

*Yannick Bleuzen**, *Gilles Jauffret***, *Didier Humbert***

POSTĘP TECHNOLOGICZNY W DZIEDZINIE MATERIAŁÓW WYBUCHOWYCH WYKORZYSTYWANYCH PRZY BUDOWIE TUNELI

1. Wstęp

Ze względu na występujące zagrożenia i wymagany wysoki poziom bezpieczeństwa produkcja materiałów wybuchowych zawsze była zaliczana do jednych z trudniejszych procesów produkcyjnych. Z tego właśnie powodu w zakładach produkujących MW obowiązują wysokie wymagania bezpieczeństwa produkcji oraz ochrony zdrowia pracowników. Jednak ciągły rozwój w produkcji MW, wprowadzenie do produkcji MWE pozwoliło znacznie zmniejszyć możliwość inicjacji materiałów wybuchowych. Tym samym udało się podnieść bezpieczeństwo podczas produkcji i stało się możliwe przeniesienie jej miejsca bliżej użytkownika.

We Francji EPC Group wykorzystywała przez kilka lat jednostkę MMU (Mobile Manufacturing Unit — Ruchome Urządzenie Produkcyjne) do produkcji ANFO, a od 1995 roku EPC Group opracowała technologię produkcji materiałów wybuchowych luzem HeavyANFO oraz materiałów wybuchowych emulsyjnych przeznaczonych dla kopalń odkrywkowych.

W 1997 roku EPC Group poszerzyła zakres swych produktów i usług o moduł do produkcji emulsji luzem przeznaczony do eksploatacji podziemnej.

2. MWE luzem w eksploatacji podziemnej

2.1. Pojęcie

Przy prowadzeniu eksploatacji podziemnej w górnictwie w większości przypadków stosowane są otwory strzałowe o średnicy od 35 do 64 mm, jednak optymalną średnicą otworów strzałowych jest 45 mm.

* Nitro-Bickford, EPC Group, Paryż, Francja

** Nitrochimie, EPC Group, St. Martin de Crau, Francja

Ze względu na swoją wysoką średnicę krytyczną materiały wybuchowe luzem typu HeavyANFO, produkowane w kopalniach odkrywkowych nie mogą być wykorzystywane do prowadzenia prac podziemnych. W związku z tym jednym z możliwych rozwiązań jest MWE luzem, który może być załadowany do otworu w pełni wodoodpornego i łatwego do zainicjowania przy małej średnicy. Kolejnym celem było opóźnienie momentu uwrażliwienia MW w procesie produkcji. EPC Group wybrała proces uczulania gazowego dla MWE nabojoyanych i luzem.

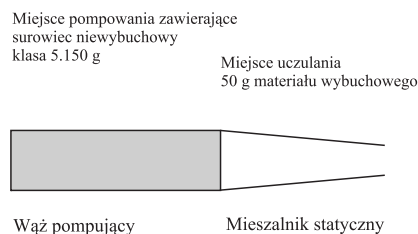
Urządzenie o nazwie MORSE (moduł przepompowujący i uczulający matrycę emulsji) składa się z:

- pojemnika do przechowywania matrycy emulsji (klasa 5.1),
- pompy dozującej,
- zbiorników i pomp dla środków uczulających,
- dwóch węży gumowych do ładowania MW do otworów strzałowych,
- komputera sterującego i kontrolującego parametry produkcji i załadunku.

Ponieważ żaden z surowców znajdujących się w zbiornikach nie jest wybuchowy, transport i magazynowanie są znacznie ułatwione.

Proces uczulania matrycy emulsji odbywa się na końcu każdego węża za pomocą mieszalnika statycznego (rys. 1), co pozwoliło ograniczyć ilość materiału wybuchowego w całym procesie do 50 g dla każdego węża.

Matryca emulsji i środki uczulające zostają przepompowane do końca węża, gdzie są rozdzielane przez mieszalnik statyczny. Dopiero w tym momencie składniki zaczynają ze sobą reagować, w wyniku czego powstają pęcherzyki gazu, uczulające matrycę emulsji. Po zakończeniu reakcji chemicznej otrzymujemy emulsję możliwą do zainicjowania przez podbudzacz wybuchowy.



Rys. 1. Końcówki węża

2.2. Kontrola jakości

Jakość surowców dostarczonych do miejsca wykonywania prac została uprzednio kontrolowana w wytwórni. Na miejscu kontrola jakości ogranicza się do kontroli procesu pompowania i oceny skuteczności uczulenia. Kontrola wspomnianego procesu dokonywana jest za pomocą przepływomierzów (z urządzeniem sygnalizującym duży lub mały przepływ). Jednorodność i gęstość mogą być oceniane za pomocą wykalibrowanego naczynia. Dzięki ki-

netyce reakcji chemicznej ostateczny stopień wrażliwości i gęstość osiągane są w kilka minut po wpompowaniu produktu do otworu strzałowego.

2.3. MORSE

MORSE zbudowany jest na stalowej, nierdzewnej ramie i przystosowany do przenoszenia przez dźwig lub podnośnik widłowy. Może zostać załadowany na przyczepę lub samochód ciężarowy. Wymiary urządzenia to: $2 \times 2 \times 3$ m. Ciężar brutto z pełnymi zbiornikami wynosi około 3 ton.

Wymienny zbiornik może pomieścić ponad jedną tonę matrycy emulsji. Wszystkie pompy są obsługiwane przez dwa silniki hydrauliczne zasilane elektrycznie.

MORSE wyposażony jest w dwa gumowe węże. Ich zewnętrzna średnica wynosi 25 mm, a długość około 25 m. Na końcu każdego węża znajduje się mieszalnik statyczny i dysza. Cykl pompowania oraz uczulania jest rozpoczynany za pomocą zdalnie sterowanego urządzenia. Siłownik pneumatyczny uruchamia zawór trójdrożny w celu napełnienia jednego z węży. Zapalona kontrolka znajdująca się na panelu oznacza, że wąż jest gotowy do użycia.

Operator może użyć dyszy, by popchnąć pobudzac i detonator do końca odwierconego otworu strzałowego. Oznaczenie na wężu pomaga mu sprawdzić właściwą głębokość otworu. Po naciśnięciu guzika komputer sterujący zapewnia odpowiednią kolejność cykli. Kontroluje prędkość obrotową pomp oraz przepływ dodatków, które gwarantują wysoką jakość produkcji, a także inne parametry, niezwykle ważne dla bezpieczeństwa operacji, takie jak: temperatura i ciśnienie pompowania, brak przepływu oraz ustawienie zaworów. Świetlny sygnał ostrzegawczy na panelu sterującym informuje o każdym zakłóceniu. Poważniejszy problem, np. nadmierna temperatura lub nadciśnienie, powoduje natychmiastowe zatrzymanie urządzenia.



Rys. 2. Moduł MORSE na samochodzie ciężarowym

Podczas pompowania ciśnienie w dyszy wypycha wąż, zapewniając dokładne wypełnienie wywierconego otworu. Sygnał świetlny na urządzeniu informuje operatora o zakończeniu cyklu. Oznaczenie na wężu pozwala sprawdzić długość pustego odcinka otworu. Wydajność pompowania może zostać ustawiona od 30 do 60 kg/min. Załadunek otworu strzałowego trwa zazwyczaj kilka sekund.

2.4. Właściwości MW

Podstawowe właściwości MWE luzem to:

- średnia gęstość produktu: $1,10 \text{ kg} \cdot \text{dm}^3$ (możliwe jest uzyskanie gęstości od 0,8 do 1,2),
- energia detonacji: 3 MJ/kg,
- średnica krytyczna: 30 mm,
- prędkość detonacji (średnica ładunku 45 mm): $4500 \div 5000 \text{ m/s}$,
- gęstość wypełniania (ilość MW w 1 m otworu):

Średnica	Ilość MW
40 mm	— 1,40 kg/m
45 mm	— 1,75 kg/m
51 mm	— 2,25 kg/m
64 mm	— 3,50 kg/m

3. Próby doświadczalne

3.1. Tunel Sorderettes

3.1.1. Opis projektu

Pierwszym miejscem testowania modułu MORSE był tunel na autostradzie A43 w dolinie Maurienne (Savoie) w Alpach francuskich. Próby te były możliwe dzięki SRTF, Dyrekcji Regionalnej ds. Przemysłu, Rozwoju i Środowiska (DRIRE) z Savoie oraz wykonawcom. Tunel ma 386 metrów długości. Fragment tunelu o przekroju przodka 90 m^2 został wykonany za pomocą tradycyjnych materiałów wybuchowych. Tunel przecina moreny lodowcowe, łupki oraz piaskowiec z karbonu. Przez pierwsze 200 metrów sonda przeszła przez warstwę moreny lodowcowej i piaskowca. Próby strzelania zostały wykonane w piaskowcu.

3.1.2. Opis strzelania

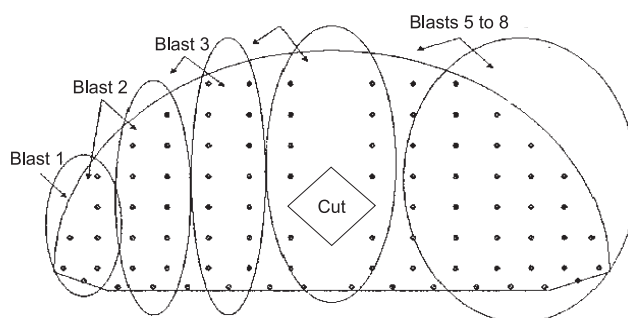
Początkowe dane dotyczące odpalania ładunków wybuchowych były następujące:

- powierzchnia przekroju przodka: 90 m^2 ,
- 146 otworów o średnicy 48 mm, 4 m długości (około 56 otworów na obrzeżach),
- 2 puste wywiercone otwory o średnicy 110 mm,
- materiał wybuchowy: dynamit 25 i 35 mm,
- ilość materiału wybuchowego: 440 kg,
- sekwencyjne uzbrajanie elektryczne z 10 obwodami (odstęp 40 ms pomiędzy seriami).

3.1.3. Przebieg prób

Próby zostały przeprowadzone przy stopniowo zwiększającej się liczbie otworów załadowanych MWE, przy użyciu modułu MORSE. We wszystkich prowadzonych robotach strzałowych włomy i otwory strzałowe na krawędziach przodka były ładowane dynamitem, jako ładunek udarowy w otworach wypełnionych MWE luzem zastosowano naboje dynamitu o masie 250 g. Ze względu na to, że nie mogło dojść do opóźnienia prac w przypadku ewentualnych awarii MORSE'a, zastąpienie ładunku dynamitu MWE zostało przeprowadzone etapami.

Otwory strzałowe w poszczególnych sekcjach były sukcesywnie ładowane MWE luzem i zostały podłączone do zapalarki sekwencyjnej.



Rys. 3. Organizacja testów

Ilość materiału wybuchowego oraz czas wymagany podczas prób podano w tabeli 1.

TABELA 1

Parametry załadunku MWE luzem

Numer strzelania	Liczba załadowanych otworów	Liczba węży	Wypełnienie, kg	Czas wymagany
1	9	1	50	7 min
2	21	1	130	16 min
3	36	1	226	30 min
4	45	1	283	60 min
5	88	1	525	120 min
6	88	1	535	90 min
7	88	1	545	60 min
8	88	2	560	65 min

Jedynym problemem, z którym borykano się, były trudne warunki geologiczne. Niektóre otwory zostały zablokowane fragmentami skały i wymagały oczyszczenia sprężonym powietrzem. Wynikłe problemy tłumaczą zmniejszenie ilości materiału wybuchowego emulsyjnego luzem użytego w strzelaniu nr 4, w którym niektóre otwory zostały załadowane za ledwie na długości 1 m, oraz dłuższy czas załadunku otworów w strzelaniu nr 5.



Rys. 4. Załadunek MWE luzem do otworu

W wyniku strzelań próbnych z użyciem MWE luzem uzyskano prawidłowy kształt przodka z niewielkim zagłębieniem (mniej niż 0,10 m) oraz granulację urobku lepszą niż przy zastosowaniu dynamitu.

3.1.4. Wnioski nadzorcy tunelu

Prace nad tunelem, a w szczególności ich wpływ na środowisko, były nadzorowane przez CETU — centrum techniczne francuskiego Ministerstwa Transportu, specjalizującego się w konstrukcjach podziemnych. Głównymi spostrzeżeniami była poprawa bezpieczeństwa poprzez ograniczenie użytych materiałów wybuchowych. Czas załadunku MW był taki sam jak w metodzie konwencjonalnej, nawet w robotach strzałowych wykonywanych w trudnych warunkach geologicznych i przy braku doświadczenia operatora w zastosowaniu nowej metody. Poziom drgań sejsmicznych nie mógł przekroczyć parametrów krytycznych ze względu na czynny tunel kolejowy położony 30 m dalej. Żaden z zanotowanych parametrów drgań nie przekroczył ustalonych limitów.

3.2. Saint Genies Tunnel (luty 1998 r.)

3.2.1. Opis projektu

Kolejna próba została przeprowadzona w tunelu na trasie pociągu szybkobieżnego w południowo-wschodniej Francji (LN5). Tunel ten ma długość 150 m, o powierzchni przodka 90 m². Próby były możliwe dzięki współpracy SNCF.

Sonda natrafiła na wapień jurajski (indeks AFTES: ID4/ID5) z warstwami łupków osadowych. Skała charakteryzowała się licznymi nieciągłościami wypełnionymi brekcją.

3.2.2. Opis przebiegu strzelania

Początkowe podstawowe parametry strzelania były następujące:

- powierzchnia przodka: 90 m²,
- liczba otworów: 103,
- średnica otworu: 48 mm,
- długość: 4,9 m,
- 2 puste wywiercone otwory o średnicy 110 mm,
- zastosowany MW: 450 kg dynamitu o średnicy 30 mm,
- sekwencyjne uzbrajanie elektryczne z 10 obwodami (odstęp 40 ms pomiędzy seriami).

3.2.3. Przebieg prób

Przeprowadzono 8 odstrzałów. Podczas pierwszych trzech strzałów włom został wypełniony dynamitem. Od czwartego do ósmego odstrzału wszystkie otwory, z wyjątkiem tych na krawędziach przodka, zostały wypełnione MWE luzem.

TABELA 2
Parametry załadunku

Numer strzelania	Liczba otworów	Liczba węży	Ładunek MW, kg
1	96	1	614
2	96	2	730
3	96	2	719
4	100	2	800
5	100	2	393
6	100	2	702
7	103	2	740
8	103	2	736
Suma	794	2	5434

W czasie prób testowano różne modyfikacje urządzenia. Ważne było dostosowanie ilości materiału wybuchowego wprowadzanego do otworu do potrzeb. Gdy warunki geologiczne wpływają na zmniejszenie pojemności w przypadku krótszych otworów, moduł MORSE jest w stanie zatrzymać cykl wypełniania przed otrzymaniem polecenia z panelu sterującego. Operator może wówczas wybrać wznowienie lub zatrzymanie cyklu. Jeśli zachodzi potrzeba użycia jeszcze trochę materiału po zakończeniu cyklu, tryb stopniowego dozowania pozwala operatorowi dokończyć wypełnianie. Użycie dwóch przewodów wtryskujących pozwoliło znacznie ograniczyć czas potrzebny na wypełnienie każdej serii.

Wprowadzenie dyszy w spękaną skałę okazało się łatwiejsze niż załadunek ręczny naboju dynamitu lub naboju ładunków MW do plastikowej rury. Podczas prób przy zasto-

sowanej kolejności odpalania we włomach nie zauważono w trakcie detonacji wpływu ściskania się MWE luzem. Średnia prędkość detonacji zarejestrowana w otworze strzałowym wynosiła 4700 m/s, co wskazuje na jej doskonałe parametry detonacyjne.

3.2.4. Stanowisko nadzorcy

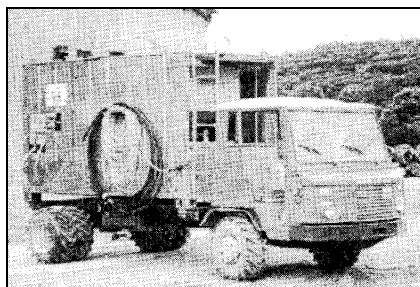
Podobnie jak w poprzednich próbach wykorzystanie nowej technologii nie spowodowało żadnych problemów natury technicznej lub ekologicznej, które wymagałyby wstrzymania prac. Czas potrzebny do przeprowadzenia roboty strzałowej był porównywalny z czasem w tradycyjnej metodzie, a niekiedy nawet krótszy. Właściwości gazów, mniej szkodliwych niż w przypadku dynamitu, pozwoliły na skrócenie czasu wentylacji.

Ponadto większa energia podczas detonacji, wynikająca z pełnego wypełnienia kolumny ładunku otworu strzałowego, pozwoliła uzyskać lepszą granulację urobku. Biorąc pod uwagę oszczędność czasu i kosztów, przewiduje się wzrost popularności tej metody.

3.3. Wnioski z przeprowadzonych strzelań

Przeprowadzone strzelania, mimo ograniczonych ładunków MW, wykazały wysoką efektywność MWE luzem w prowadzeniu prac strzałowych oraz niezawodność modułu MORSE. Wykonawcy robót i nadzorcy byli zgodni co do tego, że moduł MORSE ułatwia prowadzenie robót strzałowych w tunelach.

Firma SSE, przekonana o tym, że technologia MORSE doskonale odpowiada projektom budowy tuneli w Szwajcarii, zamówiła w 1998 roku urządzenie MORSE.



Rys. 5. MORSE na samochodzie ciężarowym firmy SSE przystosowanym do warunków górskich

4. Rozwój przemysłowy w Szwajcarii

4.1. Tunel Sigirano

4.1.1. Nowe urządzenie MORSE

Pierwsze urządzenie MORSE użyte we Francji było nieustannie poddawane badaniom i ulepszeniom. Po przeprowadzeniu pierwszych testów zbudowano ramę ze stali nierdzew-

nej. Poszczególne wyświetlacze zostały również zastąpione wielokanałowym monitorem. Wprowadzone udoskonalenia ułatwiły kalibrację odpowiednich uczulaczy przepływu. Ponadto serwis należący do SSE zamontował urządzenie na małej ciężarówce przystosowanej do warunków górskich i mogącej poruszać się w trudnych warunkach w tunelu. Urządzenie zostało wyposażone w aluminiową pokrywę zabezpieczającą.

Próby terenowe rozpoczęły się w kwietniu 1999 roku w tunelu Sigirano (kanton Tessin).

Tunel o długości 2500 metrów wydrążony został w jednolitym, twardym gnejsie. Ostateczna długość tunelu wynosiła około 3000 metrów.

Matryca emulsji została dostarczona z wytwórni w tonowych pojemnikach typu IBC. Uczulacze zostały dostarczone w 50-kilogramowych beczkach. Ciężarówka była zazwyczaj zaparkowana w osłoniętym miejscu, w połowie tunelu. Wyjeżdżała na zewnątrz tylko po to, by uzupełnić zbiornik z matrycą. W celu uzupełniania otworów ciężarówka z urządzeniem MORSE wycofywała się blisko świdra, gdzie mogła zostać podłączona do prądu i sprężonego powietrza.

4.1.2. Parametry strzelania

Początkowy schemat odpalania był następujący:

- powierzchnia przodka: 25 m²,
- liczba otworów: 76,
- średnica: 41 mm,
- długość otworu: 3,5 m,
- materiał wybuchowy: TOVEX SE 35/420 g,
- ilość materiału wybuchowego: 202 kg.

4.1.3. Przebieg prób

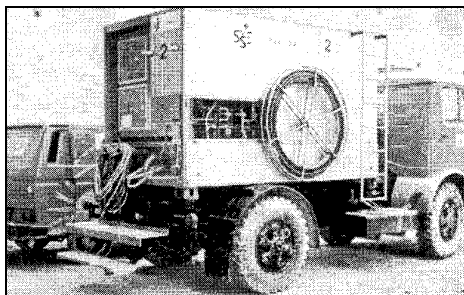
Przy pierwszym strzelaniu podjęto decyzję, aby zastosować tę samą ilość MWE luzem w każdym otworze co w przypadku materiału wybuchowego TOVEX SE, zachowując niezmienioną siatkę wierceń.

Uzyskane efekty strzelania nie były zadowalające. Kształt przodka charakteryzował się licznym wgłębieniami, a urobek posiadał dużą ilość nadgabarytów, co utrudniało załadunek koparce. Przyczyną wystąpienia wgłębień było zwiększenie koncentracji MWE luzem na dnie otworów, co spowodowało niewłaściwy rozkład energii. Zastąpienie materiału wybuchowego dokonane zostało w oparciu o masę, a nie o energię. MW TOVEX SE ma postać półpłynną, z dużą zawartością aluminium. W przeciwieństwie do materiału TOVEX SE, MWE luzem pompowany przez moduł MORSE (rys. 6) nie zawiera aluminium zwiększającego jego energię detonacji.

Energia detonacji uzyskana podczas pierwszego strzelania stanowiła zaledwie 70% energii MW TOVEX SE. W związku z tym ilość MWE została początkowo zwiększona do 246 kg, a w następnych strzelaniach zmniejszona do 200 kg, przy jednoczesnej zmianie parametrów siatki wiercenia otworów strzałowych. W kolejnych strzelaniach uzyskane rezultaty były bardzo dobre i odpowiadały użyciu 200 kg materiału wybuchowego.

Pracownicy docenili zalety nowej metody. Do załadunku były używane dwa węże przez operatorów znajdujących na ziemi i platformie. Nowa metoda okazała się szybsza i mniej męcząca niż używanie ładunków nabojoyanych.

Podczas pierwszych dwóch miesięcy urządzenie MORSE obsługiwało jedno lub dwa strzelania dziennie. SSE zapewniła opiekę technika, który wyszkolił wszystkich operatorów i nadzorował operacje załadunku MWE do otworów. Łącznie do końca maja 1999 roku zużyto około 25 ton MWE luzem.



Rys. 6. Moduł MORSE

4.1.4. Wnioski

Użytkownicy szybko zaufali urządzeniu, ponieważ pozwala ono dozować odpowiednią ilość materiału w zależności od potrzeb. Operatorzy obsługujący moduł MORSE byli mniej zmęczeni, obsługując węże, niż przy ładowaniu ręcznym MW. Wykonawcy tunelu docenili zmniejszenie ilości używanych i przechowywanych materiałów wybuchowych.

Zoptymalizowany schemat odpalania MWE luzem pozwala na zmniejszenie masy materiałów wybuchowych o około 30%. Niższa energia detonacji wynikająca z ciężaru emulsji w porównaniu z energią ładunku MW TOVEX jest rekompensowana całkowitym wypełnieniem kolumny ładunku MW w otworze oraz lepszym przekazaniem energii detonacji do urabianego ośrodka. Po raz kolejny duża wydajność MWE luzem w wyrobiskach podziemnych została potwierdzona przeprowadzonymi próbami.

4.2. Tunel Mitholz

W trakcie przeprowadzania próby w Sigirano dwa inne moduły MORSE były budowane przez firmę NITROCHIMIE na potrzeby drażenia tunelu Mitholz, będącego częścią projektu budowy tuneli nazwanego Alp Transit. Dwa samochody ciężarowe zostały wyposażone w moduły MORSE, a ich eksploatację rozpoczęto we wrześniu 1999 roku.

4.2.1. Opis projektu

Projekt Mitholz składał się z czterech niezależnych przekopów rozpoczynających się w centralnym punkcie, do którego można było się dostać chodnikiem wychodzącym z drogi w dolinie Kandertal.

SSE założyła bazę w centralnej części tunelu. W tym miejscu umieszczono zbiornik do przechowywania matrycy oraz plastikowe zbiorniki na środki uczulające. Pojemniki z matrycą emulsji zostały dostarczone bezpośrednio z fabryki. Udostępniono niewielki budynek na drobne prace konserwacyjne oraz pomieszczenia dla operatorów. Obsługę załadunku przy użyciu modułu MORSE wykonywali operatorzy wykonawcy robót.

4.2.2. Parametry strzelania

Ponieważ wykorzystanie urządzeń MORSE było w tym projekcie bardzo intensywne, użyto wiele różnych schematów.

Poniżej podano najbardziej reprezentatywne parametry strzelania:

- powierzchnia przodka: 62 m²,
- 92 otwory z 25 otworami na obrzeżach,
- średnica otworu: 45 mm,
- wymiary siatki: 1,10 × 1,10 m,
- włom z 2 pustymi otworami o średnicy 105 mm,
- długość otworu: 4,40 m,
- pobudzac: 0,420 g TOVEX SE,
- zapalniki: Dynashock LP,
- objętość odstrzelonego urobku: 272 m³,
- materiał wybuchowy: emulsja: 381 kg, TOVEX SE: 28,5 kg.

Pomiędzy sierpniem 1999 roku a kwietniem 2000 roku dwa moduły MORSE były wykorzystywane kilka razy dziennie. Bez większych problemów dokonano załadunku około 300 ton MWE luzem. Oznacza to około 780 odstrzałów przeprowadzonych przez pracowników wyszkolonych przez firmę SSE.

Przeciętny czas niezbędny do wypełnienia przodka przy użyciu dwóch węży wynosił mniej niż 30 min. — najszybsze wypełnienie przeprowadzono w 19 minut.

5. Wnioski

Niniejszy artykuł przedstawia rozwój w dziedzinie nowych technik strzałowych stosowanych w pracach podziemnych.

EPC Group wybrała metodę pragmatyczną w celu udoskonalenia systemu MORSE. Ogólna ilość emulsji luzem, wyprodukowanej za pomocą technologii MORSE w Szwajcarii, pod koniec kwietnia 2000 roku wynosi ponad 450 ton, co oznacza ponad 900 odstrzałów.

W świetle różnych technologii wykorzystywanych w operacjach podziemnych w Alpach szwajcarskich system MORSE jest bezpieczny, prosty oraz niezawodny:

- dla operatorów zaletą jest zmniejszenie ryzyka zawodowego i zagrożeń związanych z kontaktem z materiałami wybuchowymi oraz ograniczenie szkodliwości gazów postrzałowych;

- dla wykonawców zaletą jest zmniejszenie ilości materiałów wybuchowych oraz kontrola magazynu, zwiększona produktywność przez szybkość zakładania ładunków oraz krótszy czas wentylacji;
- rezultaty odstrzału w przypadku MWE luzem są porównywalne z użyciem dynamitu.

EPC Group, przy współpracy SSE, stale udoskonala technologię MORSE. Od końca czerwca 2000 roku dziewięć urządzeń MORSE jest wykorzystywanych we Francji, Szwajcarii, Anglii i Irlandii.

Autorzy pragną podziękować wszystkim, którzy przyczynili się do zebrania informacji zawartych w niniejszym artykule, a w szczególności M. Delaloye z SSE za udostępnienie szczegółów operacji w Szwajcarii.

Wyrażają również wdzięczność CETU (Centre d'Etudes des Tunnel, francuskie Centrum Badań nad Tunelami), dyrektorom firm CHAGNAUD, SRTF, SETEC, którzy udostępnili wyniki prób w tunelu Sorderettes, oraz dyrektorom firm SNCF, EI, PASCAL za współpracę w tunelu Saint-Genies de Comolas.

Zatwierdzono do druku: 17.09.2004 r.