

Rafał Kuszyk\*, Anna Siemińska-Lewandowska\*

## OCENA ROZWOJU NIECKI OSIADAŃ NAD TUNELEM DRAŻONYM TARCZĄ ZMECHANIZOWANĄ

---

### 1. Wstęp

W Polsce nie drążono dotychczas tuneli komunikacyjnych tarczami zmechanizowanymi tzw. TBM (ang. *Tunnel Boring Machine*). W najbliższym czasie rozpoczyna się budowa II linii metra w Warszawie, gdzie odcinki szlakowe będą wykonywane tą technologią. Podstawowym problemem jest wyznaczenie zasięgu wywołanej drążeniem niecki osiadań i ustalenie jej wpływu na budynki i obiekty infrastruktury podziemnej i drogowej.

### 2 Przyczyny rozwoju niecki osiadań

Osiadania powstałe w czasie drążenia tuneli tarczami TBM można podzielić na:

- Osiadania krótkoterminowe (natychmiastowe) spowodowane przejściem tarczy, których wielkość zależy od stateczności przodka, tempa robót tunelowych, czasu instalacji poszczególnych pierścieni obudowy oraz czasu wypełniania pustek między obudową, płaszczem tarczy i gruntem (za tzw. „ogonem” tarczy). Osiadania te uwidaczniają się w pewnej odległości przed czołem wyrobiska i kończą się w momencie uzyskania odpowiedniej wytrzymałości przez medium wypełniające pustki za obudową (wg [8]).
- Osiadania spowodowane odkształceniem obudowy tunelu. Dotyczą głównie tuneli o dużych średnicach wykonanych na niewielkich głębokościach. Ich znaczenie jest stosunkowo niewielkie z uwagi na możliwość przewidzenia występujących w nadkładzie obciążeń i odpowiednio sztywne zaprojektowanie obudowy.
- Osiadania długoterminowe spowodowane konsolidacją gruntów spoistych lub ściśliwych zależną od szybkości rozpraszania ciśnienia porowego oraz pełzaniem uzależnionym od rodzaju gruntu.

---

\* Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, Warszawa

Z przedstawionego zestawienia wynika, że największe znaczenie w procesie deformacji mają osiadania krótkoterminowe. Są one wypadkową działania kilku czynników związanych z procesem tunelowania, które prowadzą do urobienie większej objętości gruntu w stosunku do objętości ostatecznej przestrzeni tunelu. Ta dodatkowa objętość wybranego gruntu nosi nazwę straty objętości  $V_L$  (ang. *volume loss, ground loss*) [liczone w m<sup>3</sup>/mb wykonanego tunelu]. Wielkość przemieszczeń powodująca straty objętości zależy od rodzaju gruntu, tempa robót, średnicy tunelu, typu tarczy (sposobu podparcia przodka), typu obudowy oraz jej sztywności. Na sumę straty objętości składają się dwie wartości (wg [8]):

- strata objętości gruntu na przodku spowodowana rozluźnieniem i ubytkami gruntu na czole wyrobiska zależnie od sposobu podparcia (niekontrolowane przemieszczanie się gruntu do komory roboczej);
- strata objętości wokół płaszcza tarczy i segmentów obudowy tunelu spowodowana nieznacznym powiększeniem średnicy przedniej części płaszcza i głowicy urabiającej w stosunku do pozostałej części płaszcza tarczy; rozpychaniem gruntu na boki w czasie postępu — tzw. „wężykowanie”; przemieszczanie się gruntu w przestrzeni pomiędzy zamontowaną obudową i płaszczem tarczy — za „ogonem” tarczy — w czasie postępu prac.

W przypadku robót tunelowych wykonywanych metodami tradycyjnymi 70–80% osiadań powierzchni terenu jest wynikiem deformacji powstałych na czole wyrobiska. W przypadku wyrobisk wykonywanych przy użyciu różnego rodzaju tarcz zmechanizowanych wartość ta spada poniżej 70% w zależności od stosowanej metody (wg [8]). Procentowy udział w osiadaniach na powierzchni terenu w zależności od naruszenia gruntu (wg Leca [1]) wynosi:

- na przodku 10–20%,
- na długości płaszcza tarczy 40–50%,
- w ogonie tarczy 30–50%.

Wielkość osiadań na powierzchni terenu jest w przybliżeniu równa stracie objętości gruntu na przodku dla większości warunków gruntowych. Strata objętości ( $V_L$ ) jest zazwyczaj wyrażana jako procent całej objętości gruntu wydobytego z drążonego tunelu ( $V_{LT}$ ) w danym przekroju. W przypadku tunelu o przekroju kołowym otrzymuje się zależność:

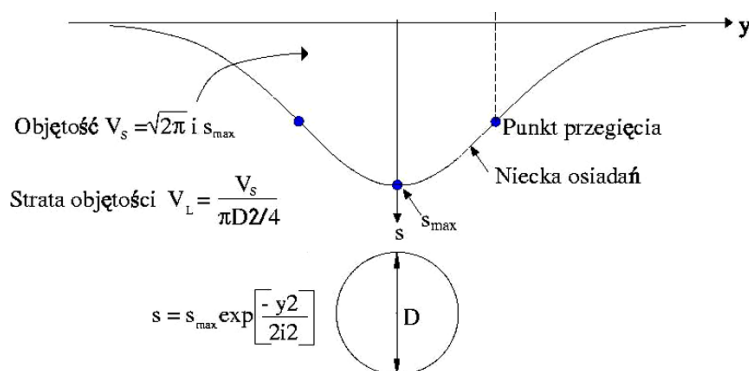
$$V_L = \frac{V_{LT} \cdot 100\%}{\pi D^2 / 4} \quad (1)$$

gdzie  $D$  oznacza średnicę zewnętrzną tunelu.

Strata objętości ( $V_L$ ) może być również wyrażona jako procent objętości niecki osiadań powstałej nad wyrobiskiem według rysunku 1 (za Mair, [2]). Tak liczona strata objętości wynosi ok. 1% dla większości przypadków.

Poniżej podaje się przykładowe wartości straty objętości, które rejestrowano przy różnych metodach wykonania tunelu (wg [8]):

- metoda górnicza (NATM): ił londyński —  $V_L = 0,5-1,5\%$ ,
- tarcze otwarte: ił zwarty —  $V_L = 1-2\%$ ,
- tarcze zamknięte (TBM): piasek —  $V_L = 0,3-0,5\%$ , ił zwarty —  $V_L = 0,3-0,5\%$ , grunty słabo skonsolidowane —  $V_L = 1-2\%$  (bez uwzględnienia osiadań długoterminowych).



Rys. 1. Rozkład niecki osiadań nad pojedynczym tunelem (Mair, [2]).  
Objaśnienie pod wzorem (2)

### 3. Metody szacowania osiadań

W praktyce projektowej stosuje się najczęściej dwie metody szacowania wielkości osiadań terenu:

- metodę analityczną/półempiryczną, opartą na empirycznych formułach wyprowadzonych na podstawie wcześniejszych obserwacji;
- metodę elementów skończonych (MES), która jest obecnie bardziej popularną metodą.

W przypadku obliczeń analitycznych najczęściej stosowane są zależności podane przez Attewella i Woodmana (1982). Wzór podstawowy na osiadania terenu wzdłuż osi tunelu ma postać:

$$s = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \cdot \left\{ G\left[\frac{x-x_i}{i}\right] - G\left[\frac{x-x_f}{i}\right] \right\} \quad (2)$$

gdzie:

- $s$  — osiadania pionowe w punkcie  $(x, y)$ , m,
- $y$  — współrzędna prostopadła do osi tunelu, m,

- $x$  — współrzędna równoległa do osi tunelu, m,  
 $V_s$  — objętość niecki osiadań na metr wykonanego tunelu,  $m^3/m$ , określona jako procent strat objętości  $V_L$  w stosunku do całkowitej objętości wykonanego tunelu  $V$ ,  
 $x_i$  — współrzędna początku tunelu, m,  
 $x_f$  — współrzędna przodka, m,  
 $i$  — parametr określający szerokość niecki osiadań (punkt przegięcia) określony jako  $i = K \cdot z_0$ ,  
 $K$  — stała empiryczna zależna od rodzaju gruntu, —,  
 $z_0$  — głębokość od powierzchni do osi tunelu, m,  
 $G$  — funkcja określona wzorem:

$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\alpha} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) d\alpha \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha = (x - x_i)/i$ ;  $G(0) = 0,5$ , gdy  $x = x_f$  (punkt nad osią tunelu);

$G(1) = 1,0$ , gdy  $(x - x_i) \rightarrow \infty$ .

Dla szczególnych przypadków, gdy wybrany przekrój obliczeniowy znajduje się w pewnej odległości od przodka i spełnione są warunki  $(x - x_i)/i > 3$  oraz  $(x - x_f)/i < -3$  wtedy  $G[(x - x_i)/i] = 1$  i  $G[(x - x_f)/i] = 0$ , to wzór (2) przybiera postać (za [6]):

$$s = s_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) = \frac{V_L}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) \quad (4)$$

Wzór (2) przyjmuje również postać szczególną, gdy oblicza się osiadania w osi tunelu ( $y = 0$ ):

$$s = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot \left\{ G\left[\frac{x - x_i}{i}\right] - G\left[\frac{x - x_f}{i}\right] \right\} = s_{\max} \cdot (G_1 - G_2) \quad (5)$$

Rozkład osiadań na powierzchni terenu nad pojedynczym tunelem został opisany również przez wielu innych autorów. Badacze New i O'Reilly (1991) stwierdzili m.in., iż krótkotrwałe przemieszczenia nad tunelem dają rozkład przybliżony do krzywej Gaussa:

$$s = s_{\max} \exp\left(\frac{-y^2}{2i^2}\right) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot K \cdot z_0} \exp\left(\frac{-y^2}{2(K \cdot z_0)^2}\right) \quad (6)$$

gdzie:

- $s$  — teoretyczne przemieszczenia powierzchni terenu (rozkład normalny), m,
- $y$  — poziomy zasięg zaniku deformacji mierzony od osi tunelu, m,
- $i$  — odchylenie standardowe (punkt przegięcia krzywej), m,
- $s_{\max}$  — maksymalne osiadania na powierzchni nad osią tunelu, m — liczone według formuły (New & O'Reilly, 1991 / Mair, 1996):

$$s_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}} = V_L \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi i}} = \frac{0,313 V_L D^2}{i} \quad (7)$$

Zasięg niecki osiadań w płaszczyźnie prostopadłej do osi tunelu jest determinowany przez wartość  $i$  rozumianą jako odległość od osi tunelu do punktu przegięcia. Według Pecka (1969) istnieje wyraźna zależność pomiędzy wielkością powstałej niecki osiadań (determinowaną parametrem  $i$  oraz  $z_0$ ) a rodzajem gruntu, w którym drążony jest tunel. Na podstawie tej zależności New i O'Reilly (1991) podali zależność dla określenia wielkości  $i$ :

$$i = K \cdot z_0 \quad (8)$$

Jednocześnie, na podstawie doświadczeń angielskich, autorzy ci podali empiryczną zależność dla oszacowania wartości  $i$ :

— dla gruntów spoistych

$$i = 0,43z_0 + 1,1 \text{ m} \quad (9)$$

— dla gruntów niespoistych

$$i = 0,28z_0 - 0,1 \text{ m} \quad (10)$$

Wielu autorów próbuje określić odległość  $i$  dla lokalnych warunków gruntowych. Przykładowo:

1) New i O'Reilly (1991):

— tunel w iłach z piaskami powyżej

$$i = 0,43z_A + 0,28z_B + 1,1 \text{ m} \quad (11)$$

— tunel w piaskach z iłami powyżej

$$i = 0,28z_A + 0,43z_B - 0,1 \text{ m} \quad (12)$$

gdzie:

- $z_A$  — miąższość warstwy spoistej,
- $z_B$  — miąższość warstwy niespoistej.

2) Arioglu (1992, wg [8]):

$$i = \frac{i_1 + i_2 + i_3}{3} \quad (13)$$

gdzie:

$$i_1 = 0,386z_0 + 2,84,$$

$$i_2 = 0,5z_0,$$

$$i_3 = 1,392 \cdot \left(\frac{D}{z}\right) \cdot \left(\frac{z_0}{D}\right).$$

Natomiast wielkość stałej empirycznej  $K$  można przyjmować niezależnie od głębokości i średnicy tunelu. Wartość ta, według różnych autorów (wg [8]), mieści się w przedziale:

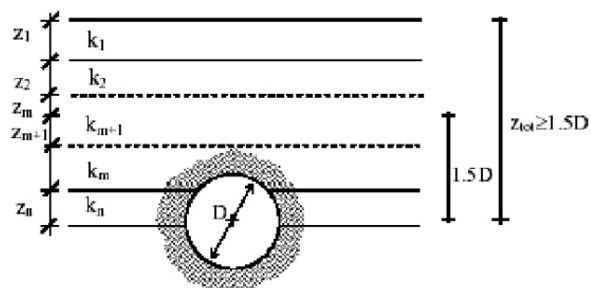
- dla gruntów spoiстых —  $K = 0,40 \pm 0,50$ ,
- dla gruntów niespoistych —  $K = 0,25 \pm 0,35$ .

W przypadku gruntów uwarstwionych, zakładając, że wszystkie warstwy gruntu wpływającego na osiadania, mają jednakową rozciągłość w poziomie, można przyjąć, iż  $K_{eq}$  jest średnią ważoną wartością z wartości  $K_i$ . Dla tuneli posadowionych płytko ( $z_0 < 1,5D$ )  $K_{eq}$  przyjmuje wartość wg poniższego wzoru (wg [5]):

$$K_{eq} = \frac{z_1 k_1 + \dots + z_n k_n}{z_{tot}} \quad (14)$$

W przypadku głębokiego posadowienia tunelu ( $z_0 \geq 1,5D$ ) wartość  $K_i$  jest obliczana w zależności od odległości danej warstwy, od osi tunelu (por. rys. 2) według formuły (za [5]):

$$K_{eq} = \frac{0,35(z_1 k_1 + \dots + z_m k_m) + 0,65(z_{m+1} k_{m+1} + \dots + z_n k_n)}{0,35(z_1 + \dots + z_m) + 0,65(z_{m+1} + \dots + z_n)} \quad (15)$$



Rys. 2. Obliczenie stałej  $K$  dla posadowienia głębokiego (New i O'Reilly, [5])

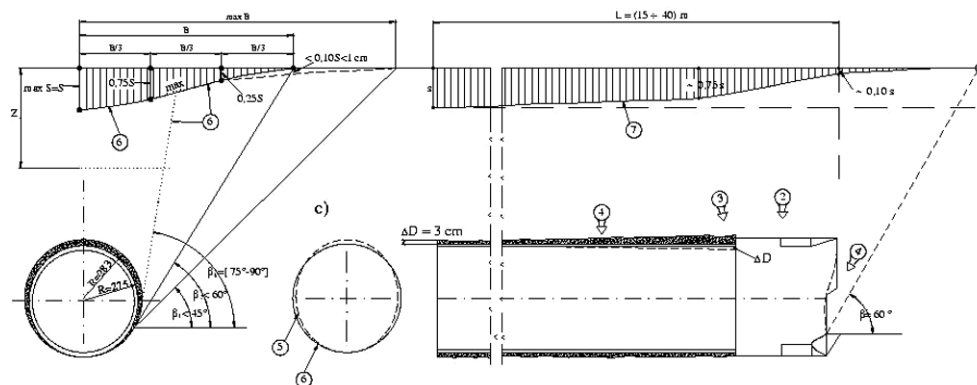
#### 4 Prognoza zasięgu deformacji na budowie I linii metra w Warszawie

W warunkach warszawskich wykonano dotychczas jedynie empiryczne prognozowanie osiadań nad tunelem dla I linii metra (wg [3]). Drażnienie prowadzono tarczą ręczną z przodkiem zabezpieczonym drewnianym szczytem tarczy.

W analizie tej przyjęto, że (rys. 3):

- kąt położenia punktu osiadań zerowych jest mniejszy od  $45^\circ$ ; kąt położenia zasięgu osiadań znaczących w gruntach osuszonych nie przekracza  $60^\circ$ ;
- największe pochylenie niecki osiadań  $i = 1,5 s/B$ ;
- ostateczną wartość  $s$  osiadań w osi tunelu, w zależności od nadkładu (rodzaju i układu warstw w stropie) oraz uzyskanej depresji przyjmuje się w granicach  $4 \div 20$  cm;
- zapadliska i leje o głębokości  $0,5 \div 3,0$  m mogą powstać w wyniku niedokładnego rozpięcia czoła wyrobiska, wyjmowania dużych głazów lub przechodzenia przez warstwę wodonośną;
- osiadania powierzchni terenu pod wpływem obniżenia poziomu wód gruntowych w utworach skonsolidowanych są bardzo małe (rzędu  $0,1 \div 0,3$  mm / 1 m depresji).

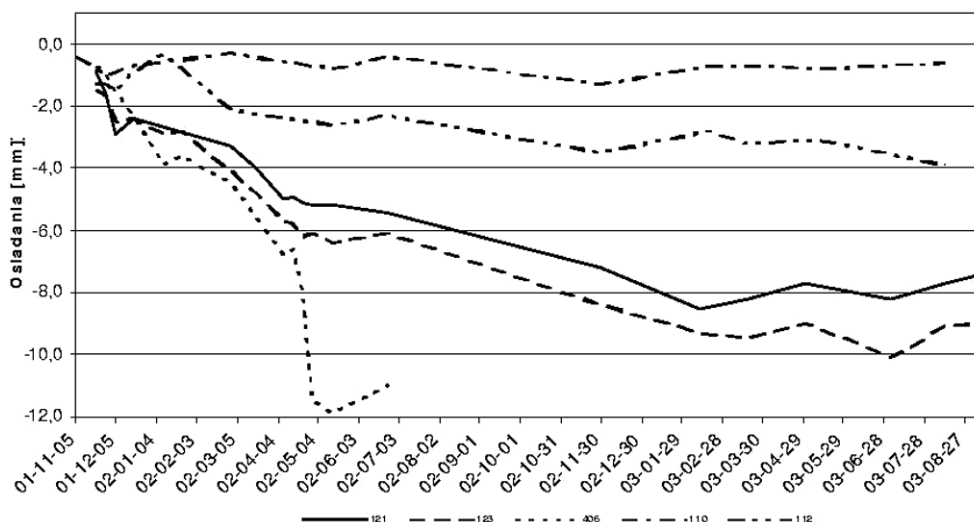
Według tej prognozy zasięg i wielkość deformacji terenu przedstawia rysunek 3.



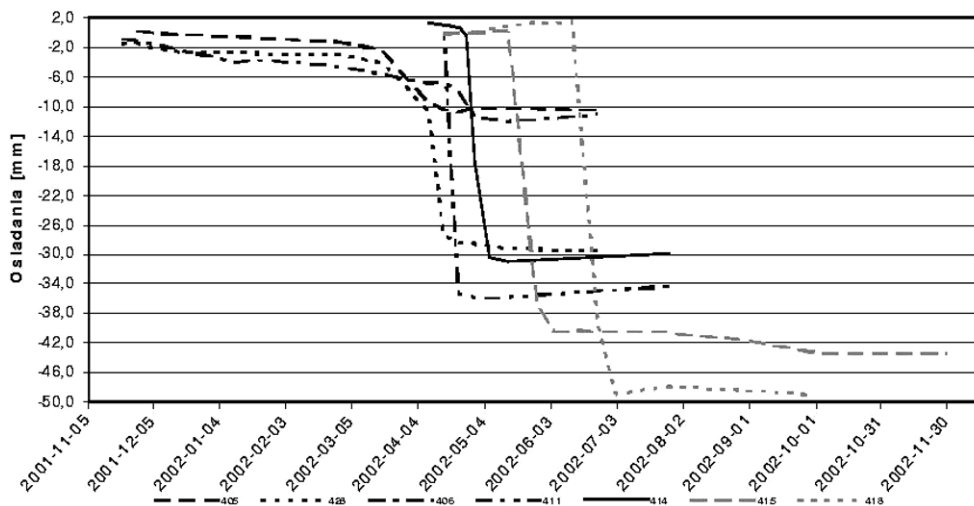
Rys. 3. Charakterystyka osiadań terenu w czasie budowy tunelu I linii metra (Köhle, [3])

Potwierdzeniem przyjętych założeń jest analiza osiadań (wg [4]) pomierzonych nad tunelami szlakowymi metra na odcinku B18 przebiegającymi w pobliżu zwartej zabudowy mieszkalnej. Pomiar osiadań były prowadzone przed rozpoczęciem robót tunelowych aż do zakończenia tych prac. Pomiarów dokonywano na reperach umieszczonych na elementach konstrukcyjnych budynków wzdłuż trasy metra.

Pomierzone przemieszczenia pionowe na wybranych reperach zostały przedstawione na rysunku 4 i 5.



Rys. 4. Przemieszczenia mierzone na budynkach (Kuszyk, [4])



Rys. 5. Przemieszczenia mierzone w osi tuneli (Kuszyk, [4])

Jak wynika ze wskazań reperów, przemieszczenia można podzielić na dwie grupy — przemieszczenia znaczące, występujące jedynie w osi tuneli i w bezpośredniej od nich odległości oraz przemieszczenia zanikające, które sięgają do najbliższych budynków. W stre-



fie pierwszej, osiadania są znaczne i sięgają 50 mm a ich zasięg jest niewielki — do ok. 10 m na boki od osi tunelu. W pierwszym etapie wielkość osiadań związana jest z oddziaływaniem odwodnienia, w drugim z technologią wykonywania tuneli i przejściem czoła tarczy. Przedstawiony na wykresach obraz jest sumą tych czynników. Dodatkowo, przedstawione przemieszczenia dotyczą obszaru podatnego na odkształcenia. Występują tu słabe grunty organiczne związane z dawnym korytem rzeki Drny.

W strefie drugiej, osiadania dochodzą do 10 mm, choć średnio wynoszą 4 mm i zależą od konstrukcji budynków oraz gruntów w poziomie ich posadowienia.

Powodem tworzenia się znaczących osiadań jest przede wszystkim reakcja gruntu, za zmontowaną obudową na przesuw płaszczą tarczy. Powstała w ten sposób przestrzeń jest wypełniana zaczynem cementowym pod ciśnieniem. Stosowana na I linii technologia nie daje jednak możliwości pełnego jej wypełnienia bez przemieszczenia ośrodka gruntowego. Jak pokazują wykresy i zachowanie się sąsiednich budynków, zasięg powstałych przemieszczeń jednak nie jest duży i nie powoduje uszkodzeń budynków.

#### LITERATURA

- [1] *Leca E., New B.*: ITA/AITES Report 2006 on Settlements induced by tunnelling in Soft Ground. *Tunnelling and Underground Space Technology* 22 (2007), s. 119–149
- [2] *Mair R.J., Taylor R.N., Bracegirdle A.*: Subsurface settlement profiles above tunnels in clays. *Geotechnique* 43(2) 1993, s. 315–320
- [3] *Köhle J.*: Projekt i wykonanie metodą tarczową tuneli szlakowych I linii metra w Warszawie. *Inżynieria i Budownictwo* 11/1990, s. 389–401
- [4] *Kuszyk R.*: Zgodność modelu numerycznego podłoża gruntowego z osiadaniami rzeczywistymi w strefie I linii metra w Warszawie. II Problemowa Konferencja Geotechniki, Białystok — Białowieża, czerwiec 2004
- [5] *New B., O'Reilly M.P.*: Tunnelling induced ground movements; Predicting their magnitude and effects. *Proc. of 4th International Conference on Ground Movements and Structures*, University of Wales College of Cardiff. Pentech Press, 1991, s. 671–697
- [6] *Attewell P.B., Woodman*: Predicting the dynamics of ground settlements and its derivatives caused by tunneling in soil. *Ground Engineering* 15(8) 1982, s. 13–22
- [7] *Peck R.B.*: Deep excavations and tunneling in soft ground. 7th International Conf. Soli Mechanics and Foundation Engineering. Mexico 1969, s. 225–290
- [8] Materiały szkoleniowe kursu „Shield tunnelling in soft soils“. DelftGeoAcademy 2008