

Nieniszcząca ocena zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej z wykorzystaniem pomiaru oporności betonu

Mgr inż. Łukasz Sadowski, Instytut Budownictwa, Politechnika Wrocławska,
Prof. Stephen Millard, Department of Engineering, University of Liverpool

1. Wprowadzenie

Korozja stali w betonie jest główną przyczyną ryzyka utraty integralności strukturalnej konstrukcji żelbetowych. Koszty związane z zarządzaniem i utrzymaniem tych budowli rosną w ostatnich latach zdecydowanie i osiągnęły znaczący poziom w stosunku do ogółu kosztów związanych z problemami budownictwa [3, 7]. To powoduje, że korozja stali zbrojeniowej stała się najważniejszym problemem dotyczącym przemysł budowlany w ostatnich latach. Zasadne jest wobec tego wykorzystanie badań nieniszczących w diagnostyce korozji zbrojenia w istniejących konstrukcjach żelbetowych. Jedyną metodą, która w sposób bezpośredni może dać wiarygodny wynik jest metoda pomiaru natężenia prądu korozyjnego [1, 10, 11]. Metoda ta wymaga jednak połączenia ze stałą zbrojeniową. Wyróżniamy wiele metod pośrednich, takich jak pomiar rozkładu potencjału stacjonarnego na powierzchni konstrukcji żelbetowej [6], analizę gradientu potencjału stacjonarnego, pomiar gęstości prądu korozyjnego, pomiar rezystywności betonowej otuliny [2, 3, 4, 5] czy metody radiograficzne. W niniejszym artykule zawarta jest próba oceny stanu zagrożenia

korozyjnego zbrojenia za pomocą dwóch metod pomiaru oporności betonowej otuliny. Wykorzystano znaną metodę Wennera oraz nową metodę, która służy do pomiaru oporności betonu, ale z wykorzystaniem półogniw miedziowo-siarczanowych jako środków miejsc kontaktu. Najważniejszą zaletą jest to, że metody te nie wymagają bezpośredniego połączenia ze zbrojeniem [8].

2. Opis metody Wennera i nowej metody pomiaru oporności betonowej otuliny

2.1. Metoda Wennera

Metoda ta została opracowana w 1916 roku przez Wennera i początkowo była wykorzystywana do pomiaru rezystywności gruntu [9]. Po raz pierwszy technikę tę zastosowano w badaniach konstrukcji żelbetowych w latach siedemdziesiątych i jest ona wykorzystywana do dnia dzisiejszego (rys. 1). Pomiar rezystywności może dać jedynie wska-

zówkę, w którym miejscu możemy spodziewać się korozji ze względu na niewielką oporność betonu. Oporność betonu ρ można wyliczyć wg [9] za pomocą równania Stern'a i Geary'ego:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (1)$$

gdzie:

a – stała odległość pomiędzy miejscami kontaktu [cm]

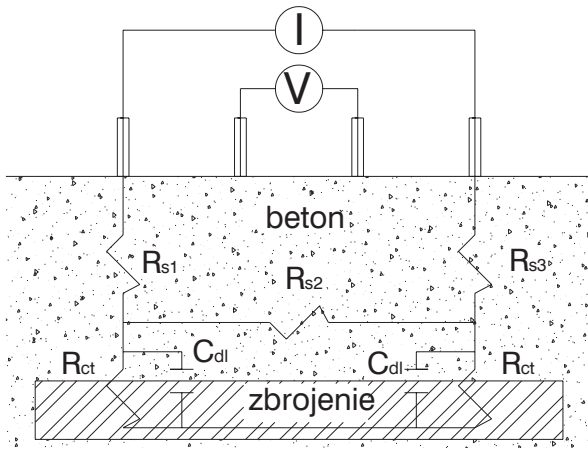
V – różnica potencjałów [V]

I – natężenie prądu inicjującego [A]

Dla stałej odległości „ a ” inicjowany jest niewielki prąd „ I ”, który przepływa przez dwa środkowe punkty kontaktu przyrządu z betonem.



Rys. 1. Pomiar w praktyce oporności betonu metodą Wennera [12, 13]



Rys. 2. Schemat obwodu elektrycznego w metodzie Wennera

W wyniku różnicy potencjałów „V” mierzona jest oporność betonu (rys. 2). Jest ona regulowana przez prąd elektryczny, który przepływa między anodowymi i katodowymi obszarami zbrojenia. Pomiaru są wykonywane przy użyciu prądu zmiennego i częstotliwości około 1000 Hz (rys. 3).

Oporność betonu R_c wg [4] jest określona równaniem:

$$R_c = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} \quad (2)$$

gdzie:

R_{s1} , R_{s2} , R_{s3} – oporności betonu w poszczególnych gałęziach obwodu elektrycznego [kΩ]

Jest to wartość, jaką otrzymujemy przy absencji stali zbrojeniowej (rys. 2). Pomiar oporności betonu R_c mierzony bezpośrednio nad stałą zbrojeniową jest bardziej skomplikowany i można go opisać zależnością (3):

$$R_c = \frac{R_{s1} + R_{s3} + (2R_{s2}R_{ct})}{2R_{ct} + R_{s2} + C_{dl}R_{ct}R_{s2}} \quad (3)$$

gdzie:

R_{ct} – oporność betonu na styku stali zbrojeniowej i betonu [kΩ]

C_{dl} – pojemność elektryczna [F]

Jeżeli wartość R_{ct} jest wysoka, to korozja jest mało prawdopodobna. Z drugiej strony, jeśli przyjmuje ona niskie wartości można spo-

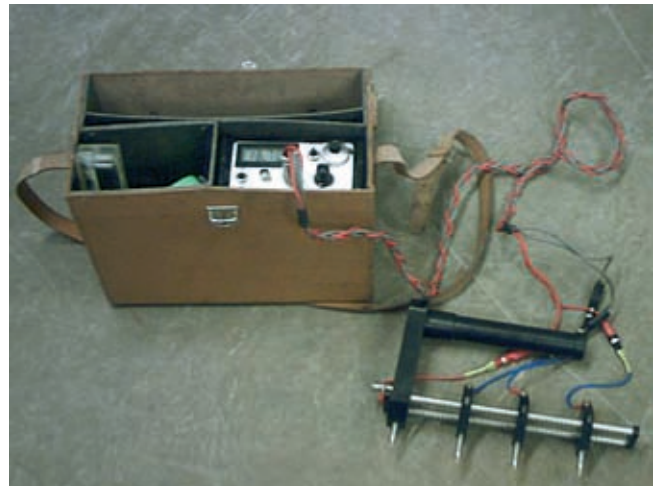
dziewać się korozji. Dla niskich częstotliwości poniżej 10 Hz wartość pojemności elektrycznej C_{dl} przyjmuje wartości pomijalne. W praktyce większość przypadków stosuje prąd o niskiej częstotliwości i równanie (3) przyjmuje postać zależności:

$$R_c = \frac{R_{s1} + R_{s3} + (2R_{s2}R_{ct})}{2R_{ct} + R_{s2}} \quad (4)$$

2.2. Nowa metoda pomiaru oporności betonu

Na rysunku 4 przedstawiono schemat nowej metody pomiaru rezystywności betonu z wykorzystaniem prądu stałego. Zastosowano dwa półogniwa miedziowo-siarczanowe w środkowych miejscach kontaktu. Za ich pomocą mierzy się różnice potencjałów (rys. 4a). Przy użyciu elektrody pomiarowej i elektrody roboczej, czyli dwóch zewnętrznych miejsc kontaktu generuje się wzorem metody impulsu elektrostatycznego niewielki impuls elektryczny. Częstotliwość użytego prądu to około 300 Hz. Zastosowany prąd jest prądem stałym. W wyniku różnicy potencjałów V między użytymi półogniwami otrzymuje się wartość rezystancji R_{puls} betonowej utuliny wg równania:

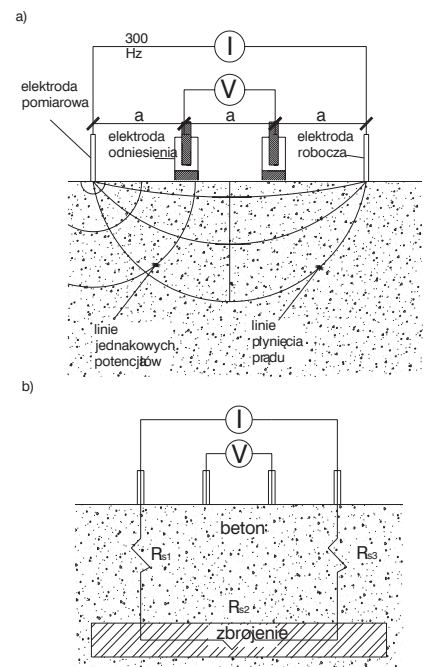
$$R_{cpuls} = R_{s1} + R_{s2} + R_{s3} \quad (5)$$



Rys. 3. Urządzenie do pomiaru rezystywności betonu (CNS Equipment)

Wartość oporności R_{cpuls} będzie wobec tego zawierać się pomiędzy opornością mierzona nad i poza zbrojeniem w przypadku pomiaru aparatem Wennera, który wykorzystuje prąd zmienny (rys. 4b).

Należy przypuszczać, że wartość bliższa R_c nad zbrojeniem oznacza korozję. Jeśli R_{cpuls} jest zbliżone do R_c poza zbrojeniem, można wnio-



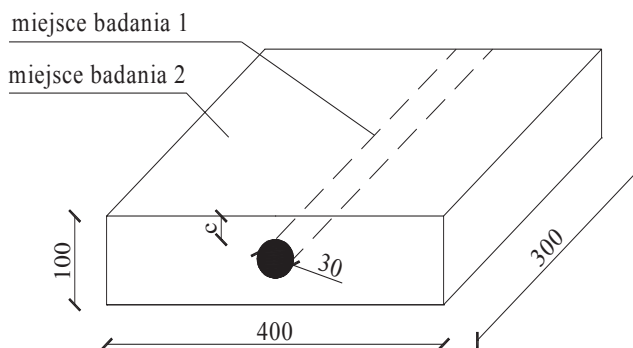
Rys. 4. Pomiar oporności betonu nową metodą:

a) schemat przepływu prądu elektrycznego w betonie

b) schemat obwodu elektrycznego w żelbecie



Rys. 5. Widok stanowiska pomiarowego



Rys. 6. Badana próbka
c – grubość otuliny (10 mm, 20 mm i 30 mm)

skować o braku korozji. Skomplikowana może okazać się sytuacja, gdy R_{cpuls} będzie dokładnie pośrodku. Wtedy trudno jest jednoznacznie określić, czy stal koroduje, czy nie i jaki dokładnie jest stopień korozji.

Ponadto należy pamiętać, że:

1. beton nie jest w pełni materiałem homogenicznym;
2. beton nie jest elektrycznie jednolitym materiałem w szczególności, jeśli mamy do czynienia z betonem zbrojonym.

Generator prądu zmiennego powinien być podłączony do elektrody pomiarowej oraz elektrody odniesienia (rys. 5). Natężenie prądu powinno zawierać się w przedziale 0,01mA i 1mA. W przypadku kontynuowania pracy nad tym urządzeniem, powinno się wziąć pod uwagę poniższe wytyczne:

- Podczas pomiaru na obiekcie należy uprzednio zapoznać się z rysunkiem rozmieszczenia zbrojenia oraz najlepiej zbadać rzeczywistą średnicę zbrojenia oraz otulinę. Należy unikać miejsc krzyżowania się zbrojenia. Pomiary wykonywać na prostych odcinkach zbrojenia.
- Pomiary powinny być wykonywane w stałej temperaturze i najlepiej w tym samym czasie. Technika zapewnia pomiar jedynie w danym momencie i nie uwzględnia zmieniających się parametrów środowiska oraz powierzchni betonu (takich jak wilgotność, stopień PH itp.).

- Pomiar nie może być wykonany na bardzo mokrych powierzchniach. Jeśli powierzchnia jest zbyt wilgotna, odległość między miejscami kontaktu powinna być co najmniej 40 mm [6].

- Należy przed pomiarem dokładnie oczyścić powierzchnię betonu, ponieważ mogą istnieć pewne niedokładności związane z kontaktem między elektrodami a powierzchnią.

- Odległość między miejscami kontaktu „a” powinna być większa co najmniej 1,5 razy od maksymalnej średnicy użytego kruszywa, w celu uniknięcia pomiaru rezystywności pojedynczego ziarna kruszywa [2].

Weryfikacji pomiarów dokonano za pomocą znanej metody polaryzacji liniowej [1,10]. Zależność między wartością prądu korozyjnego I_{corr} a prawdopodobieństwem wystąpienia korozji podano w tabeli 1.

3. Część eksperymentalna

Badaniu poddano trzy próbki o wymiarach 40 cm x 30 cm x 10

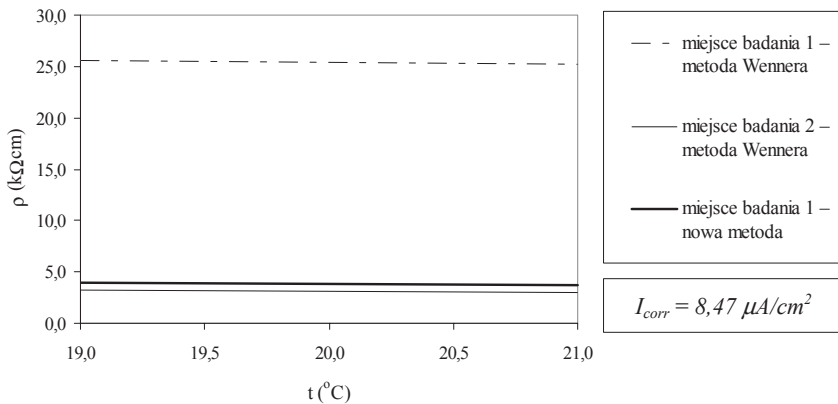
cm i średnicy zbrojenia w postaci pojedynczego pręta ze stali gładkiej o średnicy 10 mm. Próbkę różniły się grubością otuliny zbrojenia, która wynosiła 10, 20 i 30 mm (rys. 6). Dwie z nich były aktywnie korodujące, natomiast jedna była próbką pasywną. Zostało to zweryfikowane na podstawie wartości pomiaru prądu korozyjnego I_{corr} znaną metodą polaryzacji liniowej [1, 10].

Pomiary wykonano w dwóch miejscach:

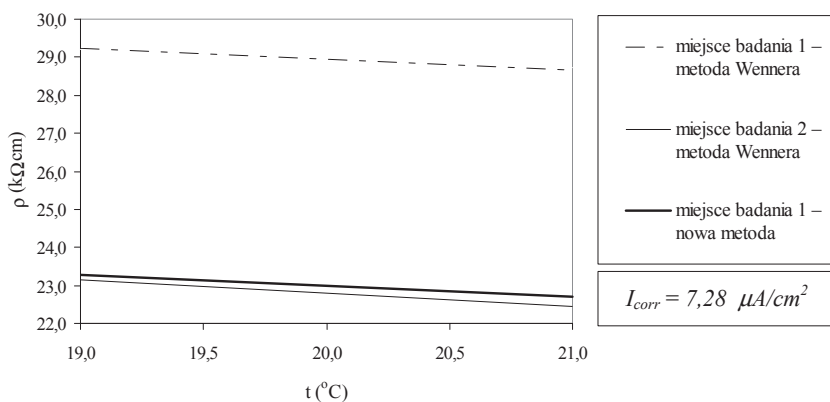
- Miejsce 1 – bezpośrednio nad zbrojeniem. Zrealizowano po trzy pomiary: nową metodą, urządzeniem Wennera oraz przy użyciu metody polaryzacji liniowej (LPR).
- Miejsce 2 – poza zbrojeniem. Wykonano trzy pomiary z wykorzystaniem urządzenia Wennera. Wyniki zostały przedstawione w postaci wykresów w postaci regresji liniowej wartości otrzymanych z pomiarów (rys. 7–9). Linia regresji powstała z badań nową metodą w miejscu badania 1 powinna zawierać się pomiędzy liniami regresji powstałymi

Tabela 1. Zależność między wartością prądu korozyjnego a prawdopodobieństwem wystąpienia korozji [1]

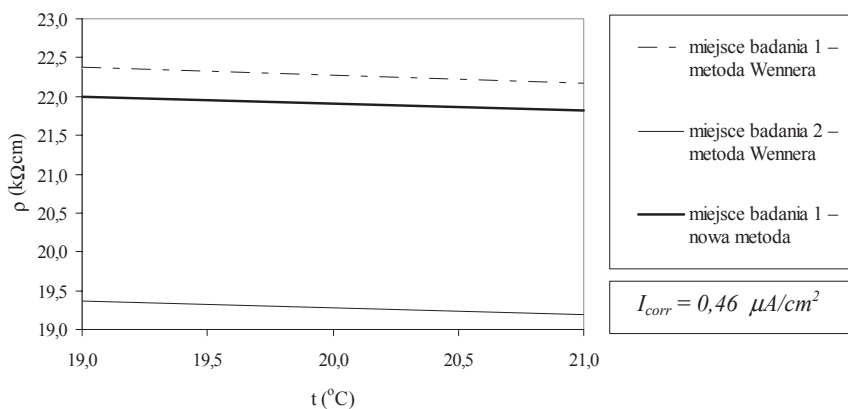
Wartość prądu korozyjnego I_{corr} [$\mu A/cm^2$]	Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji
$I_{corr} < 0,1$	niskie
$0,1 < I_{corr} < 0,5$	średnie
$0,5 < I_{corr} < 1,0$	wysokie
$I_{corr} > 1,0$	bardzo wysokie



Rys. 7. Średnie wartości z pomiarów na próbce o otulinie 10 mm (próbka korodująca – $I_{corr} = 8,47 \mu A/cm^2$)



Rys. 8. Średnie wartości z pomiarów na próbce o otulinie 30 mm (próbka korodująca – $I_{corr} = 7,28 \mu A/cm^2$)



Rys. 9. Średnie wartości z pomiarów na próbce o otulinie 20 mm (próbka pasywna – $I_{corr} = 0,46 \mu A/cm^2$)

z badań urządzeniem Wennera w miejscu 1 oraz w miejscu 2.

Wyniki uzyskane podczas pierwszego pomiaru okazały się obiecujące (rys. 7). Zaobserwowano

znaczne różnice między rezultatami uzyskanymi dzięki metodzie Wennera nad i poza zbrojeniem. Może to oznaczać efekt niewielkiej grubości otuliny. Jednocześnie oporność betonu wyznaczona przy

użyciu nowej metody jest zbliżona do mierzonej przez aparat Wennera nad zbrojeniem. Na tej podstawie można wnioskować o szybkiej korozji stali zbrojeniowej. Zostało to zweryfikowane za pomocą polaryzacji liniowej LPR. Prąd korozyjny I_{corr} wyniósł $8,47 \mu A/cm^2$, co wg Tabeli 1 oznacza bardzo wysokie prawdopodobieństwo występowania korozji.

Podczas drugiego pomiaru na próbce aktywnie korodującej otrzymana wartość za pomocą nowej metody mieściła się nadal pomiędzy wartościami mierzonymi aparatem Wennera nad i poza zbrojeniem (rys. 8). Można wnioskować o szybkiej korozji stali zbrojeniowej, co zostało zweryfikowane za pomocą metody polaryzacji liniowej LPR. Bardzo wysokie prawdopodobieństwo występowania korozji potwierdza prąd korozyjny I_{corr} , który wyniósł $7,28 \mu A/cm^2$. Zaobserwowano istotną wadę metody. W sytuacji, gdy stal jest położona głębiej, trudniej jest zaobserwować jej wpływ na wartość otrzymanej oporności. Warto jest zauważyć, że w rzeczywistych przypadkach różnica między wynikami uzyskanymi nad oraz poza zbrojeniem może być jeszcze mniejsza. Pozostaje pytanie, jaka powinna być interpretacja wyników w sytuacji, gdy powyższa wartość wystąpi poza tym przedziałem?

Rezultaty otrzymane na trzeciej próbce pokazują, że nowa metoda daje wiarygodne wyniki nawet wtedy, gdy mamy do czynienia z próbką w stanie pasywnym. W tym przypadku wartość uzyskana za pomocą nowej metody jest bliższa wartości wg urządzenia Wennera poza zbrojeniem i oznacza to, że stal prawdopodobnie nie koroduje. Niewielki prąd korozyjny I_{corr} równy $0,46 \mu A/cm^2$ otrzymany za pomocą LPR potwierdza tę tezę (tabela 1). Głównym problemem w przypadku próbek pasywnych jest wspomniany już fakt, że wartości uzyskane za pomocą metody Wennera są blisko siebie.

4. Wnioski

Na podstawie badań i analiz można stwierdzić, że metoda daje wiarygodne wyniki zarówno w odniesieniu do próbek aktywnych, jak i pasywnych. W odniesieniu do realnych konstrukcji może nastąpić interakcja pomiędzy rejonami korodującymi i niekorodującymi. Nie zostało to zasymulowane podczas testów laboratoryjnych. Nowa metoda może być zastosowana do wyznaczania stopnia korozji stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetonowych, bez konieczności bezpośredniego połączenia elektrody ze zbrojeniem. Rezultaty uzyskiwane za pomocą nowej metody w połączeniu z metodami uzupełniającymi mogą dać wiarygodny system wnioskowania o korozji konstrukcji. Należy jednak krytycznie podchodzić do otrzymanych wyników i stosować wymienione

wytyczne oraz mieć świadomość nie tylko zalet, ale przede wszystkim wad, jakie zostały podkreślone w niniejszym opracowaniu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrade C., Alonso C., Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, Vol. 37, November 2004, str. 623–643
- [2] Gowers K. R., Millard S. G., Measurement of concrete resistivity for assessment corrosion severity of steel using Wenner technique. *ACI Materials Journal*/ September – October 1999
- [3] Manning, David G., (1995). „Detecting Defects and Deterioration in Highway Structures.” National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice, str. 118
- [4] Millard S.G., Harrison J. A., Edwards A. J., Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assessment of corrosion risk. *ACI Materials Journal* 1989
- [5] Monteiro J.M., Morrison F., Frangos W., Nondestructive measurement of corrosion

- state reinforcing steel in concrete. *ACI Materials Journal*/ November–December 1998
- [6] Moczko A., Łakomy T., Metody nieniszczącej diagnostyki zagrożenia korozyjnego stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych. *Polski Cement*, 2002, Nr 2 (18), str. 48–50
 - [7] Ramniceanu A., Correlation of Corrosion Measurements and Bridge Conditions with NBIS Deck Rating. 2004 Blacksburg, Virginia
 - [8] Sadowski Ł., Współczesne metody nieniszczącej oceny zagrożenia korozyjnego żelbetonowych konstrukcji budowlanych. Praca magisterska. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 2007
 - [9] Stern, M. & Geary, A. L., „Electrochemical Polarization. A Theoretical Analysis of Shape of Polarization Curves”, *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 104, 1957, str. 56–63
 - [10] Zybura A., Jaśniok T., Diagnostyka stanu korozyjnego zbrojenia w żelbetonowych obiektach komunikacyjnych. *Drogownictwo*, nr 4, 2000, str. 109–116
 - [11] Zybura A., Jaśniok T., Śliwka A., Badanie możliwości ograniczenia korozji zbrojenia inhibitorami migrującymi. *Przegląd Budowlany* 9/2006 str. 40–45
 - [12] Materiały reklamowe firmy NDT James Instruments
 - [13] Materiały reklamowe firmy Proceq

PRODUCENT PREFABRYKATÓW ŻELBETOWYCH I STRNOBETONOWYCH

Firma Betonex Sp. z o.o.

Jesteśmy prężnie rozwijającym się producentem prefabrykatów żelbetonowych i strunobetonowych. Wykonujemy elementy dla obiektów przemysłowych, handlowych i biurowych. Wdrażamy najnowsze technologie prefabrykacji sprawdzone na rynku włoskim przez jednego z naszych udziałowców PRECOMPRESSI VALSUGANA wchodzącego w skład grupy INDUSTRIE MAURIZIO PERUZZO. Grupa posiada zakłady produkcyjne we Włoszech, Rumunii i Bułgarii.

W palecie naszych produktów znajdziecie Państwo:

- słupy,
- belki i dźwigary sprężone,
- sprężone płyty stropowe TT,
- płatwie dachowe
- ściany i podwaliny

Dla Państwa wygody naszą ofertę możemy uzupełnić o:

- koncepcje i techniczne rozwiązania konstrukcji prefabrykowanych
- projektowanie
- dostawy elementów na budowę
- kompleksowy montaż obejmujący konstrukcję oraz obudowę ścian i dachu



43-382 Bielsko-Biała, ul. Ks. J. Londzina 29

tel. +48 033 49 95 100, fax +48 033 49 95 101, e-mail: info@betonex.pl

www.betonex.pl