

Kazimierz Kłosek¹
Janusz Sobolewski²
Jarosław Ajdukiewicz³

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA GEOSYNTETYKÓW DLA POPRAWY NOŚNOŚCI PODTORZA W REWITALIZACJI I BUDOWIE NOWYCH SZLAKÓW KOLEJOWYCH

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono rezultaty zastosowania geosyntetyków w celu poprawy nośności i trwałości podtorza. Były one układane bezpośrednio pod tłuczniem, pod warstwą ochronną lub też na większej głębokości w podtorzu jako tzw. zbrojenia nadpalowe. W pierwszej kolejności omówiono i podano najstarszy sposób poprawy nośności i trwałości podtorza za pomocą geowłóknin układanych bezpośrednio na torowisko, tzn. leżących bezpośrednio pod podsypką. Następnie przedstawiono przykłady i zasady wymiarowania zbrojenia geosyntetycznego układanego w spąg warstwy ochronnej, które w mniejszym stopniu podlega abrazji i wykazuje się większą trwałością niż płytko układane geowłókniny podtłuczniowe. W końcowej części artykułu zajęto się zbrojeniami nadpalowymi stosowanymi w przypadku występowania w podłożu gruntów słabych o znacznej miąższości. Zawarto tutaj kilka przykładów ilustrowanych przekrojami konstrukcyjnymi zrealizowanych zbrojeń. Dla zobrazowania zakresu wytrzymałości stosowanych geosyntetyków podano również konkretne wartości wytrzymałości znamionowych tych zbrojeń. Zamieszczony wykaz literatury tematu pozwala każdemu zainteresowanemu na samodzielne studia w tym zakresie.

Słowa kluczowe: podtorze, geosyntetyki, zbrojenie geosyntetyczne

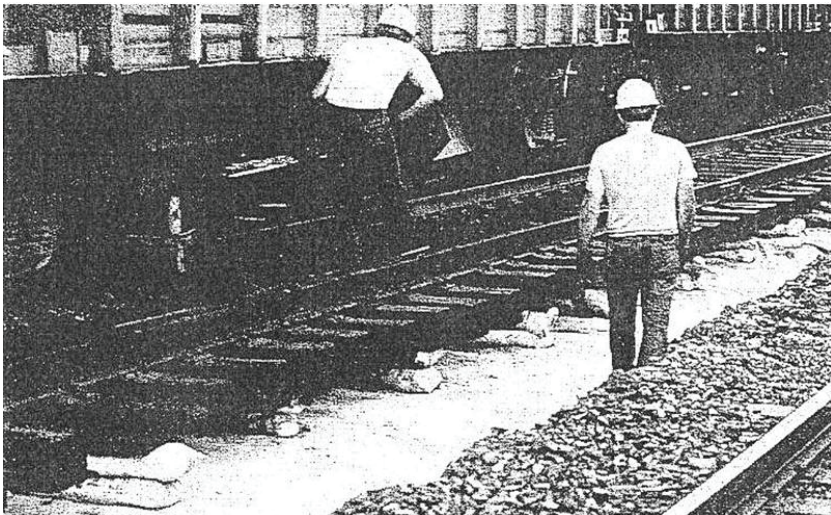
¹ dr hab inż., prof. nzw. Pol. Śl., Politechnika Śląska, Katedra Dróg i Mostów, Zakład Dróg i Kolei, e-mail: Kazimierz.Klosek@polsl.pl

² Huesker Synthetic GmbH, Gescher

³ P.R. INORA sp. z o.o., Gliwice

1. Geowłókniny na torowisku pod podsypką, jako pierwsze próby zastosowania geosyntetyków na kolejach

Początków zastosowania geosyntetyków w kolejnictwie można dopatrywać się w latach 70. i 80. XX-go wieku. W pierwszej kolejności zaczęto stosować geowłókniny w północnych stanach USA i w Kanadzie (fot. 1) układając je bezpośrednio pod podsypką (Raymond 1999). Prawie równoległe wykonane zostały pierwsze próbne odcinki na szlakach Deutsche Reichsbahn (DR) w dawnej NRD, (Lieberenz & Chilian 1986). Geosyntetyki stosowano wówczas raczej intuicyjnie, gdyż brakowało odpowiednich badań, doświadczenia i normatywów. Metodą prób i błędów, z pomocą odcinków próbnych starano się ustalić wymagania, jakim powinny sprostać geosyntetyki układane w podtorzu. Pierwsze próby dotyczyły instalacji geosyntetyków bezpośrednio na torowisku, tzn. pod podsypką tłuczniową. Stosowano przy tym różne wyroby o zróżnicowanej gramaturze np. począwszy od 400 g/m² poprzez 600 i 800 aż do 1050 g/m², geowłókniny z różnych polimerów i wykonywanych różnymi technikami produkcji (Lieberenz & Chilian 1986 i Raymond 1999).



Fot. 1. Pierwsze próby zastosowania geosyntetyków: geowłókniny układane bezpośrednio na torowisku pod podsypką, Kanada, (Raymond 1999)

W szczególności prowadzone długoletnie badania kanadyjskie (nawet na niektórych odcinkach do 18 lat) wykazały, że z powodu zbyt dużej ścieralności w kontakcie tłuczeń/geosyntetyk geowłókniny po-

winny mieć co najmniej gramaturę 1050 g/m². Z tamtych lat pochodzi też pomysł pokrywania górnej powierzchni geowłóknin żywicami akrylowymi w ilości 5%-20% suchej masy geotekstyliu, a więc tak, ażeby ich wodoprzepuszczalność była w dostateczny sposób jeszcze zachowana (Raymond 1999).

Z tamtego czasu pochodzą też zalecenia jakie powinny być spełnione przy stosowaniu geowłóknin instalowanych pod podsypką tłuczniową (Lieberecz & Chilian 1986, Raymond 1999, van Sandvoort 1994):

- minimalna grubość warstwy tłucznia pod podkładem 200 mm, zalecana 300 mm;
- nachylenie torowiska min. 2%, zalecana obecnie w Niemczech wartość min. 5%;
- geowłóknina z włókien o minimalnej długości 100 mm, wytrzymałości włókien 0,4 N/tex,
- ilość perforacji w trakcie igłowania ≥ 80 razy/cm²;
- wydłużenie przy zerwaniu $\geq 60\%$ (w/g ASTM D-4632);
- efektywna średnica porów $O_{90,w} \leq 0,06$ mm;
- polimer - w świetle badań kanadyjskich, najlepsze wyniki uzyskano dla geowłóknin igłowanych z włókien poliestrowych;
- w przypadku podtorza zbudowanego z gruntów drobnoziarnistych $d \leq 0,06$ mm więcej niż 95% masy suchego gruntu zalecano stosowanie przekładki piasku na torowisku pod włókniną;
- zalecany był obustronny drenaż francuski w torowisku o głębokości min. 0,15 m z odpowiednim wprowadzeniem geowłókniny do rowka, w celu umożliwienia odpływu wody z tłucznia i z warstwy filtracyjnej lub podtorza na odcinku w wykopie.

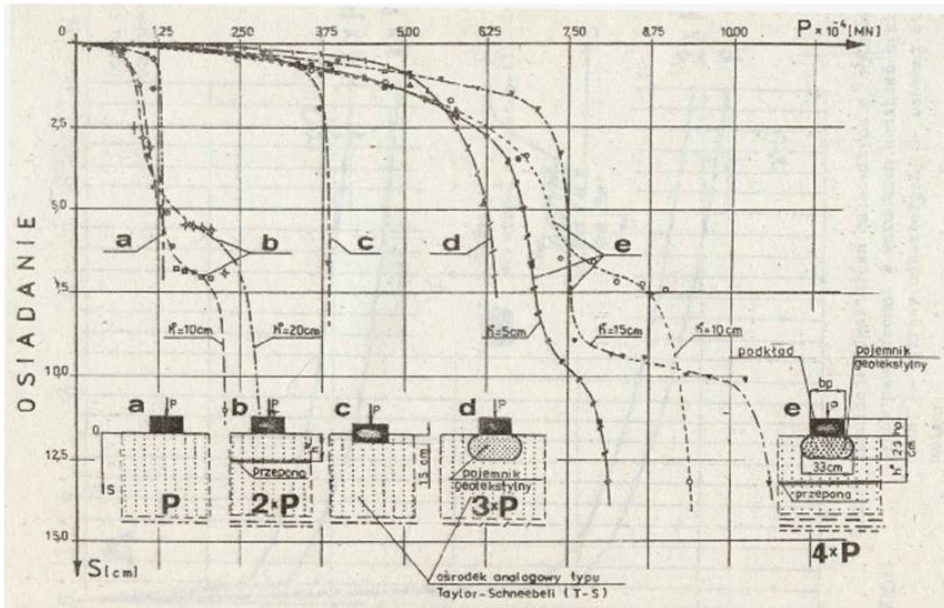
Poza Kanadą sposób ten nie znalazł jednak szerszego uznania w Europie ze względu na obawy co do możliwości wystąpienia kolmatacji geowłókniny pod tłuczniem, możliwości wystąpienia dużej ścieralności a także utrudnień występujących w razie konieczności podbijania torów. W latach 80. XX-go wieku w Holandii podjęto zatem próbę podpinania pod podkłady worków uszytych z geotkanin poliestrowych o wytrzymałości 100 kN/m wypełnianych tłuczniem (fot. 2). Worki te podpinano za pomocą taśm z poliestru o wytrzymałości nominalnej 120 kN/m (van Sandvoort 1994).



Fot. 2. Worki z geotkaniny wypełnione tłuczniem i podpięte pod podkłady kolejowe za pomocą taśm z poliestru (van Sandvoort 1994)

Pomimo udokumentowanej poprawy nośności (osiągnięto znaczną redukcję prędkości drgań w zakresie częstotliwości > 40 Hz) i znacznej redukcji osiadań podtorza (czą. o 50% w stosunku do osiadań podkładów bez worków) sposób ten nie znalazł szerszego zastosowania ze względu na duże koszty budowy i trudności w późniejszym podbijaniu torów. Podkreślić jednak należy, że uzyskane wyniki opierały się na monitoringu 221 milionów przejazdów osi o nacisku 200 kN, a więc badania te można uznać za stosunkowo wiarygodne.

Badania zbliżonego typu nawierzchni określonej symbolem 4xP prowadzone były wcześniej w Polsce (Basiewicz & Kłosek 1988/89), przynosząc szereg bardzo zachęcających rezultatów. Zbudowany na tej podstawie w eksploatowanym torze na terenie górniczym odcinek doświadczalny (1988) istnieje do chwili obecnej dając po 23 latach użytkowania możliwość oceny trwałości i niezawodności tego rozwiązania. Wykazano istotny wzrost nośności podłoża nawierzchni w stosunku do rozwiązania standardowego, istotny wzrost wartości oporu podłużnego i poprzecznego rusztu torowego praktycznie uniemożliwiający wyboczenie nawierzchni toru bezстыkowego na terenie górniczym, wykazano również bardzo skuteczne tłumienie drgań - zwłaszcza wysokich częstotliwości przekazywanych z nawierzchni na podtorze. W trakcie prób terenowych wykazano ponadto możliwość podbijania nawierzchni.



Rys. 1. Wyniki badań nośności podłoża podkładów bez wzmocnienia geosyntetykiem 'a' ze wzmocnieniem geosyntetycznym w podłożu 'b' ze wzmocnieniem geotekstylnym pojemnikiem podpokładowym 'd' oraz j. w. z dodatkową warstwą geosyntetyku na koronie torowiska 'e' (Kłosek&Basiewicz 1988)

Z tego okresu wczesnych zastosowań geosyntetyków na torowiskach kolei europejskich (lata 80. i początek lat 90.) pochodzą zalecenia lub stwierdzenia zawarte w publikacji van Sandvoort'a z 1994, z których najważniejsze przytacza się poniżej:

- w świetle dostępnych doświadczeń zastępcza średnica porów $O_{90,w}$ w geotekstyliach układanych bezpośrednio na podłoża ilaste i pylaste nie powinna przekraczać 0,060 mm ażeby wykluczyć możliwość kolmatacji przez migrujące cząstki ilowe, racjonalnym wydaje się wykonanie podsypki piaskowej na torowisku;
- wyniki doświadczeń wskazują, że gramatura gwózków igłowanych nie powinna być mniejsza niż 350 g/m^2 , a stabilizowanych termicznie – 250 g/m^2 , przy czym zalecane jest pokrycie geosyntetyku warstwą ochronną z piasku lub żwiru;
- w świetle uzyskanych do tej pory wyników można stwierdzić, że nieco lepsze właściwości filtracyjne pod obciążeniem dynamicznym

nym wykazują geowłókniny igłowane niż geowłókniny stabilizowane termicznie;

- potrzebne są dalsze badania i obserwacje dotyczące właściwego doboru średnicy zastępczej porów geotekstyliów.

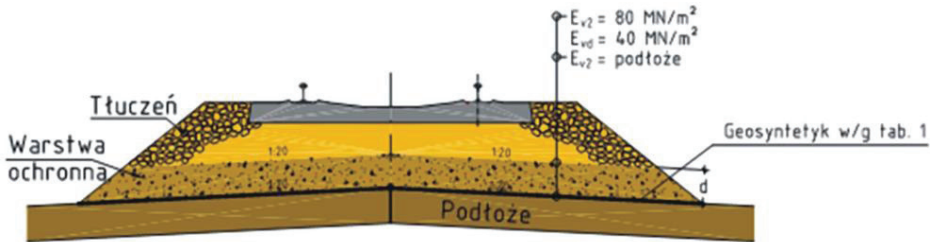
Oczywiście postęp w tej dziedzinie nie zatrzymał się na latach 80., lecz w dalszym ciągu rozwijano metody badawcze, wykonywano poligony i budowano obiekty prowadząc na nich monitoring. Zaowocowało to wydaniem w latach 90. XX-go wieku wielu publikacji, zaleceń, rozporządzeń i norm (np. BS 8006:1995, EBGeo 1997, FSGV 2005 M Geo E 05, EBGeo 2010, BS 8006:2010), które umożliwiły bardziej racjonalne i lepiej udokumentowane stosowanie geosyntetyków w tym także i w kolejnictwie.

2. Geosyntetyki do poprawy nośności i właściwości hydraulicznych podtorza

W latach 90. XX-go wieku w Niemczech w ramach projektów „Die Deutsche Einheit” („Zjednoczenie Niemiec”) polegających m.in. na rewitalizacji starych szlaków kolejowych w byłej NRD, rozpoczęto za aprobatą EBA (Eisenbahnbundesamt - Federalny Urząd Kolejowy) stosować już na dużą skalę geosyntetyki w podtorzach kolejowych. Stosowano wówczas geokompozyty: geosiatka + geowłóknina zespolone ze sobą lub też geosiatki układane na geowłókninach w celu poprawy właściwości nośnych i drenażowych podtorza. Geosyntetyki starano się przy tym układać w spągu warstwy ochronnej, bezpośrednio na podłożu rodzimym lub podłożu starego torowiska (rys. 2 i fot. 3). Z tego czasu pochodzą też wymagania stawiane górnej powierzchni warstwy ochronnej (torowisko) dla remontowanego szlaku kolejowego (RiL 836, 2008):

- prędkość jazdy pociągów $v \leq 300$ km/h: $E_{v2} \geq 120$ MN/m²;
- prędkość jazdy pociągów $v \leq 230$ km/h: $E_{v2} \geq 100$ MN/m², nawierzchnia bez podsypki;
- prędkość jazdy pociągów $v \leq 230$ km/h: $E_{v2} \geq 80$ MN/m², nawierzchnia z podsypką tłuczniową;
- prędkość jazdy pociągów (ruch towarowo - osobowy) $v \leq 160$ km/h lub wyłącznie pociągów towarowych i regionalnych $v \leq 120$ km/h: $E_{v2} \geq 50$ MN/m², nawierzchnia z podsypką tłuczniową;

- prędkość jazdy pociągów regionalnych $v \leq 80$ km/h i towarowych $v \leq 50$ km/h: $E_{v2} \geq 40$ MN/m², nawierzchnia z podsypką tłuczniową (gdzie E_{v2} - moduł sztywności podłoża przy wtórnym obciążeniu płytą $D = 300$ mm w/g DIN 18134 oraz wymagania stawiane na zbrojenie w EBGE0 1997:
 - o rozciągająca siła mobilizowana przy wydłużeniu 3%: ≥ 10 kN/m
 - o wytrzymałość krótkotrwała na rozciąganie w/g EN ISO DIN PL 10 319: ≥ 40 kN/m).



Rys. 2. Schematyczny przekrój poprzeczny ze zbrojeniem geosyntetycznym w podtorzu spełniającym jednocześnie wymagania dotyczące separacji i filtracji.

Uwaga: w przypadku budowy nowych szlaków wymaga się w Niemczech na torowisku następujących wartości modułów E_{v2} :

- prędkość jazdy $v \leq 300$ km/h: $E_{v2} \geq 120$ MN/m²,
- prędkość jazdy pociągów (ruch mieszany: pociągi osobowe i towarowe) $v \leq 230$ km/h: $E_{v2} \geq 120$ MN/m²,
- prędkość jazdy pociągów (ruch towarowo - osobowy) $v \leq 160$ km/h lub wyłącznie pociągów towarowych i regionalnych $v \leq 120$ km/h: $E_{v2} \geq 100$ MN/m², nawierzchnia z podsypką z tłucznią,
- prędkość jazdy pociągów regionalnych $v \leq 80$ km/h i towarowych $v \leq 50$ km/h: $E_{v2} \geq 80$ MN/m², nawierzchnia z podsypką z tłucznią.

Poza tym należy każdorazowo spełnić warunki dotyczące separacji i filtracji, które w międzyczasie zostały uregulowane zaleceniami zawartymi w EBA 2007, RiL 836 2008, FSGV 2005 i DVWK 1992. Ażeby wykluczyć nietrafione rozwiązania w dokumentach EBA (Federalny Urząd Kolejowy), wymaga się ażeby zastosowane geosyntetyki posiadały właściwości co najmniej równe wymaganiom minimalnym podanym przez EBA dla danej aplikacji: separacja, filtracja i zbrojenie. W tabelicy 1 przytoczono za EBA 2007 najważniejsze z tych wymagań.

Tablica 1. Wybrane parametry geosyntetyków stosowanych na kolejach DBAG w Niemczech w/g EBA 2007

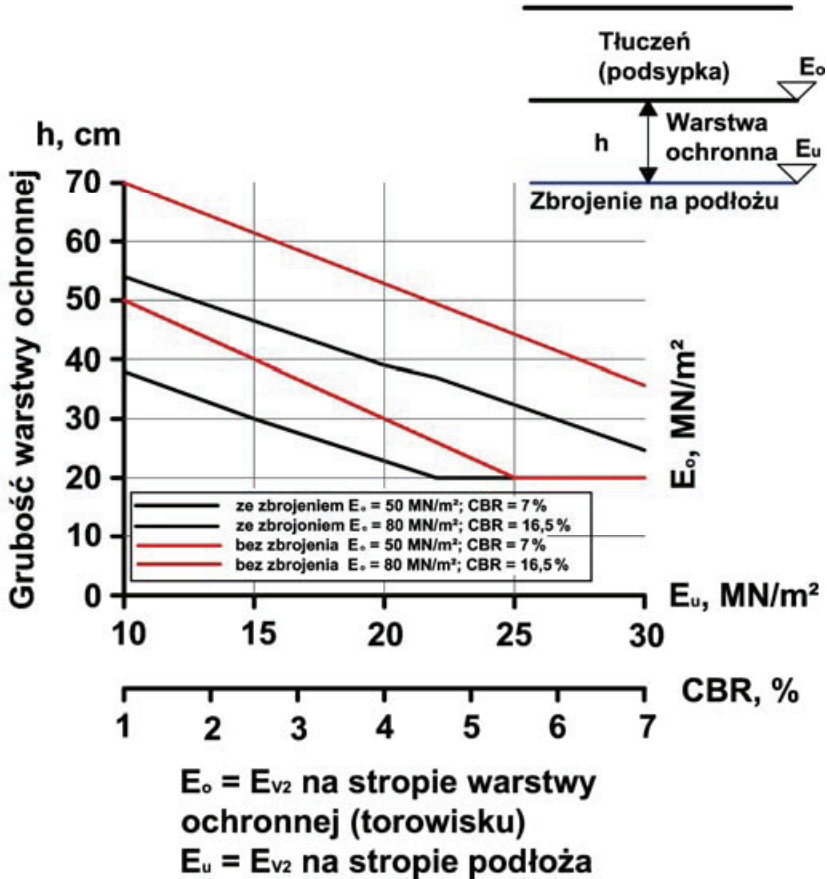
Funkcja	Cecha / Własność	Warunek	Norma badawcza
Separacja & Filtracja	Klasa wytrzymałości CBR	\geq GRK 4* ≥ 2000 N	Merkblatt M Geo E 2005 EN ISO PN 12236
	Wodoprzepuszczalność prostopadle do produktu pod naciskiem 20 kPa	$\geq 1,0 \times 10^{-3}$ m/s	DIN 60500 – 4 (2007)
Zbrojenie	Wytrzymałość na rozciąganie w obu kierunkach	≥ 40 kN/m	EN ISO PN 10319
	Anizotropia wytrzymałości	1:1...1:1,25	(-)
	Siła rozciągająca mobilizowana na obu kierunkach zbrojenia przy wydłużeniu 3 %	≥ 10 kN/m	EN ISO PN 10319
	Max wielkość oczka geosiatki	≤ 40 mm	(-)

*Klasyfikacja GRK podana jest w FSGV 2005 (Merkblatt M Geo E 05) oraz Wytycznych wzmacniania podłoża gruntowego w budownictwie drogowym. IBDiM, W-wa 2002

W praktyce grubość warstwy ochronnej spełniającej zarówno funkcję filtracyjną i mrozoochronną określa się z nomogramów dla znanej wartości E_{v2} podłoża i wymaganej wartości E_{v2} na torowisku. Wartości E_{v2} określa się w warunkach niemieckich za pomocą badania VSS w/g DIN 18 134. Poza tym w badaniach podłoża można korzystać z zależności korelacyjnych pomiędzy E_{v2} i CBR (Californian Bearing Ratio) lub pomiędzy E_{v2} i c_u (niezdrenowana wytrzymałość gruntu na szybkie ścinanie) lub E_{v2} i E_{vd} (moduł podłoża w badaniu z płytą dynamiczną). Na rys. 3 przedstawiono za EBGeo 1997 nomogram do wymiarowania grubości warstwy ochronnej jeżeli na jej stropie wymaga się $E_{v2} \geq 50$ MN/m² (remont linii kolejowej dla prędkości jazdy pociągów $v \leq 160$ km/h) i $E_{v2} \geq 80$ MN/m² (dla prędkości jazdy pociągów 250 km/h $\geq v > 160$ km/h).

Oczywiście, że grunt czy też kruszywo użyte na wymianę (lub też warstwę ochronną) powinno spełniać wymagania dotyczące wodoprzepuszczalności i zagęszczalności. Na kolejach niemieckich dopuszcza się w zasadzie dwa rodzaje takich kruszyw KG 1 i KG 2, których uziarnienie podano w RiL 836 / 2008.

**ZBROJENIE GEOSYNTETYCZNE:
zmobilizowana siła rozciągająca 10 kN/m
przy wydłużeniu 3% na obu kierunkach**



Rys. 3. Grubość warstwy ochronnej w zależności od wartości E_{v2} podłoża i wymaganej wartości E_{v2} na torowisku: $\geq 50 \text{ MN/m}^2$ i $\geq 80 \text{ MN/m}^2$, EBGeo 1997

Poprawnie wykonany remont czy też ulepszenie linii kolejowej wymaga zatem:

- wykonania badań podłoża w celu określenia jego nośności (E_{v2}), wodoprzepuszczalności (k_f) i uziarnienia;
- doborze właściwego kruszywa na warstwę ochronną KG 1 lub KG 2;
- ustalenia wymaganej grubości warstwy ochronnej np. za pomocą nomogramu (rys. 3);

- doboru odpowiedniego geosyntetyku o parametrach spełniających warunki podane w tab. 1 i DVWK 1992 (wielkość zastępcza porów $O_{90,w}$ i wodoprzepuszczalność k_v);
- doboru odpowiedniego zbrojenia spełniającego warunki podane w tab. 1 i na rys. 3;
- wykonania badań kontrolnych VSS na torowisku w celu sprawdzenia czy wymagana wartość E_{v2} dla projektowanej prędkości jazdy pociągów została osiągnięta.

Na fotografii 3 pokazano instalację geokompozytu Comtrac 55/50 B 30 z roku 1995 na szlaku kolejowym Münster - Hamm w Niemczech, przy ulepszaniu podtorza dla prędkości jazdy do 160 km/h przy użyciu pociągu zmechanizowanego. Dla przykładu podano w tab. 2 za Schilder & Piereder 2000 wyniki badań uzyskane za pomocą VSS i płyty dynamicznej, które uzyskano w trakcie remontu i w ciągu kilku do kilkunastu miesięcy po włączeniu torów do ruchu w Austrii. Badania wykonywano na podłożu przygotowanym do wbudowania warstwy ochronnej (filtracyjna + mrozoochronna) na którym układało się odcinkami: geowłókninę, geowłókninę z geosiatką i geokompozyt, spełniające wymagania ogólne podane w tab. 1. Czasokres tych badań wynosił nawet do 12 miesięcy od zakończenia budowy. Stwierdzono, że wymagane w projekcie wartości $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ ($E_{vd} \geq 40 \text{ MN/m}^2$) zostały osiągnięte po wbudowaniu warstwy ochronnej o grubości 40-45 cm, przy zastosowaniu geosyntetyków spełniających wymagania zawarte w tab. 1.

Tablica 2. Wyniki badań nośności podłoża i podtorza za pomocą obciążeń statycznych i dynamicznych płytą o średnicy 300 mm, Schilder & Piereder 2000

Typ wzmocnienia	Liczba wyników (-)	Podłoże		Torowisko z warstwą ochronną			Torowiska po x miesiącach		
		E_{v2}	E_{vd}	Grubość warstwy ochr. cm	E_{v2}	E_{vd}	E_{v2}	E_{vd}	Ilość miesięcy (-)
		MN/m ²	MN/m ²		MN/m ²	MN/m ²	MN/m ²		
Geowłóknina	26 151	25,7 -	- 12,3	40 40	79,9 -	- 28,3	106,0 -	- -	6 -
Geowłóknina i geosiatka	46	-	9,2	45	-	28,4	-	45,0	12
Geokompozyt	7	-	6,1	45	-	30,2	-	39,8	10



Fot. 3. Linia kolejowa Münster - Hamm w trakcie rewitalizacji, kompozyt Comtrac® 55/50 B30, 1995 r.

Fot. Huesker Synthetic GmbH



Fot. 4. Modernizacja podbudowy torowiska linii kolejowej E30 Lewin Brzeski – Łosiów w celu dostosowania linii kolejowej do prędkości 160 km/h – Fibertex® F-650M i Fortrac® 80/80-30, 2000r.

Fot. P. R. INORA sp. z o.o.

Podobne realizacje miały też z powodzeniem miejsce w Polsce (fot. 4 i fot. 5). Na fotografii 4 pokazano ulepszenie podtorza na trasie E30 Lewin Brzeski – Łosiów przy dostosowywaniu linii kolejowej do pręd-

kości 160 km/h w 2000 r. Na bazie ówczesnych doświadczeń i zgodnie z niemieckimi zaleceniami zawartymi w EBGEO 1997 pod warstwą tłuczniovą została ułożona włóknina o odporności na przebicie 6 kN (klasa CBR 5) i masie powierzchniowej 600 g/m² oraz geosiatka o wytrzymałości krótkoterminowej 80 kN/m w obydwu kierunkach.

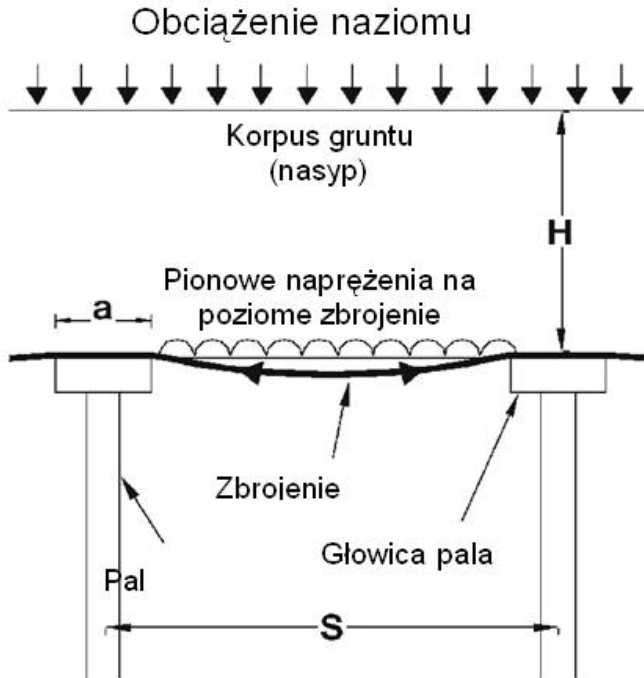


Fot. 5. Rewitalizacja Linii Kolejowej CMK, Fortrac® 80/80-30, 2008r.
Fot. P. R. INORA sp. z o.o.

3. Linie kolejowe posadowione na palach lub kolumnach ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie posadowienia

Nasypy lub linie kolejowe posadowione na palach ze zbrojeniem geosyntetycznym w ich podstawie mają kilka zalet w stosunku do posadowienia bezpośredniego na słabym gruncie: praktycznie nie ma potrzeby odczekiwania okresu konsolidacji - osiadania nasypu są bardzo małe; zbędny jest transport dodatkowych mas ziemnych na przeciążenia i kompensacje; w trakcie eksploatacji nasypy posadowione na palach praktycznie nie wykazują osiadań. W ciągu ostatnich 20 lat można było zaobserwować wzrost popularności tej metody posadowienia nasypów na całym świecie. Zasadę działania tego systemu przedstawia rys. 4 (za BS 8006:81995 & BS 8006:2010). Za-

równy obciążeniu, jak i ciężar własny nasypu, w zasadzie całkowicie przenoszone są poprzez pale na głębsze warstwy podłoża. Zbrojenie w rezultacie przesklepień przenosi bezpośrednio tylko pewną część obciążeń całkowitych od nasypu i obciążenia kolejowego. Im większe są: długość przęsła ($s-a$) w zbrojeniu i wysokość nasypu H (rys. 4), tym większe są wymagania dotyczące zbrojenia. W związku z tym, że na dzień dzisiejszy możliwa jest produkcja zbrojeń geosyntetycznych o wytrzymałościach nawet przewyższających 2400 kN/m, można w szerokich granicach zwiększać rozstawy pali.



Rys. 4. Zasada działania systemu posadowienia na palach ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie, BS 8006:2010.

Na współczesnym rynku budowlanym oferuje się zbrojenia z szerokiej gamy polimerów o różnych strukturach (geotkaniny, geosiatki, geokompozyty), co pozwala na dobór optymalnego zbrojenia, dokładnie odpowiadającego swoimi cechami mechanicznymi wymaganym warunkom. W zależności od zastosowanego polimeru, można uzyskać żądane sztywności na rozciąganie lub wytrzymałości oraz spełnić warunki dotyczące dopuszczalnej wielkości pełzania długoterminowego (wieloletniego). Zasadniczą kwestią w każdym przygotowanym do wy-

konania projekcie jest postawienie dokładnie sprecyzowanych warunków co do dopuszczalnej wielkości pełzania zbrojenia po zakończeniu budowy, ponieważ dalszych deformacji nasypu nie da się już kompensować, jak to może mieć miejsce w trakcie budowy. W tym zakresie należy wykorzystywać izochrony danego produktu do sprawdzania warunku dopuszczalnych wydłużeń krótko- i długoterminowych, tak jak to podano w Instrukcji ITB Nr 429/2007 (Wysokiński & Kotlicki 2007). Z izochron można ustalić przyrosty wydłużeń dla danej siły i danego czasu trwania obciążenia przy znanej temperaturze otoczenia. Poza tym należy zauważyć, że zbrojenie przejmuje nie tylko część sił pionowych, ale również ma ono za zadanie uniknąć zbyt dużych i niebezpiecznych ugięć (wyboczeń) pali, przejąć zatem powinno siłę bocznego rozporu w nasypie.

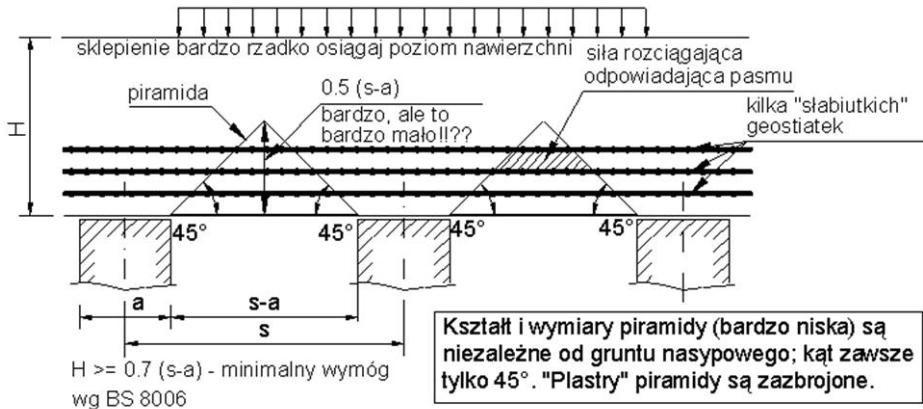
3.1. Przegląd metod wymiarowania

Począwszy od ok. 1985 roku opracowano kilka metod wymiarowania zbrojenia nadpalowego, bazując na różnych tradycjach lub też poglądach dotyczących pracy tego typu systemu. Starsze metody analityczne są bardzo proste, lub inaczej mówiąc - zbyt uproszczone. Nowsze metody ujmują już lepiej prace systemu, ale wymagają większego nakładu pracy i poprawnej znajomości mechaniki gruntów. Poza tym można sięgać obecnie do analiz numerycznych dwu- lub trój- wymiarowych (PLAXIS[®], FLAC[®]). Tu jednak należy zaznaczyć, że metody numeryczne wymagają zastosowania adekwatnych modeli gruntu, ścisłego opisanie (ustalenia) warunków brzegowych i elementów kontaktowych. Analizy numeryczne nie zawsze dają realistyczne wyniki. Stwierdzono już wielokrotnie, że w szczególności odnosi się to zastrzeżenie do dokładności wyników dotyczących wielkości sił rozciągających zbrojenie. Stąd użycie metod numerycznych wymaga dobrej znajomości nie tylko mechaniki gruntów i mechaniki polimerów ale również doświadczenia z zakresu modelowania, jak też i praktyki w realizacji i monitoringu tak zaprojektowanych obiektów. W zasadzie w metodach analitycznych mamy do czynienia z dwoma problemami, od poprawności rozwiązania których zależy dokładność obliczeń:

- redystrybucja naprężeń i odkształceń w punktowo podpartym nasypie (tj.: jaka część obciążeń działa bezpośrednio na pale, a jaka musi zostać przejęta poprzez napięte pomiędzy palami zbrojenie?);

- obliczenie siły rozciągającej w zbrojeniu i dobór do wykonania tego zbrojenia odpowiedniego produktu geosyntetycznego.

„Metoda Guido”



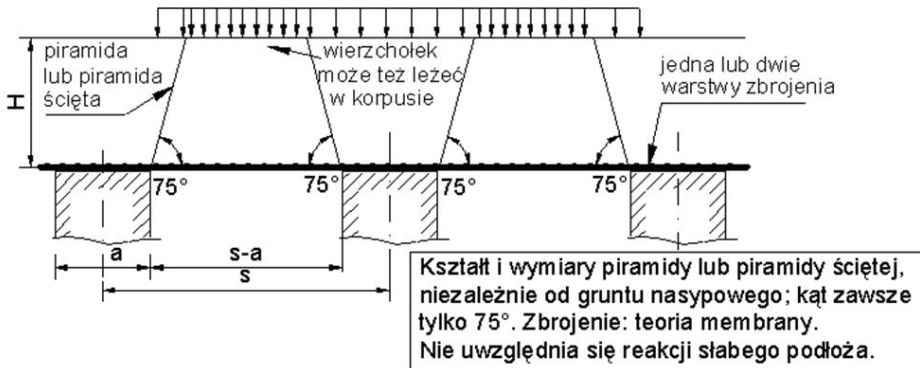
Rys. 5. „Metoda Guido”

W metodzie tej, najstarszej i najprostszej, ale i zarazem najmniej realistycznej, założono tzw. odwrócony model rozkładu naprężeń, zakładając, że naprężenia koncentrują się nad palami dokładnie pod kątem 45°, niezależnie od rodzaju gruntu nasypowego (rys. 5). Gdyby tak było w rzeczywistości, to wkładki zbrojenia przenosiłyby zatem jedynie ciężar plastrów gruntu zawartych pomiędzy wkładkami, a najwyższa wkładka obciążona byłaby piramidką o stosunkowo małej objętości. Pomimo, że tak zwana „Metoda Guido” praktycznie nie ma związku z publikacją Guido (Guido 1987), często jednak używa się takiej nazwy. Guido zajmował się rozkładem naprężeń pod płytą, w gruncie zbrojonym, a nie zagadnieniami przesklepiania się gruntu nad palami. Wiele wskazuje na to, że metoda ta, choć generuje duże oszczędności materiałowe, daje wyniki leżące po stronie niebezpiecznej [Kempton et al. 1998, Russel & Pierpoint 1997]. Autorom niniejszego artykułu są znane także przypadki obiektów zaprojektowanych tą metodą, gdzie zbyt duże deformacje praktycznie wyłączyły je z eksploatacji.

„Metoda Szwedzka”

Opis tej metody można znaleźć w Rogbeck et al. (1998). W zasadzie sam model podobny jest do Metody Guido, z tym, że kąt pochylenia

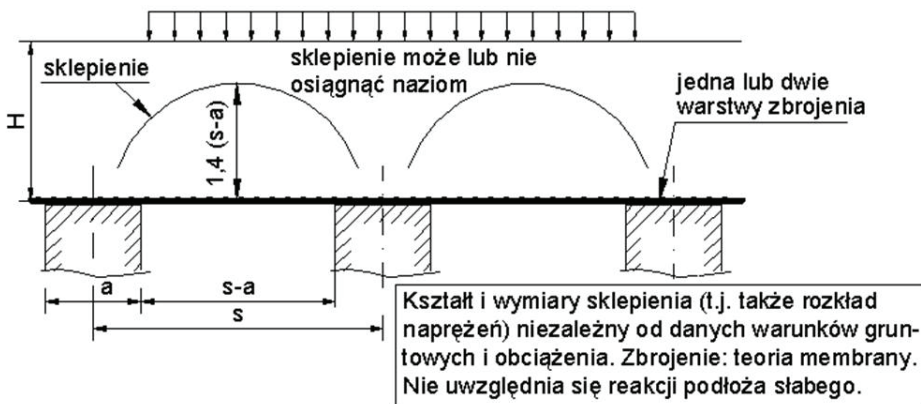
ścian piramidy ma w niej 75° (rys. 6), a nie jak w Metodzie Guido 45° . Oczywiście, kąt ten jest i tu niezależny od parametrów gruntu i rozkładu obciążeń. Intuicyjnie można stwierdzić, że ta metoda jest dużo ostrożniejsza od Metody Guido, gdyż dla niewysokich nasypów mamy w niej do czynienia najczęściej z piramidą ściętą, a więc uwzględnia się w niej częściowo obciążenie naziomu działające na górnej powierzchni piramidy.



Rys. 6. „Metoda Szwedzka“

Zbrojenie najczęściej projektuje się jako membranę obciążoną pionowo bez uwzględnienia reakcji gruntu słabego pod zbrojeniem. Metoda ta nie została ujęta, jak do tej pory, w żadnej normie budowlanej, prawdopodobnie ze względu na zbyt uproszczony model pracy systemu.

„Metoda British Standard 8006“

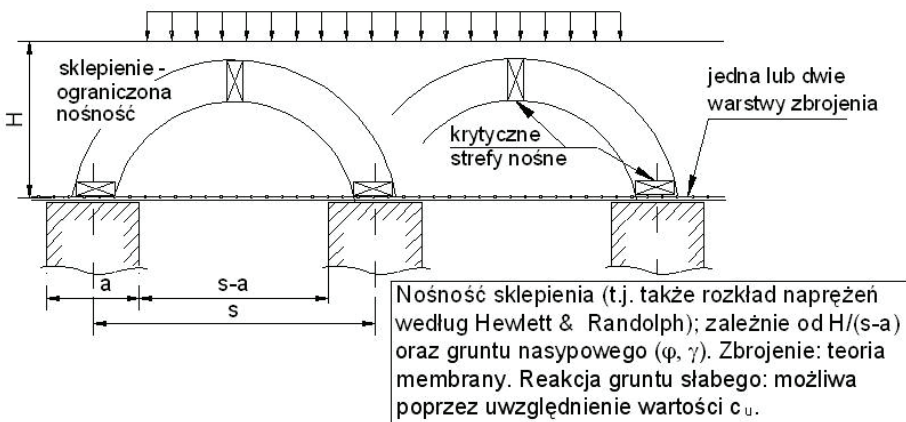


Rys. 7. Metoda „British Standard 8006“

Metoda ta została opublikowana jako metoda normowa w BS 8006:1995 i w zasadzie w niezmienionej postaci powtórzona w BS 8006:2010. W edycji z 2010 roku podano jednak także za Hewlett & Randolph (1988) sposób obliczania obciążenia na membranę przy uwzględnieniu przesklepień w gruncie. W oryginalnym modelu BS 8006 wysokość sferycznego sklepienia nad przesłem pomiędzy palami wynosi $1,4 \times (s - a)$, przy czym minimalna wysokość nasypu wynosi $0,7 \times (s - a)$ - (rys. 7).

Z punktu widzenia mechaniki gruntów nadal trzeba utrzymywać, że jest to metoda wątpliwa, bo wyniki obliczeń nadal nie zależą od jakości gruntu nasypowego. Stąd też, zdaniem autorów niniejszego artykułu, bardziej poprawne wyniki powinna dawać nowa alternatywna metoda uwzględniona dodatkowo w BS 8006:2010.

„Metoda Niemiecka” (Kempfert, Stadel & Zaeske 1997)

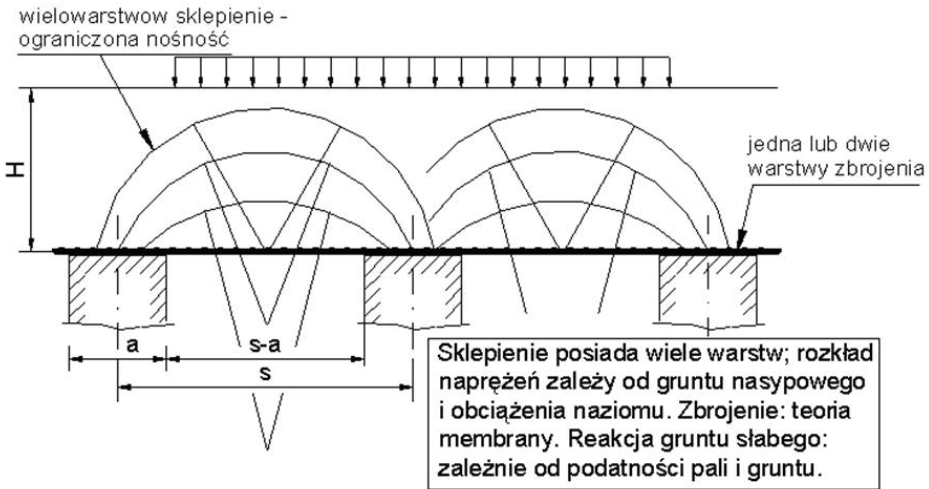


Rys. 8. „Metoda Niemiecka” (Kempfert H.G., Stadel M., Zaeske D. 1997)

Rozkład naprężeń działających na przesło pomiędzy palami (zbrojenie) i na głowice pali wyznacza się tu metodą Hewlett & Randolph (1988), w której to metodzie uwzględnia się wytrzymałość na ściananie gruntu nasypowego. Siłę rozciągającą w zbrojeniu oblicza się jak dla membrany, przy czym stworzono w tej metodzie możliwość uwzględnienia reakcji gruntu słabego pod zbrojeniem geosyntetycznym. Siłę rozciągającą w membranie powiększa się o siłę rozporu bocznego w nasypie, równą parciu czynnemu gruntu. Bliższe informacje o tej metodzie wymiarowania można znaleźć w publikacjach Kempfert et al. (1997), Alexiew & Gartung (1999), Sobolewski (1999),

Alexiew & Vogel (2001). Metoda ta została z powodzeniem zastosowana do wymiarowania wielu ważnych i dużych obiektów w Niemczech i innych krajach. Obiekty te były monitorowane celem weryfikacji założeń projektowych (Alexiew & Gartung 1995, Sobolewski 1999, Alexiew & Vogel 2001).

„Nowa Metoda Niemiecka” (Zaeske; 2001) i EBGeo 2010



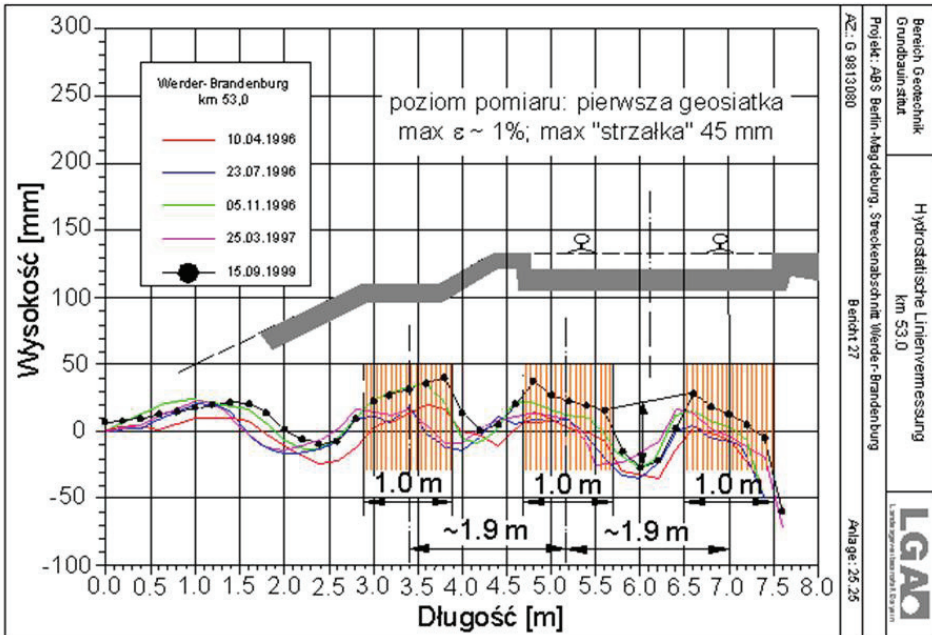
Rys. 9. „Nowa Metoda Niemiecka” EBGeo 2010.

Głównymi ulepszeniami w tej metodzie są:

- ustalenie bardziej dokładnej metody wyznaczenia obciążeń działających na zbrojenie i na głowice pali (rys. 9);
- uwzględnienie sztywności pali, nasypu i podłoża;
- uwzględnienie sprzężenia pomiędzy strzałką zwisu zbrojenia i osiadaniem głowic pali a wielkością odporu gruntu usytuowanego pod zbrojeniem.

Metoda ta była weryfikowana w badaniach modelowych w skali 1:3 (Zaeske 2001, Kempfert et al 2004). Uwieńczeniem tych prac jest rozdział 9 w nowej edycji EBGeo z 2010, który zawiera tę właśnie nową metodę. Pozwala ona na uzyskanie bardziej dokładnych wyników obliczeń i bardziej realistycznego ustalenia warunków brzegowych. W nowej edycji EBGeo znajdują się też zalecenia konstrukcyjne, między innymi takie jak:

- zbrojenie należy wbudowywać jak najbliżej głowic pali;



Rys. 11. Projekt „Werder – Brandenburg”, Niemcy. Typowy obraz deformacji na poziomie najgłębiej wbudowanej warstwy zbrojenia, pomiary i analiza LGA Nürnberg

Uwaga: różne skale poziome i pionowe.

W ramach projektu przewidziano również wbudowanie systemu monitoringu, który pod względem klasy zainstalowanych urządzeń był swego rodzaju novum dla tego typu aplikacji (rys. 11). Systematyczne pomiary były prowadzone przez 5 lat. Ważniejsze wyniki obserwacji: czapki palowe, spoczywające na bardzo smukłych palach wykazują tendencje od obrotu; niektóre pale wykazały większe osiadania od prognozowanych w projekcie; siły w zbrojeniu są mniejsze od prognozowanych; siły rozciągające od obciążenia dynamicznego (od przejeżdżających pociągów) mają wartości pomijalnie małe; wyniki pomiaru sił w geosiatkach potwierdzają prawidłowość modelu membrany.

Projekt: „Węzeł kolejowy Rathenow (Körgraben)”; Koleje Niemieckie – DB AG; 1997

W ramach przebudowy tego węzła należało przygotować tory dla przejazdów pociągów systemu ICE z torowiskiem bezpodsyPKowym. Poza tym założono stosunkowo płytkie posadowienie głowic pali. Ze względu na te specyficzne warunki i bardzo małe dopuszczalne

deformacje szyn należało zastosować dwie warstwy geosiatki Fortrac®-A, wykonane z włókien aramidowych (rys. 12). Wymiarowanie przeprowadzono za pomocą „Starej Metody Niemieckiej”. Program pomiarowy obejmował symulacje jazdy pociągów ICE z prędkością do 300 km/h na poletku doświadczalnym, wykonanym w skali 1:1 (fot. 6a).

Wyniki wykazały bardzo dobrą stabilność torowiska, strzałka zwiśsu zbrojenia dolnego okazała się ograniczoną do max. 20 mm, zaś strzałka zwiśsu zbrojenia górnego do max. 10 mm. Monitoring wykazał, że możliwe jest zastosowanie tego systemu także dla torowisk bezpodsypkowych, o ile zastosuje się geosiatki o bardzo małym pełzaniu i o odpowiednio wysokich wartościach modułów sztywności na rozciąganie, np. Projekt „Węzeł Groebers”: w tym ICE na terenie zapadliskowym, patrz. poligon (fot. 6b).

Trasa szybkiego ruchu kolejowego (ICE) Hannover - Berlin

Zabudowano dwie warstwy geosiatek o większej wytrzymałości w kierunku wzdłużnym (1 x wzdłuż, 1 x w poprzek osi kolei)



Rys. 12. Typowy przekrój torowiska; Projekt „Rathenow”; Niemcy

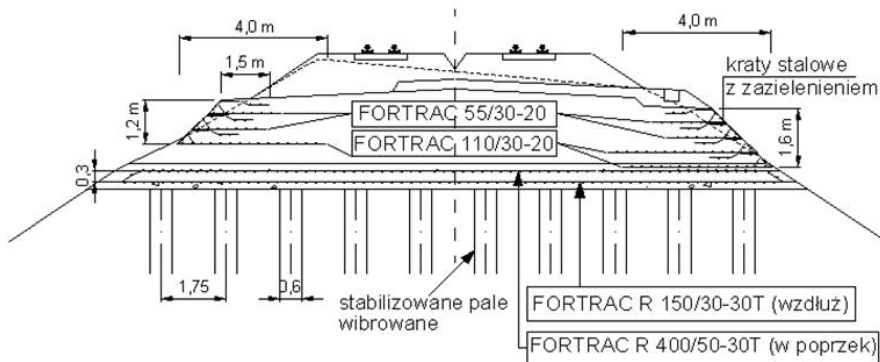


Fot. 6 a, b. DyStaFit: maszyna do symulacji jazdy pociągów: płyta o średnicy 2,5 m i masie 5 ton, częstotliwość do 39,2 Hz, symulowana prędkość jazdy pociągów ICE $v = 300$ km/h, Projekt „Rathenow” i „Groebers”; Niemcy
 Fot. Huesker Synthetic GmbH.

Projekt: „Harper Mühlenbach”; Koleje Niemieckie – DB AG; 1998/1999

Omawiany odcinek był starym jednotorowym szlakiem kolejowym, który po zjednoczeniu Niemiec należało włączyć do sieci ogólnoniemieckich magistral kolejowych. Zatem należało poszerzyć koronę szlaku tak, aby w miejsce dotychczasowego jednego toru mogły być ułożone dwa tory i to w celu umożliwienia ruchu pociągów na obydwu torach

z prędkością do 160 km/h. Z tego też względu należało nie tylko dokonać poszerzenia korony nasypu, ale i poprawić jego nośność, nie zajmując przy tym dodatkowo nowych terenów (uniknięcie problemów z wykupem gruntów). Najlepszym rozwiązaniem okazało się usunięcie górnej części nasypu, wykonanie kolumn stabilizowanych cementem, ułożenie zbrojenia i odbudowa korpusu, ale ze ścianami stromymi z gruntu zbrojonego, (rys. 13). Do wymiarowania zastosowano „Nową Metodę Niemiecką”, która pozwala bardziej racjonalnie uwzględnić współpracę z układem nośnym i zbrojenia nadpalonego gruntu słabego, znajdującego się pomiędzy palami.



Rys. 13. Typowy przekrój poprzeczny obiektu „Harper Mühlenbach”; Niemcy

Projekt „Paulinenaue“, Niemieckie Koleje (DB AG), Berlin Hamburg, 2003

Odcinek linii kolejowej Berlin - Hamburg w okolicy miasta Paulinenaue został ulepszony w latach 90. z dopasowaniem do prędkości jazdy 160 km/h. Zastosowano wtedy ulepszenie podłoża za pomocą scementowanych kolumn żwirowych, ponieważ pod stosunkowo niskim nasypem zalegał torf. Niestety po kilku latach wystąpiły pierwsze oznaki deformacji. Koleje Niemieckie zdecydowały się jednocześnie na przebudowę tego odcinka, tak ażeby zwiększyć prędkość jazdy do 250 km/h. Projekt i roboty budowlane na odcinku 10 km przeprowadzono w 2003 roku. Specyfiką tego projektu było dalsze wykorzystanie istniejących kolumn po ścięciu ich głowic, co pozwalało również zwiększyć wysokość nasypu ponad nowym zbrojeniem geosyntetycznym. Nad kolumnami utworzono materace złożone z dwóch lub trzech warstw dwuosiovej geosiatki Fortrac® 200/200-30 M, o wytrzyma-

łości nominalnej 200 kN/m w obu kierunkach każda. Linia kolejowa została zamknięta na tym odcinku i całość robót przeprowadzono w terminie 2 miesięcy. Projekt został sporządzony w oparciu o „Nową Metodę Niemiecką”. Dzięki bardzo dobremu zazębieniu się geosiatek z kruszywem, zrezygnowano z zawijania geosiatek na obrzeżach nasypu (fot. 7). Odcinek ten znajduje się pod eksploatacją od 2003 roku i nie zaobserwowano dotychczas żadnych problemów ze statecznością czy też deformacjami. Zainstalowany system monitoringu wykazuje jak na razie spory zapas bezpieczeństwa jeżeli chodzi o stan użytkowania.

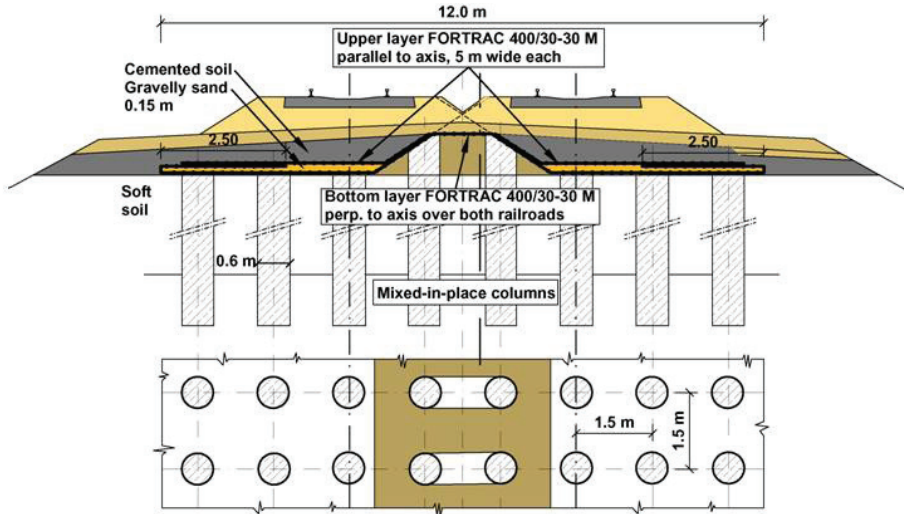


Fot. 7. Typowa sekwencja robót: Linia Kolejowa Berlin-Hamburg, Odcinek: „Paulinenaue” - 3 warstwy zbrojenia nad palami, Fortrac® 200/200-30 M
Fot. Huesker Synthetic GmbH

Projekt „Büchen”, Niemieckie Koleje (DB AG), Berlin-Hamburg, 2003

Na linii kolejowej Berlin-Hamburg zrealizowano również w 2003 roku projekt „Büchen”, w celu podwyższenia prędkości jazdy do 250 km/h. Odcinek „Büchen” o długości około 1 km znajduje się niedaleko Hamburga i nie był wcześniej wzmacniany. Odcinek ten nie mógł być jednak całkowicie zamknięty, zatem rekonstrukcję należało przeprowadzić połówkowo, w dwóch etapach, które związane ze sobą za pomocą geosiatek ułożonych poprzecznie (rys. 14, fot. 8). Kolumny nośne wykonano metodą „Mixed-in-place”, przy czym w centralnej części szlaku głowice kolumn usytuowano wyżej tak, ażeby można

było wykonać rekonstrukcję metodą pół na pół. Zbrojenie stanowią dwie jednoosiowe geosiatki ułożone ortogonalnie. Obliczenia statyczne wykazały potrzebę zastosowania geosiatki Fortrac® 400/30-30 M w poprzek i wzdłuż torowiska. Pomiędzy dwoma geosiatkami wbudowano warstwę piasku o grubości 0,15 m. W tym przypadku zastosowano w kierunku poprzecznym półmaterac.



Rys. 14. Typowy przekrój poprzeczny, Linia Kolejowa Berlin-Hamburg, Odcinek „Büchen”



Fot. 8. Instalacja poprzecznego zbrojenia nadpalowego na pierwszej półtorze w podtorzu, Linia Kolejowa Berlin-Hamburg, odcinek „Büchen”

Fot. Huesker Synthetic GmbH.

4. Podsumowanie

Projektowanie i wykonawstwo zbrojeń geosyntetycznych w podtorzu ma już długą historię, która sięga lat 70. ubiegłego wieku. W tym czasie powstało na świecie wiele metod obliczeniowych, bazujących na doświadczeniach empirycznych, systemach monitoringu i wynikach wieloletnich obserwacji. Właściwie zaprojektowane zbrojenie powinno zabezpieczać dopuszczalne rzędne niwelety na okres żywotności budowanego obiektu, a zatem powinno ono (zbrojenie) wykazywać małe pełzanie. Stąd należy dołożyć wszelkich starań, aby zmobilizować zbrojenie już w trakcie budowy włączając je do współpracy z podtorzem.

Dobór zbrojenia (rodzaj polimeru, konstrukcja produktu geosyntetycznego) należy przeprowadzić w oparciu o charakterystyki wytrzymałościowe i izochrony wybranych produktów, ograniczając ilość warstw do maksymalnie dwóch, tzn. instalować jedynie zbrojenie poprzeczne i wzdłużne. W przypadkach wątpliwych - należy sięgać po metodę obserwacyjną, wykonywać poligony dla sprawdzenia założeń i modelu obliczeniowego. Warto zaznaczyć że można przy tym wykorzystywać urządzenia do symulacji jazdy pociągów podobnie jak się to wykonuje od wielu lat w Niemczech.

Bibliografia

- [1] Liberenz K., Chilian G. 1986: *Geotextilien im Schichtsystem des Eisenbahnunterbaues*. Technische Textilien 29, s. 134-136.
- [2] Basiewicz T., Kłosek K. 1988: *Konstrukcja podłoża szynowego typu 4P o podwyższonej zdolności eksploatacyjnej*. Mat. V Konf. Naukowej 'Drogi Kolejowe'; Gdańsk-Stogi 1989.
- [3] Kłosek K. 1997: *Recording and analysis of some high-speed railway dynamic and vibroacoustic characteristics with use of the microcomputer signal analyser*. World Congress on Railway Research WCRR'97, Firenze-Italy, 1997.
- [4] Kłosek K. 1996: *The diagnostics of new permanent way type under the conditions of great service load of rolling stock*. International Heavy Haul Railway Conference, Montreal – Quebec – Canada, 1996.

- [5] Guido V.A., Knueppel J.D., Sweeny M.A. 1987: *Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs*. Proc. Geosynthetic '87 Conf., Nowy Orlean, USA; str. 216÷225.
- [6] Hewlett W.J., Randolph M.F. 1988: *Analysis of piled embankments*. Ground Engineering, Tom. 22, Nr. 3, str. 12÷18.
- [7] DVWK 1992. Anwendung von Geotextilien im Wasserbau, Merkblatt DK 626/627. Wydawnictwo Paul Parey, Hamburg-Berlin. Merkblatt
- [8] Van Santvoort G. 1994: *Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering*,. Wydawnictwo A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- [9] EBGEO 1997. Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik – DGGT; Wydawnictwo Ernst & Sohn; Berlin; Niemcy.
- [10] Kempfert H.G., Stadel M., Zaeske D. 1997: *Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen*. Bautechnik, Tom 74, Zeszyt 12, str. 818÷825.
- [11] Russel D.M., Pierpoint N. 1997: *An assessment of design methods for piled embankments*. Ground Engineering, Listopad 1997, str. 29÷44.
- [12] Kempton G.T., Russel D., Pierpoint N.D., Jones C.J.F.P. 1998: *Two-and-three-dimensional numerical analysis of the performance of piled embankments*. Proc. Sixth Intern. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, USA; IFAI, Roseville, MN; Tom 2, str. 767÷772.
- [13] Raymond G.P. 1999: *Railway rehabilitation geotextiles*. Geotextiles and Geomembranes, Wydawnictwo Elsevier Science Ltd., s. 213-230.
- [14] Alexiew D., Gartung E. 1999: *Geogrid reinforcement railway embankment on piles – Monitoring 1994-1998*. Proc. Geosynthetico '99, South American Symposium on Geosynthetics, s. 403-411.
- [15] Rogbeck Y, Gustavson S., Sodergren I., Lindquist D. 1998: *Reinforced piled embankments in Sweden – design aspects*. Proc. Sixth Intern. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, USA; Mineapolis, IFAI, Roseville, MN, Tom 2, str. 755÷762.
- [16] Sobolewski J. 1999: *Nасыпы kolejowe ze zbrojeniem geosyntetycznym w podstawie, posadowione na sztywnych i podatnych*

- palach i kolumnach*. DK 99, X Konferencja Naukowo-Techniczna "Drogi Kolejowe 99, CNTK, Politechnika Warszawska, Spala; str. 241÷256.
- [17] Lieberenz K., Alexiew D., Pohlmann H. 2000: *Bau eines Bahndammes mit geokunststoffbewehrter Basis und Böschung*. Proc. 26. Deutsche Baugrundtagung in Hannover 2000. DGGT, Essen. str. 433-439.
- [18] Schilder R., Piereder F. 2000: *Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800-R*. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Heft 9/2000. s. 577-586.
- [19] Alexiew D., Vogel W. 2001: *Railroads on piled embankments in Germany: Milestone projects*. Proc. International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Kyushu, Japonia; Wydawnictwo Balkema; Holandia; Rotterdam; Tom 1, str. 185÷190.
- [20] Zaeske D. 2001: *Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen*. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Fachbereich Geotechnik, Heft 10.
- [21] Kempfert H.G., Göbel C., Alexiew D., Heitz C. 2004: *German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements*. Proc. EuroGeo 3, Monachium.
- [22] FGSV 2005. Merkblatt für die Anwendung von Geokunststoffen im Erdbau des Strassenbaues, M Geo E 05, Verlag FGSV.
- [23] EBA 2007. Prüfungsbedingungen für Geokunststoffe des Eisenbahn-Bundesamtes, Ausgabe vom 01.02.2007.
- [24] Wysokiński L., Kotlicki W. 2007: *Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami*. Instytut Techniki Budowlanej, Instrukcja 427.
- [25] RiL 836. 2008. Richtlinie 836-Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten. Wydawnictwo DB Netz AG.
- [26] EBGeo 2010. Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik – DGGT; Wydawnictwo Ernst & Sohn; Berlin; Niemcy.
- [27] British Standards Institution: BS 8006:2010. Code of practice for strengthened reinforced soils and other fills. Londyn, BSI.

EXAMPLES OF GEO-SYNTHETICS APPLICATION FOR SUBGRADE IMPROVEMENT WHILE REVITALIZATION AND NEW RAILWAY TRACKS CONSTRUCTION

Summary

The application of geo-synthetics for improvement of subgrade load capacity and durability have been presented in the paper. The geo-synthetics are usually placed down directly below the layer of ballast, built-up under the protective layer or used deeply in the subgrade so-called overpale reinforcement have been presented in the paper. The oldest way for load capacity and durability improvement using geo-synthetics laid directly on trackway i.e. placed down directly under ballast have been given. The examples and rules for dimensioning of geo-synthetic reinforcement set down in the bottom of protective layer that is less abrasion sensitive and seems to be more persistent than geo-synthetic placed down not deeply under ballast have been presented. The overpale reinforcement applied in case of weak subgrades of high thickness of strata have been described. To illustrate the range of geo-synthetics endurance the nominal values of endurance for these reinforcements have been given. The list of bibliography allows everybody to study the problem by oneself.

Keywords: railway subgrade, geo-synthetics, geo-synthetics reinforcement