

Michał Lidner

Prognoza skutków wybuchu w kontekście eksploracji powojennych obiektów tunelowych

Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy 19 (2), 91-103

2016

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.

Michał Lidner

Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

e-mail: michal.lidner@wat.edu.pl

Prognoza skutków wybuchu w kontekście eksploracji powojennych obiektów tunelowych

STRESZCZENIE

W pracy opisano hipotetyczne analizy oddziaływania wybuchu w powojennych obiektach tunelowych. W jednym z takich obiektów rzekomo ma znajdować się złoty pociąg, który (jak wynika z doniesień medialnych) może być zaminowany z użyciem materiałów wybuchowych. W niniejszym artykule przedstawiono wpływ zastosowania wiedzy budowlanej w celu zapewnienia bezpieczeństwa robót archeologiczno-budowlanych podczas ewentualnej eksploracji takiego tunelu. Przedstawiono historyczne i techniczne aspekty budowy tuneli metodą odkrywkową. Opisano zachowanie obudowy tunelu w momencie ewentualnej detonacji ładunków wybuchowych. Określono również maksymalną masę materiału wybuchowego, która nie naruszy konstrukcji obiektu. Wykorzystano uproszczone metody analityczne i numeryczne. Opisano przykładową lokalizację tunelu oraz bezpieczny sposób jego eksploracji. Następnie określono wpływ ewentualnego wybuchu na okoliczną infrastrukturę miejską i przedstawiono najbardziej ekonomiczne jej zabezpieczenie.

Słowa kluczowe: Wybuch, fala uderzeniowa, tunele.

Wstęp

Od kilku miesięcy zainteresowanie polskich mediów wzbudza wiadomość o odkryciu złotego pociągu¹. Pod koniec wojny pociąg miał wyruszyć z Wrocławia, a w drodze do Wałbrzycha został ukryty przez niemieckich żołnierzy. Najwięcej doniesień medialnych dotyczy jego zawartości. Przede wszystkim spekuluje się, że w pociągu znajdowało się zrabowane przez Niemców złoto oraz biżuteria, zdeponowane przez mieszkańców Wrocławia w bankach. Równie dużo informacji o zawartości pociągu dotyczy tzw. bursztynowej komnaty, dzieł sztuki, broni lub chemikaliów.

Pojawiają się również doniesienia o możliwym zaminowaniu pociągu. Z racji występowania takiego ryzyka podczas prowadzenia prac archeologicznych należałoby zwrócić szczególną uwagę na bezpieczeństwo osób biorących udział w eksploracji, jak również na bezpieczeństwo mienia i okolicznej zabudowy miejskiej.

W artykule przedstawiono wpływ zastosowania wiedzy budowlanej w celu zapewnienia bezpieczeństwa prowadzonych robót archeologiczno-budowlanych zarówno przy poszuki-

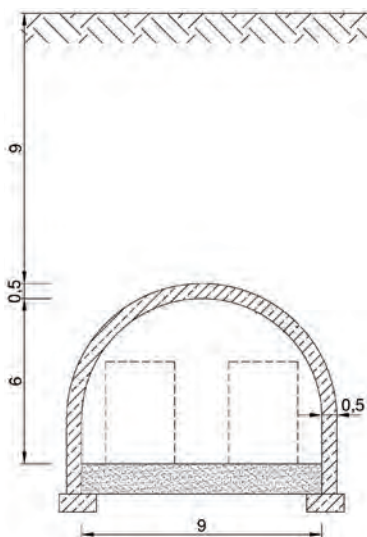
¹ P. Koper, A. Richter, *Opracowanie dot. poszukiwań złotego pociągu*, Wałbrzych 2015.

waniu złotego pociągu, jak i innych obiektów o podobnej funkcji i przeznaczeniu. Dokonano przeglądu dostępnej literatury historycznej i budowlanej w celu potwierdzenia poprawności badań georadarowych wykonanych przez odkrywców.

Określenie rodzaju konstrukcji obudowy tunelu

Na konferencji w dniu 15 grudnia 2015 roku odkrywcy tunelu przedstawili swoje opracowanie² dotyczące poszukiwań złotego pociągu. Informują w nim o istnieniu tunelu o sklepieniu łukowym o szerokości (w podstawie) 9 m, wyniosłości 6 m oraz długości 120 m. Należy przypuszczać, że podane wymiary są wymiarami w świetle, gdyż przedstawione na rysunkach³ wymiary opisują pustkę powietrzną. Tunel jest przysypany gruntem nieskalistym o miąższości 9 m.

Po wykonaniu analizy historycznej okazuje się, że na potrzeby niemieckiej armii wykonano w czasie wojny wiele tego typu obiektów. Z powodu konieczności szybkiego wykonywania prac tunelarskich budowano typowe obiekty tunelowe, o podobnych do siebie wymiarach. Informacja ta oraz przykładowy przekrój poprzeczny przez tunel została zawarta w pracy Witkowskiego⁴ i przedstawiona na rys. 1. Ponadto przekroje tuneli o podobnych wymiarach prezentują autorzy podręczników do projektowania tuneli⁵. Warto zwrócić uwagę na fakt, że ma on identyczne wymiary jak tunel odkryty przez odkrywców złotego pociągu. Wynika to głównie z konieczności zapewnienia odpowiednich wymiarów skrajni dla pociągów poruszających się takim tunelem.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przykładowego tunelu (wymiarzy w metrach)

Źródło: opracowanie własne na podstawie I. Witkowski, op. cit..

² P. Koper, A. Richter, op. cit.

³ Ibidem.

⁴ I. Witkowski, *Podziemne królestwo Hitlera. Przewodnik po podziemiach III rzeszy*, WIS-2, Warszawa 2014.

⁵ H. Stamatello, *Tunele i miejskie budowle podziemne*, Arkady, Warszawa 1970; S. Gałczyński, *Podstawy budownictwa podziemnego*, OWPWr, Wrocław 2001.

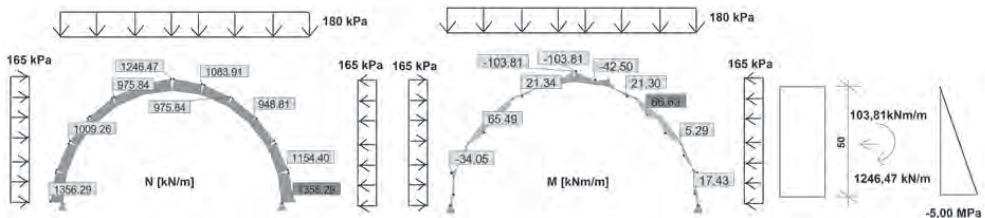
Analizy stanu wyężenia obudowy tunelu

Przedstawiony na rys. 1 obiekt poddano analizie statycznej w programie Robot Structural Analysis 2014. Przyjęto schemat statyczny konstrukcji jako prętowy łukowy o szerokości 1 m. Jako obciążenie przyjęto ciężar własny oraz obciążenie od nadkładu ośrodka gruntowego o wartości 180 kPa (nadkład ośrodka gruntowego o miąższości $9 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ – ciężar objętościowy hipotetycznego ośrodka gruntowego). Przyjęto warunki aktywnego parcia ośrodka gruntowego, gdyż wymiary tunelu są zbyt duże w stosunku do miąższości nadkładu ośrodka gruntowego, aby mogły wystąpić warunki przesklepienia. Dodatkowo uwzględniono parcie boczne na obudowę tunelu, przyjmując dla uproszczenia, że jego rozkład jest stały wzdłuż wysokości tunelu i woda gruntowa jest poniżej poziomu posadowienia. Wówczas jego wartość szacuje się na około 165 kPa ($15,5 \text{ m} \cdot 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{tg}^2(45^\circ - 18^\circ/2)$, gdzie 18° – przyjęty kąt tarcia wewnętrznego ośrodka gruntowego).

W latach czterdziestych ubiegłego wieku do projektowania konstrukcji z betonu wykorzystywano liniową teorię naprężeń. Ocenę nośności elementu konstrukcyjnego przeprowadzano poprzez porównanie efektu oddziaływania wyznaczanego w formie naprężeń ściskających beton z dopuszczalnymi naprężeniami, jakie był on w stanie przenieść. W celu przeniesienia naprężeń rozciągających umieszczano pręty zbrojeniowe, które były w stanie przenieść siłę równą co do wartości całce z wykresu naprężeń rozciągających przekrój.

Przedstawioną wyżej hipotezę potwierdzają oględziny autorów publikacji dokonane w kwaterze głównej Adolfa Hitlera w Wilczym Szańcu. W ruinach schronów można zaobserwować wystające gładkie pręty, o dość dużej średnicy (co najmniej 20 mm) i dużym rozstawie (ok. 500 mm). Wskazuje to na zastosowanie typowych rozwiązań w tamtych czasach, bez uwzględnienia wpływu zagęszczenia zbrojenia na zarysowanie elementu.

Wobec powyższych obserwacji dalsze analizy statyczne wykonano dla wartości charakterystycznych obciążeń, ponieważ projektanci tunelu nie znali postanowień obecnych norm projektowania. Za powyższym założeniem przemawia również potrzeba oszacowania maksymalnej wartości ładunku wybuchowego, którego wybuch jest w stanie przetrwać obudowa tunelu. Powiększanie obciążeń poprzez zastosowanie współczynników częściowych spowodowałyby zawyżenie masy ładunku.

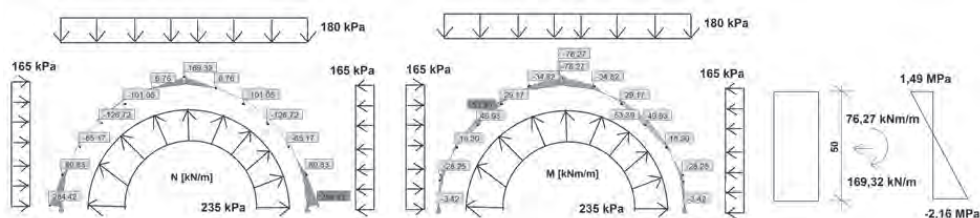


Rys. 2. Wykres momentów zginających i sił podłużnych oraz wykres naprężeń w najbardziej wyężonym przekroju: sytuacja trwała.

Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 2. przedstawiono wykres momentów zginających i sił podłużnych od obciążenia ciężarem własnym i nadkładem ośrodka gruntowego oraz wykres naprężeń liniowych w najbardziej wyężonym przekroju w sytuacji trwałej. Przyjmując, że w latach czterdziestych ubiegłego wieku typowym betonem do zastosowań budowlanych był beton o wytrzymałości

na poziomie dzisiejszego betonu klasy C12/15, można więc zauważyć, że naprężenia ściskające w najbardziej wyężonym przekroju (5,00 MPa) nie przekraczają wytrzymałości betonu na ściskanie. Nawet jeśli po uzupełnieniu obliczeń o współczynniki częściowe, które wirtualnie zwiększyłyby obciążenia i zaniżyłyby nośność, wartość naprężeń przekroczyłaby poziom dopuszczalny, to i tak należy mieć świadomość, że są to tylko hipotezy. Zatem celem powyższych rozważań jest jedynie uwiarygodnienie informacji podanych przez odkrywców⁶ w kontekście badań historycznych⁷ i wiedzy budowlanej.



Rys. 3. Wykres momentów zginających i sił podłużnych oraz wykres naprężeń w najbardziej wyężonym przekroju, sytuacja wyjątkowa podczas wybuchu

Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 3 przedstawiono również wykres momentów zginających i sił podłużnych oraz wykres naprężeń liniowych w najbardziej wyężonym przekroju, jakie mogą powstać w sytuacji wyjątkowej (wybuch), tak żeby nie została przekroczona średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie ($-1,5$ MPa). Taki układ sił wewnętrznych powstałby, gdyby nadciśnienie ewentualnego wybuchu zrównoważyło obciążenie od nadkładu gruntu i ciężaru własnego. Na tej podstawie określono, że maksymalne nadciśnienie od wybuchu w tunelu może wynosić 235 kPa.

Określenie skutków hipotetycznego wybuchu

W poprzednim podrozdziale określono prawdopodobną nośność obudowy tunelu na oddziaływanie wybuchu. Przyjęto założenie, że prace eksploracyjne będą przebiegały bezpiecznie tylko w przypadku, gdy obudowa tunelu nie ulegnie zniszczeniu. Powstanie nadciśnienia większego niż 235 kPa mogłoby wiązać się z zarysowaniem betonu.

Obecnie większość elementów budowlanych zbroi się górną i dolną siatką, a zbrojenie znajduje się zarówno w rozciąganych strefach, jak i ściskanych. Jednak autorzy przypuszczają (na podstawie własnych obserwacji budowy z okresu II wojny światowej), że ściskane fragmenty przekroju nie były zbrojone. Stal zbrojeniowa była umieszczana tylko w strefie rozciąganej przekroju. Stąd nie można dopuścić do przekroczenia nadciśnienia wybuchu o wartości 235 kPa, gdyż przekroczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie wiązałoby się z jednoczesnym zniszczeniem obudowy. Konsekwencją tego mógłby być niekontrolowany rozrzut odłamków betonu, cząstek gruntu, zniszczenie okolicznej infrastruktury, a w najlepszym razie znaczne zakurzenie okolicy w promieniu kilkuset metrów.

⁶ P. Koper, A. Richter, op. cit.

⁷ I. Witkowski, op. cit.

W związku z tym pojawia się pytanie zasadnicze: jak stwierdzić, czy takie nadciśnienie nie powstanie w przypadku ewentualnej detonacji, jeśli nie znamy masy ani rozmieszczenia ładunków wybuchowych?

Rozwiązaniem tego zagadnienia może być wyznaczenie masy ładunków wybuchowych, która wywołałaby nadciśnienie o takiej wartości. Metodologia wyznaczania masy ładunku została przedstawiona w wielu pracach, m.in. w dwóch pracach Siwińskiego i Stolarskiego⁸, Włodarczyka⁹ i Lidnera¹⁰. W artykule wykorzystano procedurę przedstawioną w ostatniej z wymienionych prac.

Zastępczy promień ładunku, wartość szczytową nadciśnienia powietrznej fali uderzeniowej oraz nadciśnienia odbitej fali uderzeniowej, czas trwania nadciśnienia, wartość nadciśnienia zastępczego oraz rozkład nadciśnienia w funkcji czasu ustala się następująco:

$$r_0 = \sqrt[3]{C} / 18,85, \quad (4.1)$$

$$\Delta p_f = p_1 \left[1 + 44200 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^3 \right], \quad (4.2)$$

$$\Delta p_0 = p_1 \left[\frac{(3k-1) \frac{\Delta p_f}{p_1} + 4k}{(k-1) \frac{\Delta p_f}{p_1} + 2k} \frac{\Delta p_f}{p_1} \right], \quad (4.3)$$

$$\tau = 9 \frac{r_0}{a_1}, \quad (4.4)$$

$$\Delta p_z = \sqrt{\left(\frac{1 - \cos \omega \tau}{\omega \tau} \right)^2 + \left(\frac{\sin \omega \tau - 1}{\omega \tau} \right)^2} \Delta p_0 \quad (4.5)$$

$$\Delta p = \Delta p_0 \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^{1,9} \sqrt{\frac{\Delta p_0}{p_1}} \quad (4.6)$$

gdzie:

C – masa materiału wybuchowego, 1000 kg,

p_1 – ciśnienie atmosferyczne,

r_1 – odległość rozpatrywanego punktu od epicentrum wybuchu, m,

k – wykładnik adiabaty, –

⁸ J. Siwiński, A. Stolarski, *Analiza oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” 2015, nr 2; idem, *Analiza oddziaływania wybuchu zewnętrznego na przegrody budowlane*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” 2015, nr 2;

⁹ E. Włodarczyk, *Mechaniczne oddziaływanie wybuchu punktowego na ściany i strop obiektu*, „Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej” 1980, nr 11.

¹⁰ M. Lidner, *Obliczenia numeryczne obciążenia od wybuchu na przykładzie konstrukcji ściano-wo-płytowej o dowolnej geometrii*, Budmika 2015. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań 2015.

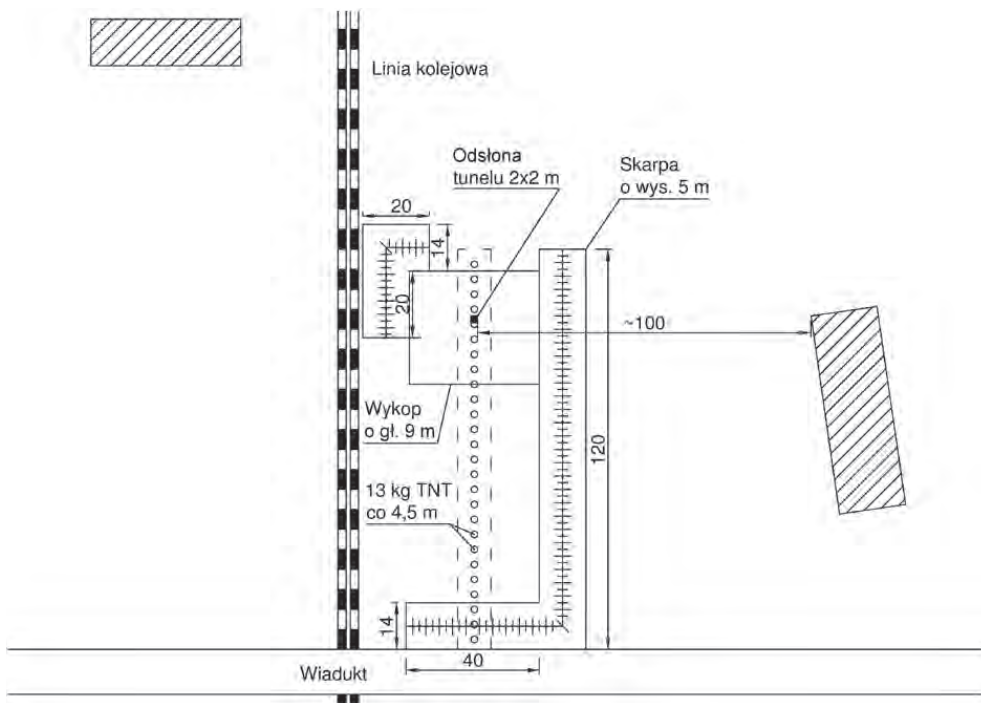
a_1 – prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

ω – częstość drgań własnych, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$,

Po wykonaniu obliczeń okazuje się, że ładunek o masie równoważnej 13 kg trotylu umieszczony w rozstawie 4,5 m wzdłuż całego tunelu generowałby statyczne naciśnienie zastępcze o wartości 200 kPa. Poniżej przedstawiono pośrednie wyniki obliczeń:

- zastępczy promień ładunku 0,13 m,
- naciśnienie fali uderzeniowej padającej na obudowę tunelu 207 kPa,
- naciśnienie fali uderzeniowej odbitej od obudowy tunelu 276 kPa,
- czas trwania naciśnienia $4 \times 10^{-3} \text{s}$,
- częstość drgań własnych wyznaczona w programie Robot 0,93 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$,
- zastępczy współczynnik dynamiczny 0,726
- statyczna wartość naciśnienia zastępczego $0,726 \times 276 = 200 \text{kPa}$.

Przykładowe rozmieszczenie ładunków zaznaczono na rys. 4. Jest to szkic zagospodarowania terenu, gdzie poszukuje się złotego pociągu. Jednak, jeśli istnieją jeszcze tego typu obiekty, to najprawdopodobniej będą one również w pobliżu torów, w zagłębieniu i przysypane dużą warstwą ośrodka gruntowego, głównie w celu ochrony przed atakiem lotniczym.



Rys. 4. Szkic zagospodarowania terenu (wymiary w metrach)

Źródło: opracowanie własne.

Weryfikacji obliczeń ręcznych dokonano z wykorzystaniem numerycznej procedury wyznaczenia naciśnienia z zastosowaniem algorytmu przedstawionego w pracy Lidnera

i Szcześniak¹¹. Wykorzystano trzy zasady zachowania: masy, pędu i energii oraz dyssypację energii (utrata energii związaną między innymi z przemianą materiału wybuchowego w ciepło) wyrażone następująco:

$$\rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (4.7)$$

$$\rho_0 \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial(p+q)}{\partial x}, \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + (p+q) \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (4.9)$$

$$q = -\frac{(c\Delta x)^2}{V} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|, \quad (4.10)$$

gdzie:

ρ_0 – gęstość ośrodka gazowego, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

V – objętość ośrodka gazowego wyrażana w jednostkach odwrotności gęstości, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,

U – prędkość fali uderzeniowej w trzech ortogonalnych kierunkach, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

Δt – krok czasowy, s,

∂x – wymiary podzielonej przestrzeni gazowej w trzech ortogonalnych kierunkach, m,

\mathcal{E} – energia, J,

p – ciśnienie gazu w trzech ortogonalnych kierunkach, MPa,

q – dyssypacja w trzech ortogonalnych kierunkach reprezentowana przez ciśnienie, MPa,

c – parametr bezwymiarowy ustalany doświadczalnie.

Równania od (4.7) do (4.10) rozwiązano metodą różnic skończonych. Następnie podzielono rozpatrywaną przestrzeń na równe sześciany $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$ i zadanie rozpatrywano w kolejnych krokach czasowych Δt . Wymiary sześcianów powinny być co najmniej równe długości boku ładunku wybuchowego. Zadanie analizuje się w pewnych krokach czasowych Δt następujących po sobie (ilość kroków czasowych – n). Wielkość kroku czasowego Δt jest równa czasowi detonacji materiału wybuchowego.

Z powyższego układu równań wyznacza się wartości ciśnienia. Z równania od (4.8) należy wyznaczyć $Ux_{l_x;l_y;l_z}^{n+\frac{1}{2}}$, $Uy_{l_x;l_y;l_z}^{n+\frac{1}{2}}$, $Uz_{l_x;l_y;l_z}^{n+\frac{1}{2}}$ dla każdego l_x, l_y, l_z, z (4.7) $V_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+1}$ dla każdego l_x, l_y, l_z, z (4.10) $qx_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$, $qy_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$, $qz_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$ dla każdego l_x, l_y, l_z, z (4.9) $px_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+1}$, $py_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+1}$, $pz_{l_x+\frac{1}{2};l_y+\frac{1}{2};l_z+\frac{1}{2}}^{n+1}$ dla każdego l_x, l_y, l_z .

¹¹ M. Lidner, Z. Szcześniak, „Obliczenia numeryczne oddziaływania wybuchu”, „Logistyka” 2015, nr 4 (opracowane na podstawie: J. VonNeumann, R. D. Richtmyer, *A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks*, J. App. Ph. 1950, vol. 21).

Następnie należy powtarzać ten cykl obliczeń w kolejnych krokach czasowych przy uwzględnieniu warunków brzegowych. Uwzględnia się obecność przegród budowlanych, od których następuje odbicie fali uderzeniowej, poprzez wprowadzenie warunku brzegowego zerowej prędkości gazu w miejscu przegrody (na przykład w przypadku wybuchu w po-

mieszczeniu sześciennym $Ux_{L; l_y; l_z}^{n+\frac{1}{2}} = Uy_{l_x; K; l_z}^{n+\frac{1}{2}} = Uz_{l_x; l_y; M}^{n+\frac{1}{2}} = 0$).

Drugim rodzajem warunku brzegowego jest wprowadzenie odpowiedniej wartości nadciśnienia w miejscu detonacji ładunku wybuchowego (na przykład $px_{\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{1}{2}}^1 = py_{\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{1}{2}}^1 = pz_{\frac{1}{2}; \frac{1}{2}; \frac{1}{2}}^1 = P_0$).

W celu zapewnienia stabilności rozwiązań należy dodatkowo spełnić następujące warunki z pracy Lidnera i Szcześniaka¹²:

$$\frac{a_1 \Delta t}{\Delta x} \leq \frac{\sqrt{k}}{2c}, \quad (4.11)$$

$$\frac{a_1 \Delta t}{\Delta y} \leq \frac{\sqrt{k}}{2c}, \quad (4.12)$$

$$\frac{a_1 \Delta t}{\Delta z} \leq \frac{\sqrt{k}}{2c}. \quad (4.13)$$

Wyżej wyprowadzone równania przedstawiają zapisany metodą różnic skończonych układ czterech równań z pięcioma niewiadomymi wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi. Podany układ równań rozwiązuje zagadnienie dynamiki wybuchu w ujęciu trójwymiarowym, co doskonale odpowiada warunkom rozchodzenia się nadciśnienia od wybuchu w obudowie tunelu. Niestety wartość dyssypacji zależy od nieznanego parametru dyssypacji, którego wartość trzeba przyjąć, żeby podany układ równań miał rozwiązanie.

Brakujący parametr dyssypacji można ustalić z opublikowanych w literaturze badań detonacji materiału wybuchowego wewnątrz obiektów budowlanych. Takie kalibracje opisano w pracy Lidnera¹³. Wartość parametru dyssypacji c ustalono jako równą 0,6723.

W prezentowanym zadaniu w obudowie tunelu przyjęto następujące wartości parametrów:

$$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,20 \text{ m},$$

$$l = 600,$$

$$\Delta t = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s},$$

$$n = 5000,$$

$$p_{1/2}^1 = 15930 \text{ MPa}.$$

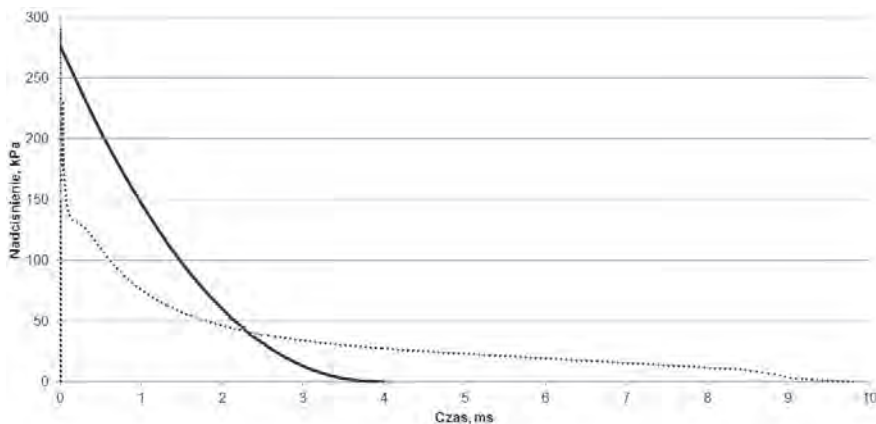
Wówczas iloczyn liczby odcinków l i wartości odcinka Δx daje wartość 120 m, czyli podaną w pracy Kopera i Richtera¹⁴ długość tunelu. Podobnie mnożąc liczbę kroków czasowych n przez wartość kroku czasowego Δt , otrzymuje się całkowity czas trwania analizy numerycznej, który wynosi 10^{-2} s.

¹² M. Lidner, Z. Szcześniak, op. cit.

¹³ M. Lidner, *Analizy numeryczne oddziaływania wybuchu*, XVI Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice 2016 (w druku).

¹⁴ P. Koper, A. Richter, op. cit.

Wyniki analizy numerycznej i analizy na podstawie wzorów empirycznych dostępnych w pracy Lidnera¹⁵ przedstawiono na rys. 5, które wykazują ogólną zbieżność co do wartości nadciśnienia oraz monotoniczności wykresu.



Rys. 5. Wykres nadciśnienia w funkcji czasu: wzory empiryczne – linia ciągła, analiza numeryczna – linia przerywana

Źródło: opracowanie własne.

Czas trwania nadciśnienia fali uderzeniowej wyznaczony numerycznie jest 2,5-krotnie dłuższy, jednak całkowity impuls (całka z wykresu czas–nadciśnienie) przyjmuje zbliżone wartości w obu wynikach. Ponadto wzory empiryczne zostały wyprowadzone przede wszystkim dla detonacji zewnętrznej. Gazy powybuchowe ograniczone przegrodami (na przykład obudową tunelu) rozprężają się wolniej, co skutkuje dłuższym czasem trwania nadciśnienia. Podkreśla większą skuteczność analiz numerycznych w analizie eksplozji wewnętrznej.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że podane wykresy nadciśnienia w funkcji czasu mogą służyć tylko do dynamicznych analiz konstrukcji obudowy tunelu. W przypadku wykonywania statycznych analiz nie należy stosować maksymalnej wartości nadciśnienia, tylko pomnożyć tę wartość przez zastępczy współczynnik dynamiczny. Wynika to z faktu, że odpowiedź dynamiczna konstrukcji na oddziaływanie krótkotrwałe (dużo krótsze od okresu drgań własnych), jakim jest wybuch, jest mniejsze niż równoważne (co do wartości) oddziaływanie statyczne.

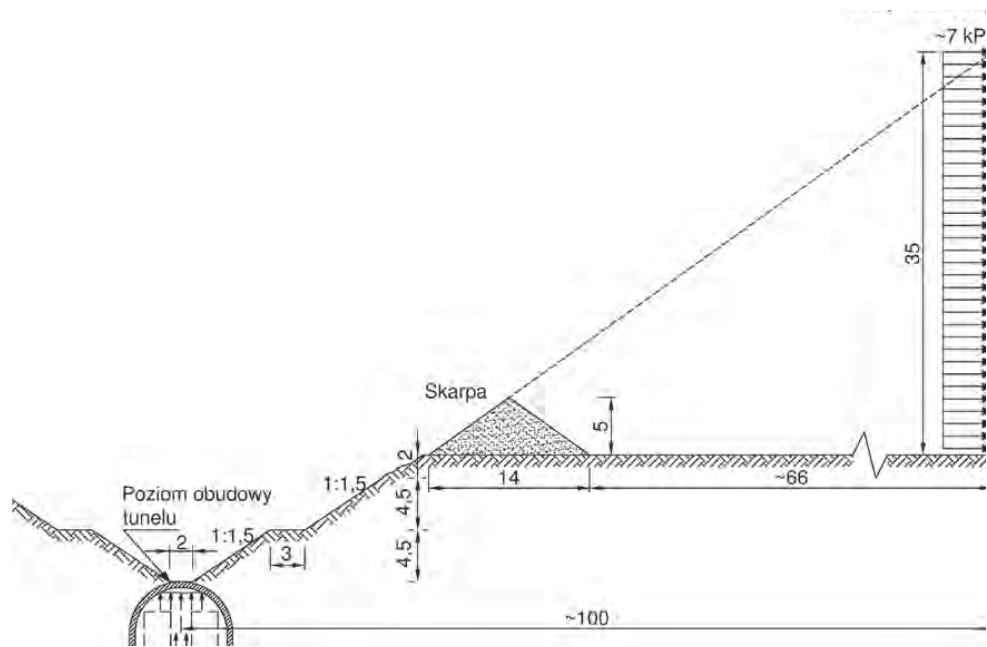
Na podstawie własnych doświadczeń autorzy pracy mogą stwierdzić, że ładunek o masie 13 kg trotylu rozmieszczony co 4,5 m jest zdolny do zniszczenia dowolnych wagonów kolejowych, również pancernych. Wydaje się również, że żołnierze, których zadaniem mogłoby być ewentualne zaminowanie pociągu, nie montowałiby aż tak dużych ilości materiałów wybuchowych.

Z powyższych rozważań wnioskuje się, że obudowa tunelu nie powinna ulec zniszczeniu poddana działaniu nadciśnienia od wybuchu ładunku o łącznej masie około 350 kg trotylu.

¹⁵ M. Lidner, *Analizy numeryczne...*

Ustalenie najbezpieczniejszych metod eksploracji

W materiałach przedstawionych przez odkrywców pociągu¹⁶ proponuje się, jako ostateczny sposób na udowodnienie istnienia złotego pociągu, jego eksplorację.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny tunelu wraz z zaznaczonymi odległościami (w metrach) od najbliższego budynku

Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 6 przedstawiono szkic proponowanego tymczasowego zagospodarowania placu budowy podczas eksploracji tunelu. Zakłada się wykonanie wykopu nad osią środkową tunelu w odległości co najmniej 20 m od miejsca zamknięcia tunelu w wyniku wybuchu. Wykop o głębokości 9 m należałoby wykonać z naturalnym spadkiem skarp, bądź z zabezpieczeniem ściankami szczelnymi. Zalecany przez normę PN-B-06050:1999 spadek wynosi 1:1,5. Dodatkowo na głębokości 4,5 m należy wykonać wokół wykopu opaskę o szerokości 3 m w celu umożliwienia wjazdu samochodów do transportu urobku. Wymiary wykopu na powierzchni należy wykonać takie, aby na głębokości 9 m (poziom obudowy tunelu) można było odsłonić obudowę tunelu o wymiarach 2 x 2 m. W ten sposób ukształtowane ściany wykopu spowodują skierowanie ewentualnej fali uderzeniowej od wybuchu w górę, a nie w stronę okolicznej zabudowy. Urobek z wykopu (szacunkowa ilość urobku 7000 m³) należy układać w skarpy (rys. 6) w celu zabezpieczenia okolicznych budynków i budowli przed skutkami oddziaływania fali uderzeniowej. Rzut usypanych skarp przed-

¹⁶ P. Koper, A. Richter, op. cit.

stawiono również na rys. 4. Dodatkowo powierzchnie skarp można przykryć folią w celu zapobiegnięcia rozrzutowi drobnych ziaren gruntu i zapylenia okolicy.

Po wykonaniu niezbędnych zabezpieczeń można przystąpić do wykonania otworu w stropowej części obudowy tunelu. Ze względu na odciążenie obudowy w okolicy proponowanego otworu jego wykonanie nie wiąże się z ryzykiem zniszczenia obudowy tunelu w wyniku lokalnego osłabienia obudowy obiektu.

Sprawdzenie bezpieczeństwa okolicznych obiektów na wypadek niekontrolowanego wybuchu w tunelu dokonano przy pomocy obliczeń zgodnych z procedurą podaną przez Lidnera¹⁷. Po wykonaniu skarp zabezpieczających okoliczną infrastrukturę uniemożliwia się dojsię do niej fali uderzeniowej w linii prostej z otworu wykonanego w tunelu (przekrój poprzeczny na rys. 6). Nadciśnienie padającej fali uderzeniowej na najbliższy fragment budynku, znajdujący się w odległości około 100 m, wynosi około 7 kPa. Zgodnie z wytycznymi podanymi w pracy Rosenkiewicza i Ludasa¹⁸ maksymalna wartość, która nie wywoła zniszczenia i nie ma negatywnego wpływu na ludzi to 10 kPa. Podobne wartości maksymalnego nadciśnienia przedstawiono w pracy Kobiela [2005], gdzie podano, że przy wartości nadciśnienia do 5 kPa nie ma ryzyka zniszczenia stolarki drzwiowej i okiennej. Przy wartości nadciśnienia 7 kPa istnieje ryzyko zniszczenia 50% powierzchni stolarki okiennej, więc należałoby jedynie uzgodnić z zarządcami okolicznych budynków prowizoryczne zabezpieczenie okien na czas wejścia do tunelu. Układ konstrukcji przy żadnej z tych wartości nie zostanie naruszony.

Podczas pierwszej eksploracji tunelu przez saperów pozostałe osoby (poza saperami) powinny znajdować się w odległości co najmniej 100 m od wykopu, tak żeby nadciśnienie od ewentualnego wybuchu nie przekroczyło 10 kPa w miejscu, w którym się znajdują.

Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości i osiągnięcia techniki budowlanej, które mogą mieć zastosowanie, w połączeniu z innymi osiągnięciami, do poszukiwań i eksploracji obiektów historycznych, w tym złotego pociągu. Artykuł przedstawia rozważania na temat trzech niewiadomych, tzn. niepewności co do istnienia samego tunelu i pociągu, hipotezy związanej z ewentualnym zaminowaniem tunelu i pociągu oraz masy ewentualnych ładunków wybuchowych.

Zadanie rozwiązano poprzez przyjęcie pewnych maksymalnych wartości parametrów, które nie powinny zostać przekroczone, jak na przykład odporności istniejącej infrastruktury na wybuch. Ustalono maksymalną masę materiałów wybuchowych o wartości 13,5 kg trotylu w rozstawie 4,5 m, która nie powinna zniszczyć obudowy tunelu. Ewentualny błąd popełniony podczas eksploracji nie powinien doprowadzić wówczas do zniszczenia okolicznej infrastruktury. W tym celu zaproponowano również odpowiednie ukształtowanie skarp, które ograniczą w pewnym stopniu propagację fali uderzeniowej. Wyniki potwierdzono analizami numerycznymi.

¹⁷ M. Lidner, *Analizy numeryczne...*

¹⁸ D. Rosenkiewicz, M. Ludas, *Analysis of Parameters of a Blast Waves Generated by Explosions of 75 g TNT Charges*, Centr. Eu J. En. Mat. 2006, vol. 3, nr 1–2

Bibliografia

- Gałczyński S., 2001, *Podstawy budownictwa podziemnego*, OWPWr, Wrocław, s. 70.
- Kobiela S., 2005, *Współczesne betonowe budowle ochronne. Wybrane zagadnienia projektowania*, OWPWr, Poznań.
- Koper P., Richter A., 2015, *Opracowanie dot. poszukiwań złotego pociągu*, Wałbrzych.
- Lidner M., 2015, *Obliczenia numeryczne obciążenia od wybuchu na przykładzie konstrukcji ścianowo-płytkowej o dowolnej geometrii*, Budmika 2015. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań.
- Lidner M., 2016, *Analizy numeryczne oddziaływania wybuchu*, XVI Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice (przyjety do druku).
- Lidner M., Szcześniak Z., 2015, *Obliczenia numeryczne oddziaływania wybuchu*, Logistyka, nr 4, 9397-9404.
- PN-B-06050:1999 Geotechnika. Roboty ziemne. Wymagania ogólne.
- Rosenkiewicz D., Ludas M., 2006, *Analysis of Parameters of a Blast Waves Generated by Explosions of 75 g TNT Charges*, Centr. Eu J. En. Mat., vol. 3, nr 1–2, 83–94.
- Siwiński J., Stolarski A., 2015a, *Analiza oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane*, Biul. Wojsk. Ak. Techn., nr 2, 197–211.
- Siwiński J., Stolarski A., 2015b, *Analiza oddziaływania wybuchu zewnętrznego na przegrody budowlane*, Biul. Wojsk. Ak. Techn., nr 2, 173–196.
- Stamatello H., 1970, *Tunele i miejskie budowle podziemne*, Arkady, Warszawa, s. 64–76.
- VonNeumann J., Richtmyer R. D., 1950, *A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks*, J. App. Ph., vol. 21, 232–237.
- Witkowski I., 2014, *Podziemne królestwo Hitlera. Przewodnik po podziemiach III rzeszy*, WIS-2, Warszawa.
- Włodarczyk E., 1980, *Mechaniczne oddziaływanie wybuchu punktowego na ściany i strop obiektu*, Biul. Woj. Ak. Techn., nr 11, 131–153.

SUMMARY

Michał Lidner

Numerical blast load analysis in the context of postwar tunnels surveying

This paper constitutes an analysis of the impact of hypothetical explosion in post-war tunnels. In one of such objects the presence of a gold train is suspected, and (according to media reports) it can be mined with explosives. This article presents the impact of the application of construction knowledge to ensure the safety of archeological and construction works during an exploration of a tunnel. The historical and technical aspects of the opencast construction of tunnels have been presented. The behavior of the tunnel at the time of a possible detonation of explosives has been described. The maximum weight of explosive materials which does not violate the construction of the site has

also been calculated. Simplified analytical and numerical methods have been applied. A possible location of the tunnel has been described, along with a secure way of its exploration. The effect of a potential explosion on the surrounding urban infrastructure has been identified as well as the most economical way to determine its security.

Key words: Explosion, shock wave, tunnels.

Data wpływu artykułu: 16.02.2016 r.

Data akceptacji artykułu: 10.05.2016 r.