

*Maciej Kędracki\**

## PROGNOZOWANIE OSIADAŃ POWIERZCHNI TERENU SPOWODOWANYCH BUDOWĄ TUNELI

---

### 1. Wstęp

Tunelowanie, zwłaszcza na niewielkich głębokościach oraz wykonywane metodą przeciskową, powoduje degradację powierzchni terenu [7]. Przejawia się to głównie jako osiadania powierzchni, które są szkodliwe dla budowli naziemnych, a także uzbrojenia podziemnego.

Zmiany w środowisku otaczającym tunel powstają głównie na skutek nadmiernego wybierania skał czy gruntu, niewłaściwego wypełniania pustki między obudową a wyłomem (pustki po przesuwie tarczy do tunelowania, a także przesuwie obudowy tunelu w tunelowaniu przeciskowym, oraz odwodnienia rejonu robót).

Podczas projektowania tunelowania zwłaszcza w rejonie zurbanizowanym, powinno się przeprowadzić prognozowanie osiadań powierzchni terenu wywołanych tymi robotami.

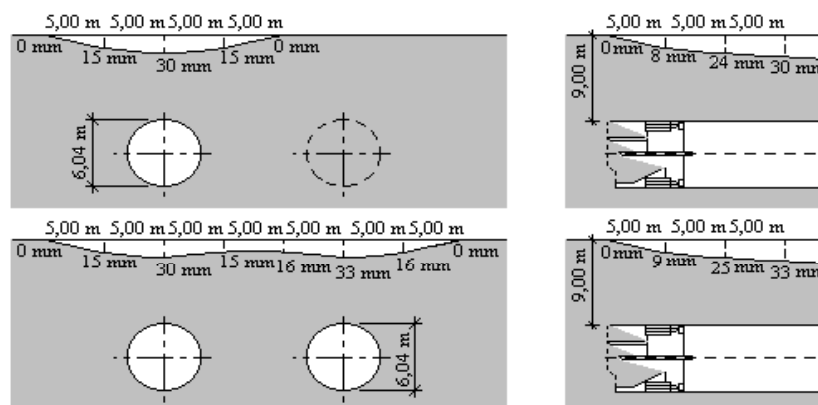
### 2. Osiadania powierzchni terenu

Rysunek 1 pokazuje osiadania powierzchni terenu, jakie powstały przy drażeniu tuneli w gruntach piaszczystych [10]. Tunele te o przekroju kołowym i średnicy w wyłomie 6,04 m były prowadzone metodą tarczową na głębokości 9 m. Odległość między tunelami w osiach wynosiła ok. 15 m. Przodek jednego z tuneli wyprzedzał drugi. Na rysunku pokazano różne wielkości osiadań powierzchni terenu w przekroju poprzecznym i podłużnym tuneli.

W tabeli 1 przedstawiono przykłady wielkości osiadań powierzchni terenu przy tunelowaniu metodą tarczową.

---

\* Wydział Budownictwa, Politechnika Łódzka, Łódź



Rys. 1. Przykład osiadań powierzchni terenu w przekroju poprzecznym i podłużnym przy tunelowaniu metodą tarczową

TABELA 1

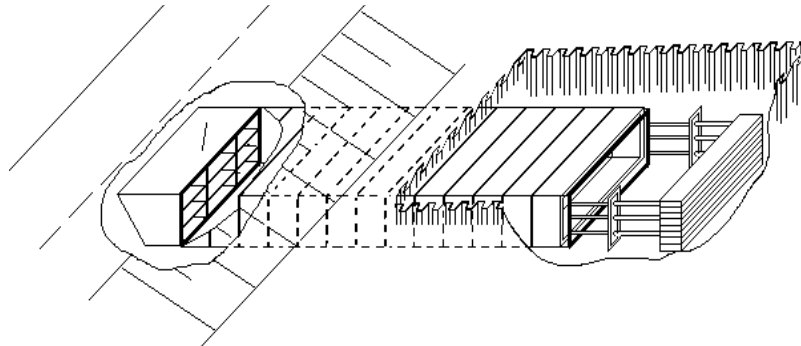
Przykłady wielkości osiadań powierzchni terenu przy tunelowaniu metodą tarczową

Miejsce tunelowania	Rodzaj gruntu	Ciśnienie wody gruntowej	Średnica tarczy, m	Maksymalne osiadania, mm
Moskwa	piasek	bez wody	5,9	290
Moskwa (beton prasowany)	piasek	bez wody	5,9	–
Budapeszt	piasek, margiel, glina pylasta, glina	zwierciadło swobodne	5,7	50
München	kras, margiel, piasek	zwierciadło swobodne	7,62	38
Hamburg	drobny piasek, margiel, piasek, otoczaki	zwierciadło napięte	5,5	20
Frankfurt nad Menem	żwir, piasek, glina	zwierciadło napięte	6,7	30
Berlin	piasek	zwierciadło napięte	6,66	105

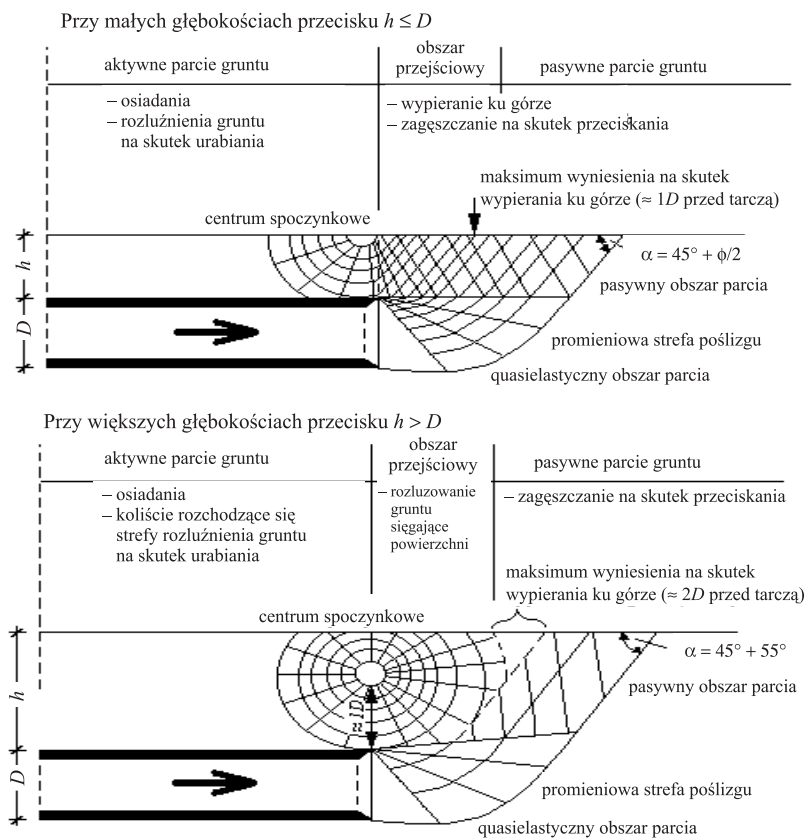
## 2.1. Oddziaływanie tunelowania metodą przeciskową na powierzchnię terenu

Tunelowanie przeciskowe (rys. 2) jest specyficzną technologią i wymaga dodatkowego omówienia. Stosowane bywa prawie wyłącznie w gruntach. Wraz z postępowaniem urabiania, w grunt wciskana jest tarcza wraz z obudową ostateczną tunelu [5].

W trakcie tunelowania przed tarczą przeciskową następuje zagęszczanie gruntu oraz wypiętrzanie powierzchni terenu. Natomiast za tarczą mamy do czynienia z rozluźnianiem gruntu oraz osiadaniem powierzchni terenu. Procesy te oraz miejsce ich występowania obrazuje rysunek 3 [10].



Rys. 2. Schemat tunelowania przeciskowego z obudową o przekroju prostokątnym



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie oddziaływania tunelowania przeciskowego na otaczające środowisko

Objaśnienia w tekście

Na rysunku 3 literą  $D$  oznaczono wysokość (lub średnicę) tunelu w wyłomie, literą  $h$  miąższość nadkładu nad obudową tunelu, kąt  $\alpha$  tworzy powierzchnia terenu i krawędź strefy poślizgu, a kąt  $\phi$  jest kątem tarcia wewnętrznego.

Gdy  $h \leq D$ , to znaczy tunelowanie przebiega na głębokości mniejszej lub równej wysokości obudowy, rozluźnienie gruntu sięga powierzchni terenu i wystąpienie osiadań jest pewne i niezwłoczne.

W przypadku  $h > D$  tunelowanie przebiega na głębokości większej niż wysokość obudowy, nad tunelem wystąpi przesklepienie utrzymujące się przez pewien czas, przeważnie do radykalnej zmiany wilgotności gruntu. Wtedy to rozluźnienie gruntu może dosięgnąć powierzchni terenu i wywołać osiadanie jego powierzchni.

### 3. Teorie i metody dotyczące szacowania osiadań powierzchni terenu na skutek budowy tuneli

Znane są sposoby określania osiadań powierzchni terenu na skutek robót górniczych. Można tu wymienić na przykład teorie polskich uczonych [4]:

- Budryka–Knothego — metoda geometryczna, krzywej wpływów odpowiada krzywa Gaussa,
- Litwiniszyna — równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu z zastosowaniem mechaniki ośrodków ciągłych,
- Sałustowicza oparta na teorii sprężystości, profil niecki osiadania odpowiada kształtem ugięciu warstwy na podłożu sprężystym.

Teorie te dotyczą przede wszystkim wybierania kopalin i związanych z tym osiadań na wielkich obszarach. Niektóre z tych teorii oraz inne niżej przytoczone sposoby mogą posłużyć do wstępnego określenia zakresu osiadań występujących podczas tunelowania.

#### 3.1. Teoria Budryka–Knothego

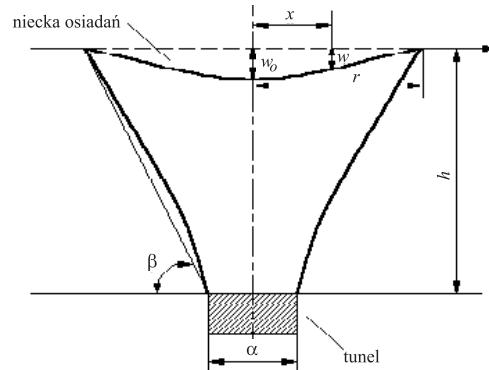
Teoria dotyczy osiadań powierzchni terenu nad wyrobiskiem korytarzowym (rys. 4), np. tunelem [8]. Oparto ją na założeniu, że niecka osiadań ma kształt krzywej Gaussa.

Wielkość osiadania dowolnego punktu na powierzchni o odciętej  $x$  można obliczyć z równania

$$w = w_0 \cdot e^{-\alpha^2 x^2} \quad (1)$$

gdzie:

- $w$  — wielkość osiadania w punkcie o odciętej  $x$ ,
- $w_0$  — wielkość osiadania w osi pionowej tunelu,
- $\alpha$  — szerokość tunelu,
- $x$  — pozioma odległość rozpatrywanego punktu od osi pionowej tunelu.



Rys. 4. Profil niecki osiadań nad wyróbiskiem korytarzowym

Szerokość tunelu można ustalić ze wzoru

$$\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{r} \quad (2)$$

gdzie:

$r$  — zasięg wpływów zależny od głębokości i własności skał

$$r = \frac{h}{\operatorname{tg} \beta} \quad (3)$$

$h$  — głębokość stropu tunelu od powierzchni terenu,

$\beta$  — kąt wpływów wyznaczony na podstawie własności skał:  $\operatorname{tg} \beta = 1,0\text{--}1,5$  dla Dolnego Śląska,  $\operatorname{tg} \beta = 2,0\text{--}3,0$  dla Górnego Śląska.

Znając wartość  $\beta$  oraz  $w_0$ , można obliczyć zasięg niecki osiadania oraz ustalić relacje pomiędzy szerokością tunelu a zasięgiem niecki osiadania.

### 3.2. Teoria Briggsa

Briggs zaleca obliczanie osiadania powierzchni terenu spowodowanego tunelowaniem z następującego wzoru [6]

$$s = m \cdot \frac{2,2}{2,2 + \sqrt{\frac{H}{100}}} \quad (4)$$

gdzie:

$s$  — wielkość osiadania,

$m$  — wysokość wyróbiska,

$H$  — głębokość wyróbiska.

### 3.3. Metoda Goldreicha

Goldreich [9] podaje wzór

$$s = m - \kappa \cdot H \quad (5)$$

gdzie:

- $s$  — wielkość osiadania,
- $m$  — wysokość wyrobiska,
- $\kappa$  — współczynnik uwzględniający ciężar właściwy gruntu, osiadania powierzchni terenu,
- $H$  — głębokość wyrobiska.

### 3.4. Metoda Awierszyna

Awierszyn proponuje, by osiadanie powierzchni terenu spowodowane budową tunelu wyznaczyć z równania [9] (rys. 5)

$$\eta_{(x)} = \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{\left(\frac{L}{l}\right)^2} \cdot e^{\frac{L}{l^2} \cdot x} \quad (6)$$

gdzie:

- $\eta_{(x)}$  — osiadanie powierzchni terenu w odległości  $x$  od osi pionowej tunelu;
- $\eta_0$  — maksymalne osiadanie powierzchni terenu — w osi pionowej tunelu;
- $L$  — szerokość niecki osiadania od osi pionowej tunelu (połowa szerokości);
- $l$  — szerokość niecki osiadania od osi pionowej tunelu (połowa szerokości),  
gdzie wystąpi połowa głębokości osiadania  $\frac{\eta_0}{2}$ ;
- $x$  — odległość od osi pionowej tunelu do miejsca, dla którego szacowane jest osiadanie.

Gdy  $L = 2,1 \cdot l$ , osiadanie powierzchni terenu w odległości  $x$  od osi pionowej tunelu należy oszacować według wzoru

$$\eta_{(x)} = \eta_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{2,13 \cdot l}\right)^{4,53} \cdot e^{2,13 \frac{x}{l}} \quad (7)$$

przy czym największe osiadanie w osi pionowej tunelu można ustalić z zależności:

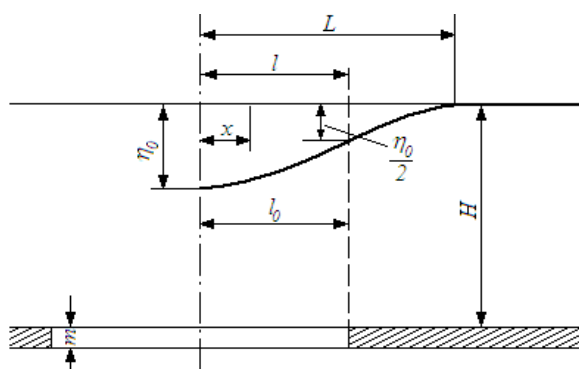
$$\kappa = \frac{m - \eta_0}{H} \quad (8)$$

lub

$$\eta_0 = m - \kappa \cdot H \quad (9)$$

gdzie:

- $m$  — wysokość tunelu,
- $H$  — głębokość stropu tunelu,
- $\kappa$  — współczynnik uwzględniający ciężar właściwy gruntu i osiadania powierzchni terenu (jak we wzorze (5)).



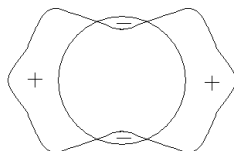
Rys. 5. Krzywa osiadań powierzchni terenu na skutek robót tunelowych według Awierszyna

### 3.5. Sposób szacowania osiadań powierzchni terenu według Limanowa

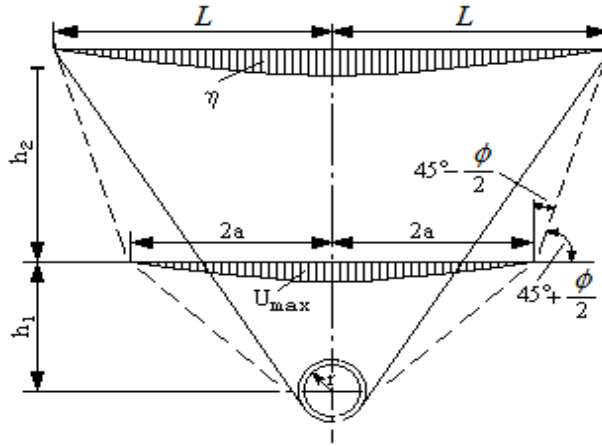
Limanow w przekroju poprzecznym tunelu wyróżnia w gruncie dwie strefy [9]:

- 1) pierwszą od powierzchni terenu w głąb, gdzie występuje ściskanie gruntu, co wyrażone jest kątem (zaznaczonym na rys. 6)  $45^\circ - \frac{\phi}{2}$  — według Rankine'a jest to stan czynny;
- 2) drugą sięgającą tunelu, gdzie występuje rozciąganie gruntu, co wyraża się kątem  $45^\circ + \frac{\phi}{2}$  — według Rankine'a jest to stan bierny;

$\phi$  jest kątem tarcia wewnętrznego gruntu.



Rys. 6. Rozkład naprężeń w przekroju tunelu [1]:  
– naprężenia ściskające, + naprężenia rozciągające



Rys. 7. Sposób szacowania osiadań według Limanowa

Zależności wynikające z rysunku 7 są następujące:

$$— \text{ wielkość osiadania } \eta_o = \frac{F}{L} \quad (10)$$

$$— F = U_{\max a} \cdot \pi \quad (11)$$

$$— L = 2a + h_2 \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (12)$$

$$— U_{\max} = (1 - \mu^2) \cdot \frac{p}{E} \cdot \frac{4r^2 \cdot h_1}{h_1^2 - r^2} \quad (13)$$

gdzie:

$\eta_o$  — wielkość osiadania powierzchni terenu,

$\phi$  — kąt tarcia wewnętrznego gruntu,

$\mu$  — współczynnik tarcia wewnętrznego gruntu,

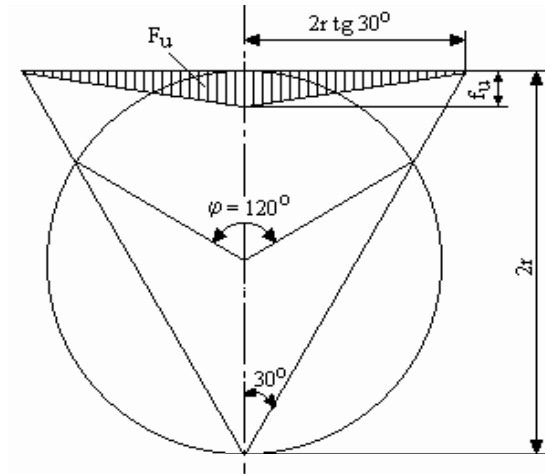
$p$  — ciśnienie pionowe działające na obudowę tunelu,

$E$  — moduł sprężystości gruntu „pozostałe elementy wzorów według rysunku 7”.

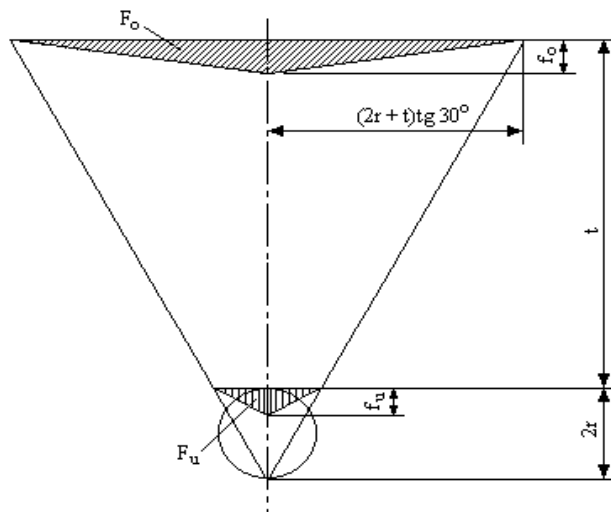
### 3.6. Geometryczny sposób szacowania osiadań powierzchni terenu według Steinfelda

Sposób szacowania osiadań proponowany przez Steinfelda [9] przedstawiono na rysunkach 8 i 9.





Rys. 8. Geometryczne związki pozwalające oszacować osiadania stropu tunelu



Rys. 9. Geometryczne związki na podstawie których można oszacować osiadania powierzchni terenu

### 3.7. Stochastyczny model osiadań Schmidta

W 1969 roku Schmidt opisał model stochastyczny osiadań powierzchni terenu przy robotach tunelowych, gdzie rozkład osiadań opisuje krzywa Gaussa, przy założeniu równej objętości straconego gruntu z objętością niecki osiadania [3] (rys. 10).

Zależność tę opisuje wzór

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} \quad (14)$$

gdzie:

$S_{\max}$  — osiadanie maksymalne, m,

$V_s$  — objętość utraconego gruntu, m<sup>3</sup>,

$i$  — odległość osi tunelu od punktu przegięcia krzywej osiadania, m,

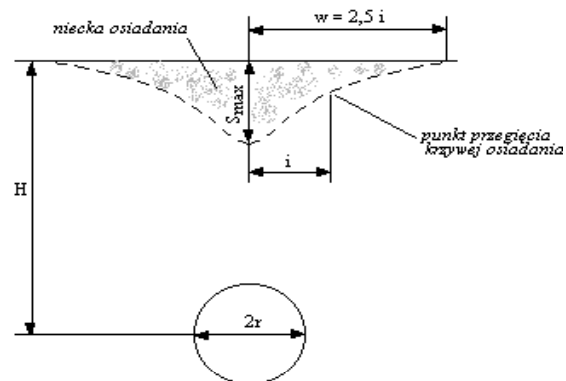
$$\frac{i}{r} = k \left( \frac{H}{2r} \right)^n \quad (15)$$

$H$  — głębokość od osi poziomej tunelu, m,

$r$  — promień tunelu, m,

$k$  — współczynnik o wartości bliskiej 1,

$n = 0,8$ .



H	głębokość od osi poziomej tunelu
i	odległość od osi tunelu do punktu przegięcia krzywej osiadania
r	promień tunelu
$S_{\max}$	osiadanie maksymalne
w	zasięg niecki osiadania

Rys. 10. Niecka osiadań

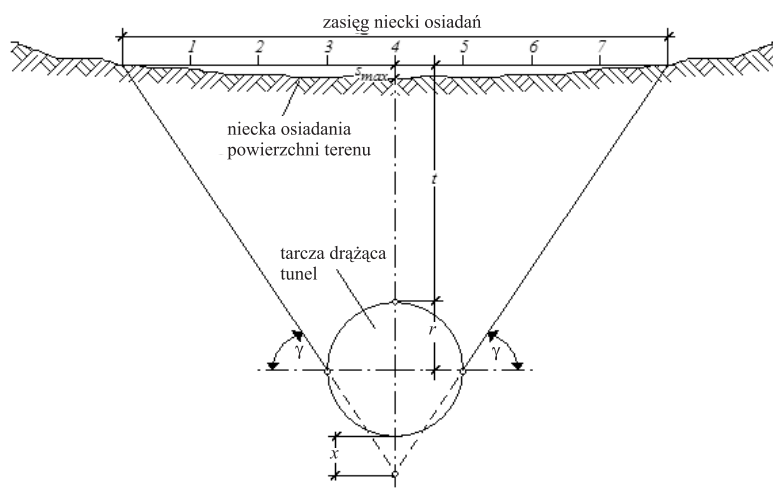
Maksymalne osiadanie można też ustalić z zależności

$$V_1 = 2,5 \times i \times S_{\max} \quad (16)$$

gdzie  $V_1$  oznacza oczekiwaną stratę objętości gruntu, m<sup>3</sup>.

### 3.8. Kształt niecki osiadania według Müllera

Müller, podobnie jak Széchy, ustalił zasięg niecki osiadania na podstawie obserwacji nad tunelem kolei podziemnej U-Bahn-Baues w Hamburgu [10]. Stosując obliczenia statystyczne do opracowania otrzymanych wyników, wyznaczył kąty graniczne  $\gamma$  określające zasięg niecki osiadań w przekroju poprzecznym tunelu [2] (rys. 11).



Rys. 11. Wyznaczanie zasięgu niecki osiadania powierzchni terenu nad tunelem za pomocą kąta granicznego

## 4. Prognozowanie maksymalnych osiadań powierzchni terenu na podstawie wskaźnika zagęszczenia gruntu

Autor niniejszego artykułu proponuje, by do prognozowania osiadań powierzchni terenu na skutek robót tunelowych prowadzonych w gruntach zastosować zależności wynikające z wyznaczania wskaźnika zagęszczenia. Określone w niżej podany sposób osiadanie będzie miało maksymalną wartość, jaka wystąpi w konkretnie rozpatrywanym przypadku.

### 4.1. Wskaźnik zagęszczenia [11]

$$I_s = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \quad (17)$$

gdzie  $\rho_d$  oznacza gęstość objętościową szkieletu gruntowego,

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (18)$$

lub

$$\rho_d = \frac{\rho}{100 + w} \times 100 \text{ g/cm}^3 \quad (19)$$

gdzie:

$m_d$  — masa szkieletu w próbce gruntu oznaczona przez wysuszenie do stałej masy w temperaturze 105°C, g,

$V$  — objętość próbki przed wysuszeniem,  $\text{cm}^3$ ,

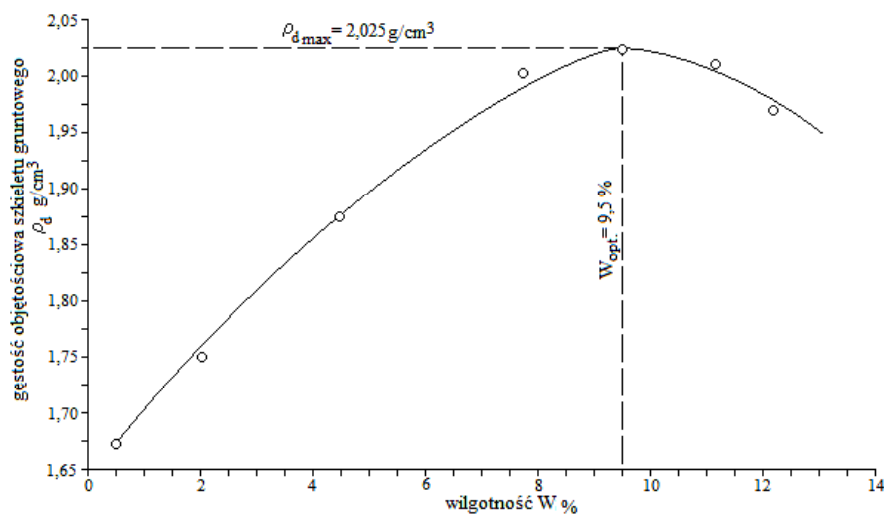
$\rho$  — gęstość objętościowa gruntu

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ g/cm}^3; \quad (20)$$

$m$  — masa próbki w stanie powietrznosuchym, g,

$w$  — wilgotność gruntu, %,

$\rho_{d \max}$  — maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego odczytana z wykresu wynikającego z badania zależności między wilgotnością a gęstością objętościową szkieletu gruntowego (rys. 12),  $\text{g/cm}^3$



Rys. 12. Wykres zależności optymalnej wilgotności od gęstości objętościowej szkieletu gruntowego

#### 4.2. Wyznaczanie maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu gruntowego

Maksymalną wartość gęstości objętościowej szkieletu gruntowego uzyskuje się przy optymalnej wilgotności badanego gruntu. Obie te wartości odczytuje się z wykresu, który określa omawiane relacje.

Wykres budowany jest na podstawie tzw. badania Proctora, tj. ubijania gruntu o określonej wilgotności w cylindrze [11]. Objętość cylindra wynosi 1000 cm<sup>3</sup> (dawniej według Proctora objętość cylindra wynosiła 944 cm<sup>3</sup>). Liczba ubijanych warstw gruntu, liczba i wysokość uderzeń, masa ubijaka jest inna dla każdej z czterech metod przeprowadzania badania. Badania przeprowadza się, zwiększając wilgotność gruntu aż do wyraźnego spadku masy próby.

### 4.3. Wyliczenie osiadań w osi podłużnej tunelu

Zakłada się, że osiadania terenu będą porównywalne do ubytku wysokości próbki uzyskanej w trakcie badania maksymalnej wartości gęstości objętościowej szkieletu gruntowego i optymalnej wilgotności badanego gruntu. Stąd

$$\rho_d = \frac{m_d}{V - \Delta V} \quad (21)$$

gdzie  $\Delta V$  oznacza ubytek objętości próbki na skutek badania

$$\Delta V = A \times \Delta h \text{ [cm}^3\text{]} \quad (22)$$

$A$  — powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, cm<sup>2</sup>,  
 $\Delta h$  — ubytek wysokości próbki na skutek badania — osiadanie, cm,  
 $V$  — objętość próbki przed wysuszeniem; wynosi

$$V = V_p - \frac{m}{\rho_s} \text{ cm}^3 \quad (23)$$

$V_p$  — wewnętrzna objętość cylindra stosowanego do badań wymienionych w części 4.2 artykułu,  
 $\rho_s$  — gęstość właściwa gruntu

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d} \text{ g/cm}^3 \quad (24)$$

$V_d$  — objętość szkieletu gruntowego w próbce gruntu oznaczona przez wysuszenie do stałej masy w temperaturze 105°C, cm<sup>3</sup>

Osiadanie

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_p - \frac{m}{\rho_s} - A \times \Delta h} \quad (25)$$

Stąd, przy założeniu  $\rho_d = \rho_{d \max}$  (z badania Proctora)

$$\Delta h = \frac{1}{A} \left( V_p - \frac{m_d}{\rho_{d \max}} - \frac{m}{\rho_s} \right) \text{ cm} \quad (26)$$

Powyższe rozważania potwierdzają częściowo obserwacje terenowe i wykonane obliczenia. Oto niektóre zbadane przypadki (tab. 2).

TABELA 2

**Pomierzone w terenie i wyliczone wielkości osiadań powierzchni terenu przy tunelowaniu metodą bezwykopową (przewiertu)**

Metoda tunelowania	Średnica tunelowania, mm	Grunt	Ciśnienie wody gruntowej	Osiedzenia, mm	
				pomierzone	wyliczone
bezwykopowa — przewiert	800	<i>Pd</i>	bez wody	42	44
	800	<i>Pg//Pd</i>		32	38
	600	<i>Gp//Pd</i>		18	20
	400	<i>Pg</i>		23	22

*Pd* — piasek drobny,  
*Pg//Pd* — piasek gliniasty przewarstwiony piaskiem drobnym,  
*Gp//Pd* — glina piaszczysta przewarstwiona piaskiem drobnym,  
*Pg* — piasek gliniasty.

## 5. Wnioski

Płytkie tunelowanie prowadzone w gruntach, bez względu na stosowaną metodę, wykonywane bez zabezpieczenia nadległych warstw gruntu wpływa destrukcyjnie na powierzchnię terenu. Wielkość i zasięg destrukcji uzależniona jest głównie od przekroju poprzecznego tunelu w wyłomie, zastosowanej metody i głębokości tunelowania, warunków wodno-gruntowych, jakości przeprowadzonych robót, a przede wszystkim od tego, czy nie miało miejsca nadmierne wybieranie gruntu. To destrukcyjne działanie objawia się głównie w postaci osiadań powierzchni terenu, których zasięg i wielkość można wstępnie prognozować mając rozeznanie warunków wodno-gruntowych na podstawie badań geotechnicznych.

Proponowana w niniejszym artykule technika prognozowania osiadań oparta na wskaźniku zagęszczenia gruntu dotyczy określenia maksymalnej wielkości i zasięgu osiadań powierzchni terenu. Na podstawie takich prognoz można ustalić wpływ tunelowania na otoczone obiekty budowlane, zaprojektować zabezpieczenia tych obiektów, zmienić technologię tunelowania, przebieg trasy, bądź wycofać się z projektu.

## LITERATURA

- [1] *Apel F.*: Tunnel mit Schildvortrieb. Düsseldorf, Werner — Verlag 1968
- [2] *Berger W.*: Der Moderne tunnel — und Stollenvortieb. Berlin — München — Düsseldorf, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1970
- [3] *Boone S., Stypulkowski J.*: Metody szacowania zachowania się gruntów w pobliżu tuneli, Nowoczesne Techniki i Technologie Bezwykopowe, 1, 2001
- [4] *Borecki M., Chudek M.*: Mechanika górotworu. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1972
- [5] *Furtak K., Kędracki M.*: Podstawy budowy tuneli. Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2005
- [6] *Kastner H.*: Statik des Tunnel und Stollenbaues auf der Grundlage geomechanischer Erkenntnisse. Berlin — Heidelberg — New York, Springer Verlag 1971
- [7] *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej, Wydawnictwo „Śląsk” 1987
- [8] *Knothe S.*: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania, Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, I, 1, 1953
- [9] *Mandel G., Wagner H.*: Verkehrs — Tunnelbau, Band I, Planung, Entwurf und Bauausführung. Berlin — München, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn 1968
- [10] *Striegler W.*: Tunnelbau. Berlin — München, Verlag für Bauwesen 1993
- [11] *Wilun Z.*: Zarys geotechniki. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1987