

pertyz dotyczących bezpieczeństwa użytkowania obiektów w sytuacji wystąpienia awarii konstrukcji.

**BIBLIOGRAFIA**

[1] Bridgman P. W., *Studies in Large Flow and Fracture*, McGraw-Hill, New York, 1952  
 [2] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków  
 [3] PN-EN 1999-1-1:2007 Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych – Część 1-1: Reguły ogólne  
 [4] PN-EN 1990:2004 Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji  
 [5] Sedlacek G., Feldmann M., Kühn B., Tschickardt D., Höhler S., Müller C., Hensen W., Stranghöner N., Dahl W., Langenberg P., Münstermann S., Brozetti J., Raoul J., Pope R., Bijlaard F., *Commentary and Worked Examples to EN 1993-1-10 „Material toughness and through thickness properties” and other toughness oriented rules in EN 1993*, JRC Scientific and Technical Reports, European Commission Joint Research Centre, 2008  
 [6] Gurson A. L., *Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I – Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media*, *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transactions of the ASME*, 99, 1, 2–15, 1977  
 [7] Tvergaard V., *Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions*, *International Journal of Fracture*, 17, 4, 389–407, 1981  
 [8] Tvergaard V., Needleman A., *Analysis of The Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar*, *Acta Metallurgica*, 32, 1, 157–169, 1984  
 [9] Kossakowski P. G., *An Analysis of the Load-Carrying Capacity of Elements Subjected to Complex Stress States with a Focus on the*

*Microstructural Failure*, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10, 2, 15–39, 2010  
 [10] Kossakowski P. G., Trąmpczyński W., *Numeryczna symulacja zniszczenia stali S235JR z uwzględnieniem wpływu uszkodzeń mikrostrukturanych*, *Przegląd Mechaniczny*, 4, 15–21, 2011  
 [11] Kossakowski P. G., *Simulation of Ductile Fracture of S235JR Steel Using Computational Cells With Microstructurally-Based Length Scales*, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, artykuł przyjęty do druku w 2012  
 [12] Huber M.T., *Właściwa praca odkształcenia jako miara wytrzymałości materiału*, *Czasopismo Techniczne*, 22: 3, 80–81, 4, 49–50, 5, 61–62, 6, 80–81, Lwów, 1904  
 [13] Faleskog J., Gao X., Shih C. F., *Cell model for nonlinear fracture analysis – I. Micromechanics calibration*, *International Journal of Fracture*, 89, 4, 355–373, 1998  
 [14] Richelsen A. B., Tvergaard V., *Dilatant Plasticity or Upper Bound Estimates for Porous Ductile Solids*, *Acta Metallurgica et Materialia*, 42, 8, 2561–2577, 1994  
 [15] Zhang Z. L., Thaulow C., Ødegård J., *A Complete Gurson Model Approach for Ductile Fracture*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67, No. 2, 155–168, 2000  
 [16] PN-EN 10002-1:2004 *Metale. Próba rozciągania. Część 1: Metoda badania w temperaturze otoczenia*  
 [17] *Określenie struktury materiałów (pobrane z konstrukcji), analiza porównawcza z parametrami stali wzorcowej, Raport z badań w ramach projektu nr R04 007 01*, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2008.  
 [18] *Abaqus 6.10 Analysis User’s Manual*, Dassault Systèmes, 2010

# Badania korozyjności gruntów metodą elektrooporową pod projektowany gazociąg

Mgr inż. Katarzyna Stelmach, mgr inż. Mariusz Szczurek, P.P.B.i R.G. GEOSTANDARD Sp. z o.o.

## 1. Wprowadzenie

Wszystkie konstrukcje liniowe ułożone w gruncie narażone są na tzw. korozję ziemną, przez którą rozumie się korozję metali spowodowaną agresywnym oddziaływaniem gruntów.

W środowisku gruntowym korozja przebiega jako proces elektrochemiczny. O jej szybkości decyduje oporność elektryczna gruntu, zależna głównie od jego wilgotności i zasolenia. Wraz ze zmniejszaniem się oporności gruntu na skutek wzrostu wilgotności i zasolenia, wrasta jego agresywność korozyjna [5]. Jedną z metod pomiaru wielkości oporu właściwego gruntu jest metoda elektrooporowa, wykorzystująca zróżnicowanie ośrodka gruntowe-

go w polu stałego prądu elektrycznego. Znajomość oporu właściwego gruntu ułatwia działania w zakresie ochrony elektrochemicznej konstrukcji. Pomiary agresywności korozyjnej gruntu wykonywane na potrzeby projektowanych konstrukcji podziemnych mają istotne znaczenie przy podejmowaniu decyzji związanych z ewentualnymi zmianami w przebiegu trasy oraz doбором izolacyjnych pokryć ochronnych. Artykuł przedstawia wybrane wyniki z pomiarów agresywności gruntu z zastosowaniem metody elektrooporowej pod projektowany gazociąg relacji Szczecin – Gdańsk, stanowiący liniową instalację o zakładanych parametrach przesyłu gazu – średnicy rur DN 700 i maksymalnym ciśnieniu roboczym MOP 8,4 MPa.

Opisywane badania są kontynuacją pomiarów pod planowany gazociąg DN 700 PN 8,4 MPa relacji Szczecin – Lwówek [4].

## 2. Charakterystyka terenu badań

Gazociąg Szczecin – Gdańsk stanowić będzie kluczową rolę w przesyłce gazu pochodzącego z terminalu LNG (Liquefied Natural Gas), który powstanie w Świnoujściu. Jego trasa leży w województwie zachodniopomorskim i pomorskim wzdłuż istniejących gazociągów wysokiego ciśnienia DN 250 MOP 6,3 MPa relacji Karlino – Koszalin, DN 200 relacji Koszalin – Słupsk oraz DN 200/250 relacji Gdynia – Lębork o łącznej długości 204 km (rys. 1) [6].

Gazociąg przy przejściach przez tereny rolne i leśne będzie układany w wykopie otwartym, a w przypadku przekroczeń przeszkód terenowych przewiduje się przejście metodą podziemną (metodą przecisku lub przewiertu) [6]. Rurociąg będzie wykonany ze stali walcowanej mechanicznie L485MB ze spawanym połączeniem rur. Średnie zagłębienie



**Rys. 1.** Trasa planowanego gazociągu DN 700 PN 8.4 MPa, relacji Szczecin Gdańsk [6]

dna rurociągu będzie wynosić około 1,9 m ppt, a średnia głębokość wykopu 2,0÷2,2 m. Projektowane jest bierne zabezpieczenie antykorozyjne w postaci trójwarstwowego polietylenu (3LPE) na zewnątrz rury oraz czynne zabezpieczenie antykorozyjne w postaci ochrony katodowej. Strefa kontrolna gazociągu będzie wynosić 12,0 m, po 6,0 m na każdą ze stron od jego osi [6].

Pod względem geologicznym teren badań położony jest w obrębie kilku geologicznych jednostek strukturalnych: antykliny Koszalina, niecki pomorskiej oraz synklizy perybałtyckiej. Na starszym podłożu zbudowanym z utworów wieku od kambru po kredę leży pokrywa osadów kenozoicznych. Gazociąg na całym odcinku przebiega w utworach czwartorzędowych, w większości plejstocenijskich osadach kompleksu północnopolskiego. Osady te są wykształcone jako osady akumulacji lodowcowej i wodnolodowcowej budujące wysoczyzny morenowe oraz lokalnie osady akumulacji rzecznej, jeziornej i zastoiskowej [6].

Pod względem hydrogeologicznym teren badań leży w granicach regio-

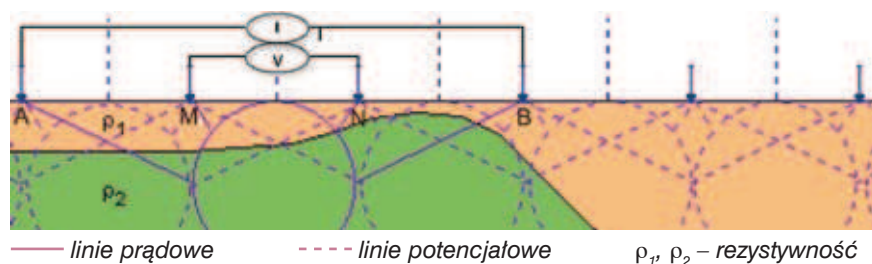
nów zachodniopomorskiego oraz wschodniopomorskiego, na których występują wody podziemne piętra czwartorzędowego. Wody podziemne występujące na głębokości 0,0÷2,0 m ppt są głównie na nisko położonych obszarach dolin rzecznych, na terenach torfowisk i nawodnionych piasków rzeczno-jeziornych. Stan zwierciadła wód

podziemnych zależy od ilości opadów atmosferycznych oraz ukształtowania powierzchni terenu. Zwierciadło to jest przeważnie swobodne. Na głębokości 2,0÷5,0 m ppt wody występują głównie w piaszczystych osadach wodnolodowcowych, na wysoczyznach lub wśród glin zwałowych. Poziom ten charakteryzuje się zwierciadłem swobodnym, które wykazuje spore wahania roczne (do 2,0 m) [6].

### 3. Metodyka badań terenowych

Podstawą fizyczną badań elektrooporowych jest zróżnicowanie oporności elektrycznej  $\rho$  różnych litologicznie osadów, a w szczególności wysokooporowych osadów piaszczysto-żwirowych i niskoopo-

rowych osadów gliniasto-ilastych. Pomiar oporu ośrodka gruntowego (rezystywności) przy przepływie prądu opiera się na wykorzystaniu prawa Ohma, to znaczy pomiarze spadku potencjału elektrycznego na określonym odcinku obwodu przy przepływie prądu o znanym natężeniu [2]. W pomiarach elektrooporowych stosuje się wiele różnych układów pomiarowych, czyli sposobów wzajemnego ustawienia elektrod prądowych AB oraz elektrod pomiarowych MN. Bezpośrednimi wielkościami podlegającymi pomiarom są: natężenie prądu  $I$  w obwodzie zasilającym AB oraz spadek napięcia  $V$  w obwodzie pomiarowym MN oraz wymiary całego układu pomiarowego [2]. Wprowadzony do gruntu prąd za pomocą elektrod A, B przepływa przez półkulę o średnicy równej odległości między tymi elektrodami. Zatem oporność gruntu pomierzona przy użyciu czterech elektrod jest opornością gruntu zawartego w tej półkuli. Przesuwając rozstaw elektrod A, B o kolejne punkty zmienia się objętość półkuli, a tym samym głębokość mierzonej warstwy (rys. 2). Głębokość ta jest równa promieniowi półkuli, tzn. odległości  $AB/2$  [3]. Przyjmując podłoże gruntowe za ośrodek niejednorodny, składający się z warstw o różnej budowie fizykochemicznej, nieposiadających na większych przestrzeniach tych samych wartości, uważa się, że mierzona oporność gruntu  $1\text{ m}^3$  nie jest opornością rzeczywistą, lecz pozorną. Jednostką oporności elektrycznej jest omometr  $[\Omega\text{m}]$ , a jej odwrotnością jest przewodność elektryczna wyrażana w simensach na metr  $[\text{S/m}]$ .



**Rys. 2.** Schemat pomiarów elektrooporowych w układzie 4-elektrodowym [8]

**Tabela 1.** Klasyfikacja zagrożenia korozyjnego na podstawie oporności właściwej gruntu [7]

Stopień zagrożenia korozyjnego	Oporność właściwa gruntu [ $\Omega\text{m}$ ]
Niski	> 100
Średni	od 100 do 20
Wysoki	od 20 do 10
Bardzo wysoki	< 10

Badania rezystywności gruntu wykonane pod zabudowę gazociągu relacji Szczecin – Gdańsk, przeprowadzono stosując metodę pionowych sondowań elektrooporowych (Vertical Electrical Sounding), w metodzie 4-elektrodowej, umożliwiającej prześledzenie zróżnicowania oporności ośrodka w kierunku pionowym. Zastosowano układ pomiarowy Wennera (w którym odległość między elektrodami A, M, N, B jest równa), mierząc oporność gruntu do dwóch poziomów głębokościowych: do głębokości 1,6 m – z odległością między elektrodami 2,0 m oraz do głębokości 3,2 m – z odległością między elektrodami 4,0 m [6].

#### 4. Interpretacja wyników badań

Oporność gruntu zależy od struktury geologicznej, składu chemicznego i poziomu wody gruntowej i ulega zmianom w zależności od warunków atmosferycznych. Wzrost wilgotności powoduje spadek oporności gruntu, przy czym wpływ opadów atmosferycznych jest odczuwalny w górnych warstwach gruntu do głębokości około 3,0 m. Wpływ temperatury w granicach powyżej 0°C jest pomijany [3]. Grunty o dużej zawartości rozpuszczalnych związków chemicznych oraz dużej wilgotności charakteryzują się dobrym przewodnictwem elektrolitycznym, stąd przyjmuje się wielkość oporu właściwego gruntu za podstawowe kryterium jego agresywności korozyjnej (tab.1).

Dla projektowanej trasy gazociągu relacji Szczecin – Gdańsk wykonano 1117 otworów wiertniczych co 50÷250 m w ciągu projektowanej inwestycji na głębokościach od 3,50 do 12,0 m ppt, oraz 806

pomiarów punktowych oporności gruntu do głębokości 1,6 i 3,2 m. Wyniki przeprowadzonych badań dla projektowanego gazociągu przedstawiono na wykresach oporności elektrycznej gruntu (do obu poziomów głębokościowych) [6]. Wyniki badań stref niskich oporności poniżej 20  $\Omega\text{m}$  (miejsc o wysokim stopniu zagrożenia korozyjnego) wraz z przekrojami geotechnicznymi dla tych miejsc przedstawiono na rysunkach 3÷6.

Do głębokości 1,6 m, wartości oporności charakterystyczne dla gruntów nieagresywnych wynoszące średnio 493  $\Omega\text{m}$  stanowią 74,6% pomierzonych punktów; wartości oporności charakterystyczne dla gruntów o podwyższonej agresywności, wynoszące średnio 67,1  $\Omega\text{m}$ , stanowią 25% pomierzonych punktów, zaś wartości oporności charakterystyczne dla gruntów agresywnych, wynoszące średnio 16,1  $\Omega\text{m}$ , stanowią jedynie 0,3% pomierzonych punktów [6].

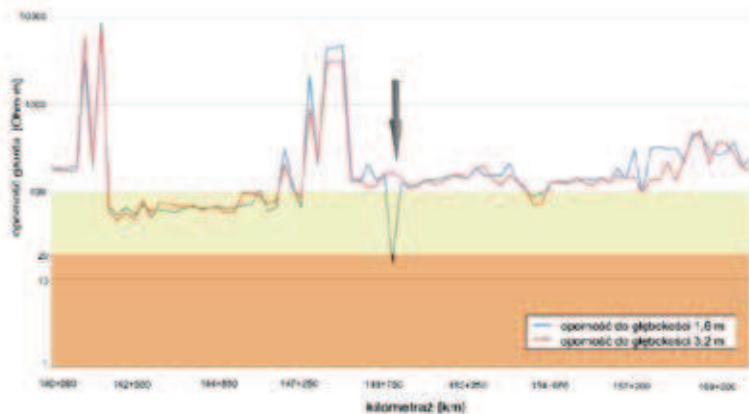
Do głębokości 3,2 m wartości oporności charakterystyczne dla gruntów nieagresywnych wynoszące średnio 398,1  $\Omega\text{m}$  stanowią

71% pomierzonych punktów; wartości oporności charakterystyczne dla gruntów o podwyższonej agresywności, wynoszące średnio 62,0  $\Omega\text{m}$ , stanowią 28% pomierzonych punktów, zaś wartości oporności charakteryzujące grunty agresywne wynoszą średnio 19,31  $\Omega\text{m}$  i stanowią 0,12% [6].

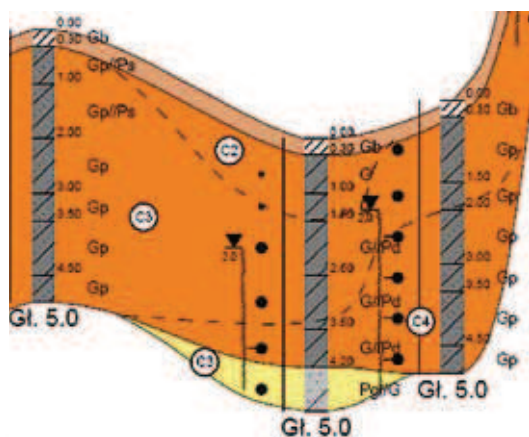
W miejscach wysokiego zagrożenia korozyjnego występują przeważająco gliny piaszczyste ( $G_p$ ), przewarstwione piaskami drobnymi ( $P_d$ ) oraz piaski pylaste ( $P_{II}$ ), przewarstwione glinami pylastymi ( $G_{II}$ ) oraz piaski średnie ( $P_s$ ) i żwiry ( $Z$ ). Ułożenie rurociągu w gruntach różnego typu, np. gliniastych i piaszczystych, sprzyja powstawaniu makroogniw korozyjnych o nierównomiernym napowietrzeniu. Wtedy obszary słabiej napowietrzone, np. grunty gliniaste stanowią miejsca anodowe w stosunku do miejsc silniej napowietrzonych, takich jak grunty piaszczyste – miejsca katodowe. Przeprowadzone pomiary są podstawą w wyborze środków ochrony przeciwkorozyjnej, właściwych izolacyjnych pokryć ochronnych oraz w ocenie skuteczności ich działania.

#### 5. Podsumowanie

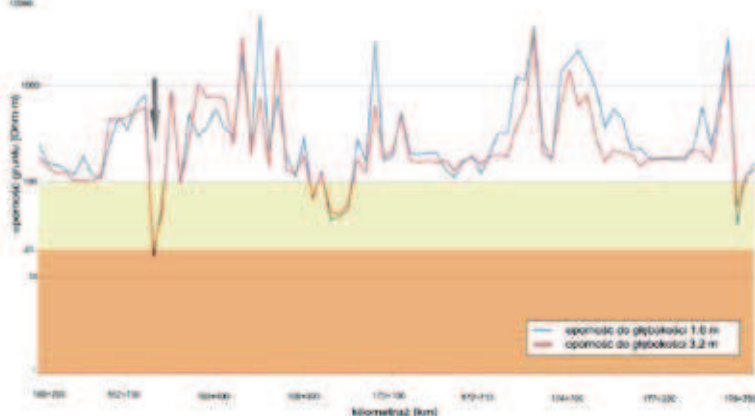
Agresywność korozyjną gruntu określa się na podstawie jego oporności (rezystywności), ponieważ korozyjność środowiska jest w dużym stopniu związana z prze-



**Rys. 3.** Wykres oporności gruntu pod projektowany gazociąg DN 700 MOP 8,4 MPa Szczecin – Gdańsk od km 140+000 do km 159+200. Miejsca wysokiego stopnia zagrożenia korozyjnego oznaczono strzałką [6]



**Rys. 4.** Przekrój geotechniczny na odcinku o podwyższonej agresywności korozyjnej gruntu od km 149 + 750 do km 150 + 100 [6]



**Rys. 5.** Wykres oporności gruntu pod projektowany gazociąg DN 700 MOP 8,4 MPa Szczecin – Gdańsk od km 160 + 200 do km 179 + 750. Miejsca wysokiego stopnia zagrożenia korozyjnego oznaczono strzałką [6]

biegiem procesów elektrochemicznych. Aktywność korozyjna gruntów jest zależna głównie od napowietrzenia, stopnia nawodnienia oraz zawartości substancji organicznych. Od struktury gruntu zależą warunki przemieszczania się wilgoci i powietrza oraz charakter kontaktu gruntu z ułożoną konstrukcją metalową. Różnorodność środowiska gruntowego sprzyja powstawaniu części anodowych i katodowych na konstrukcjach metalowych ułożonych w gruncie. W przypad-

ku procesu korozji przebiegającej w gruncie, powierzchnia metalu styka się z gruntem, który jest elektrolitem przewodzącym jony i prąd elektryczny. Tlen atmosferyczny musi pokonać warstwę elektrolitu, przeniknąć do gruntu. W takim przypadku o szybkości korozji decyduje szybkość transportu tlenu do granicy faz metal – elektrolit. Woda w gruntach we wszystkich swoich postaciach rozpuszczając różne sole tworzy agresywne elektrolity. Najbardziej korodująco na metale wpływają

grunty pylaste, natomiast występowanie gruntów piaszczystych nie wpływa na korozję metali. Grunty niebudowlane, zanieczyszczone odpadami przemysłowymi, są zawsze środowiskiem o dużej agresywności korozyjnej. Grunty piaszczyste łatwo przepuszczają wodę i gazy. W tych gruntach jest łatwy dostęp tlenu do umieszczonej w gruncie konstrukcji. Szybkość korozji w tych gruntach zależy od zawartości wilgoci. Grunty gliniaste stanowią środowisko bardziej agresywne, ponieważ zawierają często sole tworzące roztwory o nieraz dużym stężeniu. Dodatkowo przy wysychaniu tworzą drobne szczeliny powodujące znaczne różnice w napowietrzeniu gruntu [3].

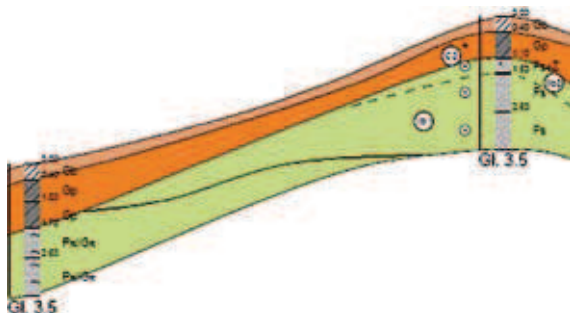
Pomiary agresywności korozyjnej gruntu metodą elektrooporową w układzie 4-elektrodowym umożliwiają ustalenie zmiennej pionowej i poziomej rezystywności gruntów lub warstw, przez które przechodzi instalacja podziemna.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] Białostocki R., Szczypta S., Żuk Z., Ocena przydatności banku danych elektrooporowych do rozpoznania i monitorowania środowiska geologicznego. Biuletyn Informacyjny GEOFIZYKA, 1/2006
- [2] Dzwiniel J., Geofizyka – metody geoelektryczne. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1978
- [3] Ostaszewicz J., Praca zbiorowa, Ochrona elektrochemiczna przed korozją. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991
- [4] Stelmach K., Szczurek M., Wykorzystanie geofizycznych badań elektrooporowych do oceny agresywności korozyjnej gruntu. Przegląd Budowlany 2011 z. 7-8
- [5] Surowska B., Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją. Politechnika Lubelska, Lublin 2002

**WYKORZYSTANE MATERIAŁY**

- [6] Dokumentacja Geotechniczna oceniająca warunki gruntowo-wodne podłoża pod projektowany gazociąg wysokiego ciśnienia DN 700 MOP 8.4 MPa relacji Szczecin – Gdańsk. P.P.B.iR.G.GEOSTANDARD Sp.zo.o., Wrocław 2011
- [7] PN- 91/B-10703:1991. Wodociągi. Przewody z rur żeliwnych i stalowych układanych w ziemi. Ochrona katodowa. Wymagania i badania
- [8] www.ggukarlsruhe.de/



**Rys. 6.** Przekrój geotechniczny na odcinku o podwyższonej agresywności korozyjnej gruntu od km 162 + 700 do km 163 + 100 [6]