

Domieszki stosowane w procesie drążenia tuneli

tekst: dr EUGEN KLEEN, TADEUSZ WASĄG, WITOLD CHODYŃ, MC-Bauchemie Sp. z o.o.

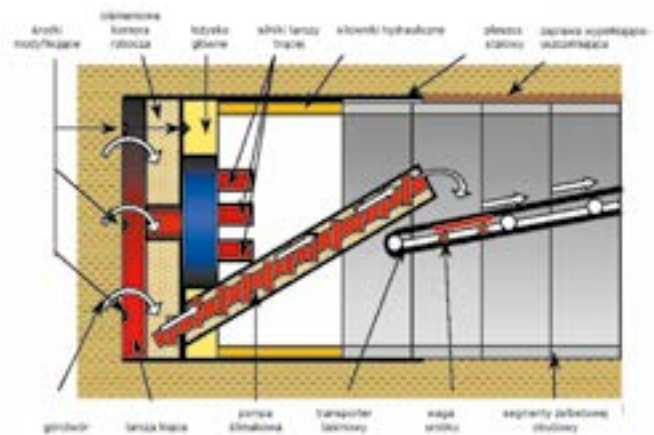
Jedną z najczęstszych metod drążenia tuneli jest metoda równoważenia ciśnienia gruntu EPB (*Earth Pressure Balance*). Jest to technologia, w której wydobyty materiał zostaje zmodyfikowany domieszkami i dodatkami chemicznymi. Celem modyfikacji jest nadanie urobkowi odpowiedniej konsystencji, aby z jednej strony zapewnić hydrostatyczne podparcie czoła wyrobiska, z drugiej umożliwić transport przenośnikiem śrubowym i dalej taśmociągami do składowisk. Domieszki modyfikujące urobek to środki powierzchniowo czynne, polimery i stabilizatory.

W pierwszej części artykułu przedstawiono opracowaną i opatentowaną przez MC-Bauchemie metodę produkcji piany modyfikującej urobek. Obejmuje ona nowy typ generatora piany wraz ze specjalnie opracowaną rodziną domieszek spieniających. Metoda pozwala na sterowanie parametrami samej piany, takimi jak wielkość pęcherzyków i jej gęstość, a także przystosowanie zmodyfikowanego urobku do żądanej funkcji geotechnicznej – stabilizacji parcia gruntu na przodek.

W drugiej części zostały opisane zaprawy wypełniająco-uszczelniające przestrzeń między górotworem a obudową tunelu. Powstanie tej szczeliny wynika z różnicy średnic tarczy tnącej i osłony komory roboczej, zbieżności płaszcza osłony oraz konstrukcji uszczelki między osłoną a ścianą żelbetowej obudowy tunelu. Zaprawa jest wtfaczana sukcesywnie w miarę postępu robót i montażu tubingów. Zadaniem zapraw jest wypełnienie przestrzeni pozwalające na osadzenie rury tunelu w sposób zapewniający przeniesienie sił i naprężeń z żelbetowej konstrukcji tunelu na grunt otaczający oraz zapobieżenie osiadaniu konstrukcji.

1. Wprowadzenie

Do drążenia tuneli w gruntach spoistych, takich jak iły i gliny, stosuje się maszyny typu EPB (ryc. 1). Obrótowa tarcza z nożami tnącymi odsypa urobek, który następnie pompą śrubową oraz systemem taśmociągów jest transportowany na składowisko. System siłowników hydraulicznych przesuwa tarczę tnącą naprzód. Żelbetowa obudowa tunelu, wykonana z prefabrykatów tworzących pierścienie, jest układana w osłonie płaszcza stalowego, stanowiącego integralną część modułu tnącego. Moduł tnący z tarczą obracającą się z prędkością 2,7 obr./min jest dociskany do czoła górotworu siłą 400 barów systemem siłowników hydraulicznych. Czoło drążonego tunelu może być kondycjonowane wodą pod ciśnieniem, bentonitem lub pianą. Urobek jest kondycjonowany wspomnianymi środkami w komorze za tarczą tnącą, do której wtfacza go ciśnienie górotworu oraz wody gruntowej. W gruntach niestabilnych parcie jest kompensowane ciśnieniem panującym w szczelnej komorze roboczej. Ciśnienie w niej jest regulowane przez odpowiednie dobranie parametrów pracy, tzn. prędkości obrotowej pompy śrubowej transportującej urobek do modułu transportowego maszyny. Utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w komorze roboczej ma za zadanie utrzymanie stabilności czoła drążonego tunelu.



Ryc. 1. Schemat maszyny drążącej typu EPB

W miarę postępu modułu tnącego układane są kolejne pierścienie obudowy tunelu. Każdy pierścień składa się z siedmiu do dziesięciu elementów, montowanych za pomocą podajnika podciśnieniowego. Przestrzeń pomiędzy pierścieniami obudowy a gruntem wypełniana jest sukcesywnie specjalnymi zaprawami bądź zaczynami. W dalszej części artykułu zostanie przedstawiona problematyka modyfikowania urobku przy drążeniu tuneli w gruntach żwirowych, piaszczystych i spoistych oraz zapraw wypełniających szczeliny pierścieniowe.

2. Zastosowanie domieszek przy wykonywaniu tuneli

W procesie drążenia tuneli wykonawca napotyka różne typy warunków gruntowych. Badania geologiczne prowadzone w postępowaniu przygotowawczym pozwalają określić typ zastosowanej maszyny oraz wynikający z tego sposób modyfikacji urobku (tab. 1).

2.1. Modyfikacja urobku

Przy użyciu maszyn typu Hydro-Shield i EPB pozyskiwany w procesie drążenia tunelu urobek wymaga kondycjonowania. Konieczność ta wynika z dwóch głównych przesłanek:

- zapewnienia wsparcia czoła tunelu. Aby wyrównać ciśnienie górotworu oraz parcie wody gruntowej, urobek musi przybrać formę homogenicznej pulpy wyrównującej – zgodnie z prawami hydrostatyki – napór zewnętrzny;
- zapewnienia możliwości odbioru, transportu i składowania urobku.

Tab. 1. Metody modyfikacji urobku

Rodzaj gruntu	Parametry gruntu	Typ maszyny	Modyfikacja urobku
Lita skała	Grunt skalisty o średniej i wysokiej stabilności. Wytrzymałość na ściskanie 50–300 MN/m ²	Gripper bez osłony	Niekonieczna, urobek syпки
Skała niestabilna	Skała od kruchej do niestabilnej, z wyciekami wody gruntowej. Wytrzymałość na ściskanie 5–50 MN/m ²	TBM-S w osłonie	Niekonieczna, urobek syпки
Grunty syпkie lub słabo zwięzłe	Piaski, żwiry o uziarnieniu < 0,2 mm, do 10%	Hydro-Shield	Piana, bentonit, polimery stabilizujące
Grunty pła-styczne	Iły i gliny o uziarnieniu < 0,2 mm, > 10%	EPB-Shield	Piana, dodatek zmniejszający lepkość gliny



Aby spełnić powyższe przesłanki, zmodyfikowany urobek powinien cechować się następującymi cechami:

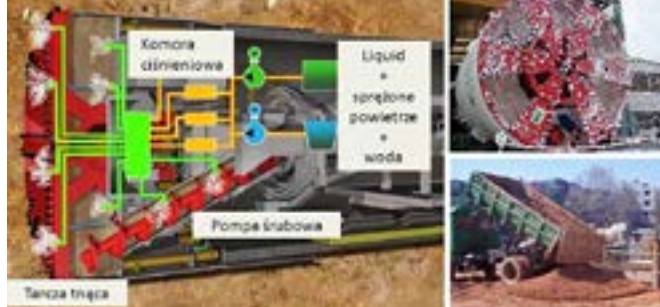
- dobrą urabialnością,
- konsystencją pasty lub pulpy,
- niskim tarciem wewnętrznym,
- dobrą wiązliwością wody.

Praktyka na wielu budowach wykazała, że w zależności od zastanych warunków geologicznych urobek, aby spełnić powyższe wymagania, musi zostać zmodyfikowany kombinacją następujących domieszek i dodatków:

- środków powierzchniowo czynnych,
- stabilizatorów bentonitowych,
- domieszek polimerowych przeciwdziałających segregacji.

2.1.1. Środki powierzchniowo czynne

W procesie drążenia tunelu do komory roboczej podawany jest środek powierzchniowo czynny MC-Montan Drive FL w postaci piany. Jest ona produkowana w generatorach piany i wtłaczana pod ciśnieniem 3–4 barów do komory roboczej (ryc. 2). W konwencjonalnych generatorach piany niejednorodna struktura porów powoduje ich niestabilność w czasie i zmienność konsystencji i gęstości pulpy.



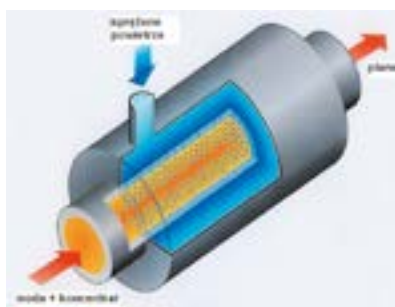
Ryc. 2. Generator piany w procesie modyfikacji urobku

W wielu testach przeprowadzonych w laboratoriach MC-Bauchemie na zlecenie firmy PORR Bau GmbH opracowano metodę produkcji piany o sterowalnych parametrach. Czynniki spieniający jest podawany sprężonym powietrzem przez moduł gazyfikujący generatora. Innowacyjność metody polega na zastosowaniu rozwiązań pozwalających na produkcję piany o wyjątkowo stabilnych parametrach jakościowych. Co więcej, operator w zależności od zastanych warunków geologicznych ma możliwość korekty gęstości i wielkości porów powietrznych piany przez zmianę elementu modułu gazyfikującego.

Rozwiązanie zostało sprawdzone w praktyce. Zamontowano generator w maszynie pracującej przy drążeniu odcinka tunelu Emscher River Renaturation Project w okolicach Bottrop. Produkt testowano na odcinku kilkuset metrów tunelu. Zebrane doświadczenia pozwoliły wyciągnąć wnioski o prawidłowości zastosowanej technologii. Sprawność generatora i właściwa receptura czynnika spieniającego, określonego handlową nazwą MC-Montan Drive FL, pozwoliły na zmniejszenie dozowania domieszki o 1/3 w stosunku do technologii stosowanych dotychczas (tab. 2). Zdaniem operatorów maszyn z firmy Herrenknecht, czołowego producenta TBM, nowa technologia umożliwiła również poszerzenie spektrum warunków geologicznych pozwalających na zastosowanie ich kombajnów drążących. Redukcja zużycia

Tab. 2. Wpływ piany na właściwości urobku

Parametr	Wpływ zastosowania piany
Konsystencja urobku	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nadanie quasi-hydraulicznej konsystencji dla umożliwienia przenoszenia ciśnienia hydrostatycznego. ▪ Nadanie plastyczności umożliwiającej transport i kontrolę ciśnienia w przenośniku śrubowym.
Wodoprzepuszczalność	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zapewnienie wiązliwości wody.
Homogeniczność	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ułatwienie zmieszania urobku z wodą. ▪ Uzyskanie konsystencji pulpy o zadanych parametrach.
Kleistość	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rozluźnienie struktury, zapobieganie zbylaniu urobku. ▪ Zapobieganie zbijaniu się drobnych frakcji pod ciśnieniem panującym w komorze roboczej i przenośniku ślimakowym.
Tarcie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ułatwienie transportu urobku. ▪ Redukcja ścierania elementów maszyny.
Regulacja ściśliwości	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wypełnianie pustek w masie urobku zapobiegające wahaniom ciśnienia w instalacji.
Nasywanie gruntu (w gruntach syпkim czoła urobku w komorze roboczej, syпkich)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nadawanie pozornej spoiwości gruntom syпkim czoła urobku w komorze roboczej, syпkich)



Ryc. 3. Generator piany. Schemat działania i widok urządzenia

domieszki oraz jej biodegradowalność dały możliwość zmniejszenia obciążenia środowiska w rejonie składowisk urobku. Metoda została opatentowana i jest obecnie stosowana w realizacji tuneli w Niemczech (ryc. 3). Twórca koncepcji generatora i domieszki, dr Eugen Kleen z firmy MC-Bauchemie, został w 2014 r. laureatem Tunnelling Conference Innovation Award.

2.1.2. Stabilizatory polimerowe

Polimery to materiały składające się z łańcuchów setek tysięcy grup cząsteczkowych zwanych merami. Długość łańcuchów głównych, gęstość i długość łańcuchów bocznych decydują o ich własnościach fizykochemicznych.

W praktyce budowlanej stosowane są stabilizatory organiczne na bazie celulozy, stabilizatory półsyntetyczne celulozo-akrylowe oraz stabilizatory syntetyczne na bazie poliakryloamidów.

W laboratoriach MC-Bauchemie opracowano rodzinę stabilizatorów syntetycznych MC-Montan Drive LB, zapewniających dobre wiązanie wody, homogeniczność mieszanki oraz utrzymanie zakładanej konsystencji od momentu wymieszania w komorze roboczej do ułożenia na składowisku.

Stosowane są w drążeniu tuneli w warstwach wodonośnych do wiązania wody przebijającej do komory mieszającej. W połączeniu z czynnikiem pianotwórczym pozwalają na pracę w gruncie o dużej zawartości glin. Zwiększają spoistość urobku, umożliwiając większą wydajność ciągów transportowych (ryc. 4, tab. 3).



Ryc. 4. Efekt działania polimerowej domieszki MC-Montan Drive LB stabilizującej urobek żwirowo-piaskowy

Tab. 3. Zakres stosowania domieszek modyfikujących urobek

Rodzaj gruntu	Charakterystyka gruntu	Modyfikacja	
Gлина plastyczna	Odspajanie bez zmiany konsystencji i spoistości, tendencja do zbrylania.	Piana – wysokie dozowania dla rozluźnienia konsystencji, dodatek zmniejszający lepkość gliny.	
Przewarstwione gliny ilaste lub piaszczyste	Łatwiejsze do odspojenia, z tendencją do zbrylania, lekko ścierne.	Woda – dla zmniejszenia wytrzymałości na ścinanie. Piana z polimerem zmniejszającym tarcie – w glinach zwięzłych.	
Piaski i żwiry gliniaste	Łatwe do upłynnienia. Tendencja do zbrylania przy zawartości frakcji drobnych > 10%.	Polimery zmniejszające tarcie dla ochrony głowicy. Stabilizatory polimerowe dla skonsolidowania urobku i zabezpieczenia przed infiltracją wody.	
Drobne piaski ilaste	Słabo płynne, przepuszczalne dla wód gruntowych, wysoce ścieralne.	Piana z polimerem stabilizującym pianę i zmniejszającym tarcie. Dozowanie polimeru:	0,1%
Piaski, żwiry			0,25%
Żwir, kamienie			1–3%
Kamienie, gązły	Tendencja do zbrylania.	Duże dozowanie polimeru dla rozbicia gniazd i brył, wiązania wody i zmniejszenia tarcia.	

2.2. Modyfikacja zapraw wypełniająco-uszczelniających

Przy wierceniu tuneli w gruntach stosuje się maszyny typu Hydro-Shield i EPB. Oznacza to, że moduł wierzący jest chroniony osłoną stalową przed osypującym się gruntem i wodą gruntową. Obudowa tunelu wykonywana jest z żelbetowych elementów prefabrykowanych. Powstaje przestrzeń pomiędzy górotworem a obudową maszyny. Szerokość powstałej szczeliny jest uwarunkowana średnicą tarczy wiertniczej, skosem obudowy maszyny i konstrukcją uszczelki

i w tym aspekcie jest zawsze wystarczająca, wynosi zazwyczaj 10–20 MPa.

Zaprawy wypełniające poddawane są badaniom:

- na urabialność według norm DIN 12350 oraz DIN 18555,
- na wytrzymałość na ścinanie według normy DIN 4094-4,
- na ściśliwość według normy DIN 18136,
- edometrycznego modułu ściśliwości według normy DIN 18135,
- właściwości filtracyjnych według normy DIN 4127.

Wiele badań jest specyficznych tylko dla tego rodzaju zapraw. Jest nim np. edometryczne badanie łączące test filtracyjny z badaniem na ścinanie i ściśliwość. Prasy stosowane w laboratoriach znanych z technologii betonu są tu nieprzydatne. Badanie zapraw wypełniających wymaga zastosowania wysokoczułych pras operujących z dużą dokładnością, w zakresie 0–2 MPa.

2.2.2. Zaprawy dwukomponentowe

Jest to nowatorskie i bardzo interesujące rozwiązanie pod wspólną nazwą MC-Montan Grout. Podstawową cechą jest duża zawartość cementu i ok. 50 kg bentonitu (tab. 6). Zaprawy te nie zawierają kruszywa. Dzięki temu otrzymuje się bardzo płynną zaprawę o znakomitej pompowalności. Zaprawy z użyciem kruszyw do 8 mm byłyby pompowalne na odległość max. 100–150 m. Opisywane zaprawy dwukomponentowe są pompowalne na odległość kilku kilometrów. Przy budowie wspomnianego tunelu w ramach inwestycji Emscher Project zaprawy wypełniające były pompowane na odległość 4,5 km. Szczególnie w tunelach o małej średnicy, np. 4 m (jak to miało miejsce przy budowie Emscher Project), transport zaprawy wypełniającej na miejsce wbudowania jest dużym wyzwaniem.

Przedstawione wymagania dla zapraw wypełniających narzucają użycie dużej ilości specjalnych domieszek. Mieszanka zawiera 400–500 kg cementu, bentonit oraz stabilizator. Stabilizator nie jest tym samym produktem, jaki znamy z technologii betonu. Ma on za zadanie kontrolowanie czasu wiązania, gdyż, jak już wcześniej wspomniano, wymagany jest czas urabialności wynoszący ok. 70 godzin. W końcowej fazie układania zaprawy dodawany jest aktywator, mający za zadanie zainicjowanie procesu tężenia i twarzenia mieszanki. System aplikacji zaprawy jest zbliżony do technologii torkretu. Jedna dysza podaje zaprawę, druga aktywator. Przez sterowanie wydajnością podawania aktywatora można sterować czasem zelowania zaprawy wynosi ok. 30 s.

Tab. 6. Receptura dwukomponentowej zaprawy wypełniającej

	Komponent A				Komponent B	
	cement	bentonit	stabilizator	woda	aktywator	woda
	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Zaprawa dwukomponentowa	482	46	4	742	89	7

2.2.3. Wypełnienie żwirowe

Jak już wcześniej wspomniano, jest to rozwiązanie przestarzałe, uciążliwe i ryzykowne. Głównymi wadami jest niemożność dokładnego wypełnienia przestrzeni aż po strop wyrobiska

i wynikająca stąd konieczność dodatkowego iniekowania powstałych pustek. Technologia ta jest coraz rzadziej stosowana, wyłącznie w tunelach drążonych w litej skale.

2.3. Technologia wypełniania przestrzeni

W praktyce budowlanej stosowane są dwa sposoby podawania zaprawy wypełniającej w przestrzeń pomiędzy górotworem a obudową tunelu:

- przez płaszcz obudowy maszyny wiertniczej. Jest to powszechnie obecnie stosowana technologia. Umożliwia ona lepszą kontrolę nad procesem wypełniania pustki. Szczególnie w rejonach zurbanizowanych, gdzie występują drgania i możliwość odspojeń górotworu, sukcesywne wypełnianie przestrzeni zapobiega obrywaniu się gruntu i tworzy wodoszczelną warstwę wypełniającą;
- przez specjalnie przygotowane otwory w prefabrykacjach betonowych obudowy tunelu. Technologia ta stosowana jest prawie wyłącznie w Azji.

3. Podsumowanie

Domieszki stosowane przy drążeniu tuneli w gruntach sypkich oraz spoistych pozwalają na:

- zwiększenie wydajności prac wiertniczych przez poprawę własności urobku;
- zmniejszenie zużycia elementów roboczych dzięki zredukowaniu sił tarcia w trakcie drążenia i transportu urobku;
- poszerzenie granic warunków geotechnicznych umożliwiając stosowanie technologii równoważenia ciśnienia gruntu (EPB);
- wprowadzenie nowych rodzajów zapraw wypełniających pierścieniowe szczeliny powstałe pomiędzy górotworem a obudową tunelu. Możliwość sterowania parametrami reologicznymi i wytrzymałościowymi zapraw;
- zmniejszenie obciążenia środowiska naturalnego przez zastosowanie bardziej efektywnych domieszek modyfikujących urobek.

Przedstawiona metoda jest obecnie stosowana na świecie w budowie najbardziej zaawansowanego systemu odprowadzania ścieków, jakim jest część niemieckiego projektu renaturalizacji rzeki Emscher oraz w projekcie Stuttgart 21 – kompleksowej restrukturyzacji węzła kolejowego w Stuttgartcie.

Literatura

- [1] Kleen E.: *Mechanical Tunneling. Annular Gap Grout*. Bottrop 2016.
- [2] Thewes M., Budach C.: *Grouting of the annular gap in shield tunnelling – an important factor for minimization of settlements and production performance*. ITA-AITES World Tunnel Congress 2009 *Safe Tunnelling for the City and Environment*. Budapest 2009.
- [3] PN-EN 12350-2:2011 *Badania mieszanki betonowej*.
- [4] DIN 18555 *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln*.
- [5] DIN 4094-4 *Subsoil – Field testing. Part 4. Field vane test*.
- [6] DIN 18136 *Soil – Investigation and testing. Unconfined compression test*.
- [7] DIN 18135 *Soil – Investigation and testing. Oedometer consolidation test*.
- [8] DIN 4127 *Earthworks and foundation engineering. Test methods for supporting fluids used in the construction of diaphragm walls and their constituent products*.



Wyzwania to nasza pasja



MC-PowerFlow 2650 – zaawansowany technologicznie superplastyfikator



**Duże początkowe upłynnienie przy długo utrzymującej się konsystencji?
Wysoka stabilność przy bardzo dobrej urabialności?**

Łączymy przeciwieństwa aby osiągnąć rozwiązania najwyższej jakości!
Nowy superplastyfikator MC-PowerFlow 2650 zapewnia najlepszą reologię świeżego betonu układanego na placu budowy.
Redukuje kleistość oraz optymalizuje urabialność betonu na miejscu budowy – a to wszystko przy zadziwiająco długim czasie zachowania właściwości roboczych.

Bądźmy w kontakcie! Wyzwania to nasza pasja.

MC-Bauchemie Sp. z o.o.
ul. Jutrzenki 177 · 02-231 Warszawa
tel. +48 22 535 63 30 · www.mc-bauchemie.pl

