

Projekt Tunelu pod Martwą Wisłą – rola systemów baz danych w budownictwie tuneli metodą TBM

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Sikora¹, prof. dr inż. Amund Bruland², inż. Marek Multan^{1,2}, inż. Wojciech Smoleń^{1,2}

¹Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

²Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology

Systemy baz danych definiuje się jako informatyczne narzędzia służące do zorganizowanego gromadzenia i przechowywania informacji [3]. Dzięki dostępności łatwych w obsłudze programów (np. Microsoft Excel, Access), które

znacznie upraszczają proces ich tworzenia, istnieje możliwość stworzenia bazy dostosowanej do konkretnych potrzeb w różnych dziedzinach każdej działalności inżyniersko-naukowej. Każda baza danych ma swój indywidualny układ dostosowa-

ny do zadania, które ma wykonywać. Wysoka funkcjonalność pozwala na prezentowanie informacji za pomocą wykresów i diagramów, umożliwiając natychmiastową analizę dowolnego zakresu danych i uzyskanie wyników. Dzięki swojej prostocie i możliwości kolekcjonowania ogromnej ilości informacji, bazy danych są powszechnie stosowane, między innymi w budowie tuneli metodą TBM (*Tunnel Boring Machine*). Technologia, która w Polsce zyskuje na popularności, w północnej i zachodniej części Europy jest już bardzo zaawansowana, a dzięki wsparciu i zaangażowaniu ze strony Ośrodków Badawczo-Naukowych, takich jak Norweski Uniwersytet Techniczny w Trondheim czy ośrodek badawczo-naukowy Stiftelsen for industriell og teknisk forskning (w Norwegii), prężnie rozwija się.

KONIECZNOŚĆ PROWADZENIA BAZ DANYCH

Rozwój technologii TBM w ostatnich dwóch dekadach przyspieszył znacząco. Obecnie, praktycznie nie ma ograniczeń technicznych związanych z brakiem możliwości wykonywania tuneli o dużych rozmiarach. W aktualnie realizowanym projekcie Tunelu pod Martwą Wisłą w Gdańsku średnica tarczy maszyny drążącej TBM – Damroka wynosi 12,56 m – do tej pory jest to największa tego rodzaju maszyna zastosowana w Polsce.

Zwiększone rozmiary to dodatkowe wyzwania przy kontroli robót budowlanych oraz jakości prac. Koniecznością staje się gromadzenie dużej ilości informacji. Firmy realizujące projekty często decydują się na komputerowe systemy archiwizowania danych. Programy muszą mieć zdolność do jednoczesnego odczytywania i zapamiętywania wskazań około 130 czujników znajdujących się na maszynie TBM, notowanych co dwie sekundy. Wykonanie dwóch metrów tunelu to blisko 700 000 wpisów. Przy tej liczbie bliżej nieuporządkowanych danych, wnikliwa analiza i prezentacja graficzna wyników staje się niemożliwa.

BADANIA NORWESKIEGO UNIWERSYTETU NAUKI I TECHNOLOGII ORAZ POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ – PREZENTACJA SYSTEMU

Na potrzeby obecnie prowadzonych badań przez Norweski Uniwersytet Techniczny w Trondheim (Norwegia) przy współpracy z Katedrą Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego Politechniki Gdańskiej, poświęconych produktywności oraz wpływowi warunków geologiczno-geotechnicznych na proces drążenia tuneli metodą TBM stworzono specjalną bazę danych pozwalającą na szybki wgląd w uporządkowane informacje procesu budowy (rys. 1). Podczas analizy danych w programie

Tabl. 1. Sposób organizowania danych w bazie danych przygotowanej we współpracy Politechniki Gdańskiej z Norweskim Uniwersytetem Technicznym w Trondheim, na bazie Projektu pod Martwą Wisłą

Data	30-wrz									
Numer pierścienia	340	341	342	343	344	345	346	347	348	
Pozycja maszyny [m]	686,3	688,3	690,3	692,3	694,3	696,3	698,3	700,3	702,3	
Rodzaj gruntu	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	GR	
Penetracja [mm/mln]	31	31	29	27	29	29	25	29	27	
Rzeczywisty nacisk na grunt [kN]	8900	8900	9000	8900	8950	9000	9000	9000	9000	
Nacisk na cylindrach [kN]	40000	41500	41300	41500	39200	42000	40000	40000	43000	
Prędkość obrotowa [obr/min]	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,1	
Moment obrotowy [kNm]	790	670	790	680	720	900	900	900	900	
Ciśnienie w komorze [bar]	2,5	2,51	2,5	2,53	2,48	2,5	2,55	2,54	2,54	
Wydrążony grunt [t]	455	450	455	455	460	455	450	460	455	
Zainiektowany zaczyn [m³]	16	16	16	16	17	16	16	18	16	
Przemieszczenie pionowe [mm]	2									
Przemieszczenie poziome [mm]	7									
Trend	0									
PRODUKCJA	95	95	100	105	105	100	115	100	105	920
TBM	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15
ZAKŁAD SEPARACJI (STP)	0	0	0	0	0	20	135	0	0	155
BACK UP	35	60	40	35	110	0	0	70	0	350
ZEWNĘTRZNE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PRACE PORZĄDKOWE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SUMA										1440

wykorzystuje się średnie arytmetyczne wartości parametrów odczytanych z określonej długości (w tym przypadku dwa metry – dystans potrzebny do zamontowania jednego pierścienia obudowy tunelu) za pomocą sensorów zamontowanych w maszynie. Na potrzeby wymienionych prac badawczych prowadzono (tabl. 1.) regularny zapis odczytów z czujników monitorujących:

- penetrację – szybkość drążenia [mm/min],
- parcie tłoków hydraulicznych tarczy – zapewniających ruch postępowy maszyny,
- prędkość obrotową tarczy skrawającej [obr/min],
- moment obrotowy [kNm],
- ciśnienie w komorze przodka [bar],
- ilość wybranego gruntu [m³],
- ilość zainiektowanej zaprawy cementowej [m³].

W celu wykonania analizy konsumpcji czasu dokonywano regularnych wpisów dotyczących wszystkich czynności wykonywanych na placu budowy przyporządkowując je następującym kategoriom:

- **Produkcja** – drążenie oraz montaż betonowych tubin-gów na ścianach tunelu,
- **Back-up** – konserwacja oraz przedłużanie instalacji doprowadzających wodę, powietrze, prąd, bentonit, zaczyn cementowy, oraz tory kolejowe, problemy techniczne związane z awarią dźwigu do montażu tubingów (tzw. erektor),
- **TBM** – konserwacja i serwis maszyny TBM (m.in. inspekcja i wymiana narzędzi skrawających),
- **Zakład Separacji STP** – (*Slurry Treatment Plant*) – zakład oddzielający urobek gruntu od bentonitu,
- **Zewnętrzne** – zatrzymania spowodowane przez czynniki zewnętrzne (opóźnienia w dostawach),
- **Prace porządkowe** w tunelu.

Wszystkie dane odnosi się do czasu, pozycji maszyny, numeru pierścienia oraz rodzaju gruntu na określonej długości (tabl. 1).

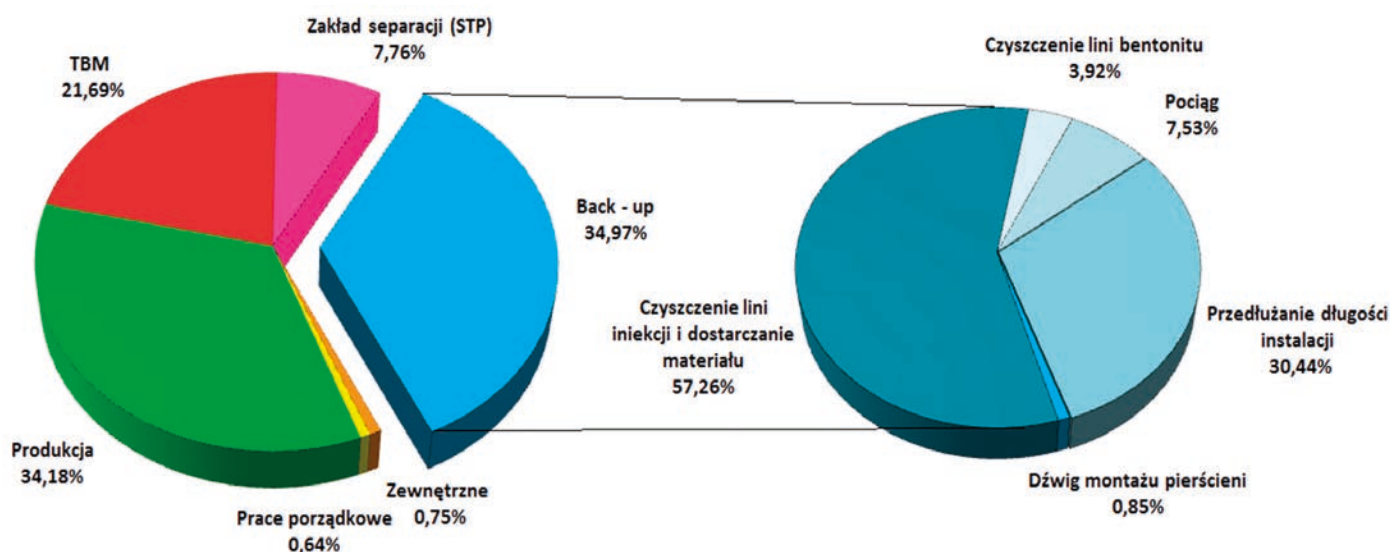
HIERARCHIA AKTYWNOŚCI

Część czynności podczas budowy wykonuje się jednocześnie. W takim przypadku stosuje się klasyfikację zwaną „hierarchią aktywności”. Taki zabieg jest koniecznością, która zapewni wiarygodny punkt odniesienia i sprawi, że łączny czas zmiany przeznaczony na poszczególne kategorie nie przekroczy 720 minut (dwanaście godzin). Klasyfikacja następuje poprzez wybranie czynności dominującej spośród dwóch lub więcej występujących w tym samym czasie. Decyzję podejmuje się na podstawie informacji udostępnionych przez inżyniera prac tunelowych projektu, wiedzy oraz doświadczenia opiekunów koordynujących pracę nad omawianą bazą danych.

Bez względu na rodzaj metody drążenia wykorzystanej w projekcie, aktywności o najwyższym priorytecie to drążenie oraz montaż pierścieni, bezpośrednio wpływające na tempo postępu procesu (rys. 1), następnie wszelkiego rodzaju awarie układów mechanicznych oraz elektrycznych odpowiedzialnych



Rys. 1. Pomieszczenie sterujące maszyną TBM – Damroka, Gdańsk (fot. Marek Multan, Wojciech Smoleń)



Rys. 2. Diagram prezentacji graficznej procesu konstrukcji tunelu utworzony na podstawie danych zgromadzonych w bazie podczas budowy Tunelu pod Martwą Wisłą metodą TBM

za funkcjonowanie maszyny. Awaryjne układy mechaniczne powodujące zatrzymanie maszyny, umożliwiają przeprowadzenie innych czynności, takich jak np. przedłużanie rur instalacji wentylacyjnej, wodnej, elektrycznej czy linii bentonitu, a także konserwację i inspekcję maszyny. Pozwala to na zaoszczędzenie czasu i przyspieszenie procesu drążenia tunelu.

ANALIZA ZGROMADOZNYCH DANYCH

Matryca Danych z pierwszego odcinka tunelu pod Martwą Wisłą o długości ponad jednego kilometra ma charakterystykę 545×15. Pomimo uśrednionych wartości, taka ilość informacji nie mogła być wnikliwie przeanalizowana bez pomocy komputera. Idealnym rozwiązaniem okazała się interpretacja graficzna. Autorska, graficzna baza danych pozwala na błyskawiczne porównanie diagramów z dowolnych zakresów danych, co daje możliwość analizy relacji między wybranymi parametrami. Dostrzeżone związki są bardzo cenne i mogą w znaczny sposób wpłynąć na decyzje podejmowane w czasie budowy. Natężenie ruchu w przypadku odcinka tunelowego Trasy Słowackiego wymusiło na inwestorze poprowadzenie dwóch równoległych tuneli. Doświadczenia zebrane podczas budowy pierwszego odcinka zastosowano przy wykonaniu kolejnego przewiertu.

ANALIZA PRODUKTYWNOŚCI

Pierwszym ważnym wskaźnikiem efektywności procesu drążenia jest diagram konsumpcji czasu przez poszczególne grupy czynności wykonywanych w czasie budowy tunelu. Nie będziemy zajmować się ani efektywnością robót budowlanych analizowanego projektu, ani ich oceną. Ukazane będą możliwości, jakie niesie z sobą wykorzystanie opracowanego systemu bazy danych.

Przykład

Na diagramie przedstawiono 34 procentowy udział czasu produkcji w stosunku do ogólnego czasu poświęconego na projekt (rys. 2). Opierając się na doświadczeniu zebranych podczas realizowania podobnych projektów, stwierdza się, że wynik znajdujący się w zakresie 30 ÷ 40% [1] określa się mianem wydajnego tempa budowy. Należy również zwrócić uwagę na znaczny udział grupy *back-up*. W celu głębszej analizy przeprowadza się osobną analizę diagramu dotyczącego wymienionej grupy. W tym momencie analizę należy oprzeć na wiedzy dotyczącej technologii wykonywania tunelu. Ponad 57% czasu pochłania eksploatacja linii iniekcyjnych, które ze względu na właściwości zaczynu cementowego muszą być dokładnie czyszczone po każdym postoju. Idea techniki *Slurry TBM* stosowanej do wykonywania przewiertów w gruntach niespoistych i spoistych, np. piaskach, ilach, glinach, wymusza wykorzystanie rozbudowanej sieci linii bentonitowej, połączonej z zakładem separacji (STP). Z powodu ciągłego przedłużania systemu jest wymagana stała kontrola wydajności pomp, gdyż ma ona znaczny wpływ na postępek procesu.

W krótkim czasie jesteśmy w stanie stwierdzić, co jest główną przyczyną przestojów oraz co staje na przeszkodzie w osiągnięciu maksymalnej wydajności produkcji. Oczywiście jest

fakt, że wykonawca czuje, co stanowi problem, jednak nadanie mu wartości przedstawionej na tle całego przedsięwzięcia pokazuje jego dokładną skalę i ukazuje efektywność ewentualnych działań prewencyjnych.

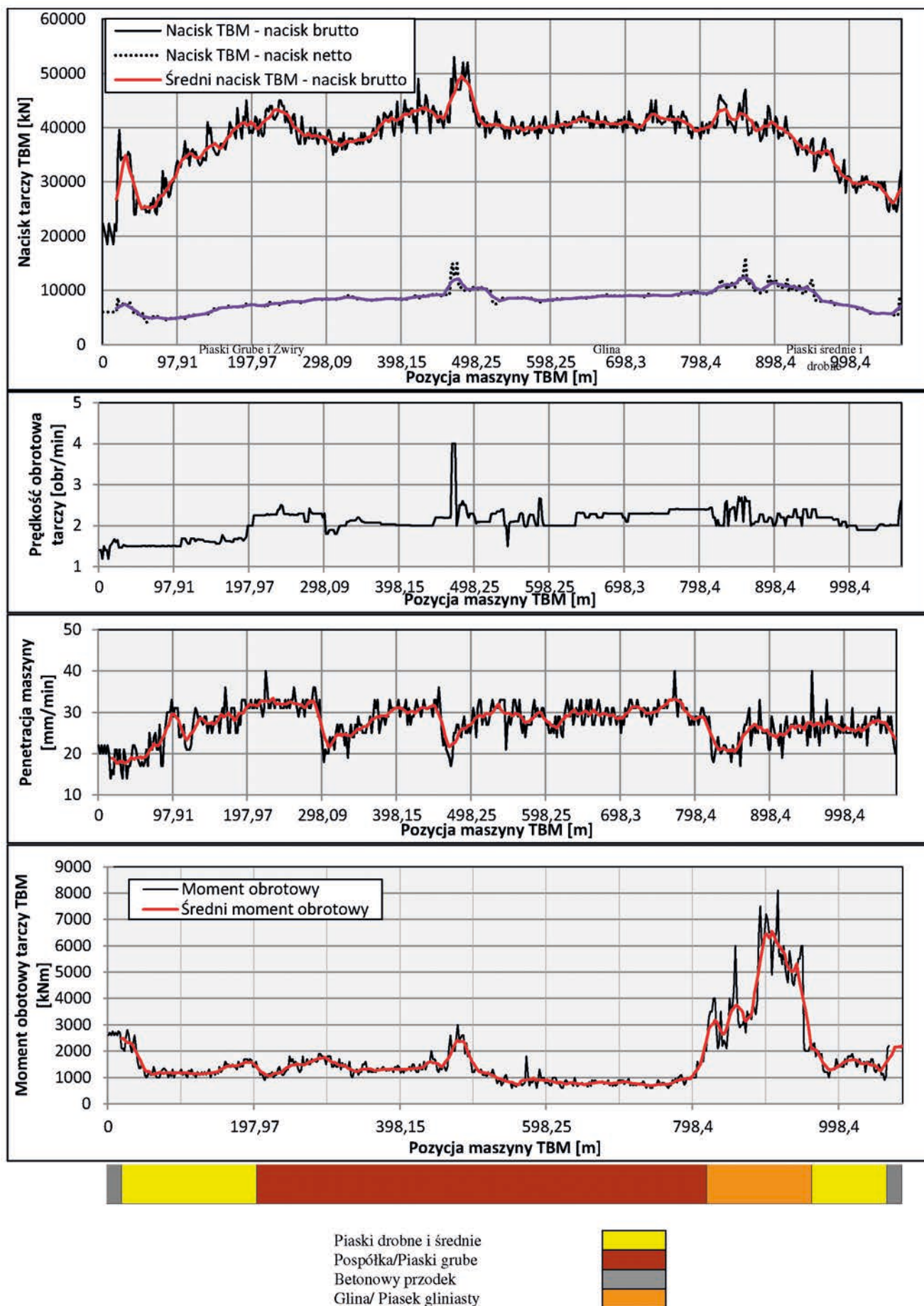
PARAMETRY TECHNICZNE

Pomimo wcześniej wykonanych badań geologicznych trudno jest przewidzieć zachowanie maszyny TBM na całej długości drążenia. Budowa tuneli zarówno w gruntach niespoistych, jak i w skałach opiera się głównie na obserwacjach empirycznych. Należy pamiętać o tym, że z geotechnicznego punktu widzenia tunele są zaliczane do trzeciej kategorii geotechnicznej, zarezerwowanej dla skomplikowanych warunków gruntowych wymagających szczególnej uwagi i dokładnej analizy. Na podstawie wielu badań geotechnicznych, takich jak: badanie abrazyjności LCPC, sondowanie CPTU, analizy sitowe oraz dzięki kartom otworów, tworzy się podłużne przekroje geologiczne zawierające zalecenia do podstawowych parametrów maszyny TBM, takich jak ciśnienie przodka, gęstość bentonitu.

Nie mniej jednak, dokładny i ekstensywny monitoring parametrów staje się kluczowy w przypadku budowy tunelu i pozwala na kontrolę procesu drążenia.

Diagram (rys. 3) to realny przykład monitoringu zmiany podstawowych parametrów drążenia spowodowanej uwarunkowaniami gruntowymi. Wyraźna zależność jest widoczna na krzywej momentu obrotowego i krzywej szybkości drążenia. W rejonie osiemsetnego metra tunelu zaobserwowano znaczny wzrost momentu obrotowego. Jest to spowodowane przejściem maszyny w strefę gruntów gliniastych. Jednocześnie można zaobserwować spadek szybkości drążenia będącej jednym z kluczowych czynników wpływających na koszt i termin ukończenia projektu. Taka zależność parametrów utrzymywała się przez 180 metrów, aż do momentu zmiany gruntu z gliny na piaski średnie i drobne. Należy pamiętać o tym, że podczas drążenia w materiale zawierającym glinę może dochodzić do obklepania części tnąco-zbierających na tarczy maszyny oraz do zwiększenia oporu obrotu, a w efekcie do obniżenia efektywności procesu drążenia oraz nierównomiernego zużycia części odpowiedzialnych za ekskawację. Na podstawie planów wykonanych przed rozpoczęciem prac szacuje się, kiedy należy dokonać ewentualnych inspekcji tarczy TBM. Dzięki analizie danych z wykresów połączonych z doświadczeniem inżynierów jest możliwe dokładniejsze oszacowanie miejsca postoju, a także przewidzenie pewnych problemów jeszcze przed inspekcją tarczy.

Sformułowanie wniosków jest możliwe tylko wtedy, gdy różnorodne i obszerne liczby danych uporządkuje się i usystematyzuje. Dzięki odpowiednim analizom komputerowym, wiedzy teoretycznej oraz doświadczeniu zespół inżynierów jest w stanie przewidzieć zachowanie maszyny na odpowiedniej części odcinka ze znaczną dokładnością, co w przypadku budowy dwóch równoległych nitek tunelu staje się szczególnie przydatne. Zebranie dokładnych parametrów wprost z komputera sterującego maszyną oraz zbudowanie na ich podstawie diagramów, baza danych daje możliwość porównania zmienności wartości parametrów do przekroju geologicznego wzdłuż konstruowanego tunelu. Takie działanie daje możliwość opisanie zachowania maszyny w przypadku konkretnych warunków gruntowych.



Rys. 3. Interpretacja graficzna czterech podstawowych parametrów drążenia Tunelu pod Martwą Wisłą maszyną TBM – Damroka

Zdobytą w ten sposób wiedza, zapisana w bazie danych, staje się wartościowym narzędziem, które może być wykorzystane w przyszłych projektach o zbliżonej charakterystyce.

PODSUMOWANIE

Zbyt duża liczba danych jest równie bezużyteczna jak zbyt mała [2]. Znaczenie i zastosowanie baz danych w projektach budowlanych, a w szczególności przy budowie tuneli, niewątpliwie wzrasta. Synteza wieloletniego doświadczenia reprezentowanego przez firmy wykonawcze z możliwościami analitycznymi projektów, jakie dają bazy danych, jest w stanie zaowocować wzrostem efektywności, a co za tym idzie rentowności realizowanych projektów. Co więcej, zdobyte i zgromadzone informa-

cje stają się bezcennym narzędziem, które znacznie zmniejszą poziom ryzyka, tak bardzo istotnego przy każdym przedsięwzięciu w budownictwie podziemnym.

LITERATURA

1. Bruland A.: Hard Rock Tunnel Boring. Norwegian University of Science and Technology, 2000.
2. McDonald J., Dishlip Ch., Raleigh P.C.: RETC Proceedings 2005 – Tunneling data: turning information into intelligence on the Neis Project. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2005.
3. Elmasri R., Navathe S. B.: Fundamentals of Database Systems. Addison-Wesley 2010.