

METODY WYMIAROWANIA WZMOCNIENIA PODTORZA W ŚWIETLE ZMIAN WPROWADZONYCH W POLSKICH PRZEPISACH

Streszczenie

Polska zobligowana jest do przestrzegania wielu międzynarodowych regulacji dotyczących projektowania i utrzymania linii kolejowych. Aby cel ten osiągnąć, w 2014 r. dokonano nowelizacji przepisów krajowych, co umożliwiło projektowanie w sposób spójny z przepisami międzynarodowymi. W pracy przedstawiono główne zmiany dotyczące klasyfikacji linii kolejowych i wymagań wobec podtorza oraz ich wpływ na możliwości wyboru alternatywnych metod wymiarowania wzmocnienia podtorza. Wskazano na kilka metod, w szczególności metody zalecane przez polskich zarządców infrastruktury kolejowej.

WSTĘP

W Polsce, kluczowym aktem prawnym w zakresie projektowania i budowy infrastruktury kolejowej dostosowanej do maksymalnej prędkości jazdy pojazdów szynowych wynoszącej 200 km/h jest Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie [1]. W dokumencie tym, niektóre wymagania i parametry graniczne zostały określone bardziej rygorystycznie niż w europejskich specyfikacjach i normach. Wynika to z faktu, że Rozporządzenie [1] zostało wprowadzone w 1998 r., kiedy to nie istniały jeszcze oparte na europejskich normach ich polskie odpowiedniki PN-EN, a także Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności – w tym dla podsystemu „Infrastruktura” [2]. W ramach nowelizacji Rozporządzenia [4] w 2014 r. wprowadzono zmiany umożliwiające projektowanie w sposób bardziej spójny z przepisami międzynarodowymi.

1. ZMIANY POLSKICH PRZEPISÓW DOTYCZĄCYCH PROJEKTOWANIA PODTORZA KOLEJOWEGO

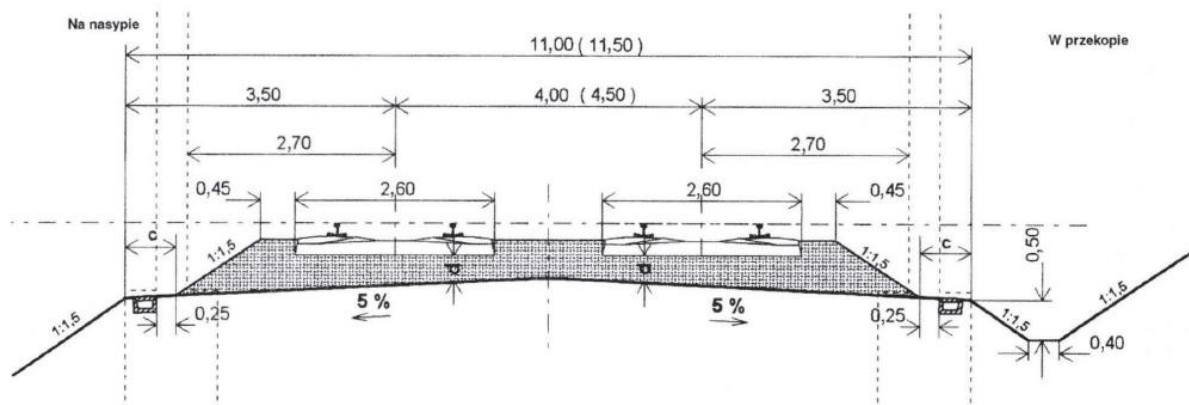
Zgodnie z Rozporządzeniem [1] układ geometryczny linii kolejowej, standardy konstrukcyjne oraz urządzenia sterowania ruchem i łączności powinny odpowiadać kategoriom linii kolejowych, których parametry eksploatacyjne podano w tabeli 1.

Zapisy Rozporządzenia [1] nakładają wymaganie, żeby podtorze kolejowe pod względem wytrzymałościowym było tak wykonane, aby minimalne wartości modułów odkształceń podtorza mierzonych na torowisku w zależności od kategorii linii kolejowej były nie mniejsze niż podane w tabeli 2.

Wymagania w zakresie minimalnych wartości modułów odkształceń podtorza określone w Rozporządzeniu [1] były częściowo niezgodne z wymaganiami określonymi w dokumencie niższej rangi – instrukcji „Id-3 Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego” [3] obowiązującej na całej sieci kolejowej krajowego zarządcy infrastruktury – PKP Polskie Linie Kolejowe. Dokument ten dotyczy podtorza na kolejach normalotorowych użytku publicznego, na których jest eksploatowana nawierzchnia klasyczna (szyny, podkła-

Tab. 1. Parametry eksploatacyjne linii kolejowych [1]

Kategoria linii kolejowej	Obciążenie przewozami T [Tg/rok]	Prędkość maks. Vmax [km/h]	Prędkość maks. pociągów towar. Vt [km/h]	Dopuszczalne naciski osi P [kN]
Magistralna	$T \geq 25$	$120 < V_{max} \leq 200$	$80 < V_{t} \leq 120$	$P \leq 221$
Pierwszorzędna	$10 \leq T < 25$	$80 < V_{max} \leq 120$	$60 < V_{t} \leq 80$	$210 \leq P < 221$
Drugorzędna	$3 \leq T < 10$	$60 < V_{max} \leq 80$	$50 < V_{t} \leq 60$	$200 \leq T < 210$
Znaczenia miejscowego	$T < 3$	$V_{max} < 60$	$V_{t} < 50$	$P < 200$



Rys. 1. Przekrój normalny dwutorowej linii magistralnej lub pierwszorzędnej na odcinku prostym [1].

dy i podsypka) z prędkościami do 250 km/h dla pociągów pasażerskich i 120 km/h dla pociągów towarowych oraz nacisków osi taboru nie większych niż 221 kN (22,5 t), z dopuszczeniem na danej linii do 5 % przewozów z naciskami do 245 kN (25 t). W tabeli 3 przedstawiono wymagania odnośnie minimalnych wartości modułów odkształcenia podtorza określone w instrukcji [3], które lepiej odpowiadają rzeczywistym obciążeniom od taboru gdyż bezpośrednio uwzględniają prędkość oraz natężenie przewozów.

Tab. 2. Minimalne wartości modułów odkształceń podtorza mierzonych na torowisku dla linii nowych i modernizowanych [1]

Kategoria linii kolejowej	Moduł odkształcenia podtorza E_0 [MPa]
Magistralna	120
Pierwszorzędna	100
Drugorzędna	80
Znaczenia miejscowego	60

Dodatkowo w Rozporządzeniu [1] podano przekroje normalne toru na prostej i w łukach, których przykład dla dwutorowej linii kolejowej magistralnej lub pierwszorzędnej na odcinku prostym pokazano na rys. 1.

W ramach nowelizacji Rozporządzenia [4] w 2014 r. wykreślono z tabeli 1 ostatnią kolumnę dotyczącą dopuszczalnych wartości nacisków od osi pojazdów, gdyż podane tam wartości dopuszczalne, i ich przedziały, były niezgodne z klasyfikacją obciążeń od taboru podaną w normie PN-EN 15528 [5] i modelami obciążeń stosowanymi w projektowaniu PN-EN 1991-2 [6], a wywodzącymi się pierwotnie z kart UIC 700 i 702 [7, 8]. Wprowadzono także deregulację przepisów dotyczących projektowania podtorza na rzecz stosowania obowiązujących w Polsce norm. Odrzucono arbitralne zasady – takie jak minimalne wartości modułów odkształceń podtorza mierzonych na torowisku i z góry określone przekroje normalne. Moduł odkształcenia podtorza jest tylko jednym z wielu parametrów, jakie powinno spełniać podtorze kolejowe i nie jest parametrem krytycznym, decydującym np. o stateczności podtorza. Zagadnienia nośności i stateczności budowli ziemnych określają normy Eurokodu 7 [9, 10]. Niewłaściwym było istniejące do niedawna narzucenie przez Rozporządzenie [1] jednego przekroju normalnego, ponieważ często w praktyce prowadziło to do wykonywania niebezpiecznych poszerzeń budowli ziemnych powodujących osuwiska, gdyż koszt pełnego poszerzenia budowli ziemnej jest niewspółmiernie wysoki w stosunku do kosztów typowego remontu lub rewitalizacji linii kolejowej. W ramach nowelizacji Rozporządzenia [4] usunięto także zapisy dotyczące typowych przekrojów normalnych, gdyż rozwiązania te powinny być optymalnie dopasowane do istniejących warunków – jak np. teren zabudowany, teren górski itp. Zarządca linii może we własnym zakresie określić przekroje normalne adekwatne do istniejących warunków.

2. STOSOWANIE ALTERNATYWNYCH PROCEDUR PROJEKTOWYCH

W takiej sytuacji projektant zyskuje większą swobodę w kształtowaniu budowli, ale wiąże się to również z większą odpowiedzialnością. Wymaga to pewnej refleksji nad funkcją jaką pełnił usunięty przepis. Obecnie powinny przejąć ją inne kryteria projektowe. Ich źródłem może być literatura, inne przepisy, w tym regulacje wprowadzane przez zarządców infrastruktury. Usunięcie wymagania dotyczącego typowych przekrojów umożliwia projektowanie bardziej ekonomiczne, ale wymaga uwzględnienia szerokiej gamy zagadnień takich jak stateczność, nośność czy skrajnia kolejowa. Niniejsza praca skupia się jednak na wymaganiu minimalnych modułów odkształceń podtorza mierzonych na torowisku. Zapewnienie odpowiednich modułów odkształceń miało bezpośredni wpływ na spełnienie podstawowych wymagań stawianych podtorzu, takich jak nośność i sztywność, trwałość, czy jednorodność.

Odpowiednia sztywność podtorza wiąże się z niedopuszczeniem do zbyt dużych odkształceń sprężystych podtorza, które mogłyby powodować nadmierne ugięcia toru. Nośność natomiast wymaga nieprzekroczenia naprężeń dopuszczalnych dla wbudowanych w podtorze gruntów. Elementy te są wzajemnie powiązane, gdyż odpowiednio sztywna górną warstwę podtorza powoduje korzystniejszy rozkład naprężeń na niższej leżącej grunty. Jak wykazano w pracy [11], dotychczasowe wymagania dawały bardzo duży zapas bezpieczeństwa jeżeli chodzi o naprężenia mogące naruszyć strukturę gruntu. Nie należy jednak wyciągać pochopnych wniosków dotyczących możliwych „oszczędności” przekrojów.

Drugim równie ważnym aspektem jest trwałość konstrukcji. Choć jednorazowe naprężenia występujące w związku z przejazdem pociągu są niewielkie w stosunku do wytrzymałości gruntu, to powodują one trwałe deformacje, które kumulują się w konstrukcji nawierzchni i podtorza. Co pewien czas deformacje te wymagają usunięcia poprzez różne zabiegi utrzymaniowe. Odpowiednie ekonomiczne podejście wymaga uwzględnienia kosztów, zarówno budowy, jak i utrzymania, zatem już na etapie projektu wskazane jest oszacowanie trwałości konstrukcji [12].

Trwałość podtorza wiąże się przede wszystkim z zastosowaniem odpowiedniej jakości wbudowanych gruntów oraz właściwym odwodnieniem. Kluczowe kryteria dotyczące trwałości takie jak zagęszczalność, wysadzinowość czy stabilność mechaniczna związane są z jego uziarnieniem i składem mineralogicznym. Jednak w kontekście omawianych zmian przepisów istotnym będzie w jaki sposób projektować i kształtować budowlę ziemną, przy założeniu dostępności określonych materiałów. Natomiast kryterium ściśle związanym z trwałością będą trwałe deformacje. Narastają one pod wpływem cyklicznych obciążeń w różnych elementach budowli, przede wszystkim w warstwie podsypki, ale również w warstwie filtracyjnej i podłożu gruntowym [13]. W konsekwencji prowadzą do przekroczenia dopuszczalnych odchyłek nierówności toru i powodują konieczność jego naprawy. Stosunkowo niewielkie osiadania reguluje się w warstwie podsypki poprzez podbijanie toru. Konieczność zbyt częstych zabiegów utrzymaniowych tego typu może być

Tab. 3. Minimalne wartości modułów odkształceń podtorza mierzonych na torowisku [3] Oznaczenia: wartości bez nawiasów odnoszą się do podtorza nowo budowanego i dobudowywanego, oraz modernizowanego do $V_{max} \geq 160$ km/h; wartości w nawiasach dotyczą podtorza linii eksploatowanych – ocena konieczności wzmocnienia lub naprawy.

Prędkość maks. V_{max} [km/h]	Natężenie przewozów T [Tg/rok]			
	$T \geq 25$	$10 \leq T < 25$	$3 \leq T < 10$	$T < 3$
$200 < V_{max} \leq 250$	120 (80)	120 (80)	120 (80)	110 (70)
$160 < V_{max} \leq 200$	120 (80)	120 (70)	110 (60)	100 (55)
$120 < V_{max} \leq 160$	120 (70)	110 (60)	100 (50)	90 (45)
$80 < V_{max} \leq 120$	110 (60)	100 (55)	90 (45)	80 (40)
$V_{max} \leq 80$	100 (50)	90 (45)	80 (40)	80 (40)

spowodowana wadami podtorza [13], których usunięcie wymaga kosztownej naprawy lub przebudowy. Dlatego do oszacowania osiadań nawierzchni kolejowej spowodowanych obciążeniami eksploatacyjnymi opracowano wiele modeli, których przegląd można znaleźć w pracy [14]. Jako jeden z najpopularniejszych przytacza ona model opracowany przez Alva-Hurtado'a and Seliga w 1981 [15], wyrażony wzorem:

$$\varepsilon_N = \varepsilon_1 (1 + C \log(N)) \quad (1)$$

gdzie:

- ε_N - trwałe odkształcenie po liczbie cykli obciążenia N ,
- ε_1 - trwałe odkształcenie po pierwszym cyklu obciążenia,
- C - parametr empiryczny, zwykle w zakresie 0,2-0,4 [16].

Powyższa formuła wymaga jednak uprzedniego oszacowania trwałego odkształcenia w pierwszym cyklu obciążenia. Alternatywą mogą być wzory skalibrowane na podstawie badań konstrukcji wykonanych w pełnej skali [17]. Zwykle powstają one jednak przy zastosowaniu określonych standardów konstrukcyjnych. Ich stosowanie w przypadku innych konstrukcji wymaga stosowania dodatkowych współczynników i czyni oszacowanie mniej dokładnym. Zestawienie kilkunastu różnych wzorów oraz ich walidacja przedstawiona w pracy [18] pokazała, że w większości nie umożliwiają one uwzględnienia takich czynników jak różny rodzaj podkładów, podsypki czy wielkość obciążenia. Wobec ww. trudności związanych ze stosowaniem wzorów empirycznych i wynikającej z tego niepewności oszacowania w większości przypadków racjonalnym wydaje się być stosowanie metod uproszczonych, takich jak metoda modułów czy metoda naprężeń zalecane przez wytyczne [3]. Za ich wykorzystaniem przemawia wieleletnie doświadczenie w ich stosowaniu. Nie mniej jednak, niezależnie powinny być rozwijane i walidowane metody pozwalające na dokładniejsze oszacowanie trwałości podłoża i nawierzchni kolejowej w warunkach polskich.

Jeżeli podtorze jest stabilne i nie występują w nim grunty mało wytrzymałe lub ściśliwe to zalecaną metodą jest tzw. metoda modułów [3]. Zakłada ona, że ekwiwalentny moduł odkształcenia podtorza (E_e) mierzony w poziomie torowiska powinien spełniać wymagania określone w tabeli 3. Danymi wyjściowymi do projektowania są moduł odkształcenia gruntu miejscowego (E_g) oraz moduł odkształcenia materiału warstwy ochronnej torowiska (E_0). Na ich podstawie można za pomocą nomogramu (rys. 2) wyznaczyć grubość warstwy ochronnej jaką należy wykonać aby uzyskać wymaganą wartość modułu ekwiwalentnego.

Niektóre parametry gruntu można szacować na podstawie tablicy przedstawionej w załączniku do wytycznych [3]. Ponadto moduły odkształceń gruntów drobnoziarnistych można szacować na podstawie wyników badania CBR:

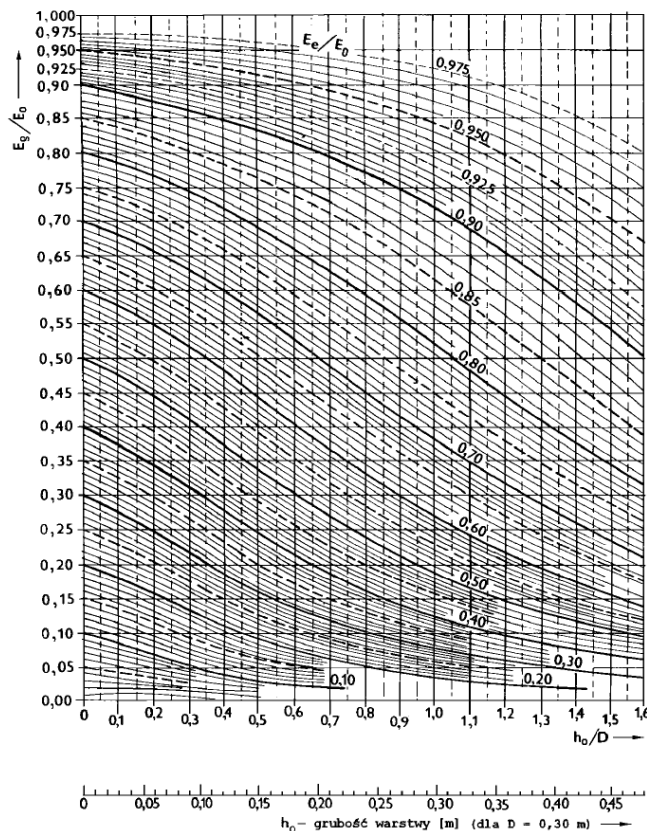
$$E = 8,3735 \cdot CBR^{0,7142} \quad (2)$$

gdzie:

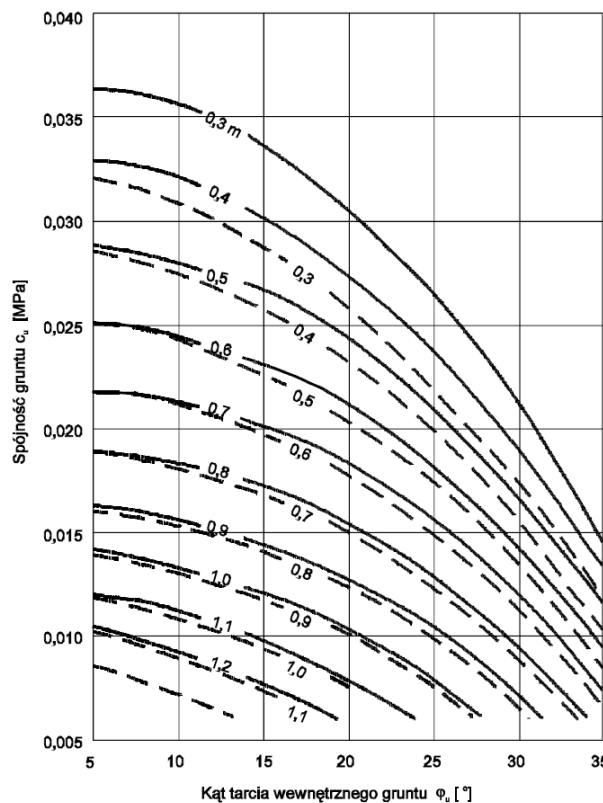
- E - moduł odkształcenia, [MPa]
- CBR - kalifornijski wskaźnik nośności, [%].

Natomiast w przypadku złych lub skomplikowanych warunków wodno-gruntowych powyższą metodę należy uzupełnić o sprawdzenie tzw. metodą naprężeń. Ostatecznie stosuje się grubości pośrednie, przy czym nie mogą być mniejsze niż te wynikające z metody modułów. Istotą tego podejścia jest warunek o nieprzekroczeniu dopuszczalnych naprężeń w gruntach znajdujących się pod warstwą ochronną. Podstawowymi danymi do projektowania są kąt tarcia wewnętrznego (φ_u) i spójność (c_u) gruntu miejscowego oraz kategoria toru. Wprowadzając dodatkowe ograniczenia: moduł odkształcenia warstwy wzmacniającej wynoszący 150 MPa oraz współczynnik pewności 2,0, można posłużyć się nomogramami (rys.

3). Pozwalają one na wyznaczenie grubości warstwy ochronnej torowiska wraz z podsypką. Przykładowy nomogram przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Nomogram DORNII – stosowany w metodzie modułów [3].



Rys. 3. Nomogram do określenia łącznej grubości podsypki i warstwy ochronnej w torach kategorii 1 [3].

PODSUMOWANIE

Zmiana Rozporządzenia wprowadzona w 2014 r [4] znacznie poprawiła spójność przepisów krajowych i międzynarodowych dotyczących projektowania i utrzymania linii kolejowych. Zmniejszenie dość rygorystycznych wymagań wobec kształtowania podtorza umożliwiło bardziej ekonomiczne projektowanie. Niestety, stworzyło to zagrożenie związane z obniżoną trwałością konstrukcji, co może wpłynąć na zwiększenie kosztów utrzymania. Jedną z przyczyn zwiększonych nakładów na zabiegi utrzymaniowe mogą być nadmierne trwałe deformacje, zatem należy oszacować ich możliwą wielkość. Istnieje wiele modeli służących przewidywaniu trwałych deformacji, których walidacja wykazała, że wciąż są one pod wieloma względami niedoskonałe [18] i zjawisko to powinno być przedmiotem dalszych badań. Tymczasem racjonalnym jest korzystanie z metod wymiarowania wzmocnień torowisk zalecanych przez polskich zarządców infrastruktury kolejowej, m. in. metoda modułów, czy metoda naprężeń. Za ich aplikacją przemawia wieloletnia praktyka w stosowaniu w Polsce.

BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987.
2. Rozporządzenie Komisji Unii Europejskiej nr 1299/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. dotyczące technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Infrastruktura” systemu kolei w Unii Europejskiej. Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej nr 356, 2014.
3. Id-3 Warunki techniczne utrzymania podtorza kolejowego. PKP Polskie Linie Kolejowe. Warszawa 2009.
4. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 5 czerwca 2014 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dz.U. 2014 poz. 867.
5. PN-EN 15528+A1:2013-04. Kolejnictwo -- Klasyfikacja linii w odniesieniu do oddziaływań pomiędzy obciążeniami granicznymi pojazdów szynowych a infrastrukturą. Europejski Komitet Normalizacyjny, Bruksela 2012.
6. PN-EN 1991-2:2007 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje -- Część 2: Obciążenia ruchome mostów. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2007.
7. UIC Leaflet 700 Classification of lines – Resulting load limits for wagons. 10th edition. International Union for Railways. Paris 2004.
8. UIC Leaflet 702 Static loading diagrams to be taken into consideration for the desing of rail carrying structures on lines used by international services. 3rd edition. International Union for Railways. Paris 2003.
9. PN-EN 1997-1:2008/NA:2011 Eurokod 7 -- Projektowanie geotechniczne -- Część 1: Zasady ogólne. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2011.
10. PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 -- Projektowanie geotechniczne -- Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2009.
11. Kraskiewicz, C., Michalczyk, R., Brzezinski, K., Płudowska, M., *Finite Element modelling and design procedures for verifications of trackbed structure* (2015) Procedia Engineering, 111, pp. 462-469.
12. Bałuch H., Bałuch M., *Układy geometryczne toru i ich deformacje*. PKP Polskie Linie Kolejowe S. A., Warszawa 2010.
13. Skrzyński E., *Podtorze kolejowe*. PKP Polskie Linie Kolejowe S. A., Warszawa 2010.
14. Shi, X., *Prediction of permanent deformation in railway track*. Rozprawa Doktorska, University of Nottingham, Nottingham 2009.
15. Alva-Hurtado, J.E. and Selig, E.T., *Permanent Strain Behaviour of Railroad Ballast*, Proc. of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 1, 543-546, 1981. A. A. Balkema, Rotterdam 1981.
16. Selig, E.T. and Waters, J.M., *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, London 1994.
17. Thom, N.H. and Oakley, J., *Prediction Differential Settlement in a Railway Trackbed*, *Railway Foundations*, Birmingham 2006.
18. Abadi, T., Le Pen, L., Zervos, A., Powrie, W., *A Review and Evaluation of Ballast Settlement Models using Results from the Southampton Railway Testing Facility (SRTF)*, (2016) Procedia Engineering, 143, pp. 999-1006.

TRACKBED STRENGTHENING METHODS CONSIDERING RECENT CHANGES IN POLISH LAW

Abstract

Poland is obliged to comply with various international regulations concerning the design and maintenance of railway lines. In order to achieve this goal, in 2014 amendments to the national legislation were made which allowed to design in a manner consistent with international regulations. The paper presents the main changes in the classification of railway lines and the requirements for the trackbed and their impact on the choice of alternative methods of trackbed dimensioning. Selected methods were discussed, in particular the methods recommended by the Polish rail infrastructure management.

Autorzy:

mgr inż. **Cezary Kraśkiewicz**– Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, c.kraskiewicz@il.pw.edu.pl

mgr inż. **Karol Brzeziński**– Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, k.brzezinski@il.pw.edu.pl

dr hab. inż. **Artur Zbiciak**, prof. PW – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, a.zbiciak@il.pw.edu.pl