

Nasypy na kolumnach z piasku w opaskach, zasady projektowania i przegląd ważniejszych zrealizowanych projektów geotechnicznych

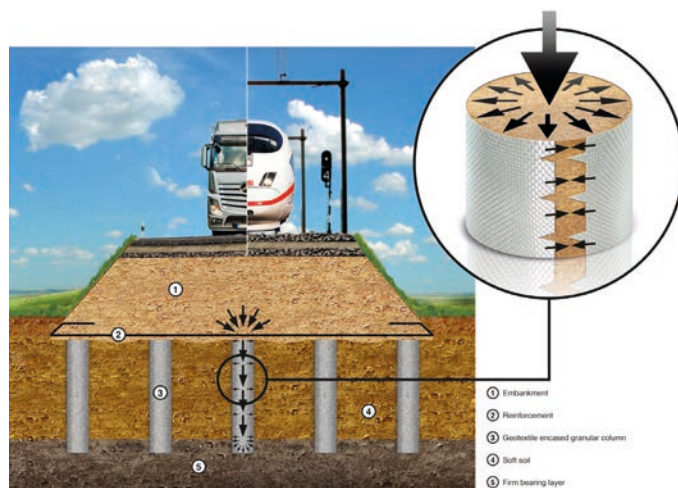
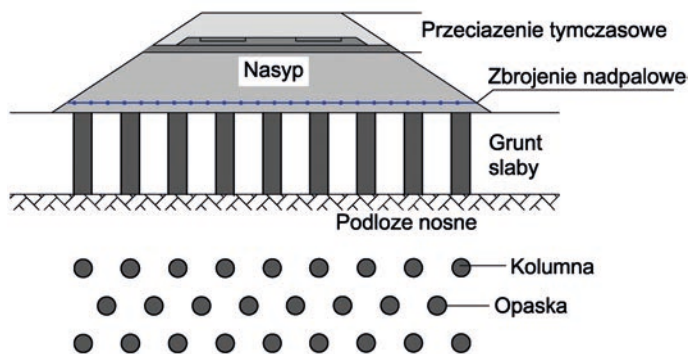
Dr inż. Janusz Sobolewski – Huesker Synthetic GmbH, Gescher

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Budowa dróg, autostrad i linii kolejowych wymaga coraz częściej przejścia przez tereny o złożonych i skomplikowanych warunkach geotechnicznych, które dotychczas były omijane ze względu na wysokie koszty lub problemy natury technicznej. Przy obecnej gęstości infrastruktury ominięcie niekiedy takich przeszkód jest niemożliwe lub bezcelowe. W takich przypadkach coraz częściej znajdują zastosowanie nowoczesne metody fundamentowania, w tym także geosyntetyki, które pozwalają na skrócenie czasu budowy lub redukcję kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Do takich metod zalicza się, między innymi, system posadowienia na kolumnach w opaskach geosyntetycznych (GEC's – *Geotextile Encased Columns*). W artykule będzie przedstawiony przegląd wybranych projektów, w których zastosowano GEC's, aby wykazać jego zalety i zaprezentować jego możliwości. Prace wdrożeniowe nad technologią wykonania kolumn z piasku w opaskach geosyntetycznych rozpoczęto z początkiem lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Było to wspólne przedsięwzięcie firm Möbius i Huesker przy udziale naukowym

Uniwersytetu w Kassel [1]. W początkowym okresie stosowano system GEC's głównie do wzmacniania podłoża pod nasypami drogowymi i kolejowymi (rys. 1). Stosowano przy tym opaski zszywane podłużnie, nieco później rozpoczęto produkcję z parkiem maszynowym umożliwiającym tkanie bezszwowe opasek tekstylnych o dużych średnicach, tzw. tkanie metodą „na około”.

W tym czasie usiłowano opracować technologię wykonania kolumn ze średnicami 800 i 1500 mm, stosując dwa odmienne sposoby pograżania rur obsadowych. Kolumny o średnicy 800 mm wykonywano za pomocą rur obsadowych, grubościennych mających na spodzie kłapy zamknięte przy pograżaniu i otwierające się przy wyciąganiu (rys. 2). Prace wdrożeniowe polegały na opracowaniu technologii wykonania, ustaleniu niezbędnych parametrów technologicznych, weryfikacji modeli obliczeniowych i monitoringu pracy kolumn, a nawet ich odkopanie w celu sprawdzenia faktycznego kształtu kolumny i jej wymiarów [1]. Na początku 2000 roku rozpoczęto już produkcję opasek bezszwowych o dużych wytrzymałościach na rozciąganie



Rys. 1. Schemat posadowienia nasypu drogowego lub kolejowego na systemie GEC's z tymczasowym przeciążeniem w trakcie budowy

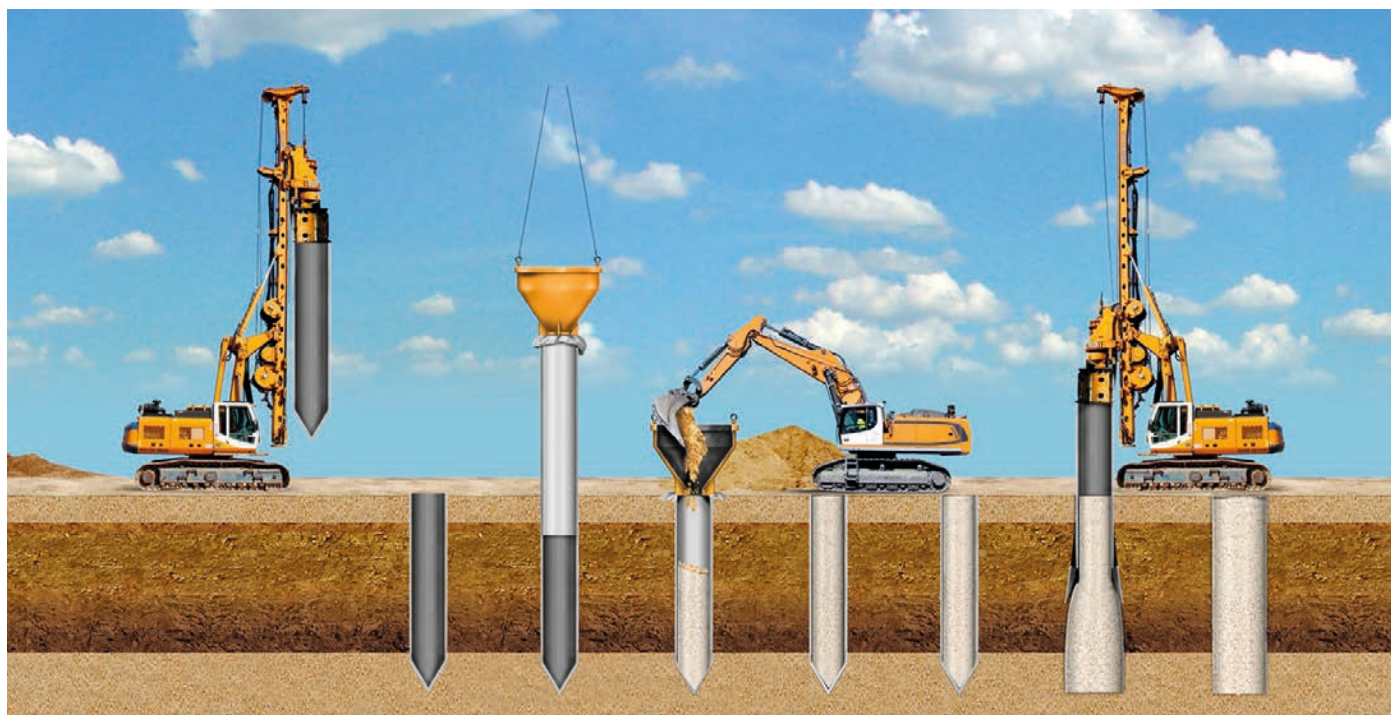
nie (nawet do 600 kN/m z poliestru lub z poliwinylalkoholu tkanych „na około”).

TECHNOLOGIE WYKONANIA KOLUMN W OPASKACH GEOSYNTETYCZNYCH

W tej metodzie zamknięta od dołu rura jest wprowadzana do gruntu ciężkim wibratorem nasadkowym utwardzanym na wierzchu rury lub przelotowym utwardzanym na jej pobocznic. Po osiągnięciu przez rurę obsadową wymaganej głębokości jest opuszczana opaska geosyntetyczna zszyta na dnie, obciążona workami z piasku, tak aby mogła ona przylgnąć do dna. Po wypełnieniu piaskiem rura obsadowa jest wyciągana za pomocą wibratora, przez co uzyskuje się kolumnę opasaną geotkaniną i wypełnioną co najmniej średnio zagęszczonym piaskiem (rys. 2). Grunt o małej nośności w otoczeniu rury jest rozpychany na boki, co przyczynia się do jego wstępnego obciążenia i konsolidacji pod wpływem powiększonych składowych

poziomych naprężenia wywołanych rozparciem na boki. W latach 2000-2010 wykonano w tej technologii szereg posadowień nasypów autostradowych i kolejowych oraz obwałowanie terenu nowej Fabryki Airbusa 380 w Hamburgu, który to projekt wraz z projektem posadowienia placów składowych w stalowni ThyssenKrupp AG w Brazylii można uznać za unikatowe w skali światowej [1, 2, 3, 5, 6, 7]. W Hamburgu wykonano ponad 60 000 kolumn o średnicy 800 mm o łącznej długości około 720 km, w Brazylii 246 km kolumn o średnicy 780 mm.

Kolumny o średnicy 1500 mm są wykonywane przy użyciu rur obsadowych z otwartym dnem i z poborem urobku w trakcie zagłębiania, podobnie jak przy wykonaniu pali wielkośrednicowych z użyciem ciężkich palownic (rys. 3). Po osiągnięciu wymaganej głębokości jest wpuszczana opaska geosyntetyczna, którą następnie wypełnia się piaskiem. Rura obsadowa jest wyciągana wibratorem tak, aby uzyskać wymagane co najmniej średnie zagęszczenie piasku.



Rys. 2. Etapy wykonania kolumn przy pomocy rur obsadowych z dnem zamykającym, pogrążanie rury obsadowej z rozparciem gruntu o małej nośności na boki



Rys. 3. Etapy wykonania kolumn z piasku w otoczce geosyntetycznej za pomocą rur obsadowych z dnem otwartym i z wybieraniem urobku

Najnowszą odmianą GEC's są kolumny wykonywane za pomocą wibroflotów. Metodę tę opracowała niemiecka firma Keller Grundbau GmbH przy współudziale Huesker Synthetic GmbH. W metodzie tej wibroflot jest umieszczany w opasce geosyntetycznej, co eliminuje konieczność stosowania rur obsadowych. Zarówno dno opaski, jak i spód umieszczonego w niej wibroflota opiera się na stożku gubionym, którego średnica jest dużo większa od średnicy wibroflota, co zapobiega uszkodzeniu opaski w trakcie jej pogrążania w podłoże (rys. 4).

Opaskę wraz z wibroflotem pogrąża się za pomocą wibracji, aż spód stożka gubionego osiągnie wymaganą głębokość. Następnie podciąga się wibroflot, podając jednocześnie piasek poprzez służę wewnętrzną w wibroflocie, przy czym stożek u podstawy pozostaje w gruncie. Piasek stopniowo wypełnia opaskę, nadając jej formę kolumny, a ruchami wibratora „w górę, w dół” z jednoczesnym podawaniem piasku odpowiednio poszerza się kolumnę aż do momentu osiągnięcia przez nią docelowej średnicy (rys. 4).



Rys. 4. Etapy wykonania kolumn z piasku w otoczce geosyntetycznej za pomocą wibroflota, system Keller

MODEL OBLICZENIOWY I ZASADY PROJEKTOWANIA POSADOWIENIA

Model obliczeniowy GEC's podano w najnowszych zaleceniach EB GEO 2010 wydanych przez DGGT (Niemieckie Stowarzyszenie Geotechniczne) w 2010 roku [3], które uwzględniają już postanowienia EC 7 i DIN 1054:2005, a więc projektowanie geotechniczne metodą stanów granicznych. Kolumny o powierzchni przekroju A_s rozmieszcza się w siatce kwadratowej lub trójkątnej o boku s , zakładając, że wspólnie z przylegającym gruntem tworzą one powtarzalne komórki o powierzchni A_E (rys. 5). Wskaźnik wymiany gruntu określa się przy tym jako:

$$\alpha_s = \frac{A_s}{A_E} \quad (1)$$

Na ogół stosuje się system ze wskaźnikiem wymiany $\alpha_s = 10 \div 20\%$ i kolumny o średnicach $0,60 \div 0,80$ m. Analizę osiadań głowicy kolumny i obliczenia siły rozciągającej w opasce przeprowadza się dla typowej komórki, przyjmując, że osiadanie stropu gruntu o małej nośności jest równe osiadowi głowicy kolumn, co pozwala na analityczne wyznaczenie nacisków przypadających na kolumnę i grunt słabonośny znajdujący się pomiędzy kolumnami. Zakłada się przy tym, że objętość kolumn nie ulega zmianie (brak samozagęszczania się kolumn pod wpływem obciążenia z zewnątrz), stąd odkształcenia kolumn odbywają się przy ich stałej objętości.

Stąd osiadania kolumny można obliczyć z następującej zależności:

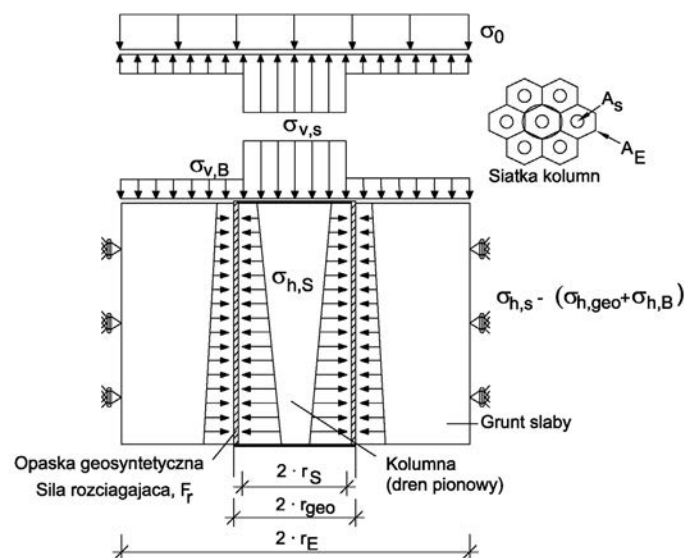
$$s_s = \left[1 - \frac{r_s^2}{(r_s + \Delta r_s)^2} \right] \cdot L \quad (2)$$

gdzie:

L – początkowa długość kolumny,

r_s – promień początkowy kolumny,

Δr_s – przyrost promienia kolumny pod wpływem jej osiadania (skrócenia się).



Rys. 5. Model obliczeniowy posadowienia na kolumnach z opaską geosyntetyczną [3, 4]

Przyrost promienia kolumny Δr_s oblicza się, uwzględniając promień opaski geosyntetycznej r_{geo} i promień kolumny r_s bezpośrednio po podciągnięciu rury obsadowej:

$$\Delta r_s = \Delta r_{geo} + (r_{geo} - r_s) \quad (3)$$

Należy przy tym poczynić następujące założenia:

- promień opaski r_{geo} powinien być większy lub co najmniej równy promieniowi wewnętrznemu rury obsadowej,
- promień kolumny r_s bezpośrednio po podciągnięciu rury obsadowej przyjmować należy w technologii usuwania urobku z rury obsadowej równy promieniowi zewnętrznemu rury obsadowej, w technologii na rozpach gruntu słabonośnego (rura z zamkniętym dnem) promień kolumny r_s należy przyjmować o 1 cm do 2 cm mniejszy od promienia wewnętrznego rury obsadowej. Zachodzi bowiem tutaj tzw. zjawisko zaciskania się kolumn pod dużym naciskiem bocznym wywołanym obciążeniem gruntu słabonośnego w trakcie pogrążania zamkniętych rur obsadowych.

Dobór geosyntetyku na opaskę odbywa się poprzez zapewnienie jego wystarczającej wytrzymałości na rozciąganie:

$$R_{B,d} \geq F_{r,d} \quad (4)$$

gdzie:

$F_{r,d}$ – wymagana wartość obliczeniowa wytrzymałości na obwodowe rozciąganie opaski obliczona dla pierwszego stanu granicznego według EB GEO 2010, Rozdział 10 lub [7],

$R_{B,d}$ – wytrzymałość obliczeniowa opaski geosyntetycznej na rozciąganie w danym czasie użytkowania t , w danym środowisku gruntowym i danym stanie obciążenia.

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k,0} \cdot \eta_M}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5 \cdot \gamma_M} \cdot \left(1 + \frac{s_s}{L} \right) \quad (5)$$

gdzie:

$R_{B,k,0}$ – wytrzymałość standardowa na rozciąganie przy poziomie ufności 95% według EN ISO 10319,

A_1 – współczynnik redukcji z tytułu pełzania według [3],

A_2 – współczynnik redukcji uwzględniający straty wytrzymałości w transporcie i zabudowie [3],

A_3 – współczynnik połączeń, opaska bez szwa, $A_3 = 1,00$,

A_4 – współczynnik redukcji uwzględniający wpływ środowiska gruntowego według [3],

A_5 – współczynnik redukcji uwzględniający zmęczenie materiałowe wynikające z obciążeń cyklicznych lub dynamicznych według [3],

γ_M – cząstkowy współczynnik bezpieczeństwa materiałowego [3],

η_M – współczynnik kalibracyjny w odniesieniu do pierwszego stanu granicznego (STR) [3],

s_s – całkowite osiadanie kolumny, oblicza się do drugiego stanu granicznego według zaleceń podanych w [3],

L – początkowa długość kolumny.

Moduł sztywności na rozciąganie opaski geosyntetycznej J z uwzględnieniem pełzania wyznacza się, korzystając z izochron dla danego dopuszczalnego zakresu wydłużenia jednostkowego ε i czasu trwania obciążenia t (np. w typowych warunkach: w stanie tymczasowego przeciążenia: $t = 12$ miesięcy, w stanie eksploatacji: $t = 120$ lat) i wyznaczając z nich każdorazowo dopuszczalny stopień obciążenia β :

$$J = \frac{\beta \cdot F_{B,k,0}}{\varepsilon} \quad (6)$$

W produktach z poliestru (PET) wydłużenie dopuszczalne przyjmuje się w zakresie $5 \div 6\%$, a w produktach z poliwinylol-

alkoholu (PVA) dopuszcza się wydłużenia rzędu 3 ÷ 4%. Przy posadowieniu na torfach i innych gruntach o ściśliwym szkieletcie należy uwzględnić osiadanie wtórne podłoża wywołane pełzaniem gruntu słabego znajdującego się pomiędzy kolumnami. Stosując GEC's, osiadania wtórne można obliczyć następująco:

$$S_{sr} = R_{GEC} \cdot \frac{\sigma_{v,B}}{\sigma_{v,B,p}} \cdot c_\alpha \cdot h^* \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (7)$$

gdzie:

R_{GEC} – współczynnik redukcji ustalony na podstawie monitoringu na zrealizowanych obiektach z GEC's, na ogół przyjmuje się wartość $R_{GEC} = 0,25$,

c_α – współczynnik pełzania gruntów organicznych,

$\sigma_{v,B}$ – składowa pionowa naprężenia na grunt o małej nośności w trakcie eksploatacji obiektu,

$\sigma_{v,B,p}$ – składowa pionowa naprężenia na grunt słaby działająca w trakcie przeciążenia nasypu i konsolidacji pierwotnej (zatem istnieje możliwość redukcji osiadań wtórnych poprzez odpowiedni dobór wartości przeciążenia i czasu jego trwania w fazie budowy),

h^* – miąższość gruntu o małej nośności pomniejszona o wartość osiadania pierwotnego s_s w trakcie przeciążenia:

$$h^* = L - s_s \quad (8)$$

t – czas użytkowania obiektu (lub przewidywany okres, w jakim będzie zachodzić pełzanie gruntu słabonośnego),

t_0 – czas przeciążenia podłoża poprzez podwyższony nasyp (okres budowy).

Poza statecznością wewnętrzną kolumn pod obciążeniem nasypem (warunek równowagi sił rozciągających opaskę) i wyznaczeniem osiadania głowic kolumn (warunek na dopuszczalne osiadania podstawy nasypu) należy również udowodnić, że stateczność nasypu ze względu na głęboki poślizg w podłożu w trakcie jego przeciążenia i w trakcie eksploatacji będzie spełniać odpowiednie warunki normowe, np. DIN 1054:2009 lub EC-7. W pierwszej kolejności należy dokonać jednak przejścia z modelu rzeczywistego 3D na model płaski 2D. ze względu na fakt, że przy generowaniu modelu płaskiego nie można bezpośrednio uwzględnić wpływu wytrzymałości opaski geosyntetycznej i koncentracji naprężenia nad głowicami kolumn, wyznacza się zastępczą spójność dla kolumn, która uwzględni wpływ opaski geosyntetycznej na ich nośność na ścinanie:

$$c_{ers} = \frac{F_{r,d}}{r_s \cdot \gamma} \cdot \frac{1 + \sin \phi'_s}{2 \cdot \cos \phi'_s} \quad (9)$$

gdzie:

γ – współczynnik redukcji ze względu na ewentualną niedokładność modelowania,

ϕ'_s – efektywny kąt tarcia wewnętrznego piasku w kolumnie.

PRZEGLĄD WAŻNIEJSZYCH PROJEKTÓW Z GEC'S

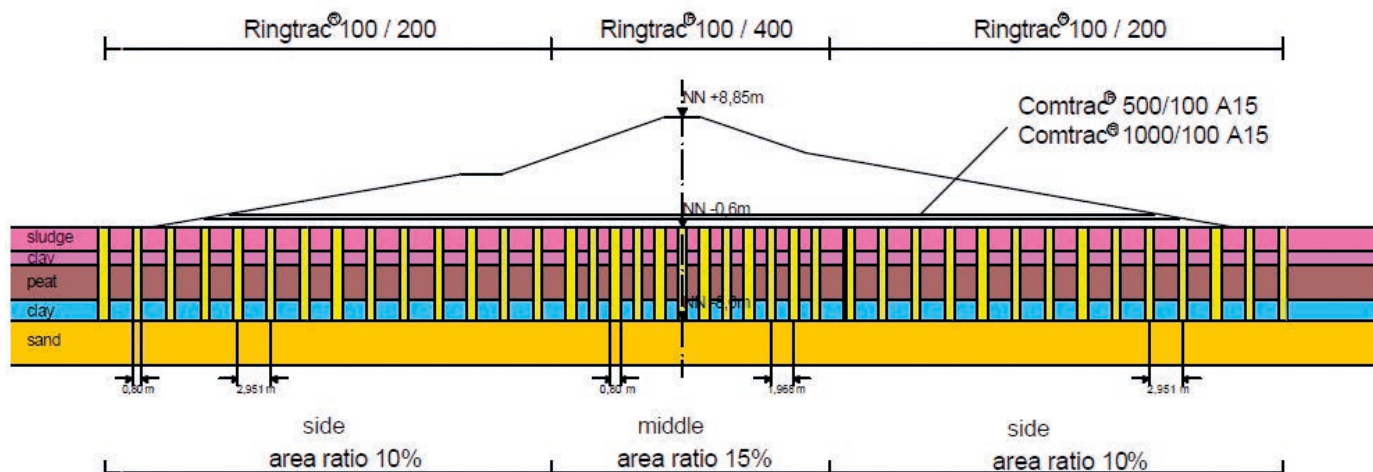
Wał odcinający w celu pozyskania terenu pod Fabrykę Airbus 380 w Hamburgu

Pierwszym dużym projektem o największej liczbie kolumn i największej ich sumarycznej długości był projekt pozyskania terenu pod fabrykę Airbus 380 w Hamburgu, który zrealizowano w latach 2001-2004. W ciągu 7 miesięcy zainstalowano tam ponad 60 000 kolumn o łącznej długości około 720 km pod wałem odcinającym przyszły teren fabryki (około 160 ha) od koryta Łaby i pływów utrudniających warunki wykonawstwa (rys. 6). Wał ten umożliwił utrzymanie stałego poziomu wody w odciętym akwenie, co pozwoliło na transport i dalsze wykonanie robót z jednostek pływających. Wał odcinający o wysokości dochodzącej do 9,5 m posadowiono na systemie GEC's, stosując jako zbrojenie nadkolumnowe kompozyt Comtrac® 1000/100 A15 i Comtrac® 500/100 A15 (rys. 6).

Natrafiono tutaj na świeże osady rzeczne Łaby, które odłożyły się w sztucznej zatoce powstałej po wydobywaniu piasku i żwiru. Świeże osady rzeczne wykazywały bardzo niską wytrzymałość na szybkie ścinanie bez odpływu wody (do głębokości 3 ÷ 4 m, $c_u = 0,4 \div 1,0$ kN/m²), co całkowicie wykluczało transport ładowy. Na rys. 7 przedstawiono dwa typowe profile geotechniczne, które uwidaczniają bardzo małe wytrzymałości osadów w wierzchniej ich części. Kolumny wykonywano z barek, które pozycjonowano w trakcie przypływów, a instalacja kolumn odbywała się głównie w trakcie odpływów, kiedy powierzchnia osadu była prawie całkowicie odkryta, a barki spoczywały na szlamie (rys. 8).

Po wykonaniu wału odcinającego na pozyskanym terenie ułożono ortogonalnie do siebie geotkaninę i geosiatkę, a następnie namyto piasek o grubości warstwy 3 ÷ 4 m do platformy roboczej, z której wykonano drenaż pionowy (rys. 9).

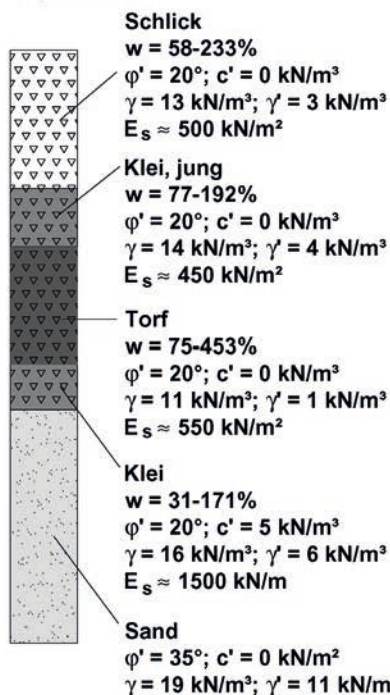
Realizacja tego projektu i wyniki monitoringu wykazały, że system GEC's sprawdza się również w ekstremalnie trudnych warunkach geotechnicznych i w bardzo słabych gruntach. Omawiany projekt spotkał się w swojej początkowej fazie w Niemczech z krytyką niektórych ekspertów geotechnicznych, zgłaszających obawy co do możliwości wybooczenia się kolumn. Spekulacje na ten temat ucichły, kiedy wykonano wał, zbud-



Rys. 6. Przekrój poprzeczny wału, sekcja VI, [5]

Profil VI

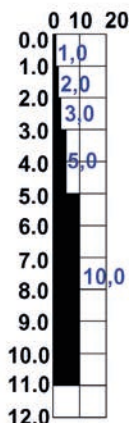
0,0 m NN



Bezugsspannung für
Steifemodulfestlegung 100 kN/m²

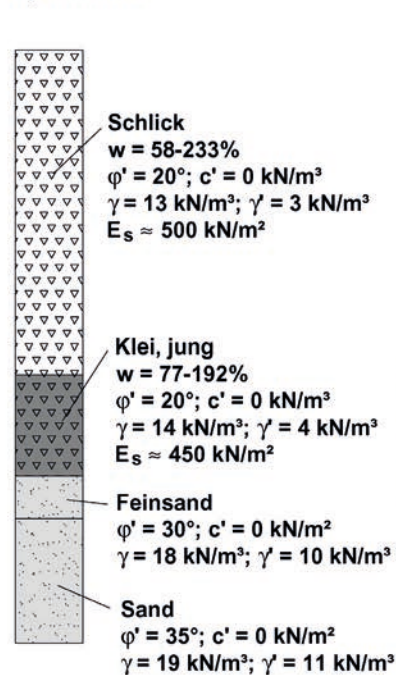
Ansatz cu

cu (kN/m²)



Profil VII

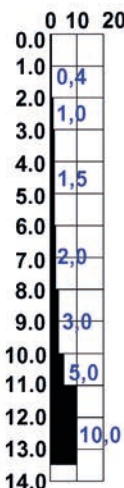
0,6 m NN



Bezugsspannung für
Steifemodulfestlegung 100 kN/m²

Ansatz cu

cu (kN/m²)



Rys. 7. Profile geotechniczne VI i VII, teren Fabryki Airbus 380, Hamburg



Rys. 8. Instalacja kolumn GEC's pod wał odcinający koryto Łaby, Teren Fabryki Airbus 380, Hamburg, 2001 (fot. Möbius)

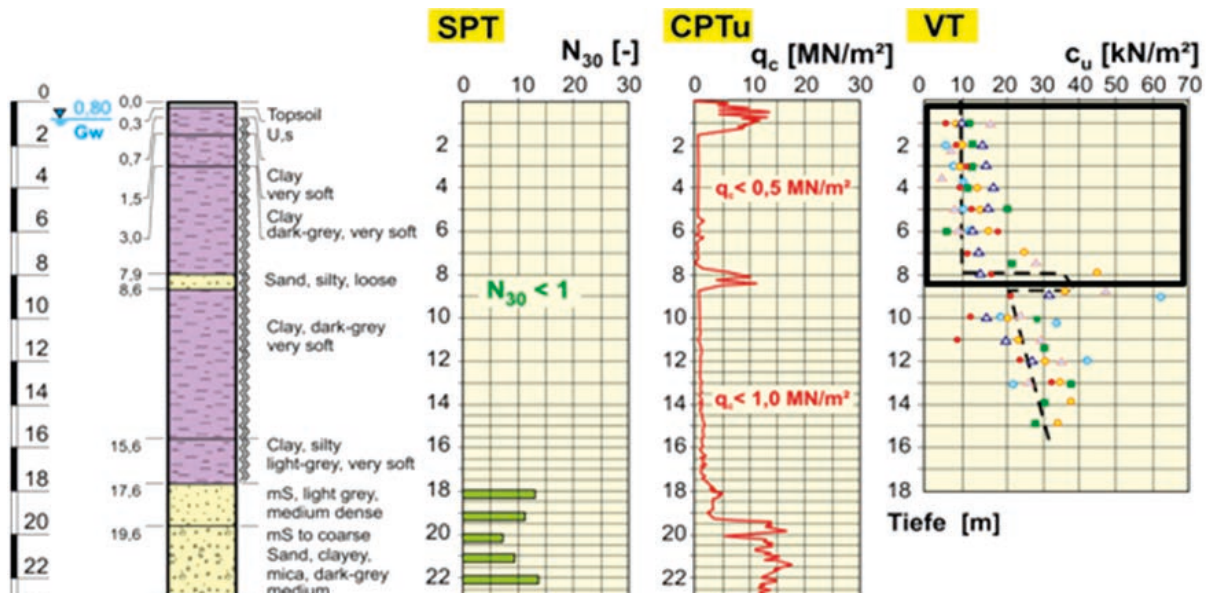


Rys. 9. Instalacja geosyntetycznego drenażu pionowego w rozstawie kwadratowym o oczku 0,50 m × 0,50 m na platformie roboczej (fot. Huesker)

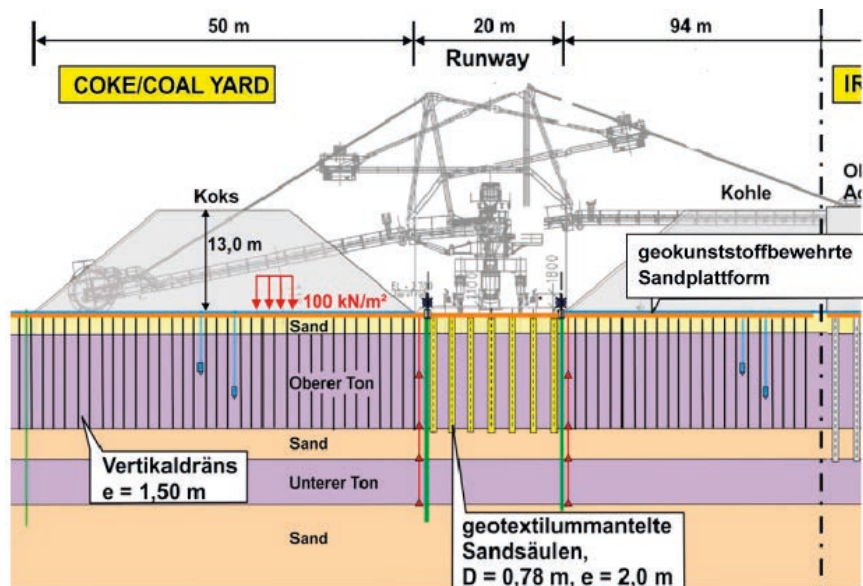
wano fabrykę, a wyniki monitoringu są nadal zadawalające. Osiedzenia wału nie przekraczają wartości 1,2 m, a ich dalszy przyrost z tytułu pełzania osadu nie ma większego wpływu na stateczność i funkcjonalność wału.

Place składowe rudy, koksu i węgla, Stalownia Thyssen & Krupp AG, Brazylia

Koncern stalowy Thyssen & Krupp AG wybudował w latach 2006-2010 hutę stali w Brazylii o mocy produkcyjnej 5 Mio ton stali/rok. Hute zlokalizowano na brzegu Zatoki Sepetiba na obszarze podmokłym o wymiarach 2 km × 4,5 km. Poza produkcyjnymi obiektami jak stalownia, wielkie piece, koksownia należało wykonać również place składowe węgla, rudy i koksu z urządzeniami przeładunkowymi oraz port i linię kolejową. Teren lokalizacji huty pokryty jest utworami czwartorzędowymi, normalnie skonsolidowanymi, które znajdują się przeważnie w stanie miękkoplastycznym (rys. 10). Do głębokości około 8 m wytrzymałość utworów spoistych na szybkie ścinanie bez odpływu wody wynosi zaledwie 10 kN/m². Zwierciadło wody gruntuwej układa się przy tym na poziomie terenu, czyli około ± 0 m n.p.m. Na szczególnie trudne sytuacje geotechniczne natrafiono w obrębie placów składowych rudy i węgla, gdzie oprócz silnych i zmiennych obciążeń od hałd należało zapewnić przejeźdźność urządzenia przeładunkowego (masa 750 ton) poruszającego się po szynach. W celu redukcji osiadań podjęto decyzję o posadowieniu torowiska na systemie GEC's (rys. 11). Kolumny z opaskami Ringtrac® 100/250 i 100/275 w rozstawie 2,0 m i o średnicy 78 cm osadzono w górnym przewarstwieniu z piasku, co



Rys. 10. Warunki geotechniczne podłoża placów składowych, Huta Thyssen & Krupp [1]



Rys. 11. System GEC's pod torowiskiem urządzenia przeładunkowego [1]

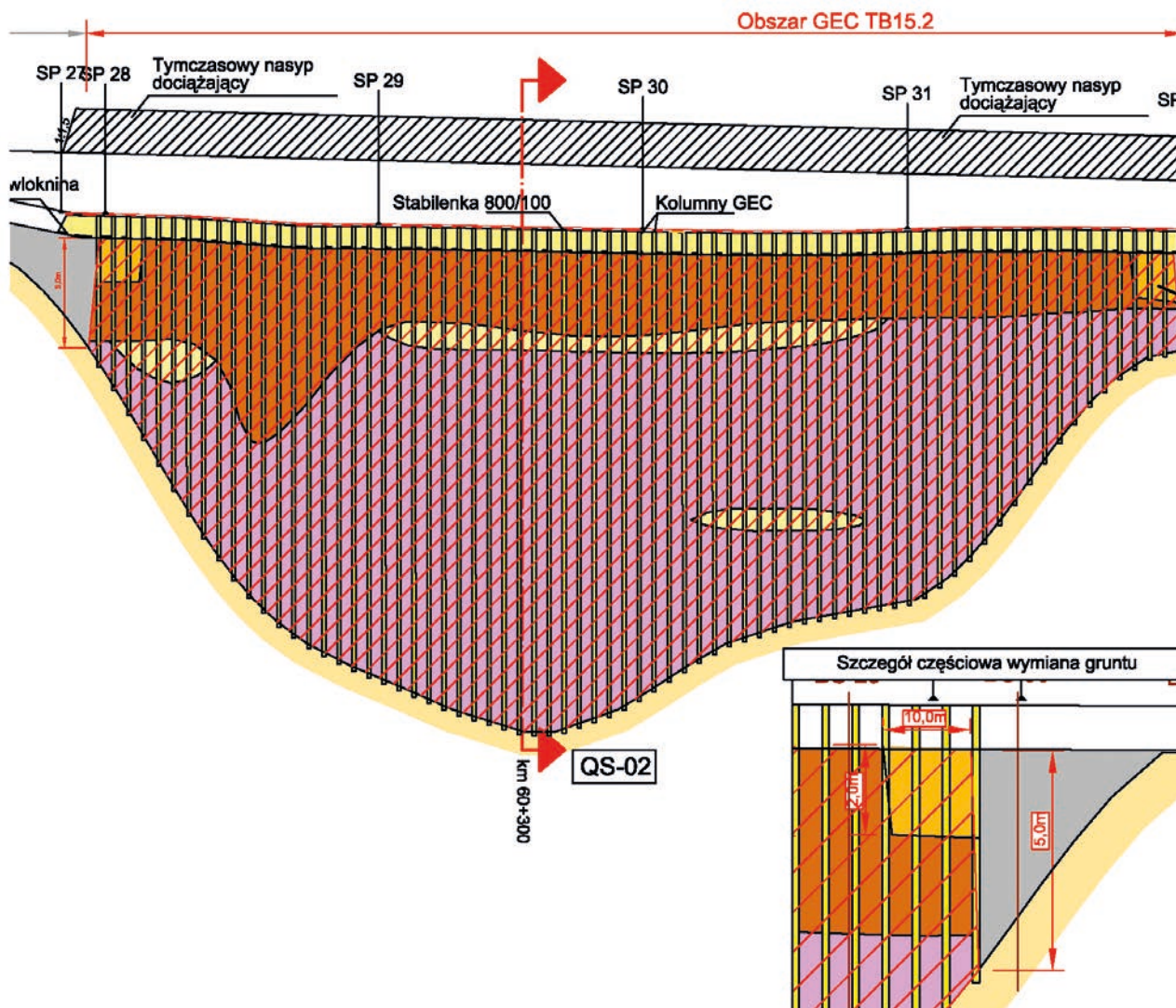
pozwoili uniknąć kosztownego w warunkach Brazylii głębszego palowania. W tym obiekcie wykonano kolumny o łącznej długości około 246 km, posługując się najczęściej odpowiednio zmodyfikowanym sprzętem używanym w systemie pali Franki.

Podobnie jak i na innych obiektach prognozy osiadań były po stronie bezpiecznej, a zatem i do dzisiaj nie były przekroczone wartości progowe i obiekt ten jest użytkowany bez ograniczeń ruchowych.

Autostrada A2, Łagów-Jordanowo

Nowo wybudowana autostrada A2 pomiędzy Świeciem i Nowym Tomysłem (oddana do ruchu 31 listopada 2011 roku) przebiega przez kilka słabonośnych obszarów torfowych i bagicznych, gdzie w zależności od wysokości nasypu, miąższości i stanu gruntów słabonośnych zastosowano odpowiednio dopa-

sowane technologie posadowienia. Szczególnie trudny był stosunkowo krótki odcinek w tzw. obszarze torfowym 15.2 w kilometrażu 60+220 ÷ 60+450, który znajduje się pomiędzy miejscowościami Łagów i Jordanowo. Na tym odcinku napotkano na głęboką niekłą wypełnioną gruntami organicznymi o głębokości nawet do 28 m p.p.t. i właśnie tutaj zdecydowano się na posadowienie nasypu o wysokości 3 ÷ 4 m na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych, czyli na systemie GEC's. Górną warstwę o miąższości około 5,0 ÷ 6,0 m stanowiły torfy na ogół słabo rozłożone o wytrzymałości na szybkie ścinanie bez odpływu w zakresie $c_u = 5 \div 10 \text{ kN/m}^2$. Głębiej napotkano gytie o wytrzymałości na ścinanie bez odpływu $c_u = 10 \div 20 \text{ kN/m}^2$, lokalnie także namuły i cienkie przekładki piasku. Szczególnie niekorzystna była duża ściśliwość gruntów organicznych, na co wskazują parametry podane w tabl. 1. Zwraca się przy tym uwagę, że woda gruntowa praktycznie przez cały czas budowy zalegała na powierzchni terenu.



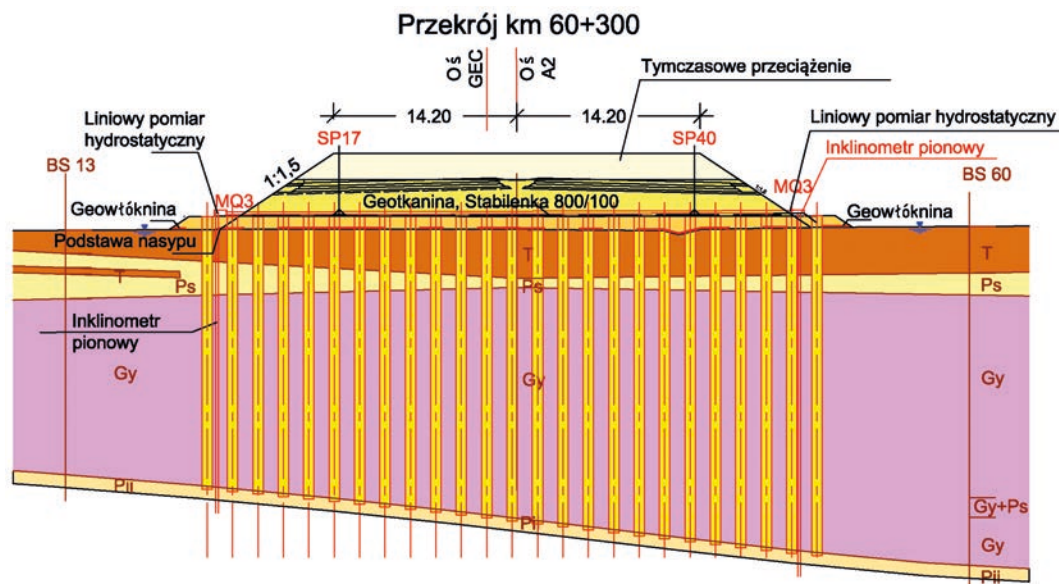
Rys. 12. Profil podłużny autostrady wraz z podłożem, km 60+225 ÷ km 60+450, [7]

Tabl. 1. Właściwości fizyczne i mechaniczne gruntów, wartości charakterystyczne

Rodzaj gruntu	Ciężar objętościowy γ/γ' [kN/m]	Kąt tarcia ϕ' [°]	Spójność c' [kN/m ²]	Edometryczny moduł ścisłości pierwotnej dla ($p_{ref} = 100 \text{ kN/m}^2$) E_{oed} [kN/m ²]	Współczynnik konsolidacji przy przepływie poziomym wody $c_h = 5 \cdot c_v$ [m ² /s]	Współczynnik pełzania c_α [–]
Grunt nasypowy	19/10	35	(–)	(–)	(–)	(–)
Piasek na kolumny	19/10	32,5	(–)	(–)	(–)	(–)
Torf	11/1	15	5	500	$1,59 \cdot 10^{-7}$	0,03
Gytia	14/4	20	5	750	$3,96 \cdot 10^{-8}$	0,01
Podłoże nośne	20/10	32,5	(–)	(–)	(–)	(–)

W pierwszej kolejności układano geowłókninę o $CBR \geq 1500 \text{ N}$ bezpośrednio na trawie i przykrywano warstwą piasku o grubości 1,0 m. Na tak utworzonej platformie mógł odbywać się ruch lekkiego i średnio ciężkiego sprzętu budowlanego (ładownia na podwoziu ogumionym, traktor, itd.). Staceczność sprzętu pomocniczego była zapewniona przy wytrzymałości na szybkie ścinanie w torfie nie mniejszej niż $7,5 \text{ kN/m}^2$

,co na ogół było zachowane. Palownice do wykonania kolumn typu Liebherr LRB 255 o ciężarze około 1100 kN miały podwozie gąsienicowe i poruszały się po materacach z bali drewnianych o wymiarach $6,0 \text{ m} \times 6,0 \text{ m}$ (nacisk pod materacem z bali drewnianych $30,5 \text{ kN/m}^2$), wykonując kolumny „metodą przed siebie”. Stąd pomost drewniany palownicy był układany już na wykonanych uprzednio kolumnach (rys. 14).



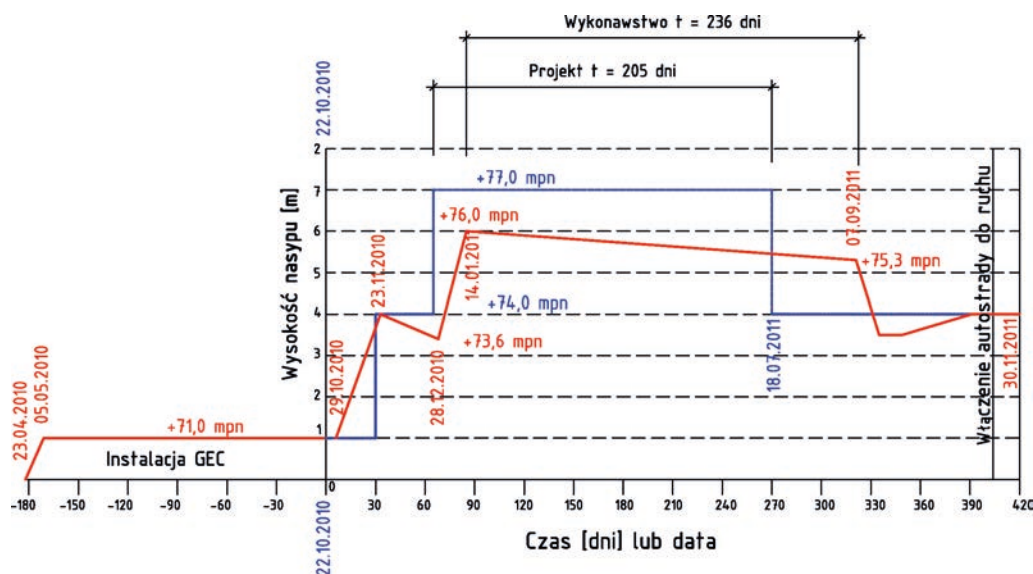
Rys.13. Przekrój poprzeczny nasypu A2, km 60+300, [7]



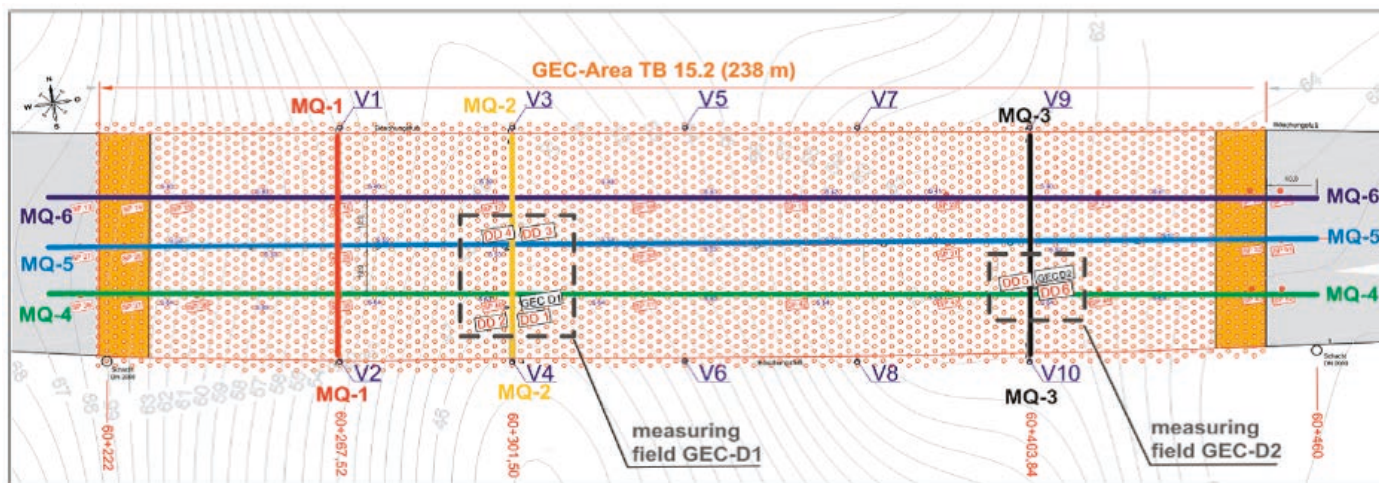
Rys.14. Palownice w trakcie instalacji kolumn, A2, km 60+220 ÷ 60+450 (fot. Möbius)

Kolumny były wykonywane na ogół za pomocą dwóch palownic (rys. 14) pozwalających na instalację około 40 ÷ 50 kolumn na każdą zmianę. Na omawianym odcinku wykonano 3400 kolumn o łącznej długości około 5 km. Na rys. 15 podano schematycznie chronologię najważniejszych faz budowy: przygotowanie platformy roboczej, instalację kolumn, instalację monitoringu i zbrojenia nadpalowego, wznoszenie nasypu wraz z przeciążeniem, rozbiórkę przeciążenia. Przeciążenie usunięto we wrześniu 2011 roku, kiedy ustalono, że uzyskano zadowalający stopień skonsolidowania podłoża (posadowienia) i wykazano na podstawie wyników pomiarów, że zgodnie z wymogami specyfikacji będą spełnione warunki:

- dopuszczalna różnica osiadań na dowolnie zlokalizowanym i skierowanym odcinku o długości 10 m nie będzie większa niż 15 mm w ciągu 30 lat od zakończenia robót,
- dopuszczalne osiadania podstawy nasypu ≤ 10 cm w ciągu 30 lat od momentu odbioru robót.



Rys.15. Chronologia wykonawstwa nasypu [7]



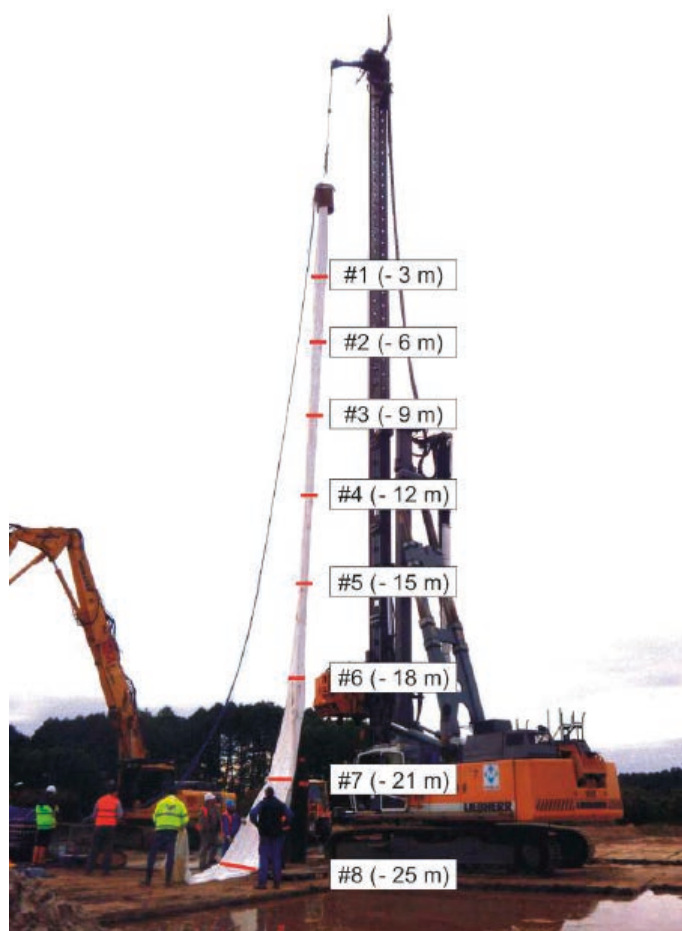
Rys. 16. Plan instalacji kolumn i urządzeń pomiarowych [7]

Roboty ziemne rozpoczęto w kwietniu 2010, wykonując wymianę na odcinkach startowych i tworząc platformę roboczą na całym odcinku wzmacnianym. Zakończenie wykonania kolumn, wbudowanie warstwy wyrównawczej, instalację geotkaniny i zakończenie instalacji monitoringu datuje się na 29.10.2010 roku, w tym dniu wykonano pomiar "0" i rozpoczęto wznoszenie nasypu (rys. 15). Do kolumn o długości większej niż 22 m stosowano, zamiast kłap w dnie, stożki gubione, przy czym styk: rura obsadowa – stożek był uszczelniany taśmą bentonitową tak, aby woda gruntowa nie napływała do wnętrza rury. Kilkanaście kolumn o długości do 28 m (długość opaski 30,5 m), w tym kolumny pomiarowe S1, S2 i D1, wykonano w opaskach o średnicy 780 mm za pomocą rur obsadowych $d = 780$ mm.

System monitoringu składał się z następujących składowych (rys. 16):

- repery płytowe z żerdziami przedłużanymi dla pomiarów geodezyjnych: 29 sztuk (oznaczenie SP),
- przewody do liniowych pomiarów hydrostatycznych metodą Lhotzky'ego: 6 linii pomiarowych oznaczonych symbolem MQ (3 w profilu podłużnym i 3 w przekrojach poprzecznych),
- czujniki do pomiaru składowych pionowych naprężeń na głowicach kolumn i pomiędzy nimi (DD1-DD4),
- czujniki do pomiaru obwodu opasek geosyntetycznych (kolumny D1, D2 – system Lhotzky'ego z czterema poziomami pomiarowymi, system NeoStrain: kolumny S1, S2, każda z 8 poziomami pomiarowymi),
- pionowe rury inklinometryczne umieszczone wzdłuż krawędzi podłużnych u podstawy nasypu po 5 z każdej strony, oznaczenie V01-V10.

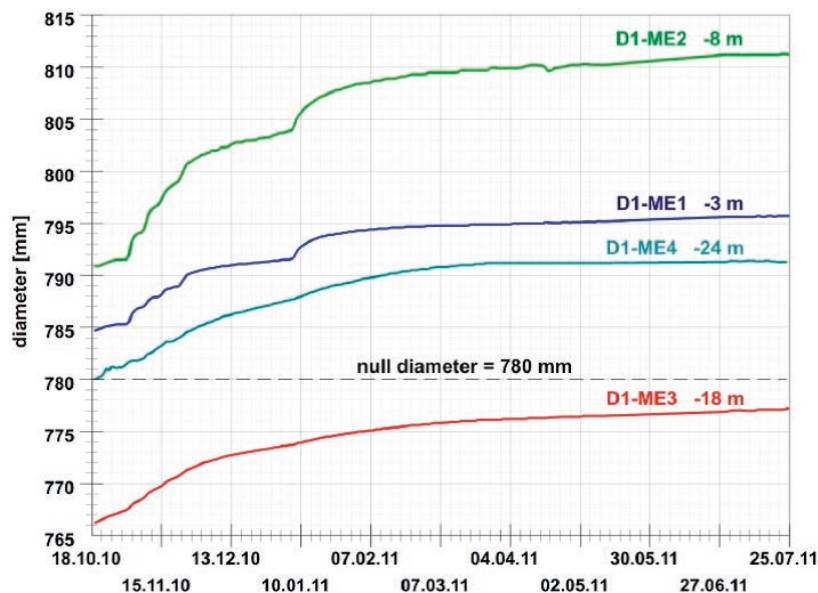
Ze względu na ograniczone ramy artykułu na rys. 17 pokazano jedynie moment instalacji opasek z czujnikami systemu NeoStrain w kolumnie pomiarowej S1. Po raz pierwszy była możliwa obserwacja zmiany obwodu opaski w kolumnie, począwszy od jej opuszczenia do rury obsadowej, w trakcie wypełniania piaskiem, kiedy opaska przyjmowała średnicę wewnętrzną rury i bezpośrednio po podciągnięciu rury obsadowej.



Rys. 17. Instalacja opaski geosyntetycznej z zamontowanymi czujnikami pierścieniowymi do pomiaru zmian obwodu kolumn, kolumna S-1 (fot. NeoStrain)

Stwierdzono, że wraz z rozpoczęciem budowy nasypu średnica kolumn ulegała stopniowo powiększaniu, przy czym w torfie, w górnej strefie podłoża „pęcznienie” kolumn osiągało wartości maksymalne (rys. 18).

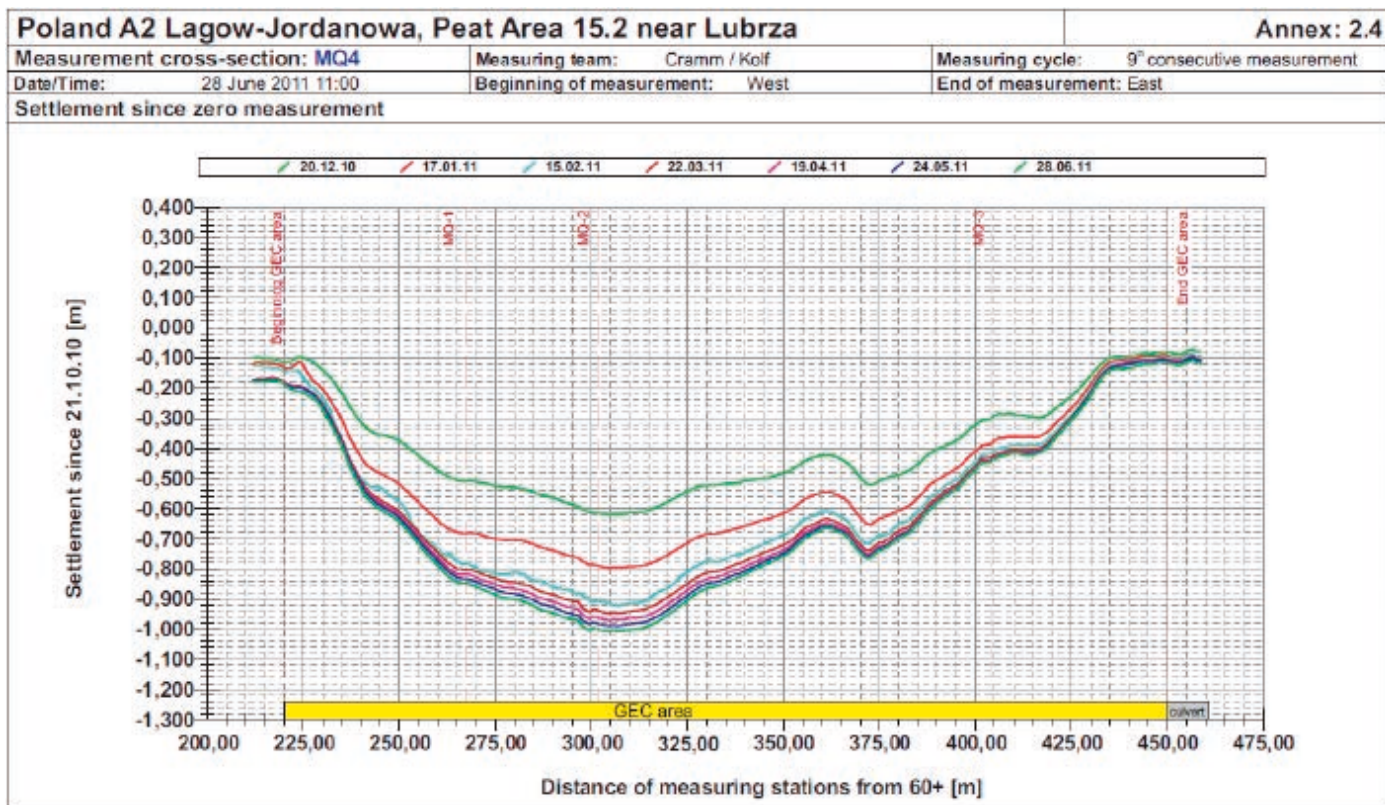
W przewarstwieniach piasku kolumna D1 nawet po wykonaniu przeciążenia nasypu nie osiągnęła promienia r_{geo} , czyli tym samym średnicy wewnętrznej rury obsadowej (poziom



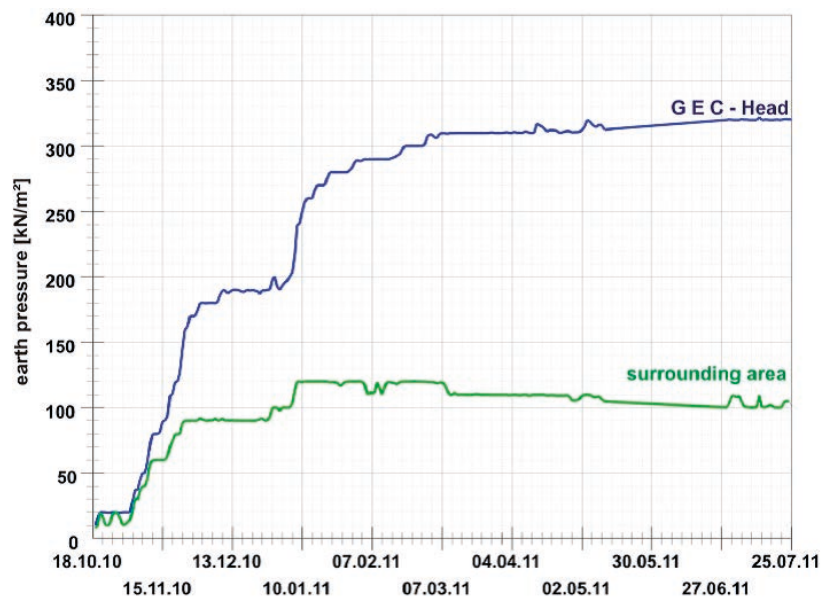
Rys. 18. Zmiany średnicy opaski, kolumna D1, system pomiarowy Lhotzky'ego

pomiarowy ME 3, głębokość instalacji 18 m) (rys. 18). Na tej głębokości stwierdzono w sondowaniach statycznych wykonywanych systematycznie w trakcie robót występowanie przewarstwienia piasku, co wywołało prawdopodobnie tę anomalię. Największe wydłużenie pierścieniowej opaski pomierzono na kolumnie D1 na poziomie ME 2 na głębokości około 8 m od poziomu głowicy, jeszcze w spągowej patii torfu. Wydłużenie to odpowiadało sile rozciągającej opaskę o wartości $F_r = 75 \text{ kN/m}$, która była mniejsza od wartości prognozowa-

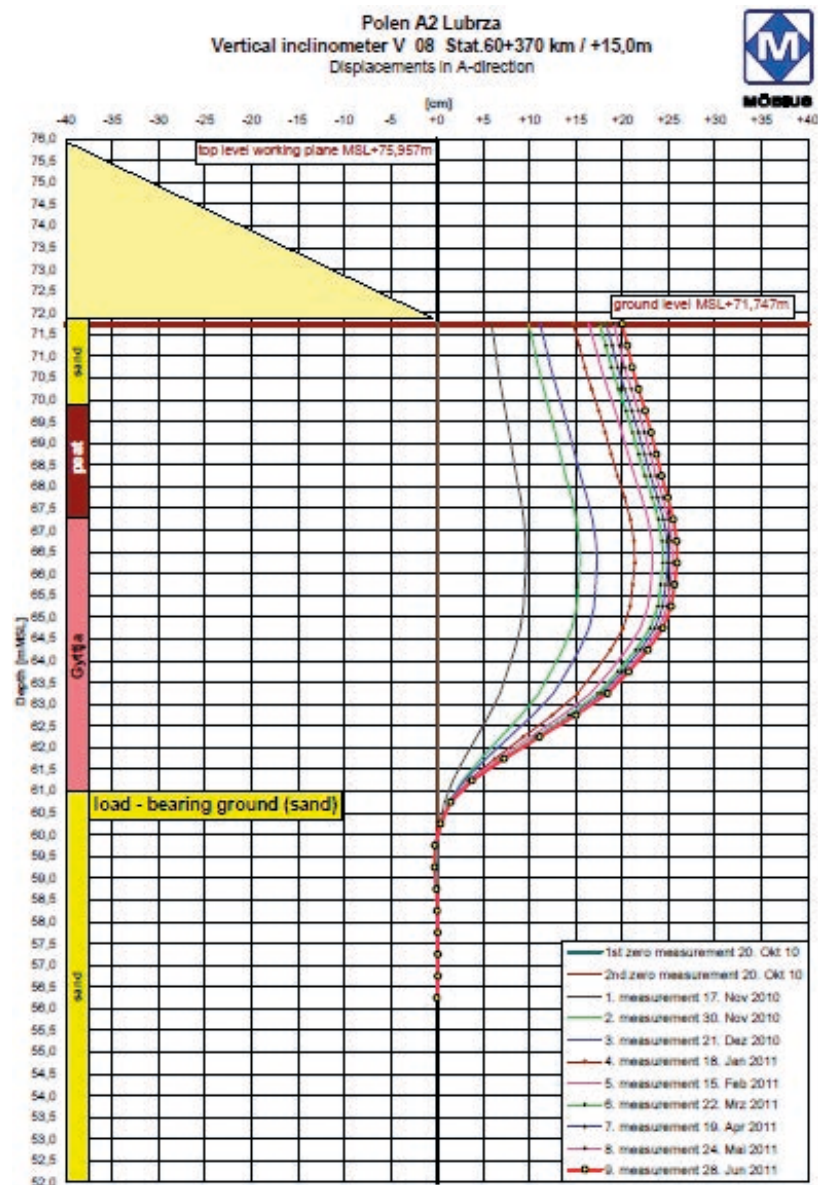
nej dla tej fazy $F_{r,d} = 122 \text{ kN/m}$. Wyniki liniowych pomiarów hydrostatycznych pozwoliły na kontrolę osiadań nasypu, które na koniec przeciążenia wynosiły w przekroju km 60+300, $s = 1,05 \text{ m}$ (rys. 19). W projekcie prognozowano osiadanie kolumn rzędu $s_s = 2,33 \text{ m}$, a więc dużo większe od pomierzonego w lipcu 2011 roku, $s = 1,05 \text{ m}$. Powyższa różnica może wynikać z niedoszacowania wartości edometrycznego modułu ściśliwości w ramach opracowania dokumentacji geotechnicznej projektu technicznego (tabl. 1), przyjęcia niezmiennionej wartości



Rys. 19. Wyniki liniowych pomiarów hydrostatycznych w profilu podłużnym nasypu, system Lhotzky'ego [7]



Rys. 20. Składowa pionowa naprężenia na głowicy kolumny D1 i na stopie gruntu słabonośnego w jej otoczeniu, system Lhotzky'ego [7]



Rys. 21. Przeszczenia poziome inklinometru V 08



Rys. 22. Widok odcinka autostrady posadowionego na systemie GEC's, km 60+200 ÷ km 60+450 przed oddaniem do ruchu, listopad 2011 (fot. Huesker)

modułu ściśliwości po wykonaniu kolumn (pominięcie samowzmocnienia się warstw organicznych po wyparciu poprzez rury obsadowe około 15% ich objętości na boki) i pominięciu osiadań od ciężaru platformy roboczej wraz z ciężkim sprzętem budowlanym oraz ciężaru warstwy wyrównawczej, które nie były ujęte monitoringiem. O silnym samowzmocnieniu się torfu świadczą wyniki pomiarów składowej pionowej naprężenia w podstawie nasypu (rys. 20).

Okazało się, że naprężenie na głowicy kolumny D1 wynosiło $\sigma_{v,s} = 320 \text{ kN/m}^2$ (nacisk na kolumnę 160 kN) zamiast prognozowanych 794 kN/m^2 . Natomiast składowa pionowa naprężenia działająca na torf pomiędzy kolumnami osiągnęła po wbudowaniu przeciążenia wartość maksymalną $\sigma_{v,B} = 120 \text{ kN/m}^2$ i w trakcie konsolidacji uległa zmniejszeniu do 100 kN/m^2 (obciążenie pionowe przenoszone przez grunt słabonośny w jednostkowej komórce: 283 kN). Zatem wskaźnik efektywności kolumn wynosił 36,1%, a nie jak prognozowano $E = 40 \div 50\%$, co może oznaczać, że grunt słabonośny jest w stanie poprzez samowzmocnienie przejąć na siebie znacznie większe obciążenia. Można zatem przypuszczać, że przedstawiony model obliczeniowy daje wyniki po stronie bezpiecznej i jest możliwa jego dalsza optymalizacja. Wyniki pomiarów prowadzonych na 10 zainstalowanych rurach inklinometrycznych pozwalały na bieżącą ocenę wyężenia geotkaniny ułożonej w podstawie nasypu. Przykładowo pokazano na rys. 21 wyniki poziomych przemieszczeń podłoża uzyskane na inklinometrze V 08. W żadnym z 10 pionowych profili pomiarowych przemieszczenia poziome inklinometrów nie przekroczyły wartości dopuszczalnej 400 mm, a siła rozciągająca w zbrojeniu poziomym (geotkanina poliestrowa o wytrzymałości standardowej $F_{B,k,0} = 800 \text{ kN/m}$) nie przekroczyła wartości obliczeniowej $F_{B,d} = 388 \text{ kN/m}$.

Po wykonaniu ostatniej serii pomiarowej w sierpniu 2011 roku podjęto ostateczną decyzję o usunięciu przeciążenia i wykonaniu nawierzchni, wykazano przy tym, że dopuszczalna różnica osiadań 15 mm na dowolnie skierowanym odcinku o długości 10 m nie będzie przekroczona w ciągu najbliższych 30 lat, i że spodziewane osiadania wtórne nie przekroczą war-

tości 10 cm. Na rys. 22 pokazano stan autostrady z listopada 2011 roku tuż przed oddaniem jej do eksploatacji.

PODSUMOWANIE

Przedstawiono zasady wykonania i projektowania nasypów na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych przy uwzględnieniu najnowszych zaleceń DGGT z 2010 roku. Wykazano przydatność tego sposobu posadowienia w ekstremalnie trudnych warunkach geotechnicznych i wysokich wymaganiach dotyczących terminów realizacji oraz małych osiadań obiektu. Wyniki monitoringu uzyskane na wielu obiektach wskazują na możliwość optymalizacji zastosowanego modelu obliczeniowego, na przykład poprzez uwzględnienie efektu samowzmocnienia się gruntu słabonośnego pomiędzy kolumnami.

W zasadzie nie ma większych ograniczeń przy doborze odpowiedniej opaski geosyntetycznej kolumn, ponieważ zarówno rodzaj polimeru, jak i średnica, a także wytrzymałość i sztywność na rozciąganie opasek są dostępne w szerokim zakresie.

Liczne zrealizowane projekty pozwalają stwierdzić, że metoda ta jest najbardziej przydatna na bardzo słabych podłożach gruntowych ($c_u < 5 \text{ kN/m}^2$) oraz w szczególności tam, gdzie piasek lub żwir można pozyskać tanio. Nie zachodzi przy tym potrzeba wykonania wysokonośnej platformy roboczej, ponieważ kolumny można wykonywać metodą „przed siebie”, co przyspiesza i znacznie redukuje koszty robót ziemnych.

LITERATURA

1. Alexiew D., Moormann C., Jud H.: Foundation of a coal/coke stockyard on soft soil with geotextile encased columns and horizontal reinforcement, Proceeding of the 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil 2010, 1905-1909.
2. Brokemper, D., Sobolewski, J., Alexiew, D., Brok, C.: Design and construction of geotextile encased columns supporting geogrid reinforced landscape embankments; Bastions Vijfwal Houten in the Netherlands, Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama, 2008, 889-892.
3. DGGT.: Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen-EBGEO, Ernst & Sohn, Berlin, 2010.
4. Raithel M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universität Kassel, 1999.
5. Raithel M., Küster V., Landmark A.: Geotextile Encased Columns a foundation system for earth structures, illustrated by a dyke project for a works extension in Hamburg, Proceedings of the Nordic Geotechnical Meeting NGM, Ystad, Szwecja, 2004.
6. Raithel M., Küster V., Alexiew D.: 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen, Geotechnik 36, Heft 4, 2013, 205-217.
7. Sobolewski J., Raithel, M., Küster V., Friedl G.: Autostrada A2: Łągów-Jordanowo, Nasyp posadowiony na kolumnach z piasku w opaskach geosyntetycznych – projekt, wykonawstwo i monitoring, XVI KKMGiG, Wrocław 2012.