

KĘDRA Zbigniew<sup>1</sup>

# Wpływ koincydencji nierówności toru kolejowego na bezpieczeństwo przy małych prędkościach jazdy

*Drogi kolejowe,  
Diagnostyka nawierzchni,  
Geometria toru*

## Streszczenie

*W diagnostyce geometrii toru kolejowego jednym z bardziej skomplikowanych problemów jest wyznaczenie wartości granicznych pomierzonych nierówności toru oraz określenie wpływu ich jednoczesnego występowania na jednym mikro odcinku toru na bezpieczeństwo jazdy. W praktyce prowadzi to do wielu nieporozumień, szczególnie w czasie badania wypadków kolejowych, gdzie bardzo często pojedyncze przekroczenie odchyłki dopuszczalnej interpretowane jest jako jego przyczyna. W artykule omówiono zagadnienie koincydencji nierówności geometrycznych toru kolejowego przy małych prędkościach jazdy pociągu. Szczególną uwagę zwrócono na jednoczesne występowanie wchrowatości toru, przechyłki i nierówności poziomych na krótkim odcinku toru.*

## EFFECTS OF COINCIDENCE OF IRREGULARITIES OF THE TRACK ON THE SAFETY AT LOW SPEEDS

### Abstract

*The diagnostics of railway track geometry one of the more complicated problems is to define the limits of measured irregularities track and determine the effect of their simultaneous occurrence in a micro-section of the track safety. In practice, this leads to many misunderstandings, especially during the study of railway accidents, which often exceed the single limit tolerances is interpreted as the cause. The article discusses the problem of irregularities of geometric coincidence railway track at low speed of the train. Particular attention was paid to the simultaneous occurrence of track twist, cant and horizontal irregularities on a short section of track*

## 1. WSTĘP

Diagnostyka geometryczna toru kolejowego sprowadza się w praktyce do pomiaru czterech podstawowych parametrów: nierówności pionowych i poziomych, różnicy wysokości toków szynowych (przechyłki) i szerokości toru, a następnie obliczeniu gradientu szerokości i wchrowatości toru. W kolejnym etapie pomierzone wartości są porównywane z wartościami dopuszczalnymi, które wyznaczone zostały na podstawie kryterium spokojności jazdy. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnych należy podjąć odpowiednie decyzje utrzymaniowe, np. wykonać naprawę, ograniczyć prędkość jazdy pociągu.

Takie podejście bardzo często prowadzi do błędnych decyzji utrzymaniowych lub nieporozumień w przypadku ustalenia przyczyny wykołowania pojazdu szynowego. Zdarza się, że z jednej strony przekroczenie pojedynczej odchyłki dopuszczalnej kojarzone jest z bezpośrednią przyczyną wypadku, a z drugiej strony duże wartości kilku pomierzonych nierówności na jednym mikro segmencie toru, traktowane są oddzielnie, pomijają ich jednoczesne występowanie.

Bardzo rzadko inżynier diagnosta analizuje jednoczesne występowanie dwóch lub więcej nierówności w obrębie jednego mikro segmentu toru o długości do 20 m, tzn. na długości bazy sztywnej wagonu. Główna przyczyna to posługiwanie się tylko wydrukami z wagonów pomiarowych oraz brak systemu wspomagającego pracę diagnosty.

Kolejnym problemem z jakim spotyka się inżynier dróg kolejowych to brak jednoznacznych wartości dopuszczalnych związanych z bezpieczeństwem jazdy. Wartości graniczne pomierzonych i obliczonych nierówności toru zostały określone obecnie dla pojedynczych usterek, jednak tylko w przypadku szerokości toru z uwagi na zwężenie i poszerzenie oraz wchrowatości toru.

W ostatnich latach w wielu krajach prowadzone są badania nad zjawiskiem koincydencji nierówności toru kolejowego. W Polsce problematyce tej poświęcono również wiele uwagi, co doprowadziło ostatecznie do sformułowania zasad oceny koincydencji oraz budowy odpowiednich narzędzi wspomagających jej ocenę [1,2]. Modele te w głównej mierze związane były z analizą parametrów kinematyczno-fizycznych, tj. przyśpieszenia niezrównoważonego, przyrostu tego przyśpieszenia i prędkością podnoszenia koła na wchrowatym torze. W praktyce takie podejście sprowadza się do wyznaczenia odcinków toru, na których należy wykonać naprawy w pierwszej kolejności z uwagi na występowanie koincydencji nierówności toru.

Wśród wielu pracowników kolei panuje powszechny pogląd, że zmniejszenie prędkości jazdy pociągu zwiększa bezpieczeństwo. Takie rozumowanie ma swoje podstawy w pewnym zakresie w analizie parametrów kinematyczno-fizycznych, a w szczególności przyśpieszenia niezrównoważonego i przyrostu przyśpieszenia. Należy jednak pamiętać, że przy bardzo małych prędkościach, dużej różnicy wysokości toków szynowych oraz wchrowatości toru, możemy

<sup>1</sup>Dr inż. Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Transportu Szynowego, kedra@pg.gda.pl

oczekiwać w łukach o małych promieniach odciążenia kół na toku zewnętrznym. Szczególnie podatne są tu wagony o dużej sztywności w stanie próżnym, np. wagony cysterny, wagony do przewozu kruszyw i materiałów sypkich.

## 2. KOINCYDENCJA NIERÓWNOŚCI TORU KOLEJOWEGO

W ostatnich latach w wielu krajach zaczyna się dostrzegać konieczność zmiany podejścia do oceny stanu toru poprzez analizę wszystkich nierówności geometrycznych występujących na krótkim odcinku toru, tzn. rozpatruje się ich jednocześnie występowanie na mikro segmencie o długości do 20 m.

Występowanie koincydencji nierówności toru należy rozumieć jako nakładanie się maksymalnych wartości nierówności, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia granicznych wartości odchyłek dopuszczalnych. W praktyce szczególnie niebezpieczne może być jednocześnie wytypowanie dużych odchyłek trzech rodzajów nierówności: różnicy wysokości toków szynowych (przechyłki), nierówności poziomych oraz wichrowatości.

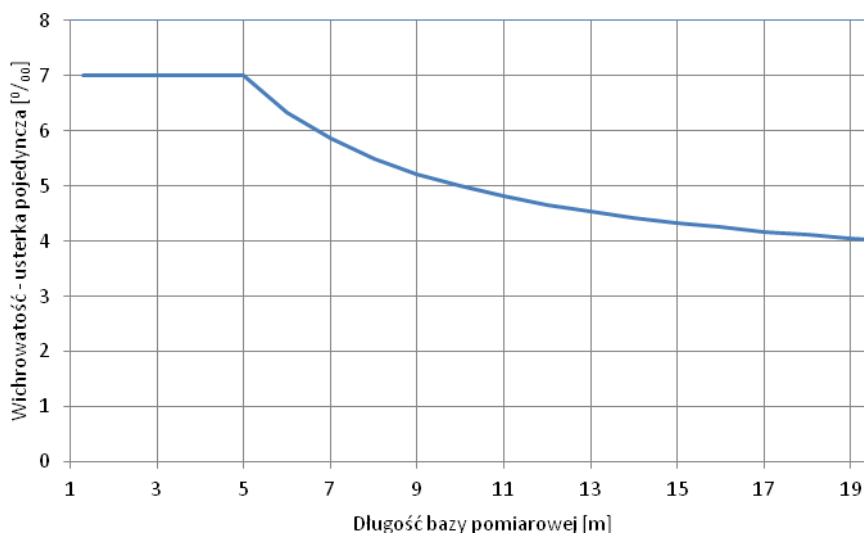
Trwające od kilkunastu lat w Polsce prace nad tym zagadnieniem pozwoliły w konsekwencji na opracowanie modeli, które zostały uwzględnione w kilku systemach wspomagających podjęcie decyzji utrzymaniowych, np. DONG, UNIP, czy też SOHRON [1,2]. Systemy te pozwalają na analizowanie nierówności toru z uwagi na ich koincydencję, a w konsekwencji podejmowanie trafniejszych decyzji. Prace te jednak, z uwagi na dużą złożoność zagadnienia współpracy pojazdu z torem nie doprowadziły do określenia granicznych wartości nierówności toru w przypadku ich jednoczesnego występowania. W przepisach krajowych [4] dotyczących utrzymania nawierzchni kolejowej określono wartości graniczne tylko dla szerokości toru i wichrowatości oraz dla wszystkich nierówności określono wartości dopuszczalne z uwagi na spokojność jazdy.

Wartości graniczne pojedynczych nierówności uwzględniono również w technicznych specyfikacjach interoperacyjności (TSI) dla wichrowatości i szerokości toru [3]. Wartość graniczna wichrowatości toru jest funkcją zastosowanej bazy pomiarowej  $l$  i obliczana jest zgodnie ze wzorem:

$$w = \frac{20}{l} + 3 \quad [‰]$$

gdzie:  $l$  – długość bazy pomiarowej [m].

Na rysunku 1 przedstawiono wykres wichrowatości granicznej toru w funkcji bazy pomiarowej  $l$ , w zakresie długości  $1,3 \text{ m} \leq l \leq 20 \text{ m}$  i przy maksymalnej wartości  $w = 7 \text{ mm/m}$  (‰). Obliczona wichrowatość toru musi obejmować przynajmniej bazę pomiarową mieszczącą się w zakresie od 2 do 5 m (w Polsce stosuje się bazę pomiarową 5 m i wartość graniczną wichrowatości 35 mm, tj. 7 ‰).



Rys.1. Graniczne wartości wichrowatości toru dla usterek pojedynczych

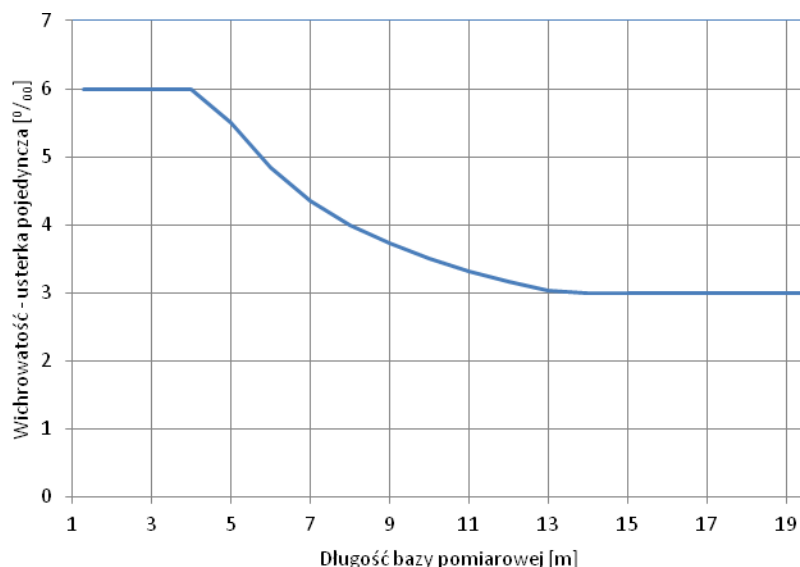
Zagadnienie koincydencji nierówności toru częściowo uwzględniono w przepisach europejskich [3] poprzez zmniejszenie wartości granicznych wichrowatości w łukach o małych promieniach oraz ograniczenie dopuszczalnej różnicy wysokości toków szynowych. Przechyłkę eksploatacyjną należy utrzymywać w zakresie +/- 20 mm w stosunku do wartości przechyłki projektowej, natomiast jeżeli promień łuku poziomego  $R$  jest mniejszy niż 420 m, a przechyłka  $h > \frac{R-100}{2}$ , wichrowatość toru musi być ograniczona zgodnie ze wzorem [3]:

$$w = \frac{20}{l} + 1,5$$

przy maksymalnej wartości wynoszącej pomiędzy 6 mm/m i 3 mm/m w zależności od długości bazy pomiarowej.

Wichrowatość graniczną toru spełniającą powyższe warunki przedstawiono na rysunku 2, jako usterkę pojedynczą w funkcji długości bazy pomiarowej.





Rys.2. Graniczne wartości wchrowatości toru w łukach o małych promieniach

W przypadku jednoczesne występowanie kilku nierówności toru o dużych wartościach, przekroczenie nawet pojedynczej odchyłki dopuszczalnej może prowadzić do zwiększenia wartości stosunku sił  $Y/Q$ , a w konsekwencji do przekroczenia kryterium bezpieczeństwa. Może to mieć miejsce szczególnie przy nakładaniu się na siebie nierówności poziomych i różnicy wysokości toków szynowych (różnic przechyłki). W takim przypadku przy dużych prędkościach następuje wzrost niezrównoważonego przyspieszenia odśrodkowego, przyrost przyspieszenia wraz ze zmianą krzywizny toru, a w przypadku wchrowatości wzrost prędkości podnoszenia koła.

### 3. KOINCYDENCJA NIERÓWNOŚCI PRZY MAŁYCH PRĘDKOŚCIACH

W przypadku koincydencji nierówności toru przy małych prędkościach jazdy, podobnie jak w przypadku dużych prędkości zagadnienie wygląda bardzo podobnie, jeżeli weźmiemy po uwagę rodzaj nierówności, tzn. również decydujące znaczenie odgrywają nierówności poziome, przechyłka i wchrowatość. Jednak w przypadku małych prędkości nie występują duże przyspieszenie, jego znaczny przyrost i duże prędkości podnoszenia koła na wchrowatym torze. Można by zatem sądzić, że zmniejszenie prędkości do  $5 \pm 10$  km/h jest całkowicie bezpieczne na każdym torze, bez względu na wartości nierówności i w każdych warunkach.

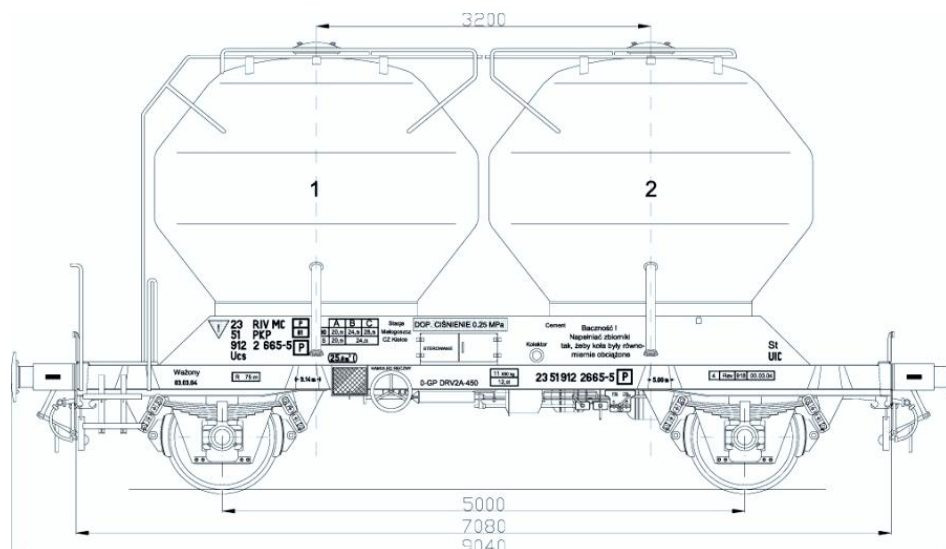
W celu lepszego zobrazowania takiego przypadku, przyjmijmy wagon w stanie próżnym, poruszający się z prędkością projektową 40 km/h po łuku kołowym z rampą przechyłkową, o następującej charakterystyce: promień łuku  $R = 250$  m, przechyłka  $h = 20$  mm i długość rampy przechyłkowej  $l_p = 10$  m. W takim przypadku wartości przyspieszenia niezrównoważonego, przyrostu przyspieszenia i prędkości podnoszenia koła na rampie przechyłkowej są minimalne, dużo mniejsze od wartości dopuszczalnych, a zmniejszenie prędkości jazdy spowoduje co najwyżej zmianę znaku przyspieszenia niezrównoważonego.

W czasie eksploatacji ograniczono prędkość do 20 km/h z uwagi na duże nierówności toru, które na jednym mikro odcinku o długości 10 m wynosiły: strzałka łuku 60 mm (projektowana 50mm), przechyłka 44 mm, wchrowatość 32 mm - 6,4 ‰ oraz różnica sąsiednich strzałek 45 mm (przy projektowanej różnicy strzałek 25 mm). Porównując wartości pomierzone z odchyłkami dopuszczalnymi dla prędkości 20 km/h należy stwierdzić, że przekroczona została jedynie pojedyncza odchyłka dopuszczalna dla wchrowatości toru z uwagi na spokojność jazdy lecz nie przekroczono odchyłki granicznej równej 35 mm. Analizując tylko pojedyncze pomiary należałoby stwierdzić, że nierówności toru nie stanowią zagrożenia dla bezpieczeństwa jazdy pociągów.

W tym przypadku mamy jednak koincydencję nierówności poziomych, różnicy wysokości toków szynowych i wchrowatości. Zwiększona przechyłka i strzałka łuku, przy jednoczesnym zmniejszeniu prędkości jazdy do 20 km/h spowoduje wystąpienie niezrównoważonego przyspieszenia dośrodkowego, a w konsekwencji odciążenie kół na toku zewnętrznym. Duża wchrowatość wystąpiła w okolicy rampy przechyłkowej (tok zewnętrzny), co spowoduje dodatkowe odciążenie jednego koła na toku zewnętrznym. Podsumowując jedno z kół na toku zewnętrznym zostanie odciążone z uwagi na występowanie koincydencji nierówności, co w konsekwencji może doprowadzić do wykolejenia.

W przypadku małych prędkości jazdy po zdeformowanym torze szczególnie podatne na wykolejenia są próżne, dwuosiowe wagony cysterny oraz wagony specjalne do przewozu tłuczni i materiałów sypkich (Rys. 1). Charakteryzują się one stosunkowo małym ciężarem własnym (około 11.500 kg) i rozstawem osi w granicach 5 m.

W przypadku wagonów w stanie próżnym istotnym czynnikiem jest odciążenie koła  $\Delta Q$ , przy bardzo małym nacisku bazowym  $Q_0$  (zmniejszenie nacisku pionowego). Odciążenie koła jest spowodowane nadmiarem przechyłki i wchrowatością toru, którą to z kolei powoduje: zaprojektowane pochylenie rampy przechyłkowej oraz dodatkowa wchrowatość własna toru.



Rys.3. Dwuosioowy wagon zbiornikowy typu 220Sa serii Us przeznaczony przewozu materiałów sypkich [5]

Czynnikiem sprzyjającym wykołaceniom jest również jazda z małymi prędkościami, w warunkach quasi-statycznych. W takim przypadku można spodziewać się bardzo dużych współczynników tarcia sprzyjających procesowi wykołecenia, zgodnie z kryterium Nadalla:

$$\frac{Y}{Q} < \frac{tg\alpha - \mu}{1 + \mu tg\alpha}$$

gdzie:

- Y - poprzeczna siła prowadząca, działająca na koło zestawu,
- Q - nacisk pionowy koła na szynę,
- $\alpha$  - kąt pochylenia obrzeża koła,
- $\mu$  - współczynnik tarcia koło-szyna.

Podstawiając  $\alpha=70^\circ$  oraz  $\mu=0,36$  do wzoru otrzymuje się współczynnik wykołecenia:

$$\frac{Y}{Q} < \frac{tg70^\circ - 0,36}{1 + 0,36tg70^\circ} = 1,2$$

Występowanie koincydencji nierówności toru w łuku kołowym o małym promieniu z przechyłką, może być czynnikiem sprzyjającym wykołaceniu, gdy dojdzie do odciążenia koła  $Q_r = Q_0 - \Delta Q$  oraz zwiększenia siły prowadzącej Y, spowodowanej większymi kątami nabiegania.

Przyjmując masę własną wagonu równą  $m = 11500$  kg i biorąc pod uwagę symetryczny rozkład nacisków na koła, nacisk bazowy na jedno koło wyniesie:

$$Q_0 = 0,25 \cdot 11500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 28203,75 \text{ N} = 28,2 \text{ kN}$$

Siła poprzeczna Y, która mogłaby spowodować wykołecenie przy nacisku  $Q_0$  musiałyby wynosić:

$$Y = 1,2 \cdot 28,2 = 33,8 \text{ kN},$$

zaś dopuszczalna siła poprzeczna działająca na przesło toru wyniosła by:

$$Y = 0,85 \left( 10 + \frac{2}{3} Q_0 \right) = 0,85 \left( 10 + \frac{2}{3} 28,2 \right) = 24,48 \text{ kN}$$

Zakładając wystąpienie tej siły, wartość nacisku pionowego na odciążonym kole, konieczna, aby doszło do wykołecenia powinna wynosić:

$$Q_r \geq \frac{Y}{1,2} = \frac{24,48}{1,2} = 20,4 \text{ kN}$$

zaś odciążenie na kole bazowym w stanie statycznym aby doszło do wykołecenia musiałyby wynosić:

$$\Delta Q \geq Q_0 - Q_r = 28,2 - 20,4 = 7,8 \text{ kN}$$



Znając charakterystykę zawieszenia wagonu można obliczyć wartość odciążenia koła z uwagi na przyspieszenie nierównoważone i wchrowatość toru.

W celu wyjaśnienia tego zagadnienia przeprowadzono proste obliczenia. Pomijając nierównomierne ugięcie resorów można przyjąć, że nadmiar przechyłki powoduje odciążenie kół na wewnętrznym toku szynowym, który można policzyć z wzoru [2]:

$$\Delta Q = \pm \frac{M}{s} = \frac{2Qp}{gs} a_n$$

gdzie:

- $p$  – położenie środka ciężkości pojazdu szynowego nad główką szyny,
- $g$  – przyspieszenie ziemskie,
- $a_n$  – nierównoważone przyspieszenie,
- $s$  – rozstaw kół pojazdu przyjmowany jako rozstaw szyn.

Jeżeli wartość nierównoważonego przyspieszenia wyrazimy w funkcji nadmiaru lub niedomiaru przechyłki  $\Delta h$  w postaci wyrażenia:

$$a_n = \pm \frac{\Delta h g}{s}$$

to wówczas otrzymamy:

$$\Delta Q = \pm \frac{2Qp\Delta h}{s^2}$$

Dla przykładu przedstawionego w artykule, tj.  $h = 44$  mm,  $Q = 28,2$  kN, prędkości  $V = 20$  km/h i promienia  $R = 250$  m, nadmiar przechyłki wynosi  $\Delta h = 25$  mm. Po podstawieniu do wzoru otrzymamy wartość odciążenia koła na zewnętrznym toku szynowym z uwagi na nadmiar przechyłki:

$$\Delta Q = \frac{2 \cdot 28,2 \cdot 2 \cdot 0,025}{1,5^2} = \frac{2,82}{2,25} = 1,25 \text{ kN}$$

Uwzględniając jednoczesne występowanie pozostałych nierówności, tj. wchrowatości i nierówności poziomych, sumaryczna wartość odciążenia koła na zewnętrznym toku szynowym może przekroczyć odciążenie dopuszczalne równe w tym przypadku 7,8 kN. Pozostanie jeszcze wskazanie przyczyny dużej siły prowadzącej, która może wynikać, np. z nadmiernej szerokości toru i w związku z tym zwiększonego kąta nabiegania, czy też zwiększonego tarcia występującego przy małych prędkościach jazdy pojazdu szynowego.

#### 4. WNIOSKI

Zagadnienie koincydencji nierówności toru kolejowego przy małych prędkościach jazdy pojazdu kolejowego ma istotne znaczenie w diagnostyce powypadkowej, szczególnie wówczas, gdy podczas badań geometrii toru stwierdzono przekroczenie pojedyncze nierówności i jednoczesne występowanie dużych wartości pozostałych nierówności na jednym mikro segmencie toru o długości do 20 m.

Szczególnie niebezpieczne jest jednoczesne występowanie dużych nierówności poziomych i różnicy wysokości toków szynowych (nadmiaru przechyłki) i/lub wchrowatości toru na łukach o małych promieniach z zaprojektowaną rampą przechyłkową.

Czynnikiem sprzyjającym wykolejeniu w takich przypadkach jest również: duże poszerzenie toru, które powoduje zwiększenie kąta nabiegania oraz mała prędkość jazdy, z którą związany jest większy współczynnik tarcia.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bałuch H., Bałuch M.: *Determinanty prędkości pociągów – układ geometryczny i wady toru*. Warszawa, Instytut Kolejnictwa 2010.
- [2] Bałuch M.: *Interpretacja pomiarów i obserwacji nawierzchni kolejowej*. Radom, Politechnika Radomska 2010.
- [3] Decyzja Komisji UE z dnia 26 kwietnia 2011 r. dotycząca *technicznej specyfikacji interoperacyjności podsystemu „infrastruktura” transeuropejskiego systemu kolei konwencjonalnych*. 2011/275/UE.
- [4] *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych Id-1 (D1)*. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Zarządzenie Nr 14 Zarządu PKP PLK S.A. z dnia 18.05.2005r. Biuletyn PKP PLK S.A. Nr 02 z dnia 10.06.2005 r.
- [5] www.cement.pl