

DAMIAN BĘBEN¹⁾

EVALUATION OF BACKFILL CORROSIVITY AROUND STEEL ROAD CULVERTS

OCENA KOROZYJNOŚCI ZASYPEK GRUNTOWYCH WOKÓŁ STALOWYCH PRZEPUSTÓW DROGOWYCH

STRESZCZENIE. Przepusty z blach falistych w związku z położeniem w środowisku gruntowym są narażone na możliwość wystąpienia korozji ziemnej. W pracy scharakteryzowano najważniejszy czynnik wpływający na powstanie korozji ziemnej, tj. rezystywność. Przedstawiono także badania rezystywności gruntu w oparciu o geofizyczne pomiary elektrooporowe metodą Wennera. Metoda ta pozwala na pomiar rezystywności gruntu na różnych głębokościach. Przeprowadzone badania doświadczalne dotyczyły sześciu przepustów położonych na drogach o różnej klasie (krajowych, wojewódzkich i lokalnych). Wszystkie badania przeprowadzono w dwóch okresach, tj. latem i wiosną. Minimalna rezystywność gruntu wokół przepustów wynosiła $30 \Omega \cdot m$ i została ustalona przy jezdni. Uzyskane wyniki wskazują na niebezpieczeństwo wystąpienia korozji ziemnej w przepustach z blach falistych, zwłaszcza położonych na drogach krajowych i wojewódzkich.

SŁOWA KLUCZOWE: korozja ziemna, metoda Wennera, przepust stalowy, rezystywność gruntu.

ABSTRACT. Corrugated steel plate culverts in connection with the location in the soil environment are exposed to risk of the soil corrosion. The paper characterizes the most important factor affecting formation of corrosion in the soil, i.e. resistivity. Tests of soil resistivity based on the geophysics electrical resistivity measurements (Wenner method) are presented. This method allows the soil resistivity measurement at various depths. The conducted experimental tests concerned the six culverts situated on different types of roads (national, provincial and local). All tests were conducted in two periods, i.e. summer and spring. The minimum resistivity of the soil in the vicinity of the steel culverts amounted to $30 \Omega \cdot m$ and it was established near roadway. The obtained results indicate the peril of the soil corrosion occurrence in the corrugated steel plate culverts, especially located on the national and provincial roads.

KEYWORDS: soil corrosion, soil resistivity, steel culvert, Wenner method.

DOI: 10.7409/rabdim.013.018

¹⁾ Wydział Budownictwa, Politechnika Opolska; d.beben@po.opole.pl

1. WSTĘP

Stalowe przepusty złożone są z powłoki z blach falistych i otaczającego ją gruntu [1 - 2]. Zatem elementy powłoki przepustu bezpośrednio stykają się z gruntem. Odporność korozyjna stalowego przepustu będzie więc związana głównie z właściwościami gruntu i jego czynnikami elektrochemicznymi. Zalicza się do nich powstawanie elektroogniw, które są efektem różnic potencjałów na powierzchni konstrukcji i wpływu prądu stałego i zmiennego.

Grunty stanowią środowisko korozyjne, gdzie korozja przebiega głównie jako proces elektrochemiczny, w którym rozkład (rozpuszczanie) metali stanowi reakcja anodowa. W większości przypadków reakcją katodową jest redukcja tlenu. O szybkości korozji w gruncie decyduje przede wszystkim jego rezystywność, która jest uzależniona głównie od jego wilgotności i zawartości soli. Poza tym rezystywność jest związana z porowatością gruntu, stężeniem soli rozpuszczonych w wodzie wypełniającej pory gruntowe, składem mineralnym szkieletu gruntowego, temperaturą, wielkością i kształtem ziaren oraz wzajemnym ich ułożeniem względem siebie [3 - 5]. Wraz ze zmniejszaniem się rezystywności gruntu, na skutek wzrostu wilgotności i zasolenia, rośnie jego agresywność korozyjna. Zgodnie z PN-EN ISO 12944-2 [6], grunt zaliczono do kategorii korozyjności Im3 (przykłady środowisk i konstrukcji to: podziemne zbiorniki, pale stalowe, rurociągi stalowe).

Korozja elektrochemiczna w gruncie zachodzi na granicy dwóch faz, tj. między stałą (przewodnik elektronowy) a środowiskiem elektrolitycznym (przewodnik jonowy). Na przebieg tego procesu zasadniczy wpływ ma środowisko korozyjne, jego skład chemiczny i zawartość czynników agresywnych, np. zanieczyszczeń. W atmosferze korozja zachodzi w cienkiej warstwie wody lub wilgoci występującej na powierzchni konstrukcji stalowej, gdzie tlen dociera do granicy fazy stal-elektrolit. Procesy korozyjne przebiegają wówczas często w sposób widoczny na całej powierzchni. Natomiast w przypadku korozji w gruncie lub wodzie, powierzchnia konstrukcji stalowej ma stały kontakt z warstwą elektrolitu (grunt lub woda są traktowane jako elektrolit). Średnia szybkość korozji ogólnej w gruncie i w wodach naturalnych szacowana jest na poziomie 0,01-0,02 mm/rok [7, 8].

Konstrukcje stalowe pracujące w gruncie (przepusty, mosty, rurociągi, itp.) są narażone na korozyjną działalność gruntu wywołaną przez [9]:

1. INTRODUCTION

Steel culverts are composed of the corrugated plate shell and the surrounding soil [1 - 2]. The elements of the culvert shell are, therefore, in a direct contact with soil. Consequently, corrosion resistance of the steel culvert will be related mainly to soil properties and its electrochemical factors. These include the formation of electro-cells which are the result of the potential differences on the surface of the structure and of the impact of direct and alternating currents.

Soils constitute the corrosion environment where the corrosion takes the form of the electrochemical process in which the metal decomposition (dissolution) is constituted by the anodic reaction. In most cases the cathodic reaction consists in the reduction of oxygen. Soil resistivity, which depends mainly on humidity and salt content, is the main factor influencing corrosion speed. In addition, the resistivity is related to the soil porosity, the concentration of salts dissolved in water that fills soil pores, mineral content of the soil frame, temperature, the size and shape of grains and their arrangement to each other [3 - 5]. Corrosive aggression rises as the soil resistivity decreases which is a result of humidity and salinity increase. According to PN-EN ISO 12944-2 [6], the corrosion soil category was defined as Im3 (the examples of environments and structures are: underground containers, steel pales and steel pipelines).

Electrochemical soil corrosion occurs on the border of two phases – between steel (electron conductor) and electrolytic environment (ionic conductor). The process is influenced mainly by corrosion environment, its chemical content and the aggressive factors (e.g. pollutants) content. In the atmosphere, corrosion takes place in a thin layer of water or humidity occurring on the steel structure surface where the oxygen reaches the border of steel-electrolyte phase. In such case, corrosion processes occur frequently and in a noticeable way on the whole surface. Whereas in case of corrosion in the soil or water, the steel structure surface is in a constant contact with the electrolyte layer (soil and water are treated as electrolyte). The average speed of the corrosion in soil or natural water is estimated at the level of 0.01-0.02 mm/year [7, 8].

Steel structures working in soil (culverts, bridges, pipelines etc.) are subject to the corrosive soil activity caused by the following factors [9]:

- high humidity,
- pH value lower than 4.5 or higher than 8,

- wysoka wilgotność,
- wartość pH mniejszą od 4,5 lub większą od 8,
- rezystywność mniejszą niż $30 \Omega \cdot m$,
- obecność siarczków, chlorków i bakterii,
- obecność prądów błędzących.

Wystąpienie korozji w konstrukcjach stalowych jest zazwyczaj związane z jednoczesnym pojawieniem się więcej niż jednego czynnika korozyjnego.

W artykule scharakteryzowany jest problem powstawania korozji ziemnej w stalowych przepustach z blach falistych ocynkowanych w oparciu o badania własne rezystywności zasypki gruntowej jako czynnika najbardziej odpowiedzialnego za powstawanie korozji w gruncie. Problem poruszony jest na przykładzie kilku wybranych przepustów.

2. REZYSTYWNOSĆ GRUNTU

2.1. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE PRZEPŁYW PRĄDU ELEKTRYCZNEGO W OŚRODKU GRUNTOWYM

Rezystywność jest jednym z podstawowych wskaźników decydujących o korozyjności gruntów związanych z zachodzącymi w nich reakcjami elektrochemicznymi. Rezystywność gruntów powszechnie zmniejsza się wraz ze zwiększaniem wilgotności i stężenia substancji chemicznych (zanieczyszczeń). Na podstawie doświadczeń można stwierdzić, że stal nierdzewna będzie mogła ulegać korozji w gruntach wilgotnych zawierających chlorki, o rezystywności mniejszej od $7 \Omega \cdot m$. Natomiast grunty piaszczyste mają wysoką rezystywność rzędu $200 \Omega \cdot m$ i dlatego generalnie uważa się je za mało korozyjne. Z kolei grunty gliniaste mają rezystywność rzędu $10 \Omega \cdot m$, co powoduje, że uważane są za wysoko korozyjne.

Rezystywność gruntów jest uważana za dominujący parametr procesów korozyjnych w przypadku braku działalności mikrobiologicznej w gruntach. Wskaźnik korozyjności gruntów zależy w głównej mierze od ich rezystywności i jest on następujący [9]:

- bardzo korozyjne: poniżej $10 \Omega \cdot m$,
- agresywne: od 10 do $50 \Omega \cdot m$,
- średnio korozyjne: od 50 do $100 \Omega \cdot m$,
- lekko korozyjne: od 100 do $200 \Omega \cdot m$,
- mało korozyjne: od 200 do $300 \Omega \cdot m$,
- niekorozyjne: od 300 do $1000 \Omega \cdot m$.

- resistivity lower than $30 \Omega \cdot m$,
- sulphides, chlorides and bacteria presence,
- stray currents presence.

Corrosion occurrence in steel structures is usually related to the influence of more than one corrosive factor at the same time.

The article defines the problem of the soil corrosion formation process in corrugated steel plate culverts as the most crucial factor responsible for the occurrence of soil corrosion on the basis of individual research of backfill resistivity. The problem is discussed through the use of several chosen culverts.

2. SOIL RESISTIVITY

2.1. FACTORS CONDITIONING THE ELECTRIC CURRENT FLOW IN A SOIL CENTRE

Resistivity is one of the key indicators that determine soil corrosion and that are related to the electrochemical reactions which take place in the soils. Soil resistivity decreases as the humidity and chemical substances (pollutants) concentration increases. On the basis of previous research it can be determined that stainless steel can be affected by corrosion in humid soils containing chlorides whose resistivity is lower than $7 \Omega \cdot m$, whereas sandy soils have high resistivity of around $200 \Omega \cdot m$ and, therefore, they are considered to be less corrosive. Clayey soils have resistivity of around $10 \Omega \cdot m$ and that is why they are considered to be highly corrosive.

Soil resistivity is considered to be the dominant parameter of corrosion processes in the absence of microbial activity in soils. Corrosion indicator of soils depends largely on their resistivity and it is as follows [9]:

- highly corrosive: below $10 \Omega \cdot m$,
- aggressive: from 10 to $50 \Omega \cdot m$,
- average corrosive: between 50 and $100 \Omega \cdot m$,
- slightly corrosive: between 100 and $200 \Omega \cdot m$,
- little corrosive: between 200 and $300 \Omega \cdot m$,
- non-corrosive: between 300 and $1000 \Omega \cdot m$.

The moisture content of the soil, particularly of groundwater, strongly increases conductivity of the environment. The biggest fluctuations of the soil resistivity occur in its upper layers due to the winter freezing and summer desiccation.

Zawartość wilgoci w gruncie, w szczególności wody gruntowej, zdecydowanie wpływa na zwiększenie przewodnictwa środowiska. Największe wahania rezystywności gruntu występują w jego górnych warstwach ze względu na przemarzanie zimą i wysychanie latem.

Ośrodek gruntowy, podobnie jak inne materiały, pod kątem zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego, charakteryzuje się dwoma parametrami, tj. rezystywnością i stałą dielektryczną [10]. Wpływ stałej dielektrycznej ujawnia się dopiero przy zastosowaniu w pomiarach prądu przemiennego o bardzo wysokich częstotliwościach - powyżej 100 kHz [11]. Ośrodek gruntowy charakteryzuje rezystywność ρ , która zazwyczaj jest wyrażona w $\Omega \cdot m$ i uzyskujemy ją w wyniku pomnożenia oporności elektrycznej R przez pole powierzchni przekroju S oraz podzielenia przez długość drogi przepływu L . Zatem w przypadku dowolnego ośrodka gruntowego rezystywność można przedstawić w postaci (1):

$$\rho = R \frac{S}{L}. \quad (1)$$

Opór elektryczny ośrodka gruntowego R jest definiowany przez prawo Ohma:

$$R = \frac{V}{I}, \quad (2)$$

gdzie: V jest napięciem [V] i I jest natężeniem prądu [A]. Charakterystyka elektryczna jest zazwyczaj opisana także przez wartość przewodnictwa σ [Sm^{-1}], która jest odwrotnością rezystywności gruntu. Zatem można ją zapisać jako:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3)$$

W jednorodnej i izotropowej półprzestrzeni gruntowej, gdy elektrody prądowe umieszczone są na powierzchni, rozkład prądów elektrycznych ma kształt półkolisty [12, 13]. Zatem gęstość prądu J [A/m^2] może być obliczona w przypadku wszystkich radialnych kierunków zgodnie z równaniem (4):

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}, \quad (4)$$

gdzie $2\pi r^2$ jest powierzchnią półkulistą kuli o promieniu r . Natomiast napięcie można przedstawić w następujący sposób:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (5)$$

Rezystywność dotyczy jedynie materiałów izotropowych i jednorodnych, natomiast w przypadku ośrodka złożonego,

Concerning the ability of conducting the electrical current, the soil medium, similarly to other materials, can be characterised by two parameters – resistivity and dielectric constant [10]. The influence of the dielectric constant is visible only when the alternating current of a very high frequency (above 100 kHz) is used [11]. The soil medium can be characterised by resistivity ρ which is described by $\Omega \cdot m$ and obtained as a result of multiplying the electrical resistance R by the cross section S and dividing by the flow path length L . In case of any soil medium, therefore, the resistivity can be presented as follows (1):

$$\rho = R \frac{S}{L}. \quad (1)$$

The resistance of the soil medium R is defined by the Ohm's law:

$$R = \frac{V}{I}, \quad (2)$$

where: V is voltage [V] and I is current intensity [A]. Electrical characteristics are usually described as well by the conductivity value σ [Sm^{-1}] which is the reverse of the soil resistivity. Therefore, it can be presented as:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (3)$$

In the homogeneous and isotropic soil half-space, when the current electrodes are placed on the surface, the distribution of electric currents has the semicircular shape [13, 14]. The current density J [A/m^2], therefore, can be calculated in case of all radial directions according to the following equation (4):

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}, \quad (4)$$

where $2\pi r^2$ is the semicircular area of a sphere having the radius r . Whereas the voltage can be presented in the following way:

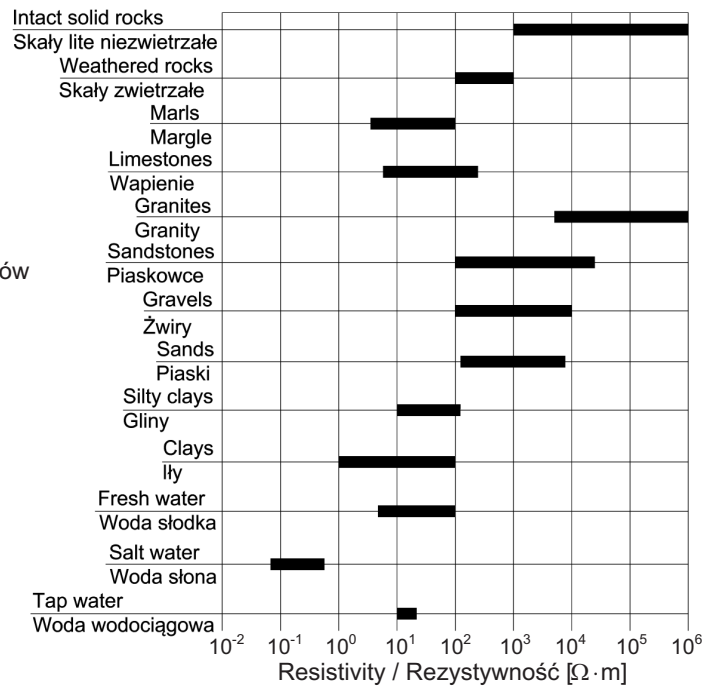
$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (5)$$

Resistivity concerns only isotropic and homogeneous materials, however in case of the complex medium, such as the soil, it constitutes only an apparent value. Typical ranges of the observed resistivity values of selected rocks and soils as well as water are shown in Fig. 1.

jakim jest grunt, stanowi tylko wartość pozorną. Typowe zakresy obserwowanych wartości rezystywności wybranych skał i gruntów oraz wody przedstawiono na Rys. 1.

Fig. 1. Comparison of resistivity for selected rocks and soils as well as water [14]

Rys. 1. Porównanie rezystywności dla wybranych skał i gruntów oraz wody [14]



2.2. BADANIA REZYSTYWNOCI GRUNTU WOKÓŁ STALOWYCH PRZEPUSTÓW

Do wykonania zasypek wokół przepustów z blach falistych wykorzystuje się grunty niekorozyjne, tj. o rezystywności rzędu 400-500 Ω·m i wartości pH (6-7,5) [2, 15]. Z tego też względu powszechnie uważa się, że w przypadku tego typu obiektów nie ma zagrożenia wystąpieniem korozji ziemnej [16]. Jednakże po głębszej analizie problem wydaje się być bardziej złożony. Biorąc pod uwagę długi okres eksploatacji obiektów mostowych oraz ich położenie pod drogami, z których mogą dostawać się do gruntu zasypowego różnego rodzaju substancje chemiczne (np. służące do zimowego utrzymania dróg, zanieczyszczenia z pojazdów, itp.), mogą wystąpić zmiany w pierwotnych właściwościach zasypki gruntowej. Przykładowo zasypka gruntowa z niekorozyjnej zmieni się w bardziej agresywną w stosunku do konstrukcji stalowej przepustu. Może być to spowodowane migracją zanieczyszczeń i wilgoci w głębsze strefy zasypki, będące bezpośrednio w kontakcie z przepustem.

W związku z powyższym postanowiono wykonać badania korozyjności gruntu wokół kilku przepustów. Do badań wytypowano 4 przepusty z blach falistych, położone pod drogami o różnym natężeniu ruchu pojazdów (drogi krajowe: DK1 i DK2, wojewódzkie: DW1 i DW2). Wybór był głównie podyktowany faktem, że ten rodzaj dróg podlega regularnemu zimowemu utrzymaniu, tj. stosowaniu środków odladzających, które mogą wpływać na zmianę agresywności gruntu. W celu porównania przeprowadzono także badania zasypki na 2 przepustach położonych pod drogami lokalnymi (DL1 i DL2), gdzie sporadycznie (lub wcale) używa się środków do zimowego utrzymania dróg. W Tabelicy 1 przedstawiono parametry geometryczne badanych przepustów. Do ich budowy została wykorzystana

2.2. THE RESEARCH OF THE SOIL RESISTIVITY AROUND THE STEEL CULVERTS

Non-corrosive soils of resistivity around 400-500 Ω·m and pH value (6-7,5) are used for backfills around the corrugated steel plate culverts [2, 15]. This is why it is commonly believed that in case of such structures there is no threat of soil corrosion [16]. However, after a more thorough analysis, the problem seems to be more complex. Given the long service life of bridges and their position under the roads from which different kinds of chemical substances (e.g. used for winter road maintenance, pollution from vehicles, etc.) can get into the backfill, there might occur some changes in the primary qualities of the backfill. It can change, for example, from non-corrosive to more aggressive one in relation to the steel structure of the culvert. It can be caused by the migration of contamination and moisture into deeper layers of the backfill which are in a direct contact with the culvert.

Therefore, it was decided to perform the soil corrosivity tests around a few culverts. Four corrugated steel plate culverts were selected for the research; they were located below the roads of different traffic volume (national roads: DK1 and DK2, regional roads: DW1 and DW2). The selection was based mainly on the fact that those types of

stal S235JRG2, z której wykonano arkusze blach falistych o profilu fali 0,20×0,055 m, standardowo zabezpieczone z obu stron ocynkiem o grubości 85 µm. Wszystkie badania zastały przeprowadzone w dwóch okresach, tj. letnim i wiosennym zaraz po zimie. Warunki atmosferyczne podczas badań były następujące: w okresie letnim – bez opadów, temperatura powietrza 25°C, wilgotność powietrza 40-45%, natomiast w okresie wiosennym – bez opadów, temperatura powietrza 15°C, wilgotność powietrza 50-55%. Badane przepusty były eksploatowane od 7 do 10 lat.

Table 1. Characteristics of tested culverts
Tablica 1. Charakterystyka badanych przepustów

Culvert name Nazwa przepustu ^{*)}	Span Rozpiętość [m]	Height Wysokość [m]	Length Długość [m]	Backfill height Wysokość zasyпки [m]	Plate thickness Grubość blach [m]
DK1	5.00	3.00	42.30	1.45	0.0055
DK2	5.00	3.00	21.40	1.51	0.0055
DW1	5.29	3.28	21.50	1.65	0.0060
DW2	4.67	2.81	23.40	0.80	0.0055
DL1	4.19	2.87	15.40	1.35	0.0045
DL2	4.02	2.78	14.40	1.40	0.0045
Remark / Uwaga ^{*)} markings of culverts explained in the text / oznaczenia przepustów wyjaśnione w tekście					

W praktyce pomiary rezystywności gruntu zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych przeprowadzane są metodami wykorzystującymi układy pomiarowe składające się z czterech elektrod, tj. metod Wennera i Schlumbergera oraz metody bazującej na konwersji tych dwóch wcześniej wymienionych metod [3]. W przypadku analizowanych przepustów, badania korozyjności gruntu przeprowadzono w oparciu o pomiar rezystywności metodą Wennera (profilowanie elektrooporowe w układzie średniego gradientu) [3]. W metodzie tej prąd elektryczny wprowadzany jest do gruntu za pomocą dwóch elektrod A i B, które wzbudzają pole elektryczne, natomiast elektrody M i N mierzą różnicę napięcia tego pola. Znając różnicę napięcia pola elektrycznego ΔV i gęstość płynącego prądu J oraz odległości między elektrodami można określić wartość rezystywności zgodnie z prawem Ohma. Różnica napięcia mierzona pomiędzy elektrodami M i N dana jest przez równanie (6):

roads have to be regularly maintained in the winter and this involves the use of de-icing substances, which may affect the aggressiveness of soil. In order to make a comparison the research was conducted also in the backfill on two culverts located below the local roads (DL1 and DL2), where the substances needed to maintain the roads in the winter are used only occasionally or never. Table 1 presents geometric parameters of the tested culverts. They were constructed of the S235JRG2 steel which was used for building the corrugated plates with the corrugation profile of 0.20×0.055 m. As usual, the plates were secured from both sides with the zinc coating whose thickness was 85 µm. The research was conducted in two periods, i.e. summer and spring right after winter. The weather conditions during the research were as follows: in the summer period – no rain, temperature: 25°C, air humidity: 40 - 45%; in the spring period – no rain, temperature 15°C, air humidity 50 - 55%. The culverts used in the research were in operation from seven to ten years.

In practice, soil resistivity measurements, both in laboratory and field conditions, are conducted with methods based on measurement systems consisting of four electrodes, i.e. Wenner and Schlumberg methods and the method based on the conversion of the two methods mentioned before [3]. In the case of the analysed culverts, the soil corrosivity research was based on the resistivity measurement with the use of the Wenner method (electroresistance profiling in the medium gradient system) [3]. According to this method an electric current is introduced into the ground by means of two electrodes A and B, which generate an electric field, while the electrodes M and N measure the voltage difference of this field. Knowing the electric field voltage difference ΔV , the density of the flowing current J and the distance between the electrodes, the resistivity value can be estimated according to the Ohm's law. The voltage difference measured between two electrodes M and N can be calculated by the following equation (6):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right], \quad (6)$$

where: AM, BM, AN and BN represent the distance between the electrodes A and M, B and M, A and N, B and N. Thus, resistivity can be calculated according to the following equation (7):

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right], \quad (6)$$

gdzie: AM, BM, AN i BN reprezentują geometryczną odległość pomiędzy poszczególnymi elektrodami A i M, B i M, A i N, B i N. Zatem rezystywność może być obliczona zgodnie z poniższą zależnością (7):

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (7)$$

w której K jest geometrycznym współczynnikiem uzależnionym od rozstawu czterech elektrod A, B, M i N.

Metoda Wennera pozwala na rozpoznanie podłoża gruntowego na różnych głębokościach w zależności od dobranych rozstawów pomiarowych. Schemat i zasadę pomiaru rezystywności tą metodą pokazano na Rys. 2. Na Rys. 3 przedstawiono widok z góry na obszar geofizycznych badań elektrooporowych zasypki gruntowej wokół przepustu DK1. Natomiast na Rys. 4 pokazano wybrany przepust podczas badań rezystywności zasypki gruntowej.

$$\rho = \left[\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (7)$$

in which K is a geometric coefficient dependent on the span of four electrodes A, B, M and N.

The Wenner method allows recognising the subsoil located at various depth, depending on the selected measurement distances. The scheme and principle of measuring the resistivity with this method are presented in Fig. 2. Fig. 3 shows the top view of the area of the backfill electrical resistivity tests around the DK1 culvert and Fig. 4 presents the selected culvert during the resistivity tests of the backfill.

Markings for Fig. 2 / Oznaczenia do Rys. 2:

- A, B – current electrodes / elektrody prądowe,
- M, N – potential electrodes / elektrody pomiarowe,
- V – micro-voltmeter / mikrowoltomierz,
- G – generator / generator prądu,
- Z – power / zasilanie,
- O – measurement point / punkt pomiarowy,
- a – electrodes spacing / rozstaw między elektrodami.

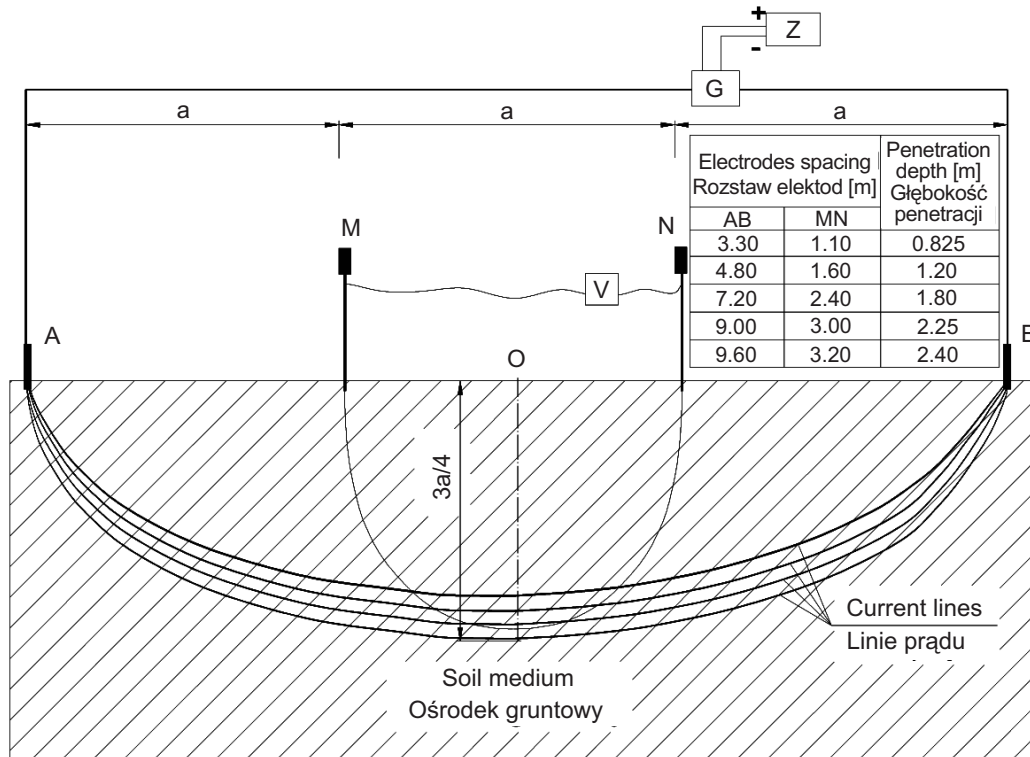


Fig. 2. Scheme of the Wenner measurement method for determining the soil resistivity
Rys. 2. Schemat pomiarowy metody Wennera do wyznaczania rezystywności gruntu

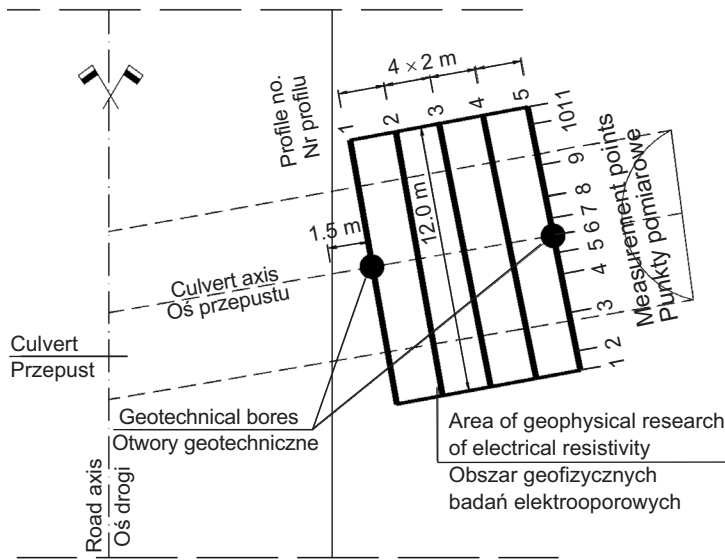


Fig. 3. Top view of the area of the electrical resistivity tests
Rys. 3. Widok z góry na obszar badań elektrooporowych

3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki pomiarów zostały przedstawione w postaci map i wykresów rezystywności gruntów. W Tablicy 2 przedstawiono zestawienie maksymalnych i minimalnych wartości rezystywności zasypki gruntowej, jakie otrzymano w wyniku przeprowadzonych pomiarów elektrooporowych w wybranych przepustach. Zaobserwowano, że w przypadku przepustu DK1 występują duże zróżnicowania rezystywności pomiędzy wartościami minimalnymi i maksymalnymi (Tabl. 2). Jest to spowodowane specyficzną budową tego przepustu, tj. jest on dość długi (ponad 40 m), a ponadto wartości maksymalne zostały uzyskane na końcu przepustu – przy wlocie (profil 5), natomiast wartość minimalną uzyskano przy jezdni (profil 1).

Na Rys. 5 pokazano mapy rezystywności gruntów wokół stalowych powłok dwóch wybranych przepustów (DK1 i DK2), uzyskane w okresie letnim na głębokości około 1,2 m. Na podstawie norm PN-EN 12501-1 [17] i PN-EN 12501-2 [18] na mapie rezystywności (Rys. 5a) została wydzielona granica $100 \Omega \cdot m$ sugerująca, że grunty o wyższej rezystywności zarejestrowane na obszarze badań spełniają warunki o niskim zagrożeniu korozją ziemną. Według powyższych norm grunty o wysokim zagrożeniu korozją występują, gdy wartość rezystywności wynosi poniżej $30 \Omega \cdot m$. Jak wynika z Rys. 5, mniejsze rezystywności zanotowano w strefach zasypki położonej bliżej jezdni (profil 1), a większe na obszarach położonych na



Fig. 4. View of the leveling rods arrangement outlining the axis of the culvert and the measurement points
Rys. 4. Widok na rozmieszczenie tyczek niwelacyjnych wyznaczających oś przepustu i punkty pomiarowe

3. RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The results of the measurements were presented in the form of maps and soil resistivity charts. Table 2 contains the list of maximum and minimum values of the backfill resistivity obtained as a result of the electroresistance measurements of selected culverts. It was observed that in case of the DK1 culvert there were considerable resistivity differences between minimum and maximum values (Table 2). It is caused by the specific structure of the culvert which is quite long (over 40 m). Moreover, the maximum values were obtained at the end of the culvert, i.e. at its inlet (profile 5) and the minimum value was obtained near the roadway (profile 1).

Fig. 5 presents resistivity maps of the soils around the steel shells of two selected culverts (DK1 and DK2), which were created in the summer at the depth of around 1.2 m. Based on the PN-EN 12501-1 [17] and PN-EN 12501-2 [18] standards, a $100 \Omega \cdot m$ border was placed on the resistivity map (Fig. 5a). The border was indicating that soils of higher resistivity registered in the research area were fulfilling the terms concerning the soils of a low soil corrosion threat. According to the standards above, the soils of high corrosion threat occur when the resistivity value is below $30 \Omega \cdot m$. As Fig. 5 shows, lower resistivity was observed in the area of the backfill located closer

końcach przepustów (profil 5). Na Rys. 6 przedstawiono mapy rezystywności gruntów w funkcji głębokości zasypki wybranych przepustów.

to the road (profile 1); higher resistivity was observed at the ends of the culverts (profile 5). Fig. 6 presents maps of backfill resistivity in the depth function for selected culverts.

Table 2. List of the backfill resistivity in the vicinity of analysed culverts

Tablica 2. Zestawienie rezystywności zasypki gruntowej w rejonie analizowanych przepustów

Culvert name / Nazwa przepustu	Resistivity / Rezystywność [$\Omega \cdot m$]			
	maximum / maksymalna		minimum / minimalna	
	Summer / Lato	Spring / Wiosna	Summer / Lato	Spring / Wiosna
DK1	340	260	34	30
DK2	72	63	34	32
DW1	130	110	55	48
DW2	80	73	68	53
DL1	230	175	126	108
DL2	180	145	110	97
Comparative profiles / Profile porównawcze	90-95	85-88	80-83	76-80

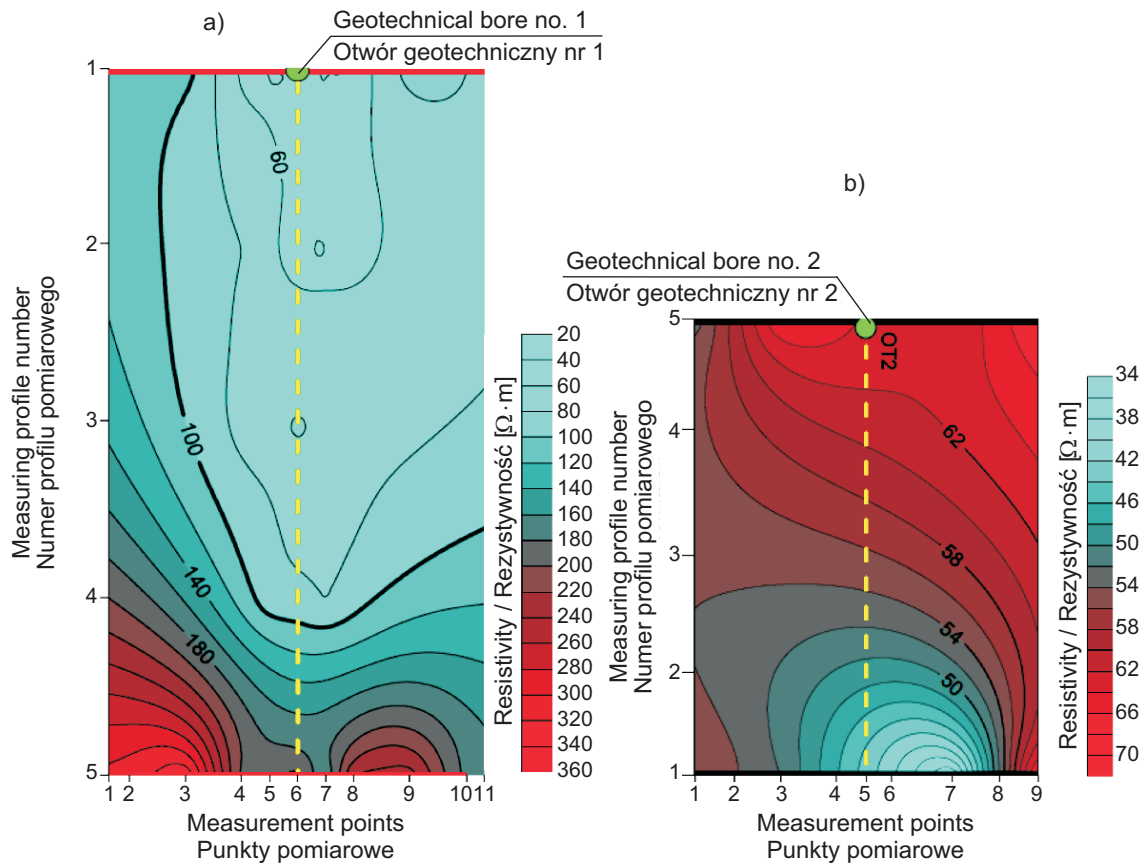


Fig. 5. Map of backfill resistivity for the culverts: a) DK1 and b) DK2

Rys. 5. Mapa rezystywności zasypki gruntowej dla przepustów nr: a) DK1 i b) DK2

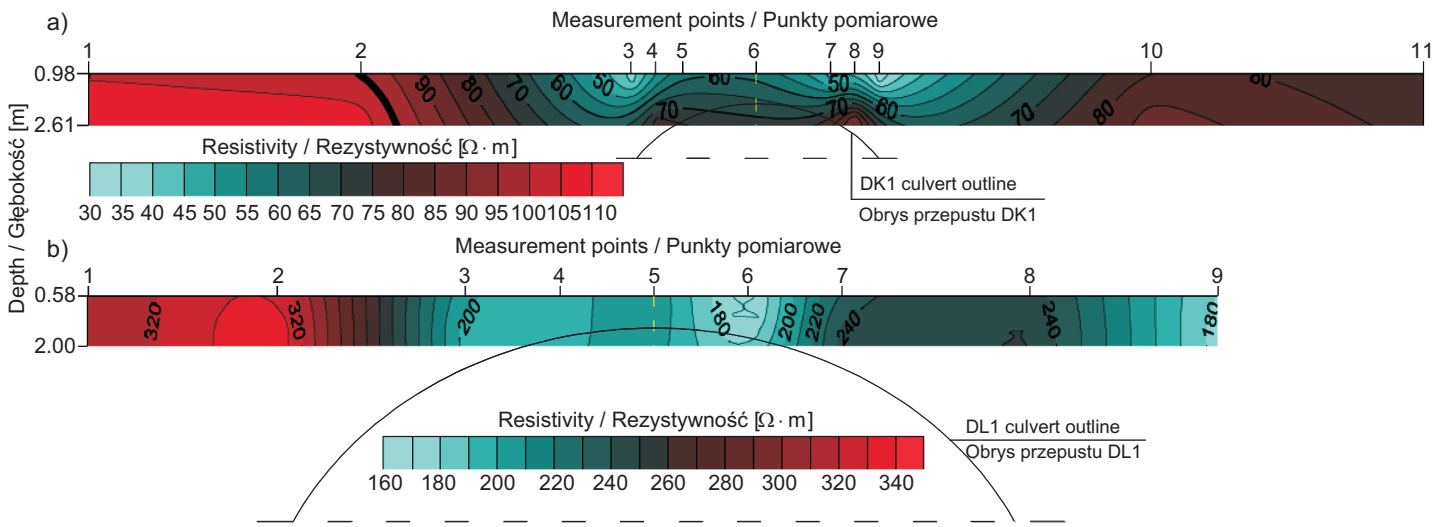


Fig. 6. Map of backfill resistivity in the depth function for the culverts: a) DK1 and b) DL1, for profiles no. 1 situated near a roadway Rys. 6. Mapa rezystywności zasypki gruntowej w funkcji głębokości w przepustach nr: a) DK1 i b) DL1, dla profili nr 1 zlokalizowanych przy jezdni

Z tych wykresów wynika, że w przypadku przepustów położonych na drogach o wyższej klasie (DK1) rezystywność gruntu jest w przedziale $50\text{--}80\ \Omega\cdot\text{m}$, nawet na głębokości ponad $2,5\ \text{m}$. Natomiast w przypadku przepustu zlokalizowanego na drodze lokalnej (DL1) widać wyraźnie, że zasypka wykazuje większą rezystywność ($> 180\ \Omega\cdot\text{m}$), czyli ma niskie zagrożenie korozyjne. Uzyskana minimalna rezystywność na obszarze badań wynosiła $30\ \Omega\cdot\text{m}$ (Rys. 7a i Tabl. 2) i uzyskano ją podczas badań wiosennych przepustu nr DK1. Została ona zarejestrowana w odległości około $1,5\ \text{m}$ od jezdni (profil 1, punkty pomiarowe 3 i 9) na głębokości około $1,2\ \text{m}$ licząc od poziomu terenu. Rezystywność gruntu w przypadku profilu 2 zlokalizowanego około $3,5\ \text{m}$ od krawędzi jezdni przekraczała $100\ \Omega\cdot\text{m}$ (Rys. 7b). Podobne minimalne wartości rezystywności zarejestrowano dla profilu nr 1, zlokalizowanego na północnej części przepustu nr DK2 (Rys. 8). W przypadku tego przepustu uzyskane wartości rezystywności nie przekraczały $100\ \Omega\cdot\text{m}$, większe wartości uzyskano w przypadku profilu 2. Rezystywność zasypki jest mniejsza w obszarze przypowierzchniowym, a większa na głębszych strefach zasypki. W celu porównania uzyskanych wartości rezystywności zasypki w przepustach z blach falistych wykonane zostały dodatkowe profile porównawcze zlokalizowane w pobliżu badanych przepustów, w których wartości nie przekraczały $100\ \Omega\cdot\text{m}$. Jednakże wartości te są wyższe od wartości minimalnych, uzyskanych z badań przepustów położonych na drogach krajowych oraz wojewódzkich i zamykają się w przedziale od 76 do $95\ \Omega\cdot\text{m}$ (Tabl. 2). Rezystywność zasypki gruntowej

The figures show that in case of the culverts located on the roads of a higher class (DK1), soil resistivity is in the range of $50\text{--}80\ \Omega\cdot\text{m}$, even at the depth of more than $2.5\ \text{m}$. However, in the case of the culvert located on the local road (DL1) it can be clearly seen that the backfill resistivity is higher ($> 180\ \Omega\cdot\text{m}$) and therefore it has a low corrosion threat. Obtained minimum resistivity of the research area was $30\ \Omega\cdot\text{m}$ (Fig. 7a, Table 2) and it was obtained during the spring tests of the DK1 culvert. The value was registered in the distance of about $1.5\ \text{m}$ from the road (profile 1, test points 3 and 9) at the depth of around $1.2\ \text{m}$ from the terrain level. Soil resistivity for the profile 2 located about $3.5\ \text{m}$ from the road edge was higher than $100\ \Omega\cdot\text{m}$ (Fig. 7b). Similar minimum resistivity values were registered for profile 1 located in the northern part of the DK2 culvert (Fig. 8). In the case of that culvert, obtained resistivity values were not higher than $100\ \Omega\cdot\text{m}$; higher values were obtained for profile 2. Backfill resistivity is lower in the terrain area and higher in the deeper backfill areas. Additional comparative profiles were made in the vicinity of the tested culverts whose values were not higher than $100\ \Omega\cdot\text{m}$, in order to compare resistivity values of the backfill in the corrugated steel plate culverts. However, these values are higher than the minimum values obtained from the research of the culverts located on the national and regional roads and they are closed in the 76 to $95\ \Omega\cdot\text{m}$ range (Table 2). Backfill resistivity decreases during spring surveys (Fig. 7 and 8), which is undoubtedly due to the increased salinity (mainly sodium chloride, used for winter road maintenance)

zmniejsza się podczas badań wiosennych (Rys. 7 i 8), co jest niewątpliwie spowodowane jej zwiększonym zasoleniem (głównie chlorkiem sodu – używanym do zimowego utrzymania dróg) i większą wilgotnością w porównaniu do okresu letniego. Zauważono również prawidłowość polegającą na tym, że zasypka gruntowa wokół przepustów położonych na drogach o wyższej klasie (krajowych i wojewódzkich) wykazuje niższe wartości rezystywności, czyli większe zagrożenie korozyjne, niż w przypadku przepustów na drogach lokalnych, co może potwierdzać wpływ środków używanych do zimowego utrzymania dróg. Największe wartości przewodnictwa elektrycznego mają grunty alkaliczne, czyli takie, które zawierają roztwory wodorotlenków litowców i wapnia oraz węglanów sodu, potasu, amonu, a także roztwór amoniaku (woda amoniakalna). W Tabelicy 3 przedstawiono wpływ rezystywności gruntu i zawartości soli na szybkość korozji stali. Grunty nieskaliste mineralne położone głębiej, tj. poniżej poziomu terenu, wykazują z reguły największą rezystywność, tj. z przedziału 100-400 $\Omega \cdot m$. Natomiast w przypadku warstw powierzchniowych położonych bliżej jezdni wartość rezystywności jest mniejsza (30-100 $\Omega \cdot m$). Ze względu na rodzaj zabezpieczenia antykorozyjnego stalowych przepustów o ich trwałości decyduje także szybkość ubytku powłoki cynkowej. W Tabelicy 4 przedstawiono ubytek grubości powłoki cynkowej w zależności od rezystywności gruntu.

and higher humidity compared to the summer period. It was also observed that the backfill round the culverts located on the road of a higher class (national and regional) has lower resistivity values and a greater corrosion threat that it is in the case of the culverts on the local roads, which may confirm the influence of the substances used to maintain the roads in the winter. Alkaline soils have the greatest electric conduction values. These are the soils which contain the solution of alkali metals and calcium hydroxides, sodium, potassium and ammonium carbonates and ammonia solution (ammonia water). Table 3 shows the influence of soil resistivity and salt content on the speed of steel corrosion. Non-rocky mineral soils located deeper, that is below the terrain level, usually have the highest resistivity of around 100-400 $\Omega \cdot m$. The resistivity is lower (30 - 100 $\Omega \cdot m$) in the case of soil layers located closer to the roadway. The durability of steel culverts depends on a type of anticorrosive protection and is determined as well by the speed of the loss of the zinc coating. Table 4 presents the decline of the zinc coating thickness depending on the soil resistivity.

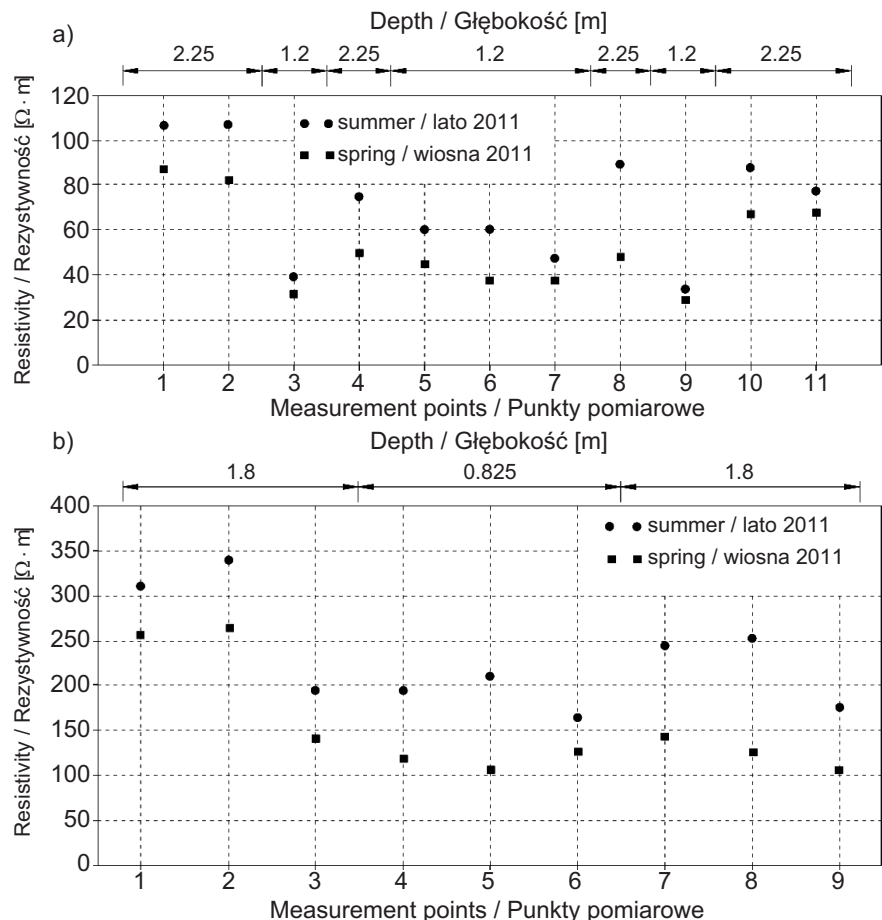


Fig. 7. Backfill resistivity in the culvert no. DK1 at various depths in two test periods (summer and spring) for two selected profiles: a) 1 and b) 2

Rys. 7. Rezystywność zasypki gruntowej w przepuście nr DK1 na różnych głębokościach w dwóch okresach badawczych (latem i wiosną) dla dwóch wybranych profili: a) 1 i b) 2

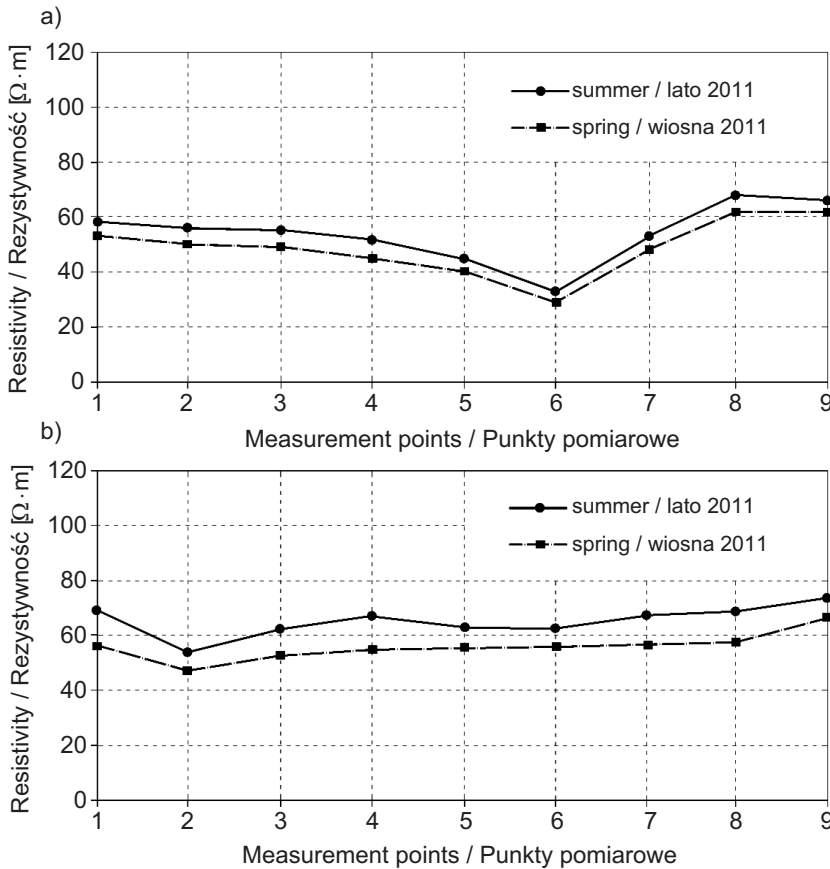


Table 4. Loss of zinc coating thickness depending on the soil resistivity according to the Australian standard [20]
 Tablica 4. Ubytek grubości powłoki cynkowej w zależności od rezystywności gruntu według normy australijskiej [20]

Resistivity Rezystywność [$\Omega \cdot m$]	Loss of zinc coating [$\Omega \cdot m/year$] Ubytek powłoki cynkowej [$\Omega \cdot m/rok$]
< 5	> 3.5
5-10	1.5-3.5
10-20	1.3-1.5
20-50	0.9-1.5
> 50	< 0.9

Fig. 8. Course of the backfill resistivity at the depth 2.25 for the culvert no. DK2 in two test periods (summer and spring) for two selected profiles: a) 1 and b) 2
 Rys. 8. Przebieg rezystywności zasytki gruntowej na głębokości 2,25 m dla przepustu nr DK2 w dwóch okresach badawczych (latem i wiosną) dla dwóch wybranych profili: a) 1 i b) 2

Table 3. Connection between corrosivity of the upper ground layers (water extract 1:1) and their electrical resistivity (pH > 6) [19]
 Tablica 3. Zależność korozyjności górnych warstw gruntowych (wyciąg wodny 1:1) od ich oporu elektrycznego (pH > 6) [19]

Soil resistivity Rezystywność gruntu	Salt content Zawartość soli	Corrosivity Korozyjność	Average rate of steel corrosion [$\Omega \cdot m/year$] Średnia szybkość korozji stali [$\Omega \cdot m/rok$]
< 1	> 7500	very high / bardzo wysoka	> 100
1-10	7500-750	high / wysoka	100-30
10-100	750-75	low / niska	30-4
> 100	< 75	very low / bardzo niska	< 4

Zasyпка gruntowa zastosowana do budowy analizowanych przepustów po okresie około 10 lat eksploatacji wykazuje niższą rezystywność w okresie wiosennym niż letnim. Biorąc pod uwagę fakt, że grunty stosowane do budowy tych przepustów były niekorozyjne, tj. mają wysoką rezystywność, uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na możliwość wystąpienia zagrożenia korozją ziemną. Dotyczy to głównie przepustów położonych na drogach krajowych i wojewódzkich, w których minimalne rezystywności są z zakresu 30-53 $\Omega \cdot m$, co zgodnie z [17 i 18] świadczy o agresywności zasytki gruntowej.

After 10 years of service, the soil backfill used in the construction of the analysed culverts showed lower resistivity in the spring than in the summer period. Considering the fact that the soils used in the construction of the culverts were non-corrosive, i.e. they had high resistivity, the obtained results indicate explicitly the possibility of soil corrosion occurrence. This concerns mainly the culverts which are situated on the national and regional roads, whose minimum resistivity is around 30-35 $\Omega \cdot m$, what is the evidence of the backfill aggressiveness according to [17, 18].

4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań rezystywności zasypki gruntowej wokół stalowych przepustów z blach falistych sformułowano następujące wnioski:

1. Pomiarzy terenowe rezystywności zasypek gruntowych wskazują, że ich minimalna wartość wynosi $30 \Omega \cdot m$, tzn. występuje wysokie zagrożenie korozją ziemną. Minimalną rezystywność uzyskano w strefach przypowierzchniowych dla profilu nr 1 przy jezdni (dla przepustów położonych na drogach krajowych i wojewódzkich), a maksymalną w obszarach położonych głębiej i w obszarach profili zlokalizowanych na końcach przepustów.
2. Uzyskane wyniki rezystywności zasypek gruntowych świadczą o zmianie wielkości tego parametru w porównaniu do wielkości pierwotnych (z okresu budowy przepustów).
3. W badanych przepustach występuje zagrożenie korozją ziemną. Dotyczy to głównie obiektów położonych na drogach krajowych i wojewódzkich, co prawdopodobnie związane jest z wykorzystywaniem na tych drogach środków do zimowego utrzymania. Jednak nie zaobserwowano jeszcze perforacji stalowej konstrukcji przepustów z powodu krótkiego czasu ich eksploatacji. W celu sformułowania bardziej szczegółowych wniosków należy kontynuować badania rezystywności na tych przepustach, wzbogacone o badanie oznaczenia stężenia czynników korozyjnych (chlorków, siarczanów, siarczków) i napowietrzania.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Bęben D.*: Badania doświadczalne kolejowego przepustu z blach falistych pod obciążeniem eksploatacyjnym przy wykorzystaniu radaru interferencyjnego. *IBDiM, Drogi i Mosty*, **10**, 1-2, 2011, 5-20
- [2] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania doświadczalne stalowej powłoki mostu drogowego podczas zasypywania gruntem. *IBDiM, Drogi i Mosty*, **3**, 2, 2004, 15-39
- [3] *Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richard G.*: Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, **83**, 2, 2005, 173-193
- [4] *Archie G.E.*: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **146**, 1, 1942, 54-61
- [5] *Abu-Hassanein Z.S., Benson C.H., Boltz L.R.*: Electrical resistivity of compacted clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, **122**, 5, 1996, 397-406
- [6] PN-EN ISO 12944-2:2001 Farby i lakiery. Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich
- [7] *Dąbrowski J., Mrówka M., Suwart C.*: Specjalna stacja ochrony katodowej kompensująca oddziaływania prądów błędzących. IX Krajowa Konferencja Polskiego Komitetu Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”, Zakopane, 7-9 czerwca 2006
- [8] *Bartoszewski M., Filipowicz S.F.*: Wybrane zagadnienia ochrony katodowej rurociągów przed korozją. *Prace Instytutu Elektrotechniki*, **232**, 2007, 97-112

4. CONCLUSIONS

As a result of resistivity research of the backfill around the corrugated steel plate culverts the following conclusions were drawn:

1. Field measurements of the backfill resistivity show that its minimum value is $30 \Omega \cdot m$ which means there is a great threat of soil corrosion. The minimum resistivity was obtained in soil layers near terrain level for profile 1 by the roadway (for culverts located on national and regional roads) and the maximum resistivity was obtained in deeper layers in the areas of profiles located at the ends of the culverts.
2. Obtained results of the backfill resistivity prove the change of this parameter value in comparison with the original values (from the culverts construction period).
3. In the tested culverts there is a threat of soil corrosion. It concerns mainly the objects located on the national and regional roads, which is probably related to the use of substances needed to the winter maintenance of these roads. However, the perforation of the steel structure of the culverts has not been observed yet as the exploitation time was too short. In order to formulate more detailed conclusions it is necessary to continue the resistivity research of the culverts. Further research should be expanded by determining the concentration of corrosion factors (chlorides, sulphates and sulphides) and aeration.

- [9] *Cunat P.J.*: Corrosion Resistance of Stainless Steels in Soils and in Concrete, Plenary Days of the Committee on the Study of Pipe Corrosion and Protection. Ceacor, Biarritz, October 2001
- [10] *Usowicz B.*: Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym. *Acta Agrophysica*, **29**, Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin, 2000
- [11] *McCarter W.J., Blewett J., Chrisp T.M., Starrs G.*: Electrical property measurements using a modified hydraulic oedometer. *Canadian Geotechnical Journal*, **42**, 2, 2005, 655-662
- [12] *Kearey P., Brooks M., Hill I.*: An introduction to geophysical exploration. Blackwell Science, Oxford, 2002
- [13] *Reynolds J.M.*: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley and Sons, New York, 2011
- [14] *Bęben D., Mańko Z.*: Badania dynamiczne mostu powłokowo-gruntowego z blach falistych. *IBDiM, Drogi i Mosty*, **7**, 1-2, 2008, 5-27
- [15] *Lech M., Garbulewski K.*: Określanie porowatości gruntów niespoistych na podstawie pomiarów oporności elektrycznej. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, **46**, 4, 2009, 48-56
- [16] *Janusz L., Madaj A.*: Obiekty inżynierskie z blach falistych. Projektowanie i wykonawstwo. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [17] PN-EN 12501-1:2005 Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Ryzyko wystąpienia korozji ziemnej. Część 1: Postanowienia ogólne
- [18] PN-EN 12501-2:2005 Ochrona materiałów metalowych przed korozją. Ryzyko wystąpienia korozji ziemnej. Część 2: Materiały ze stali niskostopowych i niestopowych
- [19] *Wranglen G.*: Podstawy korozji i ochrony metali. WNT, Warszawa, 1985
- [20] AS/NZS 2041:1998 Australian/New Zealand Standard. Buried corrugated metal structures