**inż. Kamil Sobczyk**
*kamil.sobczyk@student.wat.edu.pl*

**mgr inż. Michał Lidner**
*michal.lidner@wat.edu.pl*

Wojskowa Akademia Techniczna
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji

# ANALIZA NUMERYCZNA ODDZIAŁYWANIA WYBUCHU W KONTEKŚCIE POSZUKIWAŃ ZŁOTEGO POCIĄGU

# NUMERICAL BLAST LOAD ANALYSIS IN THE CONTEXT OF SURVEYING THE GOLDEN TRAIN

**Słowa kluczowe**: *wybuch, fala uderzeniowa, tunele, złoty pociąg*

## 1. Wstęp

Od kilku miesięcy zainteresowanie polskich mediów wzbudza wiadomość o odkryciu złotego pociągu. Pod koniec wojny pociąg miał wyruszyć z Wrocławia, a w drodze do Wałbrzycha został podobno ukryty przez żołnierzy niemieckich. 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 duża ilość informacji na temat zawartości pociągu dotyczy tak zwanej złotej komnaty, dzieł sztuki, broni lub chemikaliów.

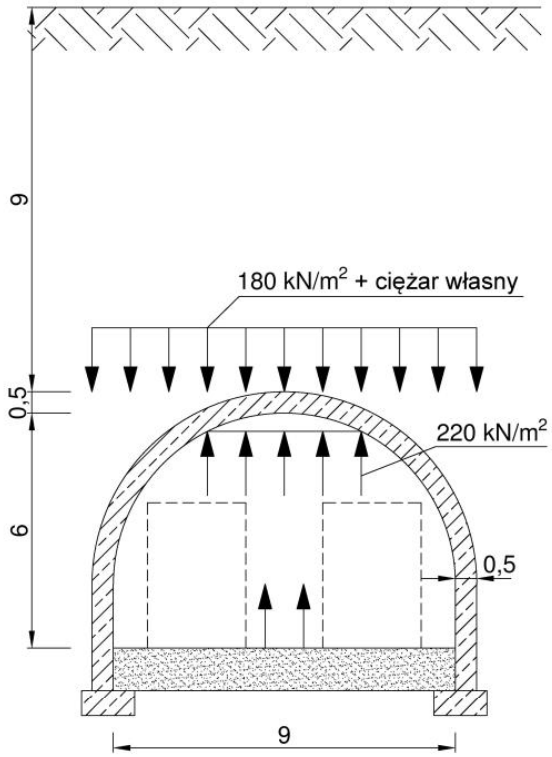
Pojawiają się również doniesienia o możliwym zaminowaniu wspomnianego pociągu. Z racji występowania takiego ryzyka podczas prowadzenia prac archeologicznych należałoby zwrócić szczególną ostrożność na bezpieczeństwo osób biorących udział w eksploracji, jak również bezpieczeństwo mienia i okolicznej zabudowy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

W niniejszym artykule przedstawiono wpływ zastosowania wiedzy budowlanej w celu zapewnienia bezpieczeństwa wspomnianych robót archeologiczno-budowlanych. W rozdziale 2 przedstawiono historyczne i techniczne aspekty budowy tuneli metodą odkrywkową. W rozdziale 3 opisano zachowanie obudowy tunelu w momencie ewentualnej detonacji ładunków wybuchowych. Określono również maksymalną masę materiału wybuchowego, która nie naruszy konstrukcji obiektu. W rozdziale 4 opisano lokalizację tunelu oraz bezpieczny sposób jego eksploracji. Następnie określono wpływ ewentualnego wybuchu na okoliczną infrastrukturę miejską i przedstawiono najbardziej ekonomiczne zabezpieczenie jej.

## 2. Identyfikacja konstrukcji obudowy tunelu

Na konferencji w dniu 15 grudnia 2015 roku odkrywcy tunelu przedstawili swoje opracowanie (*Koper et al. 2015*) dotyczącą poszukiwań złotego pociągu. Informują w niej o istnieniu tunelu o sklepieniu łukowym o szerokości (w podstawie) 9 metrów, wyniosłości 6 metrów oraz długości około 120 metrów. Należy przypuszczać, że podane wymiary są wymiarami w świetle, gdyż przedstawione na rysunkach (*Koper et al. 2015*) wymiary opisują pustkę powietrzną. Tunel jest przysypany ośrodkiem gruntowym nieskalistym o miąższości 9 metrów.

Po wykonaniu analizy historycznej okazuje się, że na potrzeby armii niemieckiej wykonano w czasie wojny wiele tego typu obiektów. Z racji potrzeby szybkiego wykonywania prac tunelarskich, budowano obiekty tunelowe typowe, o podobnych do siebie wymiarach. Informacja ta oraz przykładowy przekrój poprzeczny przez tunel została zawarta w pracy *Witkowski 2014*. Przykładowy przekrój poprzeczny przedstawiono na Rys. 1. Warto zwrócić uwagę na fakt, że ma on identyczne wymiary jak tunel odkryty przez odkrywców złotego pociągu.




Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez tunel (*Witkowski 2014*).

Przedstawiony na Rys. 1 obiekt poddano analizie statycznej w programie Robot Structural Analysis 2014. Przyjęto schemat statyczny konstrukcji jako prętowy łukowy o szerokości 1 metra. Jako obciążenie przyjęto ciężar własny oraz obciążenie od nadkładu ośrodka gruntowego o wartości 180 kN/m$^2$ (nadkład ośrodka gruntowego o miąższości 9 metrów x 20 kN/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.

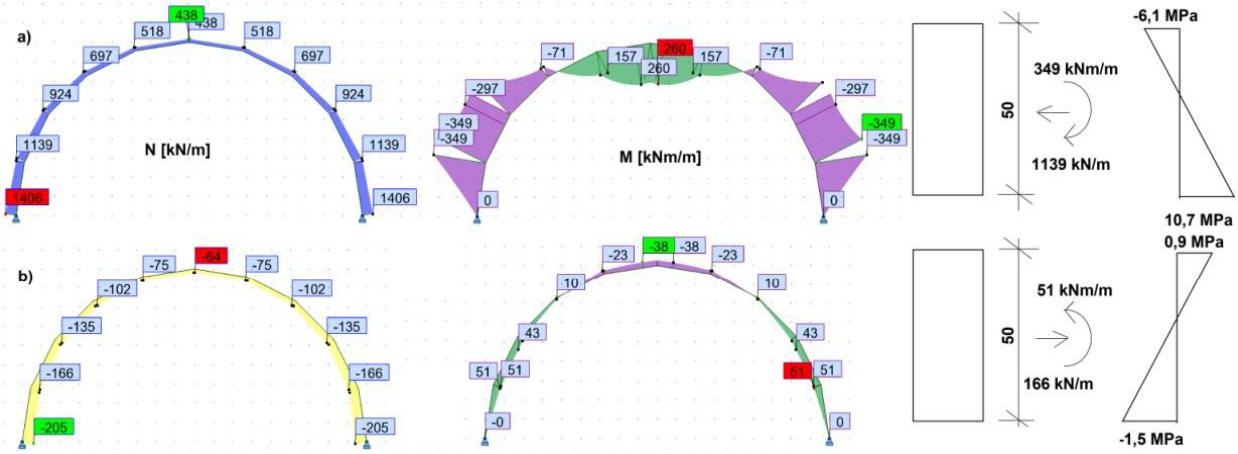
W latach czterdziestych ubiegłego wieku do projektowania konstrukcji z betonu wykorzystywano teorię liniową naprężeń. Ocenę nośności elementu konstrukcyjnego przeprowadzano poprzez porównanie efektu oddziaływania wyznaczanego w formie naprężeń ściskających beton z dopuszczalnymi naprężeniami jakie był 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 (około 50 cm). Powyższe wskazuje na brak wiedzy odnośnie 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 spowodowałoby zawyżenie masy ładunku.

Na Rys. 2 przedstawiono wykres momentów zginających i sił podłużnych od obciążenia ciężarem własnym i nadkładem ośrodka gruntowego oraz wykres naprężeń liniowych w najbardziej wytężonym przekroju w sytuacji trwałej (punkt a). Przyjmując, że w okresie lat czterdziestych ubiegłego wieku typowym betonem do zastosowań budowlanych był beton o wytrzymałości na poziomie dzisiejszego betonu klasy C12/15, można zauważyć, że naprężenia ściskające w najbardziej wytężonym przekroju (10,7 MPa) nie przekraczają wytrzymałości betonu na ściskanie.




Rys. 2. Wykres momentów zginających i sił podłużnych oraz wykres naprężeń w najbardziej wytężonym przekroju: a) sytuacja trwała, b) sytuacja wyjątkowa podczas wybuchu.

Na Rys. 2 przedstawiono również wykres momentów zginających i sił podłużnych oraz wykres naprężeń liniowych w najbardziej wytężonym przekroju (punkt b) 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 zrównoważyłoby obciążenie od nadkładu gruntu, ciężar własny oraz wygenerowałoby dodatkowe obciążenie skierowane w górę o wartości 27,5 kN/m$^2$. Na tej podstawie stwierdza się, że maksymalne nadciśnienie od wybuchu w tunelu może wynosić 220 kPa (180 kN/m$^2$ + 12,5 kN/m$^2$ + 27,5 kN/m$^2$).

Nadciśnienie pochodzące z detonacji ładunku wybuchowego w tunelu o sklepieniu kołowym rozchodziłoby się w postaci sfery. Jednak ze względu na hipotetyczną obecność pociągu zostanie ono przede wszystkim skierowane pionowo do góry. Wówczas można przyjąć, że kierunek tego obciążenia jest w całości pionowy i zgodny z kierunkiem obciążeń stałych tunelu. Przedstawiono to strzałkami pionowymi skierowanymi do góry na Rys. 1. Stąd wynika sumowanie obciążeń w poprzednim akapicie.

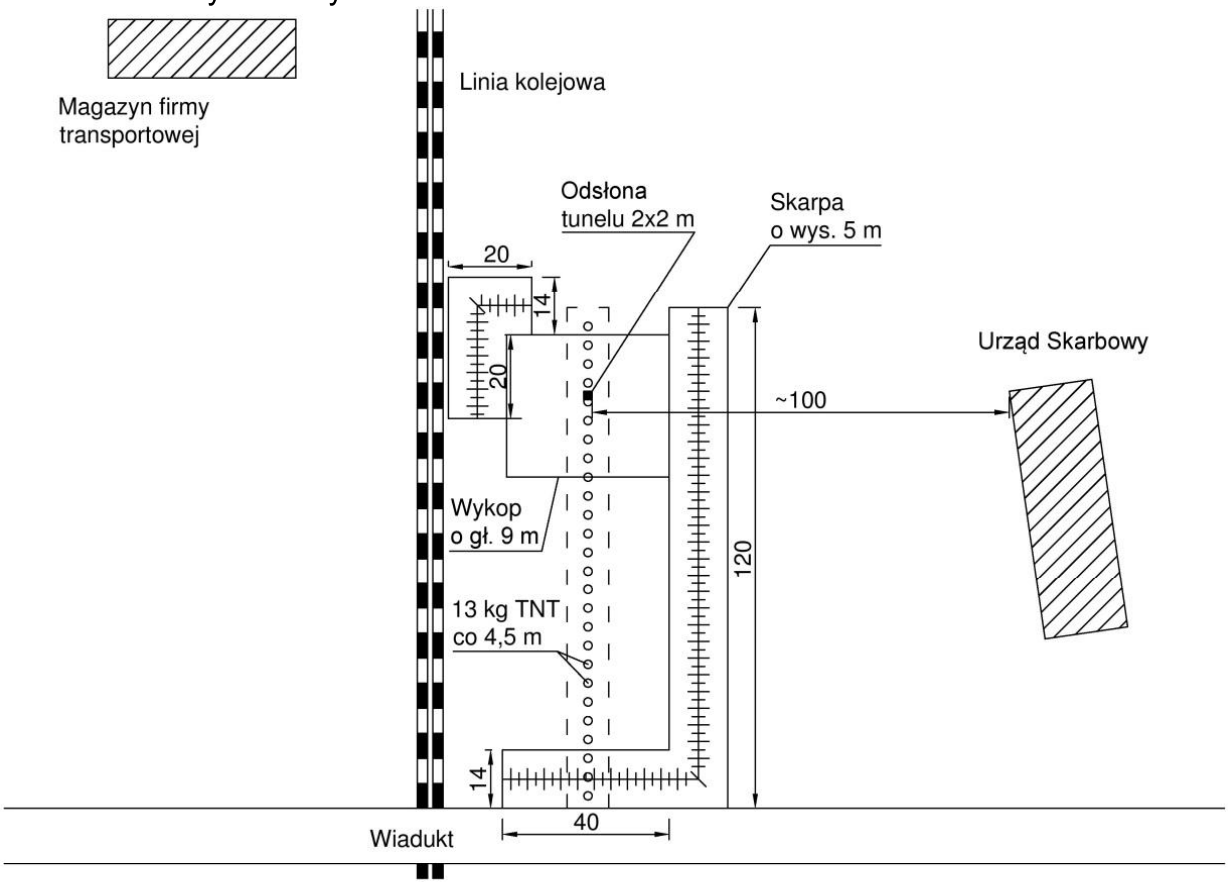
## 3. Określenie hipotetycznych skutków wybuchu

W rozdziale 2 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 220 kPa mogłoby wiązać się z zarysowaniem betonu.

Obecnie większość elementów budowlanych zbroi się siatką górną i dolną, a zbrojenie znajduje się zarówno w strefach rozciąganych jak i ściskanych. Jednak autorzy przypuszczają (na podstawie własnych obserwacji budowli z okresu II wojny światowej), że ściska-

ne fragmenty przekroju nie były zbrojone. Stal zbrojeniowa była umieszczana tylko w strefie rozciąganej przekroju. Stąd nie można dopuścić do przekroczenia nadciśnienie wybuchu o wartości 220 kPa, gdyż przekroczenie wytrzymałości betonu na rozciąganie wiązałoby się z jednoczesnym zniszczeniem obudowy. Konsekwencją tego mógłby być niekontrolowany rozrzut odłamków betonu, cząstek gruntu, zniszczenie okolicznego wiaduktu i budynków (Rys. 3), a w najlepszym razie znaczne zakurzenie okolicy w promieniu kilkuset metrów.

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?




Rys. 3. Szkic zagospodarowania terenu.

Jako rozwiązanie tego zagadnienia posłuży odpowiedź na pytanie jaka masa ładunków wybuchowych wywołałaby nadciśnienie o takiej wartości. Metodologia wyznaczania masy ładunku została przedstawiona w wielu publikacjach, między innymi w dwóch pracach *Siwiński et al. 2015a i b*, *Włodarczyk 1980*, *Lidner 2015a*. W artykule wykorzystano procedurę przedstawioną w ostatniej z wymienionych prac.

Po wykonaniu obliczeń okazuje się, że ładunek o masie równoważnej trotylu 13 kg umieszczony w rozstawie 4,5 m wzdłuż całego tunelu generowałby statyczne nadciśnienie zastępcze o wartości 200 kPa. Przykładowe rozmieszczenie ładunków zaznaczono na Rys. 3. Poniżej przedstawiono pośrednie wyniki obliczeń:

- zastępczy promień ładunku – 0,13 m,
- nadciśnienie fali uderzeniowej padającej na obudowę tunelu – 207 kPa,
- nadciśnienie fali uderzeniowej odbitej od obudowy tunelu – 276 kPa,
- czas trwania nadciśnienia – $4x10^{-3}$s,
- częstość drgań własnych wyznaczona w programie Robot – 0,93 rad/s,
- okres drgań – 6,76 s,
- zastępczy współczynnik dynamiczny – 0,726,

- statyczna wartość nadciśnienia zastępczego – 0,726 x 276 kPa = 200 kPa.

W celu weryfikacji obliczeń ręcznych przedstawiono procedurę wyznaczenia nadciśnienia numerycznie. W tym celu wykorzystuje się algorytm przedstawiony w pracy *Von-Neumann et al. 1950*, w którym trzy zasady zachowania: masy, pędu i energii oraz dyssypację energii (utratę energii związaną między innymi z przemianą materiału wybuchowego w ciepło) zapisano w postaci różnic skończonych (por. *Lidner et al. 2015*).

W pracy *VonNeumann et al., 1950* rozważa się jednowymiarowy ruch gazów. Przyjmuje się, że $X = X(x,t)$ opisuje położenie cząstek gazu w czasie $t$, które pierwotnie były w położeniu o współrzędnej $x$. Symbolem $\rho_0 = \rho_0(x)$ oznacza się gęstość początkową. Wówczas objętość gazu $V$ (wyrażoną z $m^3$/kg) oraz prędkość $U$ można wyrazić jako:

$$V(x,t) = \frac{\partial X}{\partial x} \cdot \frac{1}{\rho_0(x)}, \tag{1}$$

$$U(x,t) = \frac{\partial X}{\partial t}, \tag{2}$$

a równania reprezentujące zasadę zachowania masy, pędu i energii oraz mechanizm dyssypacji:

$$\rho_0 \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial x}, \tag{3}$$

$$\rho_0 \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial (p+q)}{\partial x}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (p+q)\frac{\partial V}{\partial t} = 0, \tag{5}$$

$$q = -\frac{(c\Delta\Delta)^2}{V} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \left|\frac{\partial U}{\partial x}\right|, \tag{6}$$

gdzie:

$p = p(x,t)$ – ciśnienie gazu;
$\varepsilon = \varepsilon(x,t)$ – energia gazu;
$q$ – dyssypacja reprezentowana przez ciśnienie;
$c$ – zmienna bezwymiarowa;
$\Delta x$ – grubość warstwy gazu.

W celu rozwiązania przedstawionego zadania należy podzielić rozpatrywaną przestrzeń na równe odcinki $\Delta x$. Zadanie należy rozpatrywać w kolejnych krokach czasowych $\Delta t$. Wymiar odcinka $\Delta x$ powinien być co najmniej równy długości boku ładunku wybuchowego. Zadanie analizuje się w pewnych krokach czasowych $\Delta t$ następujących po sobie (ilość kroków czasowych - $n$). Wielkość kroku czasowego $\Delta t$ przyjmuje się równą czasowi detonacji materiału wybuchowego. Wówczas zasady zachowania masy, pędu, wzór na dyssypację energii i zasadę zachowania energii, przy założeniu, że $x_l,\ t^n = (l = 1, 2, ..., L;\ n = 0, 1, 2, ...)$, przedstawia się jak poniżej:

$$U_l^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{\Delta t\left(p_{l+\frac{1}{2}}^n + q_{l+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - p_{l-\frac{1}{2}}^n - q_{l-\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}\right)}{\rho_0 \Delta x} + U_l^{n-\frac{1}{2}} \tag{7}$$

$$V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{\Delta t\left(U_{l+1}^{n+\frac{1}{2}} - U_{l}^{n+\frac{1}{2}}\right)}{\rho_0 \Delta x} + V_{l+\frac{1}{2}}^{n}, \tag{8}$$

$$q_{l+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{2c^2}{V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} + V_{l+\frac{1}{2}}^{n}}\left(U_{l+1}^{n+\frac{1}{2}} - U_{l}^{n+\frac{1}{2}}\right)\cdot\left|U_{l+1}^{n+\frac{1}{2}} - U_{l}^{n+\frac{1}{2}}\right|, \tag{9}$$

$$p_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{p_{l+\frac{1}{2}}^{n}\left[V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} + V_{l+\frac{1}{2}}^{n} - k\left(V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} - V_{l+\frac{1}{2}}^{n}\right)\right] + 2(1-k)q_{l+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}\left(V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} - V_{l+\frac{1}{2}}^{n}\right)}{k\left(V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} - V_{l+\frac{1}{2}}^{n}\right) + V_{l+\frac{1}{2}}^{n+1} + V_{l+\frac{1}{2}}^{n}}, \tag{10}$$

gdzie:

$U_{l(+1)}^{n(+/-)1/2}$ – prędkość ośrodka gazowego w odcinku *Δx* o numerze *l (l+1)* w chwili czasowej n(+/-)1/2, m/s;
*Δt* – krok czasowy, s;
$p_{l(+/-)1/2}^{n(+1)}$ – ciśnienie ośrodka gazowego w odcinku *Δx* o numerze *l(+/-)1/2* w chwili czasowej (n+1), N/m$^2$;
$q_{l(+/-)1/2}^{n(+1)}$ – dyssypacja energii ośrodka gazowego w odcinku *Δx* o numerze *l(+/-) 1/2* w chwili czasowej (n+1), N/m$^2$;
$\rho_0$ – gęstość ośrodka gazowego, kg/m$^3$;
*Δx* – długość odcinków podzielonej przestrzeni gazowej, m;
$V_{l(+/-)1/2}^{n(+1)}$ – objętość ośrodka gazowego w odcinku *Δx* o numerze *l(+/-)1/2* w chwili czasowej (n+1), wyrażona w m$^3$/kg;
*c* – parametr dyssypacji, -;
*k* – wykładnik adiabaty, -.

W celu zapewnienia stabilności rozwiązań należy dodatkowo spełnić następujący warunek *VonNeumann et al. 1950* :

$$\frac{a_1 \Delta t}{\Delta x} \le \frac{\sqrt{k}}{2c}, \tag{11}$$

gdzie:

$a_1$ – prędkość rozchodzenia się dźwięku w ośrodku gazowym, m/s.

Z powyższego układu równań wyznacza się wartości ciśnienia. Z równania (7) należy wyznaczyć $U_l^{n+\frac{1}{2}}$ dla każdego $l$, z (8) $V_{l+\frac{1}{2};}^{n+1}$ dla każdego $l$, z (9) $q_{l+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}$ dla każdego $l$, z (10) $p_{l+\frac{1}{2}}^{n+1}$ dla każdego $l$. Następnie należy powtarzać ten cykl obliczeń dla kolejnych kroków czasowych przy uwzględnieniu warunków brzegowych, na przykład dla rozpatrywanego zadania: $p_{\frac{1}{2}}^{1} = p_0$.

Wyżej wyprowadzone równania przedstawiają zapisany metodą różnic skończonych układ czterech równań z pięcioma niewiadomymi (*U*, *V*, *q*, *p* oraz parametr *c*) wraz z od-

powiednimi warunkami brzegowymi. Podany układ równań rozwiązuje zagadnienie dynamiki wybuchu w ujęciu jednowymiarowym, 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 na podstawie opublikowanych w literaturze badań detonacji materiału wybuchowego w rurze, która imituje tunel. Postępowanie to przedstawiono w dwóch cytowanych pracach *Lidner et al. 2015*. Wartość parametru dyssypacji $c$ ustalono jako równą 0,16.

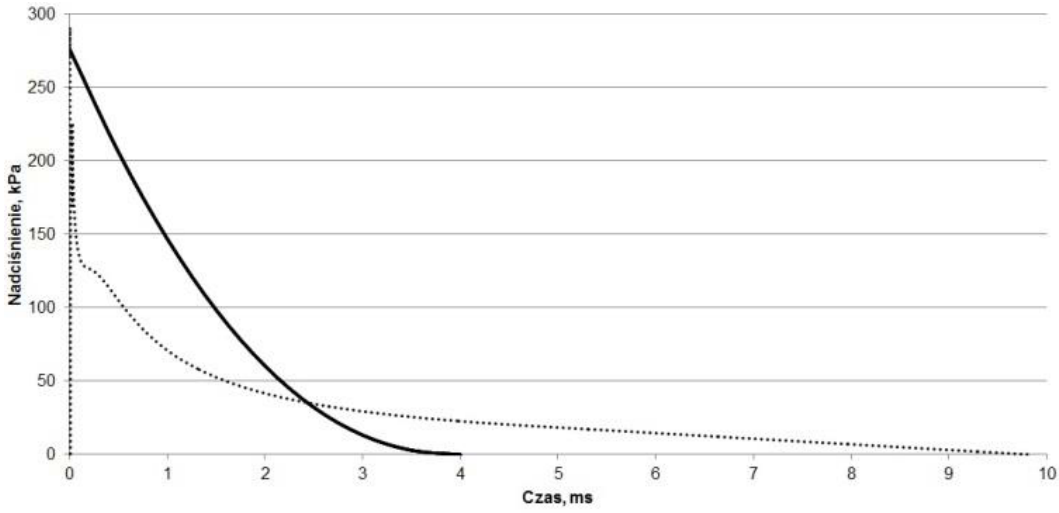
W prezentowanym zadaniu w obudowie tunelu przyjęto następujące wartości parametrów:

- $\Delta x$ = 0,20 m;
- $l$ = 600;
- $\Delta t$ = 2 x $10^{-6}$ s;
- $n$ = 5000;
- $P_m$ = 15,93 GPa;
- $\rho_0$ = 1,25 kg/m$^3$;
- k = 1,4.

Wówczas iloczyn liczby odcinków $l$ i wartości odcinka $\Delta x$ daje wartość 120 metrów, czyli podaną w pracy *Koper et al. 2015* długość tunelu. Podobnie mnożąc liczbę kroków czasowych $n$ przez wartość kroku czasowego $\Delta t$ otrzymuje się całkowity czas trwania analizy numerycznej, który wynosi $10^{-2}$ s.

Wyniki analizy numerycznej i analizy na podstawie wzorów empirycznych dostępnych w *Włodarczyk 1980* przedstawiono na Rys. 4. Wynik wykazują ogólną zbieżność (miedzy innymi co do szczytowej wartości nadciśnienia oraz całkowitego impulsu), jednak należy zwróci na różnice w czasie trwania nadciśnienia. Jeśli przyjąć 2,5 – krotnie dłuższy czas trwania nadciśnienia, mogłoby to wiązać się z większą wartością oddziaływania na obudowę tunelu.

Należy jednakże zwrócić uwagę na fakt, że podane wykresy nadciśnienia w funkcji czasu mogą służyć tylko do analiz dynamicznych konstrukcji obudowy tunelu. W przypadku wykonywania analiz statycznych nie należy stosować maksymalnej wartości nadciśnienia tylko należy 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.



Rys. 4. Wykres nadciśnienia w funkcji czasu: wzory empiryczne – linia ciągła, analiza numeryczna – linia przerywana.

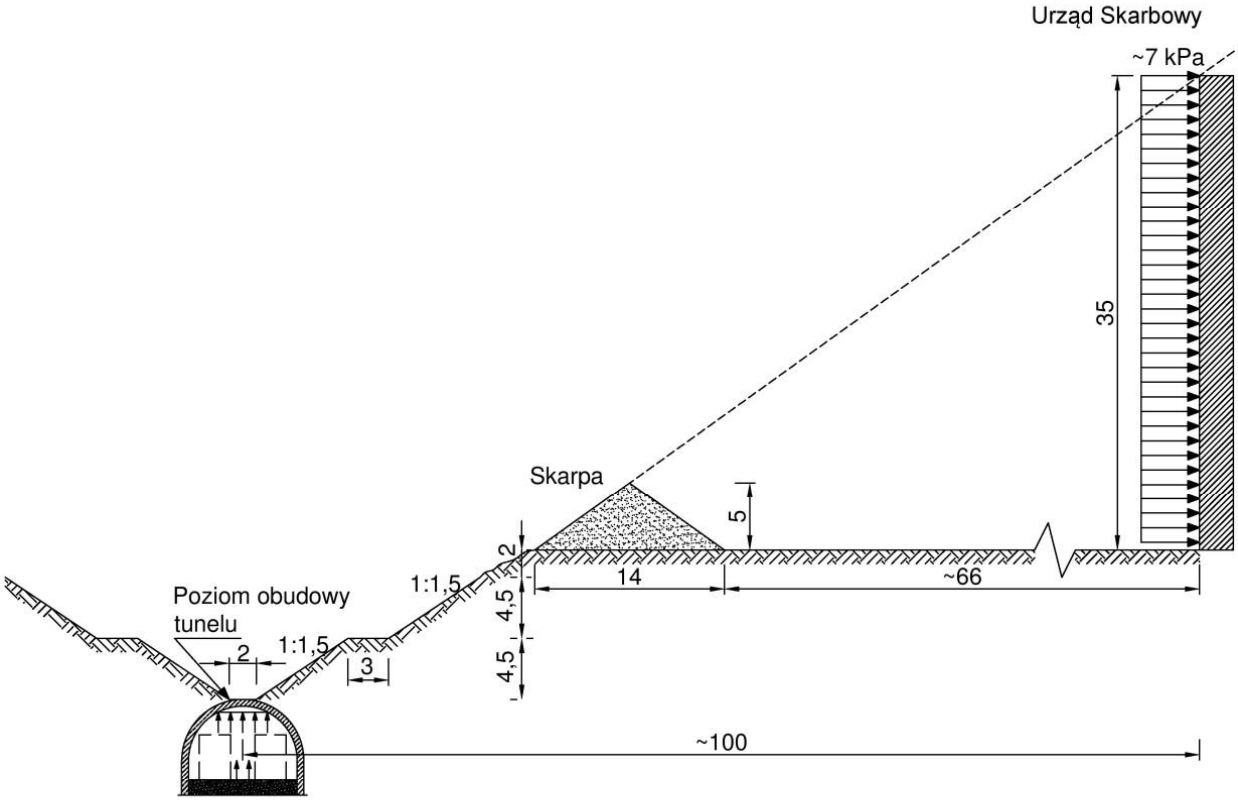
Na podstawie własnych doświadczeń autorzy pracy mogą stwierdzić, że ładunek o masie 13 kg trotylu rozmieszczony co 4,5 m jest zdolny do zniszczenia dowolnych wagonów kolejowych (również pancernych). Wydaje się również, że żołnierze, których zadaniem mogłoby być ewentualne zaminowanie pociągu nie montowaliby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

Z powyższych rozważań wnioskuje się, że obudowa tunelu jest zdolna do przeniesienia nadciśnienia od wybuchu ładunku o łącznej masie około 350 kg trotylu.

## 4. Określenie najbezpieczniejszego sposobu eksploracji

W materiałach przedstawionych przez odkrywców pociągu (*Koper et al.* 2015) proponuje się, jako ostateczny sposób na udowodnienie istnienia złotego pociągu, jego eksplorację. Odkrywcy proponują rozpoczęcie kopania w skarpie w miejscu, gdzie miał być wysadzony wjazd do tunelu. Zdaniem autorów niniejszej pracy jest to rozwiązanie trudne i dość ryzykowne. Po pierwsze w trakcie wykonywania robót ziemnych będzie się natrafiać na duże bloki betonu, których zwykła koparka nie będzie w stanie podnieść. Będzie wiązało się to z potrzebą użycia dodatkowo żurawi samochodowych. Po drugie roboty budowlane w pobliżu wysadzonego fragmentu tunelu mogą być niebezpieczne z powodu nie pewnej stateczności obudowy tunelu w tej okolicy. Po trzecie fala uderzeniowa od ewentualnego wybuchu mogłaby rozpędzić znajdujące się tam odłamy betonu, a w konsekwencji tego również zniszczyć infrastrukturę kolejową. Siła fali uderzeniowej uległaby również zwiększeniu ze względu na zagłębienie tej części placu budowy poniżej okolicznego poziomu terenu.

Na Rys. 5 przedstawiono szkic proponowanego tymczasowego zagospodarowania placu budowy podczas eksploracji tunelu. Jako bezpieczniejszy sposób eksploracji proponuje się wykonanie wykopu w odległości około 20 metrów o wskazanego przez odkrywców wysadzonego wjazdu do tunelu. Wykop o głębokości 9 metrów należałoby wykonać z naturalnym spadkiem skarp. Zalecany przez normę PN-B 06050 spadek wynosi 1:1,5. Dodatkowo na głębokości 4,5 metra należy wykonać wokół wykopu opaskę o szerokości 3 metrów w celu umożliwienia wjazdu samochodów do transportu urobku. Wymiary wykopu na powierzchni należy wykonać takie, aby na głębokości 9 metrów (poziom obudowy tunelu) można było odsłonić obudowę tunelu o wymiarach 2 x 2 metry. 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 $m^3$) należy układać w skarpy (Rys. 5) w celu zabezpieczenia okolicznych budynków i budowli przed skutkami oddziaływania fali uderzeniowej. Dodatkowo powierzchnie skarp można przykryć folią w celu zapobiegnięcia rozrzutu drobnych ziaren gruntu i zapylenia okolicy.




Rys. 5. Przekrój poprzeczny tunelu wraz z zaznaczonymi odległościami (w metrach) od najbliższego budynku.

Po wykonaniu wyżej opisanych 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 celu weryfikacji bezpieczeństwa okolicznych obiektów na wypadek niekontrolowanego wybuchu w tunelu sprawdzono warunki zgodnie z procedurą podaną w *Lidner 2015*. Po wykonaniu skarp zabezpieczających okoliczną infrastrukturę uniemożliwia się dojście fali uderzeniowej w linii prostej z otworu wykonanego w tunelu (przekrój poprzeczny na Rys. 5). Nadciśnienie padającej fali uderzeniowej na najbliższy fragment budynku, znajdujący się w odległości około 100 metrów, wynosi około 7 kPa. Zgodnie z wytycznymi podanymi w *Rosenkiewicz 2006* maksymalna wartość, która nie wywoła zniszczenia i nie ma negatywnego wpływu na ludzi to 10 kPa. Podobne wartości maksymalnego nadciśnienia podano w pracy *Kobielak 2005*. Według zapisów w niej zawartych 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. Układ konstrukcji przy żadnej z tych wartości nie zostanie naruszony.

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

## 5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości i osiągnięcia techniki budowlanej, które jak się okazuje mają zastosowanie, w połączeniu z osiągnięciami nauk historycznych, do poszukiwań i eksploracji obiektów historycznych, w tym słynnego ostatnio złotego pociągu. W pracy przedstawiono rozważania na temat trzech niewiadomych. Pierwsza z nich dotyczy niepewności co do istnienia samego tunelu i pociągu. Druga dotyczy hipotezy związanej z ewentualnym zaminowaniem tunelu i pociągu, a trzecia 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.

## 6. Bibliografia


Koper P., Richter A., 2015, „Opracowanie dot. poszukiwań złotego pociągu", Wałbrzych.

Kobielak S., 2005, „Współczesne betonowe budowle ochronne. Wybrane zagadnienia projektowania", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Poznań.

Lidner M., 2015, „Obliczenia numeryczne obciążenia od wybuchu na przykładzie konstrukcji ścianowo-płytowej o dowolnej geometrii", Budmika 2015. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań.

Lidner M., Szcześniak Z., 2015, „Simplified Numerical Modelling of a Blast Load Impact", Applied Mechanics and Materials, vol. 797, pp. 131-136.

Siwiński J., Stolarski A., 2015a, „Analiza oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane", Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, nr 2, pp. 197-211.

Siwiński J., Stolarski A., 2015b, „Analiza oddziaływania wybuchu zewnętrznego na przegrody budowlane", Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, nr 2, pp. 173-196.

PN-B 06050 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", Central European Journal of Energetic Materials, vol. 3, nr 1-2, pp. 83-94.

VonNeumann J., Richtmyer R. D., 1950, "A Method for the Numerical Calculation of Hydrodynamic Shocks", Journal of Applied Physics, vol. 21, pp. 232-237.

Witkowski I., 2014, „Podziemne królestwo Hitlera. Przewodnik po podziemiach III rzeszy", Wydawnictwo WIS-2, Warszawa.

Włodarczyk E., 1980, "Mechaniczne oddzialywanie wybuchu punktowego na ściany i strop obiektu", Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, nr 11, pp. 131-153.



**Podziękowania**

Praca powstała w wyniku zadań badawczych zrealizowanych w ramach pracy badawczej statutowej nr 934, realizowanej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji w Wojskowej Akademii Technicznej im. J. Dąbrowskiego.