

## Badania przejazdu pojazdów szynowych przez tory wchrowate w warunkach quasi-statycznych z uwzględnieniem kąta nabiegania koła na szynę

W artykule przedstawiono nowatorskie podejście do problemów bezpieczeństwa przejazdu pojazdów przez tory wchrowate w warunkach quasi-statycznych z uwzględnieniem kąta nabiegania koła na szynę. W ten sposób kryterium Nadala zostało rozszerzone o następną parametr. Można wyciągnąć wniosek, że kryterium to ulega zmianie, wskutek postępu prac analityczno-badawczych.

### 1. WSTĘP

Bezpieczeństwo przejazdu pojazdu przez tory wchrowate w warunkach quasi-statycznych jest jednym z najistotniejszych problemów kolejnictwa. Kryterium bezpieczeństwa przed wykołeniem zostało wprowadzone przez Nadala w 1908 roku. Rozwój tego kryterium oraz zabezpieczenie pojazdów szynowych przed wykołeniem, jest procesem ciągłym i podlega dalszym badaniom [2,6,7,8], pomimo istotnych osiągnięć w tej dziedzinie dla wagonów towarowych, co jest wyrażone raporcie ORE/ERRI B55 Rp.8 [13]. W świetle dzisiejszej wiedzy istotnymi czynnikami, które działają w kierunku polepszenia bezpieczeństwa przed wykołeniem w warunkach quasi-statycznych są:

- wielkość poprzecznych sił prowadzących  $Y$ , działających w punkcie styku koła i szyny w kierunku poprzecznym,
- wielkość nacisków pionowych  $Q$  koła (niem. „Radaufstandskräfte”), działających w punkcie styku koła i szyny oraz ich rzeczywisty rozkład w pojeździe,
- wartość współczynnika tarcia  $\mu$  między kołem a szyną,
- zarys koła, a zwłaszcza kąt pochylenia obrzeża  $\gamma$ , przyjęty w stanie nowym na poziomie 70° zgodnie z normą europejską PN-EN 13715+A1:2011 wg [11],
- wchrowatość toru, mierzona w promilach i określona w przepisach utrzymania infrastruktury,
- wielkość kątów nabiegania  $\alpha$  koła pojazdu na szynę,
- promień łuku toru  $R$ , przez który przejeżdża pojazd oraz wielkość pochylenia rampy przechyłkowej toku zewnętrznego szyny na łuku o promieniu  $R$ ,
- bazy wózka 2a, w przypadku pojazdów czterosiowych oraz baza pojazdu w przypadku wagonów dwusioowych,
- sztywność skrętna nadwozia,
- sztywność usprężynowania,
- sztywność skrętna ramy wózka.

### 2. Wskaźnik wykołnienia

Wskaźnik wykołnienia, który jest znany od 1908 roku jako kryterium Nadala, przedstawia się następująco:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_{\gamma=70^{\circ}, \mu=0,36} \leq 1,2 \quad (1)$$

gdzie:

$Y$ - siła prowadząca, działająca w punkcie styku w kierunku poprzecznym (niem. „laterale Führungskraft”)

$Q$ - siła nacisku pionowego koła na szynę (niem. „Radaufstandskraft”).

Kryterium w takiej formie, aby można było je bardziej zrozumieć, musi ulec rozwinięciu do następującej formy:

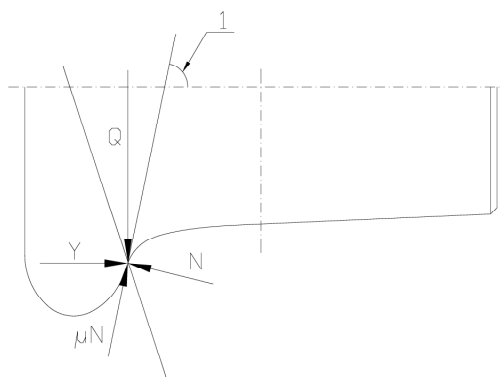
$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg} \gamma - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg} \gamma} \leq 1,2 \quad (2)$$

gdzie:

$\gamma$ -kąt pochylenia obrzeża (niem. „Spukranzwinkel”),

$\mu$ - współczynnik tarcia pomiędzy kołem, a szyną (niem. „Reibwert”)

Rozkład sił oraz kąt pochylenia obrzeża jest przedstawiono na rys.1



Rys.1. Siły działające w punkcie styku koła-szyna podczas przejazdu przez łuk toru

Legenda:

Y- siła poprzeczna działająca w punkcie styku koło-szyna

Q- siła pionowa działająca w punkcie styku koło-szyna

N –siła normalna, prostopadła do linii, wyznaczającej kąt pochylenia obrzeża

$\mu N$ - siła tarcia, działająca w punkcie styku koło-szyna.

Proces wykolejenia odbywa się w wyniku wspinania koła (niem. „das Aufklettern des Rades”) w rejonie obrzeża po główce szyny. Wspinanie koła bokiem obrzeża po zarysie zewnętrznym szyny odbywa się w wyniku działania siły tarcia  $T=\mu \cdot N$  (niem. „Tangentialkraft”) oraz składowej siły poprzecznej Y. Wartość tej siły jest tym większa im większy jest współczynnik tarcia pomiędzy kołem, a szyną. Jeżeli stosunek sił Y i Q przekroczy wartość wynoszącą 1,2, to wówczas, prawdopodobne jest wykolejenie. Należy jednak podkreślić, że kryterium to obowiązuje dla kąta pochylenia obrzeża  $\gamma=70^\circ$  oraz współczynnika tarcia na styku koło-szyna wynoszącego  $\mu=0,36$ .

Po wstawieniu danych  $\gamma=70^\circ$  oraz  $\mu=0,36$  do wzoru (2) otrzymuje się:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}70^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}70^\circ} = \frac{2,7474 - 0,36}{1 + 0,36 \cdot 2,7474} = 1,200 \quad (3)$$

Tak więc poprawnie sformułowane kryterium Nadala przedstawia się następująco:

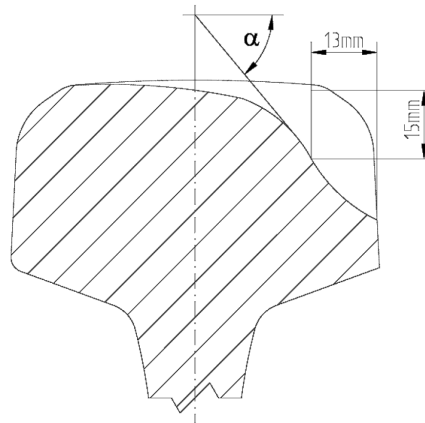
$$\left( \frac{Y}{Q} \right)_{\gamma=70^\circ, \mu=0,36} \leq 1,2 \quad (4)$$

Wskaźnik wykolejenia zależy w dużym stopniu od kąta pochylenia obrzeża  $\gamma$ . Zależność tę przedstawiono w tabeli 1.

Zależność wskaźnika wykolejenia (Y/Q) od kąta pochylenia obrzeża koła Tabela 1

l.p.	Wartość kąta pochylenia obrzeża $\gamma$	Wartość wskaźnika wykolejenia (Y/Q)
1	60°	0,845
2	61°	0,875
3	62°	0,906
4	63°	0,939
5	64°	0,972
6	65°	1,007
7	66°	1,042
8	67°	1,079
9	68°	1,118
10	69°	1,158
11	70°	1,200
12	71°	1,243
13	72°	1,289
14	73°	1,336
15	74°	1,386
16	75°	1,438
17	76°	1,493
18	77°	1,551
19	78°	1,612
20	79°	1,677
21	80°	1,746

Należy jednak zaznaczyć, że kąt pochylenia obrzeża  $\gamma$  można używać do oceny bezpieczeństwa przed wykolejeniem jeśli główka szyny nie jest na tyle zużyta, że ma wpływ na ostateczny kąt pochylenia. Jeśli główka szyny jest na tyle zużyta, jak pokazano na rys.4, to wówczas rzeczywisty kąt styku wynosi  $\alpha=55^\circ$  podczas przejazdu pojazdu z kołami o kącie pochylenia obrzeża  $\gamma=70^\circ$ .



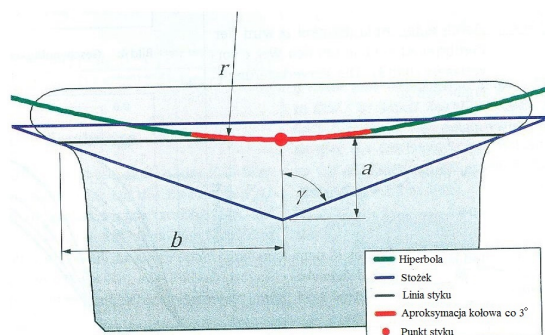
Rys.2. Maksymalne dopuszczalne zużycie szyny, które wywołuje kąt pochylenia obrzeża  $\alpha=55^\circ$

Przyjmując kąt pochylenia obrzeża  $\alpha=55^\circ$  oraz współczynnik tarcia  $\mu=0,36$  i wstawiając do wzoru (2) otrzymuje się:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}55^\circ - 0,36}{1 + 0,36 \cdot \operatorname{tg}55^\circ} \leq 0,705 \quad (5)$$

### 3. Wskaźnik wykolejenia, a kąt nabiegania

W przypadku przejazdu pojazdu przez łuk dochodzi bardzo często do nabiegania koła pojazdu na szynę pod kątem  $\alpha$ , który nazywa się w kolejnictwie kątem nabiegania (niem. „Anlaufwinkel”, ang. „striking angle”, fr „angle d’ attage”). Sytuację koła pojazdu na łuku toru opisuje rys.2 oraz rys.3.



Legenda:

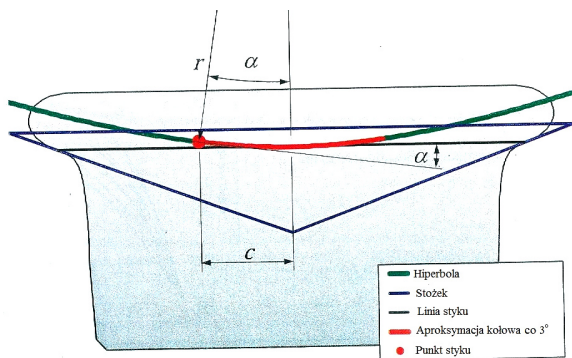
a- mała półoś elipsy

b- duża półoś elipsy

r- promień krzywizny wierzchołka hiperboli

$\gamma$ - kąt pochylenia obrzeża

Rys.3. Aproksymacja przebiegu punktu styku przez łuk toru wg [2]



Rys.4. Przesunięcie punktu styku podczas przejazdu koła pojazdu przez łuk toru wg [2]

Kąty nabiegania  $\alpha$  mogą przyjmować różne wartości, przy czym jedną z maksymalnych wartości  $\alpha=3,23^\circ$  wyliczono podczas przejazdu wagonu towarowego 218K (Hbbins) przez łuk o promieniu  $R=70$  m [2,3]. Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych pojazdów tramwajowych duże kąty nabiegania ok.  $3^\circ$ , występują podczas przejazdu przez łuk o promieniu  $R=17,5$  m i wózków o bazie 1850 mm [2]. Duże kąty nabiegania  $\alpha$  powyżej  $3^\circ$  występują podczas przejazdu wagonów towarowych przez łuki o małym promieniu, tzw. toru warsztatowe, co zostało wykazane w [6-8].

Analizując rys.3 oraz rys.4 można zauważyć, że jeśli punkt styku koła szyna wędruje na wycinku hiperboli, to wówczas powstaje kąt nabiegania  $\alpha$ .

Punkt wierzchołkowy (niem. „Scheitelpunkt”) hiperboli można wyznaczyć ze wzoru:

$$r = \frac{b^2}{a} \quad (6)$$

Półoś  $b$  odpowiada promieniowi koła  $R$  w punkcie styku.

Półoś  $a$  może być wyliczona za pomocą kąta pochylenia obrzeża na podstawie następującego wzoru:

$$a = \frac{R}{\tan \gamma} \quad (7)$$

Z zależności (6) oraz (7) wynika zależność dla aproksymowanego przesunięcia promienia koła:

$$r = R \cdot \tan \gamma \quad (8)$$

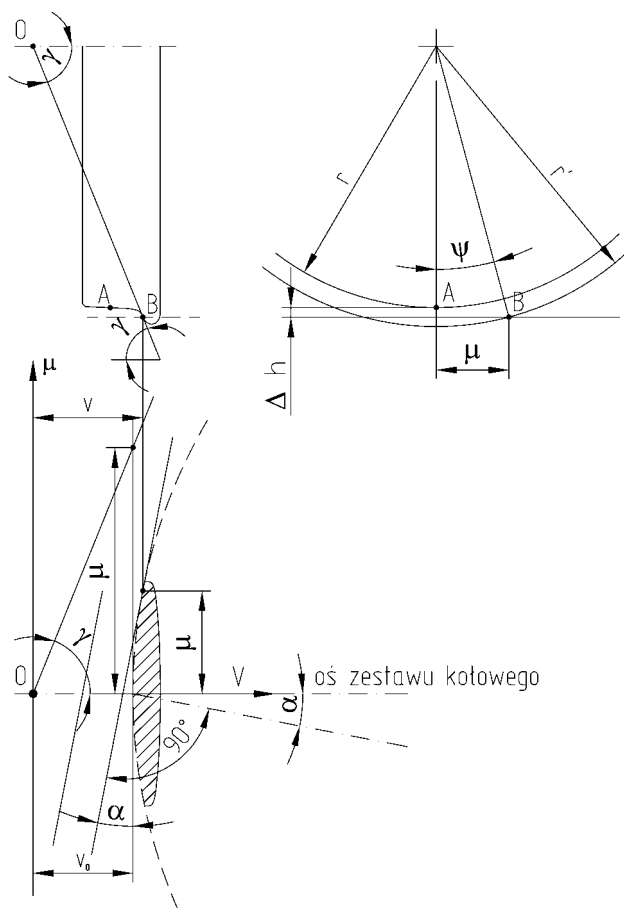
W wyniku kąta nabiegania  $\alpha$  punkt styku na kole przemieszcza się na odcinku drogi  $c$ , w wyniku czego można zapisać:

$$c = r \cdot \sin \alpha \quad (9)$$

względnie:

$$c = R \cdot \tan \gamma \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

Skośne nabieganie koła pojazdu na szynę przedstawia również rys.5.



Rys.5. Skośne nabieganie koła na szynę

Oznaczenia na rys.5:

A, B punkty styku koła z szyną, odpowiednio na powierzchni toczonej i obrzeżu koła

$\gamma$ - kąt pochylenia obrzeża

$\alpha$ - kąt nabiegania koła na szynę

$\mu$ - współczynnik tarcia

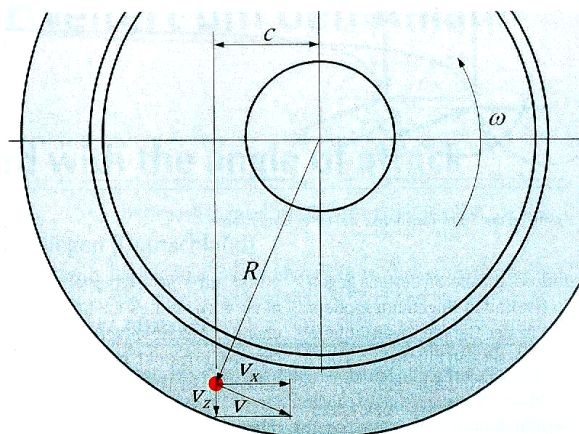
$r$ - promień powierzchni toczonej

$r$ - promień obrzeża, sięgający do ostatniego punktu na boku obrzeża

$\Delta h$ - odległość w kierunku pionowym pomiędzy punktami A i B.

### 3.1. Uwzględnienie poślizgu podczas jazdy przez łuk toru

Poślizg w kierunku pionowym można określić z rys.6.



Rys.6. Prędkości przy przesunięciu punktu styku wg [2]

Legenda:

R- promień punktu styku koła i szyny  
c- przemieszczenie punktu styku koła i szyny (punkt styku B znajduje się na obrzeżu koła)  
 $\omega$ - prędkość obrotowa koła  
v- prędkość liniowa w punkcie styku  
 $v_x$ - składowa prędkości w kierunku jazdy  
 $v_y$ - składowa prędkości w kierunku poprzecznym do kierunku jazdy.

Przemieszczeniu c punktu styku, wynikającemu z prędkości na kole towarzyszy poślizg. Poślizg w kierunku pionowym można wyznaczyć z następującej zależności:

$$s_z = \frac{v_z}{v} \quad (11)$$

Z warunków geometrycznych wynika zależność:

$$\frac{v_z}{v} = \frac{c}{R} \quad (11)$$

Z zależności (11) wynika wzór na poślizg w kierunku pionowym:

$$s_z = \tan\gamma \cdot \sin\alpha \quad (12)$$

W karcie UIC 510-2 [10] znajduje się zależność, określająca zależność współczynnika tarcia od poślizgu:

$$\left(\frac{1}{\mu}\right)^n = \left[\left(\frac{1}{\mu_s}\right)^n + \left(\frac{1}{K \cdot s_y}\right)^n\right] \quad (13)$$

Poszczególne parametry wyrażają się wzorami:

$$\mu_s = \frac{1}{1000} \cdot (Q^2 - 24,25Q + 571,5) \quad (14)$$

$$K = Q^2 - 24,25 \cdot Q + 219,5 \quad (15)$$

$$n = 0,05 \cdot Q + 2,2 \quad (16)$$

gdzie:

-Q nacisk pionowy koła na szynę wyrażony w tonach.

$$\mu = \left[\left(\frac{1}{\mu_s}\right)^n + \left(\frac{1}{K \cdot s_y}\right)^n\right]^{\frac{1}{n}} \quad (17)$$

Równanie (17) można aproksymować do funkcji wykładniczej:

$$\mu = \mu_s \cdot (1 - e^{-d \cdot s_y}) \quad (18)$$

Wyraz d wyznacza się ze wzoru empirycznego:

$$d = -10 \cdot Q + 460 \quad (19)$$

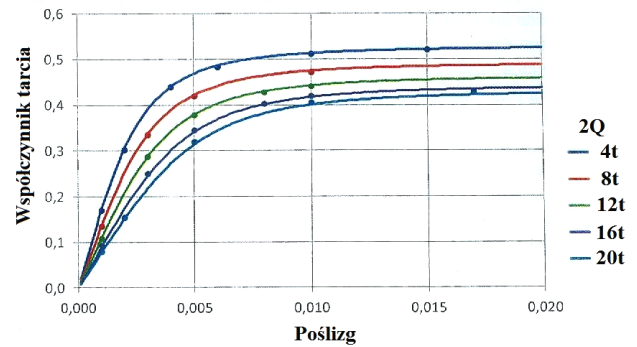
gdzie:

Q- nacisk koła w tonach.

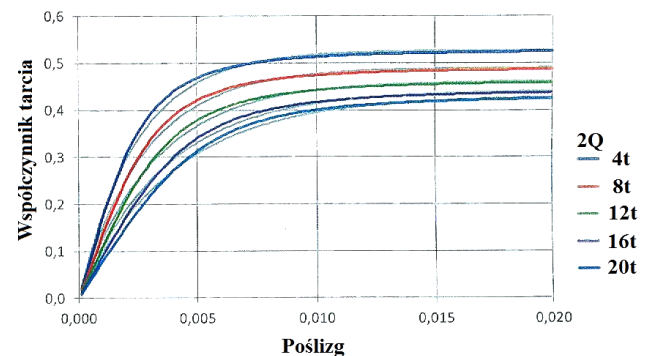
Na rys.7 przedstawiono graficzne zależności pomiędzy współczynnikiem tarcia i poślizgiem, natomiast na rys.8 przedstawiono tzw. krzywe aproksymacyjne.

Zakładając, że przebieg współczynnika tarcia w zależności od poślizgu jest niezależny od kierunku, względnie zależność współczynnika tarcia od poślizgu pionowego przebiega identycznie jak zależność współczynnika tarcia od poślizgu poprzecznego. Obowiązuje więc równanie:

$$s_y = s_z \quad (20)$$



Rys.7. Związek między współczynnikami tarcia koła-szyny i poślizgiem dla różnych nacisków pionowych zestawu kołowego 2Q na tor wg [2]



Rys.8. Aproksymacja ustalonych krzywych w karcie UIC 510-2 [10] poprzez funkcję wykładniczą dla różnych pionowych nacisków zestawów kołowych (2Q) na tor wg [2]

Niniejszą funkcję można wyrazić za pomocą aproksymacji przez funkcję wykładniczą:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\tan(\gamma) - \mu_s (1 - e^{-d \cdot \tan\gamma \cdot \sin\alpha})}{1 + \mu_s (1 - e^{-d \cdot \tan\gamma \cdot \sin\alpha}) \cdot \tan(\gamma)} \quad (21)$$

Kąt nabiegania  $\alpha$  koła pojazdu na szynę wyraża się wzorem:

$$\alpha = \frac{2a}{2} \cdot \frac{1}{R} \quad (22)$$

gdzie:

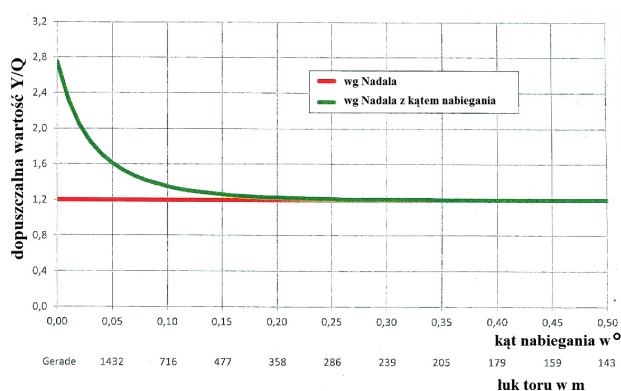
2a-baza pojazdu

R- promień łuku toru.

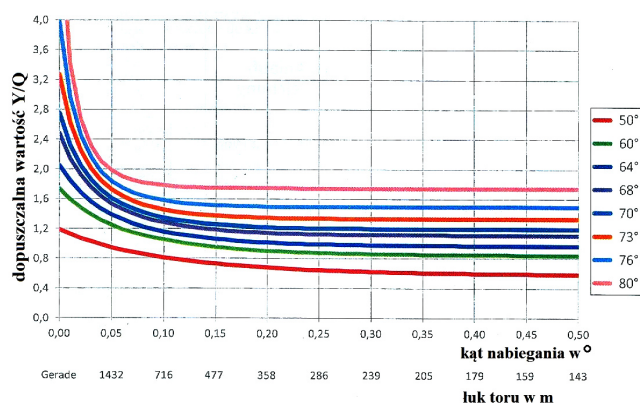
Na rys.9 przedstawiono zależność współczynnika (Y/Q) wg kryterium Nadala (czerwona linia) oraz rozszerzoną wartość współczynnika Nadala o kąt nabiegania dla kąta pochylenia obrzeża 70°, nacisku zestawu kołowego na tor wynoszącego 19t oraz współczynnika tarcia  $\mu=0,36$  i dla różnych promieni łuku toru.

Jak widać z rys.9 przy uwzględnieniu kąta nabiegania kryterium Nadala przyjmuje większe wartości od ustalonej w przepisach 1,2. Jeśli tak, to należy uznać, że w kryterium Nadala istnieją rezerwy, zależne od kąta nabiegania koła pojazdu na szynę. Krzywa wg Nadala, uwzględniająca kąt nabiegania dla większych jego wartości jest tożsama z tradycyjnym kątem nabiegania. Na rys.10 przedstawiono zależności wskaźnika wykołowania od kąta nabiegania i łuku toru, dla kątów

pochylenia obrzeża, wynoszących odpowiednio:  $\gamma=80^\circ, \gamma=76^\circ, \gamma=73^\circ, \gamma=70^\circ, \gamma=68^\circ, \gamma=64^\circ, \gamma=60^\circ$  i  $\gamma=50^\circ$ . Wykresy wskaźnika wykolejenia (Y/Q) przedstawiono dla nacisku zestawu kołowego na tor wynoszącego 19t, współczynnika tarcia  $\mu=0,36$  i pojazdu o bazie  $2a=2,5$  m.



Rys.9. Dopuszczalne wartości (Y/Q) wg kryterium Nadala i wg rozszerzonego równania wg Nadala w zależności od kąta nabiegania dla kąta pochylenia obrzeża  $70^\circ$ ,  $2Q=19t$  i współczynnika tarcia  $\mu=0,36$  wg [2]



Rys.10. Dopuszczalne wartości wskaźnika (Y/Q) wg rozszerzonego kryterium Nadala w zależności od kąta nabiegania dla różnych kątów pochylenia obrzeża,  $2Q=19t$  i  $\mu=0,36$ . Promień łuku toru ustalony dla pojazdu o bazie  $2a=2,5$  m wg [2]

Następnie przeprowadzono obliczenia dla wagonu 218 K (Hbbins) z rozsuwanymi ścianami o bazie 10m. Wagon 218 K przedstawiono na rys.11.

Wagon 218K (Hbbins) posiada następujące parametry techniczne:

- masa własna wagonu - max.16,5t
- długość ładowana -14 636 mm
- szerokość ładowana-2580 mm
- wysokość ładowna-3050 mm
- baza wagonu -10 000 mm
- maksymalny nacisk pionowy zestawu kołowego na tor-22,5t
- maksymalna prędkość wagonu załadowanego - 100 km/h
- maksymalna prędkość wagonu próżnego -120 km/h
- szerokość (prześwit) toru - 1435 mm.

Wyniki obliczeń wskaźnika wykolejenia (Y/Q) zebrano w tabeli 2.

Przed wykonaniem analizy wyników należy zwrócić uwagę, że wyprowadzona zależność na wskaźnik wykolejenia, określona wzorem (21), przyjmuje postać wzoru (2) jeżeli:

$$\mu = \mu_s \quad (23)$$

Wówczas zależność, określona wzorem (18) przyjmuje taką postać pod warunkiem, że

$$\left(1 - e^{-d \cdot s_y}\right) = 1 \quad (24)$$

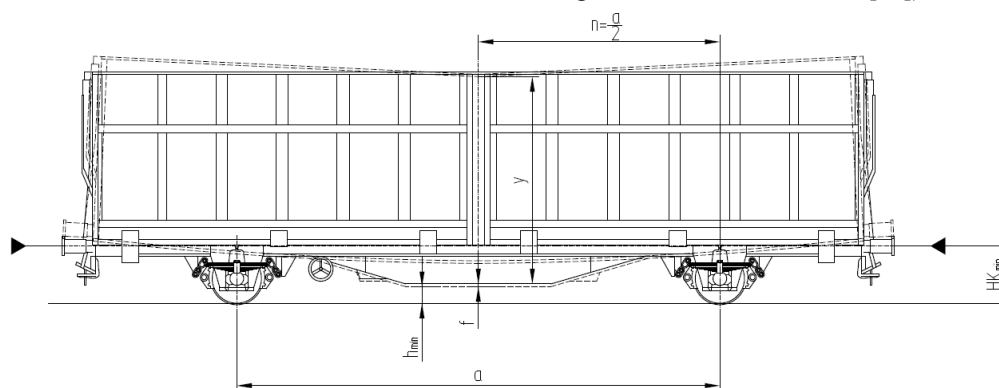
A to oznacza, że funkcja  $e^{-d \cdot s_y \sin \alpha}$  zmierza do wartości 0.

Wyniki obliczeń dla współczynnika  $\mu_s=0,36$  dla wagonu 218 K przedstawiono w tabeli 3.

### 3.2. Radialne ustawianie się zestawu kołowego w łuku, a wskaźnik wykolejenia

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 2 można zauważyć, że wraz ze wzrostem kąta nabiegania  $\alpha$ , którego wartość rośnie wraz ze zmniejszeniem się promienia łuku toru można wyciągnąć wniosek, że kryterium Nadala może przyjmować:

- większe wartości od tradycyjnie wyliczonych dla małych kątów nabiegania  $\alpha$ , które pojawiają się na odcinkach prostych toru  $R > 1800$  m oraz łukach o dużych promieniach  $600m < R < 1800$  m
- wartości równe tradycyjnie przyjmowanych dla dużych kątów nabiegania  $\alpha$ , które pojawiają się na łukach małych  $250 \leq R < 600$  m oraz na łukach bardzo małych  $250 \leq R < 400$  m (definicje zakresów łuków zgodnie PN-EN 14363:2007[12]).



Rys.11. Wagon dwuosioowy typu 218K (Hbbins) z rozsuwanymi ścianami

Zestawienie wyników obliczeń wskaźnika wykołowania (Y/Q) dla różnych kątów nabiegania  $\alpha$  i współczynnika tarcia  $\mu=0,488$  dla wagonu dwuosowego z rozsuwanymi ścianami 218 K (Hbbins) Tabela 2

L.p.	Q [t]	$\mu_s$ [-]	d [t]	R [m]	$\alpha$ [rad]	$\alpha$ [°]	$\sin\alpha$ [-]	$\frac{Y}{Q}$	$\frac{Y}{Q_{NAD}}$
1.	4,125	0,488	418,75	10000	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0286	$4,9916 \cdot 10^{-4}$	1,59	0,96
2.	4,125	0,488	418,75	5000	$1 \cdot 10^{-3}$	0,0572	$9,9832 \cdot 10^{-4}$	1,26	0,96
3.	4,125	0,488	418,75	3000	$1,66 \cdot 10^{-3}$	0,0951	$1,6598 \cdot 10^{-3}$	1,08	0,96
4.	4,125	0,488	418,75	1000	$5 \cdot 10^{-3}$	0,2864	$4,9986 \cdot 10^{-3}$	0,964	0,96
5.	4,125	0,488	418,75	800	$6,25 \cdot 10^{-3}$	0,3580	$6,2482 \cdot 10^{-3}$	0,9615	0,96
6.	4,125	0,488	418,75	600	$8,33 \cdot 10^{-3}$	0,4772	$8,3286 \cdot 10^{-3}$	0,9610	0,96
7.	4,125	0,488	418,75	300	0,016	0,9167	0,0159	0,96	0,96
8.	4,125	0,488	418,75	250	0,02	1,1459	0,0199	0,96	0,96
9.	4,125	0,488	418,75	200	0,025	1,4323	0,0249	0,96	0,96
10.	4,125	0,488	418,75	150	0,033	1,8907	0,0331	0,96	0,96

Zestawienie wyników obliczeń wskaźnika wykołowania (Y/Q) dla różnych kątów nabiegania  $\alpha$  i współczynnika tarcia  $\mu=0,36$  dla wagonu dwuosowego z rozsuwanymi ścianami 218 K (Hbbins) Tabela 3

L.p.	Q [t]	$\mu_s$ [-]	d [t]	R [m]	$\alpha$ [rad]	$\alpha$ [°]	$\sin\alpha$ [-]	$\frac{Y}{Q}$	$\frac{Y}{Q_{NAD}}$
1.	4,125	0,360	418,75	10000	$5 \cdot 10^{-4}$	0,0286	$4,9916 \cdot 10^{-4}$	1,808	1,200
2.	4,125	0,360	418,75	5000	$1 \cdot 10^{-3}$	0,0572	$9,9832 \cdot 10^{-4}$	1,493	1,200
3.	4,125	0,360	418,75	3000	$1,66 \cdot 10^{-3}$	0,0951	$1,6598 \cdot 10^{-3}$	1,324	1,200
4.	4,125	0,360	418,75	1000	$5 \cdot 10^{-3}$	0,2864	$4,9986 \cdot 10^{-3}$	1,202	1,200
5.	4,125	0,360	418,75	800	$6,25 \cdot 10^{-3}$	0,3580	$6,2482 \cdot 10^{-3}$	1,200	1,200
6.	4,125	0,360	418,75	600	$8,33 \cdot 10^{-3}$	0,4772	$8,3286 \cdot 10^{-3}$	1,200	1,200
7.	4,125	0,360	418,75	300	0,016	0,9167	0,0159	1,200	1,200
8.	4,125	0,360	418,75	250	0,02	1,1459	0,0199	1,200	1,200
9.	4,125	0,360	418,75	200	0,025	1,4323	0,0249	1,200	1,200
10.	4,125	0,360	418,75	150	0,033	1,8907	0,0331	1,200	1,200

Wyniki teoretyczne skłaniają do wyciągnięcia wniosku, że w przypadku ciasnych i średnich zakresów promieni, jednym z technicznych rozwiązań byłoby zmniejszenie kątów nabiegania poprzez zastosowanie radialnego sterowania zestawów kołowych układów biegowych lub zastosowania sprzęgów wózkowych w lokomotywach. Przykład nowoczesnego wózka z hamulcami tarczowymi oraz radialnym sterowaniem zestawów kołowych typu RC25NT (RadialControl25NewTechnology), zaprojektowany i wyprodukowany przez firmę Eisenbahnlaufwerke GmbH & Co.KG w Halle (ELH) jest przedstawiony na rys 12 i rys.13. W wyniku takiego zabiegu, kąty nabiegania maleją, zestawy kołowe wpisują się łatwiej w łuk toru. Kolejną korzyścią, jest zmniejszenie zużycia obrzeży

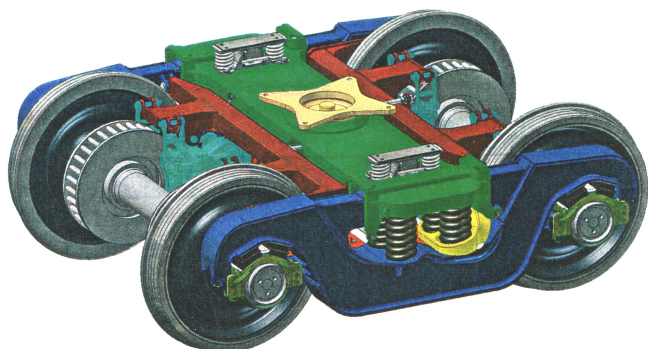
kół, co pozwala na zwiększenie żywotności kół jezdnych, a w efekcie na poprawienie konkurencyjności transportu szynowego na rynku przewozowym towarów.

Reasumując mechanizm radialnego sterowania zestawów kołowych wózka RC25NT zapewnia:

- bezpieczną równoległość zestawów kołowych na torach prostych oraz udoskonalone ustawianie się zestawów kołowych w łuku,
- niskie koszty napraw i konserwacji; przy wymianie zestawów kołowych mechanizm sterowania nie musi być demontowany, przez co zapewnione jest utrzymanie dokładności prowadzenia zestawów kołowych.

Wózek typu RC25NT jest przeznaczony do wagonów towarowych, przystosowanych do nacisku zestawów kołowych na tor, wynoszącego 25t oraz prędkości 100 km/h.

Badanie pojazdów, a w szczególności wagonów towarowych w stanie próżnym, ma istotne uzasadnienie, gdyż najczęściej dochodzi do wykolejenia w tym stanie. Wynika to ze wskaźnika wykolejenia, gdyż wtedy odciążenie koła  $\Delta Q$  może być decydujące dla bazowej wartości nacisku  $Q$ . Wyliczone wartości kątów nabiegania dla analizowanych przypadków są realne i pokrywają się z praktyką eksploatacyjną.



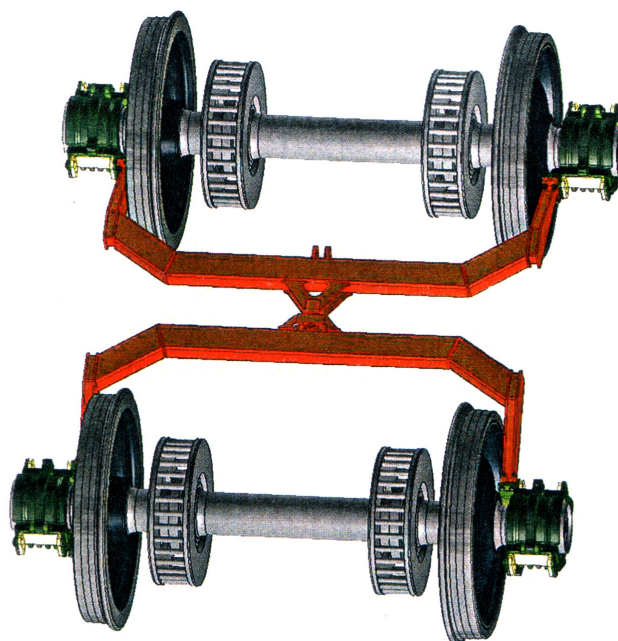
Rys.12. Wózek RC25NT, przeznaczony do ciężkich przewozów towarowych wg [5]

Należy podkreślić, że każdy luz wzdłużny zwiększa możliwość wpisywania się pojazdu w łuki. W ten sposób zmniejsza się kąt nabiegania w łukach. Uzasadnia to wzór na określenie minimalnego promienia łuku toru, przez który może przejechać pojazd np. dwuosiowy wagon towarowy. W przypadku przejazdu przez łuk o promieniu  $R$  wagonu dwuosiowego o bazie  $2p$ , luzach poprzecznych  $2q$ , luzach wzdłużnych  $2q_w$  i luzie zestawu kołowego w torze  $\varepsilon$  minimalny promień łuku toru, w który może wjechać pojazd wynosi:

$$R = \frac{\frac{p}{2} - \left[ \frac{\sin \arccos \psi}{\operatorname{tg} \gamma} + \frac{q_w}{s} \right] \frac{\varepsilon}{2}}{\left( \frac{\sin \arccos \psi}{\operatorname{tg} \gamma} + \frac{q_w}{s} - \frac{\varepsilon + 2q}{p} \right)} \quad (25)$$

Wyniki uzyskanych kątów nabiegania  $\alpha$  dla wagonu z rozsuwanymi ścianami typu 218K są realne i mają swoje potwierdzenie w praktyce kolejowej.

Należy wziąć pod uwagę, że wskaźnik wykolejenia, jako kryterium w tradycyjnej formie jest funkcją dwóch zmiennych tzn. kąta pochylenia obrzeża  $\gamma$  oraz współczynnika tarcia  $\mu$  pomiędzy kołem a szyną. Dzięki dalszym badaniom udało się uwzględnić w kryterium wykolejenia kąt nabiegania  $\alpha$ . Należy podkreślić, że wskaźnik wykolejenia jest zależny od współczynnika tarcia między kołem a szyną, który z kolei zależy od:



Rys.13. Mechanizm sterowania radialnego wózka RC25NT wg [5]

- prędkości pojazdu,
- warunków atmosferycznych (temperatura otoczenia, wilgotność powietrza),
- wyposażenia pojazdu w urządzenia do smarowania obrzeży kół,
- wyposażenia w urządzenia stacjonarne przytorowe do zwilżenia powierzchni szyn na łukach toru (stosowane głównie przez koleje szwajcarskie SBB oraz koleje austriackie ÖBB),
- wyposażenia pojazdu w urządzenia do piaskowania,
- zanieczyszczenia i zużycia szyn (patrz rys.2),
- chropowatości powierzchni tocznej i obrzeży kół oraz szyn kolejowych itd.

Zależność wskaźnika wykolejenia dla poszczególnych kątów pochylenia obrzeża  $\gamma$  od współczynnika tarcia przedstawiono w tabeli 4.

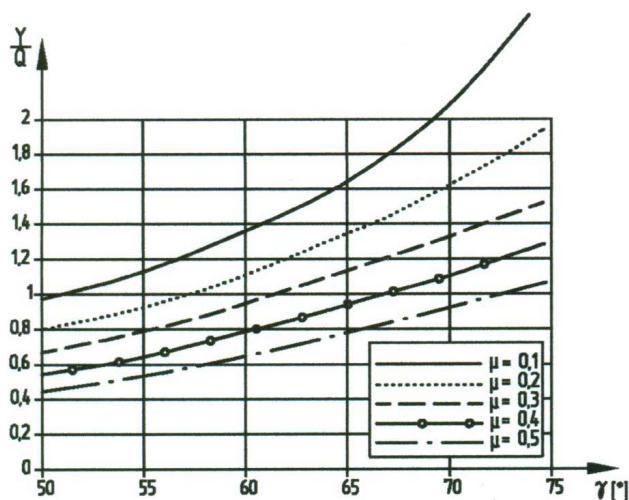
Należy zwrócić uwagę na to, że wartość współczynnika tarcia  $\mu=0,36$  nie jest wartością maksymalną występującą w kolejnictwie. Norma PN-EN 14363:2007 [12] przedstawia wykres zależności wskaźnika wykolejenia od kąta pochylenia obrzeża dla różnych współczynników tarcia. Wykres ten jest przedstawiony na rys.14.

Jak widać z rys.14, współczynnik tarcia między kołem i szyną może wynosić nawet  $\mu=0,5$ . Jak wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, zdobytych poza granicami kraju współczynnik tarcia może osiągnąć nawet w sprzyjających warunkach wartość 0,6 [1,3,4]. Tak więc kryterium Nadala, jako wskaźnik wykolejenia o wartości 1,2 ma charakter umowny i jego spełnienie w warunkach ekstremalnych może być niewystarczające.

Zależność współczynnika wykolejenia (Y/Q dla różnych kątów pochylenia obrzeża koła od współczynnika tarcia między kołem a szyną

Tabela 4

l.p.	Wartość kąta pochylenia obrzeża $\gamma$ [°]	Współczynnik tarcia [-]	Wartość wskaźnika wykolejenia	Współczynnik tarcia [-]	Wartość wskaźnika wykolejenia [-]	Współczynnik tarcia [-]	Wartość wskaźnika wykolejenia [-]
1	60°	0,36	0,845	0,2	1,137	0,1	1,391
2	61°	0,36	0,875	0,2	1,178	0,1	1,443
3	62°	0,36	0,906	0,2	1,221	0,1	1,498
4	63°	0,36	0,939	0,2	1,265	0,1	1,557
5	64°	0,36	0,972	0,2	1,312	0,1	1,618
6	65°	0,36	1,007	0,2	1,360	0,1	1,683
7	66°	0,36	1,042	0,2	1,411	0,1	1,752
8	67°	0,36	1,079	0,2	1,465	0,1	1,825
9	68°	0,36	1,118	0,2	1,521	0,1	1,903
10	69°	0,36	1,158	0,2	1,581	0,1	1,987
11	70°	0,36	1,200	0,2	1,644	0,1	2,076
12	71°	0,36	1,243	0,2	1,710	0,1	2,173
13	72°	0,36	1,289	0,2	1,781	0,1	2,276
14	73°	0,36	1,336	0,2	1,856	0,1	2,389
15	74°	0,36	1,386	0,2	1,936	0,1	2,511
16	75°	0,36	1,438	0,2	2,022	0,1	2,644
17	76°	0,36	1,493	0,2	2,114	0,1	2,791
18	77°	0,36	1,551	0,2	2,213	0,1	2,952
19	78°	0,36	1,612	0,2	2,320	0,1	3,131
20	79°	0,36	1,677	0,2	2,437	0,1	3,330
21	80°	0,36	1,746	0,2	2,563	0,1	3,555



Rys.14.Przebieg funkcji wskaźnika wykolejenia (Y/Q) w zależności od współczynnika tarcia  $\mu$  między kołem a szyną oraz kąta pochylenia obrzeża  $\gamma$  koła wg PN-EN 14363:2007 [12]

#### 4. WNIOSKI

Jak widać z przedstawionych analiz kryterium wykolejenia, zwane kryterium Nadala mające już bardzo długą historię podlega ciągłemu rozwojowi. Rozwój ten odbywa się na drodze analiz teoretycznych oraz badań empirycznych. Badanie samego kryterium i jego uściślanie ma na celu, zwiększenie bezpieczeństwa kursujących pojazdów podczas przejazdu w ekstremalnych warunkach (mała prędkość, wysoki współczynnik tarcia) przez tory wchrowate. Zwiększenie tego kryterium, w sensie wartości, daje bardzo duże

korzyści i przyczynia się do zwiększenia konkurencyjności transportu szynowego. Warto zauważyć, że w okresie eksploatacji pojazdu szynowego, dopuszczalna wartość współczynnika wykolejenia zmienia się w zależności od prędkości pojazdu (współczynnika tarcia), trajektorii toru (tory proste, łuku o dużym promieniu, łuki o małym promieniu oraz łuki o bardzo małym promieniu), wartości kąta pochylenia obrzeża, stanu utrzymania zarysu zewnętrznego koła oraz szyn. Badania nad wskaźnikiem wykolejenia (Y/Q) powinny być przeprowadzone równoległe z pracami nad zabezpieczeniami technicznymi pojazdów szynowych przed wykolejeniami. Polega to na ciągłych inwestycjach technicznych w zakresie wyposażeniu taboru szynowego w system zapobiegawczo-prewencyjny, jeśli chodzi o wykolejenia. W przypadku zastosowania mechanizmów, umożliwiających quasi-radialne lub radialne ustawianie się zestawów kołowych w łuku, osiąga się jeszcze jedną zaletę zawieszenia lub układu biegowego, do jakich można zaliczyć mniejsze zużycie obrzeża kół zestawu kołowego oraz powierzchni szyn. Zgodnie z tendencjami rozwoju pojazdów szynowych, rośnie zapotrzebowanie na ultralekkie konstrukcje. W związku z powyższym, bezpieczeństwo przed wykolejeniem nabiera priorytetowego znaczenia.



## 5. LITERATURA

- [1] Böhmer A., Ertz M., Kontothe k., Bucher-Mersch F., Klimpel T.: Beanspruchungen von Schienen unter dynamischen und thermischen Belastungen. ZEV Rail Glasers Annalen. Nr. 3 i 4 .2003.
- [2] Dede J., Reimann U : Nadals Gleichung, erweitert um den Anlaufwinkel. ZEVrail nr. 4 2014
- [3] Kik.W., Menssen R., Moelle D.: Kräfte und Verschleiss in der Wendenschleife und im Abzweig einer Weiche. Der Eisenbahningenieur 04.2003.
- [4] Krugmann H.L.: Lauf der Schienefahrzeuge im Gleis. Eine Einführung. Oldenburg. Verlag München-Wien.1982
- [5] Scholdan D., Gabriel N, Kik W.: Ein neues gleisfreundliches Drehgestell für den schweren Güterverkehr. Glasers Annalen. Sonderheft Tagungsband. Moderne Schienefahrzeuge. 09.2011.
- [6] Sobaś M.: Zawieszenia i układy biegowe wagonów towarowych. Wydawnictwo IPS Tabor 2014.
- [7] Sobaś M.: Analiza przejazdu wagonów towarowych dwuosioowych przez łuk o minimalnym promieniu (1). Pojazdy Szynowe nr 1/2003
- [8] Sobaś M.: Stan i doskonalenie kryteriów bezpieczeństwa przed wykolejeniem pojazdów szynowych (1). Pojazdy Szynowe nr 4/2005.
- [9] Sobaś M.: Stan i doskonalenie kryteriów bezpieczeństwa przed wykolejeniem pojazdów szynowych (2). Pojazdy Szynowe nr 2/2006.
- [10] Karta UIC 510-2: Pojazdy doczepne. Warunki dla stosowania kół o różnych średnicach w układach biegowych różnego typu. 4-te wydanie z października 2002 i kwietnia 2004.
- [11] PN-EN 13715+A1:2011: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Koła. Zewnętrzne zarysy wieńców kół.
- [12] PN-EN 14363:2007:Kolejnictwo- Badania właściwości dynamicznych przed dopuszczeniem pojazdów szynowych. Badania właściwości biegowych i próby stacjonarne.
- [13]Raport ORE/ERRI B55 Rp.8: Sicherheit gegen Entgleisen von Güterwagen in Gleisverwindungen. Bericht 8 (Schlussbericht). Utrecht. April, 1983.