

# Posadowienie wysokich wież elektrowni wiatrowych o mocy 2,0–2,5 MW na słabym podłożu gruntowym

■ mgr inż. Tomasz Pardela, Menard Polska Sp. z o.o.

Rosnąca liczba inwestycji związanych z energetyką wiatrową potwierdza konieczność pogłębienia wiedzy na temat poszczególnych etapów ich budowy. Artykuł odnosi się do zagadnienia często zaniedbanego i niewystarczająco zrozumianego przez inwestorów i projektantów, tj. posadowienia fundamentu elektrowni na podłożu niespełniającym warunków nośności oraz użyteczności.

Mimo że w Polsce pierwsze elektrownie wiatrowe były budowane na początku lat 90. XX w., do dziś nie zostały opracowane i rozpowszechnione w języku polskim instrukcje i wytyczne projektowe dotyczące tych specjalistycznych konstrukcji. Obcojęzyczna literatura (duński DN, holenderska NEN, normy hiszpańskie czy niemiecki DIN) wskazuje, jak w bezpieczny i ekonomiczny sposób zwymiarować poszczególne elementy elektrowni wiatrowej. Niestety, najczęściej jest ona trudno dostępna dla polskiego projektanta. Warto tutaj podkreślić, że często stosowana norma PN *Posadowienie bezpośrednio* nie powinna być użyta do wyznaczenia parametrów posadowienia bezpośredniego elektrowni wiatrowej.

Zakres prac geotechnicznych, przyjęty model obliczeniowy, proces doboru technologii wzmocnienia to podstawowe czynniki wpływające na bezpieczne i ekonomiczne posadowienie tego rodzaju obiektów, które wpływają na sukces prowadzonej inwestycji.

## 1. Badania geotechniczne pod fundamenty turbin wiatrowych

Zakres i jakość prac geotechnicznych ma kluczowe znaczenie dla planowanych robót fundamentowych. Najczęściej badania te wykonane są w sposób pobieżny, co przyczynia się do przeszacowania rozwiązań projektowych lub narażenia na uszkodzenie konstrukcji w trakcie jej użytkowania. Mając na uwadze powyższe skutki, warto przytoczyć standardy wykonywanych badań, które stosowane na całym świecie prowadzą do optymalnych rozwiązań posadowień turbin wiatrowych.

Z uwagi na kształt fundamentu i zmienny charakter obciążeń (zarówno ich wielkość, jak i kierunek) konieczne wydaje się wykonanie trzech punktów badawczych pod jeden fundament elektrowni wiatrowej. Głębokość badań powinna być określona na podstawie głębokości wpływu naprężeń ( $H$ ), co szacuje się z zależności  $H = 2B$  (gdzie  $B$  jest średnicą fundamentu). W praktyce głębokość wystarczająca równa średnicy fundamentu (ok. 20,0 m) pozwala na optymalne zaprojektowanie posadowienia. W Polsce najczęściej wykorzystywane metody do badania parametrów gruntu in situ są sondowania dynamiczne (DPL, DPH), gdy badanie przeprowadzane jest w gruntach niespoistych. Dla gruntów spoistych pozostaje pobranie próbek i wykonanie badań laboratoryjnych. Alternatywą jest wykonanie sondowań statycznych CPT, lecz należy pamiętać, że tylko wysoka jakość badań gwarantuje miarodajne parametry zarówno w gruntach niespoistych, jak i spoistych. Stosowane są też badania z zastosowaniem stożka sejsmicznego SCPTU, pozwalające na określenie dynamicznych modułów odkształcenia podłoża. Zastosowanie tych badań może znacząco wpłynąć na ocenę warunków gruntowych pod poszczególnymi fundamentami. Dokumentacja geotechniczna jest jednym z głównych narzędzi

wykorzystywanych w pracy projektanta posadowienia, stąd w pierwszej kolejności od jakości wykonanych prac rozpoznania podłoża gruntowego zależy dalszy proces projektowy.

## 2. Krótki opis konstrukcji elektrowni wiatrowej

Elektrownie wiatrowe o mocy od 2,0 do 2,5 MW najczęściej mają ok. 100 m wysokości i fundamenty o zmiennej grubości w kształcie ośmiokąta opisanego na okręgu średnicy ok. 20 m. Schematem statycznym wieży elektrowni jest wspornik w formie grubościenniej rury stalowej, zakotwiony w fundamencie i przekazujący obciążenia na monolityczny fundament będący stopą płytową lub podporą palową. Fundament swoją masą zapewnia stateczność układu i przekazuje obciążenia na podłoże gruntowe. Podłoże gruntowe należy sprawdzić zarówno dla warunku nośności, jak i dla warunku użyteczności, tj. pod względem nierównomiernego osiadania i podatności na obciążenia dynamiczne.

Zgodnie z EC7 (ENV 1997-1:1994) mimośród wypadkowej siły pionowej powodujący szczelinę pomiędzy podłożem a podstawą fundamentu nie może przekroczyć 0,60 promienia okręgu wpisanego w ośmiokąt podstawy fundamentu przy jednoczesnym zachowaniu warunków dynamicznej sztywności obrotowej podłoża, określonych przez producenta turbin wiatrowych parametrem  $k_{\phi, dyn}$  (Nm/rad). Często to właśnie spełnienie warunku dynamicznej sztywności obrotowej wymusza zastosowanie wzmocnienia podłoża.

## 3. Technologie wzmocnienia podłoża pod fundamentami elektrowni wiatrowych

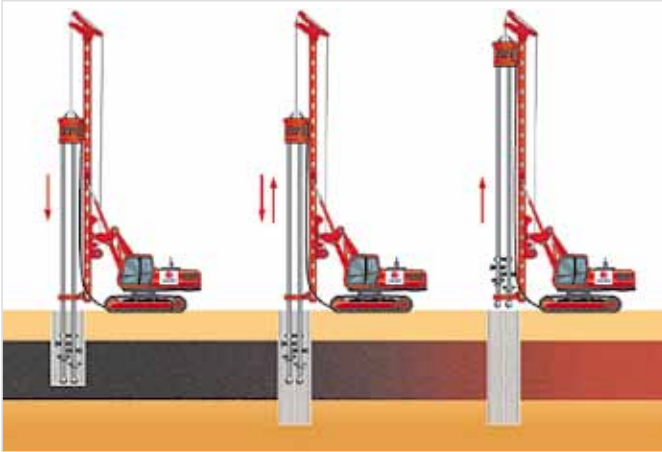
W większości przypadków podczas budowy farmy wiatrowej jest kilka lokalizacji wymagających zastosowania wzmocnienia podłoża. Dobór metody wzmocnienia podłoża jest pochodną kilku czynników. Pierwszym i w zasadzie najważniejszym jest budowa geologiczna na obszarze planowanej inwestycji. Kolejnym czynnikiem jest wielkość planowanej inwestycji. Liczba elektrowni wiatrowych, ich wysokość i wynikający z niej kształt fundamentu w znaczny sposób wpływają na koszty wykonania wzmocnienia podłoża, najczęściej nieuwzględniane na etapie planowania inwestycji. Stąd ciągle nowe rozwiązania i technologie przy wykonywaniu tego typu prac, które prowadzą do optymalizacji posadowienia. Trzecim czynnikiem jest wiedza i doświadczenie projektanta wzmocnienia podłoża. Od niego zależy zarówno koszt wzmocnienia, jak i poziom bezpieczeństwa zamierzonego rozwiązania. W większości przypadków brak wystarczającej wiedzy kończy się pokaźnym przeprojektowaniem konstrukcji, co niesie za sobą diametralne zwiększenie kosztów inwestycji.

Poniżej przedstawiono technologie, które mogą posłużyć do wzmocnienia podłoża gruntowego pod fundamentem turbiny

wiatrowej wysokiej mocy. Nie są to rozwiązania uniwersalne, każde ma swoje optymalne zastosowanie w odpowiednich warunkach gruntowych.

### 3.1. Kolumny w technologii wgłębnego mieszania gruntu DSM (*Deep Soil Mixing*)

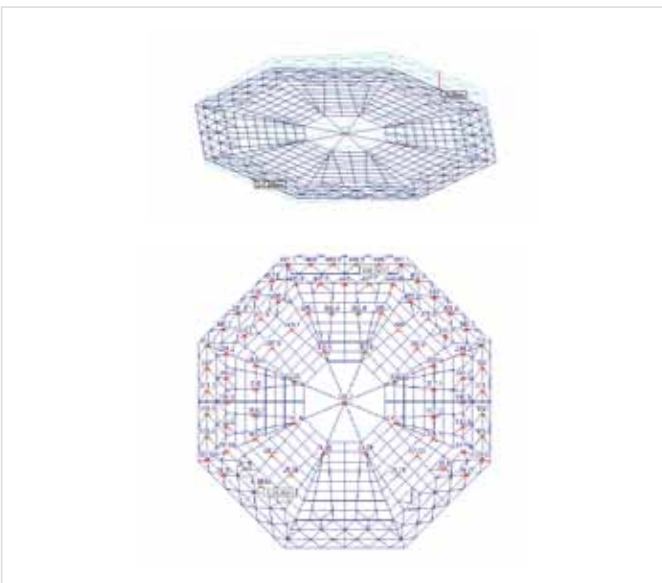
Idea kolumn DSM oparta jest na koncepcji poprawienia właściwości wytrzymałościowych gruntów występujących w podłożu poprzez wymieszanie ich z mieszanką cementową. Powstający w ten sposób tzw. cementogrunt charakteryzuje się znacznie wyższymi parametrami mechanicznymi i wytrzymałościowymi niż pierwotny grunt (ryc. 1).



Ryc. 1. Schemat wykonywania kolumn DSM typu tandem

Technologia wgłębnego mieszania gruntu polega na wprowadzeniu w podłoże mieszadła o specjalnej konstrukcji i uformowaniu kolumny DSM. Cały proces od momentu pogrążenia mieszadła do zakończenia formowania kolumny wspomagany jest wpływem zaczynu cementowego przez dysze znajdujące się na końcu żerdzi wiertniczej. Po osiągnięciu głębokości projektowej następuje faza formowania kolumny DSM przez tłoczenie dobrego do warunków gruntowych zaczynu cementowego. Skuteczne wymieszanie zaczynu z gruntem na całej długości formowanej kolumny jest zapewnione przez kilkukrotny proces pogrążania i podciągania obracającego się mieszadła.

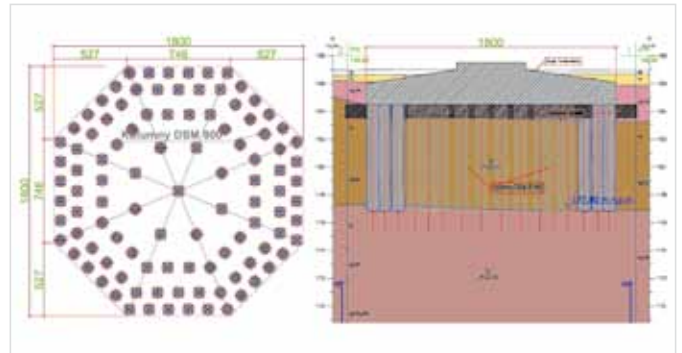
Dobór rozmieszczenia, liczby oraz średnicy kolumn DSM wynika z dokładnej analizy pracy fundamentu (ryc. 2).



Ryc. 2. Wyniki obliczeń maksymalnej siły na kolumnę DSM Ø 800 oraz widok deformacji płyty fundamentowej posadowionej na podłożu wzmocnionym

W zależności od przyjętego rozwiązania projektowego średnice kolumn wahają się od 60 do 120 cm, przy głębokości wzmocnienia od 4,0 do 12,0 m.

Na rycinie 3 przedstawiono rozwiązanie posadowienia na wzmocnionym podłożu w technologii kolumn DSM Ø 800 pod fundament elektrowni wiatrowej o średnicy 18,0 m.

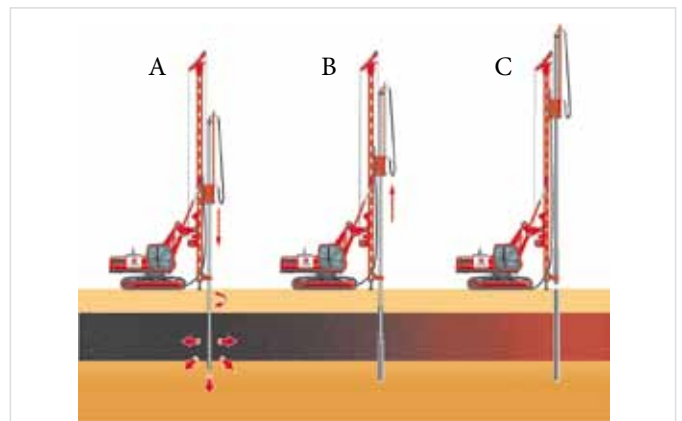


Ryc. 3. Przykładowy projekt wzmocnienia podłoża w technologii kolumn DSM

### 3.2. Kolumny przemieszczeniowe CMC (*Control Modulus Column*)

Wzmocnienie podłoża kolumnami CMC polega na stworzeniu kompozytu gruntu i kolumn betonowych. Specjalnie zaprojektowany świder przemieszczeniowy zamontowany na maszynie w trakcie wiercenia przemieszcza grunt w kierunku poziomym do osi otworu, co doprowadza do jego zagęszczenia w bezpośrednim sąsiedztwie formowanych kolumn i zapewnia lepszą współpracę kolumn ze wzmocnianym podłożem. Po przemieszczaniu gruntu poza obręb kolumny wykonywana jest pod ciśnieniem iniekcja mieszanki betonowej. Schematycznie proces wykonania kolumn CMC przedstawia rycina 4.

Zainstalowany w wiertnicy system komputerowy pozwala na monitoring wszystkich niezbędnych parametrów formowania kolumny, co daje pełną gwarancję jakości jej wykonania (ryc. 5).



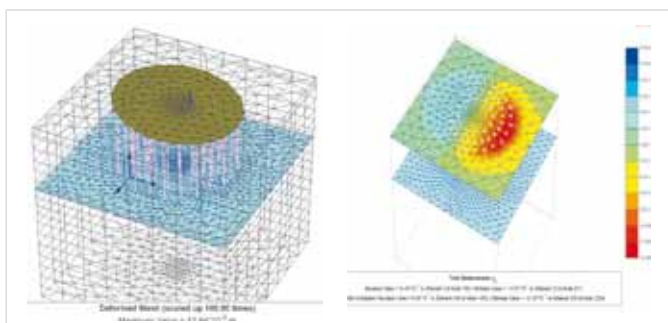
Ryc. 4. Schemat wykonywania kolumn CMC; a) pogrążenie świdra przemieszczeniowego wraz z rozepchnięciem gruntu, b) podanie mieszanki betonowej z równoczesnym wykręcaniem świdra, c) gotowa kolumna

Parametry wzmocnienia dobiera się na podstawie szczegółowej analizy pracy konstrukcji, najczęściej przeprowadzonej metodą elementów skończonych. Przedstawione na rycinach 6 i 7 wyniki obliczeń przeprowadzonych w programie Plaxis 3D pozwalają z dużą dokładnością określić optymalne rozmieszczenie kolumn, siły przypadające na poszczególne kolumny, przemieszczenia pionowe i poziome oraz przechył fundamentu. To właśnie przechył fundamentu często determinuje konieczność zastosowania wzmocnienia podłoża.

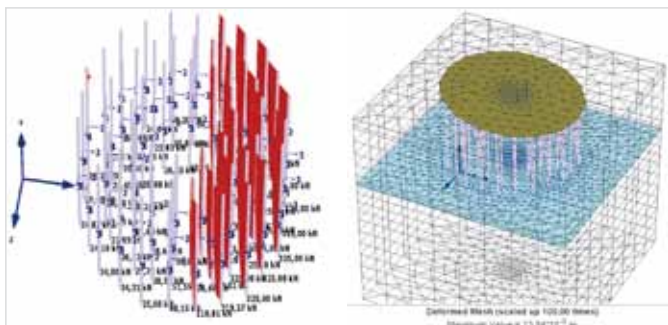




Ryc. 5. Widok wykonywania kolumn CMC pod fundamentem turbiny



Ryc. 6. Przemieszczenie fundamentu elektrowni wiatrowej na wzmocnionym podłożu kolumnami CMC



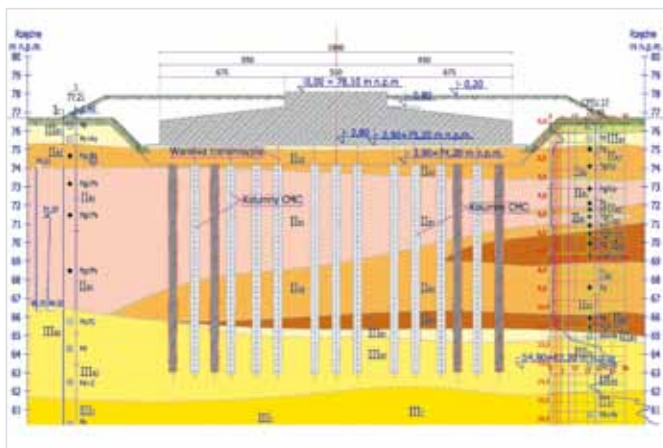
Ryc. 7. Siły w kolumnach oraz przemieszczenie fundamentu elektrowni wiatrowej na wzmocnionym podłożu kolumnami CMC

Zastosowanie technologii kolumn CMC może wiązać się z koniecznością uformowania warstwy transmisyjnej. Przenosi ona naprężenia z konstrukcji na głowice kolumn w sposób równomierny, jednocześnie minimalizując siły powodujące przebicie fundamentu. Warstwa ta zbudowana jest z dobrze zagęszczonego materiału niespoistego o parametrach wynikających z typu konstrukcji i warunków gruntowych. Na rycinie 8 przedstawiono przekrój fundamentu elektrowni wiatrowej posadowionej na kolumnach CMC.

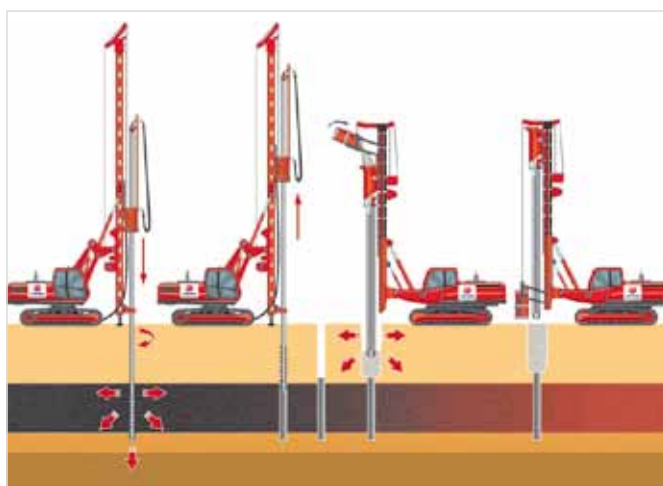
### 3.3. Kolumny typu BMC (*Bi-modulus Columns*)

Kolumny BMC są pewnego rodzaju uzupełnieniem technologii kolumn CMC. Jest to metoda wzmocniania podłoża gruntowego polegająca na wykonaniu sztywnych betonowych kolumn zwieńczonych głowicą żwirową. Zastosowanie kruszywa jako wypełnienia górnych części kolumny polepsza dystrybucję naprężeń z konstrukcji na wzmocnione podłoże. Nie występują wówczas niekorzystne koncentracje naprężeń. Tym samym dochodzi do optymalizacji zbrojenia w płycie fundamentowej. Na rycinie 9 przedstawiono schemat wykonania kolumn BMC.

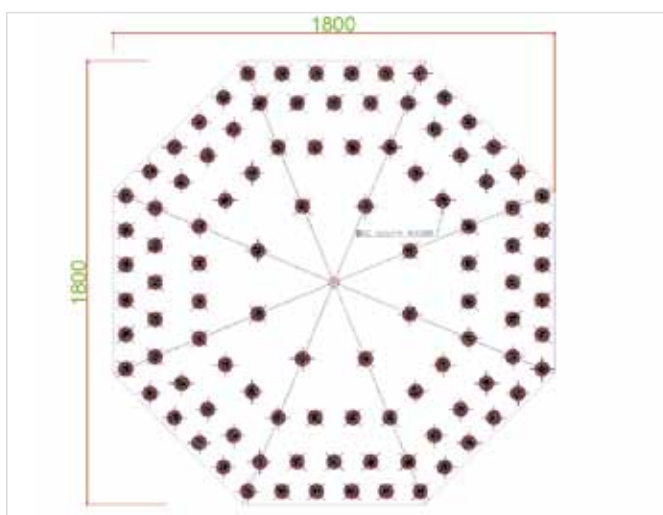
Kolumny Bi-modułowe łączą zalety kolumn żwirowych oraz kolumn betonowych. Z jednej strony nie przesztynniają podłoża gruntowego, a z drugiej nie stwarzają ryzyka wybożenia się



Ryc. 8. Przekrój fundamentu elektrowni wiatrowej posadowionej na kolumnach CMC



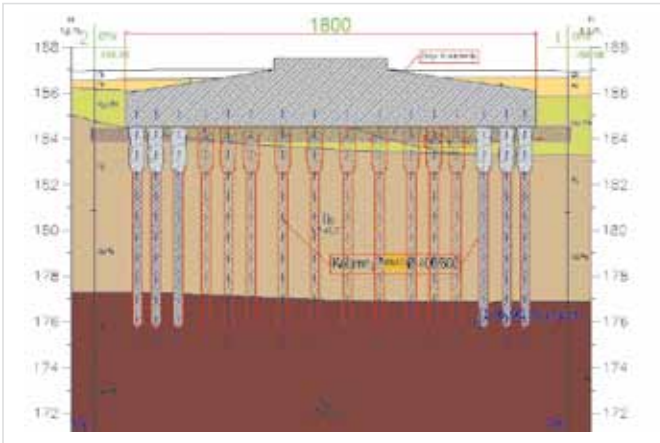
Ryc. 9. Schemat wykonania kolumn BMC



Ryc. 10. Rozmieszczeni kolumn BMC pod fundamentem elektrowni wiatrowej

lub wybruszenia kolumny. Przykład rozmieszczenia kolumn BMC pod fundamentem przedstawia rycina 10.

Trzon kolumn BMC jest wykonywany tak jak kolumny CMC o standardowej średnicy od 25 do 60 cm przy użyciu świda przeszczeniowego, który pograżony zostaje na wymaganej głębokości i wtedy wprowadzany jest iniekt do otworu. Dzięki temu, że grunt w trakcie wiercenia jest rozpychany i przemieszczany na boki, nie wydobywa się urobek. Za pomocą specjalnie zaprojektowanego wibratora wgłębny zamontowanego na jednostce sprzętowej tworzy się żwirową głowicę kolumny BMC. Etapy wykonywania głowicy żwirowej:



Ryc. 11. Przekrój fundamentu elektrowni wiatrowej posadowionej na podłożu wzmocnionym kolumnami BMC

- pogrążenie wibratora – następuje zagłębienie się w grunt wibratora do głębokości projektowej, najczęściej od 1,0 do 3,0 m, proces pogrążania często wzmagany jest podawaniem sprężonego powietrza lub wody;
- zasyp kruszywa – powstała w pierwszym etapie przestrzeń jest wypełniana kruszywem;
- dogęszczenie – podanego kruszywa realizowane krokami, najczęściej co 0,5 m, w ten sposób tworzy się kolumny o średnicy od 40 do 120 cm.

Wzmocnienie podłoża pod fundamentem elektrowni wiatrowej realizowane za pomocą technologii kolumn BMC nie wymaga tworzenia dodatkowej warstwy transmisyjnej, a fundament może być bezpośrednio posadowiony na wzmocnionym podłożu (ryc. 11).

### 3.4. Kolumny podatne Menarda MSC (Menard Susceptible / Supple Columns)

Kolumny podatne MSC są zaawansowanym technicznie wariantem kolumn żwirowych i iniekcyjnych. Wzmocnienie za pomocą wymienionych kolumn polega na utworzeniu w słabym podłożu inkluzji składającej się z trzonu o średnicy 0,15–0,32 m, cechującego się umiarkowaną sztywnością. Zastosowanie trzonu żądanej podatności w gruntach słabych zapewnia wyraźne ograniczenie osiadań całkowitych i różnicowych podłoża gruntowego oraz wpływa znacząco na poprawę warunków pierwszego stanu granicznego (spełnienie warunków nośności podłoża gruntowego).



Ryc. 13. Widok maszyn do wykonywania kolumn MSC

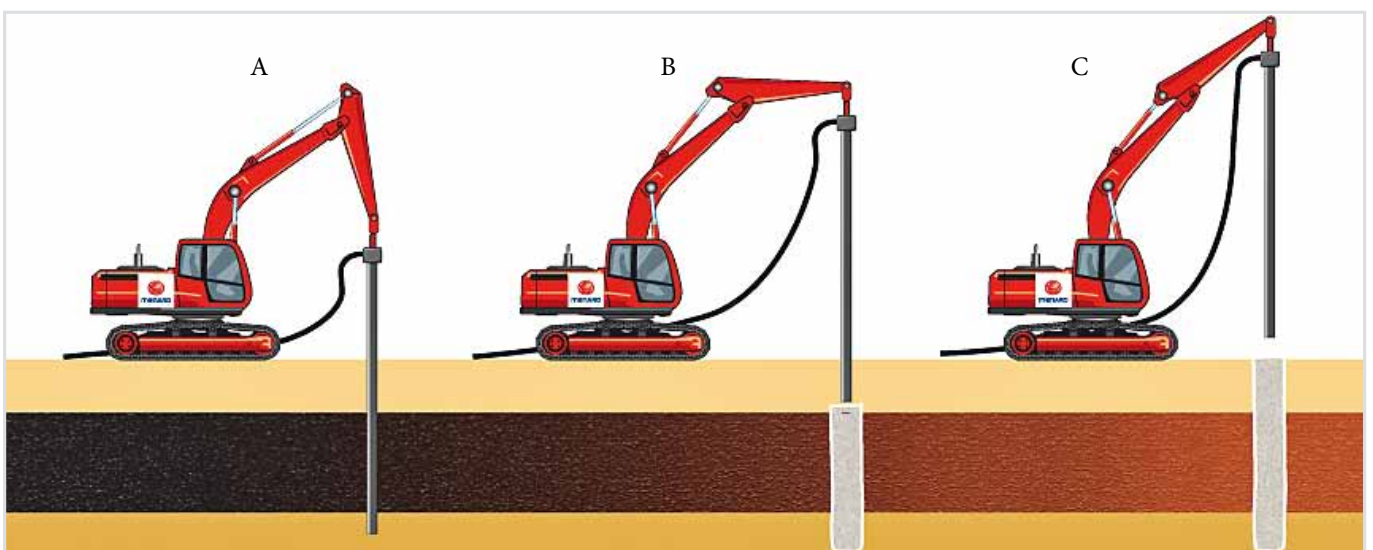
Tak dobrana technologia gwarantuje bardzo małe wartości osiadań resztkowych, porównywalne do wartości uzyskiwanych w przypadku posadowień na kolumnach betonowych lub palach. Dzięki temu spełnione zostają warunki drugiego stanu granicznego.

Metoda MSC ma bardzo szerokie i uzasadnione ekonomicznie zastosowanie w przypadku występowania warstw gruntów słabych, tj. torfów, namulów, gytyi, gruntów spoistych. Kolumny podatne to optymalne rozwiązanie przy wzmocnianiu gruntu pod posadzki przemysłowe obiektów wielkopowierzchniowych oraz parkingi.

Obciążenie przekazywane na podłożo jest przenoszone nie tylko przez kolumny MSC, ale także przez otaczający je grunt. Słabe podłożo przenosi zazwyczaj od 5 do 40% obciążeń całkowitych. Trzon o umiarkowanej podatności pozwala na zredukowanie osiadań podłoża od 60 do 95% (w zależności od stanu gruntu i rozstawu kolumn).

### 4. Podsumowanie

Problem posadowienia fundamentów elektrowni wiatrowych na słabym podłożu może być skutecznie rozwiązany pod warunkiem spełnienia kilku warunków, do których zaliczyć można na pewno wykonanie badań geotechnicznych o odpowiedniej jakości oraz we właściwej liczbie, zastosowanie dobrze dobranej technologii wzmocnienia podłoża do panujących warunków gruntowo-wodnych i w końcu wykorzystanie dostępnej wiedzy w tym zakresie.



Ryc. 12. Schemat wykonywania kolumn MSC (a) pogrążenie narzędzia, b) rdzeniowe podawanie iniektu od dołu, c) wykonana kolumna