

*Dr hab. inż. Andrzej Surowiecki prof. UP
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,
Dr inż. Wojciech Kozłowski
Politechnika Opolska*

ROLA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH W PROJEKTOWANIU WZMOCNIEŃ PODŁOŻA MODERNIZOWANYCH DRÓG SZYNOWYCH

SPIS TREŚCI

1. Instytut Kolejnictwa poligonem zawodowej praktyki kadry naukowo-badawczej kolejnictwa
2. Badania pionowych przemieszczeń odcinków toru na poligonowym stanowisku COBiRTK
3. Badania cech wytrzymałościowych laboratoryjnych modeli fizycznych warstwy podłoża toru ze wzmocnieniem
4. Przykład projektowania warstwy wzmacniającej torowisko
5. Przykłady rozwiązań projektowych i zastosowań systemu wzmocnień podtorza
6. Podsumowanie

STRESZCZENIE

W artykule omówiono istotę badań stanu odkształcenia modeli fizycznych podbudowy rusztu torowego, których rezultaty mogą stanowić podstawę do projektowania wzmocnień podłoża modernizowanych dróg szynowych.

Opisano wykonane w COBiRTK poligonowe badania w skali naturalnej, dotyczące pionowych przemieszczeń toru ze zbrojeniem w podsypce w funkcji kumulowanego obciążenia dynamicznego. Scharakteryzowano badanie modelowe w skali laboratoryjnej przedstawiające konstrukcję modeli, metodę badań i uzyskane wyniki.

Zwrócono uwagę na efekty zastosowania w ośrodku gruntowym tzw. materaca (będącego trójwymiarowym systemem zbrojenia), który jest rozwiązaniem bardziej zaawansowanym w stosunku do dwuwymiarowych wkładek typu siatka lub mata płaska.

1. INSTYTUT KOLEJNICTWA POLIGONEM ZAWODOWEJ PRAKTYKI KADRY NAUKOWO-BADAWCZEJ KOLEJNICTWA

Instytut Kolejnictwa od początku działalności jest wiodącą placówką naukowo-badawczą w Polsce, realizującą zadania ukierunkowane na rozwój teorii, badań doświadczalnych, techniki i technologii we wszystkich dziedzinach kolejnictwa. Oprócz funkcji stymulatora innowacyjności, do dorobku Instytutu Kolejnictwa należy zaliczyć także różne formy szkoleń, mające na celu doskonalenie kolejowych kadr technicznych kierowniczo i średniego szczebla, m.in. staże badawcze, a także kursy. Te ostatnie formy doskonalenia kadry funkcjonują również „na odległość” i przykładem może być prowadzony od wielu lat we Wrocławskim Ośrodku Szkolenia Kadr PKP przez naukowców z Instytutu Kolejnictwa, system wykładów bazujący na technice multimedialnej.

Znamienna jest teza, wypowiedziana w 1985 roku przez Profesora H. Bałucha (dyrektora ówczesnego COBiRTK) w referacie konferencyjnym [2], dotyczącym kształtowania sylwetki inżyniera dróg kolejowych w praktyce zawodowej. Od tamtej daty minęło 26 lat, jednak teza ta wydaje się nie tracić na aktualności, a brzmiała ona mniej więcej tak: „zmiany jakie są dokonywane w technice i technologii budowy oraz utrzymania dróg kolejowych, a także w znacznych obszarach specjalności dotyczących tego sektora kolejnictwa, dość znacząco wyprzedzają przygotowanie przeciętnego inżyniera dróg kolejowych”. W dalszym ciągu artykułu profesor wyszczególnił:

- co powinno być celem i jakie elementy składają się na kształtowanie sylwetki inżyniera dróg kolejowych,
- warunki i proponowane sposoby kształcenia nowatorskich praktyków dróg kolejowych,
- propozycję systemu przyspieszonego doskonalenia kierowniczej kadry kolejowej.

Profesor stwierdził, że zmiany są pożądane z uwagi na konieczność podejmowania wszystkich dostępnych sposobów usprawnień kolejnictwa [1, 2]. Na szczególną uwagę i szacunek zasługuje także tradycja Instytutu Kolejnictwa, polegająca na udostępnianiu swoich laboratoriów innym placówkom naukowo-badawczym, np. uczelniom technicznym. Dzięki życzliwości i wszechstronnej pomocy ze strony Profesora H. Bałucha oraz pracowników Zakładu Dróg Kolejowych, autor niniejszego opracowania wykonał na poligonowym stanowisku w ówczesnym COBiRTK (1979 r.) doświadczalne badania przemieszczeń pionowych odcinków toru kolejowego obciążonych dynamicznie. Badania te stały się inspiracją postępów w praktyce zawodowej autora. W dalszej części artykułu przedstawiono zakres i rezultaty wspomnianych badań, dotyczących projektowania wzmocnień podłoża dróg szynowych oraz omówiono bardziej zaawansowane rozwiązania wykonane przez autora, będące pochodnymi rezultatów badań podstawowych, wykonanych w COBiRTK.

2. BADANIA PIONOWYCH PRZEMIESZCZEŃ ODCINKÓW TORU NA POLIGONOWYM STANOWISKU COBIRTK

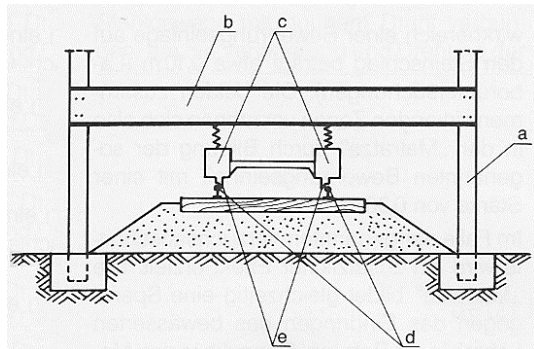
Celem badań było określenie wielkości osiadań odcinków toru pod wpływem długotrwałego obciążenia eksploatacyjnego. Żądane warunki pracy toru w przybliżeniu symuluje metoda dynamicznych obciążeń pulsacyjnych. Stanowisko badawcze wybudowane w COBiRTK [5, 10] umożliwiło wprowadzenie do modelu odcinka toru dowolnego obciążenia dynamicznego, które może być ekwiwalentne do obciążenia brutto przewozami w określonym żądanym przedziale czasu.

Skonstruowano trzy modele odcinka toru wykonane z szyn typu S49 na podkładach drewnianych o rozstawie osiowym 0,65 m:

- model nr 1: przęsło o długości 25 m (wzorcowe – dla celów porównawczych), na podsypce z piasku gruboziarnistego o grubości warstwy $h_p = 0,5$ m;
- model nr 2: odcinek toru o długości 1,5 m, skonstruowany na trzech podkładach i podsypce piaskowej (piasek gruboziarnisty) o grubości warstwy $h_p = 0,5$ m;
- model nr 3: odcinek toru o długości 1,5 m, skonstruowany identycznie jak model nr 2, lecz w warstwie podsypki piaskowej zainstalowano na głębokości $z = 0,25$ m poziomą wkładkę zbrojącą w postaci siatki stalowej o średnicy prętów $d = 3,5$ mm i wymiarze kwadratowych oczek 12 mm x 12 mm.

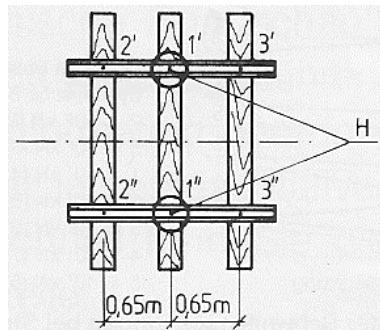
Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 1. Urządzenie w części roboczej składało się z konstrukcji ramowej, której słupy (a) w dolnej części są zakotwione w podłużnych belkach, wbudowanych w podłoże za pośrednictwem betonowych fundamentów. Urządzenie robocze przekazujące naciski punktowe na oba toki szynowe jest przytwierdzone do belki poprzecznej (b) w sposób sprężysty, umożliwiając jednocześnie realizację nacisku pionowego centrycznie na osie pionowe szyn. Końcówki (e) cylindrów (c) przekazujących nacisk na szyny (d) mają profil obręczy koła pojazdu szynowego. Część sterująca jest wyposażona w zespół wywierający obciążenie statyczne i dynamiczne pulsacyjne. Urządzenie umożliwia zastosowanie obciążenia statycznego w zakresie 0–200 kN na pojedynczą szynę, natomiast dynamicznego w zakresie: 0–160 kN na szynę.

Rys. 1. Schemat poligonowego stanowiska badawczego, zbudowanego w Zakładzie Dróg Kolejowych COBiRTK [5, 10]. Oznaczenia: a) słupy konstrukcji ramowej, b) poprzecznica, c) cylindry generujące nacisk pionowy na szynę, d) szyny, e) końcówki cylindrów obciążających szynę



W procesie badań wprowadzono naciski osiowe statyczne i dynamiczne siłą $Q = 200$ kN. Pulsator pracował z częstotliwością 4,17 Hz, co było odpowiednikiem jazdy pojazdu z prędkością 75 km/h przy rozstawie osi 5,0 m. Funkcjonowanie odcinka toru w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych (rzeczywistych), odzwierciedlono przez wprowadzenie długotrwałego cyklu obciążeń dynamicznych w zakresie 0–50 mln kN systemem pulsacyjnym. W ciągu 1 godz. uzyskiwano obciążenie toru o wartości 3 mln kN (0,3 Tg). Wobec tego, stan całkowitego obciążenia 50 mln kN (5 Tg) osiągnięto po upływie 16,7 godz. Wszystkie modele obciążano w pierwszej fazie siłą statyczną (obciążenie wstępne), w celu wstępnego zagęszczenia podsypki. Następnie przykładano obciążenie dynamiczne.

Rysunek 2 ilustruje widok z góry modelu odcinka toru o długości 1,5 m, złożonego z trzech podkładów. Pomiary osiadań trwałych wykonywano niwelacyjnie, na podstawie zmian wysokości punktów pomiarowych umieszczonych na szynach obu toków. Natomiast amplitudę drgań oszacowano po zainstalowaniu specjalnego pionowego ekranu na końcówce roboczej cylindra (e). Na ekranie w postaci siatki milimetrowej, dokonywano odczytów amplitudy za pomocą nieruchomego rejestratora.



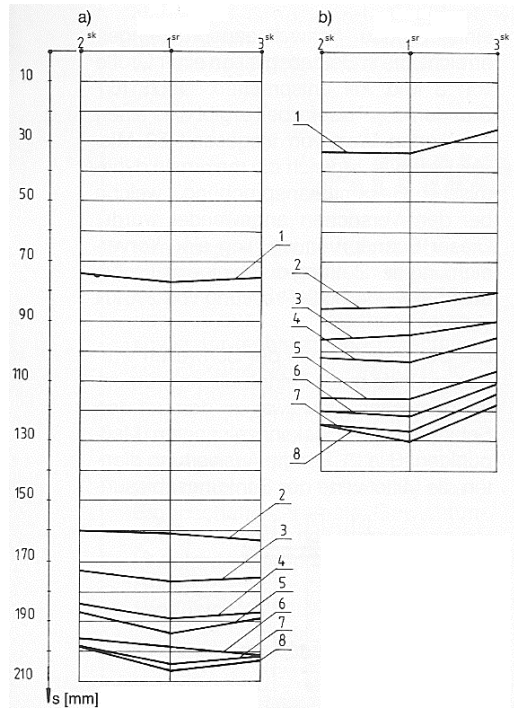
Rys. 2. Widok z góry modelu odcinka toru złożonego z trzech podkładów [5, 10]: H – punkty nacisku hydraulicznych cylindrów wywołujących pionowe obciążenie szyn

Wyniki badań pokazano na rysunkach 3 i 4. Z rysunku 3 wynika, że w początkowej fazie obciążenia dynamicznego występuje szybki przyrost osiadań, w miarę narastania cykli tego obciążenia, przyrosty osiadań ulegają redukcji. Najmniejsze przyrosty zaobserwowano przy obciążeniu na poziomie powyżej $3 \cdot 10^7$ kN. Generalnie, wartości osiadań i ich przyrosty są zdecydowanie mniejsze w przypadku toru na podsypce zbrojonej.

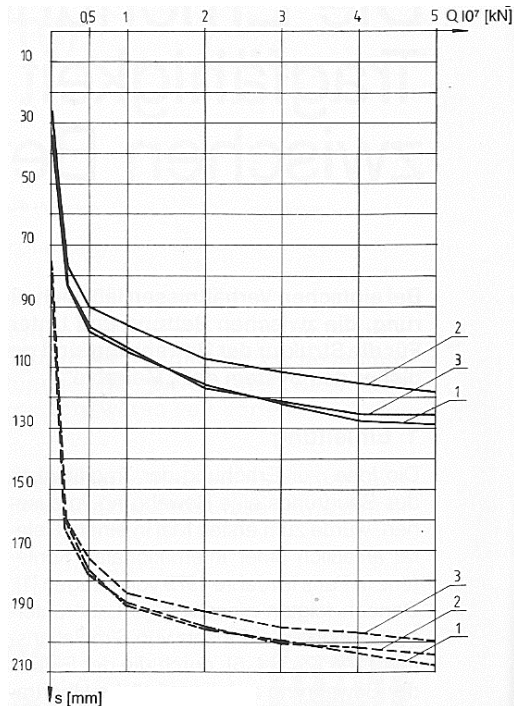
Podsumowanie badań stanowi prezentacja przebiegu krzywych trwałych osiadań podkładów w zależności od kumulacji obciążenia dynamicznego (średnie wartości z dwóch punktów pomiarowych), przedstawiono na rysunku 4. W przypadku modelu toru na zbrojonym podłożu, w odniesieniu do modelu na podłożu bez zbrojenia stwierdzono:

- redukcję wartości osiadania o około 50%,
- mniejsze przyrosty osiadań,
- ograniczenie tendencji wzrostu krzywej osiadań dla wielkości obciążenia w granicach $5 \cdot 10^7$ kN.

Rys. 3. Średnie osiadania podkładów w punktach pomiarowych 1', 1''; 2', 2''; 3', 3'' (według rys. 2) w funkcji narastającego dynamicznego obciążenia pionowego [5, 10]. Oznaczenia: 1' – podkład środkowy, 2', 3' – podkłady skrajne; a) podłoże niezbrojone, b) podłoże zbrojone; 1) krzywa osiadań pod wpływem wstępnego obciążenia statycznego; 2–8) krzywe osiadań w przypadku obciążenia dynamicznego o wartościach: 2 · 10⁶ kN (2); 5 · 10⁶ kN (3); 1 · 10⁷ kN (4); 2 · 10⁷ kN (5); 3 · 10⁷ kN (6); 4 · 10⁷ kN (7); 5 · 10⁷ kN (8); s – osiadanie

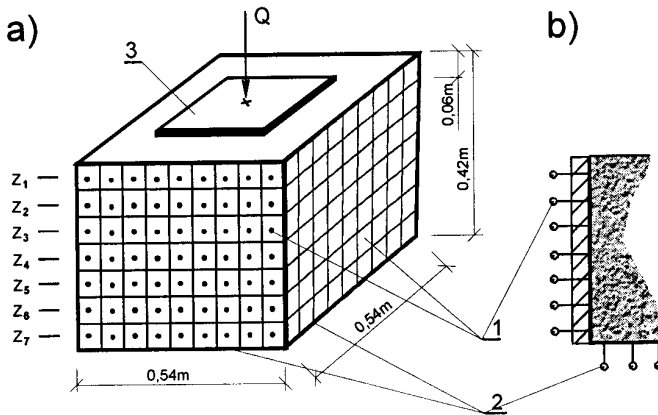


Rys. 4. Przebieg trwałych średnich osiadań podkładów w zależności od dynamicznego obciążenia [5, 10]: s – osiadanie; 1, 2, 3 – średnie osiadania punktów założonych na trzech podkładach tworzących model odcinka toru; — podłoże zbrojone, --- podłoże niezbrojone



3. BADANIA CECH WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH LABORATORYJNYCH MODELI FIZYCZNYCH WARSTWY PODŁOŻA TORU ZE WZMOCNIENIEM

Cechy wytrzymałościowe warstwy podłoża toru ze wzmocnieniem oszacowano na podstawie badań stanu odkształcenia modeli fizycznych, sporządzonych w skali laboratoryjnej. Prostopadłościenne modele o wymiarach w planie $0,54 \times 0,54$ m i wysokości $h = 0,42$ m skonstruowano w pojemniku, będącym zasadniczym elementem stanowiska badań (rys. 5) [11–17]. Specjalna konstrukcja stalowych ścian i dna pojemnika umożliwiła oszacowanie trójwymiarowego stanu odkształcenia modeli poddanych działaniu statycznego nacisku w zakresie $Q = 0–20$ kN, wywieranego przez nieodkształcalną poziomą, kwadratową płytę o wymiarze boku $0,32$ m.



Rys. 5. Schemat i podstawowe parametry stanowiska badawczego [11–17]: a) widok ogólny; b) przekrój pionowy przez ścianę; 1 – mechaniczny czujnik ciśnień poziomych; 2 – czujnik ciśnień pionowych; 3 – płyta przekazująca obciążenie na model ośrodka gruntowego wzmocnionego; poziomy pomiarowe $z_1 = 0,03$ m; $z_2 = 0,09$ m; $z_3 = 0,15$ m; $z_4 = 0,21$ m; $z_5 = 0,27$ m; $z_6 = 0,33$ m; $z_7 = 0,39$ m

Matryce modeli wykonano z gruboziarnistego piasku o wilgotności 3%, średnio zagęszczonego. Cechy wytrzymałościowe modeli określono w funkcji ilości zbrojenia. Wkładki zbrojenia w formie siatek z tworzyw sztucznych (geosiatki Fortrac) rozmieszczono poziomo, tzn. prostopadle do płaszczyzny obciążenia badawczego w celu otrzymania maksymalnego efektu anizotropowej spójności, wyrażonej zależnością [13–16]:

$$c = f_d \operatorname{tg}^2 (0,25 \pi + 0,5 \varphi) (2 \Delta z)^{-1} \quad (1)$$

gdzie: f_d – wytrzymałość obliczeniowa zbrojenia na rozciąganie, φ – kąt wewnętrzny tarcia ośrodka niespoistego ze zbrojeniem, Δz – odstęp pionowy warstw zbrojenia.

Zjawisko spójności w ośrodku niespoistym wzmocnionym prowadzi do zwiększenia wytrzymałości na ścinanie, której wartość jest wyrażona równaniem:

$$\tau_f = p_z \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (2)$$

gdzie według [13–16]: $p_z = p_y \operatorname{tg}^2 (0,25 \pi + 0,5 \varphi) + p_0,$ (3)

natomiast p_0 jest naprężeniem poziomym w stanie zniszczenia modelu gruntu wzmocnionego, wyrażonym zależnością:

$$p_0 = 2 c \operatorname{tg} (0,25 \pi + 0,5 \varphi). \quad (4)$$

Jeżeli osiadanie (przemieszczenie pionowe) modelu ośrodka o wysokości h ze wzmocnieniem wynosi Δh i jest spowodowane naprężeniem pionowym ściskającym p_z , wtedy wskaźnik odkształcenia E_0 wynosi:

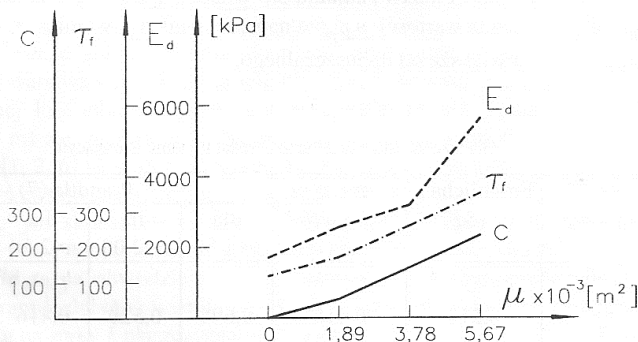
$$E_0 = p_z h (\Delta h)^{-1}. \quad (5)$$

Parametry wytrzymałościowe modelu ośrodka gruntowego wzmocnionego, dla wybranych przypadków poziomego zbrojenia przedstawiono w tabelicy 1 oraz na rysunku 6.

Tabela 1

Spójność c , wytrzymałość na ścinanie τ_f i wskaźnik odkształcenia E_0 w modelach ośrodka niespoistego: bez zbrojenia (wzorzec) i ze wzmocnieniem (w funkcji procentu zbrojenia μ)

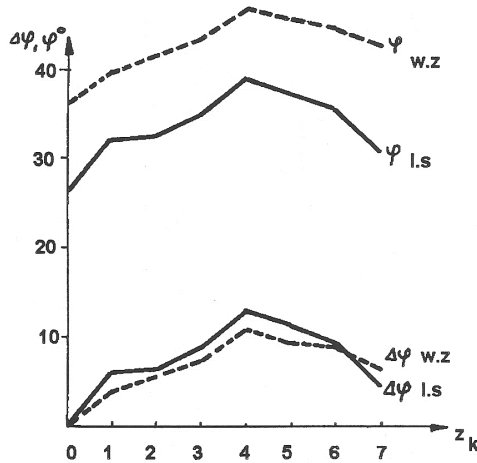
Odmiana modelu	c [kPa]	τ_f [kPa]	E_0 [kPa]
Bez zbrojenia	—	117,950	1697,88
Zbrojenie pojedynczą siatką stalową o oczkach 12×12 na głębokości 0,21 m $\mu_1 = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	52,65	170,60	2551,61
Dwie siatki, jak wyżej lecz na głębokości 0,15 m i 0,27 m $\mu_2 = 3,78 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	140,89	258,84	3174,11
Trzy siatki, jak wyżej, na głębokości 0,12 m; 0,21 m i 0,33 m $\mu_3 = 5,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$	232,54	350,49	5618,19



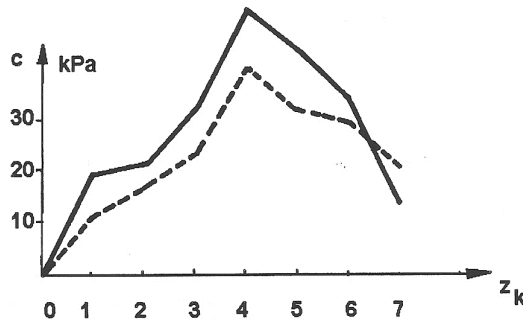
Rys. 6. Spójność c , wytrzymałość na ścinanie τ_f i wskaźnik odkształcenia E_0 w modelach ośrodka niespoistego [13–16]: bez zbrojenia (wzorzec) i ze wzmocnieniem (w funkcji procentu zbrojenia μ)

Prowadząc stosowną analizę, można wykazać zmienność efektów wzmocnienia w zależności od lokalizacji wkładki w modelu zbrojonym pojedynczo:

- kąt tarcia wewnętrzznego φ oraz przyrost wartości kąta tarcia $\Delta\varphi$ w modelach zbrojonych pojedynczo, w funkcji poziomu lokalizacji wkładki (rys. 7);
- spójność c modeli zbrojonych pojedynczo, w funkcji poziomu lokalizacji wkładki (rys. 8).



Rys. 7. Parametry modeli zbrojonych pojedynczo, w funkcji poziomu lokalizacji wkładki [13–16]: 0 – wzorzec (model bez zbrojenia); 1, 2, ...7 – poziomy lokalizacji wkładki; — model ośrodka luźno nasypanego (l.s.); --- model ośrodka wstępnie zagęszczonego (w.z.); φ – kąt tarcia wewnętrzznego, $\Delta\varphi$ – przyrost wartości kąta tarcia

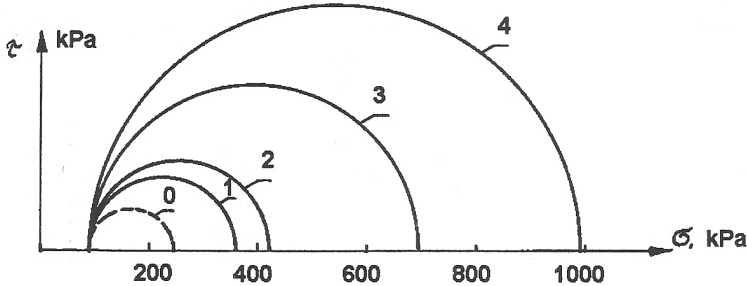


Rys. 8. Spójność c dla modeli zbrojonych pojedynczo, w funkcji poziomu lokalizacji wkładki [13–16]: 0 – wzorzec (model bez zbrojenia); 1, 2, ...7 – poziomy lokalizacji wkładki; — model ośrodka luźno nasypanego (l.s.); --- model ośrodka wstępnie zagęszczonego (w.z.)

Ogół cech wytrzymałościowych może być ujęty charakterystyką nośności, czyli maksymalnym naprężeniem pionowym σ_{1max} , które może wystąpić w obciążonym modelu, w momencie osiągnięcia czynnego stanu granicznego naprężeń [13–16]. Różnica między tym naprężeniem σ_{1max}^* (będącym pochodną największego możliwego obciążenia modelu) w przypadku modelu ze zbrojeniem a jego odpowiednikiem w modelu niezbrojonym σ_{1max} stanowi efekt przyrostu nośności wskutek zbrojenia:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{1\max}^* - \sigma_{1\max} \quad (6)$$

Efekt przyrostu nośności modeli ośrodka wskutek zbrojenia pokazano na rysunku 9, wykorzystując konstrukcję tzw. kół Mohra, powszechnie stosowaną w geotechnice.



Rys. 9. Efekt przyrostu nośności modeli ośrodka luźno nasypanego (l.s.) wskutek zbrojenia [13–16]: 0 – wzorzec (model bez zbrojenia); 1) model zbrojony pojedynczą wkładką na poziomie $z_4 = 0,21$ m; 2) model zbrojony dwiema wkładkami na poziomach $z_3 = 0,15$ m i $z_5 = 0,27$ m; 3) model zbrojony trzema wkładkami na poziomach $z_2 = 0,09$ m, $z_4 = 0,21$ m i $z_6 = 0,33$ m; 4) model zbrojony siedmioma wkładkami na poziomach $z_1 = 0,03$ m; $z_2 = 0,09$ m; $z_3 = 0,15$ m; $z_4 = 0,21$ m; $z_5 = 0,27$ m; $z_6 = 0,33$ m; $z_7 = 0,39$ m

4. PRZYKŁAD PROJEKTOWANIA WARSTWY WZMACNIAJĄCEJ TOROWISKO

Na przykładzie linii kolejowej Wrocław – Międzyzlesie (odcinek Boreczek – Strzelin, km 26,100–26,290), przystosowywanej do zwiększonych zadań przewozowych, obliczono według [8, 9] całkowite naprężenie pionowe $\sigma_{z,c}$ w podtorzu, w przekroju pionowym pod szyną ze wzoru ogólnego:

$$\sigma_{z,c} = \sigma_n + \sigma_g + \sigma_{st} + \sigma_d, \quad (7)$$

gdzie: σ_n – naprężenie od ciężaru własnego nawierzchni, σ_g – naprężenie od ciężaru gruntu podtorza, σ_{st} – naprężenie od pojazdów statyczne, σ_d – naprężenie od pojazdów, po uwzględnieniu oddziaływań dynamicznych.

W stanie istniejącym, grubość warstwy podsypki tłuczniowej $h_t = 0,25$ m; brak warstwy ochronnej, prędkość jazdy $V_{\max} = 70$ km/h) naprężenie $\sigma_{z,c}$ w torze na odcinku prostym wynosi 0,33 MPa, natomiast w łuku poziomym (o promieniu $R = 950$ m) – 0,38 MPa. Krytyczne obciążenia wyznaczono według wzorów:

- Fröhlicha [5],
$$p_{kr} = \pi \sin\phi (\gamma h + c \operatorname{ctg}\phi) + \gamma h, \quad (8)$$

- Poradnika wzmocnienia podłoża [8],

$$p_{kr} = \pi (\gamma h + c \operatorname{ctg}\phi) (\operatorname{ctg}\phi + \phi - 0,5\pi)^{-1} + \gamma h, \quad (9)$$

- Prandtla,

$$p_{kr} = c (n \operatorname{tg} \varphi)^{-1} [\operatorname{tg}^2(0,25 \pi + 0,5 \varphi) e^{\pi \operatorname{tg} \varphi} - 1]. \quad (10)$$

Do wzorów 8–10 podstawiono parametry podłoża gruntowego: kąt tarcia wewnętrznego φ , spójność c , naprężenie w poziomie torowiska od ciężaru nawierzchni $\sigma_n = 0,01$ MPa. Wyniki obliczeń podano w tablicy 2. Wartości współczynników bezpieczeństwa przyjęto w zakresie: $n = 1,5$ – 3 . Porównanie wartości p_{kr} z naprężeniami σ_{zc} wskazuje, że są przypadki, gdzie obciążenie jest większe od krytycznego.

Tablica 2

Obciążenia krytyczne torowiska w stanie istniejącym według wzorów

Wzór obliczeniowy	Fröhlicha	Poradnika	Prandtla			
			$n = 1,50$	$n = 2,00$	$n = 2,50$	$n = 3,00$
Obciążenie krytyczne p_{kr} [Mpa]	0,22	0,42	0,69	0,52	0,42	0,34

W stanie projektowanym założono: grubość warstwy podsypki tłuczniowej $h_t = 0,3$ m; warstwę ochronną (kruszywo kamienne + odsiewki uzyskiwane w procesie oczyszczania podsypki) o grubości $h_0 = 0,3$ m, prędkość jazdy $V_{\max} = 100$ km/h. Dla tych danych, naprężenie całkowite na poziomie torowiska wynosi: w torze na odcinku prostym $\sigma_{zc} = 0,15$ Mpa, w łuku poziomym o promieniu $R = 950$ m – $0,17$ Mpa. Z obliczeń wykonanych wg [6] dla podtorza w okresie intensywnych opadów atmosferycznych, co skutkuje niekorzystnymi wartościami parametrów wytrzymałościowych ($c = 0,03$ Mpa, $\varphi = 7^\circ$, wilgotność pobranych próbek gruntu podtorza np. 22%) otrzymano niezbędną grubość warstwy ochronnej $h_0 = 0,28$ m. Przyjęto więc warstwę ochronną o grubości $h_0 = 0,3$ m, uwzględniając tolerancje w wykonawstwie robót ziemnych.

Stwierdzono, że w niektórych przypadkach naprężenie σ_{zc} jest zawsze większe od krytycznego ciśnienia torowiska p_{kr} (tabl. 2). Wobec tego jest wymagane dodatkowe wzmocnienie korony torowiska, np. geosiatkami. Ponadto zaproponowano zabezpieczenie korony torowiska przed namakaniem za pomocą geowłókniny rozścielonej pod warstwą ochronną wykonaną z kruszywa, o grubości warstwy $h_0 = 0,3$ m oraz geosiatki jako warstwy podkładowej.

Bardziej skutecznym rozwiązaniem jest zamknięcie warstwy wzmocniającej kruszywa powłoką siatkową i utworzenie tzw. materaca. Zadaniem materaca jest radykalna poprawa rozkładu obciążeń eksploatacyjnych na powierzchni torowiska. Z uwagi na konieczność izolacji w torze zelektryfikowanym, zaproponowano skonstruowanie materaca z dwóch poziomo rozmieszczonych siatek z tworzywa sztucznego o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, przedzielonych warstwą kruszywa (np. tłuczeń podsypkowy). Siatki na obwodzie powinny być spięte, aby zapewnić wstępne sprężenie materaca. Starannie dobrany wymiar oczek siatki do wielkości ziaren kruszywa, powinien wyeliminować poślizg w płaszczyźnie styku obu komponentów materaca.

5. PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ PROJEKTOWYCH I ZASTOSOWAŃ SYSTEMU WZMOCNIEŃ PODTORZA

W latach osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych XX wieku w kilku lokalizacjach Dolnośląskiej DOKP, wdrożono wzmocnienie podłoża toru z zastosowaniem materaca wzmacniającego, według projektu autora niniejszego artykułu [5, 7]. Materac wzmacniający, jako samodzielna warstwa sprężysta składa się z:

- 1) materiału wypełniającego przestrzeń materaca – przyjęto tłuźcen bazaltowy, charakteryzujący się dużym kątem tarcia wewnętrznego w porównaniu z kątem tarcia gruntu podtorza;
- 2) powłoki otaczającej wypełnienie materaca, traktowanej jako materiał zbrojeniowy, wykonanej z siatki stalowej lub z tworzyw sztucznych (geosiatka) o odpowiednim splocie prętów i wymiarze oczek, dostosowanym do wielkości ziaren kruszywa; oczekiwano efektu klinowania się ziaren tłuźcienia, zapewniającego pożądany opór przesuwu ziaren tłuźcienia w płaszczyźnie powłoki.

Grubość warstwy materiału wypełniającego materac wynosiła $h_m = 0,15-0,2$ m. Wartość tę oszacowano na podstawie analizy teoretyczno-doświadczalnej, uwzględniając m.in. wartość i charakter obciążenia eksploatacyjnego (dynamika), parametry techniczne nawierzchni i nośność podtorza w strefie torowiska. Zwiększenie wymiaru h_m ponad 0,2 m nie zagwarantuje poprawy sytuacji funkcjonowania materaca (jako obiektu zespolonego), lecz może ograniczyć lub całkowicie zlikwidować współpracę powłoki dolnej z górną, która jest wykonana z warstwy tłuźcienia, stanowiącego matrycę.

Materac wzmacniający, będący sprężystą warstwą nośną powinien być wstępnie naprężony, co osiąga się przez napinanie powłoki i zagęszczanie tłuźcienia wypełniającego. Materac należy posadowić na warstwie podkładowej grubego kruszywa (np. tłuźcienia), rozścielonej bezpośrednio na torowisku. Warstwa ta jest warstwą przejściową, zapewniającą utrzymanie kontaktu z materacem przez tarcie w płaszczyźnie dolnej powłoki materaca. Zadania spełniane przez materac:

- redukcja tzw. rozporu bocznego w podłożu toru, co w następstwie powoduje zmniejszenie przemieszczeń pionowych toru;
- przekazywanie w równomierny sposób na podłożu obciążeń eksploatacyjnych, co eliminuje zagrożenie mechanicznej destrukcji torowiska oraz zapobiega zmianom reologicznym w ośrodku gruntowym podtorza;
- zabezpieczenie podsypki przed penetracją materiału gruntowego pod wpływem dynamiki ruchu pojazdów w okresach nadmiernego zawilgocenia podtorza.

Materac wzmacniający funkcjonuje, wykorzystując następujące zjawiska fizyczne:

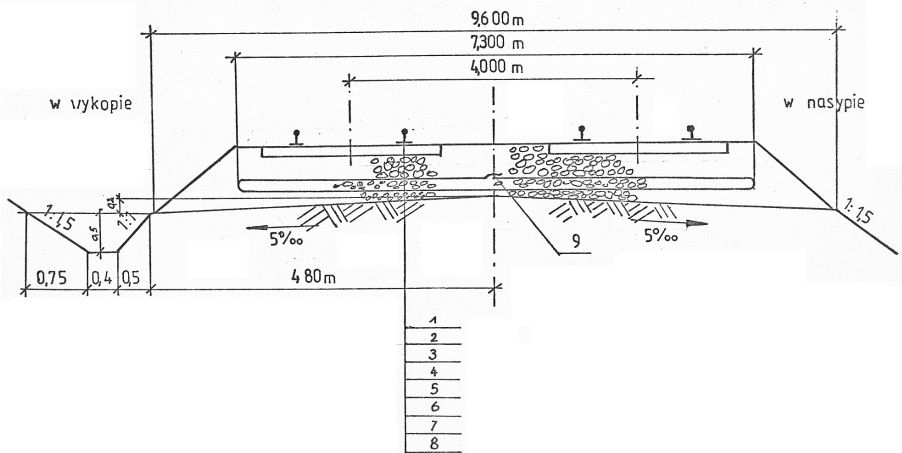
- współdziałanie kruszywa wypełniającego materac z jego powłoką siatkową na zasadzie tarcia;
- współpracę powłok siatkowych górnej z dolną, za pośrednictwem sił napięcia wewnętrznego, które mechanicznie zespalają ziarna kruszywa wypełniającego. Siły te

wynikają ze stref współdziałania pomiędzy kruszywem a powłoką. Zasięg tych stref oszacowano w procesie badań trójwymiarowego stanu odkształcenia fizycznych modeli ośrodka niespoistego wzmocnionego, sporządzonych w skali laboratoryjnej [6, 11–17];

- tarcie materiału siatkowej powłoki materaca w kontakcie z ziarnami podsypki tłuczniowej (od strony górnej) oraz w kontakcie z warstwą podkładową albo z ziarnami gruntu podtorza (jeżeli warstwy podkładowej nie zastosowano).

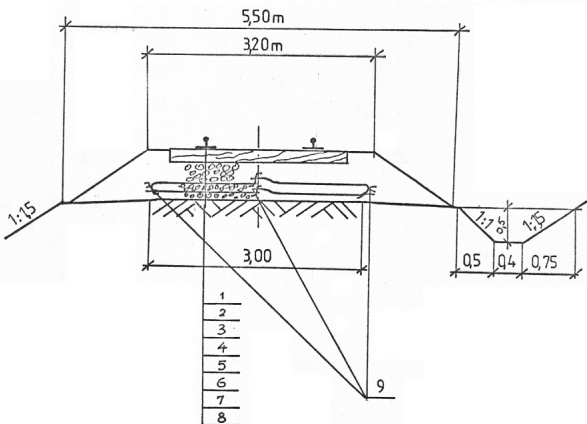
Mogą być stosowane następujące formy konstrukcji materaca wzmacniającego:

- materac wzmacniający jako element wspólny do podbudowy obu torów linii dwutorowej (rys. 10);



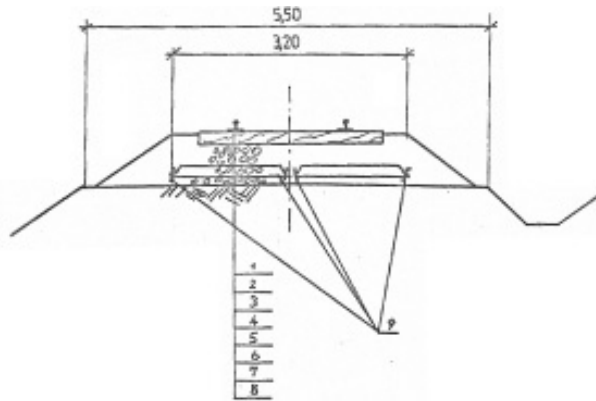
Rys. 10. Schemat zabudowy materaca wzmacniającego obejmującego oba torów linii dwutorowej [7]:
1) szyna, 2) podkład, 3) podsypka, 4) siatka górna powłoki materaca; 5) tłuczeń wypełniający materac,
6) siatka dolna powłoki materaca; 7) warstwa podkładowa tłuczni o grubości 0,1 m, uwałowana;
8) podtorze, 9) spinacze łączące powłokę siatkową

- materac wzmacniający podbudowę toru linii jednotorowej (rys. 11);



Rys. 11. Przekrój poprzeczny przez tor linii jednotorowej z materacem wzmacniającym założonym w strefie pod podkładem [7] (oznaczenia jak na rys. 10)

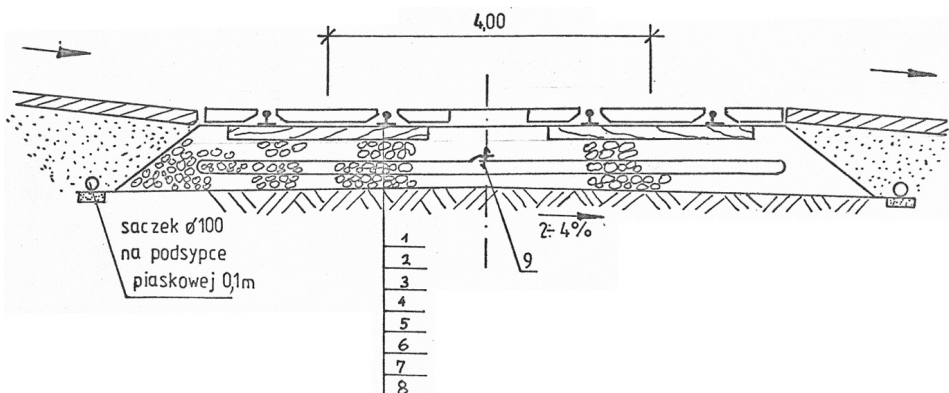
- matrac wzmacniający założony w podbudowie toru indywidualnie w strefach pod szynami (rys. 12).



Rys. 12. Przekrój poprzeczny przez tor linii jednotorowej z matracami założonymi indywidualnie w strefach pod szynami [7] (oznaczenia jak na rys. 10)

Wybrane przykłady zastosowania materaca wzmacniającego w praktyce:

1. Przejazd kolejowo-drogowy w km 28,640 linii PKP Wrocław – Międzylesie, na szlaku Boreczek – Strzelin [5, 18]. W dniu 27.09.1986 r. założono w podbudowie obu torów warstwę wzmacniającą w formie materaca o grubości $h_m = 0,2$ m. Matrac wykonano z tłuczni bazaltowego otoczonego powłoką ze stalowej siatki, którą po naprężeniu spięto w odstępach około 0,5 m specjalnymi spinaczami w strefie osi międzytorza linii dwutorowej (rys. 13). Matrac był zainstalowany bezpośrednio pod warstwą podsypki i odseparowany od wysadzinowego podtorza warstwą podkładową (wyrównawczą) o grubości $h_w = 0,1$ m, wykonaną z tłuczni. Warstwa separacyjna była w tym przy-



Rys. 13. Przekrój poprzeczny przez toru na przejeździe kolejowo-drogowym z wbudowanym w podłożu matracem obejmującym oba toru linii dwutorowej [7] (oznaczenia jak na rys. 10)

padku niezbędna, ponieważ w podtorzu (rejon Strzelina) występują minerały ilaste (około 60%): illit, montmorylonit, kaolinit.

2. Rozjazd zwyczajny w torze głównym zasadniczym stacji PKP Boreczek na linii PKP Wrocław – Międzyzylesie [5, 18]. W dniu 2.11.1987 r. zainstalowano w podbudowie rozjazdu warstwę wzmacniającą skonstruowaną identycznie jak w poprzednim wypadku.

W obu przedstawionych obiektach autor wykonywał przez okres 12 miesięcy od daty założenia materaca, geodezyjne pomiary przemieszczeń pionowych punktów pomiarowych założonych na głowce szyny. Pomiary dowiodły, że tor z warstwą wzmacniającą założoną pod nawierzchnią wykazuje znacznie zredukowane i równomierne osiadania.

6. PODSUMOWANIE

W wielu przypadkach modernizacji linii kolejowych jest konieczne wprowadzanie systemów wzmacniających podłoże toru w świetle obowiązujących wytycznych technicznych, dotyczących wymaganego modułu odkształcenia torowiska oraz prędkości projektowej. Procedura wzmacniania podłoża w budownictwie komunikacyjnym jest obecnie standardem w szczególnych przypadkach warunków geotechnicznych podłoża.

Omówiono istotę badań stanu odkształcenia modeli fizycznych podbudowy rusztu torowego, których rezultaty mogą zdaniem autora stanowić podstawę do projektowania wzmocnień podłoża modernizowanych dróg szynowych. Opisano badania:

1. Poligonowe w skali naturalnej, wykonane przez autora w Centralnym Ośrodku Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa (1979 r.), dotyczące kształtowania się przemieszczeń pionowych odcinków toru ze zbrojeniem w podsypce, w zależności od wartości kumulowanego obciążenia dynamicznego. W szczególności przedstawiono stanowisko badawcze COBiRTK, metodę pomiarów i rezultaty. W torze na podsypce zbrojonej stwierdzono redukcję wartości osiadań oraz pomniejszenie przyrostów osiadań wraz ze wzrostem wartości obciążenia i dość szybką stabilizację poziomu wartości osiadań w procesie obciążania.
2. Modelowe w skali laboratoryjnej. Wykazano m.in. przyrost nośności w warstwie ośrodka niespoistego po zainstalowaniu wzmocnienia, w zależności od liczby wkładek i ich lokalizacji.

Zwrócono uwagę na efekty zastosowania w ośrodku gruntowym, tzw. materaca wzmacniającego (będącego trójwymiarowym systemem zbrojenia), który jest rozwiązaniem bardziej zaawansowanym w stosunku do dwuwymiarowych wkładek typu siatka lub mata płaska. Na podstawie wyników badań stwierdzono:

1. Zastosowanie poziomego zbrojenia ośrodka niespoistego w postaci dwuwymiarowych wkładek (np. siatki) powoduje redukcję poziomych odkształceń w zakresie do 40%, zależnie od parametrów zbrojenia (liczba wkładek, rozmieszczenie, cechy wytrzymałościowe i in.) i cech fizycznych ośrodka gruntowego [11–17].

2. System trójwymiarowego wzmocnienia stanowi znaczący postęp w technologii projektowania podłoża dróg szynowych. Tor z nawierzchnią posadowioną na trójwymiarowym wzmocnieniu typu mata komórkowa [4] albo omawiane materace, wykazuje lepsze funkcjonowanie przy intensywnym obciążeniu eksploatacyjnym w stosunku do toru wzmocnionego wkładkami płaskimi. Dowodem tej tezy są zdecydowanie bardziej równomierne i zredukowane do ponad 40% przemieszczenia pionowe toru, a także ograniczenie nacisków pionowych na torowisko o około 30% wskutek korzystniejszego ich rozkładu. Dodatkowym efektem jest odciążenie najsłabszych stref torowiska, ograniczenie tzw. rozporu bocznego i krawędziowych nacisków podsypki na podtorze oraz zabezpieczenie nawierzchni przed ewentualnymi przemieszczeniami poziomymi.

Rozwinięciem pierwotnej formy zbrojenia przestrzennego, którą stanowi opisany materac, są obecnie stosowane zaawansowane rozwiązania, np. kompozyty tłuczniowe [3]. Jest to nowoczesna konstrukcja, złożona z warstwy tłucznia uzbrojonej (otoczonej) geosiatkami i dodatkowo stabilizowanej chemicznie (np. żywicą).

Autor składa serdeczne podziękowanie Panu Profesorowi Henrykowi Bałuchowi oraz naukowcom Zakładu Dróg Kolejowych ówczesnego COBiRTK za udostępnienie w 1979 r. poligonowego stanowiska badawczego i stosownej aparatury, konsultacje i wszechstronną pomoc w realizacji badań przemieszczeń pionowych, obciążonych dynamicznie odcinków toru kolejowego.

BIBLIOGRAFIA

1. Bałuch H.: *Koncepcja systemu szkolenia oraz doskonalenia kadr technicznych na PKP. „Drogi Kolejowe”, 1983, nr 2, s. 37–42.*
2. Bałuch H.: *Kształtowanie sylwetki inżyniera dróg kolejowych w praktyce zawodowej. Materiał III Konferencji Naukowej „Drogi kolejowe”, Kraków – Muszyna, 3–5.10.1985, Politechnika Krakowska, s. 21–30.*
3. Basiewicz T., Gołaszewski A., Towpik K.: *Badania porównawcze nawierzchni kolejowej z kompozytem tłuczniowym na odcinkach doświadczalnych. Materiał III Konferencji Naukowo-Technicznej „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym”. INFRASZYN, 2010, s. 34–52.*
4. Kłosek K., Gad. P., Wróbelki W.: *Wykorzystanie geowebu do wzmocnienia słabonośnego podtorza rozjazdów na podrozjazdnicach betonowych. Materiały IX Konferencji Naukowej „Drogi Kolejowe”, Kraków–Kościelisko, Politechnika Krakowska, listopad, 1997.*

5. Mazur S., Surowiecki A.: *Die Erhöhung der Oberbau-Tragfähigkeit durch eine Bewehrung zwischen bettung und Unterbau*. „Eisenbahntechnische Rundschau“, 1989, Nr 1/2, s. 85–87.
6. Mazur S., Surowiecki A.: *Anwendung bewehrter Erde zur Unterbauverstärkung*. „Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau“, 1989, Nr 8, s. 458–464.
7. Mazur S., Surowiecki A.: *Opracowanie sposobu zabudowy warstwy wzmacniającej z gruntu zbrojonego*. Raport serii SPR nr 15/86. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1986.
8. Siewczyński Ł.: *Zabezpieczenia podłoża warstwą ochronną*. W: „Poradnik wzmocnienia podłoża gruntowego dróg kolejowych”. Praca zbiorowa. Poznań, Politechnika Poznańska, 1986.
9. Skrzyński E., Sikora R.: *Kolejowe budowle ziemne*, T.1. Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1990.
10. Surowiecki A.: *Badania osiadań odcinków toru obciążonych dynamicznie, na poligonomowym stanowisku COBiRTK*. Raport PRE/1979. Materiał niepublikowany. Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1979.
11. Surowiecki A.: *Arbeit der bewehrten Sandschicht unter Dauerbelastung*. „Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau“, 1988, Nr 3, s. 130–32.
12. Surowiecki A.: *Laborversuche zum Einfluss ausgewählter Parameter auf die Wirkung der Bewehrung in lockeren Böden*. „Bauingenieur“, Springer Verlag, 1989, Nr 5, s. 215–217.
13. Surowiecki A., Wysocki L.: *Verformungen und Druckfortleitung einer Schicht aus bewehrter Erde*. „Bautechnik“, 1990, Nr 4, Jg. 67, s. 115–117.
14. Surowiecki A.: *Mechanische Eigenschaften der mit Vliesstoff bewehrten Sandschicht*. „Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau“, 1991, Nr 8, s. 596–598.
15. Surowiecki A.: *Laboruntersuchungen von mechanischen Eigenschaften bewehrter lockerer Bodenschichten*. „Bautechnik“, 1994, H.11, s. 707–711.
16. Surowiecki A.: *Interaction between reinforced soil components*. „Studia Geotechnica et Mechanica“, Wrocław, 1998, No. 1/2, s. 43–61.
17. Surowiecki A.: *Badania modelowe współpracy składników kompozytowych*. „Inżynieria i Budownictwo“, 2004, Nr 10, s. 527–530.
18. Surowiecki A.: *Model wzmocnienia gruntem zbrojonym podłoża komunikacyjnych budowli ziemnych*. „Raport serii SPR“ nr 12/88. Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1988.