

Warunki hydrogeologiczne, geologiczno-inżynierskie i geotechniczne na obszarze lokalizacji tunelu drogowego pod Martwą Wisłą

Buca B., Jaworska-Szulc B.

Projektowany tunel drogowy w Gdańsku będzie łączył wschodnie tereny portowe z zachodnimi w rejonie nabrzeży „Dworzec Drzewny” oraz „Nabrzeże Wiślane”. Całkowita długość trasy, na którą składa się tunel i wanny dojazdowe wynosi 1700 m. Długość sekcji tunelowej to 1370 m, w tym tunel drążony metodą TBM o długości 1070 m i średnicy ok. 12,5 m. W miejscu przeprawy tunelowej szerokość Martwej Wisły wynosi ok. 210 m, a głębokość około 11,7 m. Tunel składać się będzie z dwóch rur tunelowych, po jednej dla każdego kierunku ruchu. Rozstaw rur tunelowych wynosi 25 m [18]. Tunel w swoim najgłębszym punkcie znajdzie około 35 m poniżej lustra wody w Martwej Wiśle, natomiast minimalna głębokość tunelu pod dnem Martwej Wisły wyniesie około 9 m. Część wejściowa do tunelu w formie wykopu otwartego obejmuje ściany szczelinowe, uszczelnienie dna metodą iniekcji strumieniowej Soilcrete systemu Kellera, oraz wykonanie mikropali kotwiących na około 750 m odcinku znajdującym się na zachodnim brzegu, oraz około 340 m na wschodnim brzegu Martwej Wisły. Wykop w najgłębszym miejscu sięga do głębokości około 22 m poniżej powierzchni terenu. Tunel wraz z węzłem drogowym jest obiektem inżynierskim o całkowitej długości 2159 m. Lokalizację obiektu przedstawiono na rys. 1.

Badania geologiczno-inżynierskie i hydrogeologiczne wykonano na podstawie zatwierdzonych projektów prac geologicznych w dwóch zasadniczych etapach [41, 42, 49], pierwszy dla tunelu projektowanego w formie zatapianej i drugi dla tunelu realizowanego w systemie TBM (Tunnel Boring Machine). Ponadto przeprowadzono już dla wersji TBM badania uzupełniające i kontrolne [50, 51, 52].

W sumie wykonano następujące rodzaje badań [37, 44, 47]:

- wiercenia badawcze
- wiercenia dla celów hydrogeologicznych (studnie badawcze i piezometry w węzłach hydrogeologicznych)
- sondowania DPSH
- sondowania CPT i CPTU
- badania dylatometryczne DMT
- badania presjometryczne PMT

- sondowania BDP [39]
- badanie modelowe przepływu wód

Z wymienionych badań dla dwóch zasadniczych etapów [41, 42] wykonano wierceń rurowanych z łądu i wody 136 szt. oraz sondowań CPT i CPTU 75 szt. Inne badania wykonano w mniejszej ilości. Najgłębszy odwiert sięgał 70 m poniżej powierzchni terenu. Podczas wierceń pomiary zwierciadła wody gruntowej i pobieranie prób gruntu wykonywano zgodnie z normą [47].

Badania laboratoryjne obejmowały ustalenie fizycznych i mechanicznych właściwości gruntów ze szczególnym uwzględnieniem uziarnienia, ponieważ decyduje ono o przepuszczalności gruntu, ponadto zbadano adhezję [35] i wykonano test abrazyjności [33] oraz badania mineralogiczne. Wody poddano analizie chemicznej, poza tym wykonano badania gruntów na zawartość węglowodorów gazowych.

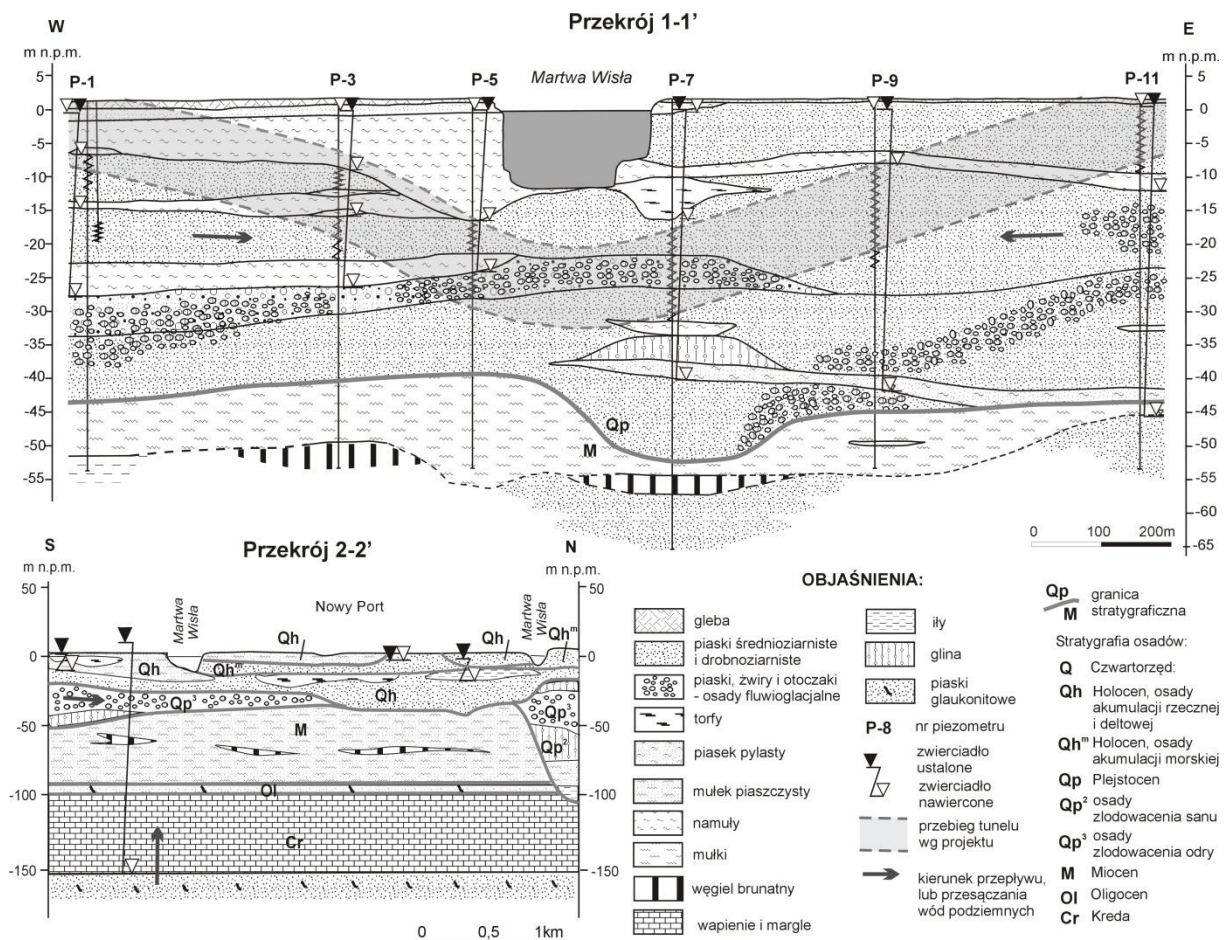


Rys. 1. Lokalizacja tunelu

Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne

Tunel pod Martwą Wisłą przebiegać będzie w obrębie czwartorzędowego poziomu wodonośnego Żuław Gdańskich (rys. 2). Holocenijskie osady tej części delty Wisły składają się głównie z drobnoziarnistych piasków rzecznych, mułków (frakcja pylasta) i ilów z domieszką szczątków organicznych, namułów organiczno-mineralnych oraz torfów. Pod serią

napływową lokalnie występują morskie piaski litorynowe [19, 20]. W obrębie plejstocenu najlepiej zachowane są cykle sedimentacyjne zlodowacenia odry, reprezentowane przez gliny zwałowe oraz serię osadów wodnolodowcowych [19]. Czwartorzędowa warstwa wodonośna zbudowana jest zatem z piaszczysto-żwirowych serii wodnolodowcowych i rzecznych oraz przepuszczalnych osadów holocenu należących do serii deltowej, a bliżej zatoki do holocenijskich piasków morskich. Średnia miąższość tego wodonośnego kompleksu piaszczystego wynosi 40 m [9]. Wody podziemne stwierdza się również w zalegających powyżej holocenijskich namułach i torfach. W warunkach naturalnych wody warstw plejstocenijskich zasilają wody gruntowe holocenijskiej serii deltowej, taki układ ciśnień obserwowany jest też obecnie [13]. Należy podkreślić, że w warunkach naturalnych obszar Żuław Wiślanych był terenem podmokłym, częściowo zalanym wodą, odmienna aktualnie sytuacja związana jest z eksploatacją wód podziemnych i melioracją tego deltowego obszaru [20].



Rys. 2 Schematyczne przekroje hydrogeologiczne

1-1' na podstawie dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [41], 2-2' na podstawie [19]

Na Żuławach Gdańskich osady czwartorzędu zalegają na osadach miocenu lub bezpośrednio na wapnisto-marglistych osadach kredy górnej (rys. 2). Najstarsze serie plejstoceny, związane z akumulacją zlodowacenia sanu, nie mają ciągłego rozprzestrzenienia i reprezentowane są przez szarą glinę zwałową, ility i mułki zastoiskowe [19]. Osady neogenu i paleogenu reprezentowane są tu przez oligoceny piaski i mułki piaszczyste z glaukonitem o niewielkiej miąższości sięgającej maksymalnie 5 m oraz przez mioceńskie piaski i mułki i ility z wkładkami węgla brunatnego [19]. Strop węglanowej serii osadów kredy górnej (kampanu i mastrychtu) występuje na Żuławach Gdańskich na rzędnych około -100 m n.p.m. (rys. 2), natomiast na rzędnych -150 m n.p.m. zalegają piaski glaukonitowe koniak i santonu, tworzące gdański zbiornik artezyjski [26].

W warunkach naturalnych, przed intensywną eksploatacją wód podziemnych w rejonie Gdańska, wody poziomu kredowego ze względu na swój artezyjski charakter i stabilizację zwierciadła wody kilkanaście metrów powyżej poziomu terenu, zasilały ascenzyjnie poziom plejstoceny [9, 26].

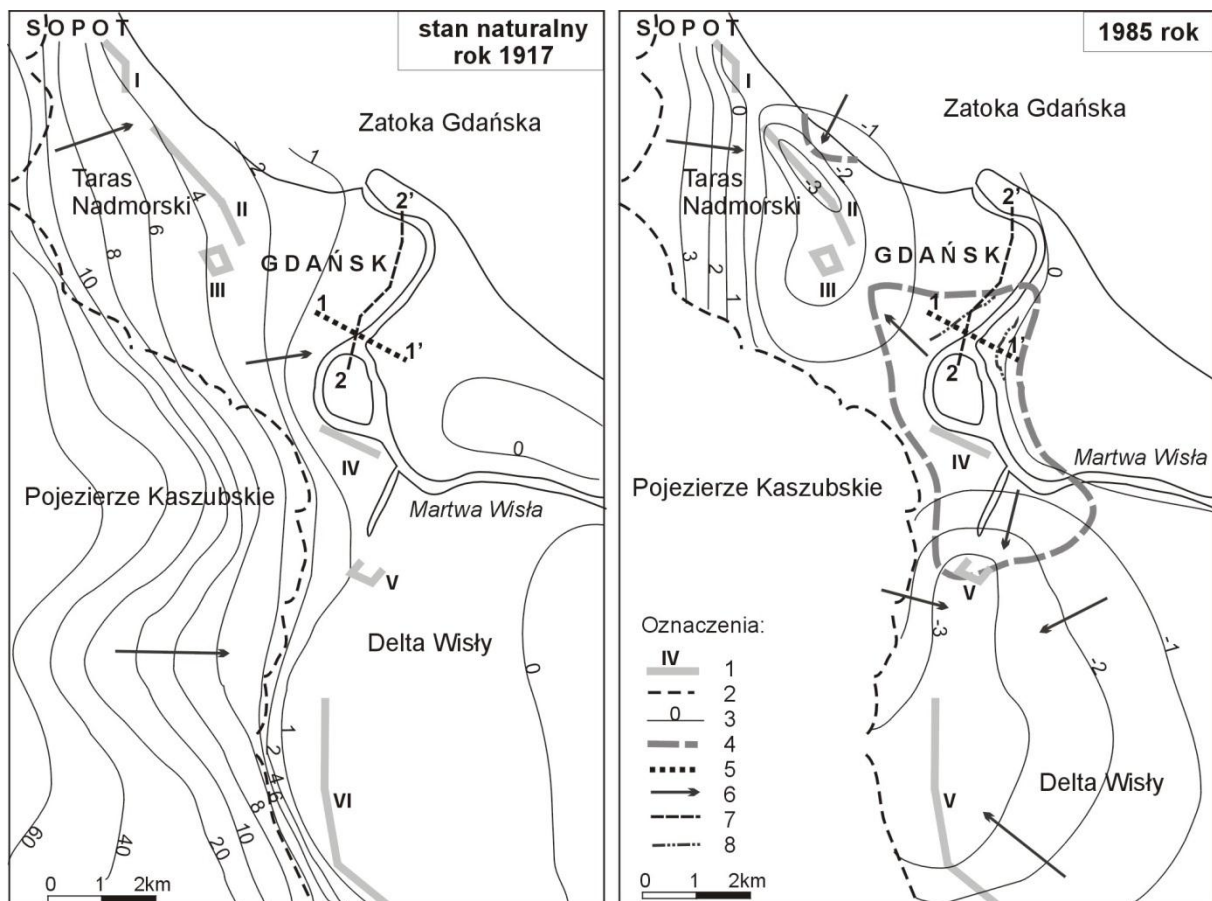
Zwierciadło wód poziomu czwartorzędowego obniża się postępując od krawędzi wysoczyzny w kierunku brzegu morza (rys. 3). Istotne znaczenie ma fakt, że w linii brzegowej obserwowano pierwotnie położenie zwierciadła wody około 2 m n.p.m. świadczący o tym, że drenaż tych wód odbywał się w odległości kilku kilometrów od brzegu w głąb zatoki [9].

Zagrożenia hydrogeologiczne związane z realizacją tunelu

Istotnym czynnikiem wpływającym na kształtowanie reżimu przepływu wód podziemnych na analizowanym obszarze jest Martwa Wisła. Wyniki obserwacji wahań zwierciadła wody w piezometrach, przedstawione w Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [41], wykazały bezpośredni wpływ stanów wody w rzece na położenie zwierciadła wody w czwartorzędowej warstwie wodonośnej. Silny wpływ rzeki, stabilizujący zwierciadło wody podczas próbnych pompowań, stwierdzano nawet w piezometrach odległych o kilkaset metrów od brzegu. Ten niemal bezpośredni kontakt między warstwą wodonośną i Martwą Wisłą, przyczynił się w latach 80. XX wieku znacznej degradacji zasobów wód podziemnych. W skutek intensywnej eksploatacji, doszło do intruzji zasolonych wód Martwej Wisły i Zatoki Gdańskiej do czwartorzędowej warstwy wodonośnej [8, 10, 11]. Do lat 60. pobór wód z poziomu czwartorzędowego nie przekraczał 1000 m³/h, natomiast w latach 80. wzrósł do ponad 4500 m³/h, w efekcie doszło do pogłębienia i rozprzestrzenienia regionalnego leja

depresji (rys. 3). Obniżenie zwierciadła wody spowodowało zmianę kierunku przepływu i do warstwy wodonośnej napłynęły zasolone wody Martwej Wisły. Zawartość jonu chlorkowego w rejonie Starego Miasta przekroczyła 300 mg/dm^3 , a na ujęciu Grodza Kamienna, wynosiła ponad 2000 mg/dm^3 [24]. Pod koniec lat 90., gdy eksploatacja ustabilizowała się na poziomie $1500 \text{ m}^3/\text{h}$, zaobserwowano stopniowe zmniejszanie koncentracji jonu chlorkowego. Tempo wysładzania wód okazało się szybsze niż można było oczekiwać [12]. Na rys. 3 przedstawiono aktualny zasięg zasolenia wód podziemnych na obszarze budowy tunelu, według badań prowadzonych w 2010 roku [41] zasolenie dotyczy kilkuset metrowego pasa wzdłuż biegu Martwej Wisły. W piezometrach położonych najbliżej brzegu rzeki stwierdzano stężenia chlorków nawet powyżej 3000 mg/dm^3 , jest to dowodem na niemal bezpośredni kontakt wód podziemnych z zasolonymi wodami Martwej Wisły. Zjawiska sztormowe i w ich efekcie tworząca się cofka, powodują, że stany wody w Martwej Wiśle wahają się w szerokim zakresie od $-0,93 \text{ m n.p.m.}$ do $+1,37 \text{ m n.p.m.}$ [41].

Proces odnawiania zasobów trwa nadal, ale może zostać zahamowany przez ponowny wzrost eksploatacji lub ewentualne odwodnienia. Według założeń projektowych wykonanie tunelu metodą TBM pozwoli uniknąć odwodnień. Nie ma zatem zagrożeń ilościowych dla zasobów wód podziemnych w sąsiedztwie inwestycji. Jedyne zagrożenia wynikające z budowy tunelu, to zagrożenia dla jakości wód. Mogą być one związane z wprowadzeniem zanieczyszczeń do warstwy wodonośnej lub z ewentualnymi – nieplanowanymi odwodnieniami, a co za tym idzie z intruzją zasolonych wód Martwej Wisły. Ponieważ tunel znajdzie się w obrębie Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 112 (Zbiornik Żuławy Gdańskie) od momentu rozpoczęcia prac ziemnych, oprócz prowadzonych obserwacji położenia zwierciadła wody, powinien zostać założony monitoring jakości wody. Pozwoli on na kontrolę, czy strefa zasolenia nie przesuwają się w kierunku eksploatowanych ujęć miejskich oraz czy do warstwy wodonośnej nie przedostały się niepożądane zanieczyszczenia. Realizacja budowy tunelu w wariantcie drążenia maszyną TBM, jest stosunkowo korzystna dla wód podziemnych, gdyż odkrycie poziomego wodonośnego jest w tym wariantcie mniejsze niż w przypadku tunelu wykonywanego w wykopie otwartym czy zatapianego, w związku z tym jest mniejsze zagrożenie bezpośredniego wprowadzenia zanieczyszczeń technicznych (np. paliwo maszyn budowlanych) związanych z budową do warstwy wodonośnej.



Rys. 3. Schematyczne mapy hydroizohips czwartorzędowego poziomu wodonośnego na podst. [11, 32]

1 – ujęcia wód podziemnych: I – Bitwy pod Płowcami, II – Czarny Dwór, III – Zaspą, IV – Stocznia, V – Grodza Kamienna, VI – Lipce, 2 - krawędź wysoczyzny Pojezierza Kaszubskiego, 3 - hydroizohipsy m n.p.m., 4 – zasięg zasolenia wód podziemnych $> 300 \text{ mg Cl/dm}^3$, 5 – orientacyjna linia przebiegu tunelu pod Martwą Wisłą, linia przekroju 1-1', 6 – kierunek przepływu wód podziemnych, 7 - linia przekroju 2-2', 8 – zasięg zasolenia wód podziemnych $> 300 \text{ mg Cl/dm}^3$ w 2010 roku [41]

Jak napisano wcześniej w warunkach naturalnych miało miejsce przesączanie ascenzyjne z piętra kredowego do czwartorzędowego, a także z warstwy plejstoceniowej do holoceniowej. W efekcie intensywnej eksploatacji, w piętrze kredowym zanikły warunki artezyjskie. Spowodowało to odwrócenie kierunku pionowego przesączania na descenzyjny, z pięter młodszych do starszych. Aktualnie, w związku ze znaczną redukcją poboru, obserwuje się podnoszenie powierzchni piezometrycznej w piętrze kredowym, a także odnawianie zasobów poziomu czwartorzędowego. Wyniki pomiarów, przedstawione we wspomnianej wyżej Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej [41] wskazują, że zwierciadła wody piętra kredowego stabilizują aktualnie 2 do 8 metrów ponad poziom terenu, natomiast

w poziomie czwartorzędowym zwierciadła stabilizują na rzędnych od 0 do 0,6 m n.p.m. Podobne wartości w zakresie -0,1 do 0,6 m n.p.m. odnotowuje się w prowadzonych od listopada 2011 cotygodniowych obserwacjach piezometrów, zlokalizowanych w sąsiedztwie tunelu w czwartorzędowej warstwie wodonośnej. Warunki hydrodynamiczne zbliżają się zatem do naturalnych, z pionowym ascenzyjnym przesączaniem wód z pięter starszych do młodszych. Prędkości tego przesączania są niewielkie (< 1 m/rok), należy jednak zastanowić się, czy opisane powyżej zjawiska mogą mieć wpływ na osiadanie lub wypór budowli. Obserwowany aktualnie proces odnawiania zasobów, prawdopodobnie będzie postępował, należy więc oczekiwać, że podniesie się poziom wód w osadach czwartorzędu oraz ciśnienie piezometryczne w piętrze kredowym. Podczas realizacji tunelu, nie można wykluczyć natknięcia się na niezinventaryzowane zlikwidowane otwory kredowe, których wykonano wiele w połowie XX wieku, głównie na cele przemysłowe. Otwory te po znacznym zdepresjonowaniu ciśnień piezometrycznych poziomu kredowego były likwidowane, nie zawsze w sposób prawidłowy. Jeżeli tunel byłby wykonywany w wykopie otwartym, napotkanie takiego niepoprawnie zlikwidowanego otworu, mogłoby spowodować poważne zagrożenia budowlane. Artezyjskie ciśnienie spowodowałoby wypływ wód piętra kredowego, a ze względu na drobne uziarnienie pisaków kredowych, mogłoby nawet dojść do zjawiska „kurzawki”.

Obliczenia modelowe przepływu wód podziemnych [5] wykazały, że tunel w najmniejszym stopniu nie zaznacza się w bilansie przepływu wód, a na układ hydroizohips wpływa bardzo nieznacznie, powodując wygięcie hydroizohips o zaledwie 3 cm. Podobne wyniki uzyskano w innych badaniach modelowych wykonanych przy założeniu, że kierunek przepływu wód podziemnych jest równoległy do Martwej Wisły [45]. Parametry filtracyjne warstwy wodonośnej są zatem wystarczające dla wyeliminowania zmian poziomu zwierciadła wód podziemnych, jakie mogłyby powstać w wyniku budowy tunelu. Wartości współczynnika filtracji są wysokie i wahają się w granicach $1,1 \cdot 10^{-4} - 0,003$ m/s, w zależności od zastosowanej metody obliczeń. Zgodnie z podziałem Pazdro i Kozerskiego [21] otwory wodonośne można zaklasyfikować jako dobrze i bardzo dobrze przepuszczalne. Najlepsze parametry filtracyjne dotyczą plejstoceniowego przewarstwienia żwirów wodnolodowcowych występujących na głębokości około 30 m, czyli w miejscu, gdzie tunel będzie przebiegał bezpośrednio pod Martwą Wisłą.

Warunki geologiczno inżynierskie i parametry geotechniczne

W ramach dokumentacji [41] wydzielono następujące warstwy geotechniczne. Poniżej podaje się ich opis, przy czym I_D i I_L są to wartości charakterystyczne.

- Warstwa I - torfy i miękkoplastyczne namuły organiczne
- Warstwa II - gliny próchniczne i ropy próchniczne, miękkoplastyczne i plastyczne, $I_L = 0,51$
- Warstwa III - piaski drobne i średnie, luźne, $I_D = 0,27$
- Warstwa IVa - piaski drobne i lokalnie pylaste, średnio zagęszczone, $I_D = 0,49$
- Warstwa IVb - piaski drobne lokalnie pylaste, zagęszczone i średnio zagęszczone, $I_D = 0,68$
- Warstwa IVc - piaski drobne bardzo zagęszczone, $I_D = 0,89$
- Warstwa Va - piaski średnie i grube, średnio zagęszczone, $I_D = 0,51$
- Warstwa Vb - piaski średnie i grube, zagęszczone, $I_D = 0,69$
- Warstwa Vc - piaski średnie i grube, bardzo zagęszczone, $I_D = 0,85$
- Warstwa VIa - ropy przewarstwione pyłami, plastyczne, $I_L = 0,29$
- Warstwa VIb - ropy przewarstwione pyłami, twardoplastyczne, $I_L = 0,11$
- Warstwa VII - pospółki i żwiry, bardzo zagęszczone, $I_D = 0,82$
- Warstwa VIII - pyły półzwarte, $I_L = 0,00$
- Warstwa IX - gliny piaszczyste półzwarte, $I_L = 0,00$
- Warstwa Xa - ropy lokalnie gliny pylaste zwarte, twardoplastyczne, $I_L = 0,1$
- Warstwa Xb - ropy i gliny pylaste zwarte, półzwarte, $I_L = 0,00$

Warstwa od I do VI b według [41] są to grunty holoceniowe, warstwy VII do IX plejstoceniowe, a Xa do Xb mioceniowe.

Przedstawiony w dokumentacji [41] podział na warstwy jest bardzo szczegółowy i dla celów projektowych w zależności od zagadnień jakie się rozpatruje można wybrane warstwy łączyć ustalając do obliczeń, zgodnie z zasadami, parametry geotechniczne jako „ostrożnie szacowane” [34], dotyczy do szczególnie gruntów niespoistych.

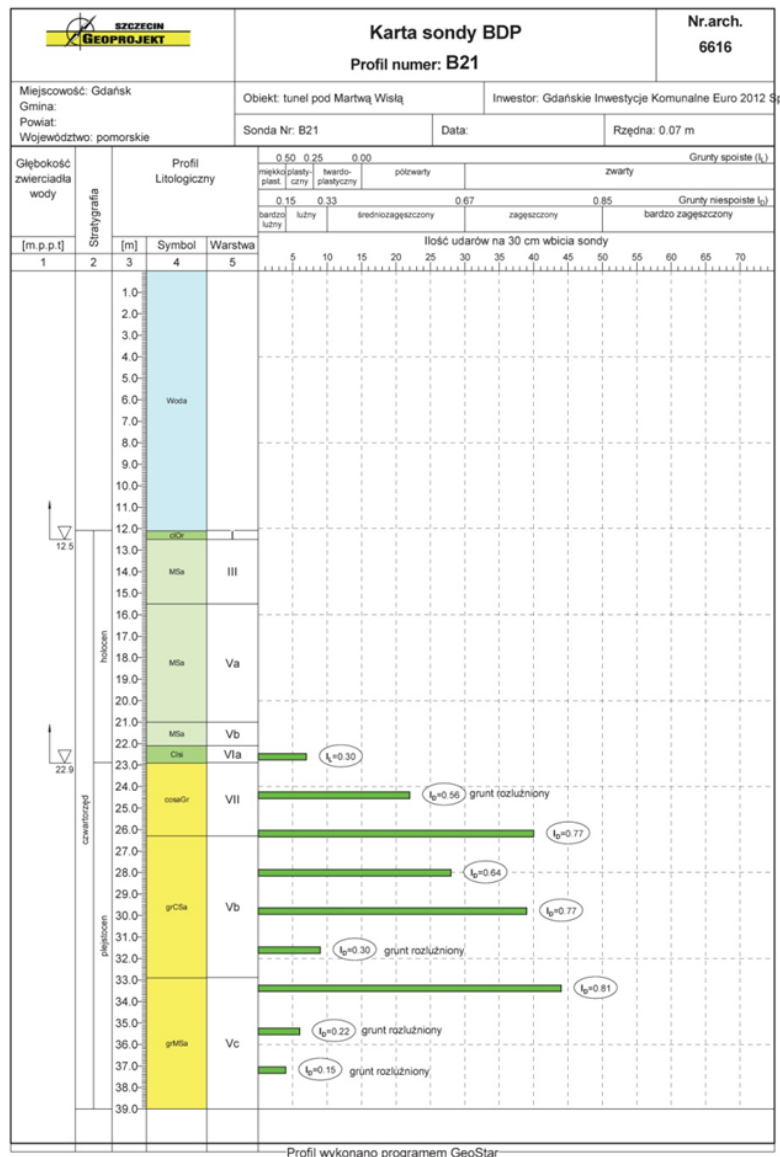
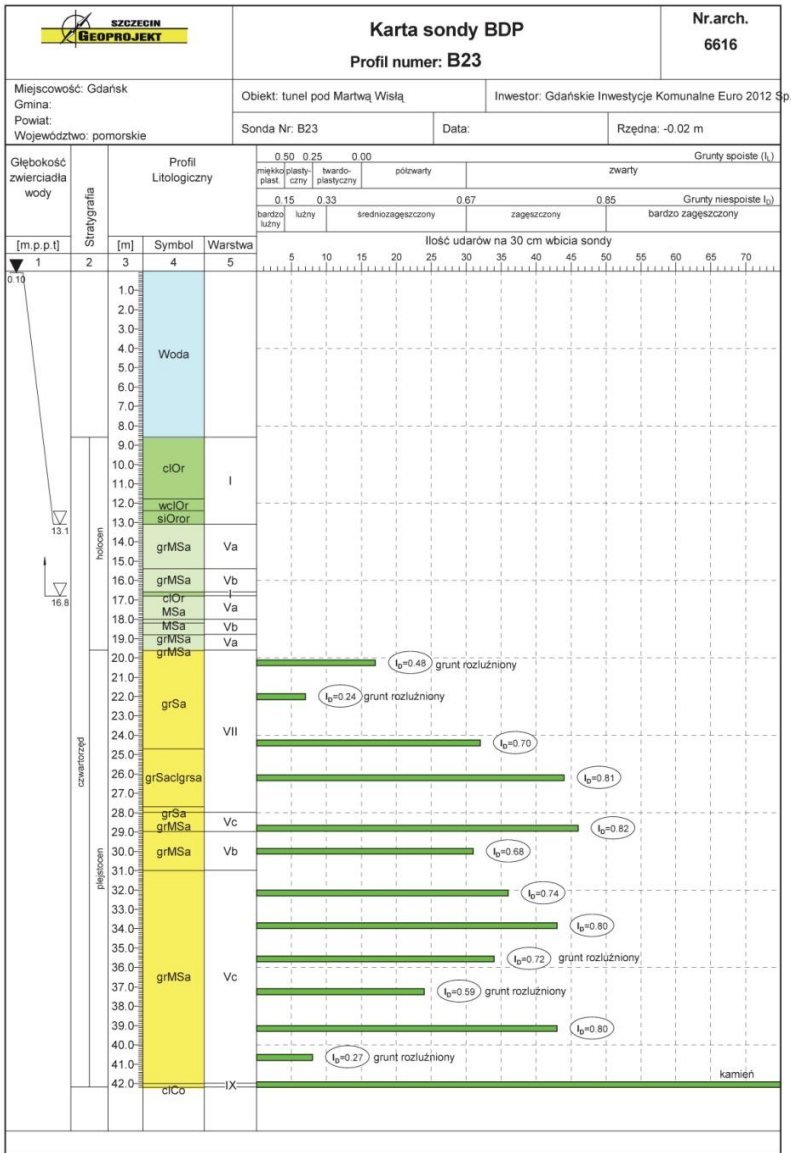
Przy drążeniu tunelu metodą TBM istotną rolę odgrywa adhezja i abrazja gruntów. Adhezyjność gruntów zależy od wskaźnika plastyczności i wskaźnika konsystencji [35]. Z przeprowadzonych badań [41] wynika, że ropy charakteryzują się wysoką adhezyjnością, natomiast namuły umiarkowaną. Test abrazyjności LCPC [33] wykazał, że piaski nie oznaczały się ścieralnością, lub ich ścieralność była niewielka, natomiast bardzo duża ścieralność dotyczy pospółek i żwirów zalegających w rejonie największego przegłębienia tunelu pod

Martwą Wisłą, związane to jest z ich dużym zagęszczeniem, wymiarem ziaren i zawartością kwarcu.

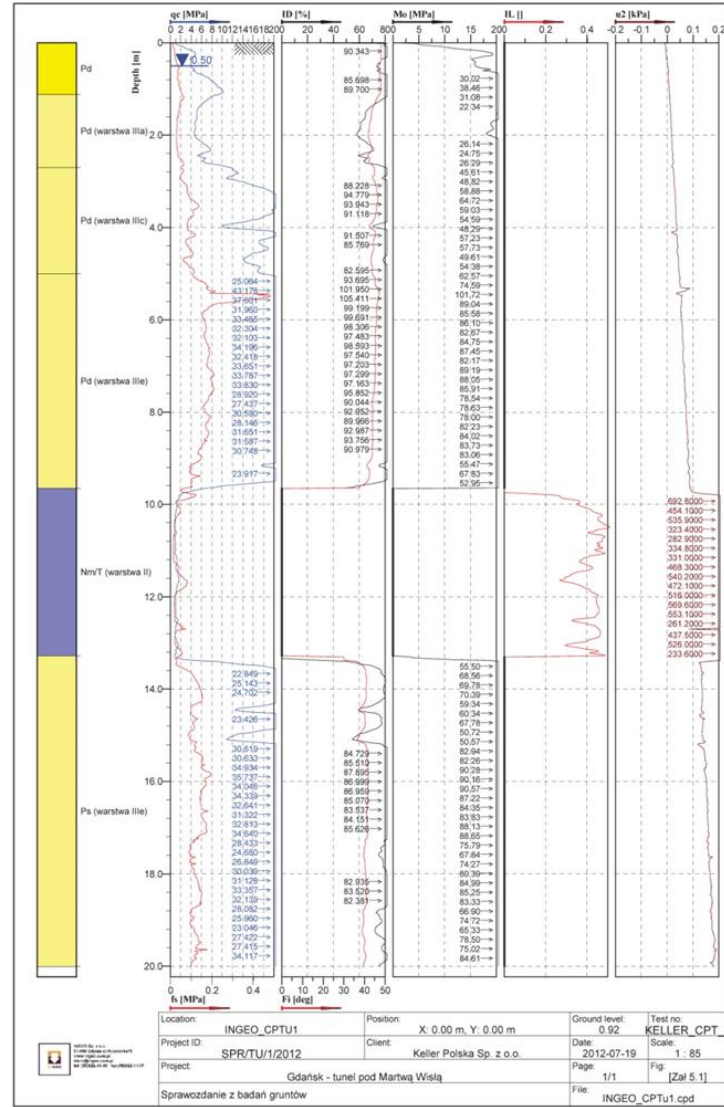
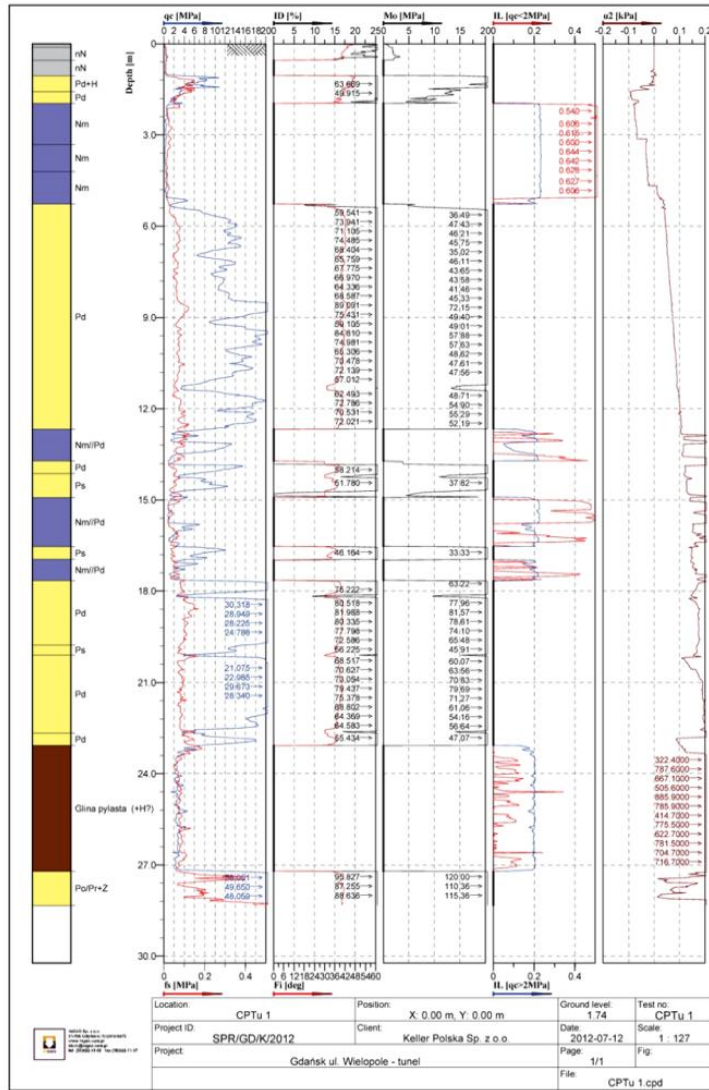
Układ warstw na drodze drążenia tunelu przedstawiono na rys. 4 [41]. Parametry istotne dla celów projektowych zawiera tabela „Parametry geotechniczne” rys. 5 [41]. Zagęszczenie gruntu poniżej dna rzeki zbadano sondą BDP [39]. Wybrane wyniki przedstawiono na rys. 6 [41]. Zróżnicowanie geotechniczne na całym dokumentowanym terenie szczególnie w obrębie wykopu otwartego najlepiej obrazują wybrane sondowania CPT rys. 7 [51]. Widać tu duże zmiany parametru „ q_c ” w zależności od rodzaju gruntów i głębokości ich występowania. Opór stożka „ q_c ” dobrze koreluje [29, 30, 38, 47] zarówno z parametrami geotechnicznymi wytrzymałości na ścinanie jak też ściśliwości, stąd duża przydatność wyników tych badań w przedmiotowym przypadku. Przy interpretacji wyników sondowań CPT korzystano również z bogatych doświadczeń regionalnych, gdyż jak wiadomo Gdańsk był pierwszym ośrodkiem w Polsce, który powszechnie zaczął stosować sondowania CPT już w latach „70” ubiegłego wieku. Należy też zwrócić uwagę na wyniki badań kontrolnych namulów organicznych rys. 8 i 9 [52], które obok warunków wodnych mają decydujące znaczenie przy projektowaniu części tunelu znajdującego się w wykopie otwartym. Wyniki powyższe potwierdzają wcześniejsze badania wykonane w ramach dokumentacji [42].

Rys. 4. Przekrój geologiczno-inżynierski [41]

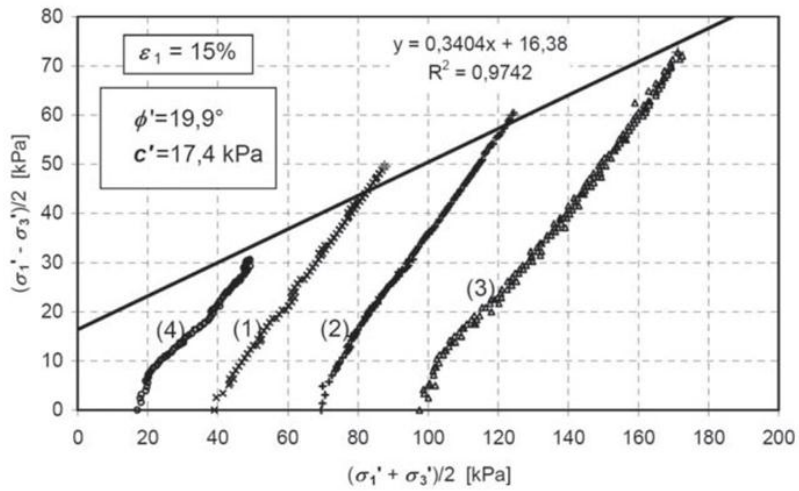
Rys. 5. Parametry geotechniczne [41]



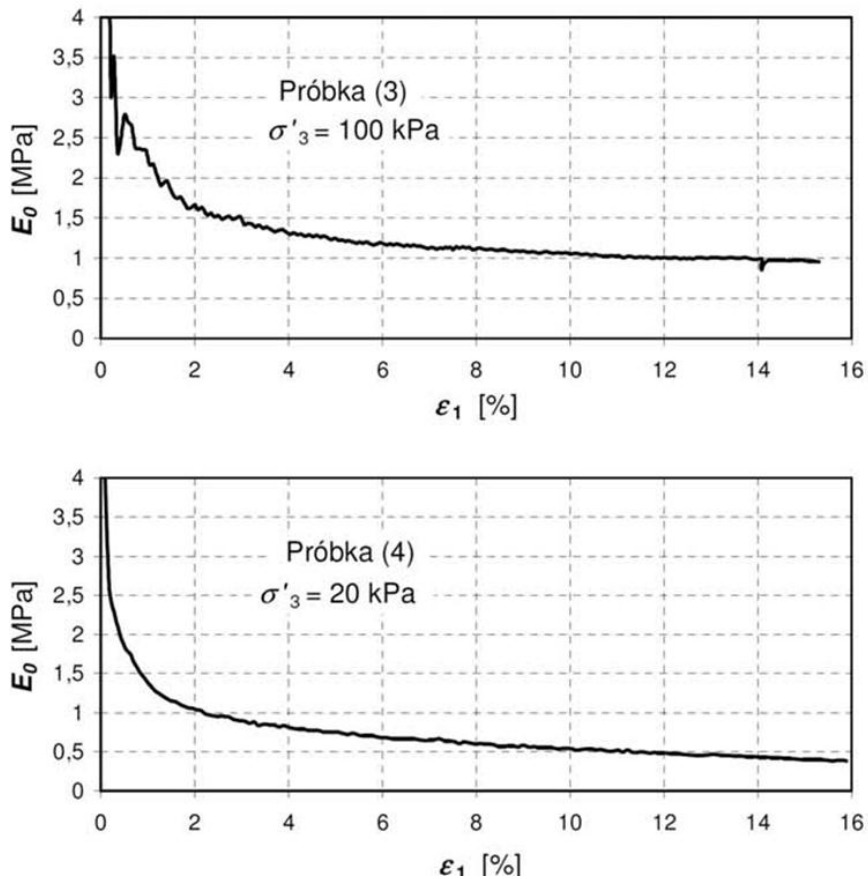
Rys. 6. Karty sondy BDP [41]



Rys. 7. Profil sondowania CPTu [51]



Rys. 8. Ścieżka naprężenia i proste oporów ścinania otrzymane z badań wszystkich czterech próbek namułu [52]



Rys. 9. Wykresy modułów odkształcenia pierwotnego E_0 namułów otrzymane z badań trójosiowych [52]

Podsumowanie

Warunki hydrogeologiczne, geologiczno–inżynierskie i geotechniczne są skomplikowane, typowe dla delty Wisły, gdzie na przemian występują grunty słabo-nośne i nośne, zostały one w ramach opracowań [41, 42, 50, 51, 52] oraz badań modelowych [5, 45] wszechstronnie zbadane i udokumentowane. Przy budowie tunelu metodą TBM w warunkach występowania wody gruntowej uziarnienie gruntów i z tym związana przepuszczalność mają decydujące znaczenie [3, 14, 15, 23, 25]. Wysoki współczynnik filtracji 0,003 m/s w warunkach ruchu nieustalonego spowodowanego wpływem rzeki i z tym związanymi wahaniami lustra wody, ponadto ciśnienie słupa wody dodatkowo komplikują sytuację. W związku z powyższym nie do uniknięcia jest prawdopodobnie zastosowanie w niektórych przypadkach metody zamrażania gruntów [16, 27]. Rozważenia wymaga też potrzeba zastosowania w czasie budowy w dnie Martwej Wisły warstwy dociążającej nad tunelem w celu uniknięcia przebiccia hydraulicznego [14].

Biorąc pod uwagę rodzaj inwestycji, warunki geologiczno–inżynierskie i geotechniczne mamy tu do czynienia z typowym przykładem budowy, w którym zgodnie z Eurokodem 7 [7] powinno się w trakcie realizacji stosować „metodę obserwacyjną”.

Niezależnie od powyższego, jak wskazują doświadczenia światowe [2, 14, 23, 28] metoda TBM sprawdza się w każdych warunkach gruntowo-wodnych zarówno pod względem technicznym jak też ekonomicznym i notuje gwałtowny wzrost zastosowania, przy czym jednocześnie ogranicza budowę innego rodzaju dużych przepraw, w tym tuneli zatapianych, uważanych przy uwzględnieniu wszystkich aspektów ekonomicznych na ogół za mniej korzystne, związane to jest przede wszystkim z mniejszą ingerencją w infrastrukturę.

Najbardziej charakterystyczną cechą warunków hydrogeologicznych na obszarze budowy tunelu, jest występowanie bardzo płytko wód podziemnych, w miększej warstwie wodonośnej o dobrych parametrach filtracyjnych i niewielkim spadku zwierciadła wody, pozostających w niemal bezpośrednim kontakcie z wodami Martwej Wisły. W przypadku omawianego tunelu pod Martwą Wisłą, zastosowanie metody TBM pozwoli uniknąć odwodnień budowlanych, które miałyby niekorzystny wpływ na zasoby i jakość wód piętra czwartorzędowego i spowodowałyby dodatkowe osiadanie terenu i obiektów w obrębie leja depresyjnego. Wykonanie tunelu drążonego jest również korzystniejsze od budowy tunelu w wykopie otwartym czy zatapianego, ze względu na najmniejszą ingerencję w warstwę wodonośną i jej odkrycie, co mogłoby prowadzić do bezpośredniego zanieczyszczenia wód



podziemnych. Na analizowanym terenie mogą znajdować się niezinventaryzowane, zlikwidowane (nie zawsze w sposób poprawny) otwory kredowe. Jeżeli tunel byłby wykonywany w wykopie otwartym, napotkanie takiego niepoprawnie zlikwidowanego otworu, mogłoby spowodować poważne zagrożenia budowlane. Artezyjskie ciśnienie spowodowałoby wypływ wód piętra kredowego, a ze względu na drobne uziarnienie pisaków kredowych, mogłoby nawet dojść do zjawiska „kurzawki”.

Piśmiennictwo

- [1] Bohdziewicz L.: Rejonizacja geologiczno – inżynierska Trójmiasta. Przegląd Geologiczny nr 6/1958
- [2] Czaja P.: Tunele – współczesne potrzeby cywilizacyjne i technologiczne możliwości ich zaspokojenia. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne lipiec/ sierpień 2012
- [3] DAUB. Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen. Recommendations for selecting and evaluating tunnel boring machines. Tunnel 5/97.
- [4] Jamiołkowski J., Wolski W.: Metody wyznaczania współczynnika parcia spoczynkowego. Archiwum Hydrotechniki. Tom XXXIII, Zeszyt 3, 1986 r.
- [5] Jaworska-Szulc B.: Analiza modelowa oddziaływania projektowanego tunelu pod Martwą Wisłą na wody podziemne, Inżynieria Morska i Geotechnika 2011
- [6] Kędracki M.: Geotechnika metod bezwykopowych. Politechnika Łódzka 2008 r.
- [7] Kłosiński B., Pieczyrak J.: Norma EN 1997 Eurokod 7 „ Projektowanie geotechniczne” Inżynieria Morska i Geotechnika 3/2009.
- [8] Kozerski B., Kwaterkiewicz A.: Strefowość zasolenia wód podziemnych a ich dynamika na obszarze delty Wisły. Archiwum Hydrotechniki, 31 (3) 1984.
- [9] Kozerski B.: Warunki występowania i eksploatacja wód podziemnych w gdańskim systemie wodonośnym. IV Ogólnopolskie Sympozjum, Aktualne problemy Hydrogeologii. Gdańsk 1988.
- [10] Kozerski B., Kwaterkiewicz A., Sadurski A.: Zagrożenia wód podziemnych strefy brzegowej morza w rejonie Gdańska. W Służbie Polskiej Geologii. Wydawnictwa AGH, Kraków 1992.
- [11] Kozerski B., Kwaterkiewicz A.: O zmianach zasolenia wód podziemnych czwartorzędu Gdańska. Współczesne Problemy Hydrogeologii tom VIII, WINDJ. Wojewoda, Wrocław 1997.

- [12] Kozerski B., Jaworska-Szulc B., Pruszkowska M., Przewłócka M.: Wyśladzanie się wód podziemnych w piętrze czwartorzędowym Gdańska jako rezultat zmniejszonego poboru. Współczesne Problemy Hydrogeologii, Toruń 2005.
- [13] Kozerski B., Jaworska-Szulc B., Pruszkowska M., Przewłócka M.: Gdański system wodonośny, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2007.
- [14] Kretschmer, Fliegner: „Untertassertunnel in offener und geschlossener Bauweise” Ernst&Sohn. Berlin 1987.
- [15] Langmaack L.: Konditionierung des Ausbruchsmaterials zur Stutzung der Ortsbrust.
- [16] Nagelsdiek S., Zublin Ed.: Vereisungen im innerstadtischen Tiefbau. Technische Universitat Munchen. Zentrum Geotechnik. Munchen 2010.
- [17] Marchetti S.: In situ Tests By Flat Dilatometer. Journal of the Geotechnical Engineering Division G 3 1980.
- [18] Mazurkiewicz B.: Przeprowa tunelowa pod Martwą Wisłą w Gdańsku, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2010
- [19] Mojski J.E.: Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski arkusz Gdańsk (27) 1:50 000. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1979.
- [20] Pazdro Z.: Wody podziemne regionu gdańskiego. Przegląd geologiczny 6(63), 1958.
- [21] Pazdro Z., Kozerski B.: Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1990.
- [22] Pisarczyk S.: Gruntoznawstwo inżynierskie. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa 2001.
- [23] Prinz H., Straus R.: Abriss der Ingenieurgeologie. 4 Auflage. Elsevier. Spektrum, 2006.
- [24] Przewłócka M.: Zmiany zasolenia na ujęciu „Czarny Dwór” w świetle eksploatacji czwartorzędowego poziomu wodonośnego. Współczesne Problemy Hydrogeologii tom XI, 2003.
- [25] Rehm U. Schwanau. Maschinelles Tunnelvortrieb –Neueste Tunnelvortriebstechniken. Tiefbau 11/2001
- [26] Sadurski A.: Warunki hydrogeologiczne górnokredowego basenu artezyjskiego w rejonie Gdańska. Rozwój hydrogeologicznych regionalnych badań w Polsce, Warszawa 1983.

- [27] Schwarz W., Schmitz S.: Bergung von Schildvortriebsmaschinen durch Bodenvereisung nach Wassereintrüben in den Vortriebsbereich. Technische Universität München. Zentrum Geotechnik. München 2010.
- [28] Siemińska-Lewandowska A., Grodecki W.: Tunele nie tylko komunikacyjne. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, lipiec/sierpień 2012.
- [29] Sikora Z.: Sondowanie statyczne, metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2006.
- [30] Świeca M.: Zasady projektowania geotechnicznego w nawiązaniu do Eurokodu 7 z zastosowaniem programów numerycznych. ITB Warszawa 2011.
- [31] Świst E.: Hydrotechniczne i komunikacyjne budowle podziemne. Wybrane zagadnienia projektowania i budowy. Wyd. STO. Bielsko –Biała 2006.
- [32] Thiem G.: Expertise on water supply system development in Gdańsk, with two sketches and one plan. Gdansk University of Technology, Gdansk, 1917
- [33] Thuro K., Singer J., Kasling H., Bauer M.: Soil Abrasivity Assessment Using the LCPC Testing Device. Felsbau 24 (2006) no 6.
- [34] Wysokiński L., Kotlicki W., Godlewski T.: Projektowanie geotechniczne według Eurokodu 7. Poradnik. JTB. Warszawa 2011.
- [35] Zimnik A. R, van Baalen L.R., Verhoef P.N.W, Ngan- Tillard D.J.M.: The Adherence of clay to steel surfaces. In: Proc. GeoEng 2000 and International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, 19-24 November 2000, CD –Rom (Melbourne, Australia), 2000, p,1-6. ISBN: 1-58716-068-04

Materiały archiwalne, opracowania niepublikowane, instrukcje, normy DIN, EN, PN

- [36] Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne. (PN –EN-1997-1:2007)
- [37] Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2. Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego (PN –EN-1997-2:2007)
- [38] DIN 4094-1. Baugrund. Felduntersuchungen. Teil 1. Drucksondierungen (Juni 2002).
- [39] DIN 4094-2. Baugrund. Felduntersuchungen. Teil 2. Bohrlochrammsondierung (Mai 2003).
- [40] DIN 4094-5. Baugrund. Felduntersuchungen. Teil 5. Bohrlochaufweitungsversuche (Juni 2001).



- [41] Dokumentacja geologiczno–inżynierska dla ustalenia geotechnicznych warunków posadowienia projektowanego tunelu pod Martwa Wisłą, opracowana przez „Geoprojekt – Szczecin” w październiku 2010 roku.
- [42] Dokumentacja geologiczno–inżynierska (zbiorcza) projektowanej przeprawy przez Martwa Wisłę łączącą ulicę Marynarki Polskiej z Sucharskiego, opracowana przez Geoprojekt Gdańsk w 2007 roku, na podstawie dokumentacji geologiczno – inżynierskich opracowanych przez „Transprojekt Poznań”, „Petrobaltic Gdańsk” oraz „Geoprojekt Gdańsk” w 2000 roku (obecnie nazwę trasa Sucharskiego i Trasa Słowackiego należy uważać za równorzędną).
- [43] ITB. Instrukcje, Wytyczne, Poradniki 428/2007. Komentarz do nowych norm klasyfikacji gruntów. Warszawa 2007.
- [44] Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Część I i II. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych. Warszawa 1998.
- [45] Model hydrodynamiki opływu wanny żelbetowej na odcinku dojazdowym, w ciągu Trasy Słowackiego, do tunelu pod Martwą Wisłą – weryfikacja zasadności wykonania przepustów wody gruntowej (syfonów), GRANPOS Janusz Granatowicz, Sopot 2012.
- [46] PN–81/B-03020. Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednio budowli. Obliczenia statyczne i projektowane.
- [47] PN-B-04452/2002. Geotechnika. Badania polowe
- [48] PN-B-02479/1998. Geotechnika. Dokumentowanie geotechniczne. Zasady ogólne.
- [49] Projekt prac geologicznych dla określenia warunków geologiczno inżynierskich projektowanego tunelu pod Marta Wisłą w ciągu Trasy Sucharskiego w Gdańsku opracowany przez „Geoprojekt Gdańsk” Sp. z o o w 2009 roku, zatwierdzony przez Marszałka Województwa Pomorskiego.
- [50] Sprawozdanie z badań geotechnicznych wykonanych na terenie budowy zlokalizowanej przy ulicy Kujawskiej i Marynarki Polskiej w Gdańsku, wykonane przez „Geoteko” Warszawa w maju 2012 roku.
- [51] Sprawozdanie z uzupełniających badań geotechnicznych dla określenia warunków gruntowo-wodnych w rejonie budowy tunelu pod Martwa Wisłą – strona ulicy Kujawskiej i strona ul. Wielopole – inwestycji „ Połączenie Portu Lotniczego z Portem Morskim Gdańsk – Trasa Słowackiego, zadanie IV. Odcinek Węzeł Marynarki Polskiej – Węzeł Ku Ujściu w Gdańsku opracowane przez „INGEO” Gdynia, lipiec 2012).

[52] Sprawozdanie z badań laboratoryjnych namułu w aparacie trójosiowego ściskania opracowane przez Politechnikę Gdańską na zlecenie Keller Polska, w lipcu/sierpniu 2012 (dotyczy tunelu pod Martwą Wisłą).