

mgr inż. Emilia Roguska¹⁾prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska^{1)*}

Analiza ryzyka w budownictwie podziemnym

Risk analysis in underground construction

DOI: 10.15199/33.2019.02.09

Streszczenie. Sztuka tunelowania to w dużej mierze sztuka zarządzania ryzykiem. Norma ISO 31000:2009 definiuje ryzyko jako wpływ niepewności na cele. Nauka o zarządzaniu ryzykiem posługuje się ryzykiem obliczanym jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia danego scenariusza i konsekwencji, jakie za sobą niesie jego zajście. W artykule przedstawiono proces zarządzania ryzykiem w ujęciu normy ISO 31000:2009. Proces opisany w tej normie jest bardzo uniwersalny. Z drugiej jednak strony, czynniki ryzyka, na jakie narażone są projekty tunelowe, wymagają specjalnie sformułowanych wytycznych. Międzynarodowe Stowarzyszenie Tunelowe (ITA) i Międzynarodowe Stowarzyszenie Ubezpieczycieli Tunelowych (ITIG) opublikowały wytyczne, które mają na celu zapewnienie efektywnego zarządzania ryzykiem przy projektach tunelowych. Wytyczne te kładą nacisk na zarządzanie ryzykiem geotechnicznym oraz na komunikację i współpracę przy zarządzaniu ryzykiem wszystkich stron projektu. Jako przykład przedstawiono analizę ryzyka największego projektu tunelowego ostatnich lat – budowy tunelu pod Przełęczą św. Gotarda w Szwajcarii.

Słowa kluczowe: budowle podziemne; tunele, analiza ryzyka.

Abstract. The art of tunnelling is partly the art of managing risks. ISO 31000:2009 defines risk as an effect of uncertainties on objectives. To be able to handle risks in tunnelling a more unambiguous definition should be applied. In the article the definition of the risk as a multiplication of probability of occurrence and the consequence of failure is used. The process of risk management according to ISO 31000 is presented. This process is however aimed at covering a wide range of contexts in society. Tunnelling is a branch of economy exposed to risks, which characteristics are different compared to other civil engineering projects. That is why it needs specific standards. International Tunnelling Association and International Tunnelling Insurance Group developed a set of standards, which are focused on dealing with risks in underground construction projects. A strong emphasis is put on managing geotechnical risks and on communication and cooperation between all parties. As example the risk analysis on St. Gotthard Base tunnel is presented.

Keywords: underground construction; tunnels; risk analysis.

Budownictwo infrastrukturalne, a szczególnie budownictwo podziemne jest dziedziną, której towarzyszy znacznie większe ryzyko niż w budownictwie kubaturowym, ponieważ warunki posadowienia tego rodzaju obiektów oceniane są tylko na podstawie doświadczenia osób opracowujących dokumentację geotechniczną. Z tego powodu, ocena ryzyka w projektach budowli podziemnych bazuje głównie na metodach empirycznych, gdyż nie ma kryteriów, które m.in. określiłyby czynniki ryzyka w sposób ilościowy, za pomocą odpowiednich rozkładów statystycznych.

W budownictwie pojęcie ryzyka nierozdzielnie wiąże się z bezpieczeństwem budowli stanowiącym jedno z najważniejszych zagadnień w procesie projektowania i realizacji tuneli komunikacyjnych, takich jak tunele drogowe, kolejowe czy systemy metra. Skutki materialne ewentualnych katastrof czy awarii takich obiektów są ogromne. Ich wartość może sięgać milionów dolarów, nie wspominając o ofiarach śmiertelnych. Najpoważniejsze awarie ostatnich lat, jak przykładowo katastrofa na budowie tunelu Heathrow Express Link czy tunelu w Hull w Wielkiej Brytanii m.in. były spowodowane złym rozpoznaniem geologicznym lub brakiem nośności podłoża i w konsekwencji niedostosowaniem rozwiązań konstrukcyjnych lub technologicznych do rzeczywistych warunków posadowienia obiektów [7]. Części strat można było uniknąć lub

zmniejszyć ich rozmiar, gdyby wprowadzono profesjonalne podejście do zarządzania ryzykiem.

Analiza ryzyka stanowi podstawowy składnik procesu zarządzania ryzykiem. Ma na celu określenie prawdopodobieństwa oraz skalę niekorzystnych konsekwencji mogących pojawić się w określonych warunkach, dając tym samym podstawy do skutecznego zarządzania ryzykiem w projekcie.

Powodem wzrostu zainteresowania analizą ryzyka w przypadku budownictwa podziemnego jest m.in.:

- coraz większa liczba realizowanych tuneli komunikacyjnych, linii metra, parkingów czy garaży podziemnych;
- przekonanie, że analiza ryzyka lepiej opisuje zapas bezpieczeństwa niż tradycyjne metody deterministyczne;
- cenne uzupełnienie tradycyjnych, sprawdzonych metod, szczególnie o zjawiska, których deterministyczne metody nie opisują;
- społeczne żądanie liczbowej oceny możliwości katastrofy, tak jak ma to miejsce w energetyce jądrowej lub transporcie lotniczym;
- coraz większe konsekwencje ewentualnej katastrofy budowli podziemnej spowodowane wzrostem gęstości zaludnienia;
- możliwość osiągnięcia zysków ekonomicznych.

Z praktyki wynika, że **zagrożenie tzw. ryzykiem geotechnicznym** jest jednym z najczęściej występujących zagrożeń w projektach budownictwa podziemnego.

¹⁾ Politechnika Warszawska; Wydział Inżynierii Lądowej

^{*}) Adres do korespondencji: a.lewandowska@il.pw.edu.pl

Proces zarządzania ryzykiem

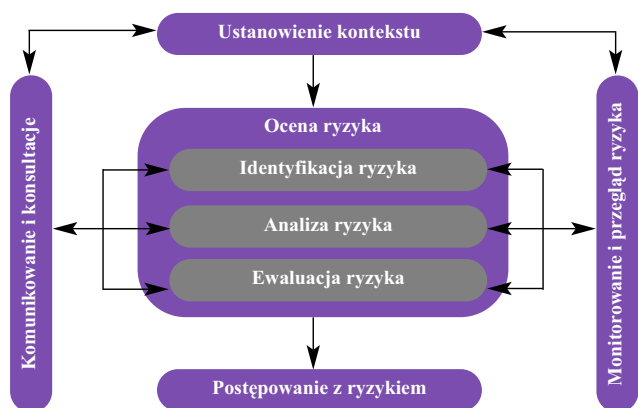
Zgodnie z definicją zawartą w Kodeksie postępowania przy zarządzaniu ryzykiem w budownictwie tunelowym [8]: *ryzyko jest to kombinacja częstotliwości występowania danego zagrożenia i konsekwencji jego wystąpienia*. Kodeks nie definiuje jednak, jakiego rodzaju jest to kombinacja. W praktyce przyjmuje się iloczyn obu tych wartości, a zatem:

$$R = P(z) \cdot K(z) \quad (1)$$

gdzie:

R – ryzyko; P(z) – prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia z;
K(z) – straty poniesione wskutek zajścia zdarzenia z.

Natomiast zarządzanie ryzykiem może zostać zdefiniowane jako skoordynowane działania w odniesieniu do czynników ryzyka [6], a więc czynników mających wpływ na realizację założonych celów. Proces zarządzania ryzykiem przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Analiza ryzyka wg normy ISO 31000 [5]
Fig. 1. Risk management process according to ISO 31000 [5]

Pierwszym, zasadniczym elementem analizy ryzyka jest **ustanowienie kontekstu**, a więc określenie celu, do którego należy dążyć. Dotyczyć to może przyjęcia terminu ukończenia projektu, budżetu, ale także kryteriów miękkich, jak np. pozyskanie reputacji czy społeczna ocena projektu.

Następnym etapem zarządzania ryzykiem jest jego **ocena**. Proces ten może polegać na: przeglądzie doświadczeń i wyników zrealizowanych już projektów, czy dyskusji i opracowaniu rejestru ryzyka z ekspertami. **Analiza ryzyka** jest niezbędna do skutecznego zarządzania ryzykiem. Oznacza ona określenie dwóch zasadniczych komponentów ryzyka: prawdopodobieństwa wystąpienia danego scenariusza zdarzeń oraz konsekwencji, jakie pociągnie za sobą wystąpienie danego scenariusza.

Na podstawie oszacowania poziomów ryzyka następuje jego **ewaluacja** – podejmowane są decyzje o postępowaniu z konkretnymi źródłami zagrożeń. Do podstawowych strategii należą:

- 1) unikanie ryzyka przez np. rezygnację z podejmowania pewnych działań;
- 2) redukcja ryzyka przez podejmowanie dodatkowych działań mających na celu zmniejszenie prawdopodobieństwa zajścia niekorzystnego zdarzenia, np. dodatkowe badania geologiczne, oraz minimalizację skutków jego wystąpienia, np. wzmacnianie fundamentów obiektów sąsiednich;

- 3) transfer ryzyka, np. przez ubezpieczenie projektu;
- 4) akceptacja ryzyka na jego poziomie rezydualnym [2].

Decyzja o postępowaniu z konkretnymi czynnikami ryzyka jest zawsze podejmowana w warunkach niepewności. Po ukończeniu projektu można ocenić, że podjęta decyzja nie była odpowiednia. Nie oznacza to jednak, że w momencie podejmowania decyzji został popełniony błąd [6].

Międzynarodowe standardy zarządzania ryzykiem w projektach tunelowych

Lata dziewięćdziesiąte XX w. i początek XXI w. obfitowały w katastrofy na budowie obiektów podziemnych. Do najbardziej dotkliwych pod względem kosztów naprawy można zaliczyć zawalenie się konstrukcji podczas budowy Heathrow Express Link w Londynie w 1994 r., zalanie i pożar na budowie tunelu w ciągu przeprawy przez Wielki Bełt w tym samym roku oraz katastrofę na budowie tunelu w Hull w Wielkiej Brytanii.

Późniejsze analizy podkreślały, że jednym z głównych źródeł katastrof był brak proaktywnego zarządzania ryzykiem. Zarządzanie proaktywne oznacza ciągłą ocenę ryzyka podczas planowania, projektowania i budowy oraz wdrażanie planów jego ograniczenia, zanim wystąpi scenariusz, którego chcemy uniknąć. W takiej sytuacji niezbędne są jednolite i jasne ramy zarządzania ryzykiem. Międzynarodowe Stowarzyszenie Ubezpieczycieli Tunelowych (ITIG) podjęło się opracowania Kodeksu Dobrych Praktyk przy zarządzaniu ryzykiem w projektach tunelowych [1]. Dzięki temu projekty tunelowe miały być „ubezpieczone”. Jednocześnie Międzynarodowe Stowarzyszenie Tunelowe (ITA) opracowało i wydało wytyczne zarządzania ryzykiem w projektach tunelowych [3]. Oba te opracowania uzupełniają się. Standardy międzynarodowe mają na celu:

- stworzenie jasnych i wydajnych ram dla procesu wyboru wykonawcy;
- stworzenie „Rejestru ryzyka”, który będzie adresował poszczególne ryzyka, a więc określał, która strona jest odpowiedzialna za jego kontrolowanie, niwelowanie, i ewentualnie poniesie ujemne skutki jego wystąpienia. Należy zaznaczyć, iż kluczowe tutaj jest właśnie adresowanie ryzyka. Stworzenie prostego rejestru zagrożeń nie oznacza implementacji Kodeksu;
- monitorowanie, zarządzanie i łagodzenie ryzyka przez cały proces inwestycyjny.

W tabeli przedstawiono proponowany rozkład odpowiedzialności stron za zarządzanie ryzykiem. W obu dokumentach duży nacisk jest położony na zarządzanie ryzykiem związanym z losowością warunków geologicznych. Kodeks wychodzi z założenia, że stroną, która potrafi najefektywniej zarządzać tym ryzykiem, jest inwestor, chociaż często spotykaną praktyką jest przenoszenie ryzyka na wykonawcę obiektu. W przypadku, gdy inwestor obarcza wykonawcę pełnym ryzykiem związanym z warunkami geologicznymi, a pojawiają się takie, których nie przewidziano w projekcie, to w wątpliwość może być podana opłacalność wybranych rozwiązań. Jeśli więc cała odpowiedzialność spoczywa na wykonawcy, to jego rolą powinno być także zaprojektowanie rozwiązania. Wykonawca będzie szukał oszczędności, co wpłynie na eksploatację i utrzymanie tunelu, a więc dodatkowe koszty poniesie inwestor.

Rozkład odpowiedzialności za proces zarządzania ryzykiem [3]
The division of responsibilities for risk management [3]

Faza	Inwestor	Wykonawca
I Wstępne etapy projektu	<ul style="list-style-type: none"> ustalenie polityki zarządzania ryzykiem (tzw. risk policy) (obszary występowania ryzyka, cele polityki zarządzania ryzykiem, strategia zarządzania ryzykiem) ustalenie kryteriów akceptacji ryzyka jakościowa ocena ryzyka szczegółowa analiza wybranych zagadnień (ocena ilościowa) 	
II Przetarg i negocjacje warunków kontraktu	<p>przygotowanie dokumentów do przetargu:</p> <ul style="list-style-type: none"> opis istotnego ryzyka technicznego wymagania techniczne co do środków ograniczenia ryzyka opis wymaganych kompetencji w zakresie zarządzania ryzykiem; <p>Wybór wykonawcy i ocena:</p> <ul style="list-style-type: none"> zdolności wykonawcy do zarządzania ryzykiem ryzyka związanego z proponowanym przez wykonawcę rozwiązaniem; <p>przygotowanie umowy zawierającej punkty dotyczące zarządzania ryzykiem</p>	<p>przygotowanie oferty do przetargu:</p> <ul style="list-style-type: none"> propozycja systemu zarządzania ryzykiem opis doświadczenia i kompetencji w zakresie zarządzania ryzykiem identyfikacja i opis ryzyka związanego z proponowanymi rozwiązaniami technicznymi identyfikacja i opis proponowanych środków redukcji ryzyka
Wybór wykonawcy		
III Realizacja inwestycji	inspekcja i nadzór nad wykonawcą w kwestii zarządzania ryzykiem, ocena i redukcja ryzyka inwestora, zatwierdzenie propozycji redukcji ryzyka wykonawcy	ustalenie systemu zarządzania ryzykiem, szczegółowa ocena ryzyka, propozycja redukcji ryzyka, wdrożenie rozwiązań redukujących ryzyko

Analiza ryzyka geologicznego na przykładzie budowy tunelu św. Gotarda

Tunel bazowy o długości 57 km pod masywem św. Gotarda jest obecnie najdłuższym na świecie tunelem komunikacyjnym. Obiekt obejmuje: dwa równoległe, jednotorowe tunele kolejowe o średnicy ok. 9,5 m; 178 przejść awaryjnych pomiędzy tunelami głównymi rozmieszczonymi co 325 m; dwie stacje ewakuacyjne w rejonie Sedrun i Faido oraz komory i system tuneli umożliwiających zmianę toru. Prace nad tym projektem rozpoczęto w 1996 r. od wykonania szybów i tuneli udostępniających – sztolni badawczych. Roboty podziemne na trasie głównych tuneli kolejowych rozpoczęto w 2002 r., a dążenie ostatniego odcinka ukończono w 2010 r. Tunel oddano do eksploatacji 2 czerwca 2017 r.

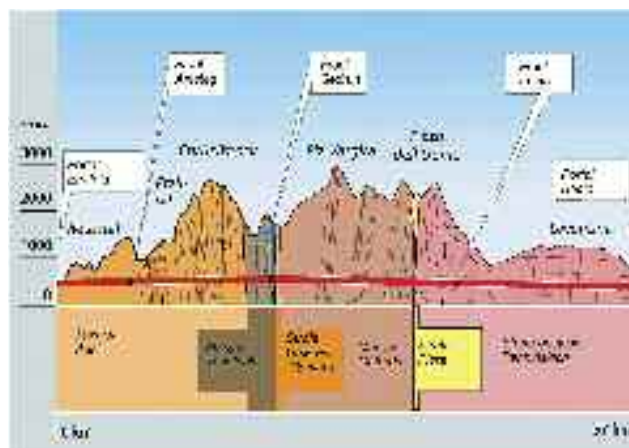
W celu skrócenia czasu budowy tuneli trasa została podzielona na 5 odcinków, które były dążone równoległe z pięciu frontów, zgodnie z harmonogramem prac. Warunki geologiczne na trasie tunelu przedstawia rysunek 2, a schemat podziału na odcinki robocze rysunek 3. Tunel wykonywano z zastosowaniem dwóch technologii – zamkniętej tarczy zmechanizowanej TBM i metodą konwencjonalną, tzw. Nową Metodą Austriacką.

Budowa tunelu była obciążona ogromnym ryzykiem geologicznym, które wynikało z trudności w rozpoznaniu stratygrafii, tektoniki i cech skał na głębokości sięgającej 2,5 km poniżej powierzchni terenu. Na podstawie rozpoznania geologicznego wydzielono dwie strefy o największym ryzyku

geologiczno-technologicznym, które mogło mieć wpływ nie tylko na powodzenie, ale także na techniczną wykonalność projektu. Były to odcinki: Faido, na którym trasa tunelu przekracza synklinę Piora, oraz Sedrun, który obejmuje masyw Tavetsch oraz spotykające się strefy: Clavaniev i Urseren-Garvera.

Podczas dążenia tuneli kolejowych na odcinku Faido zdarzały się sytuacje, kiedy tarcza wykonała jeden z tuneli bez problemów, natomiast w drugim, oddalonym zaledwie o 40 m, dochodziło do utraty stateczności przodka, co powodowało zatrzymanie prac tunelowych na długi czas. Dodatkowo, ciśnienie górotworu i jego przemieszczenia okazały się dużo większe niż rejestrowane podczas badań. Konieczność zmiany przekroju wyrobiska oraz wykonania dodatkowych prac naprawczych spowodowały opóźnienia w realizacji tego odcinka sięgające dwóch lat.

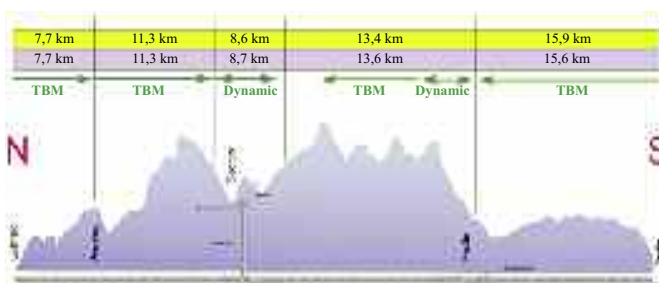
Na odcinku Sedrun roboty tunelowe posuwały się dużo szybciej, niż zakładano w harmonogramie. Prognozowane ciśnienie górotworu w strefie Urseren-Garvera mogło spowodować znaczne odkształcenia wyrobiska tuneli – przewidywana w projekcie wartość konwergencji wynosiła ok. 1 m. Z tego powodu podjęto decyzję o zmianie technologii zmechanizowanej TBM na metodę konwencjonalną (Nową Metodą Austriacką). Podczas dążenia okazało się jednak, że strefa Urseren-Garvera w poziomie tunelu kolejowego ma tylko 60% z prognozowanej długości i nie wchodzi w obszar stacji, dzięki czemu nie było konieczności dążenia w tych



Rys. 2. Geologia tunelu bazowego św. Gotarda

[Źródło: www.bau.uni-siegen.de]

Fig. 2. Geology of the Gotthard Base Tunnel



Rys. 3. Podział na odcinki robocze tunelu bazowego św. Gotarda

[Źródło: wikipedia.org]

Fig. 3. Working sections of the Gotthard Base Tunnel

w warunkach komory o znacznej średnicy. To znacznie przyspieszyło prace. W momencie, kiedy odcinek Faido miał dwa lata opóźnienia, sekcja Sedrun wyprzedzała harmonogram o prawie rok.

W takich okolicznościach podjęto decyzję o przesunięciu miejsca styku dwóch budowanych odcinków w kierunku Faido. Wymagało to jednak podjęcia szybkich decyzji i renegotjacji warunków kontraktowych z poszczególnymi wykonawcami. Dodatkowa trudność wynikała z tego, że wydłużenie odcinka roboczego Sedrun powodowało wydłużenie o wiele metrów tuneli drążonych zdecydowanie droższą metodą konwencjonalną, co zwiększało koszt budowy, ale skracało czas oddania tunelu do eksploatacji. Wystąpiły także znaczne trudności z usuwaniem urobku – należało opracować nowy plan jego składowania, gdyż dotychczasowe miejsce odprowadzania urobku nie było w stanie go więcej przyjąć. Aby sprostać tak złożonym warunkom podejmowania decyzji, wykorzystana została **metoda analizy drzewa zdarzeń**, wg której wykonano drzewa zdarzeń w przypadku obu stacji. Jedno z nich zaprezentowano na rysunku 4. Złożenie tak zbudowanych scenariuszy dawało prawie 20 000 możliwych rozwiązań. Po usunięciu tych, które można było z dużą pewnością wykluczyć, jak np. najlepsze warunki geologiczne na jednym odcinku i najgorsze na drugim, w dalszej analizie uwzględniono przeszło 6000 scenariuszy. Wyniki ujęto w formie harmonogramu, na który „nałożono” rozkład prawdopodobieństwa poszczególnych scenariuszy.

Na podstawie tak otrzymanego rozkładu prawdopodobieństwa i oceny kosztów związanych z wydłużeniem stacji Sedrun podjęto decyzję o przesunięciu miejsca połączenia odcinków o maksymalnie 2,5 km, przy czym ostateczna decyzja miała zostać podjęta w dwóch krokach wraz z postępem prac. Ostatecznie warunki gruntowe na odcinku Sedrun były takie, jak założono w scenariuszu pośrednim, a trudności organizacyjne na sekcji Faido doprowadziły do zwolnienia postępu prac. Obie sekcje spotkały się 1,5 km na północ w stosunku do pierwotnie wyznaczonej granicy. Drażenie tunelu zakończyło się w marcu 2011 r. [4].

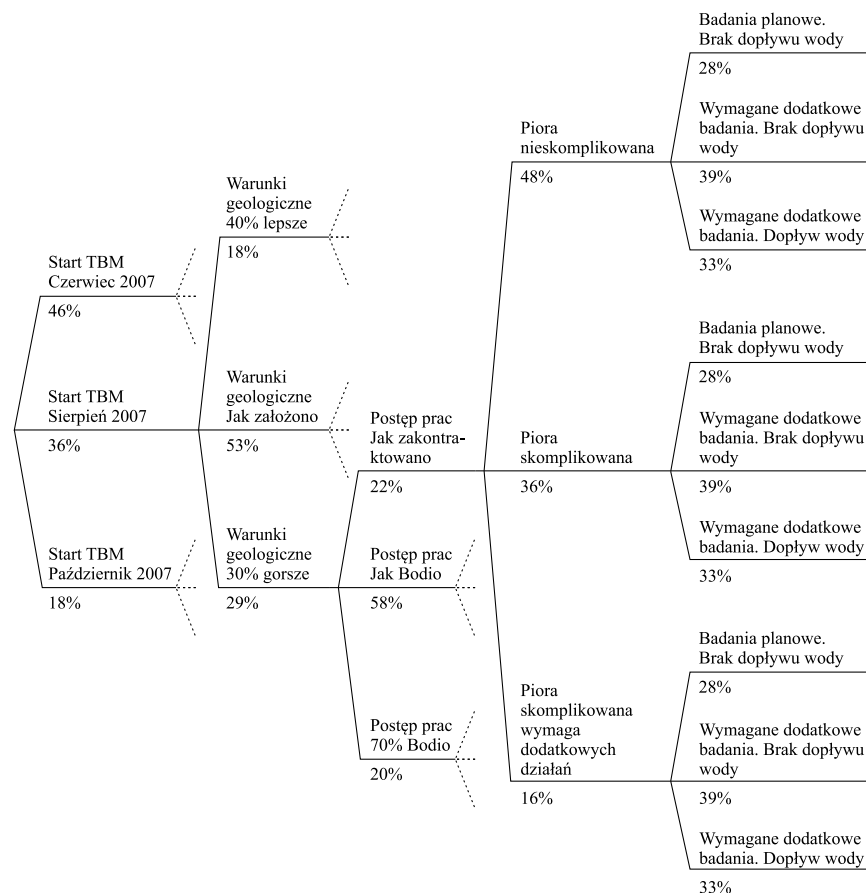
Wnioski

W tradycyjnym ujęciu zarządzanie ryzykiem przeprowadzono na podstawie decyzji podejmowanych w czasie trwania projektu. Ten proces może być znacznie skuteczniejszy dzięki wykorzystaniu narzędzi zarządzania ryzykiem. Wówczas potencjalne scenariusze ryzyka mogą być zidentyfikowane wcześniej i podjęte działania mające na celu ich zminimalizowanie.

W zarządzanie ryzykiem powinni być zaangażowani wszyscy uczestnicy przedsięwzięcia inwestycyjnego. Kontraktowe wykluczenie inwestora z procesu zarządzania ryzykiem, choć może wydawać się dla niego korzystne, prowadzi do zwiększenia cen kontraktowych oraz wprowadzania rozwiązań nieoptymalnych. W przypadku projektów tunelowych ryzykiem jest kluczowe współdziałanie w zarządzaniu. Tylko usystematyzowane działania i współpraca wszystkich stron projektu umożliwi skuteczne zarządzanie ryzykiem.

Literatura

- [1] British Tunnelling Society. 2003. „The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works”.
- [2] Cárdenas Ibsen Chivata, Saad S. H. Al-jibouri, Johannes I. M. Halman, Frits A. van Tol. 2013. „Capturing and Integrating Knowledge for Managing Risks in Tunnel Works”. *Risk Anal.*, vol. 33, (1): 92 – 108.
- [3] Eskesen Soren Degn, Per Tengborg, Jorgen Kampmann, Trine Holst Veicherts. 2004. „Guidelines for tunnelling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2”. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*
- [4] Ehrbar Heinz, M. Neuenschwander, P. Beeler, M. Bianchi. 2010. „Tough decisions for mega-projects, A methodology for decision making on time-relevant measures at the Gotthard Base Tunnel”. in ITA World Tunnel Congress (Canada).
- [5] ISO 31000:2009 Risk Management – Principles and Guidelines.
- [6] Stille Hakan. 2017. „Geological Uncertainties in Tunneling – Risk Assessment and Quality Assurance”. Bergen: Sir Muir Wood Lecture, World Tunnel Congress.
- [7] Wannick Heiko. 2006. „The Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works Future Tunnelling Insurance from the Insurers. Point of View” in ITA World Tunnel Congress.



Rys. 4. Fragment drzewa zdarzeń dla sekcji Faido [4]

Fig. 4. Event tree for Faido section [4]

Przyjęto do druku: 17.01.2019 r.