostów Politechniki Warszawskiej. Obliczenia przeprowadzono na podstawie wstępnego rozpoznania geotechnicznego, przy założeniu drażenia dwóch tuneli jednotorowych o średnicy 6m i jednego tunelu dwutorowego o średnicy zewnętrznej 11m. Parametry geotechniczne gruntów przyjęto z danych Zakładu, opracowanych dla I linii metra. Obliczenia wykonano w dwóch przekrojach na trasie projektowanej II linii metra - ul. Nowy Świat i Rondo Daszyńskiego. Wyniki obliczeń maksymalnych osiadań i kształtu niecki należy traktować jako orientacyjne i przybliżone; nie mogą one być podstawą do dalszych analiz ani formułowania wniosków o wpływie drażenia tuneli tarczą w tych rejonach.



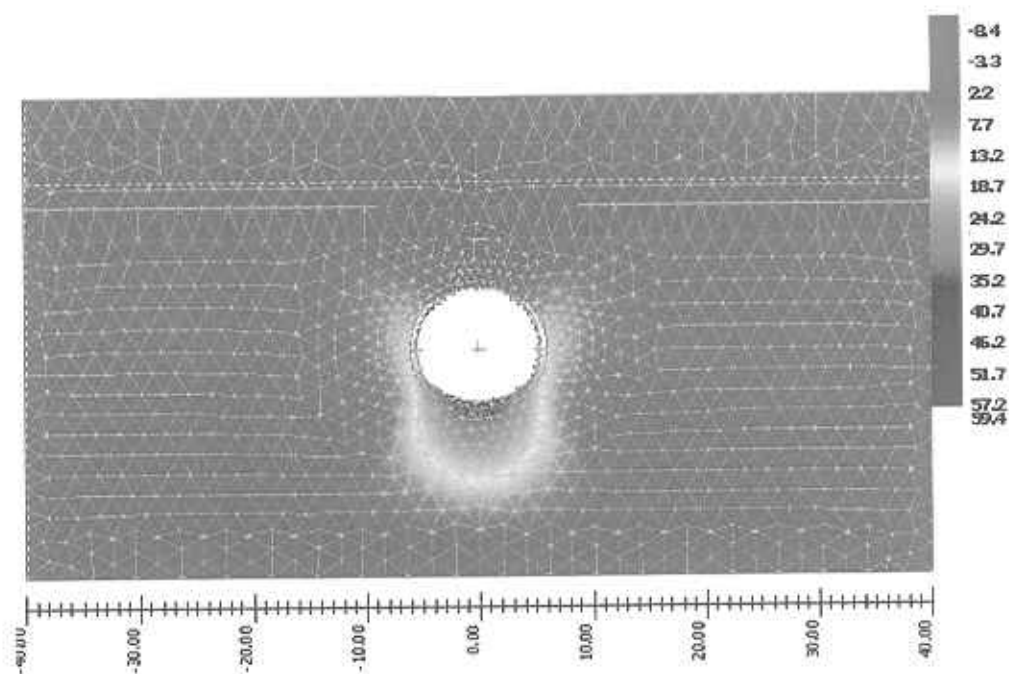
Rys. 3 Model numeryczny obszaru - tunel dwutorowy, ul. Nowy Świat



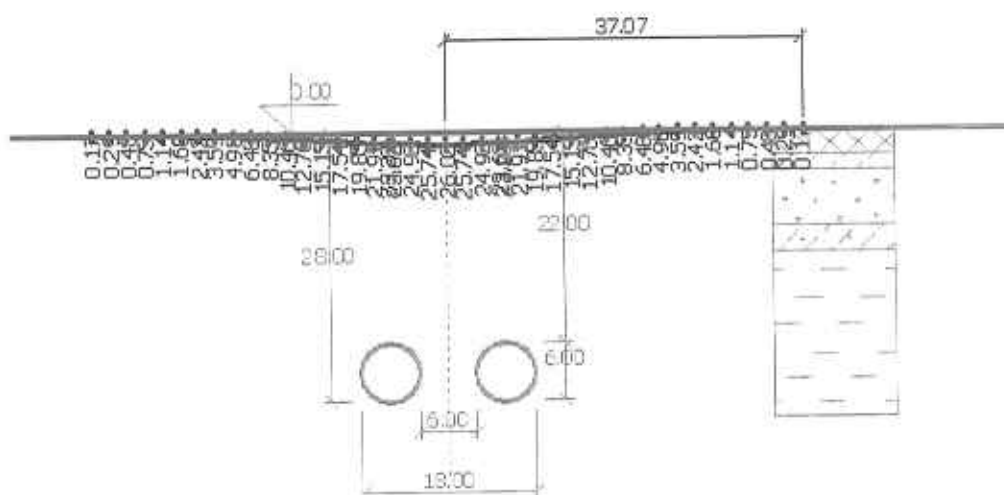
Rys. 4 Model numeryczny obszaru - dwa tunele jednotorowe, ul. Nowy Świat



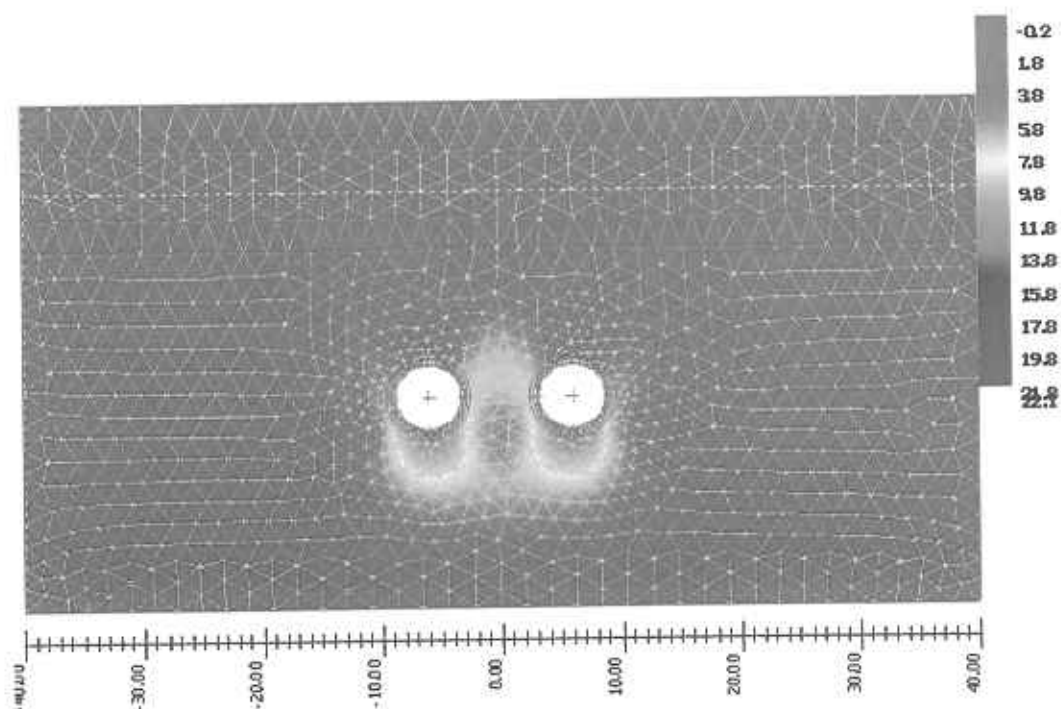
Rys. 5 Wyniki obliczeń - osiadania i zasięg niecki, tunel dwutorowy, ul. Nowy Świat



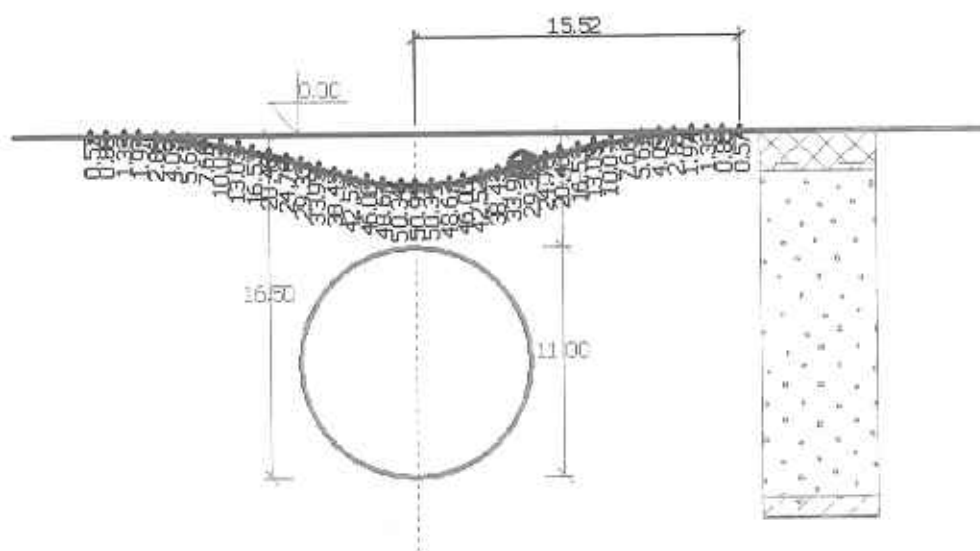
Rys. 6 Obraz naprężeń w obudowie i w podłożu wokół tunelu dwutorowego



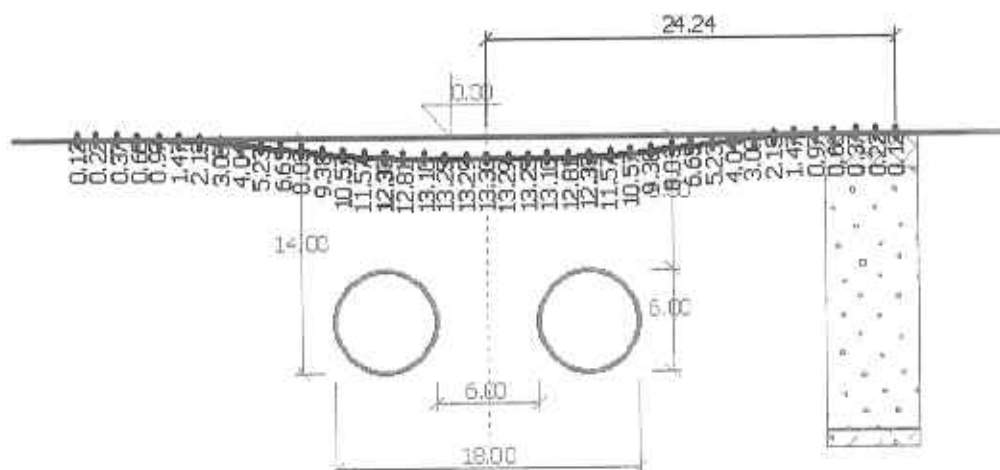
Rys. 7 Wyniki obliczeń - osiadania i zasięg niecki, dwa tunele jednotorowe, ul. Nowy Świat



Rys. 8 Obraz naprężeń w obudowie i w podłożu wokół tuneli jednotorowych



Rys. 9 Wyniki obliczeń - osiadania i zasięg niecki, tunel dwutorowy, Rondo Daszyńskiego

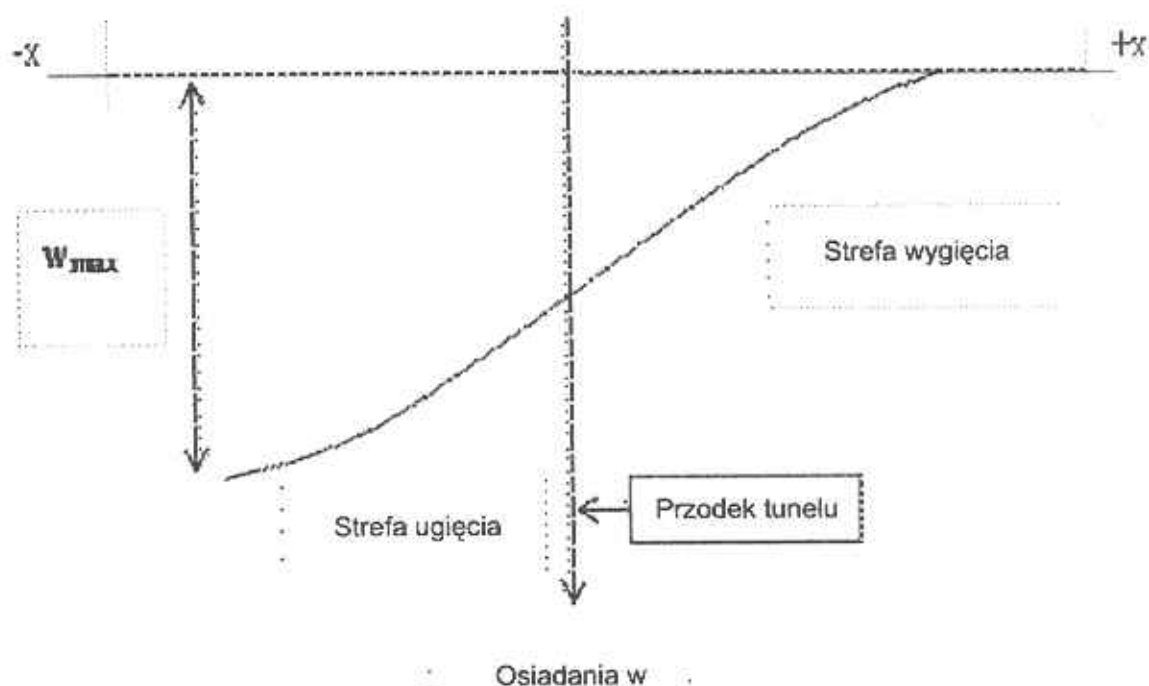


Rys. 10 Wyniki obliczeń - osiadania i zasięg niecki, dwa tunele jednotorowe, Rondo Daszyńskiego

W obliczeniach nie uwzględniono faktu, że dwa tunele jednotorowe nie są drażone jednocześnie, co zmienia obraz powstającej niecki osiadań.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń z innych krajów można stwierdzić, że wyniki uzyskane MES powinny być weryfikowane pomiarami w skali naturalnej podczas drażenia odcinków badawczych oraz monitorowane przez cały okres budowy tunelu.

Równie trudnym problemem jest ocena rozwoju i zasięgu niecki osiadań wzdłuż tunelu drążonego tarczami zmechanizowanymi. Brak dokładnych danych empirycznych i sformułowanych podstaw teoretycznych. Najdalej zaawansowane prace badawcze nad tym zagadnieniem trwają w Amsterdamie (Verruijt i Booker [9]). Na rys. 11 podano wykres osiadań wzdłuż tunelu określony równaniem sformułowanym przez Romo i Diaza w 1981 [6]. Kształt niecki i jej zasięg zależą od: zagłębienia tunelu (z_0) i średnicy (D), naprężeń pionowych w gruncie (γ, ν), ciśnienia porowego, współczynnika K_0 , współczynników technologicznych właściwych dla każdego typu tarczy.



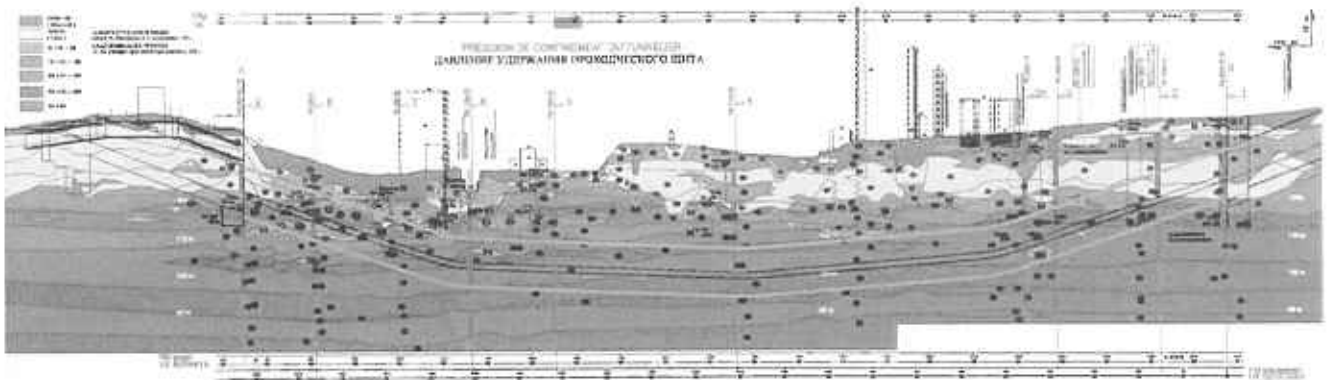
Rys. 11 Wykres niecki osiadań wzdłuż osi tunelu [6].

3. Dane z obserwacji powierzchni terenu podczas budowy tuneli tarczami zmechanizowanymi typu EPB i zawieszinowymi,

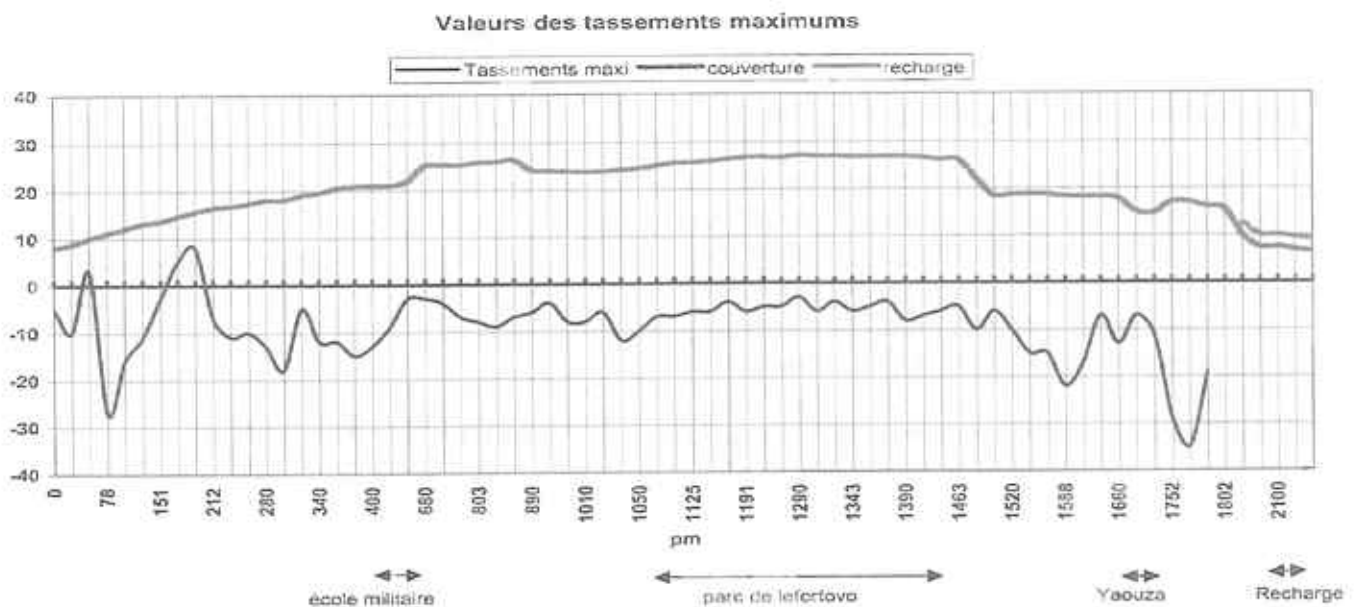
Monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu i obserwacja ruchów podłoża i obiektów w sąsiedztwie tunelu są nieodłącznymi elementami budowy tuneli z zastosowaniem tarcz zmechanizowanych. Pomiary prowadzone podczas drążenia tarczą służą weryfikacji prognoz teoretycznych oraz informują na bieżąco wykonawcę i inwestora o ewentualnych zagrożeniach lub potwierdzają słuszność przyjętej metody wykonania. Na ogół inwestor wraz z wykonawcą określają dopuszczalne wartości osiadań lub kątów obrotu obiektów nad tarczą i w strefie jej oddziaływania. Decyzja taka jest poprzedzona wnikliwymi badaniami i ekspertyzami dotyczącymi stanu technicznego obiektów na powierzchni terenu lub sytuacji geotechnicznej. Jak to pokazano na przykładach poniżej tarczami zawieszinowymi i EPB wykonuje się tunele na terenach zurbanizowanych, pod rzekami i obiektami zabytkowymi.

3.1. Tarcza zawieszinowa – wpływ ruchu tarczy na powierzchnię terenu

Na rys. 12 przedstawiono przekrój wzdłużny tunelu o średnicy 13,2 m drążonego tarczą zawieszinową, a na rys. 13 wykres przemieszczeń powierzchni terenu wraz zaznaczeniem stref zagrożonych osiadaniem.



Rys. 13 Przekrój wzdłużny tunelu drążonego tarczą zawieszinową [7].



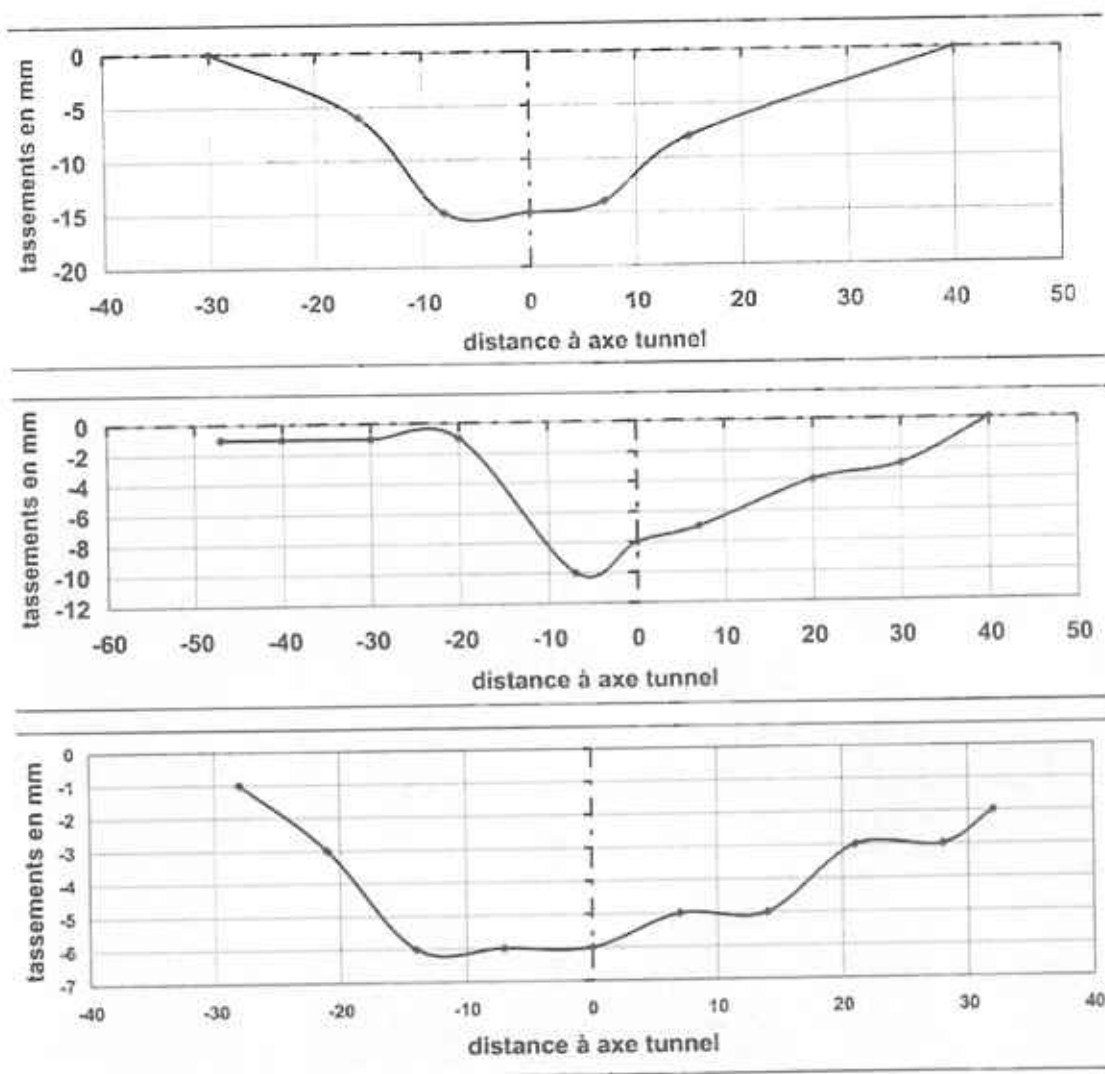
Rys. 14 Wykres osiadań powierzchni terenu [7].

Inwestor określił dopuszczalne osiadania powierzchni terenu na 20 mm . Strefy zagrożone nadmiernym osiadaniem to:

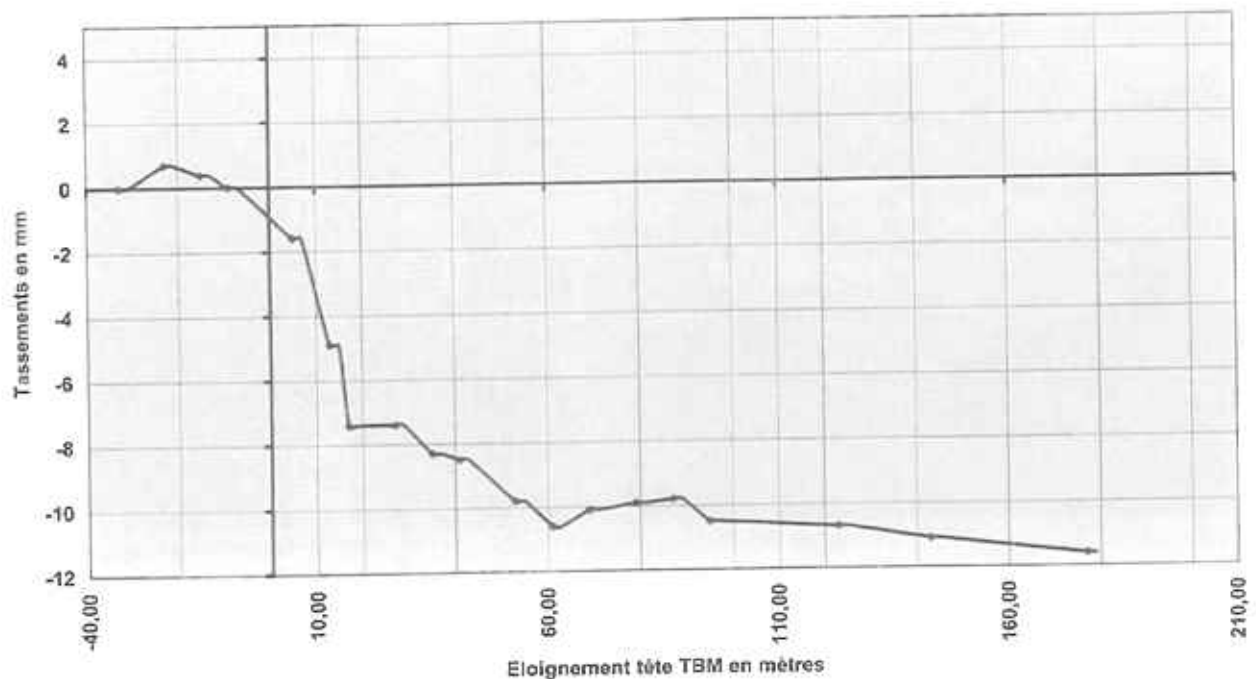
- budynek zabytkowy (wiek około 200 lat) – nad tunelem nadkład gruntu o grubości 25m, zagrożenie geotechniczne stanowiła warstwa nawodnionego piasku na głębokości 10 – 15m; w celu ograniczenia osiadań wykonano iniekcję kompensacyjną na powierzchni 2 ha, w strefie tej założono ponad 100 punktów pomiarowych,
- budynki mieszkalne o wysokości 12 pięter, posadowione na palach – w strefie tej zastosowano szczególne procedury drążenia i dzięki temu osiadania ograniczono do 8 mm, a obrót do 0,3% h , założono 70 punktów pomiarowych,

- przejście tarczy pod rzeką – nadkład gruntu nad stropem tunelu wynosił 10m, tunel drążono w glinach i piaskach nawodnionych, ograniczono ciśnienia w komorze tarczy do 180 kPa, nie stwierdzono niebezpiecznych ruchów podłoża,
- ulica o dużym natężeniu ruchu – nadkład gruntu nad tarczą wynosił tylko 7m, dlatego z uwagi na możliwość ucieczki zawiesziny i przebicie nadkładu na ulicy wykonano nasyp o wysokości 3m i założono 100 punktów pomiarowych.

Prowadzono również obserwację rozwoju niecki osiadań w kierunku poprzecznym do osi tunelu oraz wzdłuż ruchu tarczy. Zasięg niecki osiadań w przekroju poprzecznym tunelu i wyniki obserwacji z trzech przekrojów pomiarowych przedstawiono na rys. 15. Analiza wyników ze 100 profili pomiarowych pozwoliła na określenie średniego osiadania w osi tunelu na 10 mm, a szerokość niecki na 60 m. Na rys 16 pokazano rozwój niecki podczas pochodu tarczy. Po wykonaniu tunelu stwierdzono unoszenie powierzchni terenu o 1- 2 mm w odległości 10 – 20 m przed przejściem czoła tarczy, a następnie stabilizację osiadań na długości 150 – 200 m, podczas 1 miesiąca po przejściu tarczy.



Rys. 15 Obraz niecki osiadań w przekroju poprzecznym tunelu [7].



Rys. 16 Rozwój niecki osiadań podczas pochodu tarczy zawieszinowej [7].

3.2 Tarcza EPB – wpływ ruchu tarczy na powierzchnię terenu

Na rys. 17 pokazano wykres osiadań powierzchni terenu podczas drążenia tunelu tarczą typu EPB. Maksymalne osiadania w osi tunelu w zależności od warunków geotechnicznych wynosiły:

- w ilach normalnie skonsolidowanych ($c_u = 100$ kPa) – poniżej 10 mm
- w gruntach niespoistych – piaskach drobnoziarnistych – 5 – 20 mm, w zależności od szybkości drążenia. Nie stwierdzono narastania osiadań po przejściu czoła tarczy, dzięki wykonaniu iniekcji kompensacyjnych.
- w ilach zaobserwowano niewielkie unoszenie terenu po przejściu ogona tarczy.

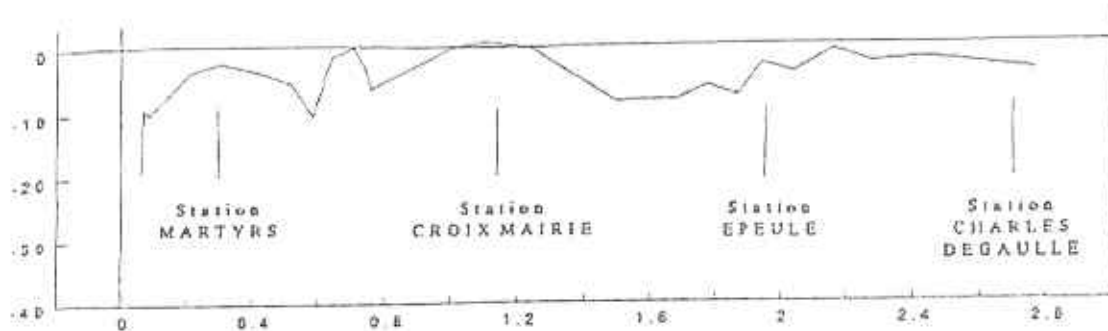


Figure 5 - Maximum settlements along the route

Rys. 17 Osiadania powierzchni terenu - tarcza EPB [7]

W tabelicy 1 przedstawiono porównanie wybranych przykładów tuneli drążonych tarczami typu EPB i zawieszinową i podano maksymalne wartości osiadań.

Tabela 1 [6]

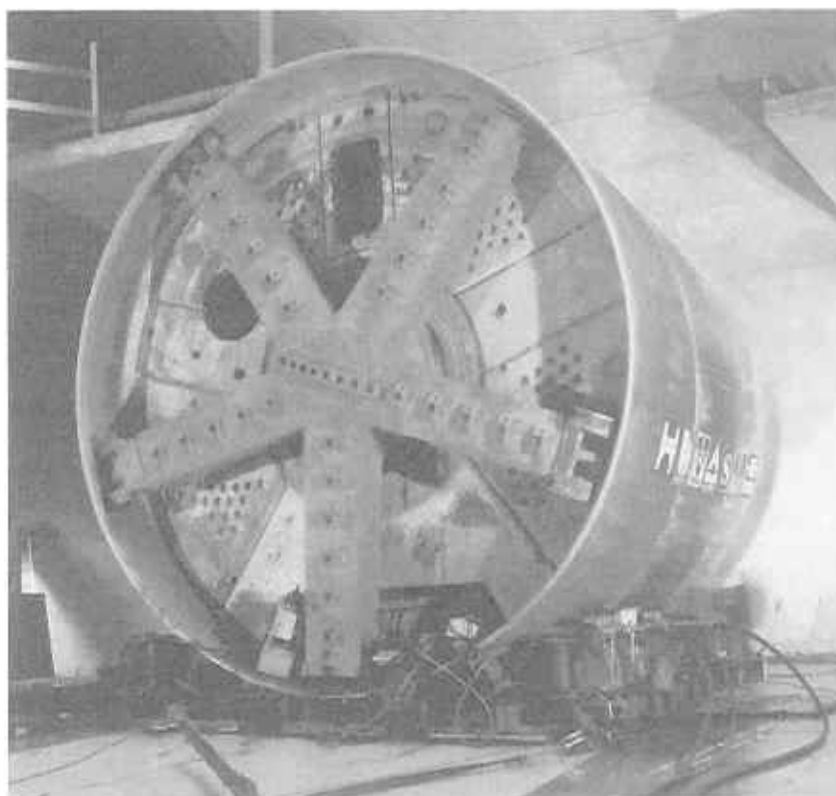
Kraj	Metoda wykonania	Warunki gruntowe	Maksymalne osiadania na pow. terenu mm	Stosunek głębokości wyrobiska i średnicy tunelu H/D	Średnica tunelu (m)
Thunder Bay, Ontario	EPB	plastyczne i twaroplastyczne iły $c_u=15\div32$ kPa	39	3,75	D=2,57
Anacostia River, Washington	EPB	piasek i piasek ze żwirem na łożach	<150		D=5,74
Changi Line, Singapore	EPB	stare aluwia	<300		D=6,13
New Cross, England	Tarcza zawieszinowa	żwiry i plastyczne iły	21,5	2,4	D=4,15
Japan	Tarcza zawieszinowa	plastyczne grunty spoiste, $c_u=60$ kPa	<51	2,4	D=7,5

4. Monitorowanie

Sposób monitorowania powierzchni terenu i budynków nad tunelem drążonym tarczą przedstawiono na przykładzie budowy metra w Amsterdamie [8], [9] - linii Północ - Południe o długości 9 km z czego 3,8 km przebiega pod historycznym centrum miasta w wyjątkowo trudnych warunkach geotechnicznych. Zastosowano tam 2 tarcze zawieszinowe (fot. 1), kesony, zatapiane elementy, a stacje wykonywano w technologii ścian szczelinowych o głębokości 45 m i grubości 1,5 m. Obecnie drążone są 2 tunele szlakowe, a stacje wykonywane są metodą odkrywkową. Usytuowano je pod ulicami, w odległości 5m do 20 m od linii zabudowy i fundamentów. Monitorowaniem objęto powierzchnię około 80 ha tzn. pas o wymiarach 4 km x 200 m, pod jedną z głównych ulic miasta. Zainstalowano 74 stacje obserwacyjne, jedną z nich przedstawiono na fot. 2 i fot. 3. Mierzono przemieszczenia 5400. obiektów, w tym 1600. budynków: mieszkalnych, zabytkowych, ambasad oraz Pałacu Królewskiego. Obserwację prowadzono 24 godziny na dobę, a pomiar każdego z założonych na budynkach punktów wykonywano co 20 min. Przemieszczenia były wyznaczane z dokładnością do 0,9 mm z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania opracowanego specjalnie do tego przedsięwzięcia. Założono, że maksymalne przemieszczenia poziome nie mogą przekroczyć 20 mm, osiadania – 25 mm, a rysy w konstrukcji 0,2 mm.

Z uwagi na wysoki poziom wody gruntowej i słabe grunty (piaski, namuły) wykonano w ramach monitoringu 150 otworów wiertniczych wzdłuż tuneli szlakowych i nad stacjami, w których zainstalowano piezometry, inklinometry, tensometry strunowe do pomiaru naprężeń w podłożu i repery wgłębne. Od czerwca 2002 obserwowano „stan zerowy” tzn. naturalne ruchy powierzchni terenu i zmiany poziomu wód gruntowych.

Równolegle jest prowadzona stała analiza wyników pomiarów; serwer połączony z systemem komputerowym analizuje ponad 500 000 danych dziennie.



Fot. 1 Głowica drążąca tarczy zawieszinowej - metro w Amsterdamie



Fot. 2 Typowa stacja obserwacyjna



Fot. 3 Widok stacji obserwacyjnej zainstalowanej na skrzyżowaniu ulic.

Przewiduje się, że do końca 2007 r. zostanie zgromadzone około 1,5 mld danych końcowych. Instalacja całego systemu monitorowania trwała 6 miesięcy i wykonywało ją 10 osób. Wykonawca, który prowadzi stały nadzór i obserwacje został wyłoniony w drodze niezależnego przetargu. Nakłady na monitoring prowadzony przez 6 lat oceniono na 1 % kosztów całego projektu, które wynoszą 1,8 miliarda euro. Uznano, że mimo dużego kosztu całej operacji, jest to korzystniejsze niż procesy i wypłaty odszkodowań. Jest to również niezbędne do oceny ryzyka inwestycji. Podobne systemy monitorowania zainstalowano na budowie metra w Londynie i Turynie.

5. Ocena ryzyka

Rozpoznanie warunków geotechnicznych, prognoza wpływu ruchu tarczy lub głębokich wykopów na otoczenie są koniecznymi elementami oceny ryzyka.

Zarządzanie ryzykiem jest obecnie jednym z elementów każdej dużej inwestycji budowlanej, a do takich należy zaliczyć budowę II linii metra w Warszawie. Zagadnienia zarządzania ryzykiem, jego ocena, elementy składowe oraz źródła są tematem oddzielnych sesji na dużych, międzynarodowych konferencjach poświęconych budowie tuneli i głębokich wykopów. Katalogi ryzyka oraz tzw. BRA czyli Basic Risk Allocation są częścią każdego poważnego przetargu międzynarodowego. Należy w najbliższym czasie przygotować się do odpowiedzi na pytanie o ryzyko związane z budową metra tarczami zmechanizowanymi. Trzeba je ocenić biorąc pod uwagę następujące etapy działania:

- Analizę ryzyka
- Kontrolę ryzyka
- Monitorowanie ryzyka
- Identyfikację ryzyka

Źródłami ryzyka mogą być np. warunki geotechniczne, konstrukcja, metody budowy, obserwacja przemieszczeń, warunki kontraktu, komunikacja między partnerami kontraktu, a nawet fakt, że wykonawcy posługują się innym językiem lub pochodzą z krajów o bardzo różnej kulturze.

Ocena i analiza ryzyka mogą być przedmiotem badań i studiów z zastosowaniem metody elementów skończonych, metod probabilistycznych i analizy wrażliwości.

Autorka opracowania jedynie sygnalizuje problem, natomiast nie czuje się kompetentna w tej dziedzinie i dlatego nie traktuje tu szerzej zagadnień ryzyka w budownictwie podziemnym.

6. Koszty budowy tuneli tarczami zmechanizowanymi : EPB i zawieszinowymi w świetle doświadczeń światowych

6.1 Metro w Tuluzie

Linia B ma 16 km długości i 21 stacji, w tym jedną stacją przesiadkową na istniejącą linię A. Z wyjątkiem niewielkich odcinków peryferyjnych metro przebiega w terenie silnie zurbanizowanym, a w ścisłym centrum pod budynkami zabytkowymi, wrażliwymi na osiadania. Tunele szlakowe są dwutorowe o średnicy zewnętrznej 7,77 m. Ich całkowita długość wynosi 11,60 km. Tunele jednotorowe o średnicy 4,66 m mają długość 1,10 km. Tunele te są drążone z zastosowaniem 4 tarcz zmechanizowanych - 2. typu EPB i 2 zawieszinowych. Stacje są wykonywane w ścianach szczelinowych. Koszt budowy całej linii B to 1 miliard euro (w cenach 2003 roku). W tym 12,6 miliona euro przeznaczono na wykup gruntów, 17,4 mln euro na przełożenie instalacji podziemnych, a 260 mln euro na tabor. Dodatkowo ogłoszono oddzielny przetarg na prowadzenie kontroli jakości robót i prace te wyceniono na 141 milionów euro.

Na roboty inżynierskie przewidziano 488 mln euro; budowę podzielono na 6 odcinków kontraktowych, a wykonawców wyłoniono w drodze przetargu międzynarodowego:

- Odcinek nr 1 to jedna stacja i tunel dwutorowy o długości 1074 m wykonywany metodą odkrywkową. Czas realizacji kontraktu - 25 miesięcy, koszt - 21 milionów euro. 1200 m
19500 €/m
- Odcinek nr 2 obejmuje 7 stacji i tunel dwutorowy o długości 4700 m drążony TBM EPB, specjalnie skonstruowaną na potrzeby tego projektu. Dodatkowo w kontrakcie przewidziano wykonanie 6 szybów wentylacyjnych o średnicy 6 m każdy. Czas wykonania - 47 miesięcy, koszt - 114,6 milionów euro. 5820 m
19700 €/m
- Odcinek nr 3 zawiera 1 stację przesiadkową i dwa tunele jednotorowe o długości 1054 m drążone tarczą ze sprężonym powietrzem oraz dwa szyby startowe tarczy. Czas realizacji kontraktu 45 miesięcy; koszt - 52 miliony euro. 1254 m
41467 €/m
- Odcinek nr 4 obejmuje dwa szyby startowe, trzy szyby wentylacyjne, 5 stacji i tunel dwutorowy o długości 3700 m drążony TBM zawieszinową wykorzystywaną wcześniej na budowie metra w Lille. Koszt - 100 milionów euro. 4500 m
27200 €/m

- Odcinek nr 5 zawiera dwa szyby startowe, 5 szybów wentylacyjnych 5 stacji oraz tunel dwutorowy o długości 3200 m drążony używaną na budowie metra w Lille TBM EPB. Czas wykonania kontraktu wynosi 41 miesięcy, a koszt 71 milionów euro.
- Odcinek nr 6 to 1 stacja i tunel dwutorowy o długości 1416 m wykonywany metodą odkrywkową. Czas wykonania kontraktu wynosi 29 miesięcy; koszt - 24,8 milionów euro.

6.2 Tunele kolejowe w Kopenhadze

Tunele te drążono tarczą zmechanizowaną typu EPB. Prace prowadzono w trudnych warunkach geotechnicznych pod dnem morza. Projekt wykonano w latach 1995 – 1996 , budowa trwała od roku 1996 do 2002 roku.

Kontrakt w wysokości 400 milionów euro obejmował :

- 2 tunele jednotorowe o średnicy 7 m i długości 7 km każdy,
- stacje wykonywane metodą stropową w ścianach szczelinowych,
- szyby wentylacyjne i szyby startowe,
- automatyczną kontrolę postępu drążenia TBM,
- automatyczną rejestrację danych geotechnicznych i weryfikację z rozpoznaniem geologicznym,
- instalację i obsługę systemu pilotowania tarczy,
- założenie systemu sieci punktów geodezyjnych nad i pod powierzchnią terenu,
- pomiary geodezyjne i pomiary osiadania konstrukcji

6.3 Budowa metra w Singapurze

Kontrakt o wartości 600 milionów euro obejmuje :

- dwa tunele szlakowe o średnicy 6,6 m i łącznej długości 4,166 m, drążone tarczą EPB,
- 2 stacje wykonywane metodą stropową w ścianach szczelinowych, w tym jedna ze schronem obrony cywilnej.

Prace prowadzone są w niekorzystnych, typowych dla Singapuru, warunkach geotechnicznych tzn. w aluviach i ilach pochodzenia morskiego, silnie nawodnionych. Nadkład gruntu nad tarczą wynosi 20 m. Objętość urobku jaki należy wydobyć wynosi około 2 mln m³. Przewidywane zużycie stali to 55 000 ton, a objętość wbudowanego betonu wynosi 600 000 m³. Prace rozpoczęto 1 sierpnia 2002 roku, zakończenie robót ma nastąpić 30.08. 2006 roku i nie przewiduje się opóźnień. czas trwania budowy - 49 miesięcy.

Bibliografia:

- [1] Attkinson, J. H. i Potts, D. M. (1977), *Subsidence above shallow circular tunnels in soft ground*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, str. 307 - 325,
- [2] Attewell, P.B. i Farmer, I.W. , (1974), *Ground deformations resulting from shield tunneling in London clay*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, str. 380 - 395
- [3] Clough, G.W. , Schmidt, B. , (1981) *Excavation and Tunneling*, Soft Clay Engineering, rozdział 8, wydawnictwo Brand and Brenner Elsevier,
- [4] Mair R.J. i inni (1983) *Ground movements around shallow tunnels in soft clay*, 10 th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, str. 323 -328

- [5] Peck, R.B. (1969), *Deep excavations and Tunneling in Soft Ground*, State of the Art Report 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, str. 225 - 290
- [6] Tan, W.I., Ranjith, P.G. (2006) *Parameters and Considerations in Soft Ground Tunneling* EJGE Edition, str. 1- 19
- [7] Tunnels et Ouvrages Souterrains, No 179/2003, No 187/2005, No 191/2005
- [8] Proceedings of 10th International Conference on Piling and Deep Foundations, maj 2006r Amsterdam
- [9] Proceedings of International Symposium on Tunneling in Soft Ground, TC 28 ISSMGE, Amsterdam 2005
- [10] Proceedings of International Conference on Deep Excavations, Singapur, czerwiec 2006.

Agencię - Lewandowski