

Na prawach rękopisu
Do użytku służbowego

INSTYTUT INŻYNIERII LĄDOWEJ
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport serii PRE nr 14/2002

**UGIĘCIE SZYNY
JAKO PARAMETR OCENY
KONSTRUKCJI TOROWISK
TRAMWAJOWYCH**

JACEK MAKUCH

PRACA DOKTORSKA

Promotor:

dr hab. inż. Marek Krużyński, prof. PWr

Słowa kluczowe:

- transport
- droga szynowa
- diagnostyka

Wrocław 2002

*Panu Promotorowi
dr hab. inż. Markowi Krużyńskiemu
serdeczne podziękowania za opiekę naukową*

składa autor

SPIS TREŚCI

SPIS RYSUNKÓW	5
SPIS TABEL	7
OZNACZENIA	8
1. WSTĘP	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Wymagania stawiane konstrukcjom torowisk tramwajowych	11
1.3. Diagnostyka torowisk tramwajowych	12
1.4. Ocena nośności torowisk tramwajowych i nawierzchni drogowych	19
2. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY	21
2.1. Cel pracy	21
2.2. Zakres pracy	21
2.3. Teza pracy	21
3. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI TOROWISK TRAMWAJOWYCH ZABUDOWANYCH	22
3.1. Rozwiązania stosowane we Wrocławiu	23
3.2. Rozwiązania stosowane w innych miastach Polski	35
3.3. Rozwiązania stosowane za granicą	37
4. ANALIZA ZAGADNIENIA UGIĘĆ SZYNY W TOROWISKACH TRAMWAJOWYCH	39
4.1. Metody i modele obliczeń nawierzchni szynowej	40
4.2. Klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej	46
4.3. Sztywność toru	49
4.4. Badanie terenowe	64
4.5. Badania laboratoryjne	68
5. BADANIA TERENOWE UGIĘĆ SZYNY W TOROWISKACH TRAMWAJOWYCH	70
5.1. Metoda badawcza	70
5.1.1. Podstawowe założenia	70
5.1.2. Konieczne modyfikacje drogowej metody pomiaru ugięć	70
5.1.3. Zespół pomiarowy i czynności pomiarowe	70
5.1.4. Mierzone wielkości	71
5.1.5. Aparatura pomiarowa	71
5.2. Zakres badań	71
5.3. Wstępne badania rozpoznawcze	72
5.4. Badania zasadnicze	72
5.4.1. Opis i lokalizacja badań	72
5.4.2. Przygotowanie wyników badań	78
5.4.3. Zestawienie wyników badań	78
5.4.4. Statystyczne opracowanie wyników badań	80
5.4.4.1. Eliminacja błędów dużych	80
5.4.4.2. Ocena rzeczywistej wartości mierzonej wielkości	81
5.4.4.3. Ocena dokładności pomiaru	82
5.4.4.4. Sprawdzenie normalności rozkładu	86
5.4.5. Analiza wyników badań	89
5.4.5.1. Porównanie wyników badań	89
5.4.5.2. Zróżnicowanie wartości ugięć na długości toru	93

6. OBLICZENIE TEORETYCZNYCH WARTOŚCI UGIĘĆ SZYNY DLA PRZEBADANYCH TOROWISK TRAMWAJOWYCH	98
6.1. Założenia	98
6.1.1. Metoda obliczeń	98
6.1.2. Schemat obciążenia	98
6.1.3. Model obliczeniowy	98
6.2. Dane do obliczeń	100
6.2.1. Obciążenie zewnętrzne	100
6.2.2. Szyna	101
6.2.3. Podatne podłoże szyny	101
6.3. Wzory obliczeniowe	106
6.4. Wyniki obliczeń	107
7. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH I OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH	109
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	112
9. KIERUNKI I MOŻLIWOŚCI PROWADZENIA DALSZYCH BADAŃ	114
LITERATURA	115
STRESZCZENIE	122
SUMMARY	124
ZAŁĄCZNIK NR 1 - Formularze z wynikami pomiarów badań terenowych .	126

SPIS RYSUNKÓW

Rys.1	Pomiar ugięcia nawierzchni drogowej ugięciomierzem belkowym	19
Rys.2	Pomiar ugięcia szyny tramwajowej ugięciomierzem belkowym	20
Rys.3	Przekrój konstrukcyjny tradycyjnego toru wbudowanego w jezdnię stosowanego we Wrocławiu w latach 70 i 80-tych	24
Rys.4	Przekrój konstrukcyjny toru wbudowanego w jezdnię z zastosowaniem płyt PPT	25
Rys.5	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Sądowej	26
Rys.6	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Grabiszyńskiej	27
Rys.7	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Poniatowskiego	28
Rys.8	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Powstańców Śl.	30
Rys.9	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Świdnickiej	31
Rys.10	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Karkonoskiej	32
Rys.11	Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na skrzyżowaniu ul. Kosmonautów i Kamiennogórskiej	33
Rys.12	Przekrój konstrukcyjny toru z matą wibroizolacyjną	36
Rys.13	Przekrój konstrukcyjny toru typu "infundo"	37
Rys.14	Przekrój konstrukcyjny toru typu "flüsterschiene"	38
Rys.15	Szyna jako belka jednoprzęsłowa na dwóch niepodatnych podporach ...	40
Rys.16	Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Winklera	40
Rys.17	Schemat toru z szynami na podkładach podłużnych, jego obciążenia i linia ugięcia rozważane przez Zimmermanna	41
Rys.18	Schemat podkładu poprzecznego, jego obciążenia i linie ugięcia rozważane przez Zimmermanna	41
Rys.19	Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Schwedlera	42
Rys.20	Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Hoffmanna	42
Rys.21	Schemat Zimmermanna do wyznaczenia momentu zginającego szynę ...	42
Rys.22	Schemat Engessera do wyznaczenia momentu zginającego szynę	43
Rys.23	Schemat Schwedlera do wyznaczenia momentu zginającego szynę	43
Rys.24	Uogólniony model nawierzchni szynowej według Basiewicza	43
Rys.25	Schemat Desaia obliczeń toru i podtorza metodą elementów skończonych	44
Rys.26	Model Zimmermanna toru z szynami na podkładach podłużnych	46
Rys.27	Zginanie belki na sprężystym podłożu	46
Rys.28	Wykres zależności η od ξ	48
Rys.29	Modele toru: uwzględniający własności lepko-bezwładnościowo-sprężyste oraz z pominięciem własności lepko-bezwładnościowych	50
Rys.30	Sztywność zastępcza układu równoległego	55
Rys.31	Sztywność zastępcza układu szeregowego	55
Rys.32	Wykres ugięć toru przy pomiarze współczynnika podłoża szyny	56
Rys.33	Krzywa ściśliwości gruntu z badań edometrycznych	56
Rys.34	Wykres obciążeń gruntu sztywną płytą naciskową VSS	56
Rys.35	Charakterystyka statyczna przytwierdzenia szyny	57
Rys.36	Zmienność współczynnika podłoża szyny dla toru na podkładach drewnianych i podsypce	58
Rys.37	Pomiar przemieszczeń szyny przy pomocy aparatury laserowej	65
Rys.38	Przyrządy diagnostyczne do pomiaru ugięć szyny	65
Rys.39	Pomiar ugięć toru kolejowego ugięciomierzem belkowym Benkelmanna	66

Rys.40	Wykres obciążenie - odkształcenie dla wyznaczania sztywności statycznej przekładek podszynowych	69
Rys.41	Ustawianie macki ugięciomierza za kołem tramwaju	72
Rys.42	Przekrój konstrukcyjny - stanowisko 1a	73
Rys.43	Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 2a, 2b i 2c	74
Rys.44	Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 3a i 3f	75
Rys.45	Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 3b, 3c, 3d i 3e	76
Rys.46	Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 4a, 4b i 4c	77
Rys.47	Przekrój konstrukcyjny - stanowisko 5a	77
Rys.48	Ocena rzeczywistej wartości i dokładności pomiaru ugięć skorygowanych szyny	85
Rys.49	Test zgodności "chi kwadrat" dla stanowiska pomiarowego 4a – przygotowanie danych	86
Rys.50	Histogramy rozkładu wyników pomiarów ugięć skorygowanych na czternastu stanowiskach pomiarowych	88
Rys.51	Porównanie empirycznych odchyłeń standardowych ugięć szyny zmierzonych w stosunku do skorygowanych	89
Rys.52	Średnie wartości ugięć skorygowanych szyny dla pięciu analizowanych typów torów	92
Rys.53	Średnie wartości ugięć skorygowanych szyny na czternastu stanowiskach pomiarowych	92
Rys.54	Współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny dla pięciu analizowanych typów torów	93
Rys.55	Współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny na czternastu stanowiskach pomiarowych	93
Rys.56	Zróżnicowanie wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru dla czternastu stanowisk pomiarowych przy jednakowej skali osi rzędnych wykresów	95
Rys.57	Zróżnicowanie wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru dla czternastu stanowisk pomiarowych przy zmiennej skali osi rzędnych wykresów	96
Rys.58	Uproszczony model obliczeniowy nawierzchni szynowej	98
Rys.59	Schemat obciążenia zewnętrznego szyny	100
Rys.60	Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowej przekładki podszynowej	102
Rys.61	Zależności współczynnika sztywności przekładki od jej grubości	103
Rys.62	Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowej przekładki podpodkładowej - gumowej lub elastomerowej	103
Rys.63	Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowej przekładki podpodkładowej - poliuretanowej dołkowanej gęstej	104
Rys.64	Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowego podlewu poliuretanowego podpodkładowego	105
Rys.65	Porównanie rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny dla nacisku koła 22,2 kN na każdym z przebadanych stanowisk	109
Rys.66	Zgodność względna rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny dla przeanalizowanych pięciu typów torowisk zabudowanych	109

SPIS TABEL

Tab.1	Moduły sprężystości podbudów i podłoża torów	53
Tab.2	Współczynniki sztywności przekładek podszynowych	53
Tab.3	Współczynniki sztywności przekładek podpodkładkowych	53
Tab.4	Współczynniki sztywności podlewów wibroizolacyjnych	54
Tab.5	Współczynniki sztywności mat wibroizolacyjnych	54
Tab.6	Współczynniki sztywności łapek i pierścieni sprężystych	54
Tab.7	Wartości współczynnika podłoża szyny U w okresie letnim	61
Tab.8	Wartości współczynnika względnej sztywności podłoża i szyny K	64
Tab.9	Ocena rzeczywistej wartości i dokładności pomiaru ugięć skorygowanych szyny	83
Tab.10	Test zgodności "chi kwadrat" dla stanowiska pomiarowego 4a	87
Tab.11	Porównanie skośności i kurtozy z ich średnimi błędami kwadratowymi	87
Tab.12	Zestawienie porównawcze wyników badań terenowych ugięć szyny	90
Tab.13	Zestawienie porównawcze wyników obliczeń teoretycznych ugięć szyny	108
Tab.14	Analiza porównawcza ugięć rzeczywistych i teoretycznych	110

OZNACZENIA

- A - pole powierzchni
- A_{op} - powierzchnia oparcia podkładu o podsypkę
- a - długość podkładu poprzecznego
 - rozstaw podpór
- B - średnica lub mniejszy bok płyty sztywnej
- b - szerokość podstawy belki
 - szerokość stopki szyny
- b_p - szerokość podkładu poprzecznego
- b_z - szerokość zastępcza teoretycznego podparcia podłużnego
- C - drugi odczyt na czujniku (nawierzchnia drogowa obciążona) [mm]
 - współczynnik podłoża [N/mm^3]
- c - współczynnik tłumienia
- C_0 - pierwszy odczyt na czujniku (nawierzchnia drogowa obciążona) [mm]
- C^{spr} - sprowadzony współczynnik podłoża
- D - współczynnik podparcia szyny [kN/mm]
 - średnica płyty obciążającej [mm]
- D' - współczynnik podparcia podkładu [kN/mm]
- D'' - współczynnik ściśliwości podkładu i przytwierdzenia [kN/mm]
- E - moduł sprężystości [MPa]
 - moduł odkształcenia [MPa]
- E'' - moduł sprężystości drewna na ściskanie prostopadłe do włókien [MPa]
- E_o - moduł ściśliwości gruntu [MPa]
- E_p - moduł sprężystości materiału poprzecznego podkładu [MPa]
- e - podstawa logarytmu naturalnego
- F - siła [kN]
- G_i - stopień degradacji elementu i
- g - przyspieszenie ziemskie [$\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$]
- h_p - wysokość podkładu poprzecznego
- i_p - liczba pasażerów
- i_w - liczba wózków w tramwaju
- i_{ow} - liczba osi w wózku
- J - moment bezwładności [m^4]
- J_n - wskaźnik nierówności n -parametrowej toru
- J_p - moment bezwładności podkładu poprzecznego [m^4]
- K - współczynnik względnej sztywności podłoża i szyny [m^{-1}]
- k - liczba stopni swobody
 - współczynnik sztywności [kN/mm]
 - współczynnik kierunkowy prostej
- k_{ot} - sztywność odsprężynowania toru [kN/mm]
- k_p - sztywność podkładu [kN/mm]
- k_{pp} - sztywność przekładki podpodkładkowej [kN/mm]
- k_{ps} - sztywność przekładki podszynowej [kN/mm]
- k_{psc} - sztywność przekładki podszynowej ciągłej [kN/mm]
- k_{stat} - sztywność statyczna [kN/mm]
- k_z - sztywność zastępcza [kN/mm]
- k_{zd} - sztywność zastępcza przytwierdzenia [kN/mm]
- L - długość zastępcza belki na sprężystym podłożu [m]
- L_p - długość zastępcza podkładu poprzecznego na sprężystym podłożu [m]

- l - łączna długość analizowanych odcinków toru
 - rozstaw poprzecznych podkładów w torze
 - rozstaw punktów podparć
- l_b - odległość ustawienia macki ugięciomierza od bazy [cm]
- l_{ro} - rozstaw osi w wózkach tramwajów
- l_m - odległość ustawienia macki ugięciomierza za osią zestawu kołowego [mm]
- l_p - długość odcinków toru z przekroczonymi odchyłkami dopuszczalnymi parametru nierówności toru
- M_E - moduł odkształcenia (według starej normy drogowej) [MPa]
- m - liczba serii pomiarów
- m_p - średnia masa pasażera [kg]
- m_t - masa tramwaju [t]
- N - łączna suma pomiarów we wszystkich seriach
- n - liczba pomiarów mierzonej wielkości
 - ogólna liczba pomiarów parametru
 - ogólna liczba analizowanych parametrów
- n_i - liczby pomiarów w poszczególnych seriach
- n_p - liczba pomiarów parametru z przekroczonymi odchyłkami dopuszczalnymi
- P - nacisk koła na szynę [kN]
 - statyczna siła skupiona [kN]
 - nacisk statyczny albo quasistatyczny koła pojazdu szynowego [kN]
- P_{dls} - docisk łapek sprężystych [kN]
- P_i - wartość i -tego nacisku [kN]
- P_{nkt} - maksymalne średnie obciążenie przekładki od nacisku kół taboru [kN]
- P_{max} - obciążenie maksymalne [kN]
- $P_{\bar{s}r}$ - wartość średnia ze wszystkich odnotowanych podczas pomiarów nacisków koła na szynę [kN]
- p - nacisk wywierany na podłoże [MPa]
- Δp - przyrost obciążenia jednostkowego [MPa]
- p_i - waga parametru i
- $q(x)$ - obciążenie statyczne [kN/m]
- $q(P, k)$ - wartość odczytywana z tablic statystycznych
- $r(x)$ - odpór podłoża [kN/m]
- S - średnia ważona z empirycznych odchyłeń standardowych
- $S_{pu D}$ - dolna granica przedziału ufności dla średniej ważonej empirycznych odchyłeń standardowych
- $S_{pu G}$ - górna granica przedziału ufności dla średniej ważonej empirycznych odchyłeń standardowych
- s - empiryczne odchylenie standardowe
- Δs - przyrost odkształcenia
- s_i - odchylenie standardowe parametru i
- $s_{pu D}$ - dolna granica przedziału ufności dla odchylenia standardowego
- $s_{pu G}$ - górna granica przedziału ufności dla odchylenia standardowego
- $t(P, k)$ - wartość odczytywana z tablic statystycznych (rozkład Studenta)
- $t_n(P)$ - wartość krytyczna odczytywana z tablic statystycznych
- U - współczynnik podłoża szyny [MPa]
- U_s - ugięcie sprężyste nawierzchni drogowej [mm]
- u - odległość od osi szyny do końca podkładu poprzecznego
- W - wadliwość
- W_n - wadliwość n -parametrowa [%]

- W_i - wadliwość parametru i
- v - współczynnik zmienności
- $v\%$ - współczynnik zmienności wyrażony procentowo
- $\bar{x}$, x_{sr} - średnia arytmetyczna
- x_{bdD} - dolna granica błędu dużego
- x_{bdG} - górna granica błędu dużego
- x_i - i -ty wynik mierzonej wielkości
 - odległość ustawienia i -tego nacisku od miejsca ugięcia
- x_{puD} - dolna granica przedziału ufności dla wartości średniej
- x_{puG} - górna granica przedziału ufności dla wartości średniej
- y - ugięcie szyny [mm]
 - ugięcie podłoża
 - ugięcie belki
- y_0 - odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza przed odjazdem tramwaju [mm $\times 10^{-2}$]
- y_1 - odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza po odjeździe tramwaju [mm $\times 10^{-2}$]
- y_s - ugięcie skorygowane szyny [mm]
- z_i - zmierzona wartość albo średnia arytmetyczna z serii pomiarów zużycia elementu i
- z_{id} - dopuszczalne zużycie elementu i
- z_w - zgodność względna [%]
- $z(P, k)$ - współczynnik odczytywany z tablic statystycznych
- α - współczynnik ugięcia podkładu poprzecznego
- η - rzędna wykresu linii wpływowej ugięcia
- η_s - współczynnik Zimmermanna dla przekroju podkładu poprzecznego pod szyną
- μ_o - współczynnik Poissona gruntu
- ν - współczynnik Poissona
- ω - współczynnik kształtu płyty sztywnej
- ω_p - połowa powierzchni dolnej podstawy poprzecznego podkładu
- $\omega_{pż}$ - powierzchnia podkładki żebrowej
- ξ - odcięta wykresu linii wpływowej ugięcia

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Większość dużych miast rozwiniętych gospodarczo państw świata stoi obecnie na granicy utraty zdolności funkcjonowania, głównie z powodu problemów transportowych. Z tego względu lokalne społeczności coraz częściej opowiadają się za realizacją polityki zrównoważonego rozwoju, która w zakresie transportu przyznaje priorytet dla komunikacji zbiorowej [94].

Klasyczny tramwaj, w porównaniu z rozwojem sieci metra i SKM, przeżywa obecnie swój wielki renesans. Ten uznawany do niedawna za przestarzały środek komunikacji zbiorowej stał się polem zastosowania najnowocześniejszych technologii zarówno w dziedzinie taboru jak i infrastruktury.

Dzięki wprowadzaniu komunikacji tramwajowej do starówek miast i stref zamieszkania oraz stosowaniu ciągów pieszo-tramwajowych i pasów autobusowo-tramwajowych, nastąpił również powrót do stosowania zabudowanych torowisk tramwajowych.

Konstrukcje torowisk tramwajowych historycznie wywodzą się z rozwiązań kolejowych. W przypadku torowisk wydzielonych z jezdni oraz występujących na ich długości poprzecznych przejazdów drogowych przez torowisko stosuje się najczęściej rozwiązania identyczne jak na kolei. Inaczej jest w przypadku torowisk zabudowanych, gdzie oprócz rozwiązania klasycznego (szyn na poprzecznych podkładach i podsypce) opracowano szereg nowych, niekonwencjonalnych konstrukcji, u których w zakresie podparcia i zamocowania szyny nastąpiło odejście od klasycznego kolejowego rusztu (szyn na poprzecznych podkładach) i zastosowanie rozwiązań zaczerpniętych z innych dziedzin budownictwa (np. fundamenty pod maszyny, mocowanie szyn suwnic) albo też zupełnie nowych, niestosowanych dotąd pomysłów, natomiast w zakresie zabudowy, podbudowy i odwodnienia nastąpiło z kolei upodobnienie się do rozwiązań stosowanych w drogownictwie.

O ile klasyczne konstrukcje toru, udoskonalone i sprawdzone w dużo cięższych warunkach pracy w ruchu kolejowym, nie powodują niespotykanych dotąd problemów w utrzymaniu i eksploatacji, to inaczej bywa w przypadku nowych rozwiązań niekonwencjonalnych, które niekiedy po krótkim okresie eksploatacji ujawniają swoje mankamenty (np. zbyt szybkie zużycie niektórych elementów) albo też nie przynoszą spodziewanych efektów (np. redukcji emisji drgań i hałasu). Wdrażaniu nowych rozwiązań konstrukcji torów tramwajowych powinno więc towarzyszyć przeprowadzanie analiz i badań dotyczących warunków ich pracy.

1.2. Wymagania stawiane konstrukcjom torowisk tramwajowych

Wymagania, jakim muszą sprostać stosowane współcześnie konstrukcje torowisk tramwajowych, stanowią połączenie zagadnień z dziedzin techniki, ekonomii i ochrony środowiska:

1. Nośność - rozumiana jako zdolność przenoszenia obciążeń od taboru tramwajowego oraz ruchu kołowego (dla torowisk wbudowanych w jezdnię) bez powstawania odkształceń trwałych lub uniemożliwiających eksploatację.
2. Trwałość - rozumiana jako długi okres użytkowania, na którą składa się:
 - niezmiennność parametrów geometrycznych (prześwit, przechyłka, wichrowatość, równość toru w planie i profilu),
 - powolne zużywanie się elementów składowych nawierzchni i podtorza (szyn, przytwierdzeń, przekładek, mas podlewowych i zalewowych, podkładów, płyt podtorzowych, podsypki),

- odporność na działanie czynników atmosferycznych (upały, mrozy, opady) i chemicznych (sól, smary, oleje) - szczelność, odwodnienie.
- 3. Niezawodność - rozumiana jako niska awaryjność (skłonność do ulegania uszkodzeń) elementów składowych nawierzchni i podtorza.
- 4. Niski koszt oraz łatwość utrzymania, napraw i budowy (mechanizacja, prefabrykacja).
- 5. Przyjazność dla środowiska:
 - estetyczny wygląd współgrający z otoczeniem,
 - tłumienie drgań i hałasu,
 - krótki i mało uciążliwy cykl budowy i napraw,
 - zastosowanie wyłącznie materiałów podlegających utylizacji.

1.3. Diagnostyka torowisk tramwajowych

W wyniku prowadzonej eksploatacji pierwotny stan techniczny torowisk tramwajowych ulega po pewnym okresie naturalnej degradacji, objawiającej się pogorszeniem stanu torów. Umiejętność określenia wielkości deformacji geometrycznych toru oraz zużycia i uszkodzeń jego składowych elementów konstrukcyjnych staje się podstawą do podejmowania decyzji o dalszej eksploatacji torowisk tramwajowych (zmniejszenie prędkości, ograniczenie lub wstrzymanie ruchu) oraz ich utrzymaniu (zakres i terminy napraw oraz modernizacji).

Diagnostyka nawierzchni szynowej rozumiana jest jako całokształt metod i środków służących do określenia jej stanu w dowolnej chwili czasu [2]. Badania diagnostyczne obejmują pomiary i przeglądy. Możemy wyróżnić dwa zasadnicze kierunki ocen stanu toru:

- ocena stanu geometrii toru (nierówności),
- ocena stanu konstrukcji toru (zużycie lub uszkodzenia poszczególnych elementów składowych).

W zakresie oceny stanu geometrii toru przeprowadza się najczęściej analizy następujących sześciu podstawowych parametrów - trzech w poziomie:

1. szerokości toru,
2. gradientu szerokości toru,
3. nierówności poziomych toków szynowych,

i trzech w pionie:

4. przechyłki toru,
5. wichrowatości toru,
6. nierówności pionowych toków szynowych.

Nierówności poziome i pionowe toków szynowych mierzy się względnie - w odniesieniu do lokalnych zmian na długości ustalonej bazy pomiarowej oraz bezwzględnie - w stosunku do położenia wynikającego z projektu.

Pomiary parametrów mogą być realizowane na dwa sposoby:

- bezpośrednio - w formie pomiarów punktowych przeprowadzanych ręcznie przenośnym sprzętem pomiarowym (toromierz, strzałkomierz, niwelator, teodolit),
- pośrednio - w formie pomiarów ciągłych przeprowadzanych automatycznie przy użyciu toromierzy samorejestrujących albo drezyn pomiarowych.

Obecnie dąży się do tego aby jak najwięcej danych pozyskiwać według drugiego sposobu, ze względu na znaczne uproszczenie procesu pomiaru, automatyczne rejestrowanie wielkości pomocniczych (np. przebytej drogi, a dla drezyn również prędkości i przyspieszeń) oraz możliwość komputerowego przetwarzania danych, aż do uzyskania gotowych wyników analiz.

W zakresie oceny stanu konstrukcji toru przeprowadza się analizy stopnia zużycia lub uszkodzenia poszczególnych elementów składowych nawierzchni. W tym wypadku tylko niektóre parametry dotyczące zużycia dają się określić w procesie pomiarów (np. zużycie szyn: pionowe, boczne oraz faliste) i to wyłącznie bezpośrednich (przy pomocy profilomierzy, szczelinomierzy, suwmiarek). Pozostałe parametry wymagają formy opisowej i dają się określić jedynie w procesie przeglądów.

Analizę wyników badań w diagnostyce nawierzchni szynowych przeprowadza się najczęściej według następujących dwóch metod:

1. bezpośredniej - w postaci analizy progowej,
2. pośredniej (syntetycznej) - z zastosowaniem mierników stanu toru.

Pierwsza metoda polega na porównywaniu uzyskanych z badań diagnostycznych parametrów z ich dopuszczalnymi wartościami określonymi w obowiązujących przepisach. Jest ona najczęściej stosowana w przypadku podejmowania decyzji o wprowadzeniu ograniczeń albo wykluczeniu analizowanego odcinka toru z dalszej eksploatacji. Druga metoda polega na wykorzystaniu wartości parametrów uzyskanych z badań diagnostycznych do wyznaczenia określonych w obowiązujących przepisach syntetycznych mierników stanu toru. Jest ona najczęściej stosowana w przypadku podejmowania decyzji o terminach i zakresie robót utrzymaniowych dotyczących analizowanego fragmentu sieci torów.

Stosowane jest również połączenie dwóch opisywanych metod analizy wyników badań diagnostycznych - w postaci analizy progowej odniesionej do wyliczonych wartości syntetycznych mierników stanu torów.

Określenie mierników stanu geometrii toru wymaga obliczenia wartości średnich, odchyłeń standardowych i wadliwości dla pomierzonych w trakcie badań diagnostycznych parametrów nierówności toru. Wadliwość jest wielkością opisującą na jakiej (procentowo) części analizowanego odcinka toru występuje przekroczenie wartości dopuszczalnych dla pomierzonego parametru nierówności toru. Jest ona wyliczana według jednego z następujących dwóch wzorów:

$$W = \frac{n_p}{n} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$W = \frac{l_p}{l} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: n_p - liczba pomiarów parametru nierówności toru z przekroczonymi odchyłkami dopuszczalnymi
 n - ogólna liczba pomiarów parametru nierówności toru
 l_p - długość odcinków toru z przekroczonymi odchyłkami dopuszczalnymi parametru nierówności toru
 l - łączna długość analizowanych odcinków toru

W diagnostyce nawierzchni szynowych najczęściej stosuje się następujące dwa syntetyczne mierniki stanu geometrii toru:

- a) wskaźnik nierówności n-parametrowej toru - średnia ważona z odchyłeń standardowych pomierzonych n parametrów nierówności geometrycznych toru, wyliczana według następującego wzoru:

$$J_n = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot s_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3)$$

gdzie: J_n - wskaźnik nierówności n -parametrowej toru
 n - liczba analizowanych parametrów nierówności toru
 p_i - waga parametru i nierówności toru
 s_i - odchylenie standardowe parametru i nierówności toru

b) wadliwość n -parametrowa toru - wyliczana na podstawie wartości wadliwości dla pomierzonych n parametrów nierówności geometrycznych toru, według następującego wzoru:

$$W_n = 100\% - \prod_{i=1}^n (100\% - W_i) \quad (4)$$

gdzie: W_n - wadliwość n -parametrowa toru [%]
 n - liczba analizowanych parametrów nierówności toru
 W_i - wadliwość parametru i nierówności toru, według wzorów (1) albo (2)

Wskaźnik nierówności toru opisuje liczbowo wielkość zróżnicowania analizowanych parametrów geometrycznych na długości toru, stanowi więc miarę komfortu jazdy. Im mniejszą osiąga on wartość, tym "równiejszy", a co za tym idzie w lepszym stanie jest tor. Często w analizach poszczególnym przedziałom wartości wskaźnika nierówności toru przypisuje się skalę ocen od niedostatecznej do bardzo dobrej [10,126].

Wadliwość jest miarą jakości utrzymania torów. Im mniejsza jest jej wartość, tym lepszy jest stan utrzymania toru. W literaturze przyjmuje się, że tor o wadliwości na poziomie 30% - 40% zapewnia z reguły dobrą spokojność jazdy, dlatego wartość tę traktuje się najczęściej jako próg wadliwości.

W analizach badań diagnostycznych wskaźnik nierówności toru oraz wadliwość są najczęściej stosowane łącznie, gdyż każde z nich posiada wady wykluczające pojedyncze ich zastosowanie do efektywnej oceny wyników badań. Wadą wskaźnika nierówności toru jest brak poziomu odniesienia, na przykład dla toru prostego (nie wymagającego przechyłki) odcinek o przechyłce spowodowanej zużyciem nie przekraczającej 10 mm (czyli ± 10 mm) uzyska taki sam wynik oceny jak odcinek o przechyłce jednostronnej w granicach od 10 do 30 mm, z kolei w przypadku analizy odcinka toru zawierającego przejście z prostej w łuk, zróżnicowanie wartości parametrów takich jak przechyłka i nierówności poziome dla prostej i łuku będzie sztucznie zawyżało wartość wskaźnika nierówności toru. Niedoskonałością wadliwości jest natomiast brak uwzględnienia wartości przekroczenia dopuszczalnych granic, na przykład ten sam wpływ na ocenę będzie miało przekroczenie wartości dopuszczalnych o 5% jak i o 100% analizowanego parametru.

Określenie mierników stanu konstrukcji toru jest bardziej złożone, niż mierników stanu geometrii toru, gdyż wielkości charakteryzujące stan konstrukcji z reguły nie są mierzalne w sposób ciągły, a przez to ich pozyskiwanie w postaci wyników pomiaru, a następnie automatyczne przetwarzanie jest skomplikowane.

Najczęściej stosuje się stopnie (wskaźniki) degradacji toru G - jako średnie arytmetyczne lub ważone ze stopni (wskaźników) degradacji G_i poszczególnych elementów

składowych toru, które z kolei określa się w sposób opisowy lub w oparciu o zróżnicowane, niekiedy dość skomplikowane wzory bazujące na pomiarach zużycia tych elementów lub liczby stwierdzonych wad (uszkodzeń). Wartość wskaźnika degradacji podobnie jak wadliwość określa się procentowo albo liczbą z przedziału od 0 do 1. Im mniejsza wartość wskaźnika, tym w lepszym stanie jest tor.

W niektórych przypadkach określania degradacji w oparciu o pomiary zużycia (np.: zużycie boczne lub faliste szyny), do wyznaczenia stopnia degradacji elementu składowego toru stosuje się prostą zależność, według następującego wzoru:

$$G_i = \frac{z_i}{z_{id}} \quad (5)$$

gdzie: G_i - stopień degradacji elementu i składowego toru

z_i - zmierzona wartość albo średnia arytmetyczna z serii pomiarów zużycia elementu i składowego toru

z_{id} - dopuszczalne zużycie elementu i składowego toru

Ze względu na odmienność konstrukcyjną jako osobne zagadnienie traktowana jest diagnostyka **podtorza**, obejmująca swoim zakresem:

- wnioskowanie na podstawie nierówności geometrii nawierzchni toru,
- obserwacje odkształceń ław torowiska, skarp nasypów i przekopów, elementów odwodnienia (korytka, studzienki, przepusty),
- obserwacje funkcjonowania urządzeń odwadniających,
- obserwacje wychłap i zawilgoceń,
- badania laboratoryjne oraz polowe gruntów podłoża (ocena makroskopowa, sondowania, pomiary modułu odkształcenia, pomiary georadarowe [66]).

Najczęściej stosowane badania diagnostyczne, przeprowadzane po pewnym okresie eksploatacji, określa się mianem diagnostyki **eksploatacyjnej**. Istnieją jednak pewne szczególne przypadki badań diagnostycznych:

- diagnostyka **powykonawcza**, której celem jest kontrola zgodności parametrów toru z projektem, ocena jakości robót budowlanych oraz dopuszczenie toru do ruchu, charakteryzuje się szerszym niż w diagnostyce eksploatacyjnej zakresem badań oraz mniejszymi wartościami odchyłek dopuszczalnych,
- diagnostyka **przedmodernizacyjna**, której celem jest potwierdzenie potrzeby oraz określenie rodzaju i zakresu planowanych robót modernizacyjnych,
- diagnostyka **powypadkowa**, której celem jest stwierdzenie przyczyny wykołowania oraz skutków w stosunku do konstrukcji toru.

Podstawowym aktem prawnym regulującym formę i zakres diagnostyki w zakresie torowisk tramwajowych są wytyczne techniczne [136] z roku 1983. W rozdziale IV dotyczącym utrzymania torów tramwajowych precyzują one rodzaje, zakres oraz terminy przeglądów dokonywanych w terenie.

Przeglądy **bieżące** przeprowadzane są drogą codziennych oględzin. Ich zadaniem jest wykrywanie:

- lokalnych odkształceń torów (np.: zapadnięcia, wysadziny, wyboczenia),
- uszkodzeń elementów składowych toru (np.: pęknięte szyny, uszkodzone łapki)
- usterek torów (np.: niedokręcone śruby, niesprawność pracy zwrotnic i urządzeń odwadniających).

Wszystkie odcinki torów powinny być kontrolowane przynajmniej raz w ciągu miesiąca. W przypadkach wątpliwych przeprowadza się niezbędne pomiary uzupełniające

(geometrii, zużycia). Wyniki przeglądów bieżących wpisywane są do dzienników przeglądów torów.

Przeglądy **okresowe** przeprowadzane są w formie oględzin i pomiarów. Ich zadaniem jest określenie:

- rodzaju i wielkości odkształceń torów: szerokości, nierówności pionowych, kierunku i prawidłowości krzywizn (wzrokowo !), przechyłek na łukach,
- stanu technicznego i stopnia zużycia elementów składowych toru: szyn (pionowe, boczne, faliste), przytwierdzeń, podkładów, podbudowy, podsypki, nawierzchni drogowej, urządzeń odwodnienia, rozjazdów,

w stosunku do norm dopuszczalnego zużycia eksploatacyjnego, w celu zakwalifikowania poszczególnych odcinków toru do naprawy średniej lub głównej. Przeglądami okresowymi powinna być objęta cała sieć torów tramwajowych, raz w ciągu roku. Wyniki przeglądów są opracowywane w terminie do 30 kwietnia i nanoszone na karty przeglądu stanu technicznego torów.

Przeglądy **specjalne** należy przeprowadzać również raz w roku, po zakończeniu przeglądów okresowych, w formie komisyjnej. Ich celem jest ostateczne stwierdzenie potrzeby, rodzaju, zakresu oraz terminu naprawy odcinków zgłoszonych do programu napraw średnich i głównych. Przeglądy specjalne mieszczą się więc w zakresie diagnostyki przedmodernizacyjnej.

Wytyczne techniczne [136] w załączniku nr 1 precyzują wartości dopuszczalnego zużycia eksploatacyjnego torów tramwajowych. Określone wartości progowe dotyczą następujących parametrów diagnostycznych:

- szerokości toru,
- zużycia pionowego i bocznego oraz uszkodzeń główki szyny,
- zużycia rozjazdów,
- przechyłki w torze prostym,
- wichrowatości,
- odchyłen od wymaganej przechyłki w łuku,
- nieliniowości powierzchni tocznej szyn w stykach,
- odkształceń nawierzchni drogowej w strefie przyszynowej.

Wytyczne techniczne [136] w rozdziale III dotyczącym budowy torów tramwajowych precyzują wartości dopuszczalnych odchyłek dla torów nowobudowanych lub remontowanych. Informacje te są w pełniejszej i bardziej aktualnej formie zebrane w innym dokumencie - normie polskiej [101] z roku 1998 dotyczącej wymagań i badań stosowanych przy odbiorze torowisk tramwajowych poddawanych naprawom głównym oraz modernizowanych i nowobudowanych.

Zagadnienia te mieszczą się w zakresie diagnostyki powykonawczej. Zakres analizowanych w tym przypadku parametrów geometrycznych jest znacznie szerszy, a odchyłki dopuszczalne - mniejsze niż przy diagnostyce eksploatacyjnej. Nie analizuje się parametrów takich jak zużycie czy uszkodzenia, w zamian za to kontroluje się cechy materiałowe elementów składowych toru (np. dla szyn, podkładów, podsypki - zgodność z innymi dokumentami normatywnymi, precyzującymi ich minimalne wymagania; dla podsypki i podłoża - wskaźnik zagęszczenia). Ogólny zakres badań jest również szerszy - obejmuje kontrolę podtorza oraz ugięć nawierzchni.

Część badań i pomiarów musi być przeprowadzana w trakcie remontu lub budowy, gdyż dotyczy elementów ulegających zakryciu (odbioru częściowe).

Zakres badań przy odbiorach obejmuje sprawdzenie:

- materiałów,
- osi trasy i niwelety,
- podtorza,

- urządzeń odwadniających,
- podsypki,
- podbudowy toru,
- nawierzchni stalowej toru,
- ochrony przed prądami błądzącymi,
- przyrządów wyrównawczych,
- montażu rozjazdów tramwajowych,
- nawierzchni torowiska,
- obrzeży betonowych,
- wypełnienia torowiska,
- wysepek przystankowych.

Trzecim dokumentem normatywnym, zawierającym regulacje z zakresu diagnostyki torów tramwajowych jest norma polska [100] z 1998 roku, dotycząca skrajni budowli. W punkcie dotyczącym wymagań ogólnych podane są maksymalne wartości niektórych parametrów opisujących deformacje toru tramwajowego:

- przesunięcie toru w poprzek,
- nierównomierność zużycia boków szyn,
- zygzakowatość toru,
- wielokątność łuku,
- zapadnięcia toru oraz zużycie pionowe główek szyn,
- wichrowatość.

Niestety wartości te nie są w pełni zbieżne z odchyłkami dopuszczalnymi podanymi w dwu poprzednich dokumentach normatywnych, a ponadto niektóre parametry (wielokątność i wichrowatość) nie są jednoznacznie sprecyzowane i mogą być różnie interpretowane [96].

W dokumentach normatywnych brak jest informacji o diagnostyce powypadkowej. W praktyce jednak, jest ona realizowana. Ilekroć istnieje podejrzenie, iż przyczyną wykolejenia mógł być zły stan toru, przeprowadzane są odpowiednie badania, a ich wyniki są zapisywane w książce wykolejeń.

Obecnie obowiązujące akty prawne regulujące formę i zakres diagnostyki w zakresie torowisk tramwajowych posiadają szereg wad:

- znajdują się w nich archaiczne zapisy (np.: o wzrokowym sposobie określania kierunku torów [136], prawidłowości krzywizn oraz ugięć nawierzchni [101]),
- występują pomiędzy nimi rozbieżności (wartości odchyłek dopuszczalnych, definicji parametrów diagnostycznych),
- pozyskiwanie danych diagnostycznych opierają głównie na pomiarach punktowych (przeprowadzanych ręcznie, przenośnym sprzętem pomiarowym), pomijając stosowane obecnie powszechnie na kolei ciągłe metody pomiarów oparte na zastosowaniu toromierzy samorejestrujących i drezyn pomiarowych,
- opracowanie wyników badań diagnostycznych opierają jedynie o analizę progową, pomijając stosowane obecnie powszechnie na kolei metody oparte na syntetycznych miernikach stanu torów.

Wytyczne techniczne [136] opracowane zostały w roku 1983 z wykorzystaniem postanowień zawartych w ówczesnie obowiązujących przepisach kolejowych. Jednakże ze względu na odmienność charakteru i struktury ruchu kolejowego i tramwajowego, już wtedy nie wszystkie zasady stosowane w diagnostyce torów kolejowych były w pełni przydatne do zastosowania w przypadku torów tramwajowych. Ponadto w okresie ostatnich 20 lat zmienił się sposób rozwiązywania wielu problemów technicznych w kolejnictwie, dlatego nowelizacji uległa znaczna część przepisów kolejowych [26, 27, 28, 29, 109], niektórych nawet kilkakrotnie.

Normy polskie [100] i [101] znowelizowane w roku 1998 wydają się być "młode" lecz jest to tylko pozorny efekt, gdyż ich nowelizacja wymuszona została postanowieniami ustawy o normalizacji, w myśl których wszystkie normy branżowe zastąpiono polskimi. Nowelizacje te niestety przeprowadzono z powieleniem niewłaściwych lub nieaktualnych sformułowań zawartych w ich poprzednich wersjach [24].

Istnieje zatem pilna potrzeba nowelizacji przepisów normujących zasady diagnostyki torów tramwajowych, obecnie bardzo często podnoszona [24, 79, 92, 96, 114], gdyż obowiązujące przepisy nie są dostosowane do nowych rozwiązań konstrukcyjnych i metod technologii robót nawierzchniowych stosowanych obecnie w torowiskach tramwajowych oraz możliwości współczesnych metod pomiarowych.

W praktyce diagnostyki torowisk tramwajowych dokonał się jednak postęp. Okazał się on możliwy głównie dzięki adaptacji metod badań oraz sposobów opracowania ich wyników stosowanych na kolei [26, 29]. Poniżej wymieniono wybrane przykłady przedsięwzięć diagnostycznych dotyczących torowisk tramwajowych, wybiegających w przód poza obecnie obowiązujące uregulowania prawne:

1. Ocena stanu torów tramwajowych w ul. Powstańców Śl. we Wrocławiu - SITK Oddział Wrocław, 1995 r. [35]
2. Ocena stanu torów tramwajowych w ul. Głogowskiej w Poznaniu - Zakład Dróg Kolejowych Politechniki Poznańskiej, 1997 r. [114]
3. Kompleksowa ocena stanu torów tramwajowych Zakładu Komunikacji Miejskiej w Gdańsku - Katedra Inżynierii Kolejowej Politechniki Gdańskiej, 2000 r. [79]
4. Wdrażanie komputerowego systemu wspomagania decyzji utrzymania torów tramwajowych "Tramtor" - Zakład torowo-budowlany Tramwaje Warszawskie, 2000 r. [92].

W przypadku przedsięwzięć 2, 3 i 4 do opracowania wyników badań diagnostycznych wykorzystano syntetyczne mierniki oceny stanu torów identyczne jak na kolei (Gdańsk) lub ich drobne modyfikacje (Poznań i Warszawa).

W przypadku przedsięwzięć z Poznania i Warszawy do opracowania wyników badań diagnostycznych zastosowano oprogramowanie komputerowe o podobnych cechach jak stosowane na kolei komputerowe systemy eksperckie [8, 10, 31].

W przypadku przedsięwzięć z Wrocławia, Gdańska i Warszawy dane diagnostyczne pozyskano tak jak na kolei metodą pomiarów ciągłych, a nie punktowych. Jedyną różnicą w stosunku do kolei, gdzie dzięki zarządzaniu infrastrukturą przez jeden podmiot w skali całego kraju opłacalne jest stosowanie drezyn pomiarowych, w przypadku komunikacji tramwajowej, zarządzanej w każdym z ośrodków z osobna, bardziej ekonomiczne okazało stosowanie toromierzy samorejestrujących.

Do niedawna problemem był brak na rynku krajowym toromierza samorejestrującego przystosowanego do szyn rowkowych stosowanych w torowiskach zabudowanych, dlatego przedsięwzięcia z Wrocławia i Gdańska nie obejmowały torowisk zabudowanych. Obecnie toromierz taki jest już dostępny, a jednym z pierwszych jego użytkowników jest Zarząd Dróg i Komunikacji we Wrocławiu.

Adaptacja metod badań oraz sposobów opracowania ich wyników stosowanych na kolei do potrzeb diagnostyki torów tramwajowych wymaga pewnych zmian. Jednym z problemów w przypadku stosowania pomiarów ciągłych jest właściwy dobór długości odcinka bazowego do wyznaczenia pochodnych parametrów geometrycznych, a w przypadku stosowania pomiarów punktowych - właściwej odległości pomiędzy przekrojami pomiarowymi. Z uwagi na występowanie w torach tramwajowych krótkich łuków o małych promieniach należy przyjmować mniejsze wartości długości odcinków bazowych oraz odległości pomiędzy przekrojami pomiarowymi, niż w przypadku diagnostyki torów kolejowych. W przeciwnym razie występujące w torze tramwajowym

krzywizny i przechyłki wynikające z projektu mogą być identyfikowane jako nierówności eksploatacyjne toru. Podobnym problemem, jest właściwy dobór długości elementarnego odcinka toru z jakiego wyliczany jest syntetyczny wskaźnik jego jakości. Tu również z uwagi na znacznie częstsze zmiany typów oraz wieku nawierzchni na długości torów tramwajowych należy przyjmować mniejsze wartości długości odcinków elementarnych, niż w przypadku diagnostyki torów kolejowych.

1.4. Ocena nośności torowisk tramwajowych i nawierzchni drogowych

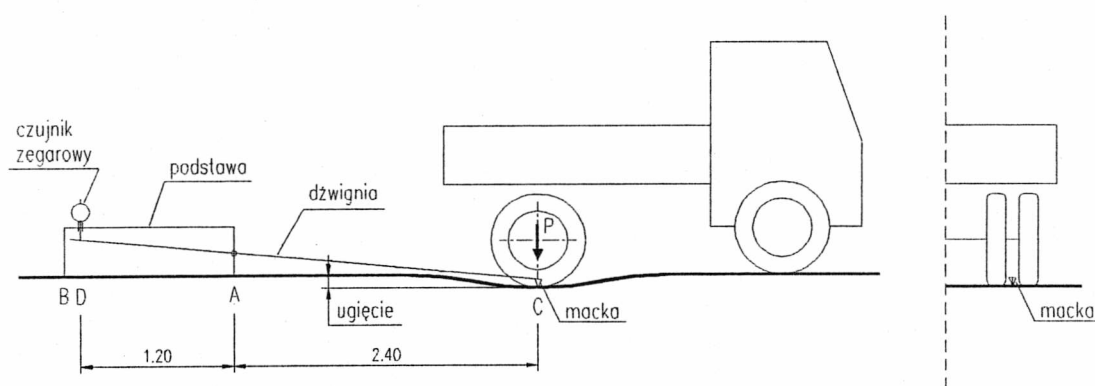
Jednym z wymagań stawianych konstrukcjom torowisk tramwajowych jest ich nośność, rozumiana jako zdolność przenoszenia obciążeń od taboru bez powstawania nadmiernych odkształceń.

Dotychczas nie opracowano jednak metody oceny nośności torowisk tramwajowych. Szukając w przepisach i normach uzasadnienia dla przeprowadzania badań nośności natrafiamy na rozbieżności:

- w wytycznych z roku 1983 [136] czytamy: "szyna właściwie podlana, podbita lub ułożona ... nie powinna wykazywać ruchów pionowych pod obciążeniem pochodzącym od przejeżdżającego taboru tramwajowego",
- w normie branżowej z roku 1991 [17] czytamy: "badanie stalowej nawierzchni toru tramwajowego polega na sprawdzeniu ... podkładów, ... płyt i ram żelbetowych przez przeprowadzenie próbnej jazdy wagonem o pełnym obciążeniu i sprawdzeniu nie uzbrojonym okiem lub odpowiednim przyrządem mierniczym, czy nie wykazują ruchów pionowych",
- w normie polskiej z roku 1998 [101] czytamy: "nawierzchnię stalową toru sprawdza się ... przeprowadzając próbne jazdy wagonem z pełnym obciążeniem i obserwując nie uzbrojonym okiem lub mierząc odpowiednim przyrządem mierniczym ruch pionowy elementów podbudowy".

Analizując zmiany dokonujące się w przepisach i normach zauważamy, że zmierzają one w słusznym kierunku, nie doprowadzają jednak do jednoznacznego sprecyzowania sposobu badania i oceny nośności torowisk tramwajowych, jakim mogłoby być określenie optymalnych wartości ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwajowych oraz ich dopuszczalnego zróżnicowania.

W drogownictwie do oceny nośności nawierzchni podatnych stosuje się między innymi metodę pomiaru ugięć nawierzchni za pomocą ugięciomierza belkowego (belki Benkelmanna) pod statycznym naciskiem samochodowego koła bliźniaczego o wartości 50 kN [16]. Budowę i zasadę działania ugięciomierza przedstawiono na rys.1.



Rys.1 Pomiar ugięcia nawierzchni drogowej ugięciomierzem belkowym

Pomiar polega na ustawieniu belki za samochodem ciężarowym, tak aby jej macka znalazła się w środku między bliźniaczymi kołami samochodu, dokładnie pod tylną osią. Po odnotowaniu odczytu na czujniku zegarowym samochód odjeżdża do przodu. W wyniku odciążenia nawierzchnia podnosi się do góry o wartość ugięcia sprężystego. Po ustaniu podnoszenia się nawierzchni przeprowadza się drugi odczyt na czujniku zegarowym. Ramię AC ugięciomierza jest dwa razy dłuższe niż AD, dlatego wartość ugięcia wylicza się mnożąc przez dwa różnicę odnotowanych odczytów, według wzoru:

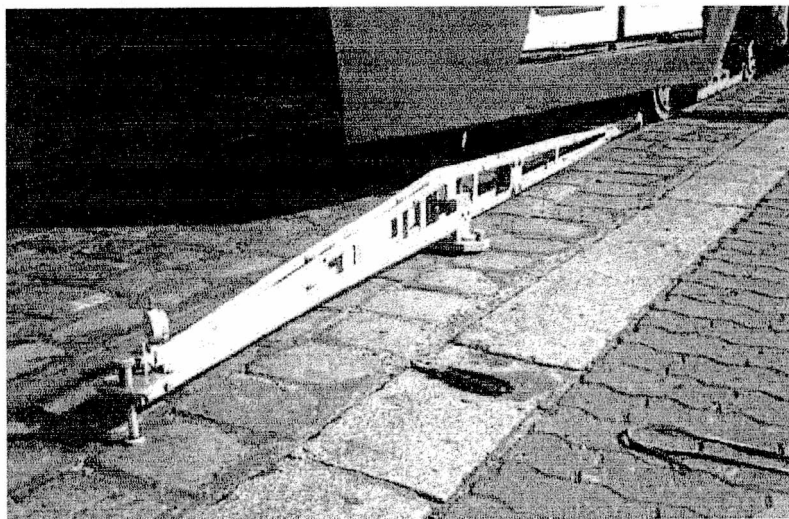
$$U_s = 2 \cdot (C_0 - C) \quad (6)$$

gdzie: U_s - ugięcie sprężyste nawierzchni drogowej [mm]
 C_0 - pierwszy odczyt na czujniku (nawierzchnia obciążona) [mm]
 C - drugi odczyt na czujniku (nawierzchnia odciążona) [mm]

Opisany sposób jest pierwszym - najprostszym wariantem pomiaru, pozwalającym jedynie na określenie wartości ugięcia sprężystego. W wariacie drugim należy dokonywać odczyty na czujniku podczas odjeżdżania samochodu w równych odstępach, co pozwala dodatkowo na określenie kształtu linii wpływowej ugięcia sprężystego w punkcie pomiaru. Wariant trzeci polega na ustawieniu macki ugięciomierza w punkcie nieobciążonym, wykonaniu odczytu, najeżdżaniu kołem samochodu w stronę punktu pomiaru z wykonywaniem odczytów w równych odstępach, a po najechaniu kołem na punkt pomiaru i wykonaniu odczytu odjeżdżaniu kołem samochodu poza punkt pomiaru, również z wykonywaniem odczytów w równych odstępach. Wariant ten pozwala na określenie wartości ugięcia sprężystego oraz całkowitego, a także kształtu linii wpływowej obu tych ugięć.

Nośność podatnych nawierzchni drogowych ocenia się porównując ugięcie miarodajne obliczone na podstawie zmierzonych ugięć z wartościami dopuszczalnymi albo wzorcowymi dla danego typu konstrukcji nawierzchni i rodzaju ruchu [52, 54, 74, 108, 121].

W przypadku zabudowanych torowisk tramwajowych istnieje możliwość zastosowania ugięciomierza belkowego i opisaną powyżej metodę pomiaru z drobnymi modyfikacjami, do wykonania pomiarów ugięć szyny za odjeżdżającym tramwajem (rys.2).



Rys.2 Pomiar ugięcia szyny tramwajowej ugięciomierzem belkowym

2. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY

2.1. Cel pracy

Celem pracy jest stworzenie podstaw naukowych do opracowania diagnostycznej metody oceny konstrukcji zabudowanych torowisk tramwajowych z punktu widzenia ich nośności, na podstawie analizy ugięć szyn obciążonych taborem w warunkach rzeczywistych, dzięki adaptacji metody pomiaru ugięć nawierzchni drogowej ugięciomierzem belkowym do pomiarów ugięć szyny tramwajowej pod statycznym naciskiem kół tramwajowych w torowiskach zabudowanych.

2.2. Zakres pracy

Opisany powyżej cel pracy wyznacza następujący jej zakres:

- w rozdziale 3 dokonano przeglądu zabudowanych konstrukcji torowisk tramwajowych, z rozróżnieniem na rozwiązania stosowane we Wrocławiu, w innych miastach Polski oraz poza granicami naszego kraju,
- w rozdziale 4 przedstawiono analizę zagadnienia ugięć szyny w torowiskach tramwajowych w ujęciu teoretycznym i empirycznym, dokonując przeglądu metod i modeli obliczeń nawierzchni szynowych oraz koncentrując się na problemie sztywności nawierzchni szynowej,
- rozdział 5 zawiera opis i analizę wyników badań terenowych pomiarów ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwajowych, przeprowadzonych przy użyciu ugięciomierza belkowego, dla pięciu obecnie najczęściej stosowanych we Wrocławiu typów zabudowanych torowisk tramwajowych,
- w rozdziale 6 przeprowadzono obliczenia teoretycznych wartości ugięć szyny dla przebadanych wcześniej typów torowisk tramwajowych,
- w rozdziale 7 dokonano analizy porównawczej wyników badań terenowych i obliczeń teoretycznych,
- w rozdziale 8 dokonano podsumowania całości pracy, przedstawiono wnioski zawierające między innymi udowodnienie przyjętej tezy,
- w rozdziale 9 wskazano na kierunki i możliwości prowadzenia dalszych badań.

2.3. Teza pracy

Sformułowano następującą tezę pracy:

Analiza ugięć szyn pod statycznym naciskiem kół tramwajowych stanowi właściwą podstawę do opracowania diagnostycznej metody oceny konstrukcji zabudowanych torowisk tramwajowych z punktu widzenia ich nośności.

3. PRZEGLĄD KONSTRUKCJI TOROWISK TRAMWAJOWYCH ZABUDOWANYCH

Konstrukcje torowisk tramwajowych typu zabudowanego przeanalizowano w niniejszym rozdziale z uwzględnieniem następujących dwu aspektów:

- okresu zastosowania (dla rozwiązań zrealizowanych w kraju),
- celu wykonania zabudowy,

które w znacznym stopniu decydują o typie zastosowanej konstrukcji.

W miastach polskich posiadających trakcję tramwajową, do końca lat 80-tych działalnością naprawczą i utrzymaniową w zakresie torowisk tramwajowych zajmowały się miejskie przedsiębiorstwa komunikacji, głównie przy pomocy własnych zakładów torowych. Stosowały one wypracowane przez siebie i sprawdzone rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne, zaspokajając występujące potrzeby remontowe. Praktycznie każde z miast posiadało "własną" optymalną konstrukcję tramwajowego toru zabudowanego. Przedsiębiorstwa komunikacji w tej dziedzinie zdane były na własne siły, gdyż w kraju żadna jednostka naukowo-badawcza nie zajmowała się tą problematyką w sposób kompleksowy.

U schyłku lat 80-tych zakres środków przeznaczanych na remonty torów z roku na rok ulegał ograniczeniu, w efekcie czego proces dekapitalizacji torowisk tramwajowych w większości miast polskich prześcignął tempo dokonywanych remontów. Pojawiła się pilna potrzeba opracowania i rozpoczęcia stosowania nowych, trwalszych rozwiązań. W poprzednim systemie gospodarczym jednostki zajmujące się naprawą i utrzymaniem infrastruktury tramwajowej nie były jednak zainteresowane wprowadzaniem nowych technologii. Zgodnie z obowiązującym wtedy sposobem myślenia zwiększenie trwałości wykonywanych przez siebie remontów oznaczało ograniczanie popytu na swe usługi, co wiązało się z pomniejszeniem swej roli w procesie gospodarczym. Klimat ustrojowy sprzyjał więc wykorzystaniu wyłącznie tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych, technologii i materiałów.

Sytuacja ta uległa diametralnej zmianie w latach 90-tych, kiedy to w naszym kraju rozpoczęto wprowadzanie reformy ustrojowej, powodującej zmiany w modelu zarządzania komunikacją zbiorową. Ustawa "O samorządzie terytorialnym" z 1990 roku przeniosła zadania organizowania lokalnej komunikacji zbiorowej z władz centralnych (województwo) na samorząd terytorialny (gminy). Ustawa "O zamówieniach publicznych" z 1995 roku nałożyła na jednostki zarządzające infrastrukturą komunikacji tramwajowej obowiązek rozstrzygania wyboru projektanta i wykonawcy robót na zasadzie przetargu. Pojawiły się nowe cele nie brane dotąd pod uwagę, a istotne w gospodarce rynkowej oraz w demokratycznie rządzonym społeczeństwie:

- zwiększenie trwałości torowisk (racjonalne wydatkowanie gminnych pieniędzy),
- ochrona przed prądami błędzącymi (odszkodowania dla innych firm za niszczenie infrastruktury podziemnej),
- ograniczenie emisji drgań i hałasu (ekologia, naciski samorządu),
- skrócenie cyklu budowy ze względu na uciążliwość (ekologia, naciski samorządu),
- estetyka wyglądu ulic (nacisk konserwatorów miejskich i architektów na stosowanie zabudowanych, bezpodsypekowych torowisk),
- oszczędności w zużyciu drewna (ekologia).

Dzięki wprowadzeniu zasad konkurencji nastąpiło podniesienie jakości świadczonych usług zarówno w projektowaniu jak i w wykonawstwie. Wprowadzenie gospodarki rynkowej zbliżyło cenowo nasze realia do realiów rozwiniętych państw, zagraniczne technologie stały się osiągalne na krajowym rynku. Nastąpił wzrost aktywności

producentów z branży torowisk tramwajowych, zainteresowanych promocją i sprzedażą swych produktów i rozwiązań.

W efekcie tych przeobrażeń, w stosunku do często tylko jednego - tradycyjnego typu konstrukcji toru zabudowanego stosowanego w każdym z miast polskich przed początkiem lat 90-tych, po tym okresie nastąpiło rozpowszechnienie się wielu nowatorskich rozwiązań konstrukcji torów tramwajowych zabudowanych [77]. Proces ten jest szczególnie zauważalny w przypadku Wrocławia [75], gdzie wśród obecnie eksploatowanych typów torowisk zabudowanych możemy wyróżnić ponad 10 zupełnie odmiennych rozwiązań.

Ze względu na drugi z wymienionych aspektów przeprowadzanej analizy zabudowę torowisk tramwajowych stosuje się:

- dla umożliwienia ruchu innych pojazdów albo pieszych po torowisku w kierunku podłużnym albo poprzecznym,
- ze względów estetycznych (współgranie z otoczeniem), ekologicznych (wyciszenie), użytkowych (ułatwienie procesu utrzymania czystości) oraz bezpieczeństwa (przykrycie tłucznia).

W świetle tak zdefiniowanych celów wykonania zabudowy torów możemy wyróżnić:

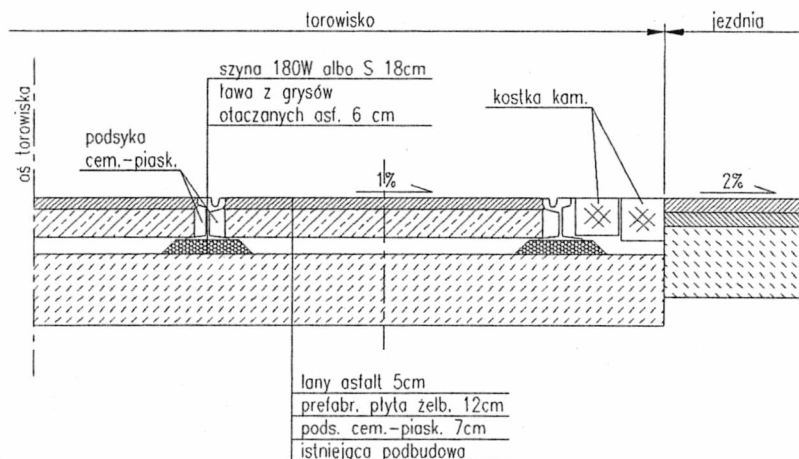
- torowiska wbudowane w jezdnie ulic albo stanowiące integralne jezdnie (wyłącznie dla ruchu pojazdów komunikacji zbiorowej),
- torowiska ciągów pieszo-tramwajowych,
- torowiska na poprzecznych przejazdach lub przejściach,
- torowiska wydzielone z ruchu innych pojazdów i pieszych lecz zabudowane konstrukcyjnie (obszary zabytkowej zabudowy, tory przy budynkach, parkach, przystankach, obiektach sportowych).

Przegląd konstrukcji tramwajowych torowisk zabudowanych przeprowadzono w niniejszym rozdziale z rozróżnieniem na rozwiązania stosowane we Wrocławiu, w innych miastach Polski oraz poza granicami naszego kraju, przy czym w dwu ostatnich przypadkach wzięto pod uwagę jedynie te typy konstrukcji, które jak dotąd nie znalazły zastosowania w przypadku torowisk wrocławskich.

3.1. Rozwiązania stosowane we Wrocławiu

W drugiej połowie lat 60-tych wrocławskie MPK przy współpracy z Instytutem Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej opracowało optymalny model konstrukcji toru zabudowanego [118] przedstawiony na rys.3, który stał się podstawowym rozwiązaniem stosowanym we Wrocławiu w przypadku remontów torowisk wbudowanych w jezdnię ulic w latach 70 i 80-tych. Eksploatowanymi do dziś torowiskami wykonanymi według tej technologii są między innymi: ul. Sienkiewicza od mostu Szczytnickiego do ul. Wyszyńskiego - 1989, ul. Grodzka - 1989.

W rozwiązaniu tym podbudowę stanowiła płyta betonowa albo warstwa zagęszczonego tłucznia o grubości 20 - 30 cm, na której układano szyny 180W albo S i łączono poprzeczkami torowymi z płaskownika. Po geodezyjnym wyregulowaniu położenia szyn podpartych tymczasowo drewnianymi klinami wykonywano pod ich stopkami trapezowe ławy o grubości 6 cm z grysów otaczanych asfaltem. Szyn nie kotwiono do podbudowy. Zabudowę śródtorza i międzytorza stanowiły prefabrykowane płyty żelbetowe o wymiarach 132×107×12 cm spoczywające na podsypce cementowo-piaskowej, dolnymi krawędziami zaś na stopkach szyn, przykryte od góry warstwą lanego asfaltu o grubości 3 - 5 cm. Po zewnętrznych stronach torowiska wykonywano przy szynach rolę z podwójnej kostki kamiennej, która graniczyła z asfaltobetonową lub kostkową nawierzchnią drogową.



Rys.3 Przekrój konstrukcyjny tradycyjnego toru wbudowanego w jezdnię stosowanego we Wrocławiu w latach 70 i 80-tych

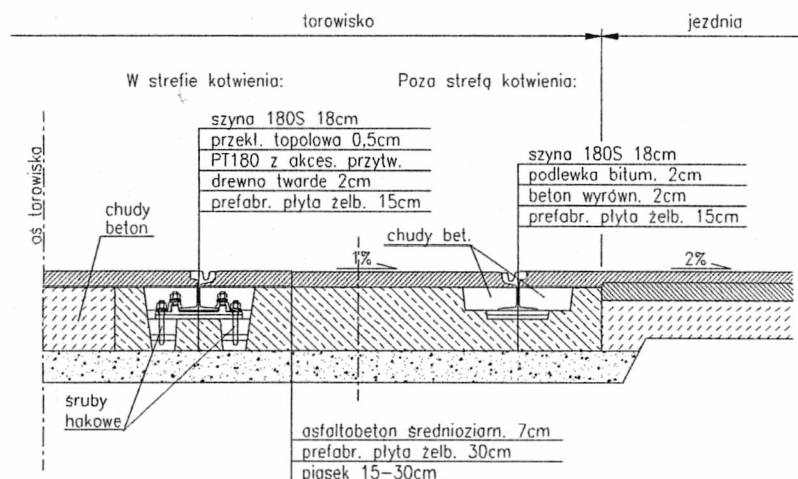
W miejscach ograniczenia wysokości konstrukcyjnej nawierzchni do niezbędnego minimum (np. na mostach) asfaltobetonowe ławy podszynowe zastępowano niższymi podlewkami z mastyksu o grubości 3 - 5 cm. W miejscach torowisk wbudowanych, nie prowadzących ruchu kołowego żelbetowe płyty zabudowy układano na grubszej warstwie podsypki cementowo-piaskowej, doprowadzając ich górną powierzchnię do poziomu główki szyny (ul. Grabiszyńska od ul. Pereca do pl. Srebrnego - 1991).

Brak kotwienia szyn do podbudowy miał zapewnić korzystniejszy - ciągły, a nie punktowy model zamocowania szyny, stał się jednak w połączeniu z szybką degradacją ław asfaltobetonowych główną przyczyną niskiej trwałości torowiska, dlatego pod koniec lat 80-tych podszynowe ławy z asfaltobetonu zaczęto zastępować betonowymi (ul. Krakowska - 1989, ul. Osobowicka - 1990, ul. Pułaskiego - 1991), co spowodowało z kolei wzrost hałaśliwości konstrukcji.

Po raz ostatni opisywane rozwiązanie w przypadku remontu kapitalnego zastosowano w roku 1995 podczas przebudowy torowiska w ul. Ruskiej i Mikołaja. Zakres remontu był tym razem dużo większy, obejmował wykorytowanie wykopu do głębokości ok. 0,75 m, ułożenie nowej warstwy odcinającej z piasku (15 cm), następnie podbudowy dolnej z tłucznia (15 cm) oraz górnej z betonu B25 (25 cm). Pod szynami wykonano podlewkę z lanego asfaltu (3 cm). Zabudowę wykonano z betonu B15 (9 cm), a nawierzchnię z asfaltobetonu grubo i średnioziarnistego (5 cm + 4 cm).

W roku 1987 podczas remontu torowiska tramwajowego wzdłuż ul. Jedności Narodowej zastosowano po raz pierwszy we Wrocławiu tor z płytami PPT - rozwiązanie według projektu mgr inż. W. Ptasznika [86, 138] przedstawione na rys.4.

Prefabrykowane płyty żelbetowe o wymiarach 300×223,5×30 cm układano na warstwie wałowanego piasku o grubości 15 - 20 cm. W kanałach szynowych płyt umieszczano szyny rowkowe połączone poprzeczkami (co 3 m), spoczywające w strefach podparcia (co 1,5 m) na stalowej podkładce żebrowej PT180 przymocowanej do płyty śrubami hakowymi z pierścieniem sprężystym i nakrętką. Szynę do podkładki żebrowej mocowano akcesoriami typowymi dla nawierzchni kolejowej: śrubą stopową z pierścieniem sprężystym i nakrętką poprzez łapkę Łp2. Między szyną a podkładką żebrową umieszczano przekładkę topolową, a pod podkładką żebrową - z drewna twardego. Poza strefami kotwienia wykonywano podlew bitumiczny pod stopką szyny. Kanały szynowe w płytach wypełniano chudym betonem do poziomu górnej powierzchni płyty, a następnie układano nawierzchnię z betonu asfaltowego.



Rys.4 Przekrój konstrukcyjny toru wbudowanego w jezdnię z zastosowaniem płyt PPT

Metodą tą wykonano we Wrocławiu znaczną ilość remontów torowisk wbudowanych w jezdnię: ul. Curie-Skłodowskiej od pl. Grunwaldzkiego do mostu Zwierzynieckiego - 1988, Nowowiejska i Piastowska - 1989, Reymonta - 1990, Trzebnicka - 1991. Niestety dość szybko ujawniła ona swoje wady: lokalne zapadnięcia toków szynowych, wykruszanie się asfaltu w strefie przyszynowej, znaczny hałas. Mimo prefabrykacji była to metoda czasochłonna i pracochłonna oraz kosztowna.

Opisywane rozwiązanie zastosowane na ul. Nowowiejskiej i Piastowskiej, stało się w roku 1999 przedmiotem ekspertyzy wykonanej przez Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [70]. W ekspertyzie oprócz analizy zużycia wynikającego z ponad 10 letniej eksploatacji analizowanego torowiska wskazano jednak na pewne wady konstrukcyjne rozwiązania tego typu:

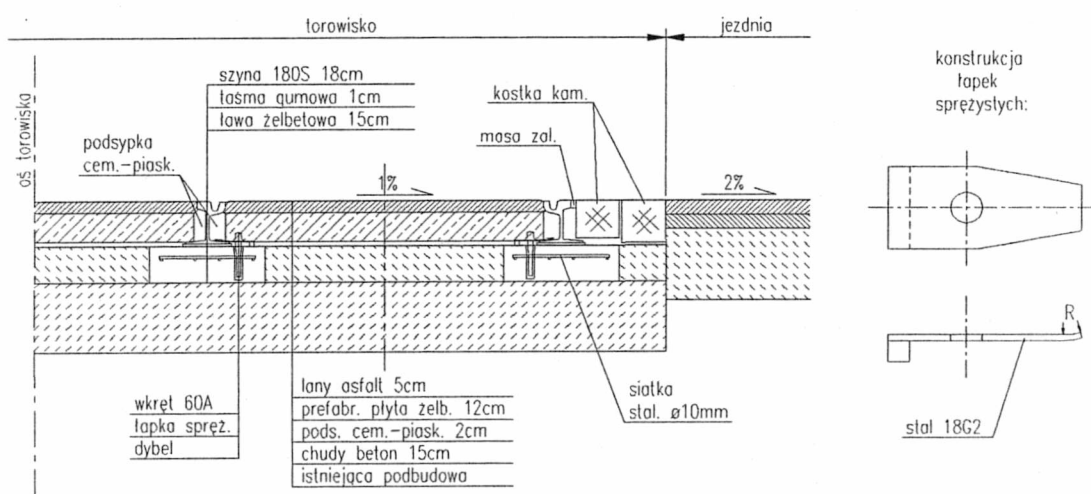
- zbyt rzadki rozstaw przytwierdzeń szyny (1,5 m),
- niewłaściwy dobór materiału na przekładki (drewno - gnicie),
- niska trwałość mocowania podkładki żebrowej do płyty PPT śrubą hakową, w wyniku zastosowania połączenia na zasadzie przegubu (po pojawieniu się niewielkiego luzu np. z powodu nadgnicia przekładki drewnianej górny koniec śruby hakowej uzyskiwał swobodę przesunięć w planie przez co również możliwe były poziome przesunięcia podkładki żebrowej) oraz jedynie połowicznego podparcia podkładki żebrowej płytą PPT (druga połowa znajdowała się nad otworami wypełnionym piaskiem),
- sztywna charakterystyka zastosowanych łapek (w stosunku do klamer sprężystych SB3 albo skl),
- brak poprzeczek torowych (mimo iż w przypadku płyt PPT istniała możliwość ich zastosowania),
- przyjęcie zbyt małej wysokości nawierzchni z asfaltobetonu, co powodowało przenoszenie się spękań ze styków płyt,
- opieranie płyt PPT bezpośrednio na warstwie piasku (zbyt duża różnica sztywności obu elementów - niewłaściwy rozkład naprężeń, klawiszowanie płyt).

Ostatnie zastosowanie torowiska wbudowanego w jezdnię z płyt PPT we Wrocławiu miało miejsce podczas remontu ul. Chrobrego w 1993 r. na odcinku od pl. Powstańców Wlkp. do ul. Jagiellończyka, gdzie podkładki z drewna zastąpiono gumowymi, natomiast podlewki bitumiczne w strefach poza podporami - gumową taśmą podszynową grubości 2 cm.

Znacznie poważniejszą modyfikacją toru z płytami PPT był remont torowiska wzdłuż ul. Curie-Skłodowskiej, przeprowadzony w 1996 r., gdzie zastosowano rozwiązanie

wzorowane na konstrukcji torowiska z Sheffield w Anglii. Szyny z komorami szynowymi zabudowanymi prefabrykowanymi bloczkami betonowymi, zalane żywicą poliuretanową w korytkach z blachy o grubości 3 mm ułożono w kanałach szynowych płyt PPT i zabetonowano. Korytka posiadały po bokach stalowe wazy, do których przed zabetonowaniem przyspawano podłużne pręty (kotwienie korytek w betonie). Nawierzchnię stanowiła warstwa asfaltobetonu. W wyniku modernizacji nastąpiła zmiana modelu podparcia i zamocowania z punktowego na ciągły oraz całkowita eliminacja połączeń śrubowych. Pomimo zastosowanych zmian opisywane torowisko obecnie znajduje się w złym stanie, nie rozwiązano bowiem problemu braku stabilności podbudowy z płyt PPT posadowionych na warstwie piasku.

W roku 1992 podczas remontu ul. Sądowej zastosowano konstrukcję torowiska tramwajowego przedstawioną na rys.5.



Rys.5 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Sądowej

Nowymi elementami w zastosowanym rozwiązaniu były:

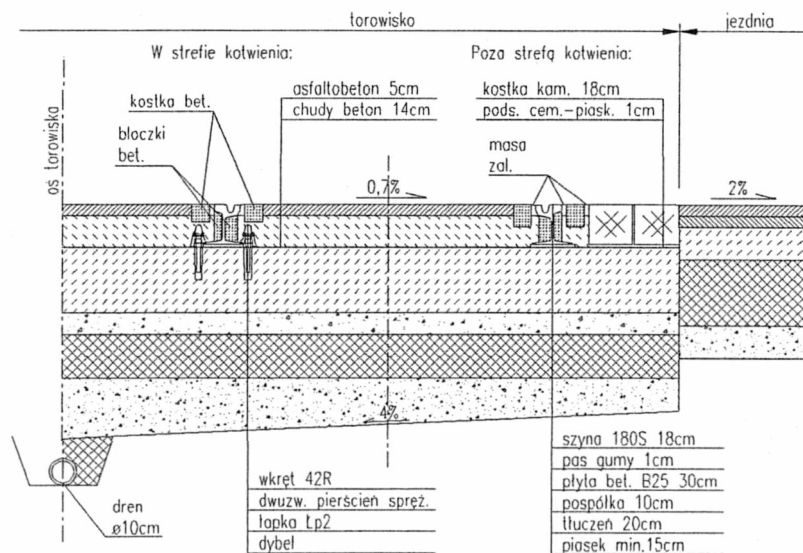
- ławy betonowe w strefie podszynowej, zbrojone siatką z prętów $\varnothing 10$, z umieszczonymi podczas betonowania dyblami z tworzywa sztucznego w rozstawie co 2,25 cm,
- łapki sprężyste specjalnej konstrukcji, opierające się z jednej strony na stopce szyny, z drugiej zaś na betonie ławy,
- gumowa ciągła taśma podszynowa, szerokości 20 cm i grubości 1 cm.

Konstrukcję tego typu zastosowano również przy remontach ul. Słowiańskiej - 1993 i Chrobrego od ul. Jagiellończyka do Łokietka - 1994 oraz z modyfikacjami na ul. Piłsudskiego od pl. Legionów do ul. Świdnickiej - 1994, gdzie zrezygnowano z żelbetowej ławy podszynowej i ul. Jagiełły - 1995, gdzie zastosowano inne łapki przytwierdzeniowe o dużo prymitywniejszej konstrukcji, natomiast zbrojenie w postaci siatki umieszczano w warstwie podbudowy betonowej. W obu ostatnich przypadkach zabudowę wykonano z kostki kamiennej, z wypełnieniem strefy przyszynowej masą zalewową.

Po wieloletnim okresie eksploatacji torowisko na ul. Sądowej jest w dobrym stanie, nie pojawiają się zapadnięcia toków szynowych czy wykruszenia nawierzchni asfaltowej, kursujący tabor nie emituje nadmiernych drgań i hałasu, co świadczy o poprawności zastosowanego rozwiązania pod względem konstrukcyjnym i technologicznym. Gorzej sytuacja wygląda na ul. Piłsudskiego, gdzie już po roku eksploatacji pojawiły się

punktowe zapadnięcia toków szynowych i ucieczka masy zalewowej w głąb torowiska. Obecnie konstrukcja torowiska tego typu nie jest stosowana.

W roku 1994 rozpoczęto remont ul. Grabiszyńskiej na odcinku od pl. Srebrnego do Hutmenu, a rok później dalszą część do skrzyżowania z ul. Klecińską, gdzie zastosowano typ konstrukcji torowiska przedstawiony na rys.6.



Rys.6 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Grabiszyńskiej

Na obu wymienionych odcinkach po raz pierwszy we Wrocławiu wykonano:

- drenaż odwadniający w przypadku torowiska wbudowanego w jezdnię,
- kotwienie szyny do podbudowy łapkami i wkrętami kolejowymi z pierścieniami sprężystymi, wkręcanymi poprzez dyble w wywiercone w betonowej podbudowie otwory (na zasadzie kołków rozporowych), w rozstawie co 2 m,
- zabudowę komór szynowych prefabrykowanymi blozkami betonowymi,
- zabudowę strefy przyszynowej chodnikową kostką z betonu wibroprasowanego.

Jako wibroizolację zastosowano pasy gumy profilowanej grubości 1 cm i długości 50 cm z przerwami 30 cm. Zrezygnowano z łączenia szyn poprzeczkami torowymi. Rozwiązanie z ul. Grabiszyńskiej było później wykorzystywane wyłącznie przy remontach przejazdów, w nie zmienionej formie na skrzyżowaniu ul. Armii Krajowej i ul. Tarnogajskiej - 1995, z zastąpieniem zabudowy z przyszynowych blozków i dywanika asfaltobetonowego prefabrykowanymi płytami żelbetowymi ułożonymi na warstwie grysów otaczanych asfaltem na skrzyżowaniach ul. Kazimierza Wlk. i Widok - 1995, ul. Grabiszyńskiej i Zaporoskiej - 1995 i pl. Orląt Lwowskich - 1995 oraz ponadto ze zrezygnowaniem z wypełniania komór szynowych prefabrykowanymi blozkami betonowymi i zastosowania pierścieni sprężystych w przytwierdzeniu na skrzyżowaniach ul. Hallera i Al. Pracy - 1997 oraz ul. Dubois i Kurkowej - 1997.

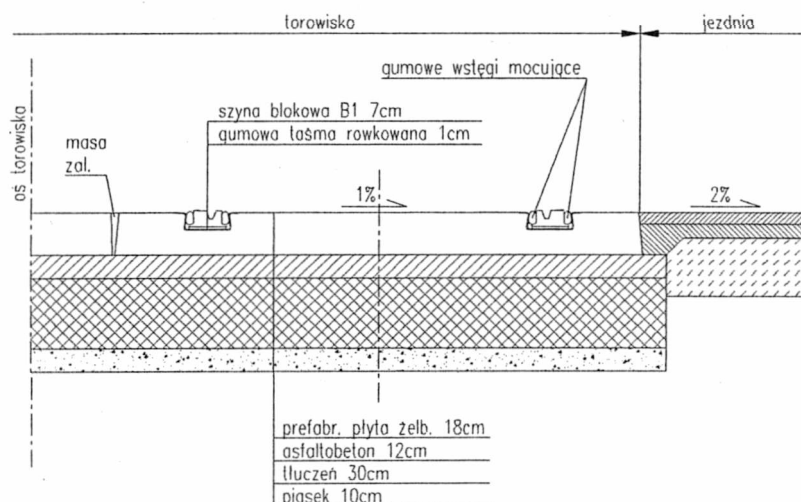
Opisywane rozwiązanie zastosowane na ul. Grabiszyńskiej, ze względu na zbyt szybkie zużycie, stało się w roku 1999 przedmiotem ekspertyzy wykonanej przez Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej [71], w wyniku której odcinek z 1994 r. uzyskał ogólną ocenę niezadowalającą, natomiast z 1995 r. - dostatecznie dobrą. W ekspertyzie wskazano następujące przyczyny szybkiej degradacji nawierzchni:

- przekrzywianie się łapek oraz wykruszania betonu spod łapki w wyniku zastosowania niewłaściwego (uproszczonego) sposobu przytwierdzenia szyn do podbudowy (bez podkładki żebrowej),

- niska trwałość osadzenia wkrętów w betonie podbudowy na zasadzie kołka rozporowego,
- zbyt rzadki rozstaw przytwierdzeń (2 m),
- sztywna charakterystyka zastosowanych łapek (w stosunku do klamer sprężystych SB3 albo skl),
- niekorzystny - niejednorodny model podparcia szyny (pasy gumy z przerwami),
- brak poprzeczek torowych (niezgodny z wytycznymi projektowania torów tramwajowych),
- niska stabilność zbyt małych elementów obudowy szyn,
- przenoszenie się pęknięć skurczowych betonu podbudowy na nawierzchnię w wyniku zastosowania tylko jednej warstwy betonu asfaltowego zamiast dwóch (ścieralnej i wiążącej).

Obecnie konstrukcja torowiska tego typu nie jest stosowana.

W roku 1994 przeprowadzono remonty torowisk w ul. Łokietka i Poniatowskiego, gdzie po raz pierwszy we Wrocławiu zastosowano tor typu węgierskiego przedstawiony na rys.7, opracowany w latach 60-tych dla Budapesztu [39], rozpropagowany później w Czechach [55], skąd trafił do Polski [23, 38].



Rys.7 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Poniatowskiego

Podstawowym założeniem tego rozwiązania jest ciągłe podparcie nietypowej (blokowej) szyny w prefabrykowanej żelbetowej płycie nawierzchni torowiska, za pośrednictwem gumowej rowkowanej taśmy podszyновой oraz ciągłe przytwierdzenie szyny gumowymi wstęgami mocującymi o przekroju elipsy, wciśniętymi pomiędzy szynę a krawędzie koryta szynowego w żelbetowej płycie. Żelbetowe płyty nawierzchni torowiska układa się na asfaltobetonowej podbudowie górnej wykonanej drogowymi rozścielaczami mas bitumicznych (w trzech kolejnych warstwach), spoczywającej na podbudowie dolnej z tłucznia albo betonu cementowego. Szczeliny pomiędzy płytami wypełnia się masami zalewowymi na bazie bitumów lub polimerów.

Prefabrykowane żelbetowe płyty torowe posiadają wysokość 18 cm, szerokość 2,20 m, natomiast w zależności od krzywizny toru w planie i profilu stosuje się różne ich długości: 5,985 m; 2,9 m; 1,41 m i 0,665 m. Na międzytorzu układa się płyty bez koryt szynowych, o szerokości zależnej od rozstawu osiowego torów.

Mimo wyższych kosztów torowiska tego typu zdecydowano się na jego stosowanie z uwagi na niewątpliwe zalety:

- mała wysokość konstrukcyjna nawierzchni,

- mała pracochłonność i czasochłonność wbudowania dzięki prefabrykacji, prostocie konstrukcji i dużemu zakresowi mechanizacji robót,
- wysoka niezawodność dzięki wyeliminowaniu połączeń śrubowych,
- niski poziom emisji drgań i hałasu,
- dobra współpraca koła z szyną oraz właściwy rozkład naprężeń dzięki ciągłemu podparciu i zamocowaniu szyn,
- wyeliminowanie dodatkowych warstw nawierzchni,
- dobra izolacja elektryczna (ograniczenie upływu prądów błądzących),
- łatwość wymiany szyn (bez naruszania podbudowy, a nawet zabudowy),
- możliwość wykonania podbudowy bez warstw z betonu cementowego (skrócenie czasu inwestycji dzięki pominięciu okresu dojrzewania betonu).

Tor typu węgierskiego stał się jednym z najczęściej stosowanych torowisk wbudowanych w jezdnię ulic we Wrocławiu w drugiej połowie lat 90-tych. W stosunku do dwóch pierwszych opisanych zastosowań, we wszystkich następnych podbudowę tłuczniową zastąpiono betonową. Według tej technologii wykonano następujące remonty: ul. Traugutta od ul. Krasieńskiego do ul. Pułaskiego - 1996, ul. Wróblewskiego od ul. Mickiewicza do ul. Wystawowej - 1997, ul. Podwale od pl. Orłąt Lwowskich do ul. Jagiełły - 1998, skrzyżowanie ul. Stawowej i Swobodnej - 1998, ul. Traugutta od ul. Kościuszki do ul. Pułaskiego - 1999, ul. Gliniana i Hubska - 1999, skrzyżowanie ul. Ślężnej i Armii Krajowej - 1999, przejazd w ul. Powstańców Śl. przy zajezdni tramwajowej - 1999, ul. Kołłątaja - 1999, skrzyżowanie ul. Legnickiej i Na Ostatnim Groszu oraz przejazd w ul. Lotniczej przy domu handlowym Astra - 2000, ul. Skargi - 2001. W przypadku remontów: ul. Św. Jadwigi - 1997 oraz ul. Piaskowej i Św. Katarzyny - 2000 ze względu na sąsiedztwo zabytkowej zabudowy zastosowano płyty o fakturze kostki kamiennej. Tor typu węgierskiego dzięki niewielkiej wysokości konstrukcyjnej okazał się bardzo korzystnym rozwiązaniem na mostach: Sikorskiego - 1998 i Trzebnickim - 1999, w przypadku których dolną podbudowę w konstrukcji toru stanowiła płyta pomostu.

Obecnie, po okresie kilkuletniej eksploatacji, dostrzegane są jednak pewne wady toru węgierskiego, w wyniku których podobnie jak w innych miastach Polski, następuje stopniowe odchodzenie od stosowania konstrukcji tego typu:

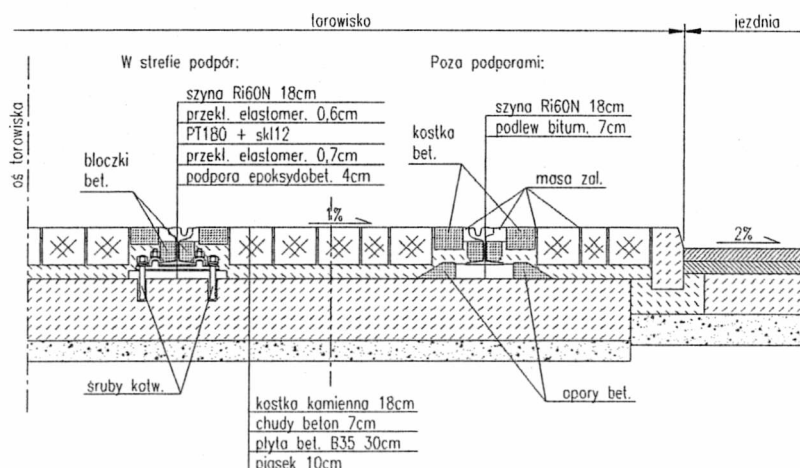
- utrudniony dostęp do infrastruktury podziemnej,
- utrudnione projektowanie w przypadku dużej liczby wjazdów i studzienek uzbrojenia podziemnego,
- brak możliwości stosowania w rozjazdach i urządzeniach wyrównawczych,
- konieczność uzyskania wysokiej precyzji wykonania najwyższej warstwy podbudowy z asfaltobetonu,
- skłonność do przesunięć poprzecznych toru w łukach o małych promieniach,
- klawiszowanie płyt,
- kłopotliwa naprawa pęknięć szyn.

Na zakończenie omawiania toru typu węgierskiego warto wspomnieć, iż opisana wcześniej konstrukcja torowiska z wykorzystaniem płyt PPT była tak na prawdę polskim zamiennikiem rozwiązania węgierskiego, którego wdrażanie ze względu na koszty ochrony patentowej i konieczności zakupu licencji napotykało na poważne trudności. Niestety projektując płyty PPT, z rozwiązania węgierskiego wzięto jedynie samą ideę wielkowymiarowej żelbetowej płyty, rezygnując z wszystkich pozostałych zalet zagranicznego rozwiązania, takich jak:

- ciągłe podparcie i zamocowanie szyny,
- mała wysokość konstrukcyjna dzięki zastosowaniu szyny blokowej,
- wyeliminowanie połączeń śrubowych,

– wyeliminowanie dodatkowych warstw nawierzchni (płyta pełni jej funkcję).
Brak tych zalet stał się automatycznie podstawową przyczyną niedoskonałości rozwiązania torowiska tramwajowego z płyt PPT.

Jesienią roku 1996 podczas remontu torowiska w ul. Powstańców Śl. na odcinku od ul. Piłsudskiego do Hotelu Wrocław zastosowano konstrukcję przedstawioną na rys.8.



Rys.8 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Powstańców Śl.

Nowościami w opisywanym rozwiązaniu były:

- typ szyny rowkowej Ri60N zamiast 180S,
- podparcie szyny w sposób punktowy co 0,67 m, z wykorzystaniem podkładek PT180 i epoksydobetonowych podpór, kotwionych specjalnymi śrubami na klej epoksydowy w betonie podbudowy, natomiast na odcinkach pomiędzy podporami - wykonanie bitumicznego podlewu pod stopką szyny pełniącego jedynie rolę wypełniacza (nie uczestniczącego w przenoszeniu obciążeń),
- zastosowanie przekładek z elastomeru grubości 6 mm pomiędzy stopką szyny a podkładką zebrową i 7 mm pod podkładką zebrową,
- wykorzystanie łapek skł12 do przytwierdzeń szyn,
- spawanie termitowe szyn,
- zaspoinowanie całego wierzchu kostkowej zabudowy torowiska bitumiczną masą zalewową.

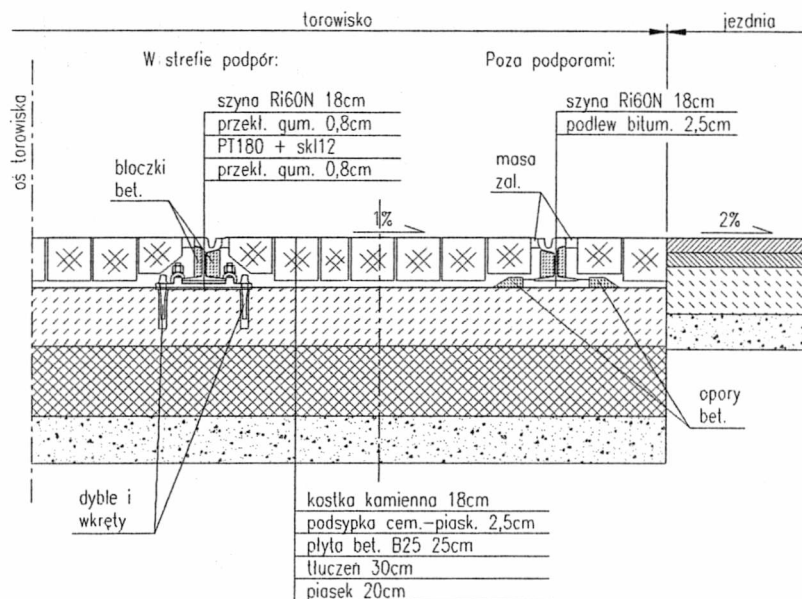
Wiosną roku 1997 wykonano remont sąsiedniego torowiska na skrzyżowaniu ul. Świdnickiej i Podwale wraz z pl. Kościuszki, według podobnej technologii, przedstawionej na rys.9.

W stosunku do poprzedniego rozwiązania:

- zastosowano przekładki gumowe,
- zrezygnowano z epoksydobetonowych podpór oraz kostki betonowej w strefie przyszynowej,
- kotwienie podkładek zebrowych wykonano przy pomocy kolejowych wkrętów i dybli w rozstawie co 1 m,
- bitumiczną masą zalewową zaspoinowano jedynie przestrzeń przyszynową.

Najważniejszą różnicą była jednak zmiana kolejności wykonania betonowej płyty podbudowy w stosunku do zmontowania rusztu torowego. Na tymczasowo położonych podkładach drewnianych ułożono szyny i połączono stalowymi poprzeczkami, do stopek szyn przymocowano podkładki zebrowe z akcesoriami przytwierdzeniowymi, w otwory podkładek zebrowych włożono wkręty, na które nakręcono dyble z tworzywa

sztucznego. Po geodezyjnym wyregulowaniu położenia szyn wylano betonową płytę podbudowy górnej, po której związaniu ostatecznie dokręcono wkręty i nakrętki na śrubach stopowych.



Rys.9 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Świdnickiej

Oba przedstawione powyżej rozwiązania przyjęto określać mianem toru na punktowych podporach. Rozwiązanie to stało się we Wrocławiu najpoważniejszym "konkurentem" toru typu węgierskiego. Według tej technologii wykonano następujące remonty: ul. Dubois od ul. Kurkowej do Pomorskiej - 1997, skrzyżowanie ul. Pomorskiej i Dubois - 1998, przejazdy w ul. Karkonoskiej - 1999, ul. Piłsudskiego od ul. Świdnickiej do węzła przed Dworcem Gł wraz z ul. Stawową i Małachowskiego - 1999, ul. Nowy Świat - 1999, skrzyżowanie ul. Żmigrodzkiej i Broniewskiego - 1999, skrzyżowanie ul. Kołłątaja i Teatralnej - 1999, skrzyżowanie ul. Legnickiej i Wejherowskiej - 2000, ul. Wierzbowa - 2001, pl. Dominikański - 2001. W przypadku remontów przejazdów w ul. Powstańców Śl. - 1999 i w ul. Kwidzyńskiej - 2000 oraz remontu skrzyżowania ul. Grabiszyńskiej z ul. Pereca - 2000 zastosowano zabudowę z prefabrykowanych płyt żelbetowych EPT posadowionych na ławach z grysów otaczanych asfaltem. W ostatnim z wymienionych przypadków zastąpiono ponadto przekładki podpodkładowe poliuretanowym podlewem. W przypadku remontu skrzyżowania ul. Piaskowej i Grodzkiej - 2000 zastosowano zabudowę asfaltobetonową zamiast kostkowej, natomiast w strefie przyszynowej - taśmy dylatacyjne bitumiczno-kauczukowe przyklejane do boku główki szyny, samowulkanizujące się podczas zagęszczania asfaltobetonu walcami.

O tak częstym stosowaniu toru na podporach punktowych zdecydowały niewątpliwie jego zalety:

- sprężyste podparcie i zamocowanie szyn - ograniczenie emisji drgań i hałasu,
- możliwość stosowania w rozjazdach i urządzeniach wyrównawczych,
- wariantowa zabudowa (kostka, płyty EPT, asfaltobeton, trawnik),
- mniejsza niż w przypadku toru węgierskiego konieczność precyzyjnego wykonania najwyższej warstwy podbudowy,
- łatwiejszy niż w przypadku toru węgierskiego dostęp do infrastruktury podziemnej oraz mniej skomplikowane projektowanie i wykonanie w przypadku dużej liczby włączów i studzienek uzbrojenia podziemnego,

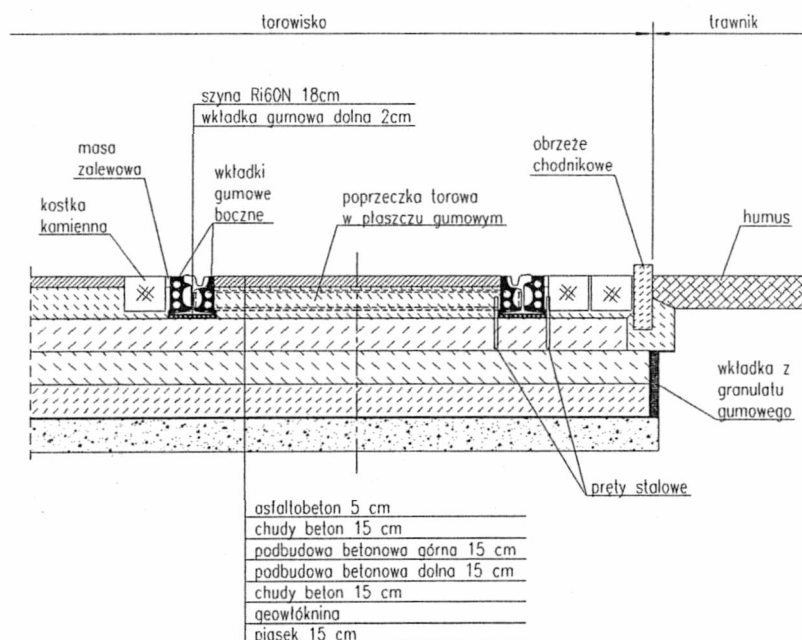
– łatwiejsza niż w przypadku toru węgierskiego naprawa pęknięć szyn.

Do wad toru tego typu należy natomiast zaliczyć:

- dużą wysokość konstrukcyjną,
- utrudnioną wymianę szyn (z naruszeniem zabudowy),
- konieczność wykonania podbudowy z betonu cementowego (wydłużenie czasu inwestycji z powodu okresu dojrzewania betonu),
- niski stopień prefabrykacji i mechanizacji.

Niedoskonałością wrocławskich zastosowań toru o omawianej konstrukcji jest również niestosowanie pierścieni sprężystych pod wkręty mocujące podkładki żebrowe do betonu podbudowy, w sytuacji gdy pomiędzy obu tymi elementami umieszcza się podatne przekładki (w momencie ugięcia podatnej przekładki wkręt przestaje dociskać podkładkę żebrową).

W roku 1999 przeprowadzony został remont torowiska tramwajowego w ul. Karkonoskiej. Na odcinku pomiędzy ulicami Letnią i Wiosenną po raz pierwszy i jak dotychczas jedyny we Wrocławiu zastosowano tor z szynami obłożonymi wkładkami gumowymi, przedstawiony na rys.10.



Rys.10 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na ul. Karkonoskiej

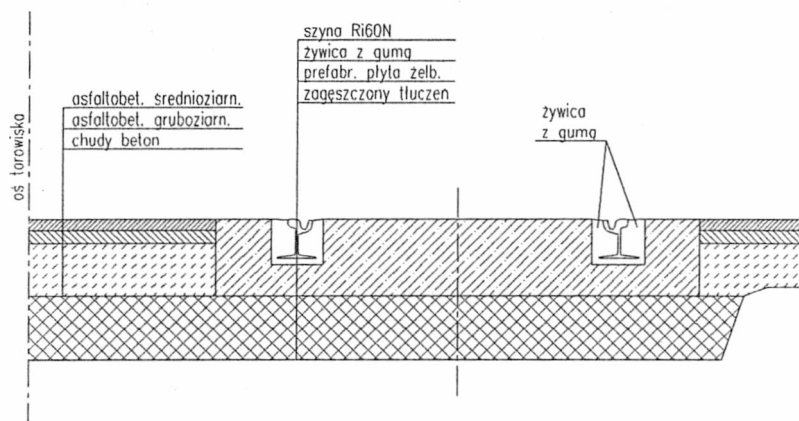
Szyna rowkowa jest otulona trzema wkładkami: dwoma bocznymi wypełniającymi komory szynowe i jedną od spodu, tak zwanym "butem". Wkładki są wykonane z jednorodnej gumy z pustkami powietrznymi. Wkładki boczne sięgają góry główki szyny i są jedynie włożone w komory szynowe i dociśnięte elementami zabudowy nawierzchni. Wkładka dolna przenosi i rozkłada obciążenia, wkładki boczne pełnią rolę pionowej dyatacji pomiędzy szyną a zabudową nawierzchni. Wszystkie wkładki tłumią drgania i stanowią izolację elektryczną. Oba toki szynowe posiadają połączenia poprzeczkami torowymi, które również są obłożone płaszczyznami gumowymi. W podtorzu zastosowano geowłókninę pomiędzy warstwą piasku a chudym betonem oraz wkładki z granulatu gumowego sklejonego klejem poliuretanowym po bokach płyty podbudowy dolnej z betonu cementowego.

Zabudowa jest wykonana z asfaltobetonu na chudym betonie, z zastosowaniem rolek z kostki na zewnątrz szyn. Pomiedzy wkładkami gumowymi bocznymi a kostką kamienną

występuje zalew z masy bitumicznej. Szyny nie są przytwierdzone do podbudowy, dlatego dla ustabilizowania rusztu torowego zastosowano pręty stalowe o średnicy 16 mm zabetonowane do połowy w górnej płycie podbudowy betonowej w rozstawie co 1,5 m w mijkę po obu stronach szyny obudowanej wkładkami gumowymi.

Opisywane rozwiązanie charakteryzuje się wysokim stopniem izolacji elektrycznej rusztu torowego (ograniczenie upływu prądów błądzących) oraz niskim poziomem emisji drgań i hałasu do otoczenia.

W roku 2000 podczas remontu przejazdu tramwajowego na skrzyżowaniu ulic Kosmonautów i Kamiennogórskiej zastosowano po raz pierwszy we Wrocławiu konstrukcję zabudowanego toru tramwajowego przedstawioną na rys.11, w postaci prefabrykowanej wielkowymiarowej płyty żelbetowej o długości 9 m, z osadzonymi w korytach płyty szynami rowkowymi w zalewie z żywicy z gumą.



Rys.11 Przekrój konstrukcyjny toru zastosowanego na skrzyżowaniu ul. Kosmonautów i Kamiennogórskiej

Prefabrykowane żelbetowe płyty torowe są układane na odpowiednio zagęszczonym i przygotowanym wysokościowo podłożu tłuczniovym. Zabudowę śródtorza pomiędzy płytami sąsiednich torów stanowi asfaltobetonowa nawierzchnia na podbudowie z kruszywa łamanego. Rozwiązanie tego typu wykorzystano również podczas remontu przejazdów tramwajowych w ul. Żmigrodzkiej na dojazdach do stacji CPN w roku 2001, gdzie oprócz płyt o fakturze gładkiej zastosowano płyty o fakturze nawierzchni kostkowej.

W kolejnych zastosowaniach omawianego rozwiązania wprowadzono modyfikację polegającą na zastąpieniu jednej płyty torowej dwoma blokami - osobnymi dla każdego toku szynowego, połączonymi poprzecznie stężeniami z rur stalowych natomiast podłużnie - blachami łukowymi, skręcanymi na śruby. Szyny kolejnych bloków wzdłuż toru spawa się ze sobą po czym zabudowuje przestrzeń wokół wykonanych styków. Zabudowę poprzeczną pomiędzy blokami stanowi asfaltobetonowa albo kostkowa nawierzchnia na podbudowie z kruszywa łamanego. Zastosowana modyfikacja znacznie ułatwia transport i wbudowanie elementów nawierzchni, może natomiast budzić obawy co do nierównego osiadania toków szynowych i kłopotów z zachowaniem prześwitu. Według opisanego rozwiązania wykonano remonty następujących przejazdów: skrzyżowanie ul. Ślężnej i Jaworowej - 2002, przejazd na pl. Grunwaldzkim przy budynkach politechniki - 2002, skrzyżowanie ul. Olszewskiego i Abramowskiego - 2002. Niestety w przypadku części z omawianych przejazdów, już po krótkim okresie eksploatacji pojawiły się odkształcenia drogowej zabudowy śródtorzy i międzytorzy.

W roku 2000 przeprowadzony został remont nawierzchni na moście Piaskowym, gdzie po raz pierwszy we Wrocławiu zastosowano w torowisku tramwajowym ciągły podlew pod stopką szyny z materiału poliuretanowego. Jako koryto dla wykonania podlew posłużyły ceowniki zespolone z konstrukcją pomostu, ułożone ramionami do góry wzdłuż stopek szyn. Szyny połączone poprzeczkami torowymi nie zostały zakotwiczone do płyty pomostu, a jedynie obudowane nawierzchnią drogową z kostki kamiennej na podsypce cementowo-piaskowej. Pomiędzy górnymi krawędziami szyny a zabudową drogową wykonano dylatację w postaci zalewu z masy bitumicznej.

Oprócz wszystkich opisanych do tej pory rozwiązań konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych stosowany jest we Wrocławiu również tor typu klasycznego - na podsypce i poprzecznych podkładach z zabudową nawierzchnią typu drogowego. Jego omówienie zostało pozostawione na koniec niniejszego rozdziału, gdyż dopiero od niedawna znajduje on szersze wykorzystanie. Przed rokiem 1999 jedynymi miejscami zastosowania konstrukcji tego typu były poprzeczne przejazdy samochodowe oraz przejścia piesze przez torowisko. Jako zabudowę stosowano:

- asfaltobeton albo asfalt lany na chudym betonie,
- kostkę kamienną albo betonową, płytki chodnikowe,
- żelbetowe płyty prefabrykowane tramwajowe lub kolejowe (przejazdowe).

Konstrukcję toru stanowiły:

- podkłady - drewniane, a od połowy lat 60-tych również strunobetonowe,
- szyny - rowkowe, ale również kolejowe (w przypadku zabudowy w postaci kolejowych płyt przejazdowych),
- przytwierdzenia - od bezpośredniego (wkrętami do podkładów drewnianych) poprzez przytwierdzenie typu "K" z łapkami Łp, a od roku 1996 również skl12, po przytwierdzenie SB-3, którego pierwsze zastosowanie we wrocławskich torowiskach tramwajowych miało miejsce w roku 1993 podczas budowy ul. Bałtyckiej.

Od roku 1999 rozpoczęto we Wrocławiu stosowanie zabudowy torowisk tramwajowych wydzielonych wzdłuż przystanków, ze względu na znaczne ułatwienie procesu utrzymania ich czystości. Jako zabudowę stosuje się wypełnienie komór szynowych bloczkami betonowymi oraz wariantowo:

- chodnikową kostkę z betonu wibroprasowanego na podsypce z piasku lub kruszywa łamanego (skrzyżowanie ul. Hallera i Mieleckiej - 1999, skrzyżowanie ul. Grabiszyńskiej i Zaporoskiej - 2000, ul. Powstańców Śl. i Karkonoska - 1999, ul. Toruńska i Kwidzińska - 2000),
- prefabrykowane płyty żelbetowe EPT albo PPTxW na podsypce z piasku lub kruszywa łamanego (skrzyżowanie ul. Ślężnej i Armii Krajowej - 1999).

W roku 2001 po raz pierwszy we Wrocławiu wykonano zabudowę wydzielonego torowiska tramwajowego wzdłuż pl. Grunwaldzkiego na odcinku od mostu Szczytnickiego do skrzyżowania z ul. Piastowską, w celu umożliwienia prowadzenia po nim ruchu autobusów miejskich. Jako materiały do wykonania zabudowy zastosowano bloczki betonowe do wypełnienia komór szynowych oraz prefabrykowane płyty żelbetowe EPT na grysach otaczanych asfaltem, z zaspoinowaniem szczelin pomiędzy płytami oraz płytami i szynami bitumiczną masą zalewową.

Ostatnią nowością w przypadku poprzecznych przejazdów przez torowisko o klasycznej konstrukcji toru jest natomiast zastosowanie w roku 2001 płyt betonowo-gumowych na skrzyżowaniu ul. Olszewskiego i Norblina.

Niedoskonałością wrocławskich zastosowań torów zabudowanych o opisanej w niniejszym rozdziale konstrukcji jest fakt, iż prefabrykowane bloczki betonowe stanowiące wypełnienie komór szynowych nie są do niej przyklejane materiałem gwarantującym trwałe zespolenie obu tych elementów (np. klejem na bazie

poliuretanów). Niewykonanie tej czynności powoduje, że bloczki zamiast zwiększać masę szyn, a przez to obniżać ich podatność do wpadania w drgania od poruszającego się po torze taboru, stanowią osobny element drgający, a przez to emitujący dodatkowy hałas oraz powodujący rozszczelnienie nawierzchni.

3.2. Rozwiązania stosowane w innych miastach Polski

W przypadku większości pozostałych miast Polski, klasyczny tor na podsypce i poprzecznych podkładach zabudowany nawierzchnią typu drogowego, wykorzystywany we Wrocławiu do niedawna jedynie na poprzecznych przejazdach i przejściach przez torowisko, jest podstawowym rozwiązaniem stosowanym aż po dzień dzisiejszy, dla różnych rodzajów zastosowań toru zabudowanego, tak jak na przykład w Gdańsku, gdzie podczas remontu skrzyżowania ul. 3 Maja i Nowe Ogrody w roku 2000 zastosowano konstrukcję toru z szyn rowkowych na podkładach drewnianych i podsypce z zabudową asfaltobetonową.

Podstawową wadą toru klasycznego zabudowanego w jezdni ulic są różnice w osiadaniu nawierzchni torowej i drogowej pod obciążeniem eksploatacyjnym, powodujące szybką degradację zabudowy drogowej w strefie przyszynowej, co pociąga za sobą rozszczelnienie nawierzchni i w efekcie dalszą degradację poszczególnych jej elementów składowych. W celu zwiększenia trwałości opisywanego rozwiązania wprowadzane są pewne jego modyfikacje. W Warszawie, w konstrukcjach torów zabudowanych z szyn rowkowych na podkładach drewnianych albo strunobetonowych i podsypce, z zabudową asfaltobetonową albo żelbetowymi płytami prefabrykowanymi (EPT, PPTxW), od początku lat 90-tych stosowane są oprócz klasycznych kruszyw (tłucznia, kłińca) granulaty konsolidujące (o odpowiednio dobranych proporcjach klas uziarnieniu) reaktywne - aktywowane katalizatorami stałymi i ciekłymi (żelami i solami krzemianowymi) z mechanicznym ich zagęszczeniem [50, 137] (ul. Młynarska - 1991, skrzyżowanie Al. Jerozolimskich i ul. Chałubińskiego - 1991). W Sosnowcu podczas remontu torowiska z szyn rowkowych na podkładach strunobetonowych, wbudowanego w jezdnię ul. Małachowskiego w roku 1996 zastosowano w podtorzu geokompozytowe poduszki w postaci worków z geosyntetyku wypełnionych tłucznem, dzięki którym uzyskano wzrost modułu podłoża z około 40 MPa do ponad 120 MPa [63]. W Łodzi podczas remontów skrzyżowań: ul. Kopcińskiego i Narutowicza w roku 2001 oraz ul. Legionów i Zachodniej w roku 2002 zastosowano konstrukcję toru z szyn rowkowych na podkładach strunobetonowych, których nie obsypano podsypką tłuczniovą lecz zabetonowano aż do poziomu spodu główki szyny, pozostawiając miejsce jedynie na zabudowę asfaltobetonową.

W przypadku torów zabudowanych posadowionych na podbudowie w postaci prefabrykowanej płyty żelbetowej, tor tramwajowy z płytami PPT opracowano i po raz pierwszy zastosowano w Łodzi. Oprócz Wrocławia znalazł on szerokie zastosowanie w Poznaniu oraz na terenie aglomeracji górnośląskiej, gdzie jest wykorzystywany do dnia dzisiejszego (przejazdy poprzeczne na ul. Chorzowskiej w Katowicach - 2002).

Tor typu węgierskiego najwcześniej w Polsce pojawił się w Krakowie (ul. Kalwaryjska - 1984). Późniejsze zastosowania oprócz Wrocławia miały miejsce głównie w Łodzi, Warszawie, Szczecinie i Bydgoszczy. Torowiska tego typu nigdy jak dotąd nie zostały użyte w Poznaniu, Gdańsku oraz na terenie aglomeracji górnośląskiej. W Szczecinie podczas remontu torowiska na moście Długim w roku 2000 zastosowano rozwiązanie z szyną blokową toru węgierskiego, ale osadzoną w stalowym korycie wypełnionym żywicą poliuretanową.

W przypadku torów zabudowanych posadowionych na podbudowie w postaci wylewanej płyty betonowej ukształtowały się dwa odmienne sposoby jej wykonania:

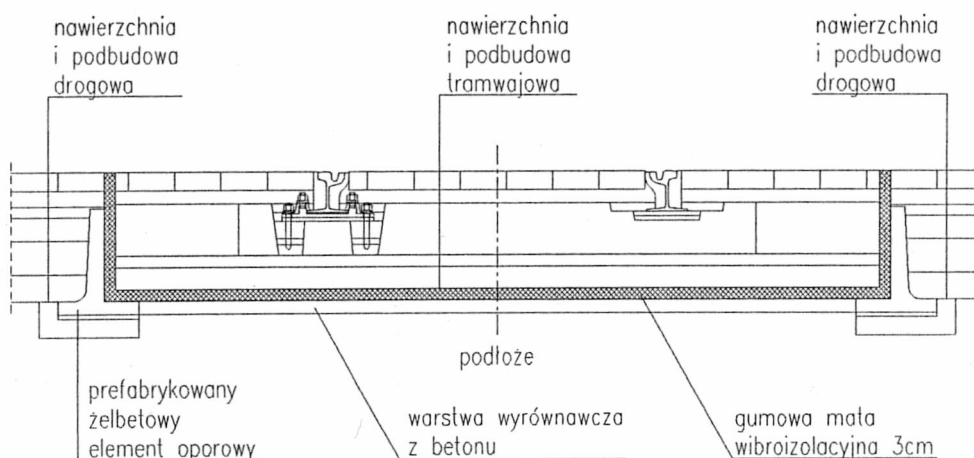
- bez zbrojenia - Wrocław,
- ze zbrojeniem - Poznań, Kraków, Łódź.

W Poznaniu po odejściu od stosowania toru z płytami PPT, zastąpiono go torem na punktowych podporach (most Teatralny - 1995, ul. Głogowska od Hetmańskiej do Ściegiennego - 1998), obecnie jednak preferowany jest tor o ciągłym modelu podparcia, z szyną obłożoną wkładkami gumowymi (ul. Podgórna - 2000). Stosowane wkładki są wykonane z gumy pełnej. Wkładki boczne sięgają 3 cm poniżej poziomu główki szyny w celu uzyskania miejsca na wykonanie przyszynowego zalewu z masy bitumicznej.

Podobnie w Krakowie po odejściu od stosowania toru węgierskiego, zastąpiono go torem na podporach punktowych (skrzyżowanie ul. Franciszkańskiej i Straszewskiego przy budynku filharmonii - 1997 [88], ul. Karmelicka przy teatrze Bagatela - 1997 [21]), obecnie jednak preferowane jest rozwiązanie z ciągłym podlewem żywicą poliuretanową pod stopką szyny do wysokości około 2 cm ponad jej dolną powierzchnię [91], z kotwieniem szyny do podbudowy śrubami z nakrętką i pierścieniem sprężystym, wklejanymi w otwory wywiercone w podbudowie betonowej na klej epoksydowy, poprzez łapki typu Łp opierające się jednym ramieniem na stopce szyny a drugim na przekładce blaszanej spoczywającej na betonie podbudowy, z zabudową chudym betonem i warstwą asfaltobetonu (ul. Westerplatte - 2000, ul. Długa i Kamienna - 2000, ul. Grzegorzewska - 2000, ul. Św. Gertrudy i Stradomska - 2001).

Zastosowanie w Łodzi analogicznej technologii w przypadku remontu torowiska w ul. Zgierskiej w roku 2002 wskazuje na zakończenie okresu stosowania toru węgierskiego w tym mieście, który z kolei był następcą toru z płytami PPT.

W torowiskach zabudowanych na terenie aglomeracji górnośląskiej, począwszy od roku 1995 komory szynowe wypełnia się wkładkami z granulatu gumowego spojonego klejem poliuretanowym [103]. W przypadkach szczególnej konieczności ograniczenia emisji drgań i hałasu elementy wibroizolacyjne stosuje się nie tylko w przytwierdzeniu i podparciu szyny, ale również w podbudowach torowisk - w postaci mat wibroizolacyjnych. Na rys.12 przedstawiono rozwiązanie zastosowane w roku 1995 podczas remontu torowiska tramwajowego położonego wzdłuż ciągu pieszo-tramwajowego w ul. Wolności w Chorzowie, dzięki któremu uzyskano 30 % redukcję emisji przyspieszeń drgań do otoczenia [60].



Rys.12 Przekrój konstrukcyjny toru z matą wibroizolacyjną

Matę z granulatu gumowego ułożono poziomo pod warstwą podbudowy betonowej i w pionie na granicach konstrukcji tramwajowej i drogowej tworząc "wibroizolacyjną

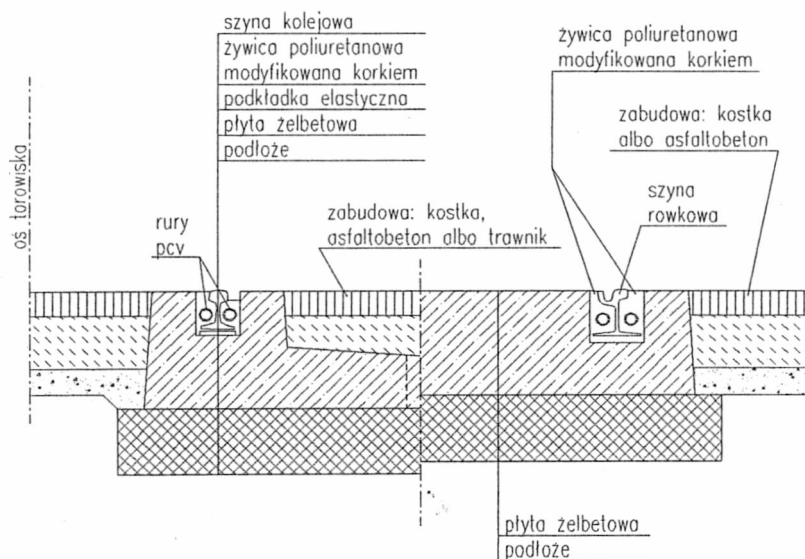
wannę". Rozwiązanie takie nazywane również nawierzchnią lub płytą pływającą [90] zastosowano również w Zabrzu na ul. Wolności w roku 1998.

W Krakowie podczas remontu węzła rozjazdowego na skrzyżowaniu ulic Basztowej i Długiej w 2000 r. pod warstwą żelbetowej podbudowy umieszczono gumowe maty. Podczas remontu torowiska w ul. Bronowickiej na odcinku od ul. Rydla do Stańczyka w roku 2000 zastosowano poduszki z żywicy poliuretanowej wykonane pod strefą podszynową poprzecznych podkładów. Rozwiązanie to wybrano ze względu na sąsiedztwo budynków mieszkalnych. Dodatkowo w celu wytłumienia torowiska zastosowano jego zabudowę trawnikiem w postaci warstwy humusu obsianego trawą na geotkaninie. Taki sam typ zabudowy torowiska wykorzystano w Łodzi w roku 2001 na ul. Piłsudskiego w okolicy stadionu Widzew, tym razem w celu zapobiegnięcia aktom wandalizmu dokonywanym przez niektórych kibiców przy użyciu tłucznia.

3.3. Rozwiązania stosowane za granicą

Spośród konstrukcji zabudowanych torowisk tramwajowych stosowanych za granicą, które jak dotąd nie znalazły zastosowania w kraju, na omówienie zasługują dwa rozwiązania.

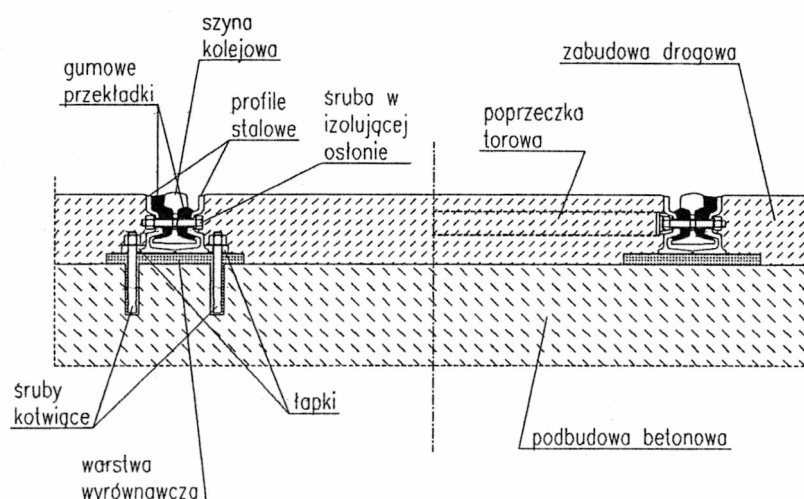
Pierwsze z nich to system torowy "infundo" [111], którego konstrukcję przedstawiono na rys.13.



Rys.13 Przekrój konstrukcyjny toru typu "infundo"

Podbudowę toru stanowi żelbetowa płyta posadowiona na odpowiednio zagęszczonym i wypoziomowanym podłożu, wykonywana specjalną maszyną do układania i zagęszczania betonu na zasadzie krocącego deskowania ślizgowego. Płyta posiada wykształcone koryta do osadzenia szyny kolejowej albo rowkowej w zalewie z żywicy poliuretanowej modyfikowanej korkiem. Żywica stanowi zarówno podparcie jak i przytwierdzenie szyny, izolację wibroakustyczną i elektryczną. W celu zmniejszenia jej zużycia komory szynowe wypełnia się wkładkami z tworzyw sztucznych. Możliwe jest wykonanie płyty o fakturze gładkiej powierzchni albo imitacji kostki, albo też wykształcenie koryt pod zabudowę kostką, asfaltobetonem albo trawnikiem. Ważniejsze realizacje torowiska tego typu miały miejsce w następujących miastach: Walencja - 1992, Sheffield - 1995, Budapeszt - 1995, Monachium -1997.

Drugie z rozważanych rozwiązań to tak zwana "flüsterschiene", czyli w dosłownym tłumaczeniu "szeptażąca szyna" [93]; której konstrukcję przedstawiono na rys.14.



Rys.14 Przekrój konstrukcyjny toru typu "flüsterschiene"

Szyna typu kolejowego jest umieszczona w dwu zewnętrznych profilach stalowych, za pośrednictwem gumowych elastycznych przekładek. Stalowe profile w określonym rozstawie są połączone ze sobą śrubami w izolujących osłonach przechodzącymi przez otwory wywiercone w szycie szyny oraz przytwierdzone za pośrednictwem śrub kotwiących wklejonych w beton podbudowy z nakrętkami i łapkami specjalnej konstrukcji albo jedynie połączone ze sobą poprzeczkami torowymi i zabudowane nawierzchnią drogową. Pomiędzy stalowymi korytami a betonem podbudowy stosuje się warstwę wyrównawczą z cementowej masy niekurczliwej szybkowiążącej. Zabudowa drogowa z betonu, asfaltu albo kostki styka się ze stalowymi profilami obudowy szyn. Gumowe przekładki stanowią izolację wibroakustyczną i elektryczną. Dzięki zastosowaniu stalowych profili nie jest konieczne stosowanie szyny rowkowej dla uzyskania toru zabudowanego.

W analizowanym rozwiązaniu możliwe są ugięcia szyny do 10 mm. Wysoka elastyczność zapewnia tłumienie wstrząsów i wibracji wywołanych przejeżdżającym taborom do 90 %. Ważniejsze realizacje torowiska tego typu miały miejsce w następujących miastach: Karlsruhe - 1992, Kolonia - 1992 i 1998, Brunszwig - 1993, Ludwigshafen - 1995, Brema - 2002.

4. ANALIZA ZAGADNIENIA UGIĘĆ SZYNY W TOROWISKACH TRAMWAJOWYCH

Określeniem stanu wyężenia i odkształcenia poszczęólnych elementów składowych nawierzchni toru oraz podtorza zajmuje się dyscyplina wiedzy nazywana teorią nawierzchni szynowej.

Analizę zagadnienia ugięć szyny w torowiskach tramwajowych przeprowadzono w oparciu o przegląd literaturowy prac teoretycznych i empirycznych z zakresu badań nad wytrzymałością toru. Tematyką tą zajmowało się wielu wybitnych uczonych jak Winkler, Hoffmann, Schwedler, Zimmermann, Engesser, Saller, Hanker, Timoszenko, Eisenmann, a w Polsce Wasiutyński, Skibiński, Nowacki, Basiewicz, Bałuch i inni. Większość tych prac dotyczy torów kolejowych, jednakże ze względu na podobieństwo konstrukcyjne zarówno drogi jak i pojazdów w transporcie kolejowym i tramwajowym, wspomniane rozważania można również stosować w przypadku torów tramwajowych.

Tor jako nawierzchnia szynowa, jest zbiorem elementów (szyny, przytwierdzenia, podkłady albo płyty, podsypka), których jednym z podstawowych zadań jest przejęcie obciążeń od ruchu pojazdów, a następnie przekazanie ich na podłoże gruntowe (rodzime albo nasyp). Spełnienie tego zadania wymaga wzajemnego współdziałania elementów składowych toru i podtorza w taki sposób, aby zachowane były warunki:

- równowagi sił (obciążeń, wzajemnych oddziaływań elementów toru i reakcji podłoża),
- wytrzymałości (nieprzekroczenia dopuszczalnych granic naprężeń materiałów),
- stateczności (nieprzekroczenia dopuszczalnych granic odkształceń).

Elementy składowe nawierzchni szynowych charakteryzują się znaczną sprężystością powodującą występowanie w trakcie eksploatacji, widocznych w wielu przypadkach nawet nie uzbrojonym okiem, przemieszczeń i odkształceń poszczęólnych elementów lub całej konstrukcji. Odkształcenia nawierzchni i podtorza spowodowane przejazdem pojazdu szynowego w przypadku poprawnie zaprojektowanego i zbudowanego toru, znajdującego się w stanie zdatności eksploatacyjnej powinny być:

- sprężyste - powinny ustępować po odciążeniu toru,
- jednorodne - o tej samej wartości na długości toru.

Nie powinny również przekraczać pewnych granicznych wielkości, wynikających z warunków użytkowania.

W przypadku analizy pracy większości konstrukcji inżynierskich określony obiekt zastępuje się odpowiednim modelem teoretycznym, z odpowiadającym mu zapisem matematycznym, po którego rozwiązaniu rachunkowym otrzymuje się pożądane wielkości określające stan wyężenia i odkształcenia obiektu.

W przeciwieństwie do innych typów konstrukcji inżynierskich, charakterystyczne cechy nawierzchni szynowych, takie jak:

- ruchomy charakter obciążeń użytkowych,
- sprężystość zastosowanych materiałów,
- specyficzne ukształtowanie konstrukcji w postaci rusztu,
- odkształcalność podłoża,

powodują przestrzenną współpracę wszystkich elementów składowych toru podczas jego pracy. Tworząc coraz bardziej złożone modele teoretyczne nawierzchni szynowej, coraz lepiej uwzględniające rzeczywiste warunki i cechy jej pracy, natrafia się na wzrastające trudności rozwiązania matematycznego tych modeli oraz pozyskania wartości parametrów niezbędnych do pełnego ich opisu, które mogą być wyznaczone tylko w sposób doświadczalny. Teoretyczne modele nawierzchni szynowych charakteryzują się:

- układem przestrzennym,

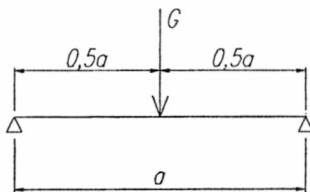
- dynamicznym charakterem obciążeń i oddziaływań,
- dużą liczbą stopni swobody,
- nieliniowością analizowanych zależności,
- stochastyczną zmiennością parametrów,
- uwzględnieniem własności lepko - bezwładnościowo - sprężystych,

w wyniku czego ich rozwiązanie za pomocą klasycznych metod matematycznych okazuje się być bardzo trudne. Dążność do rozwiązania tych modeli prowadzi więc do ich uproszczeń, najczęściej zastępowania układów przestrzennych kilkoma układami płaskimi, rozpatrywania zagadnienia w ujęciu statycznym, redukcji liczby stopni swobody, linearyzacji wielkości nieliniowych, zastępowania stochastycznego zróżnicowania deterministycznym oraz uwzględnienia jedynie własności sprężystych. Owe uproszczenia powodują jednak, że zastosowane metody obliczeniowe pozostają słuszne tylko w pewnych szczególnych warunkach, a w przypadku ogólnym umożliwiają uzyskanie modeli symulujących zjawiska jedynie zbliżone do występujących w rzeczywistości.

4.1. Metody i modele obliczeń nawierzchni szynowej

Na przestrzeni rozwoju dziedziny kolejnictwa opracowano wiele metod obliczeń nawierzchni szynowej.

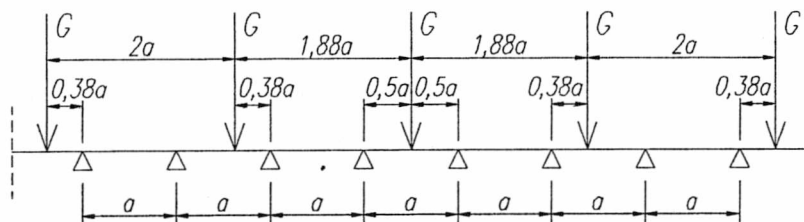
Najwcześniej stosowanym sposobem wyznaczania naprężeń w szynie było potraktowanie jej jako jednoprzęsłowej sprężystej belki wolnopodpartej na dwóch niepodatnych podporach, obciążonej statycznym naciskiem koła pojazdu w środku rozpiętości (rys. 15) [81].



Rys. 15 Szyna jako belka jednoprzęsłowa na dwóch niepodatnych podporach.

Oznaczenia: G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór

W latach 70-tych XIX wieku Winkler określił największy statyczny moment zginający w szynie [135], posługując się metodą trzech momentów dla sprężystej belki ciągłej spoczywającej na nieskończonej ilości niepodatnych podpór i obciążonej jak na rys. 16. Dla tak określonego schematu nawierzchni i obciążenia wyprowadził również (jako pierwszy) wzór na wartość współczynnika dynamicznego.



Rys. 16 Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Winklera. Oznaczenia: G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór

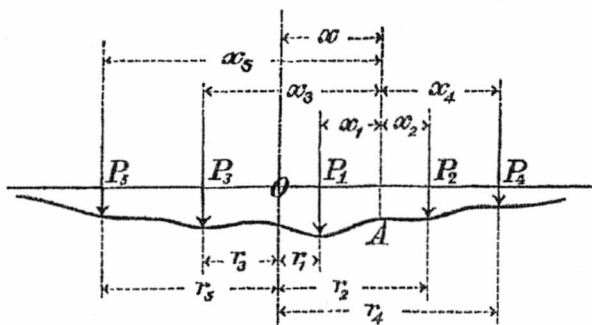
Natomiast w przypadku obliczeń podkładów Winkler zastosował zdefiniowany przez siebie wcześniej [134] model jednostronnego, jednokierunkowego i jednoparametrowego

podłoża podatnego zakładający, że jego ugięcie w dowolnym punkcie jest proporcjonalne do nacisku w tym punkcie i nie zależy od nacisku w punktach sąsiednich, według wzoru:

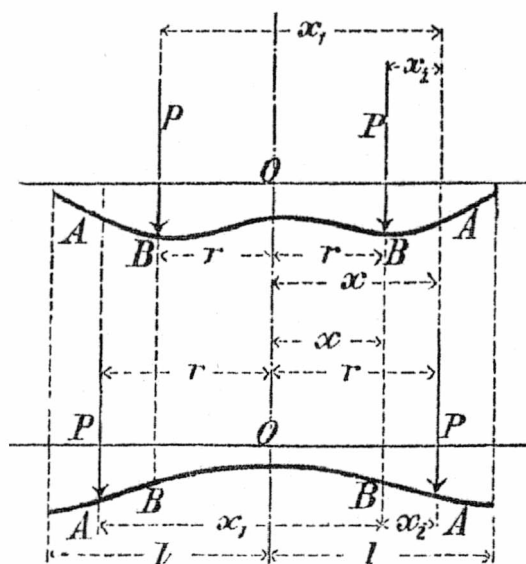
$$p = C \cdot y \quad (7)$$

gdzie: p - nacisk wywierany na podłoże
 C - współczynnik podłoża
 y - ugięcie podłoża

W latach 80-tych XIX wieku Zimmermann [139] zastosował do obliczeń statycznych toru z szynami na podkładach podłużnych nieskończenie długą belkę sprężystą obciążoną pojedynczą siłą lub grupą sił skupionych, spoczywającą na podłożu sprężystym Winklera (rys.17).



Rys.17 Schemat toru z szynami na podkładach podłużnych, jego obciążenia i linia ugięcia rozważane przez Zimmermanna [139]. Oznaczenia: P_i – naciski kół na szynę; x_i i r_i – odległości; O i A – punkty charakterystyczne

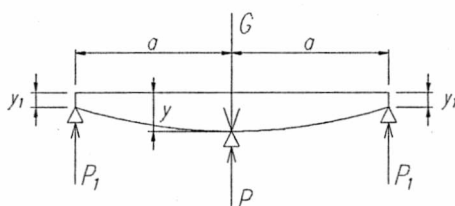


Rys.18 Schemat podkładu poprzecznego, jego obciążenia i linie ugięcia rozważane przez Zimmermanna [139], schemat górny – podkład długi, schemat dolny – podkład krótki. Oznaczenia: P – naciski szyn na podkład; $2l$ – długość podkładu; x_i i r_i – odległości; O , A i B – punkty charakterystyczne

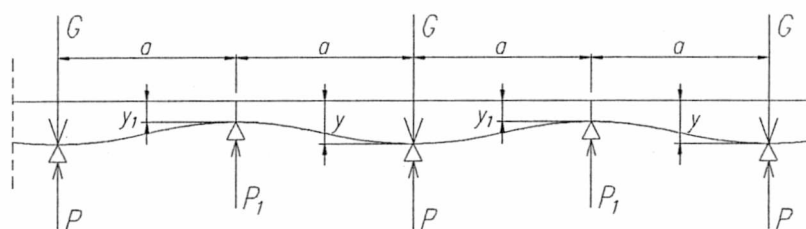
Do obliczeń statycznych poprzecznych podkładów w torze przyjął analogiczny schemat, z tą tylko różnicą że belka jest skończonej długości, a obciążenie - w postaci dwóch symetrycznie rozmieszczonych sił skupionych (rys.18).

W obu powyższych przypadkach obliczenia wykonał wychodząc z równania różniczkowego linii ugięcia belki na sprężystym podłożu oraz zależności (7) charakteryzującej podłoże Winklera, co pozwoliło na wyznaczenie sił wewnętrznych, reakcji oraz ugięć belek.

Natomiast do wyznaczenia nacisku szyny na podkład Zimmermann zastosował schematy opracowane wcześniej przez innych badaczy: Schwedlera (rys.19) i Hoffmanna (rys.20) [64].

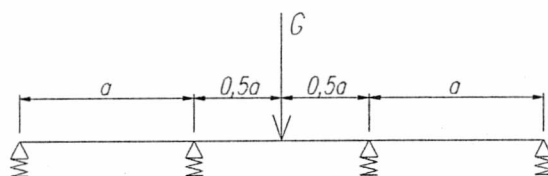


Rys.19 Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Schwedlera. Oznaczenia: G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór; y i y_1 – osiadanania podpór; P i P_1 – reakcje podpór

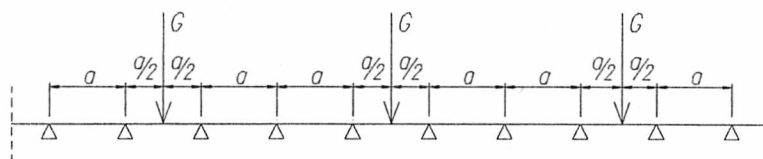


Rys.20 Schemat toru i jego obciążenia przyjęte przez Hoffmanna. Oznaczenia: G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór; y i y_1 – osiadanania podpór; P i P_1 – reakcje podpór

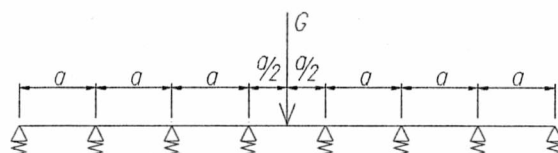
Z kolei do obliczenia momentów zginających szynę w torach na poprzecznych podkładach przyjął schemat pokazany na rys.21, inaczej niż inni badacze: Engesser (rys.22) i Schwedler (rys.23).



Rys.21 Schemat Zimmermanna do wyznaczenia momentu zginającego szynę. Oznaczenia: G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór



Rys.22 Schemat Engessera do wyznaczenia momentu zginającego szynę. Oznaczenia:
 G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór

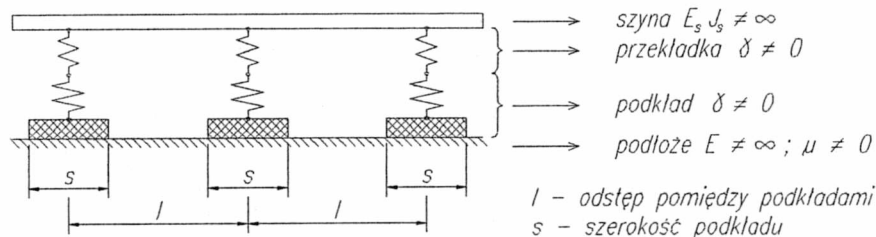


Rys.23 Schemat Schwedlera do wyznaczenia momentu zginającego szynę. Oznaczenia:
 G – nacisk koła na szynę; a – rozstaw podpór

Niedoskonałością metody Zimmermanna obliczania nawierzchni szynowej jako całości było założenie stosowania pod szyną podkładów podłużnych, podczas gdy na kolei znacznie częściej stosuje się podkłady poprzeczne. W związku z tym w latach 30-tych XX wieku Saller, a później Hanker [47] oraz Timoszenko [123] zaproponowali ominięcie tego problemu poprzez zastąpienie podkładów poprzecznych teoretycznym podparciem podłużnym - zachowującym się w ten sam sposób, jak szyna na podkładach poprzecznych oraz poprzez wprowadzenie drobnych modyfikacji do wzorów obliczeniowych Zimmermanna dla toru z szynami na podkładach podłużnych.

W oparciu o model sprężystego podłoża Boussinesqa w latach 40-tych opracowana została przez Gorbunowa-Posadowa [43] teoria izotropowej półprzestrzeni sprężystej, wykorzystywana również do obliczania podkładów nawierzchni szynowych. W modelu tym ugięcie dowolnego punktu podłoża zależy nie tylko od nacisku w tym punkcie, ale i od nacisku w punktach sąsiednich. Podłoże jest charakteryzowane przez dwa parametry: moduł ściśliwości gruntu E_o i współczynnik Poissona μ_o .

W roku 1959 Basiewicz przedstawił uogólniony model nawierzchni szynowej [14] różnicujący odkształcalność poszczególnych jej elementów (przekładki, podkładu i podłoża), której układ statyczny przedstawia belkę ciągłą na sprężystych podporach i podłożu w postaci półprzestrzeni sprężystej (rys.24). Do rozwiązania układu wykorzystał równania kanoniczne mieszanej metody sił i odkształceń znanej ze statyki budowli.

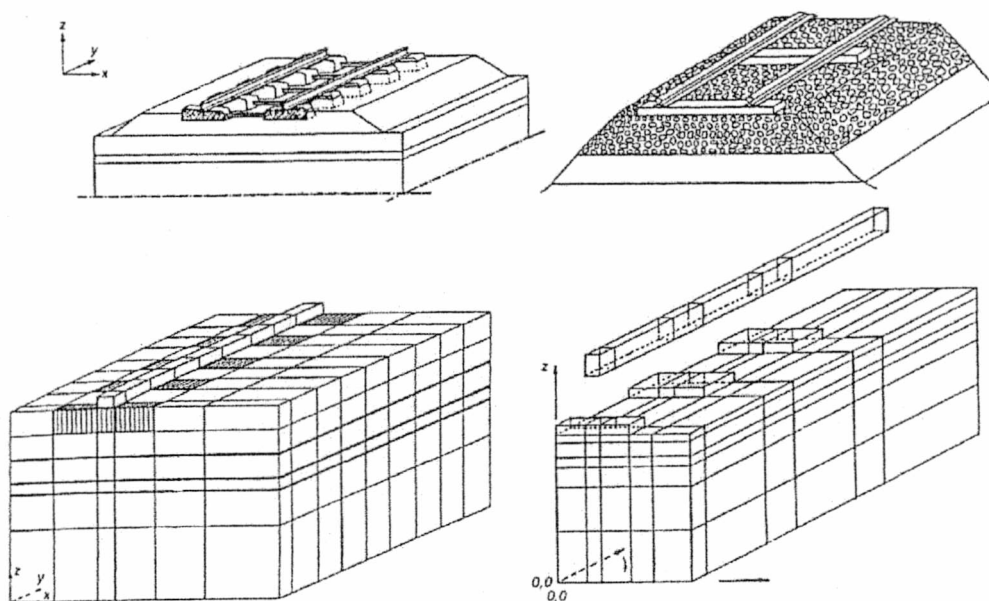


Rys.24 Uogólniony model nawierzchni szynowej według Basiewicza [14]. Oznaczenia:
 $E_s J_s$ - sztywność giętna szyny; γ - ściśliwość (odwrotność sztywności) przekładki i podkładu; E i μ - moduł ściśliwości i współczynnik Poissona podłoża

W drugiej połowie XX wieku, dzięki rozwojowi i upowszechnieniu się komputerowych metod obliczeń nastąpił znaczny postęp również w dziedzinie teorii nawierzchni szynowych, w postaci:

- zmniejszania liczby założeń upraszczających w stosowanych dotychczas modelach obliczeniowych toru (np. uwzględnienie zmienności: sztywności, podparcia i obciążeń belek [67]),
- stosowania bardziej złożonych modeli obliczeniowych toru (np. ruszty [61] lub tarcze [12] zamiast belek; modele stochastyczne rozwiązywane metodami symulacji komputerowych [9] zamiast modeli deterministycznych),
- zastosowania nowych metod obliczeń wobec stosowanych dotychczas albo zupełnie nowych modeli teoretycznych toru (np. metoda różnic skończonych umożliwiającą numeryczne całkowanie równań różniczkowych zginanych belek [34]; metoda elementów skończonych - obecnie podstawowe narzędzie obliczeniowe we współczesnej mechanice).

Ostatnia z wymienionych metod zasługuje na szczególną uwagę, gdyż oprócz możliwości wykorzystania do obliczeń obiektów traktowanych klasycznie - jako dwa oddzielne elementy (np. ruszt + podłoże [59]), umożliwia w zamian przyjęcie niejednorodnej półprzestrzeni (rys.25) [30, 105], przez co cechuje się znacznie większym podobieństwem zastosowanego modelu obliczeniowego do rzeczywistej konstrukcji.



Rys.25 Schemat Desai'a obliczeń toru i podtorza metodą elementów skończonych [119]

Przedstawione powyżej w wielkim skrócie metody obliczania nawierzchni szynowych cechuje bardzo duże zróżnicowanie, ze względu na:

- rozpatrywane modele podłoża (nieodkształcalne albo odkształcalne: Winklera albo półprzestrzeni sprężystej; jedno albo wielowarstwowe; jednorodne albo niejednorodne: deterministycznie albo stochastycznie),
- zastosowane modele obliczeniowe (belki: na podporach albo na podłożu, skończonej albo nieskończonej długości; ruszty; płyty; tarcze),

- przyjęte sposoby obciążeń (siły pojedyncze albo grupy sił, zmienny rozstaw sił, charakter statyczny albo dynamiczny),
- stopień szczegółowości analiz,
- zakres zastosowanych uproszczeń,
- zastosowane metody obliczeń (równania równowagi sił, różniczkowe równania linii ugięcia, MES).

Różnorodność ta wynika po części z poziomu rozpoznania pracy nawierzchni szynowej oraz możliwości dostępnych metod obliczeniowych stosowanych w mechanice i matematyce, które ulegały rozwojowi na przestrzeni czasu, ale również ze zróżnicowania celów jakim miały służyć rozważane metody (np. ujęcie statyczne albo dynamiczne; obliczenia dotyczące tylko jednego albo wszystkich elementów toru), a także konfrontacji na bieżąco zgodności obliczeń teoretycznych z danymi empirycznymi. Okazało się bowiem, że duży stopień skomplikowania metod, w których starano się brać pod uwagę jak najwięcej parametrów, wcale nie przyczyniał się do lepszego odwzorowania pracy konstrukcji rzeczywistej, a wręcz przeciwnie powodował wzrost rozbieżności pomiędzy otrzymywanymi wynikami obliczeń i pomiarów wykonywanych w terenie lub w laboratorium [42]. Dlatego model podłoża Winklera, w którym zarówno proporcjonalność ugięć od nacisków jak i niezależność ugięć punktów od nacisków w sąsiednich punktach należy uznać za znaczne uproszczenia, dzięki swej prostocie okazuje się być bardziej przydatny do obliczeń nawierzchni szynowej, niż inne bardziej skomplikowane modele podłoża [87].

Metody obliczania nawierzchni szynowych oparte na statycznym działaniu obciążeń oraz jednorodnym i sprężystym modelu podłoża określa się mianem metod klasycznych [83]. Metody nowoczesne, uwzględniające dynamiczny charakter obciążeń oraz oddziaływań elementów składowych nawierzchni szynowej, jak również deterministyczną i stochastyczną zmienność warunków podparcia i sztywności tych elementów, są w obecnym stanie rozwoju rozwiązaniami otwartymi, wymagającymi systematycznych i rozległych badań.

Metody klasyczne spotykają się obecnie z krytyką [119], szczególnie w środowiskach nie związanych bezpośrednio z praktycznym zastosowaniem teorii nawierzchni szynowej, podczas gdy wyniki pomiarów terenowych potwierdzają ich zgodność z rzeczywistością nawet w 90 % [64].

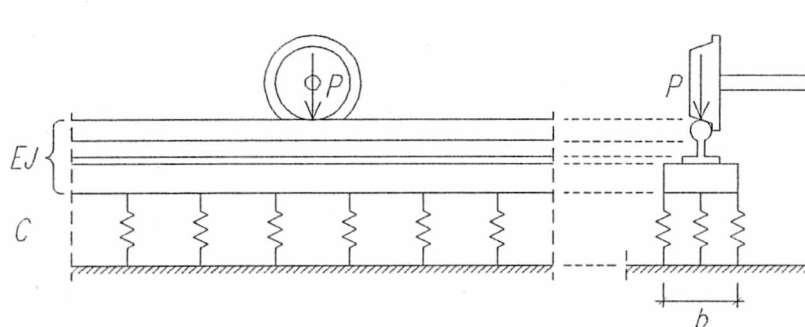
Ze względu na cel i zakres niniejszej pracy obejmujący zagadnienie ugięć szyny pod działaniem statycznego nacisku kół tramwaju, niezbędne do dalszych analiz okazuje się być wybranie z przedstawionych powyżej metod obliczania nawierzchni szynowej przynajmniej jednej z nich, najlepiej spełniającej następujące wymagania:

- umożliwiającej wyznaczenie ugięć szyny,
- rozpatrującej statyczne działanie obciążeń i współdziałanie elementów toru,
- uwzględniającej możliwość obciążenia więcej niż jedną siłą skupioną (dwuosiowy wózek tramwaju),
- proponującej uproszczony i uniwersalny sposób obliczeń, nadający się do powszechnego zastosowania (wobec nowych typów konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych, które mogą się pojawić w przyszłości),
- zawierającej prosty model nawierzchni i podtorza - wymagający niewielkiej liczby danych wejściowych oraz łatwych do wyznaczenia parametrów charakteryzujących konstrukcję.

Wymienione powyżej wymagania w największym stopniu spełnia klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej jako belki na sprężystym podłożu.

4.2. Klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej

Zimmermann założył, że nawierzchnię szynową jako całość stanowią dwie równoległe nieważkie, nieskończenie długie, ciągłe i sprężyste belki o stałym przekroju, składające się z szyn i przymocowanych do nich podkładów podłużnych, spoczywające swobodnie na ciągłym, jednorodnym i sprężystym podłożu typu winklerowskiego [139]. Zakładając równomierny nacisk obciążeń od pojazdów na oba toki szynowe, w dalszych analizach brana jest pod uwagę tylko jedna taka belka oraz obciążenie o wartości równej naciskowi jednego koła pojazdu (rys.26).

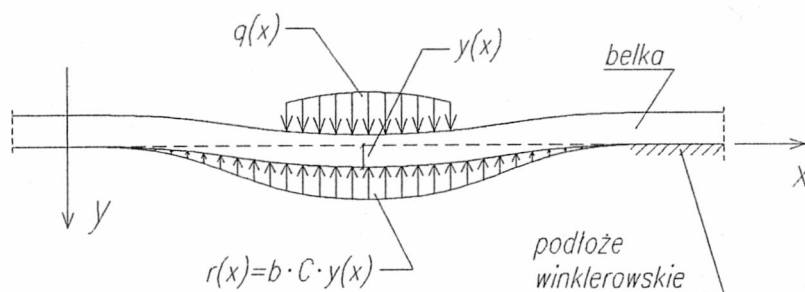


Rys.26 Model Zimmermanna toru z szynami na podkładach podłużnych. Oznaczenia:
 P – nacisk koła na szynę; b – szerokość podstawy podkładu podłużnego; EJ – sztywność giętna belki zespolonej (szyna + podkład podłużny); C – współczynnik podłoża

Równanie odkształcenia osi takiej belki przy zginaniu (rys.27) określa znane ze statyki [87] równanie różniczkowe czwartego rzędu, według następującego wzoru:

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} + r(x) = q(x) \quad (8)$$

gdzie: E - moduł sprężystości materiału belki
 J - moment bezwładności belki względem jej obojętnej osi poziomej
 y - ugięcie belki
 $r(x)$ - odpór podłoża belki
 $q(x)$ - obciążenie statyczne belki



Rys.27 Zginanie belki na sprężystym podłożu (oznaczenia w tekście)

Zgodnie z założeniami modelu podłoża Winklera ($p = C \cdot y$), jego odpór możemy wyrazić następującym wzorem:

$$r = b \cdot C \cdot y \quad (9)$$

gdzie: b - szerokość podstawy belki
 C - współczynnik podłoża

W celu uproszczenia obliczeń wprowadza się nową zmienną ξ według następującego wzoru:

$$\xi = \frac{x}{L} \quad (10)$$

gdzie L jest kolejną nową wielkością, nazywaną długością zastępczą belki na sprężystym podłożu, dobraną w taki sposób aby:

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EJ}{Cb}} \quad (11)$$

Po podstawieniu do równania różniczkowego linii ugięcia belki na sprężystym podłożu (8) wzorów (9), (10) i (11) oraz niewielkich przekształceniach uzyskujemy nową, znacznie prostszą jego postać:

$$\frac{d^4 y}{d\xi^4} + 4y = \frac{4q}{Cb} \quad (12)$$

Przy założonym obciążeniu zewnętrznym oraz zadanych warunkach brzegowych możliwe jest rozwiązanie równania (12) ugięcia belki.

W przypadku obciążenia belki jedynie jedną siłą skupioną P w początku układu współrzędnych ($x = 0$; $\Rightarrow \xi = 0$) wyrażenie z prawej strony znaku równości we wzorze (12) przyjmuje wartość zero (brak obciążenia ciągłego q). Po czterokrotnym scałkowaniu oraz uwzględnieniu warunków brzegowych (dla $\xi = 0$ oraz $\xi = \infty$) pozwalających wyliczyć stałe całkowania, uzyskuje się rozwiązanie równania różniczkowego w postaci:

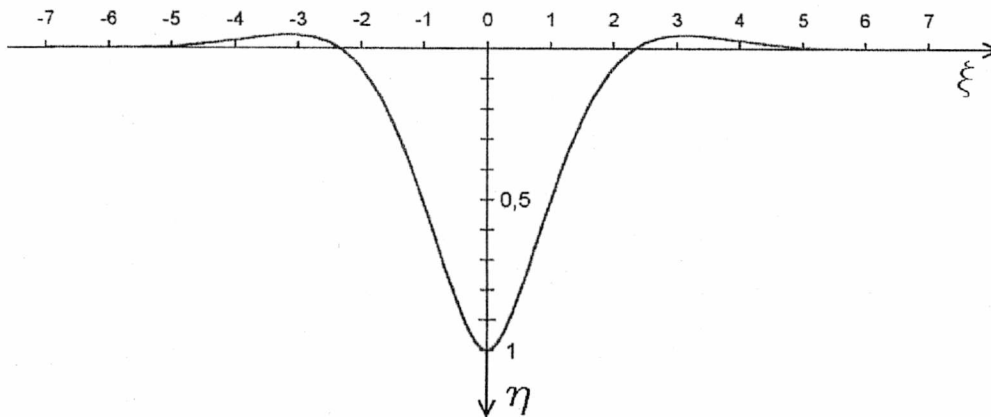
$$y = \frac{P}{2CbL} \cdot \eta(\xi) \quad (13)$$

gdzie: P - statyczna siła skupiona obciążająca belkę
 η - rzędna wykresu linii wpływowej ugięcia, obliczana według następującego wzoru:

$$\eta(\xi) = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) \quad (14)$$

gdzie: e - podstawa logarytmu naturalnego
 ξ - odcięta wykresu linii wpływowej ugięcia

Na rys.28 przedstawiono wykres zależności η od ξ . Przedstawiona krzywa jest linią ugięcia $y(\xi)$ nieskończenie długiej i sprężystej belki na podatnym podłożu typu winklerowskiego, obciążonej pojedynczą siłą skupioną $P = 1$ w początku układu współrzędnych ($\xi = 0$) dla $2CbL = 1$.



Rys.28 Wykres zależności η od ξ

Z zasady wzajemności przesunięć wynika ponadto, że krzywa ta jest jednocześnie linią wpływu ugięcia y w przekroju $\xi = 0$, wobec czego w przypadku wystąpienia obciążenia w postaci zespołu n statycznych sił skupionych P_i , stosując zasadę superpozycji otrzymujemy wzór na wartość ugięcia szyny:

$$y = \frac{1}{2CbL} \sum_{i=1}^n P_i e^{-\frac{x_i}{L}} \left(\cos \frac{x_i}{L} + \sin \frac{x_i}{L} \right) \quad (15)$$

gdzie: P_i - wartość i -tego nacisku
 x_i - odległość ustawienia i -tego nacisku od miejsca ugięcia

Przedstawioną powyżej metodę obliczeń nawierzchni kolejowej według Zimmermanna można zastosować do obliczania ugięć toru z szyną podpartą w sposób ciągły, przy czym niezbędne są następujące zmiany w interpretacji oznaczeń ze wzorów (8) ÷ (15):

- b - szerokość stopki szyny,
- C - współczynnik podłoża pod stopką szyny,
- E - moduł sprężystości stali szynowej,
- J - moment bezwładności przekroju szyny względem jej obojętnej osi poziomej.

W przypadku obliczania ugięć toru z szyną podpartą w sposób dyskretny, konieczne jest ponadto uwzględnienie modyfikacji metody zaproponowanych przez Sallera i Hankera albo Timoszenkę, polegających na zastąpieniu podparcia poprzecznego teoretycznym podparciem podłużnym, w wyniku czego we wzorach (8) ÷ (15) zamiast szerokości stopki szyny b należy używać wielkości b_z , obliczanej według wzorów:

według Sallera-Hankera:

$$b_z = \frac{b_p \cdot 2u}{l} \quad (16)$$

według Timoszenki:

$$b_z = \frac{\alpha \cdot b_p \cdot a}{2l} \quad (17)$$

gdzie: b_z - szerokość zastępcza teoretycznego podparcia podłużnego

- b_p - szerokość podkładu poprzecznego
- u - odległość od osi szyny do końca podkładu poprzecznego
- l - rozstaw podkładów poprzecznych w torze
- α - współczynnik ugięcia podkładu poprzecznego (stosunek ugięcia średniego do maksymalnego; przyjmuje się zwykle 0,8 dla podkładów drewnianych i 1 dla betonowych [8])
- a - długość podkładu poprzecznego

Ze względu na ułatwienie obliczeń częściej jednak we wzorach (8) ÷ (15) zastępuje się iloczyn wielkości C i b współczynnikiem podłoża szyny U albo ilorazem wielkości D i l gdzie D oznacza współczynnik podparcia szyny. Wielkości U oraz D , podobnie jak C są miarami sztywności podparcia szyny i zostaną szczegółowo omówione w następnym rozdziale niniejszej pracy.

Powyższe rozważania przeprowadzono przy następujących założeniach oraz uproszczeniach dotyczących zastosowanego modelu nawierzchni szynowej - dotąd niewymienionych:

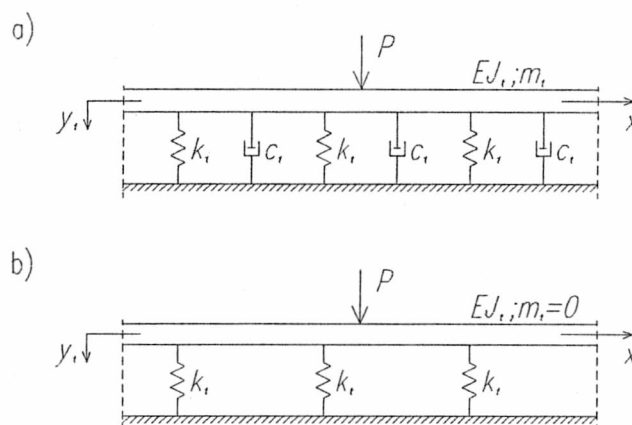
- tor jest odcinkiem prostym,
- uwzględnia się jedynie składowe pionowe obciążeń i jedynie zginanie belki (obciążenia działają w pionowej osi symetrii przekroju poprzecznego belki),
- zakłada się, że podłoże jest w stanie przenosić siły rozciągające (ujemne ugięcia na wykresie η od ξ),
- pomija się tarcie występujące pomiędzy belką (szyną) i jej podłożem, oraz wspomnianych już:
- rozpatruje się jedynie ujęcie statyczne,
- uwzględnia się cechy podłoża Winklera (ugięcia są proporcjonalne do nacisków w danym punkcie i nie zależą od nacisków w punktach sąsiednich),
- zakłada się jednorodność i ciągłość podłoża oraz stały przekrój i ciągłość belki (szyny),
- nie bierze się pod uwagę ciężaru własnego belki (szyny).

Przedstawiona powyżej klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej opiera się na równaniu różniczkowym linii ugięcia belki na sprężystym podłożu. W mechanice budowli używa się obecnie innych niż zastosowany przez Zimmermanna sposobów wyprowadzenia tego równania, na przykład u Nowackiego [87]:

- z rozważań belek ciągłych na sprężystych podporach poprzez zbliżenie podpór nieskończenie blisko siebie,
- z rozważań nad równowagą elementu objętościowego belki.

4.3. Sztywność toru

W analizie zagadnienia ugięć szyny, parametrem o kluczowym znaczeniu jest sztywność toru, którą determinują jego własności lepko-bezwładnościowo-sprężyste [45, 56], co przedstawiono w postaci uproszczonego modelu na rys.29 a). W niniejszej pracy rozpatrywany jest jednak przypadek unoszenia się szyny toru po zdjęciu z niej pionowego obciążenia, w wyniku odjazdu koła tramwajowego z zatrzymania, z prędkością nie przekraczającą 5 km/h, dlatego wystarczające jest rozpatrywanie zagadnienia w ujęciu statycznym, z pominięciem dynamiki i reologii zachodzących oddziaływań. W modelu możemy więc zaniedbać własności bezwładnościowe ($m_t = 0$) oraz lepkie (eliminacja tłumików c_t), co przedstawiono na rys.29 b), uwzględniając jedynie bezpośredni wpływ masy i tłumienia na własności sprężyste (na przykład zmniejszenie wartości k_t w przypadku odciążania, w stosunku do obciążania - histereza).



Rys.29 Modele toru: a) uwzględniający własności lepko-bezwładnościowo-sprężyste; b) z pominięciem własności lepko-bezwładnościowych. Oznaczenia: P – nacisk koła na tor; EJ_t – zastępcza sztywność giętna toru; m_t – zastępcza masa toru; y_t – przemieszczenie pionowe środka masy zastępczej toru; k_t – zastępczy współczynnik sztywności toru w kierunku pionowym; c_t – zastępczy współczynnik tłumienia toru w kierunku pionowym.

Istnieje wiele sposobów definiowania sztywności toru, w zależności od tego jak skomplikowany model teoretyczny nawierzchni szynowej został zastosowany do jej analizy.

Najprostszym sposobem jest potraktowanie toru jako jednego elementu i określenie jego sztywności odsprężynowania k_{ot} w postaci stosunku nacisku koła pojazdu szynowego do wywołanego tym naciskiem ugięcia sprężystego szyny, według wzoru:

$$k_{ot} = \frac{P}{y} \quad (18)$$

gdzie: k_{ot} - sztywność odsprężynowania toru [kN/mm]
 P - nacisk statyczny albo quasistatyczny koła pojazdu szynowego [kN]
 y - ugięcie sprężyste szyny [mm]

Według badań niemieckich z lat 50-tych [13], w przypadku klasycznego toru kolejowego na poprzecznych podkładach i podsypce, średnie wartości sztywności odsprężynowania toru wynoszą:

- dla podkładów z drewna miękkiego - 70 kN/mm
- dla podkładów z drewna twardego - 120 kN/mm
- dla podkładów betonowych - 180 kN/mm.

W ostatnio zrealizowanych badaniach krajowych na torze doświadczalnym w Żmigrodzie [45], uzyskano podobne wyniki:

- dla podkładów z drewna miękkiego - 82 kN/mm
- dla podkładów z drewna twardego - 110 kN/mm
- dla podkładów betonowych - 203 kN/mm.

Według badań czeskich z lat 70-tych przeprowadzonych dla torowisk tramwajowych [127] średnie wartości sztywności odsprężynowania toru wynoszą:

- dla konstrukcji klasycznej - 50 - 60 kN/mm
- dla toru typu węgierskiego - 31,2 kN/mm

Omawiany sposób definiowania sztywności nawierzchni szynowej jest jednak mało przydatny, gdyż praktycznie dla każdej konstrukcji toru różniące się chociażby jednym elementem składowym należy oczekiwać innych wartości jej sztywności.

Znacznie szersze zastosowanie znalazły metody definiowania sztywności nawierzchni szynowej bazujące na sztywnościach poszczególnych jej elementów składowych.

W klasycznym modelu teoretycznym nawierzchni szynowej przedstawionym w poprzednim punkcie niniejszej pracy (belka na sprężystym podłożu) tor jest traktowany jako układ dwuelementowy: szyna i jej podłoże. Z punktu widzenia pionowych ugięć toru szyna pracuje na zginanie (sztywność giętna EJ), natomiast podłoże szyny - na ściskanie (współczynnik podłoża C).

Szyna pod względem sztywności jest łatwo identyfikowalnym elementem składowym toru. Cechuje ją duża jednorodność zarówno tworzywa jak i kształtu. Parametrem sztywności tworzywa jest moduł sprężystości wzdłużnej (Younga) E stali szynowej wynoszący $2,1 \cdot 10^5$ MPa [85], natomiast parametrem sztywności kształtu - moment bezwładności J jej przekroju poprzecznego względem obojętnej osi poziomej, uzyskujący w zależności od typu szyny następujące wartości:

kolejowa	- S49:	$1,815 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
rowkowa	- Ri60N:	$3,299 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
	- 180S:	$3,514 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
blokowa	- B1:	$0,304 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$
	- B3:	$0,268 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$

Jedynie w miejscach takich jak: szyny przejściowe, spoiny termitowe, styki łubkowe, urządzenia wyrównawcze, zwrotnice i krzyżownice, następuje lokalna zmienność omawianej sztywności kształtu szyny. W trakcie eksploatacji moment bezwładności J szyny ulega zmniejszeniu na skutek ścierania się główek oraz korozji.

Podłoże szyny pod względem sztywności jest znacznie trudniej identyfikowalne, gdyż obejmuje bardzo szeroki zakres elementów składowych nawierzchni szynowej takich jak: przekładki, przytwierdzenia, podkłady, płyty, podsypka, nasyp, podłoże - dla których określenie sztywności zarówno dla każdego elementu z osobna, jak i ogólnej (zastępczej) jest zagadnieniem znacznie bardziej skomplikowanym. Elementy składowe toru stosowane w podłożu szyny:

- obejmują bardzo szeroki zakres tworzyw: stal, drewno, beton cementowy lub asfaltowy, kruszywa mineralne, masy bitumiczne, tworzywa sztuczne, grunty nasypowe i naturalne - stanowiących zarówno ośrodki ciągłe, rozdrobnione jak i pośrednie; o cechach sprężystych, lepkich, plastycznych albo ich kombinacjach; wykazujące wysoką izotropowość (stal) albo anizotropowość (drewno wzdłuż i w poprzek włókien) oraz niezmienność albo stochastyczne różnicowanie właściwości w obrębie tworzywa (grunty),
- są materiałami jednorodnymi albo kompozytami (beton zbrojony; elastomery modyfikowane korkiem),
- są wykonywane na budowie albo stosowane w formie prefabrykatów, przez co cechuje je zróżnicowanie tolerancji wymiarów i stopnia przestrzegania reżimów technologicznych,
- pracują w zakresie odkształceń tylko sprężystych albo sprężystych i plastycznych (grunty, kruszywa),
- stanowią różne modele podparcia szyny (ciągły, punktowy, pośredni - strefowy),
- posiadają różny stopień skomplikowania budowy (na przykład przytwierdzenia bezpośrednie i pośrednie), przez co podlegają różnym typom wzajemnych oddziaływań, mniej lub bardziej stochastycznie zmiennym,

- podlegają nieustannemu zużyciu eksploatacyjnemu (zmiana wymiarów, uszkodzenia, zanieczyszczenie) i procesom wynikającym ze starzenia się i oddziaływania czynników atmosferycznych (korozja, gnicie, parzenie),
- pracują w zmiennych warunkach klimatycznych (temperatura, wilgotność).

W przypadku elementów ze stali i betonu występujących w podłożu szyny (podkładki żebrowe, podkłady żelbetowe i płyty torowe i podtorzowe), ze względu na bardzo dużą sztywność tych tworzyw, pomija się ich odkształcalność przy ściskaniu.

Dla elementów zginanych występujących w podłożu szyny (podkłady poprzeczne oraz płyty na podsypce, łapki sprężyste w przytwierdzeniach) ich sztywność giętą sprowadza się do sztywności przy ściskaniu. Dla uwzględnienia zginania poprzecznego podkładu opartego na podsypce we wzorze (17) stosuje się współczynnik α wyrażający stosunek średniego ugięcia podkładu do maksymalnego, występującego w przekroju podszynowym. Zgodnie z wynikami obliczeń teoretycznych (według modelu belki skończonej długości na sprężystym podłożu) oraz badań empirycznych przyjmuje się zwykle [8]:

- dla podkładów drewnianych: $\alpha = 0,8$
- dla podkładów betonowych: $\alpha = 1$

Wartość współczynnika α uzyskana dla podkładów betonowych pozwala w ich przypadku oraz poprzez analogię w przypadku żelbetowych płyt torowych i podtorzowych na pomijanie ich zginania przy obliczaniu pionowych ugięć toru.

Poprzeczny podkład drewniany cechuje duża anizotropia jego sztywności wzdłuż i w poprzek włókien. Analizując zginanie podkładu drewnianego należy brać pod uwagę moduł sprężystości wzdłużnej E drewna wynoszący $0,11 \cdot 10^5$ MPa [85], natomiast w przypadku jego pionowego ściskania - znacznie mniejszy moduł sprężystości drewna na ściskanie prostopadłe do włókien E'' wynoszący według różnych badań od 80 do 300 MPa [3, 40, 48, 81].

W tabeli 1 podano średnie wartości modułów sprężystości E dla materiałów stosowanych najczęściej w torowiskach tramwajowych jako podbudowy oraz występujących w podłożu. W przypadku ośrodków ciągłych jako modułu sprężystości E używa się modułu Younga, natomiast w przypadku ośrodków rozdrobnionych - wtórnego modułu odkształcenia.

W przypadku materiałów wibroizolacyjnych stosowanych w nawierzchniach szynowych, ze względu na ich zróżnicowany kształt (przekładki pełne, otworowane, z pustkami powietrznymi, o powierzchni płaskiej, rowkowanej, dołkowanej) i niekiedy złożoną budowę (kompozytowe) do określenia ich sztywności nie używa się jak dotychczas modułu sprężystości E tworzywa z którego są wykonane, lecz następujących innych miar:

- dla przekładek i podlewów o określonych wymiarach powierzchniowych, stosowanych w punktowym modelu podparcia szyny - współczynników sztywności k [kN/mm], wyrażonych jako stosunek siły F obciążającej przekładkę lub podlew do wielkości ugięcia y wywołanego tym obciążeniem, według wzoru:

$$k = \frac{F}{y} \quad (19)$$

- dla przekładek w formie taśm i podlewów, stosowanych w ciągłym modelu podparcia szyny - współczynników sztywności k jak wyżej, z tą tylko różnicą, że określonych dla wymiaru podłużnego przekładki lub podlewu wynoszącego 1 m [89];

- dla mat układanych na całej powierzchni torowiska - winklerowskiego współczynnika podłoża C [N/mm³] według wzoru (7).

W tabelach 2 - 5 przedstawiono orientacyjne wartości współczynników sztywności dla materiałów wibroizolacyjnych stosowanych najczęściej w torowiskach tramwajowych.

Tab.1 Moduły sprężystości podbudów i podłoży torów

L.p.	Materiał	E [MPa]	źródło
1	beton cementowy: - B35	31 500	[99]
2	- B30	30 500	[99]
3	- B25	29 000	[99]
4	beton epoksydowy	25 000 - 35 000	[49]
5	asfaltobeton (przy temperaturze 30°C)	700 - 800	[27]
6	chudy beton (II etap pracy - ze spękaniem)	400	[53]
7	kruszywo łamane stabilizowane mech.	400	[53]
8	kruszywo naturalne stabilizowane mech.	200	[53]
9	tłuczeń: - granitowy	500	[27]
10	- wapienny	200	[27]
11	żwir	200 - 300	[27]
12	piasek, pospółka, odsiewki	150	[27]
13	grunt stabilizowany: - cementem	200 - 450	[27]
14	- bitumem	150 - 200	[27]
15	- wapnem	60 - 150	[27]
16	grunt spoisty	10 - 82	[27]
17	kauczuk naturalny	8	[85]

Tab.2 Współczynniki sztywności przekładek podszynowych

L.p.	Materiał	k [kN/mm]	źródło
1	drewniana (topolowa)	240 - 400	[6, 14, 19]
2	polietylenowa (o grubości 6 mm)	100 - 150	[6, 84]
3	poliuretanowa: - płaska (o grubości 6 mm)	1000	[20]
4	- dołkowana gęsta	36	[20]
5	- dołkowana rzadka	19	[20]
6	gumowa rowkowana: - cienka (4,5 mm)	120	[13]
7	- gruba (22 mm)	27	[13]
8	gumowa o grubości 10 mm: - pełna	90	[1]
9	- rowkowana	60	[1]
10	elastomerowo - korkowa o grub. 10 mm	136,8	[122]

Tab.3 Współczynniki sztywności przekładek podpodkładowych

L.p.	Materiał	k [kN/mm]	źródło
1	elastomerowo - korkowa o grub. 15 mm	11,4 - 17,9	[89]

Tab.4 Współczynniki sztywności podlewów wibroizolacyjnych

L.p.	Materiał	k [kN/mm]	źródło
1	poliuretanowy: - podlew punktowy podpodkładowy	10,9 - 23,3	[115]
2	- podlew ciągły pod stopką szyny	39,2 - 82	[115]

Tab.5 Współczynniki sztywności mat wibroizolacyjnych

L.p.	Producent	C [N/mm ³]	źródło
1	Tiflex	0,015 - 0,1	[122]
2	Clouth	0,01 - 0,2	[25]
3	Phoenix	0,01 - 0,06	[95]

Elementy wibroizolacyjne stosowane w przytwierdzeniach (przekładki, podlewy) występują najczęściej w parze z elementami kotwiącymi (łapki, wkręty, śruby, nakrętki, pierścienie sprężyste, podkładki żebrowe), które dla właściwej współpracy obu omawianych rodzajów elementów muszą również zapewnić pionową sprężystość kotwienia. W starszych konstrukcjach przytwierdzeń (typu K) funkcje te pełnią pierścienie sprężyste, natomiast w nowszych - łapki sprężyste (SB3, skl). Sztywność tych elementów, z punktu widzenia pionowych ugięć toru, określa się tak jak w przypadku przekładek i podlewów współczynnikiem sztywności k [kN/mm]. Dla pozostałych stalowych elementów kotwiących przytwierdzeń można założyć ich niepodatność. W tabeli 6 przedstawiono orientacyjne wartości współczynników sztywności łapek i pierścieni sprężystych.

Tab.6 Współczynniki sztywności łapek i pierścieni sprężystych

L.p.	Materiał	k [kN/mm]	źródło
1	łapki sprężyste (klamry)	0,7 - 1,5	[6, 84, 129]
2	pierścienie sprężyste	7 - 20	[1, 5, 13]

Określoną wcześniej pionową sztywność ściskanego podkładu drewnianego w postaci modułu sprężystości drewna na ściskanie prostopadłe do włókien E'' często również zastępuje się współczynnikiem sztywności k [kN/mm], który według różnych badań [3, 40, 48, 81] przyjmuje wartości od 30 do 120 kN/mm.

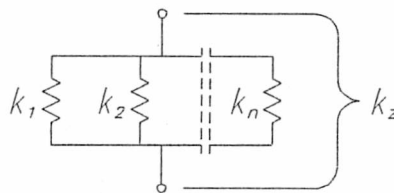
Na podstawie wymienionych powyżej miar sztywności poszczególnych elementów składowych konstrukcji nawierzchni szynowych możliwe jest określenie ogólnej (zastępczej) sztywności podłoża szyny - jako całości lub tylko pewnej jego części. Ściskane elementy podatne ośrodków ciągłych w podparciu szyny (przekładki i podkładki, łapki i pierścienie sprężyste, podkłady drewniane) pracują w połączeniach równoległych, szeregowych albo ich kombinacjach. Sztywność zastępczą k_z zespołu n elementów o sztywnościach k_i wyznacza się ze wzorów:

- w przypadku połączenia równoległego (rys.30):

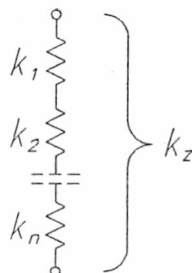
$$k_z = \sum_{i=1}^n k_i \quad (20)$$

- w przypadku połączenia szeregowego (rys.31):

$$\frac{1}{k_z} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \quad (21)$$



Rys.30 Sztywność zastępcza układu równoległego



Rys.31 Sztywność zastępcza układu szeregowego

Przykładem połączenia równoległego jest współdziałanie przekładki podszynowej i łapek lub pierścieni sprężystych w przytwierdzeniu, jak również współdziałanie przekładki pod podkładką żebrową i pierścieni sprężystych na śrubach albo wkrętach kotwiących ją do podkładu albo podbudowy. Przykładem połączenia szeregowego jest natomiast współdziałanie obu wymienionych połączeń równoległych wraz z podatnością podkładu drewnianego. Ściskane elementy podatne ośrodków rozdrobnionych w podparciu szyny (podsypka, warstwa ochronna, podłoże) tworzą szeregowy układ warstw. W analizach pracy toru, podobnie jak w drogownictwie używa się w tym wypadku metod teoretycznych, teoretyczno-empirycznych i empirycznych wyznaczania zastępczej sztywności takiego wielowarstwowego podłoża [73, 74, 108]. W kolejnictwie przy wymiarowaniu warstw ochronnych instrukcja D4 [27] zaleca stosowanie metody ekwiwalentnego modułu sprężystości wzorowanej na metodach DORNII i OSZD.

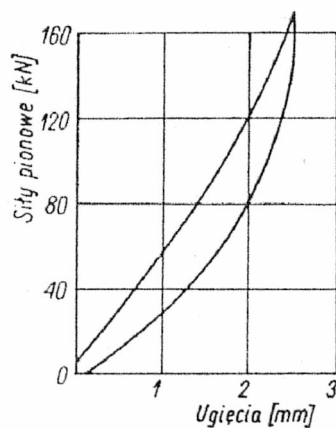
Miary sztywności poszczególnych elementów składowych konstrukcji nawierzchni szynowych używane w analizie pracy toru nie mogą być jednak traktowane równorzędnie, gdyż różnią się one pod wieloma względami, co jest kolejnym utrudnieniem w określeniu ogólnej sztywności toru na podstawie sztywności jego elementów składowych. Przyczyny zróżnicowania analizowanych miar sztywności możemy określić jako:

- materiałowe,
- wykonawcze,
- konstrukcyjne,
- eksploatacyjne.

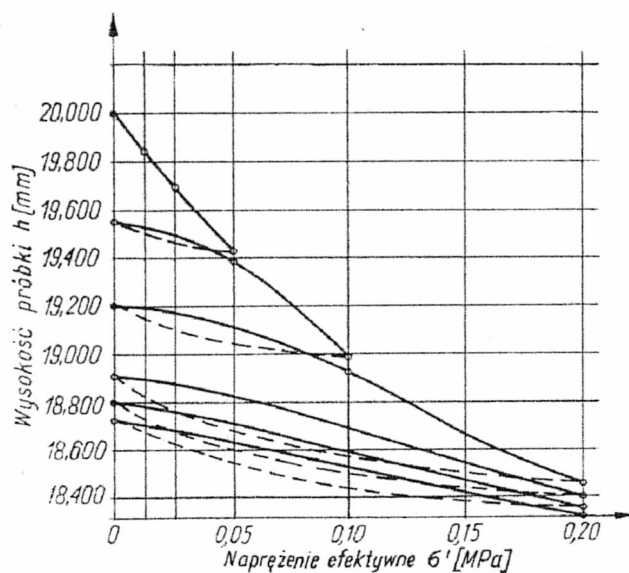
Jedynie w przypadku stali i betonu ich moduł sprężystości E pozostaje w zasadzie niezmienny w różnych warunkach obciążeń (statyczne albo dynamiczne, obciążanie albo odciążanie, zmiana przedziału wartości sił) oraz klimatycznych (temperatura i wilgotność), a także w miarę wzrostu wieku konstrukcji.

W przypadku gruntów, kruszyw i tworzyw sztucznych ich miary sprężystości (E , k , C) są zmienne w zależności od wartości siły obciążającej oraz inne dla cyklu obciążania i odciążania, a w przypadku gruntów i kruszyw dodatkowo inne w kolejnych cyklach obciążeń. Na rysunkach 32 - 35 przedstawiono przykładowe wykresy

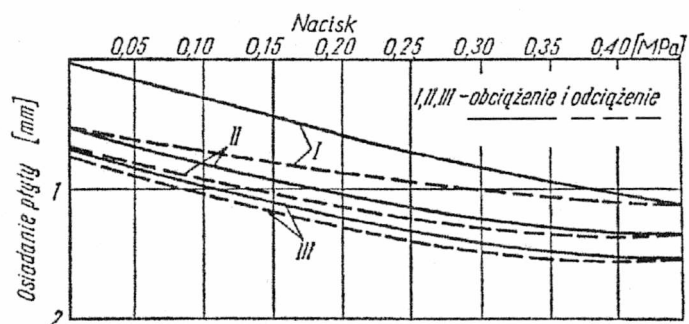
charakterystyk "siła - ugięcie" dla różnych metod określania sprężystości materiałów występujących w nawierzchniach szynowych.



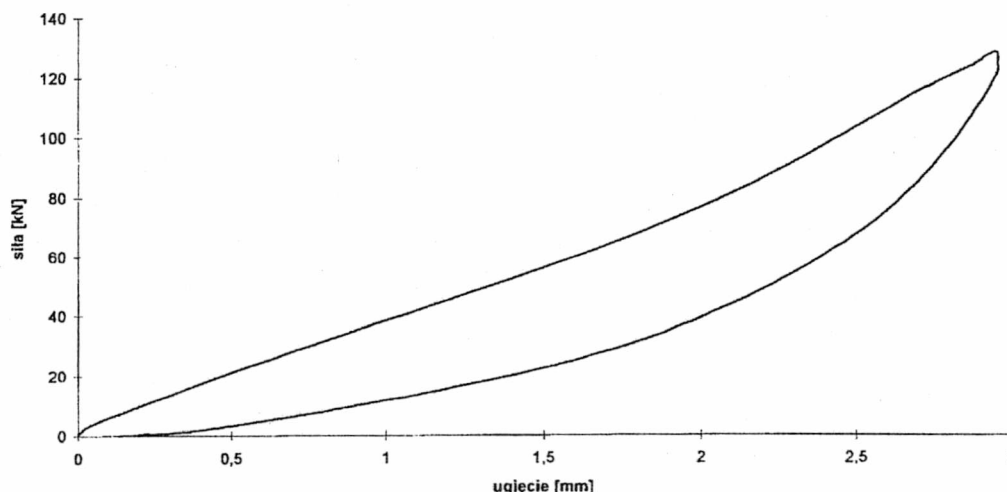
Rys.32 Wykres ugięć toru przy pomiarze współczynnika podłoża szyny [40]



Rys.33 Krzywa ścisłości gruntu z badań edometrycznych [133]



Rys.34 Wykres obciążeń gruntu sztywną płytą naciskową VSS [107]



Rys.35 Charakterystyka statyczna przytwierdzenia szyny [20]

Cechami wspólnymi tych wykresów są:

- przedstawione charakterystyki mają kształt nieliniowy progresywny tzn. wraz ze wzrostem obciążenia maleją przyrosty odkształceń; charakterystyki te są w praktyce często linearyzowane w pewnych przedziałach obciążeń albo wokół wybranej wartości, albo też aproksymowane przez funkcje biliniowe [19, 80],
- linie obciążenia nie pokrywają się z liniami odciążenia, co w efekcie powoduje uzyskanie pętli histerezy charakteryzującej zdolność pochłaniania i rozpraszania energii w nawierzchni szynowej (tłumienie drgań), będącej skutkiem lepkich właściwości badanych materiałów.

Dla przekładki elastomerowej zastosowanej w nawierzchni metra warszawskiego jej sztywność statyczna dla przedziału obciążeń $15 \div 35$ kN wynosi 11,4 kN/mm, natomiast dla przedziału $35 \div 50$ kN już 17,9 kN/mm czyli około półtora raza więcej [89].

W przypadku kruszyw i gruntów sypkich ich moduł sprężystości zmienia się wraz ze stopniem ich zagęszczenia, natomiast w przypadku gruntów spoistych - wraz ze zmianą wilgotności: według instrukcji D4 [27] od 10 do 82 MPa, czyli aż ośmiokrotnie.

W przypadku gruntów, kruszyw i tworzyw sztucznych, ich miary sprężystości (E , k , C) uzyskują różne wartości dla obciążeń statycznych i dynamicznych (wartości podane w tabelach 1 - 6 dotyczą obciążeń statycznych). Według badań radzieckich w przypadku obciążeń dynamicznych następuje wzrost sztywności k przekładek polimerowych od 6 do 8 razy [6], natomiast wartość modułu odkształcenia gruntu E wzrasta od 5 do 6 razy [117].

W przypadku gruntów, kruszyw, bitumów i tworzyw sztucznych, ich miary sprężystości (E , k , C) uzyskują różne wartości w zależności od temperatury (wartości podane w tabelach 1 - 6 dotyczą temperatury pokojowej albo okresu lata). Sztywność podlewu poliuretanowego k wynosząca w temperaturze pokojowej 30 kN/mm wzrasta do 37,5 kN/mm w temperaturze 0°C [1], natomiast moduł sprężystości E asfaltobetonów przy spadku temperatury od 30°C do 15°C wzrasta około dwukrotnie [133].

W przypadku tworzyw sztucznych ich sprężystość zmienia się z wiekiem. Według badań japońskich sztywność k przekładki gumowej po 12 latach zwiększa się z 90 do 150 kN/mm czyli o dwie trzecie [6], natomiast według badań kanadyjskich

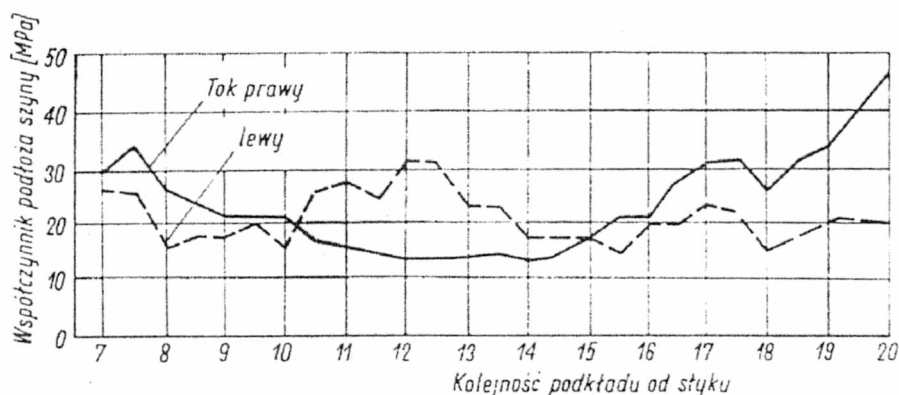
szttywność k podlewu poliuretanowego po okresie półrocznym zmniejsza się z 232 do 176 kN/mm czyli o około 25 % [1].

W przypadku ośrodków rozdrobnionych (gruntów, kruszyw), ze względu na przypadkowy i nieregularny układ ziarn i cząstek [133] należy oczekiwać znacznie większej stochastycznej niejednorodności tych materiałów, niż w przypadku ośrodków ciągłych (stali, betonu, drewna, tworzyw sztucznych).

W przypadku prefabrykowanych elementów nawierzchni szynowych (szyny, podkłady, płyty, przekładki, przytwierdzenia) należy oczekiwać znacznie mniejszych odchyłek od wymiarów normowych lub projektowych oraz większej jednorodności materiału niż w przypadku elementów wykonywanych na budowie (podlewy, płyty wykonywane na mokro, warstwy kruszyw).

Im więcej elementów składowych nawierzchni szynowej współdziała w przenoszeniu obciążeń, tym większe jest prawdopodobieństwo stochastycznego zróżnicowania własności toru, w wyniku nakładania się tolerancji wymiarów elementów oraz zmian ich wymiarów albo uszkodzeń spowodowanych zużyciem (pękanie pierścieni i łapek, zanieczyszczenie podsypki, zawilgocenie podłoża).

Na rys.36 przedstawiono zróżnicowanie współczynnika podłoża szyny dla toru na podkładach drewnianych i podsypce na jego długości [40]. W przypadku toku prawego różnice przekraczają 100 % w odstępach czterech podkładów.



Rys.36 Zmienność współczynnika podłoża szyny dla toru na podkładach drewnianych i podsypce [40]

Przedstawione powyżej zróżnicowanie miar sztywności elementów składowych dróg szynowych powoduje, że jedynie dla materiałów takich jak stal, beton i drewno (ale tylko wzdłuż włókien) moduł sprężystości E można potraktować jako stałą materiałową, i korzystać z wartości podawanych w tablicach wytrzymałościowych [85] lub normach [99], natomiast w przypadku pozostałych materiałów (kruszywa, grunty, tworzywa sztuczne) wartości podawane w normach [98], instrukcjach [27] i katalogach [53] mają jedynie orientacyjny charakter i często konieczne jest pozyskiwanie danych o sztywności materiałów albo całego podłoża szyny w wyniku badań terenowych lub laboratoryjnych.

Na przestrzeni rozwoju dziedziny kolejnictwa opracowane zostały różne metody określania i wyznaczania miar sztywności podłoża szyny (jako całości lub tylko pewnej jego części). W obliczeniach nawierzchni szynowej przyjęły się następujące trzy miary sztywności podłoża szyny:

- współczynnik podłoża C [N/mm³],
- współczynnik podparcia szyny D [kN/mm],

- współczynnik podłoża szyny U [MPa].

Współczynnik podłoża C liczbowo wyraża wielkość ciśnienia przyłożoną na jednostkę jego powierzchni, wywołującą jednostkowe sprężyste jego ugięcie. Współczynnik podparcia szyny D liczbowo wyraża wielkość siły potrzebnej do jednostkowego sprężystego ugięcia podpory szyny. Współczynnik podłoża szyny U liczbowo wyraża wielkość obciążenia równomiernego, przyłożonego na jednostkę długości szyny pod jej stopką, wywołującego jej jednostkowe ugięcie sprężyste.

Współczynnik podłoża C jest stosowany w przypadku analizy osiadania bryły sztywnej (podkładu poprzecznego lub podłużnego, płyty) posadowionej na podatnym ośrodku rozdrobnionym (podsypce, gruncie podłoża) albo ciągłym (mata wibroizolacyjna) oraz w przypadku analizy toru z szyną podpartą na podatnym ciągłym podlewie lub przekładce. W pierwszym z wymienionych przypadków jest on nazywany współczynnikiem podłoża podkładów, obejmuje bowiem podłoże szyny od spodu podkładu w dół i nie uwzględnia podatności podkładu, przekładek i przytwierdzeń. Niekiedy zachodzi jednak konieczność uwzględnienia we współczynniku podłoża C podatności podkładu, przekładek i przytwierdzeń, jest on wtedy nazywany sprowadzonym współczynnikiem podłoża i oznaczany jako C^{spr} [14]. W przypadku ciągłego podlewia lub przekładki pod stopką szyny współczynnik podłoża C obejmuje całe podłoże szyny od spodu jej stopki w dół.

Współczynnik podparcia szyny D jest stosowany w przypadku analizy toru z szyną podpartą w sposób dyskretny na poprzecznych podkładach albo na podporach punktowych. Obejmuje on całe podłoże szyny od spodu jej stopki w dół, lecz w przypadku toru klasycznego może być również rozbity na dwa współczynniki składowe:

- współczynnik podparcia podkładu D' - obejmujący podłoże szyny od spodu podkładu w dół,
- współczynnik ściśliwości podkładu i przytwierdzenia D'' - obejmujący podatność podkładu, przekładek i przytwierdzenia.

Współczynnik podłoża szyny U jest stosowany w przypadku analizy toru z szyną podpartą w sposób ciągły, jak również w sposób dyskretny - jeśli tylko punkty podparć rozmieszczone są równomiernie i odpowiednio gęsto. Założenie ciągłego podparcia szyny zamiast punktowego powoduje błąd w obliczeniach naprężeń w szynach jedynie na poziomie 5 % [13]. Współczynnik podłoża szyny U zawsze obejmuje całe podłoże szyny od spodu jej stopki w dół.

Wartości wszystkich trzech współczynników C , D i U (i ich pochodnych) zależą od odkształcalności poszczególnych elementów toru znajdujących się pod szyną i wyznaczane są doświadczalnie dla konkretnych typów toru i podtorza. Określa się je mierząc ugięcia albo naprężenia pod znanymi obciążeniami, a następnie wylicza z teoretycznych wzorów metod obliczeń nawierzchni szynowej.

Spośród trzech rozważanych miar sztywności podłoża szyny, w kolejnictwie najwcześniej znalazł zastosowanie zaczerpnięty z geotechniki winklerowski współczynnik podłoża C . Wyniki badań przeprowadzonych przez różnych badaczy i zarządy kolejowe cechuje jednak znaczne zróżnicowanie [3, 42, 48, 64, 120]. Dla toru klasycznego, w zależności od zastosowanej podsypki (żwirowa albo tłuczniowa) oraz jakości podłoża (bagienne, normalne, skaliste) uzyskano następujące przedziały wartości współczynnika C :

- według Zimmermanna: $C = 3 \div 8 \text{ kG/cm}^3$,
- według Hankera: $C = 5 \div 25 \text{ kG/cm}^3$,
- według Zarządu Kolei Środkowo-Europejskich: $C = 5 \div 40 \text{ kG/cm}^3$,
- według badań na kolejach niemieckich: $C = 9,6 \div 32 \text{ kG/cm}^3$.

Wasiutyński uzyskał natomiast podczas badań w latach 1933 - 1934, dla piaszczystego podtorza i podsypki tłuczniowej bardzo niską wartość $C = 3 \div 3,5 \text{ kG/cm}^3$. Różnice te wynikają z braku jednoznaczności sposobu wyznaczania współczynnika podłoża podkładów C :

- poprzez obciążanie całego rusztu torowego pojazdem szynowym i analizowanie osiadań wszystkich podkładów albo obciążanie pojedynczego podkładu siłownikiem i sprawdzanie jego osiadań, albo też poprzez obciążanie podsypki (w poziomie spodu podkładu) płytami naciskowymi o różnych kształtach i analizowanie ich osiadań,
- poprzez odczytywanie ugięć spodu podkładów albo stopki szyny z uwzględnieniem odliczenia wpływu ściśliwości podkładów (Wasiutyński),

a ponadto:

- ze stosowania różnych metod pomiaru ugięć (mechaniczne, mechaniczno - hydrauliczne, optyczno - fotograficzne, elektromechaniczne), pozwalających na uzyskanie różnych dokładności,
- z różnego stopnia odizolowania bazy pomiarowej od mierzonych ugięć,
- z nieuwzględnienia wpływu dynamiki obciążeń (Wasiutyński).

Współczynnik podłoża podkładów C okazał się być dość niewygodną miarą sztywności toru, gdyż podobnie jak w geotechnice moduł odkształcenia gruntu zależy nie tylko od jego właściwości ale i od kształtu, powierzchni i sztywności płyty obciążającej, tak samo rozważany współczynnik zależał nie tylko od właściwości podsypki i podłoża ale również od cech rusztu obciążającego czyli: podkładów (wymiarów, rozstawu, sprężystości), przytwierdzeń (sprężystość zastosowanych łapek, pierścieni, przekładek) oraz szyn (ich sztywności).

Obecnie w obliczeniach nawierzchni szynowych powszechnie stosuje się znacznie wygodniejszy współczynnik podłoża szyny U , który w stosunku do współczynnika podłoża podkładów C posiada następujące zalety:

- uwzględnia sztywność przekładek, przytwierdzeń i podkładu,
- jest odpowiedniejszy dla konstrukcji toru, która generalnie ma charakter bardziej liniowy niż powierzchniowy,
- posiada jednoznacznie określony sposób wyznaczania,
- dzięki jego zastosowaniu znacznemu uproszczeniu ulegają obliczenia (metoda Timoszenki).

Zestawienie wartości współczynnika podłoża szyny U w okresie letnim, dla badań zagranicznych i krajowych przedstawiono w tabeli 7.

Wartości współczynnika podłoża szyny U uzyskane z badań są również zróżnicowane, lecz w mniejszym stopniu niż to było w przypadku współczynnika podłoża podkładów C .

Wszystkie z trzech analizowanych miar sztywności podłoża szyny C , D i U nie mają charakteru stałych materiałowych, lecz są w znacznej mierze zależne od:

- zagęszczenia podsypki,
- pory roku,
- wielkości obciążenia.

Według badań radzieckich [40] bezpośrednio po naprawie głównej toru klasycznego (po pierwszym podbiciu) wartość współczynnika podłoża szyny U wynosi $4 \div 5 \text{ MPa}$, a po przejechaniu około 40 pociągów (przed wykonaniem drugiego podbicia) wzrasta do 14 MPa , czyli około trzykrotnie. W okresie zimowym współczynnik podłoża szyny U wzrasta od dwóch [19] do trzech razy [13, 40, 42] w stosunku do okresu lata. Analiza zależności ugięcia szyny od obciążenia [19] prowadzi do wniosku, iż współczynnik podłoża szyny U w pierwszym przedziale obciążeń stanowi około 50 % wartości występujących przy pełnym obciążeniu toru.

Tab.7 Wartości współczynnika podłoża szyny U w okresie letnim

Opis badań	współczynnik podłoża szyny U [MPa]		Źródło:
	podkł. drew.	podkł. bet.	
Badania amerykańskie: szyna 55, podkł. co 56 cm, tłuczeń wap.	36	-	[42]
Badania radzieckie: - MIIT	42 ÷ 53	182 ÷ 191	[42]
- DIIT	27 ÷ 30	81 ÷ 187	[42]
- CNII, MPS, MIIT	55	180 ÷ 194	[42]
Badania niemieckie	43 - 106	164	[42]
Frizman	23 ÷ 29	50 ÷ 200	[40]
Erskov	20	-	[1]
Evdokimov	49 ÷ 77	-	[1]
Raymond	14,2	-	[1]
Szachunjanec: szyny R60, przytw. K, pods. tłucz.	53	188	[13]
Basiewicz: szyny S49, przytw. K, podkłady IIB i INBK3 co 65 cm, pods. tłucz.	40	80	[13]

Między wszystkimi wymienionymi współczynnikami charakteryzującymi sztywność toru istnieją wzajemne zależności teoretyczne oraz empiryczne, dzięki którym przy znanych parametrach toru, można dokonywać przeliczeń jednych na drugie.

Niezależnie od typu toru:

- pomiędzy wielkościami D i U istnieje związek:

$$D = U \cdot l \quad (22)$$

gdzie: l - rozstaw punktów podparć [m]

- pomiędzy wielkościami k_{ot} i U istnieje związek:

$$k_{ot} = 2 \cdot U \cdot L = \sqrt[4]{64 \cdot E \cdot J \cdot U^3} \quad (23)$$

W torze klasycznym:

- pomiędzy wielkościami D' i C , w zależności od zastosowanej metody obliczeń istnieją związki:

według metody Timoszenki: $D' = C \cdot b_p \cdot \frac{a}{2} \cdot \alpha \quad (24)$

według metody Sallera-Hankera: $D' = C \cdot b_p \cdot 2u \quad (25)$

według metody Zimmermanna
obliczania podkładu poprzecznego: $D' = C \cdot b_p \cdot \frac{L_p}{\eta_s} \quad (26)$

- gdzie: b_p - szerokość podkładu poprzecznego
 a - długość podkładu poprzecznego
 u - odległość od osi szyny do końca podkładu poprzecznego
 α - współczynnik ugięcia podkładu poprzecznego
 L_p - długość zastępcza podkładu poprzecznego na sprężystym podłożu [m],
według wzoru:

$$L_p = \sqrt[4]{\frac{4E_p J_p}{C b_p}} \quad (27)$$

- E_p - moduł sprężystości materiału podkładu poprzecznego
 J_p - moment bezwładności podkładu poprzecznego względem jego obojętnej osi poziomej
 η_s - współczynnik dla przekroju podkładu poprzecznego pod szyną przyjmowany z tablic Zimmermanna, albo obliczany według empirycznego wzoru:

$$\eta_s = \frac{29,4}{0,5 \cdot a} + \frac{0,723}{0,5 \cdot a} \cdot L_p \quad (28)$$

- sprowadzony współczynnik podłoża C^{spr} uwzględniający podatność podkładu, przekładek i przytwierdzeń wylicza się na podstawie wzoru [14]:

$$\frac{1}{C^{spr}} = \frac{1}{C} + \frac{b_p \cdot 2u}{D''} \quad (29)$$

- wzory (24), (25) i (26) pozostają aktualne, jeśli C zastąpimy przez C^{spr} oraz D' przez D ,
- pomiędzy wielkościami U i C^{spr} istnieje związek:

$$U = C^{spr} \cdot b_z \quad (30)$$

- gdzie: b_z - szerokość zastępcza teoretycznego podparcia podłużnego według metod Timoszenki i Sallera-Hankera - wzory (16) i (17)

- pomiędzy wymienionymi trzema odmianami współczynnika podparcia szyny: D , D' i D'' istnieje zależność:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{D'} + \frac{1}{D''} \quad (31)$$

- jeżeli sztywność zastępczą przytwierdzenia oznaczmy przez k_{zp} , natomiast sztywność podkładu przez k_p to:

$$\frac{1}{D''} = \frac{1}{k_{zp}} + \frac{1}{k_p} \quad (32)$$

- pomiędzy ściśliwością drewna w poprzek włókien wyrażoną przez moduł sprężystości E'' oraz sztywnością podkładu k_p istnieje zależność:

$$\frac{1}{k_p} = \frac{h_p}{2E''} \left(\frac{1}{\omega_{pz}} + \frac{1}{\alpha \cdot \omega_p} \right) \quad (33)$$

gdzie: h_p - wysokość podkładu poprzecznego [m]
 ω_{pz} - powierzchnia podkładki żebrowej [m²]
 ω_p - połowa powierzchni dolnej podstawy podkładu poprzecznego [m²]

W torze bezpodsytkowym:

- z niepodatnym podłożem i podatnym podparciem dyskretnym (podpory w postaci przytwierdzeń) - zachodzi równość współczynnika podparcia szyny D i sztywności zastępczej przytwierdzenia k_{zp} ,
- z niepodatnym podłożem i podatnym podparciem ciągłym (podlew albo przekładka pod stopką szyny) - zachodzi zależność pomiędzy współczynnikiem podłoża C , a sztywnością podlew lub przekładki k oraz współczynnikiem podłoża szyny U według wzorów:

$$C = \frac{k}{A} \quad (34)$$

$$U = C \cdot b \quad (35)$$

gdzie: A - pole powierzchni przekładki zastosowanej do wyznaczenia jej sztywności k
 b - szerokość stopki szyny

Analizując sztywność nawierzchni szynowych należy mieć na uwadze, że pewne jej miary takie jak D , k i k_{ot} albo E i U mimo iż posiadają taki sam wymiar, to nie oznaczają tej samej wielkości fizycznej. Podobnie w przypadku miar C , D i k_z należy pamiętać, że w zależności od zakresu elementów składowych nawierzchni szynowej jaki obejmują mogą przybierać różne wartości.

W teorii nawierzchni szynowej stosuje się również powszechnie pewną syntetyczną miarę sztywności toru nazywaną współczynnikiem względnej sztywności podłoża i szyny, będącą odwrotnością długości zastępczej belki na sprężystym podłożu L [m], która w niniejszej pracy w celu odróżnienia od określonej wcześniej sztywności przekładek, podlewów oraz łapek i pierścieni sprężystych k oznaczana będzie jako K [m⁻¹]:

$$K = \frac{1}{L} = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}} \quad (36)$$

Wielkość ta jest najczęściej wyliczana teoretycznie, ale może być również - podobnie jak C , D i U , oznaczana w sposób empiryczny metodą doświadczalno-analityczną, z tą tylko różnicą, że ze względu na fakt iż K jako odwrotność L we wzorze (13) występuje w formie ułamka (w mianowniku ułamka oraz w ξ) do jej wyznaczenia stosuje się metodę odwrotnej weryfikacji z wykorzystaniem komputerów. Badania takie zapoczątkował w latach 60-tych Bałuch [3]. Były one również wykorzystywane przy ocenie zastosowania na PKP przytwierdzenia sprężystego SB3 [41]. W tabeli 8 przedstawiono średnie wartości współczynnika względnej sztywności podłoża i szyny K

uzyskane z badań krajowych przeprowadzonych dla różnych typów nawierzchni i pojazdów szynowych.

Tab.8 Wartości współczynnika względnej sztywności podłoża i szyny K

Opis badań	K [m ⁻¹]	Źródło:
Szyna S49; podkł. drew. co 65,5 cm; pods. tłucz.; obciąż. lok. elektr. BoBo: $P = 100$ kN, rozst. osi 3,2 m, prędk. 3 km/h	1,3	[3]
Szyna S60; podkł. drew.; tor prosty; obciąż. lok. elektr. EU-05, prędk. 5 km/h	0,7	[11]
Szyna UIC60; podkł. drew.; tor pod Karsznicami	1,1	[1]
Szyna S60; podkł. bet.(INBK-7); pods. tłucz.; prędk. 5 km/h: - obciąż. lok. elektr. EU-05; - przytw. SB3 - przytw. klas. - obciąż. wag. pomiarowym; - przytw. SB3 - przytw. klas.	2,04 1,56 1,87 1,61	[41]

4.4. Badania terenowe

W zakresie zagadnienia pionowych ugięć nawierzchni szynowych badania terenowe przeprowadza się najczęściej w następujących dwóch celach:

- wyznaczenia charakterystyk sprężystych toru (C , D , U , K , k_{ot} , E),
- oceny diagnostycznej.

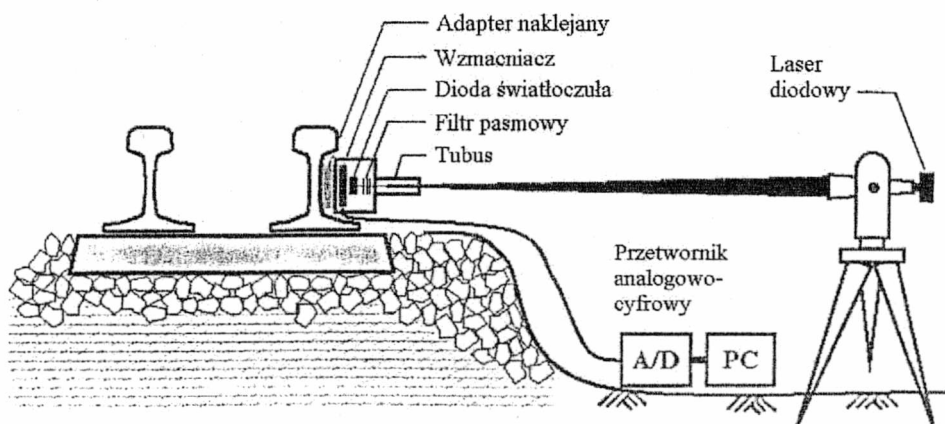
Pierwsze w historii kolejnictwa badania zmierzające do ustalenia współczynnika podłoża C przeprowadzone zostały w 1869 roku przez Häntzschela, przy pomocy kolankowej rurki szklanej napełnionej wodą. Dzięki odpowiedniemu zróżnicowaniu średnic obu ramion rurki kolankowej osiadająca szyna wciskając tłoczek w poziome ramię rurki, powodowała dziesięciokrotnie większe podniesienie poziomu wody w pionowym jej ramieniu. Dokładność odczytu osiadań szyny wynosiła 0,1 mm [64].

Wasiutyński w swoich badaniach przeprowadzonych w latach 1932-36 na posterunku doświadczalnym Warszawa - Włochy zastosował fotograficzny aparat lunetowy mogący przesuwając się po umieszczonym równolegle do toru masywnym fundamencie w postaci 60-tonowej płyty żelbetowej opartej na 8 palach drewnianych o długości 10 m, wbitych w studnie z kręgów betonowych o głębokości 5 m. W obserwowanym punkcie nawierzchni kolejowej przymocowywano małą, wypolerowaną kulkę metalową, skupiającą promienie światła w jednym punkcie. Obraz tego światła był rejestrowany na światłoczułej błonie w aparacie lunetowym, przesuwanej ze stałą prędkością, w postaci wykresu osiadań obserwowanego punktu powstających w czasie przejazdu lokomotywy. Największy możliwy błąd metody pomiaru osiadań wynosił według autora badań 0,0126 mm [81]. Mimo niewątpliwej zalety jaką był wysoki stopień odizolowania bazy pomiarowej od wpływów dynamicznych pojazdów szynowych, dzięki czemu osiągnięto wysoką dokładność pomiaru, metoda ta nie znalazła szerszego zastosowania ze względu na znaczne koszty przygotowania stanowiska pomiarowego oraz brak możliwości przenoszenia go w inne miejsca.

Dużo szersze zastosowanie zdobył natomiast aparat fotograficzny Blossa, który dla dokonania pomiaru ustawiano w pobliżu szyny pomiędzy dwoma podkładami. Osiadał on razem z podłożem i fotografował jednocześnie dwa punkty: jeden położony na osiadającej szynie, a drugi nieruchomy - położony poza strefą wpływów obciążeń działających na tor [3, 64]. Bliskość aparatu w stosunku do szyny umożliwiało uzyskiwanie powiększeń zdjęć 1 : 16, co było bardzo korzystne z punktu widzenia dokładności pomiaru.

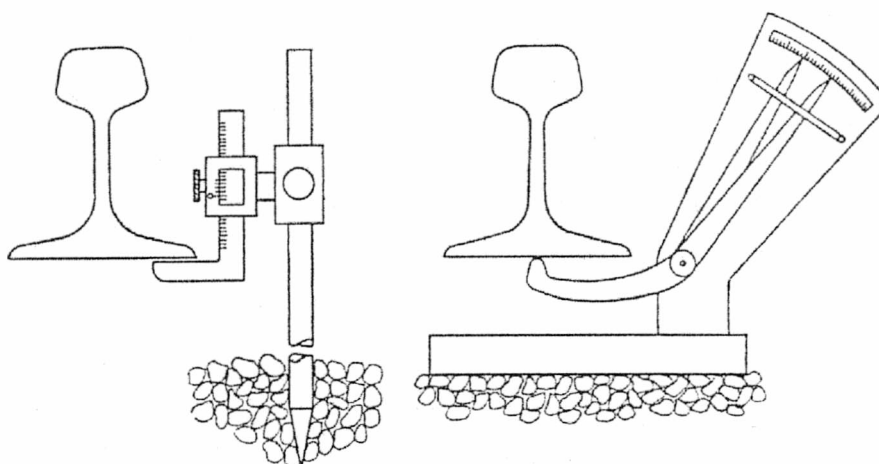
W drugiej połowie XX wieku dzięki rozwojowi elektronicznych metod pomiarów i opracowania ich wyników odstępiono od określania ugięć szyny na rzecz pomiarów naprężeń zginających w szynie, dokonywanych za pomocą urządzeń tensometrycznych przyklejanych do ich stopek [3, 41]. Dla badań przeprowadzonych w ten sposób przez Bałucha na początku lat 70-tych, błąd pomiarów naprężeń nie przekraczał 10 % [11].

Obecnie dzięki zastosowaniu technik laserowych w geodezyjnych przyrządach pomiarowych nastąpił powrót do określania ugięć szyny w badaniach nośności lub sztywności toru. Dokładność metody pomiaru przedstawionej na rys.37 wynosi 0,05 mm [18].



Rys.37 Pomiar przemieszczeń szyny przy pomocy aparatury laserowej [18]

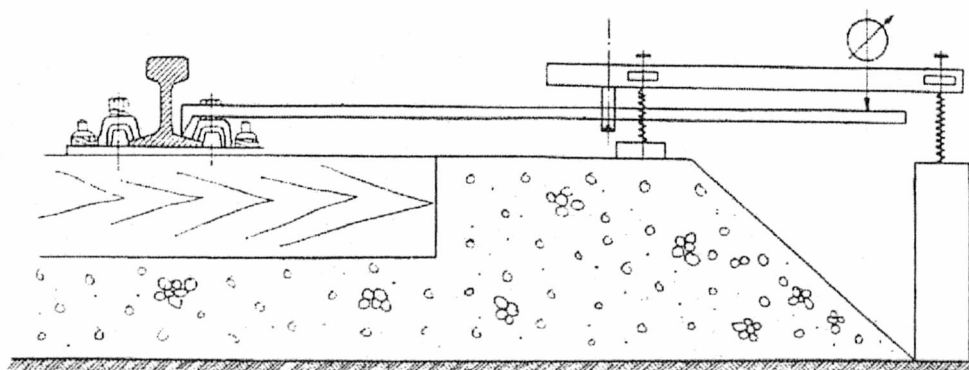
W diagnostyce nawierzchni szynowych do dziś natomiast używa się prostych, mechanicznych metod pomiaru ugięć szyny [2]. Stosowane są najczęściej urządzenia przedstawione na rys.38 nazywane wybojomierzami albo wychyleniomierzami oraz uniwersalne suwmiarki torowe.



Rys.38 Przyrządy diagnostyczne do pomiaru ugięć szyny [2]

Podczas badań osiadań szyn przeprowadzonych przez Bałucha przy pomocy wychyleniomierza [11] uzyskano dokładność pomiarów wynoszącą 0,01 mm. W swojej książce poświęconej diagnostyce nawierzchni szynowych [2] Bałuch wspomina również

o ustalaniu ugięć toru od obciążeń statycznych przy pomocy ugięciomierza belkowego Benkelmanna (rys.39), oceniając jednak tę metodę jako bardzo niewygodną, ze względu na stosunkowo długi czas potrzebny do ustawienia ugięciomierza na ławie torowiska.



Rys.39 Pomiar ugięć toru kolejowego ugięciomierzem belkowym Benkelmanna [2]

W przypadku torowisk tramwajowych, w literaturze brak jest szerszych informacji na temat metod badań ugięć szyny i ich wyników. W podręczniku projektowania torów tramwajowych [72] przytacza się badania Blossa, według których średnie ugięcia szyn rowkowych w zabudowanych torowiskach pod naciskiem dwuosioowych wagonów o wadze 10 t (≈ 100 kN) wynoszą:

- dla podłoża z tłucznia lub kamienia: 0,35 mm,
- dla podłoża betonowego: 0,08 mm.

W badaniach odcinków doświadczalnych tramwajowych torowisk typu węgierskiego, przeprowadzonych w Pradze w latach 1977 - 78 [127] uzyskano średnią wartość ugięć szyny wynoszącą 1,1 mm dla nacisku koła 34,25 kN.

Podczas prac związanych z oceną stanu technicznego eksploatowanych torowisk tramwajowych wbudowanych w jezdnię ulic we Wrocławiu, wykonanych przez Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej w roku 1999 [70, 71], przeprowadzono między innymi pomiary ugięć szyny pod statycznym naciskiem koła wagonu tramwajowego, według metody pomiaru będącej przedmiotem niniejszej pracy (przy użyciu ugięciomierza belkowego, pod naciskiem kół tramwajów liniowych). Dla konstrukcji torów na podbudowach z płyt żelbetonowych PPT (ul. Nowowiejska) oraz z betonu cementowego (ul. Grabiszyńska) uzyskano następujące wartości ugięć szyny:

- w miejscach bez widocznych uszkodzeń toru: 0,08 - 0,14 mm,
- w miejscach wyraźnych deformacji toru: 6,56 - 14,68 mm.

Do wyznaczenia charakterystyk sprężystych ośrodków rozdrobnionych w konstrukcjach nawierzchni szynowych i drogowych używa się odmiennych niż opisane dotychczas metod badań terenowych, zaczerpniętych z geotechniki. Moduły odkształcenia lub sprężystości gruntów podłoża oraz podatnych warstw konstrukcyjnych określa się najczęściej na podstawie badań metodą próbnego obciążenia sztywną płytą naciskową VSS o średnicy 0,3 m [27]. Niestety dla trzech rozważanych dziedzin: kolejnictwa, drogownictwa i geotechniki w przypadku wyznaczania charakterystyk sprężystych ośrodków rozdrobnionych brak jest jednoznaczności nazewnictwa, symboli, wzorów obliczeniowych oraz metodyki badań.

W kolejnictwie, zgodnie z [27] za moduł sprężystości E uważa się moduł odkształcenia wtórnego oznaczany najczęściej jako E_2 albo E_{II} , uzyskiwany z drugiego

cyklu obciążenia. W drogownictwie, zgodnie z [107] za moduł sprężystości E_s uważa się moduł odkształcenia uzyskiwany dla odprężenia, pomnożony przez współczynnik ω uwzględniający sztywność płyty i wyrażenie: $1 - \nu^2$, gdzie ν oznacza współczynnik Poissona. Dla modułów odkształcenia natomiast, zgodnie z [102] stosuje się inaczej zdefiniowane ich nazwy (przymiotniki pierwotny i wtórny dotyczą nie odkształcenia lecz modułu) oraz symbole - odpowiednio E_1 i E_2 . W geotechnice [98] moduł odkształcenia pierwotnego gruntu E_o nazywa się ogólnym, natomiast wtórnego E - sprężystym. Moduł E_o jest również niekiedy nazywany modułem ściśliwości [43] albo deformacji [133]. Używa się również pojęcia modułu podatności gruntu oznaczanego najczęściej jako E_p albo E_s [130, 133], będącego ilorazem modułu odkształcenia i wyrażenia: $1 - \nu^2$.

Zgodnie z obowiązującymi obecnie przepisami moduł odkształcenia uzyskany z badań metodą próbných obciążeń sztywną płytą naciskową należy obliczać ze wzorów:

- w kolejnictwie - według starej normy drogowej [15]:

$$M_E = \frac{\Delta p}{\Delta s} \cdot D \quad (37)$$

gdzie: M_E - moduł odkształcenia [MPa]

Δp - przyrost obciążenia jednostkowego w ustalonym zakresie (dla podłoża: 0,05 ÷ 0,15 MPa)

Δs - przyrost odkształcenia odpowiadający przyjętemu zakresowi przyrostu obciążenia jednostkowego [mm]

D - średnica płyty obciążającej [mm]

- w drogownictwie - według nowej normy drogowej [53, 102]:

$$E = \frac{3 \Delta p}{4 \Delta s} \cdot D \quad (38)$$

gdzie: E - moduł odkształcenia

$\Delta p, \Delta s, D$ - jak w poprzednim wzorze

- w geotechnice - według normy [98]:

$$E_o = (1 - \nu^2) \cdot \omega \cdot \frac{B}{k} \quad (39)$$

gdzie: E_o - moduł odkształcenia

ν - współczynnik Poissona

ω - współczynnik kształtu płyty sztywnej (0,79 - kołowa, 0,84 - kwadratowa)

B - średnica lub mniejszy bok płyty sztywnej

k - współczynnik kierunkowy prostej będącej aproksymacją metodą najmniejszych kwadratów zależności zmierzonych przemieszczeń powierzchni gruntu u od odpowiadających im obciążeń jednostkowych p , na początkowym jej odcinku

Przedstawione powyżej metody określania modułów odkształcenia różnią się ponadto sposobem pozyskiwania danych obliczeniowych: poprzez odczytywanie różnic obciążeń i odkształceń albo aproksymację wykresu osiadań prostą. W pierwszym z wymienionych

przypadków stosuje się różne zakresy obciążeń obliczeniowych, a w obu - różne wartości obciążeń maksymalnych.

Z punktu widzenia torowisk tramwajowych wbudowanych w jezdnię ulic, stanowiących połączenie rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w kolejnictwie i drogownictwie, szczególnie niekorzystna okazuje się być różnica wartości modułów odkształcenia wyznaczanych według wzorów (37) i (38). Postulat ujednolicenia obu metod poprzez wprowadzenie mnożnika 3/4 również do wzoru modułu odkształcenia stosowanego w kolejnictwie (37) jest obecnie podnoszony w publikacjach [112, 113].

4.5. Badania laboratoryjne

Podobnie jak w przypadku badań terenowych, badania laboratoryjne w zakresie zagadnienia pionowych ugięć toru przeprowadza się najczęściej w celu wyznaczenia charakterystyk sprężystych poszczególnych elementów składowych nawierzchni szynowych. Badania te głównie dotyczą elementów, których sztywność określa się przy pomocy współczynnika k [kN/mm] nie mającego charakteru stałej tworzywa (tak jak moduł sprężystości E), lecz przyjmującego różne wartości w zależności od kształtu i wymiarów analizowanego elementu.

Badania sztywności przekładek, podlewów, pierścieni i łapek sprężystych przeprowadza się na różnego typu maszynach wytrzymałościowych zadających odpowiednie obciążenia i odczytujących uzyskane odkształcenia, w warunkach statycznych albo dynamicznych, z uwzględnieniem zmiennych warunków klimatycznych (temperatura i wilgotność).

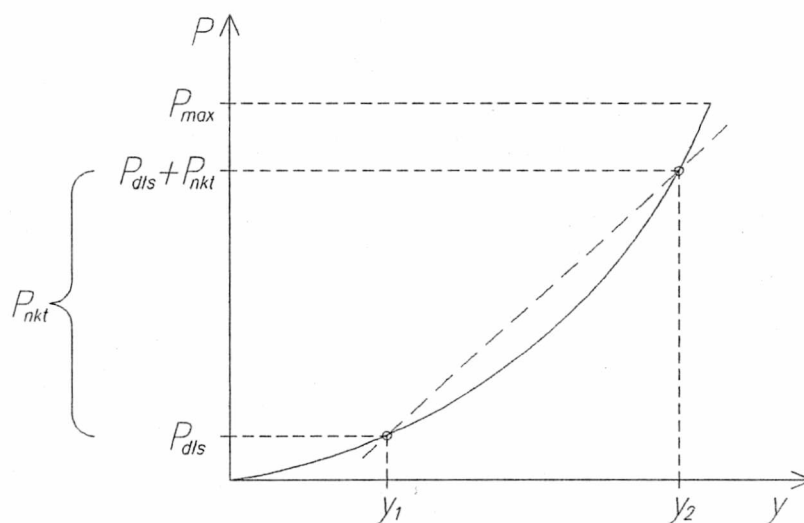
Sztywność statyczną k_{stat} w przypadku przekładek pracujących w przytwierdzeniach szyn określa się na podstawie analizy zależności obciążenie - odkształcenie (rys.40) najczęściej dla trzeciego cyklu obciążenia, z następującego wzoru [124]:

$$k_{stat} = \frac{P_{nkt}}{y_2 - y_1} \quad (40)$$

gdzie: P_{nkt} - maksymalne średnie obciążenie przekładki od nacisku kół taboru [kN]
 y_2 - ugięcie przekładki dla obciążenia $P_{dts} + P_{nkt}$ [mm]
 P_{dts} - docisk łapek sprężystych [kN]
 y_1 - ugięcie przekładki dla obciążenia P_{dts} [mm]

Maksymalne obciążenie przekładki P_{max} podczas testu przyjmuje się na poziomie $1,7 \cdot P_{nkt}$. Badania przeprowadza się dla temperatur: pokojowej, -20°C i $+50^{\circ}\text{C}$

Niestety również w zakresie badań laboratoryjnych sztywności k elementów składowych nawierzchni szynowych brak jest ujednolicenia, gdyż stosowane są nie tylko metody badań według dokumentów normatywnych z dziedziny kolejnictwa [36, 37, 106, 124, 128, 131], w których badane elementy podlegają warunkom pracy analogicznym do występujących w torze rzeczywistym [20, 122], ale również metody badań według dokumentów normatywnych dotyczących ogólnie dziedziny tworzyw sztucznych [32], w przypadku których warunki pracy jakim poddawane są badane elementy odbiegają od występujących w torze rzeczywistym [115].



Rys.40 Wykres obciążenie - odkształcenie dla wyznaczania sztywności statycznej przekładek podszynowych (oznaczenia w tekście)

Laboratoryjne metody oznaczania modułów odkształcenia i sprężystości dla ośrodków rozdrobnionych stosuje się rzadko, głównie z powodu uzyskiwania znacznych różnic w stosunku do wartości rzeczywistych (np. dla gruntów - w wyniku badań próbek o naruszonej strukturze) [62].

5. BADANIA TERENOWE UGIĘĆ SZYNY W TOROWISKACH TRAMWAJOWYCH

5.1. Metoda badawcza

5.1.1. Podstawowe założenia

Pomiary ugięć szyn w torach przeprowadzono z wykorzystaniem drogowego ugięciomierza belkowego, według pierwszego wariantu pomiaru - umożliwiającego określenie jedynie ugięcia sprężystego [16]. Pomiary wykonywane były pod ruchem tramwajów liniowych. W celu zmniejszenia uciążliwości pomiarów wykorzystano postoje tramwajów na przystankach lub przed światłami sygnalizacji świetlnej. Pomiarami objęto jedynie torowiska eksploatowane od kilku lat, znajdujące się w dobrym stanie, tak aby wyeliminować wpływ niewłaściwej pracy konstrukcji na wyniki pomiarów ugięć (np. lokalny brak podparcia szyny, zerwane przytwierdzenie, itp.).

5.1.2. Konieczne modyfikacje drogowej metody pomiaru ugięć

Ze względu na odmienną konstrukcję nawierzchni i pojazdów drogowych w stosunku do tramwajowych oraz wykorzystanie do obciążeń różnych pojazdów, zamiast jednego - o znanym nacisku koła na nawierzchnię, konieczne były następujące modyfikacje drogowej metody pomiaru ugięć przy użyciu ugięciomierza belkowego:

- a) mackę belki ugięciomierza ustawiano na szynie, do wyboru były dwie możliwości:
 - 1. ustawienie macki na obrzeżu szyny rowkowej - można ją wtedy umieścić dokładnie pod osią zestawu kołowego, ale ze względu na ograniczony dostęp i niewielką szerokość obrzeża jest to zadanie trudne w realizacji i nie dające gwarancji uzyskania prawidłowego pomiaru,
 - 2. ustawienie macki na główce szyny - zadanie jest łatwe w wykonaniu, ale macka znajduje się wtedy w pewnej odległości za osią zestawu kołowego, czyli miejscem największego ugięcia,
- b) dla uzyskania pewnego oparcia podstawy ugięciomierza, ustawiano go nie równolegle, lecz lekko ukośnie w stosunku do osi toru, tak aby jego podstawa spoczywała na nawierzchni drogowej z boku szyny,
- c) w celu określenia wartości nacisku koła na szynę notowano typy oraz napelnia tramwajów (liczbę pasażerów).

5.1.3. Zespół pomiarowy i czynności pomiarowe

Skład zespołu pomiarowego stanowiło dwóch pracowników Politechniki oraz dwóch pracowników Nadzoru Ruchu MPK.

Pracownicy Politechniki ustawiali ugięciomierz za ostatnim kołem tramwaju, po czym pierwszy z nich dokonywał regulacji przyrządu, a następnie zapisywał odczyt wskazań czujnika zegarowego, natomiast drugi pracownik w tym czasie zaznaczał w torze miejsce ustawienia macki ugięciomierza oznaczając je kolejnym numerem pomiaru, po czym liczył liczbę pasażerów w wagonie. Po wykonaniu tych czynności pierwszy pracownik dawał znak o możliwości odjazdu tramwaju, a po jego odjechaniu i ustaniu podnoszenia się szyny ponownie zapisywał odczyt wskazań czujnika zegarowego. Po zakończeniu pomiaru ugięć obaj pracownicy zdejmowali ugięciomierz z toru i mierzyli położenie miejsca ustawienia macki ugięciomierza.

Spośród pracowników Nadzoru Ruchu MPK pierwszy z nich wskazywał motorniczemu właściwe miejsce zatrzymania pojazdu, informował o pomiarach oraz dawał znak o możliwości odjazdu, natomiast drugi wstrzymywał ruch następnych tramwajów, jeśli pomiar jeszcze się nie zakończył.

5.1.4. Mierzone wielkości

Podczas badań mierzone były, a następnie odnotowywane w roboczych protokołach z pomiarów następujące wielkości:

- dla każdego stanowiska - temperatura powietrza i stan pogody oraz lokalizacja charakterystycznych elementów konstrukcji nawierzchni toru (np. granice płyt, osie podkładów),
- dla każdego pomiaru na danym stanowisku - numer boczny taboru, liczba pasażerów, lokalizacja punktu ustawienia macki ugięciomierza, wskazania czujnika zegarowego ugięciomierza przed i po odjechaniu tramwaju oraz uwagi (dodatkowe informacje dotyczące okoliczności wykonania pomiaru).

Typ taboru w dalszych analizach identyfikowano według jego numeru bocznego. Wrocławskie MPK, w okresie wykonywania pomiarów, eksploatowało w ruchu liniowym wagony tramwajowe krajowej produkcji (Konstal - Chorzów) dwóch typów:

- sześciooosiowe przegubowe 102N, 102Na, 102Nd - oznaczane w niniejszej pracy symbolem "102" - o numerach bocznych od 2001 do 2110,
- czteroosiowe 105Na i ich odmiany 105Nx - oznaczane w niniejszej pracy symbolem "105" - o numerach bocznych od 2201 do 2558.

Wagony 102, kursowały wyłącznie w trakcji pojedynczej, natomiast 105 - pojedynczej i podwójnej.

Liczbę pasażerów liczono tylko w tej części wagonu, która opierała się na wózku, pod którym dokonywano pomiaru (od końca wagonu do przekroju w połowie odległości pomiędzy osadami ostatniego i przedostatniego wózka).

Położenie punktów ustawienia macki ugięciomierza oraz lokalizację charakterystycznych elementów konstrukcji nawierzchni toru określano w stosunku do umownej bazy, którą stanowiło położenie pierwszego punktu pomiaru ugięć na każdym stanowisku. Zwrot osi tak określanych odległości przyjmowano zgodnie do kierunku jazdy po badanym torze.

5.1.5. Aparatura pomiarowa

Do pomiarów wartości przemieszczeń dźwigni ugięciomierza w stosunku do jego podstawy (rys.1) zastosowano czujniki zegarowe o zakresie 25 mm i dokładności podziałki 0,01 mm. Odczyty wskazań czujnika zegarowego wykonywano z dokładnością do pół podziałki, co po przeliczaniu dawało odczyty wartości ugięć szyny z dokładnością do 0,01 mm.

Do pomiaru położenia miejsc ustawienia macki ugięciomierza oraz charakterystycznych elementów konstrukcji nawierzchni toru zastosowano taśmę mierniczą o długości 2 m i dokładności podziałki 1 mm. Odczyty długości wykonywano z dokładnością do 1 cm.

Do pomiaru temperatury powietrza zastosowano termometr zewnętrzny o dokładności podziałki 1°C.

5.2. Zakres badań

Pomiary przeprowadzono dla pięciu, obecnie najczęściej stosowanych we Wrocławiu, typów torowisk zabudowanych. Dwóch typu klasycznego:

1. tor na podkładach drewnianych i podsypce,
2. tor na podkładach betonowych i podsypce,

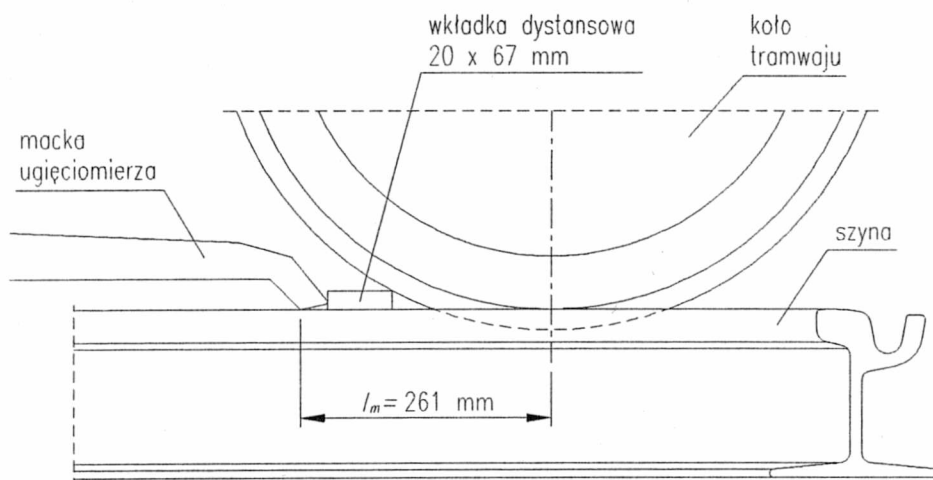
i trzech typu niekonwencjonalnego:

3. tor na podbudowie betonowej i podporach punktowych,
4. tor typu węgierskiego,
5. tor na podbudowie betonowej z szyną obłożoną wkładkami gumowymi.

5.3. Wstępne badania rozpoznawcze

W oparciu o przedstawione w poprzednich punktach założenia przeprowadzono w dniu 12 lipca 2001 roku serię wstępnych badań rozpoznawczych pomiarów ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwaju przy pomocy ugięciomierza belkowego dla kilku wybranych stanowisk - przewidzianych w późniejszym czasie do wykonania badań zasadniczych.

Podczas pierwszych pomiarów mackę ugięciomierza ustawiano na obrzeżu szyny w osi zestawu kołowego, jednak z powodu znacznej uciążliwości tak dokonywanego pomiaru oraz brak pewności co do prawidłowości uzyskanych odczytów zdecydowano się w badaniach zasadniczych na ustawianie macki ugięciomierza na głowce szyny za kołem tramwaju. Ze względu na fakt, że niektóre tramwaje przy ruszaniu najpierw minimalnie cofały do tyłu, konieczne było ustawienie macki w pewnej odległości za kołem. Przygotowano pomocniczą wkładkę dystansową o przekroju prostokąta (20 x 67 mm), wsuwaną za tylne koło tramwaju, pozwalającą ustawiać mackę ugięciomierza zawsze w tej samej odległości $l_m = 261$ mm za osią zestawu kołowego (rys.41).



Rys.41 Ustawianie macki ugięciomierza za kołem tramwaju

Podczas wstępnych badań rozpoznawczych wykonywano połowę pomiarów ugięć na szynie prawej, a drugą połowę - na lewej. W badaniach zasadniczych, zdecydowano się jednak dla każdego stanowiska mierzyć tylko ugięcia na jednej szynie.

Ze względu na różne długości kursujących składów (1x105, 102, 2x105) pomocne okazało się oznaczanie wzdłuż peronu miejsc zatrzymań czoła różnych składów tramwajów, tak aby ich tylne koła zatrzymywały się na długości odcinka toru poddanego badaniom.

5.4. Badania zasadnicze

5.4.1. Opis i lokalizacja badań

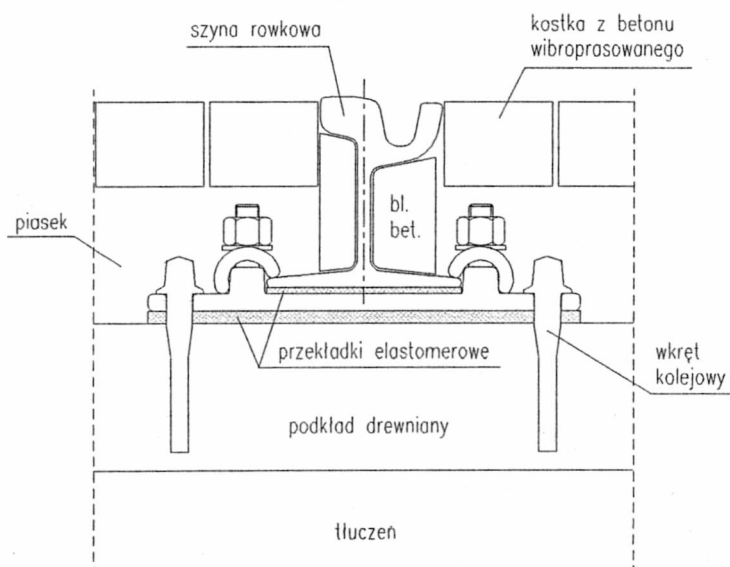
Badania zasadnicze pomiarów ugięć szyn pod statycznym naciskiem kół tramwaju, dla pięciu określonych wcześniej typów torowisk zabudowanych, przeprowadzono w dniach od 13 do 23 lipca 2001 roku, na wybranych odcinkach tramwajowych torów zabudowanych, które nazwano stanowiskami pomiarowymi. Było ich w sumie 14, gdyż niektóre typy torów - stosowane częściej, przebadano na kilku

osobnych stanowiskach, różniących się wiekiem i szczegółami rozwiązań konstrukcyjnych.

W celu uniknięcia rozbudowanego opisu typów badanych torowisk oraz lokalizacji stanowisk pomiarowych, zastosowano w dalszej części pracy skrócone ich nazewnictwo przyporządkowując pięciu badanym typom torowisk kolejne liczby od 1 do 5 (tak jak w punkcie 5.2), natomiast kolejnym stanowiskom pomiarowym dla toru tego samego typu - kolejne litery alfabetu: a, b, c ...

Tor pierwszego typu (rys.42), z szynami rowkowymi na poprzecznych podkładach drewnianych i podsypce, przebadano tylko na jednym stanowisku:

- 1a - na przystanku w ul. Hallera przed skrzyżowaniem z ul. Mielecką, jadąc od strony ul. Grabiszyńskiej (szyna Ri60N, przytwierdzenie: PT180 + skl12, elastomerowa przekładka podszytna i podpodkładowa, wypełnienie komór szynowych blokami betonowymi, podkłady drewniane IIIB co 67 cm, podsypka tłuczniowa 20 cm na podsypce piaskowej 10 cm, zabudowa kostką z betonu wibroprasowanego; rok budowy 1999).



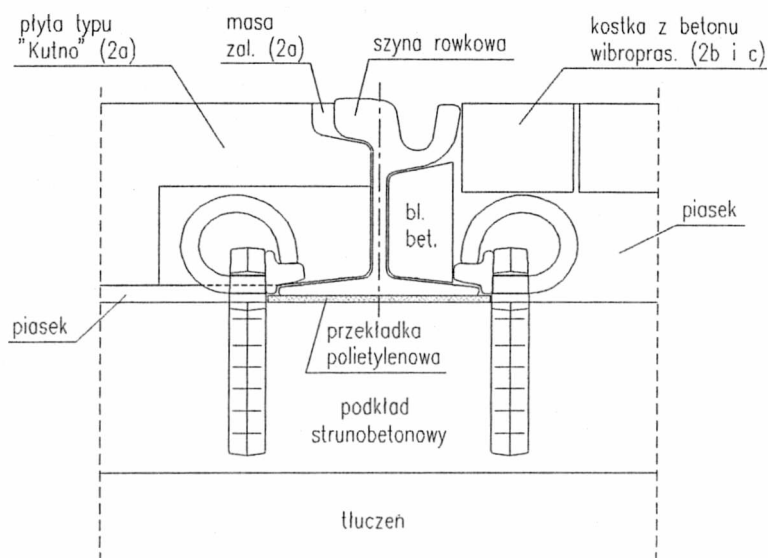
Rys.42 Przekrój konstrukcyjny - stanowisko 1a

Tor drugiego typu (rys.43), z szynami rowkowymi na poprzecznych podkładach betonowych i podsypce, przebadano na trzech stanowiskach różniących się wiekiem i rodzajem zabudowy:

- 2a - na przystanku w ul. Ślężnej przed skrzyżowaniem z ul. Wiśniową, jadąc od strony centrum (szyna Ri60N, przytwierdzenie SB-3, polietylenowa przekładka podszytna, podkłady strunobetonowe PST94 co 67 cm, podsypka tłuczniowa 20 cm na podsypce piaskowej 10 cm, zabudowa płytami typu "Kutno": PPT1W, PPT2W, PPTBW; rok budowy 1999),
- 2b - na przystanku w ul. Powstańców Śl. przed skrzyżowaniem z ul. Jaworową, jadąc w stronę centrum (szyna Ri60N, przytwierdzenie SB-3, polietylenowa przekładka podszytna, podkłady strunobetonowe PST94 co 67 cm, podsypka tłuczniowa 20 cm na warstwie piasku 15 cm, zabudowa kostką z betonu wibroprasowanego; rok budowy 1999),

2c - na przystanku w ul. Grabiszyńskiej przed skrzyżowaniem z ul. Zaporoską, jadąc od strony centrum (szyna Ri60N, przytwierdzenie SB-3, polietylenowa przekładka podszynowa, podkłady strunobetonowe PST94 co 67 cm, podsypka tłuczniowa 20 cm na warstwie pospółki 25 cm i piasku 10 cm, zabudowa kostką z betonu wibroprasowanego; rok budowy 2000).

Dla każdego z wymienionych powyżej trzech stanowisk komory szynowe wypełniono bloczkami betonowymi, natomiast dla stanowiska 2a na styku krawędzi szyny i żelbetowej płyty zabudowy torowiska zastosowano bitumiczną masę zalewową.



Rys.43 Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 2a, 2b i 2c

Tor trzeciego typu (rys.44 i 45), z szynami rowkowymi na podporach punktowych i podbudowie betonowej, przebadano aż na sześciu stanowiskach różniących się wzajemnie rodzajem podparcia i kotwienia podkładki żebrowej, rozstawem podpór, rodzajem zabudowy oraz wiekiem:

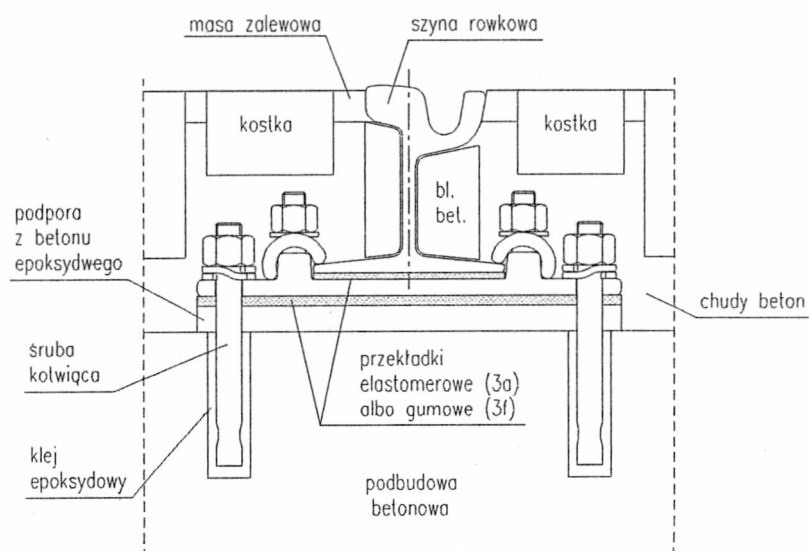
3a - na przystanku w ul. Świdnickiej przed skrzyżowaniem z ul. Piłsudskiego, jadąc w stronę centrum (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, elastomerowe przekładki podszynowa 6 mm i podpodkładkowa 7 mm, epoksydobetonowa podpora, kotwienie do podbudowy śrubami wklejanymi żywicą epoksydową z zastosowaniem dwuzwojowego pierścienia sprężystego, rozstaw podpór 67 cm, podbudowa z betonu B35 grubości 30 cm na warstwie ubitego piasku 10 cm, zabudowa kostką kamienną i z betonu wibroprasowanego; rok budowy 1996),

3b - na przystanku w ul. Podwale przed skrzyżowaniem z ul. Świdnicką (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, gumowe przekładki podszynowa 8 mm i podpodkładkowa 8 mm, kotwienie do podbudowy wkrętami kolejowymi w zabetonowanych dyblach poliamidowych, rozstaw podpór 1 m, podbudowa z betonu B25 grubości 25 cm na warstwie kruszywa łamanego 30 cm i piasku 20 cm, zabudowa kostką kamienną; rok budowy 1997),

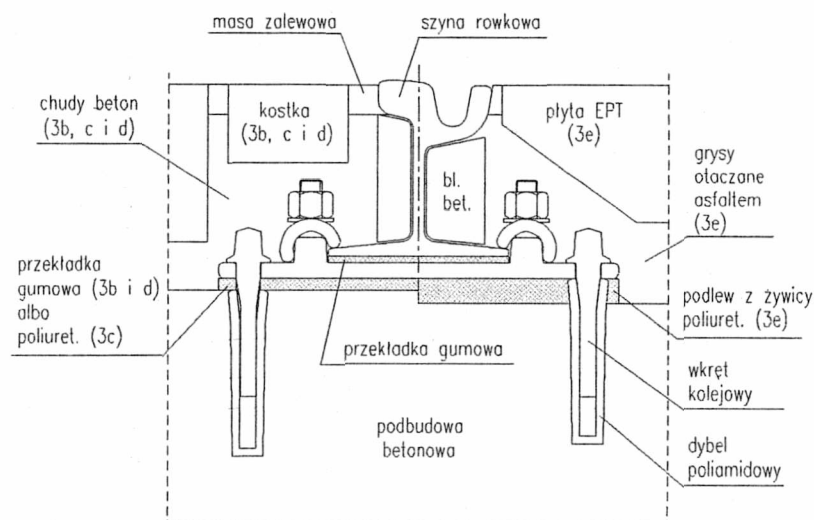
3c - na przystanku w ul. Dubois przed skrzyżowaniem z ul. Pomorską (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, przekładka podszynowa gumowa 10 mm oraz podpodkładkowa poliuretanowa dołkowana gęsta, kotwienie do podbudowy wkrętami kolejowymi w zabetonowanych dyblach poliamidowych, rozstaw podpór 1 m, podbudowa z betonu B30 grubości 30 cm na warstwie piasku 10 cm, zabudowa kostką kamienną; rok budowy 1998),

- 3d - na przystanku w ul. Piłsudskiego przed skrzyżowaniem z ul. Świdnicką, jadąc w stronę pl. Legionów (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, gumowe przekładki podszynowa 10 mm i podpodkładkowa 8 mm, kotwienie do podbudowy wkrętami kolejowymi w zabetonowanych dyblach poliamidowych, rozstaw podpór 66 cm, podbudowa z betonu B25 grubości 30 cm na warstwie pospółki 10 cm, tłucznia kamiennego 20 cm i piasku średnioziarnistego 10 cm, zabudowa kostką kamienną; rok budowy 1999),
- 3e - na przystanku w ul. Grabiszyńskiej przed pl. Pereca (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, przekładka podszynowa gumowa 10 mm, podpodkładkowy podlew poliuretanowy 15 mm, kotwienie do podbudowy wkrętami kolejowymi w zabetonowanych dyblach poliamidowych, rozstaw podpór 1 m, podbudowa z betonu B35 grubości 30 cm na warstwie kłınca 20 cm, pospółki 25 cm i piasku 10 cm, zabudowa kostką kamienną i płytami żelbetowymi; rok budowy 2000),
- 3f - na przystanku w ul. Legnickiej przed skrzyżowaniem z ul. Wejherowską (szyna Ri60N, przytwierdzenie PT180 + skl12, gumowe przekładki podszynowa 10 mm i podpodkładkowa 10 mm, epoksydobetonowa podpora, kotwienie do podbudowy śrubami wklejanymi żywicą epoksydową z zastosowaniem dwuzwojowego pierścienia sprężystego, rozstaw podpór 1 m, podbudowa z betonu B30 grubości 30 cm na warstwie chudego betonu 10 cm i piasku 10 cm, zabudowa kostką z betonu wibroprasowanego; rok budowy 2000).

Dla każdego z wymienionych powyżej sześciu stanowisk komory szynowe wypełniono prefabrykowanymi betonowymi bloczkami, na styku krawędzi szyny i drogowej zabudowy torowiska zastosowano bitumiczną masę zalewową, natomiast na odcinkach pomiędzy podporami jako wypełnienie przestrzeni pod stopką szyny zastosowano podlew z mas bitumicznych.



Rys.44 Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 3a i 3f



Rys.45 Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 3b, 3c, 3d i 3e

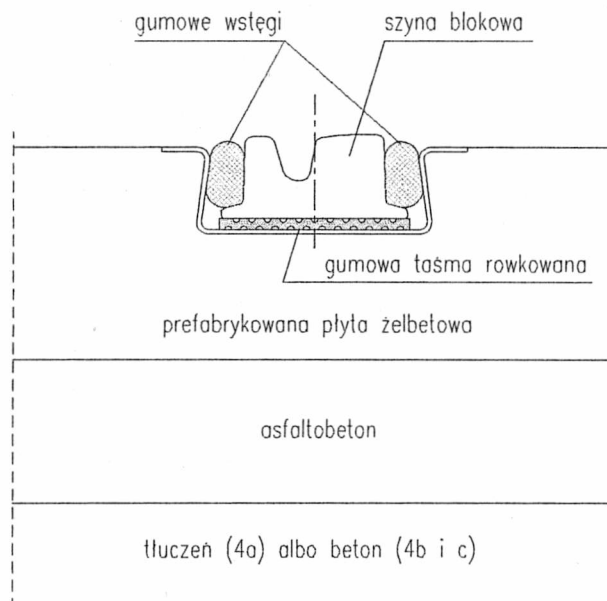
Tor czwartego typu (rys.46) - węgierski, z szynami blokowymi osadzonymi w korytach prefabrykowanych żelbetonowych płyt nawierzchni, na podbudowie asfaltobetonowej, przebadano na trzech stanowiskach różniących się rodzajem warstwy podbudowy dolnej oraz wiekiem:

- 4a - na przystanku na pl. Bema po przyjeździe z kierunku Kowal (szyna blokowa B1, gumowa rowkowana taśma podszynowa, przytwierdzenie gumowymi wstęgami w stalowych korytach żelbetonowych płyt nawierzchni, asfaltobeton 12 cm, podbudowa dolna z tłucznia 30 cm na warstwie piasku 20 cm; rok budowy 1994),
- 4b - na przystanku na pl. Wróblewskiego po przyjeździe z kierunku Księża Małego (szyna blokowa B1, gumowa rowkowana taśma podszynowa, przytwierdzenie gumowymi wstęgami w stalowych korytach żelbetonowych płyt nawierzchni, asfaltobeton 12 cm, podbudowa dolna z betonu B25 grubości 25 cm na warstwie piasku 10 cm; rok budowy 1996),
- 4c - na przystanku w ul. Piaskowej przy Hali Targowej, jadąc w kierunku pl. Bema (szyna blokowa B1, gumowa rowkowana taśma podszynowa, przytwierdzenie gumowymi wstęgami w stalowych korytach w żelbetonowych płyt nawierzchni, asfaltobeton 12 cm, podbudowa dolna z betonu B25 grubości 25 cm na warstwie piasku 15 cm; rok budowy 2000).

Żelbetowe płyty nawierzchni torowej wykonane są z betonu B35, posiadają wysokość 18 cm, szerokość 2,20 m, natomiast długości - w zależności od typu:

- VL60 - 5,985 m
- VL30 - 2,90 m
- VL15 - 1,41 m
- VL8 - 0,665 m

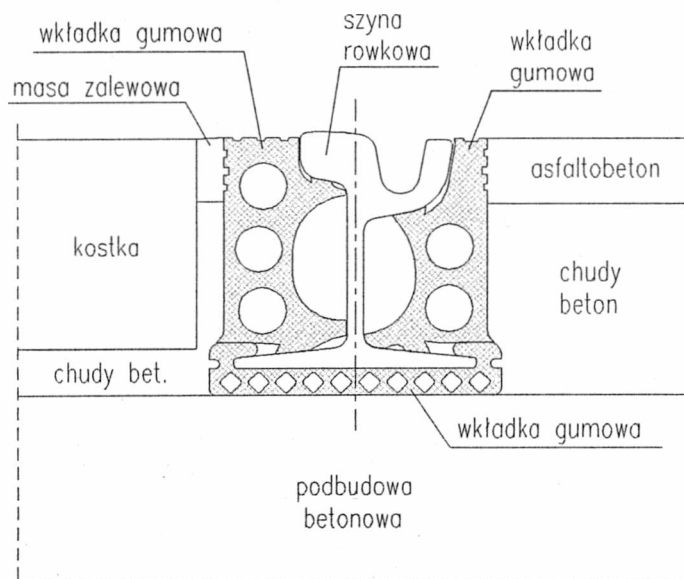
Szczeliny dylatacyjne pomiędzy płytami szerokości 2 cm wypełnione są bitumiczną masą zalewową. Nie stosuje się dyblowania przy połączeniach płyt.



Rys.46 Przekrój konstrukcyjny - stanowiska 4a, 4b i 4c

Tor piątego typu (rys.47), z szynami rowkowymi obudowanymi wkładkami gumowymi na podbudowie betonowej, przebadano tylko na jednym stanowisku:

5a - na ul. Karkonoskiej, pomiędzy skrzyżowaniami z ul. Letnią i Wiosenną (szyna Ri60N, obudowana wkładkami gumowymi Phoenix: bocznymi M 591 61 i 62 oraz dolną M 384 18, na podbudowie betonowej B30 o grubości 25 cm na chudym betonie 10 cm i warstwie piasku 15 cm, zabudowa z asfaltobetonu na chudym betonie, na zewnątrz szyn - rolki z kostki; rok budowy 1999).



Rys.47 Przekrój konstrukcyjny - stanowisko 5a

Podbudowy betonowe dla konstrukcji torów na stanowiskach 3a - 3f, 4b, 4c i 5a posiadały dylatacje w poprzek całego torowiska co około 6 m.

Ze względu na znaczne zróżnicowanie częstotliwości kursowania tramwajów w miejscach stanowisk pomiarowych, liczby dokonanych pomiarów ugięć szyny nie były

takie same i wahały się od 10 do 25 pomiarów, natomiast w przypadku stanowiska 4a przeprowadzono większą serię pomiarów w liczbie około 50.

Długości badanych odcinków torowisk wynosiły od 2 do 5 m, a dla stanowiska 4a - 16 m. Podczas badań starano się tak zatrzymywać tramwaje, aby punkty pomiaru ugięć szyny rozmieścić równomiernie na długości odcinków pomiarowych. Z jednej strony pokrywanie się punktów pomiaru na długości toru dało możliwość kontroli ugięć zmierzonych w tym samym miejscu, z drugiej strony zróżnicowanie ich położenia pozwalało na ocenę wpływu niejednorodności toru na zmierzone ugięcia. Z powodu trudnej do osiągnięcia precyzji w zatrzymywaniu się tramwajów punkty zmierzonych ugięć wypadały dość nieregularnie na długości odcinków pomiarowych.

Na każdym ze stanowisk, ze względów bezpieczeństwa (wąskie międzytorza, ruch kołowy w obrębie torowiska) badania ugięć przeprowadzano na szynie prawej (patrząc zgodnie z kierunkiem ruchu po torze). Wyjątkiem było stanowisko 5a na ul. Karkonoskiej (tor z wkładkami gumowymi), gdzie ze względu na kursowanie tylko jednej linii co 15 minut oraz korzystne warunki terenowe (szerokie międzytorze, wydzielone z ruchu kołowego) zdecydowano się na pomiary ugięć szyn w torach obu kierunków z jednego stanowiska pomiarowego, organizując je pośrodku międzytorza i mierząc ugięcia szyn lewych.

5.4.2. Przygotowanie wyników badań

Niedoskonałością przyjętej metody pomiarowej jest zastosowanie do obciążeń torowisk różnych tramwajów, zamiast jednego - o znanym nacisku koła na szynę, co powoduje iż uzyskane wyniki ugięć szyny y_i cechuje zróżnicowanie wynikające ze zmiennych wartości nacisków koła na szynę P_i towarzyszących każdemu pomiarowi, przez co przestają one być w łatwy sposób porównywalne. Jednakże dzięki notowaniu typów oraz napelnień tramwajów możliwe było (co prawda z pewnym przybliżeniem) określenie wartości nacisków koła na szynę towarzyszące każdemu pomiarowi. Z klasycznej teorii obliczania nawierzchni szynowej (rozdział 4.2. niniejszej pracy) wiadomo natomiast, że istnieje funkcyjna zależność pomiędzy obciążeniem i ugięciem szyny. Możliwe jest więc potraktowanie zróżnicowania nacisków koła na szynę jako błędu systematycznego pomiarów ugięć szyny i poprzez zastosowanie odpowiednich wzorów korygujących przeliczenie na wartości pozbawione tego błędu.

Wychodząc z liniowej zależności ugięć od nacisków (wzór 15), obowiązującej w granicach funkcjonowania prawa sprężystości, w celu uniezależnienia wyników wartości zmierzonych ugięć od zróżnicowania wartości nacisku koła na szynę P_i , zastosowano w niniejszej pracy przeliczenie zmierzonych ugięć szyny y_i na ugięcia skorygowane y_{si} - odpowiadające jednej ustalonej wartości nacisku, jako którą przyjęto wartość średnią ze wszystkich odnotowanych podczas pomiarów nacisków koła na szynę - P_{sr} według wzoru:

$$y_{si} = y_i \cdot \frac{P_{sr}}{P_i} \quad (41)$$

Pojawiające się w dalszej części niniejszej pracy określenie "skorygowane" używane w stosunku do ugięć uzyskanych z pomiarów oznacza, że są to ugięcia odpowiadające naciskowi koła na szynę P_{sr} o wartości 22,2 kN.

5.4.3. Zestawienie wyników badań

Wyniki badań, w postaci arkuszy pomiarów sporządzonych dla każdego stanowiska pomiarowego, zamieszczono w załączniku nr 1. Arkusze opracowano przy pomocy programu komputerowego "Excel".

Każdy arkusz składa się z trzech części: opisowej, tabelarycznej i graficznej. W części opisowej zamieszczono podstawowe dane dotyczące stanowiska pomiarowego: numer, datę i godzinę pomiaru, stan pogody i temperaturę, lokalizację stanowiska, typ i wiek toru. W części tabelarycznej zestawiono wartości zmierzone oraz wyliczone. Wiersze tabeli odpowiadają kolejnym pomiarom wykonanym na stanowisku. Dla każdego pomiaru odnotowano lub zmierzono:

- typ taboru (kolumna nr 2 tabeli),
- liczba pasażerów przypadająca na ostatni wózek i_{pi} (kolumna nr 3 tabeli),
- położenie punktu pomiarowego określone jako odległość ustawienia macki ugięciomierza od bazy l_{bi} (kolumna nr 5 tabeli),
- odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza przed odjazdem tramwaju y_{0i} (kolumna nr 6 tabeli),
- odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza po odjeździe tramwaju y_{1i} (kolumna nr 7 tabeli).

Dla każdego pomiaru obliczono:

- rzeczywisty nacisk koła na szynę P_i (kolumna nr 4 tabeli) - przyjmując masy tramwajów podawane przez producentów i średnią masę pasażera oraz zakładając równomierne rozmieszczenie masy i pasażerów w tramwajach, według zależności:

$$P_i = \left(\frac{m_t}{i_w \cdot i_{ow} \cdot 2} + \frac{m_p \cdot i_{pi}}{i_{ow} \cdot 2} \right) \cdot g \quad (42)$$

gdzie: P_i - nacisk koła na szynę [kN]

m_t - masa tramwaju (102 - 26 t; 105 - 16,8 t)

m_p - średnia masa pasażera (70 kg)

i_{pi} - liczba pasażerów przypadająca na ostatni wózek

i_w - liczba wózków w tramwaju (102 - trzy wózki; 105 - dwa wózki)

i_{ow} - liczba osi w wózku (dwie osie)

g - przyspieszenie ziemskie (9,81 kg·m/s²)

- ugięcie zmierzone szyny y_i (kolumna nr 8 tabeli) - z odczytów wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza przed i po odjeździe tramwaju, według wzoru:

$$y_i = \frac{2 \cdot (y_{0i} - y_{1i})}{100} \quad (43)$$

gdzie: y_i - ugięcie zmierzone szyny [mm]

y_{0i} - odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza przed odjazdem tramwaju [mm × 10⁻²]

y_{1i} - odczyt wskazań czujnika zegarowego ugięciomierza po odjeździe tramwaju [mm × 10⁻²]

- ugięcie skorygowane szyny y_{si} (kolumna nr 9 tabeli) - według wzoru (41), dla wyliczonych wcześniej wartości P_i i y_i oraz obliczonej dla całej serii pomiarów wartości $P_{sr} = 22,2$ kN.

W ostatnich trzech wierszach tabeli zamieszczono wyliczenia podsumowujące pomiary wykonane na danym stanowisku. Dla każdego stanowiska pomiarowego obliczono:

- wartość średnią, empiryczne odchylenie standardowe i wyrażony procentowo współczynnik zmienności dla nacisków koła na szynę P_i ,
- wartość średnią, empiryczne odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla ugięć zmierzonych szyny y_i ,
- wartość średnią, empiryczne odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla ugięć skorygowanych szyny y_{si} .

Wartości średnie, empiryczne odchylenia standardowe i współczynniki zmienności obliczono według wzorów:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (44)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (45)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad (46)$$

$$v_{\%} = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \% \quad (47)$$

gdzie: $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna
 n - liczba pomiarów mierzonej wielkości
 x_i - i -ty wynik mierzonej wielkości
 s - empiryczne odchylenie standardowe
 v - współczynnik zmienności
 $v_{\%}$ - współczynnik zmienności wyrażony procentowo

W części graficznej arkusza pomiarowego przedstawiono wykresy ilustrujące różnicowanie wartości ugięć skorygowanych na długości toru. Linia przerywaną rzadką na wykresach zaznaczono wartość średnią ugięć uzyskaną dla danego stanowiska, natomiast przerywaną gęstą - odchylenia standardowe od wartości średniej. Dla typów torów o niejednorodnej konstrukcji, pokazano na wykresach miejsca tych niejednorodności (granice płyt nawierzchni, podpory, podkłady), a w przypadku gdy znany był jedynie takt niejednorodności (rozstaw podpór lub podkładów) pod wykresem podano jego wartość.

5.4.4. Statystyczne opracowanie wyników badań

5.4.4.1. Eliminacja błędów dużych

Pierwszym stopniem eliminacji błędów dużych było ich wykluczanie już na etapie badań terenowych. Po uzyskaniu wartości znacznie odbiegającej od zmierzonych dotychczas na danym stanowisku, kontrolowano powtórnie poprawność wykonania pomiaru. Jeśli stwierdzono usterki (np. brak stabilności podparcia podstawy ugięciomierza albo zsunięcie się macki ugięciomierza z główki szyny) zapisywano je w rubryce uwagi roboczych protokołów i pomiaru takiego nie brano pod uwagę do dalszych rozważań. Łącznie wykluczono w ten sposób 2 pomiary z ogólnej liczby 288 wykonanych w terenie.

Drugim stopniem eliminacji błędów dużych było ich wykluczanie na etapie analizy wyników badań terenowych, zgodnie z zasadami analizy statystycznej [110]. Dokonując zestawienia wyników badań zamieszczonych w załączniku 1 sprawdzano dla każdego stanowiska czy analizowane wartości ugięć skorygowanych y_{si} mieszczą się z przyjętym prawdopodobieństwem ufności $P = 0,99$ w przedziale granic błędu dużego ($x_{bd D}$, $x_{bd G}$), które określano według zależności:

$$\begin{aligned}x_{bd D} &= \bar{x} - t_n(P) \cdot s \\x_{bd G} &= \bar{x} + t_n(P) \cdot s\end{aligned}\quad (48)$$

gdzie: $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna, według wzoru (44)
 $t_n(P)$ - wartość krytyczna odczytywana z tablic statystycznych [110]
 s - empiryczne odchylenie standardowe, według wzoru (45)

W przypadku gdy niektóre wyniki pomiarów wykraczały poza przedział granic błędu dużego, były one wykluczane, a procedura była powtarzana dla pozostałej liczby wyników pomiarów z danego stanowiska, aż do uzyskania jedynie wyników mieszczących się w przedziale granic błędu dużego.

W sumie na ogólną liczbę 286 pomiarów przeznaczonych do analizy wykluczono z powyższego powodu tylko jeden z nich.

Wyniki badań zamieszczone w załączniku nr 1 uwzględniają jedynie pomiary nie obciążone błędami dużymi.

5.4.4.2. Ocena rzeczywistej wartości mierzonej wielkości

Ponieważ dla każdego z czternastu stanowisk, pomiarów ugięć dokonywano tym samym urządzeniem w analogicznych warunkach, a pomiary były niezależne, dlatego jako oceny rzeczywistej wartości ugięcia skorygowanego szyny dla danego stanowiska pomiarowego użyto średniej arytmetycznej według wzoru (44). Do wyznaczenia granic przedziału ufności ($x_{pu D}$, $x_{pu G}$), który z przyjętym prawdopodobieństwem $P = 0,99$ pokrywa rzeczywistą wartość ugięcia skorygowanego, zgodnie z zasadami analizy statystycznej [110] zastosowano wzory:

$$\begin{aligned}x_{pu D} &= \bar{x} - t(P, k) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \\x_{pu G} &= \bar{x} + t(P, k) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}\end{aligned}\quad (49)$$

gdzie: $\bar{x}$ - średnia arytmetyczna, według wzoru (44)
 $t(P, k)$ - wartość odczytywana z tablic statystycznych (rozkład Studenta) [110]
 k - liczba stopni swobody, według wzoru:

$$k = n - 1 \quad (50)$$

n - liczba pomiarów mierzonej wielkości
 s - empiryczne odchylenie standardowe, według wzoru (45)

Iloczyn:

$$t(P, k) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100 \%}{\bar{x}}$$

jest procentowo wyrażonym błędem względnym oceny wartości rzeczywistej mierzonej wielkości.

Zestawienie średnich arytmetycznych wartości ugięć skorygowanych na czternastu przebadanych stanowiskach pomiarowych wraz z odpowiadającymi im ocenami ufności w formie przedziałów i błędów względnych przedstawiono w tabeli 9 (kolumny od 5 do 9).

Uzyskane z obliczeń wartości średnich arytmetycznych z kolumny nr 5 tabeli 9 możemy traktować jako rzeczywiste wartości ugięć skorygowanych szyny, z błędami względnymi oceny wartości rzeczywistej obliczonymi w kolumnie nr 9 tabeli 9 przy poziomie ufności $P = 0,99$. Średnia wartość względnego błędu oceny rzeczywistej wartości ugięć skorygowanych szyny dla wszystkich stanowisk wyniosła 15 %.

5.4.4.3. Ocena dokładności pomiaru

Odwołując się do założeń dotyczących pomiarów (wykonane tym samym urządzeniem pomiarowym, w analogicznych warunkach, niezależne), jako oceny dokładności pomiaru wartości ugięć skorygowanych szyny użyto oceny odchylenia standardowego [110].

W przypadku analizy dokładności badań na każdym ze stanowisk pomiarowych z osobna, za ocenę odchylenia standardowego przyjęto empiryczne odchylenie standardowe obliczone według wzoru (45). Do wyznaczenia granic przedziału ufności (s_{puD} , s_{puG}), który z przyjętym prawdopodobieństwem $P = 0,99$ pokrywa wartość odchylenia standardowego, zgodnie z zasadami analizy statystycznej [110] zastosowano wzory:

$$\begin{aligned} s_{puD} &= s \cdot z_1(P, k) \\ s_{puG} &= s \cdot z_2(P, k) \end{aligned} \quad (51)$$

gdzie: s - empiryczne odchylenie standardowe, według wzoru (45)
 $z_1(P, k)$ i $z_2(P, k)$ - współczynniki odczytywane z tablic statystycznych [110]
 k - liczba stopni swobody, według wzoru (50)

Zestawienie empirycznych odchylen standardowych dla ugięć skorygowanych szyny na czternastu przebadanych stanowiskach pomiarowych wraz z odpowiadającymi im ocenami ufności przedstawiono w tabeli 9 (kolumny od 10 do 14).

W przypadku ogólnej analizy dokładności badań - łącznie na wszystkich stanowiskach pomiarowych, za ocenę odchylenia standardowego przyjęto średnią ważoną S z empirycznych odchylen standardowych, według wzoru:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) \cdot s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}} \quad (52)$$

gdzie: m - liczba serii pomiarów
 n_i - liczby pomiarów w poszczególnych seriach
 s_i - empiryczne odchylenia standardowe poszczególnych serii

Tabela 9 Ocena rzeczywistej wartości i dokładności pomiaru ugięć skorygowanych szyny

Lp	stano- wisko pomia- rowe	liczba pomia- rów n	liczba stopni swobody k = n-1	ocena rzeczywistej wartości ugięcia skorygowanego szyny					ocena dokładności pomiaru ugięcia skorygowanego szyny					
				średnia arytme- tyczna x śr [mm]	wartość z tablic statyst. t(P,k)	granice przedziału ufności wart. rzecz.		błąd wzgl. oceny wart. rzecz.	empiryczne odchylenie standardowe s [mm]	wartość z tablic statyst. z1(P,k)	wartość z tablic statyst. z2(P,k)	granice przedziału ufności odch. st.		(n-1)s^2
						dolna x pu D [mm]	górna x pu G [mm]					dolna s pu D [mm]	górna s pu G [mm]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1a	10	9	0,316	3,250	0,236	0,395	25%	0,077	0,618	2,277	0,048	0,176	0,054
2	2a	12	11	0,206	3,106	0,166	0,247	19%	0,045	0,641	2,056	0,029	0,092	0,022
3	2b	15	14	0,261	2,977	0,239	0,284	9%	0,029	0,669	1,854	0,020	0,054	0,012
4	2c	20	19	0,173	2,862	0,152	0,194	12%	0,033	0,702	1,668	0,023	0,055	0,021
5	3a	22	21	0,119	2,833	0,094	0,143	21%	0,040	0,712	1,618	0,029	0,065	0,034
6	3b	21	20	0,175	2,845	0,150	0,200	14%	0,040	0,707	1,640	0,028	0,065	0,032
7	3c	22	21	0,157	2,833	0,141	0,173	10%	0,027	0,712	1,618	0,019	0,044	0,015
8	3d	25	24	0,105	2,799	0,094	0,116	11%	0,020	0,726	1,558	0,015	0,032	0,010
9	3e	22	21	0,175	2,833	0,137	0,213	21%	0,062	0,712	1,618	0,044	0,101	0,081
10	3f	25	24	0,105	2,799	0,078	0,131	25%	0,047	0,730	1,542	0,035	0,073	0,054
11	4a	47	46	0,428	2,687	0,387	0,470	10%	0,106	0,786	1,355	0,083	0,143	0,514
12	4b	10	9	0,428	3,250	0,331	0,525	23%	0,094	0,618	2,277	0,058	0,215	0,080
13	4c	22	21	0,464	2,833	0,419	0,509	10%	0,075	0,712	1,618	0,053	0,121	0,118
14	5a	12	11	1,101	3,106	1,044	1,157	5%	0,063	0,641	2,056	0,040	0,129	0,044
suma =		285	271	wart.śr. =				15%	suma =					1,091

Do wyznaczenia granic przedziału ufności ($S_{pu D}$, $S_{pu G}$), który z przyjętym prawdopodobieństwem $P = 0,99$ pokrywa wartość średniej ważonej odchyłeń standardowych, zgodnie z zasadami analizy statystycznej [110] zastosowano wzory:

$$\begin{aligned} S_{pu D} &= S \cdot [1 - q(P, k)] \\ S_{pu G} &= S \cdot [1 + q(P, k)] \end{aligned} \quad (53)$$

gdzie: S - średnia ważona empirycznych odchyłeń standardowych
 $q(P, k)$ - wartość odczytywana z tablic statystycznych [110]
 k - liczba stopni swobody, według wzoru:

$$k = N - m \quad (54)$$

m - liczba serii pomiarów
 N - łączna suma pomiarów we wszystkich seriach, według wzoru:

$$N = \sum_{i=1}^m n_i \quad (55)$$

Iloczyn:

$$q(P, k) \cdot 100 \%$$

jest procentowo wyrażonym błędem względnym oceny odchylenia standardowego mierzonej wielkości.

Liczba serii pomiarów m w przypadku przeprowadzonych badań terenowych odpowiada ilości stanowisk pomiarowych:

$$m = 14$$

Ze wzoru (52), korzystając z podsumowań kolumn nr 15 i 4 tabeli 9 obliczono:

$$S = \sqrt{\frac{1,091}{271}} = 0,063 \text{ mm}$$

Ze wzorów (55) i (54) obliczono:

$$N = 285$$

$$k = 271$$

Z tablic statystycznych odczytano:

$$q(P, k) = 0,11538$$

$$q(P, k) \cdot 100 \% \approx 12 \%$$

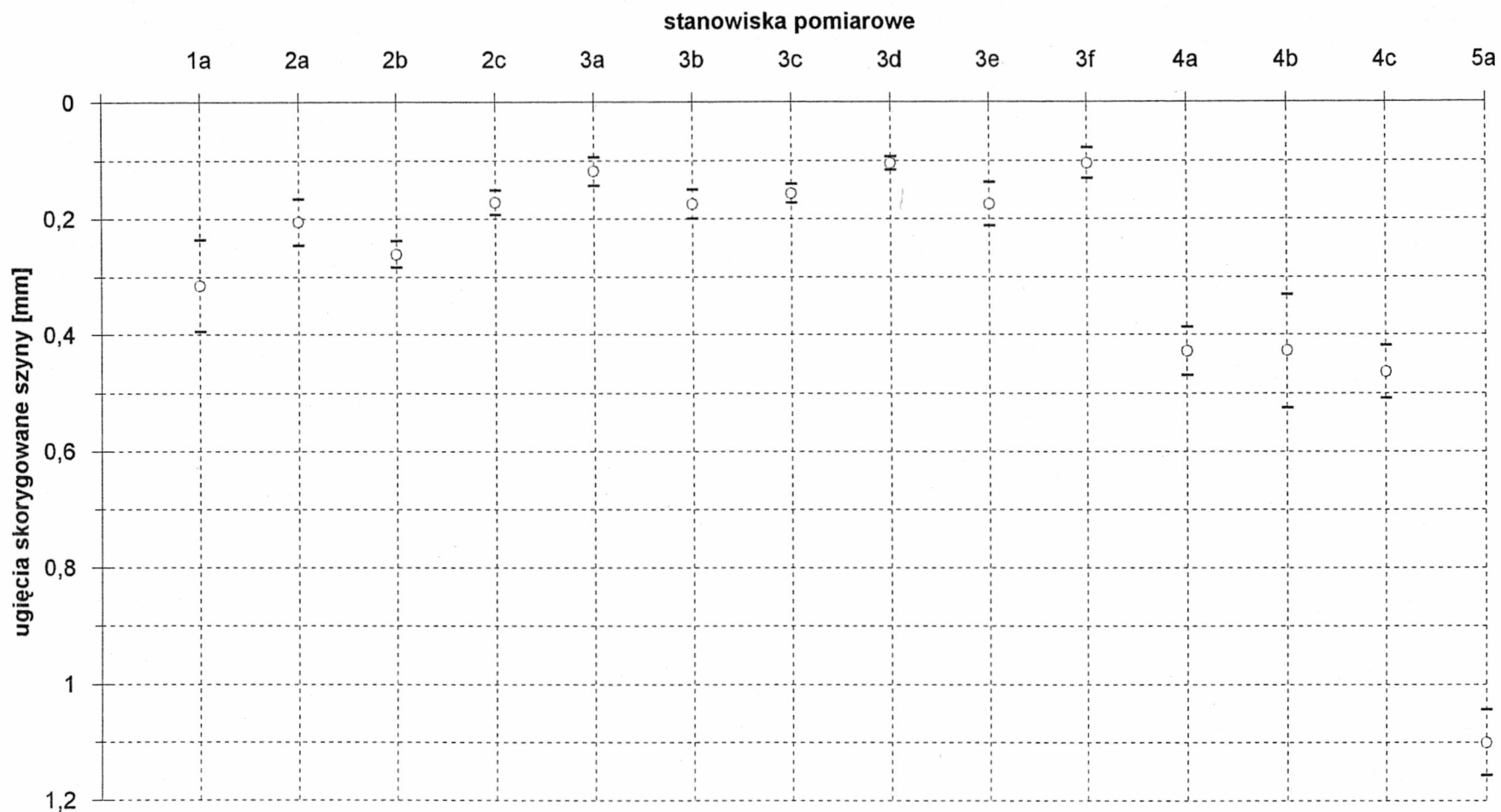
Ze wzorów (53) obliczono:

$$S_{pu D} = 0,056 \text{ mm}$$

$$S_{pu G} = 0,071 \text{ mm}$$

Uzyskaną z obliczeń wartość $S = 0,063 \text{ mm}$ możemy traktować jako dokładność (błąd, niepewność) pomiarów terenowych ugięć skorygowanych szyny przy pomocy ugięciomierza belkowego, z błędem względnym jej oceny wynoszącym 12 % przy poziomie ufności $P = 0,99$. Rozważana wartość dokładności pomiarów terenowych jest porównywalna z dokładnością wskazań ugięciomierza w przypadku badań polowych nawierzchni drogowych określaną na poziomie 0,05 mm [107].

Ocenę rzeczywistej wartości i dokładności pomiaru ugięć skorygowanych szyny przedstawiono dodatkowo w postaci graficznej na rys.48.



Rys.48 Ocena rzeczywistej wartości i dokładności pomiaru ugięć skorygowanych szyny; punktami w postaci okręgów oznaczono wartości średnie, natomiast w postaci kresek - odchylenia standardowe

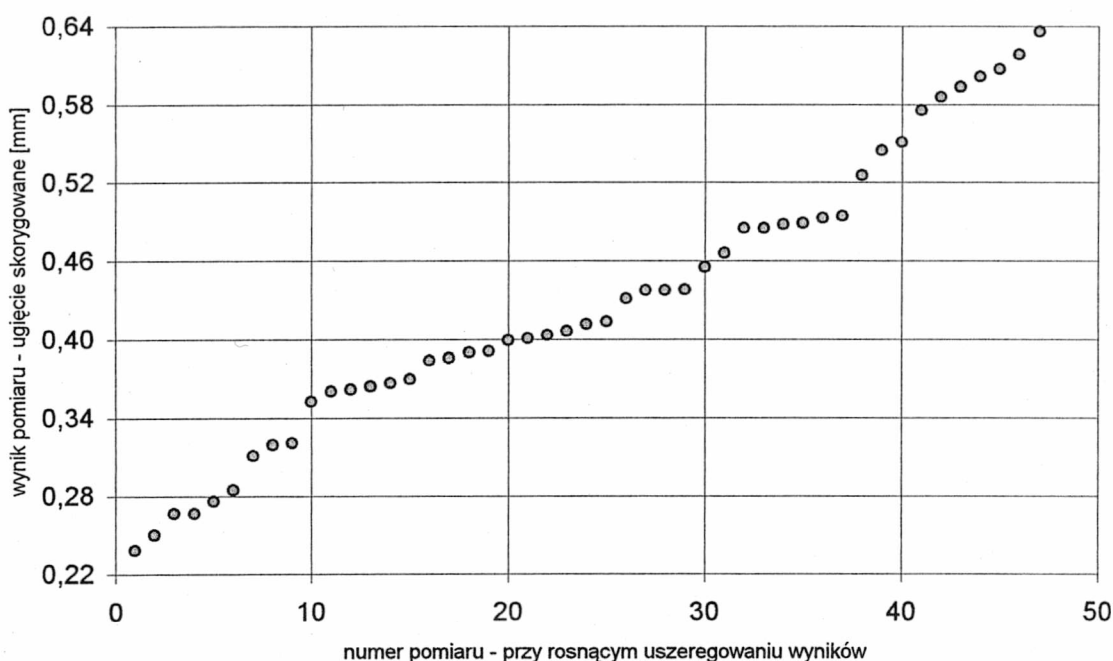
5.4.4.4. Sprawdzenie normalności rozkładu

Oceny ufności wartości średnich oraz odchyłeń standardowych zastosowane w niniejszej pracy obowiązują jedynie przy założeniu rozkładu normalnego błędów przypadkowych, dlatego przeprowadzony został sprawdzian zgodności badanego procesu z rozkładem normalnym.

W przypadku stanowiska 4a ze względu na dużą liczbę pomiarów ($n = 47$) możliwe było przeprowadzenie testu zgodności χ^2 ("chi kwadrat") [110]. Test ten przedstawiono graficznie na rys.49 oraz w tabeli 10. W wyniku testu uzyskano wartość parametru χ^2 wynoszącą 3,84 co w stosunku do około cztery razy większej wartości krytycznej χ^2_{kr} wynoszącej 13,28, odczytanej z tablic statystycznych dla prawdopodobieństwa ufności $P = 0,99$ oraz liczby stopni swobody $k = 4$ pozwala stwierdzić, że brak jest podstaw do twierdzenia, iż badane wyniki nie podlegają rozkładowi normalnemu.

W przypadku pozostałych stanowisk, ze względu na niewielkie liczby dokonywanych pomiarów ($n \leq 25$) niemożliwe było przeprowadzenie testów zgodności χ^2 , dlatego zastosowano przybliżone metody sprawdzania normalności rozkładu poprzez porównanie skośności i kurtozy z ich średnimi błędami kwadratowymi, co zostało przedstawione w tabeli 11. Na każdym z czternastu stanowisk pomiarowych żadna z dwóch analizowanych wielkości co do wartości bezwzględnej nie przewyższyła ponad trzykrotnie swojego błędu kwadratowego (kolumny 6 i 9 tabeli 11), dlatego brak jest podstaw do twierdzenia iż badane wyniki nie podlegają rozkładowi normalnemu.

Dla każdego z czternastu stanowisk pomiarowych wykonano dodatkowo histogramy rozkładu wyników pomiarów ugięć skorygowanych szyny, które przedstawiono zbiorczo na rys.50. Ze względu na zróżnicowanie liczby dokonywanych pomiarów n na każdym ze stanowisk pomiarowych, długości klas dobierano indywidualnie. Kształt histogramów jest kolejnym potwierdzeniem zgodności badanego procesu z rozkładem normalnym.



Rys.49 Test zgodności "chi kwadrat" dla stanowiska pomiarowego 4a - przygotowanie danych

Tabela 10 Test zgodności "chi kwadrat" dla stanowiska pomiarowego 4a

Dane z pomiarów:

- wyniki pomiarów - zgodnie z załącznikiem 1, stanowisko 4a

- wartość średnia wyników pomiarów

- odchylenie standardowe wyników pomiarów

$\bar{x} = 0,43$

$s = 0,11$

Określenie przedziałów wyników pomiarów dla przeprowadzenia testu zgodności "chi kwadrat":

- górna granica pierwszego przedziału

- długość przedziałów

- liczba przedziałów

$x_1 = 0,28$

$x_i - x_{(i-1)} = 0,06$

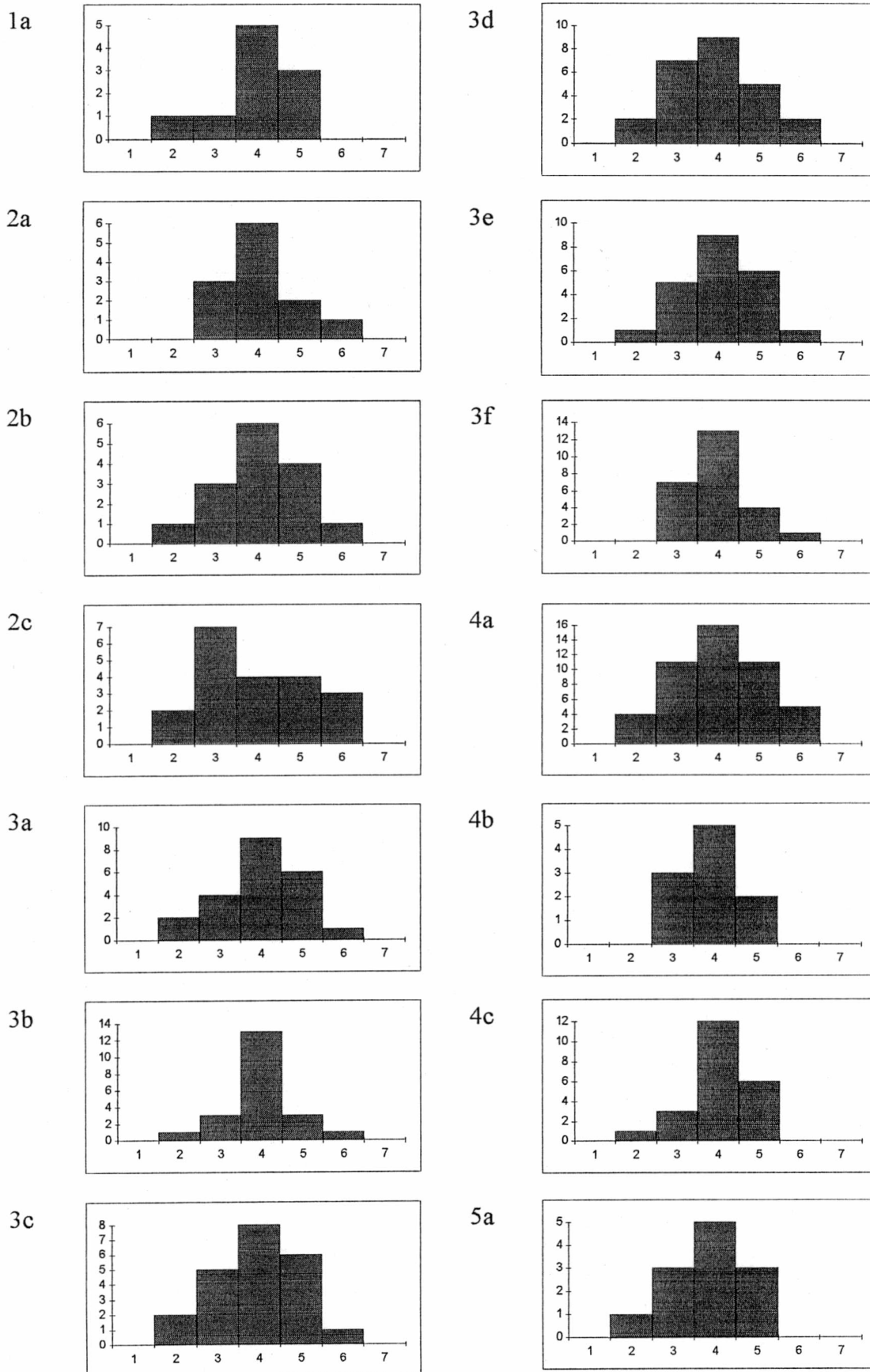
$l = 7$

numer przedziału i	granica przedziału		liczba wyników w przedziale mi	obliczenie sumy "chi kwadrat"				
	dolna x(i-1)	górna xi		ti = (xi - xśr)/s	wart. całki prawdop. fi(ti)	pi = fi(ti) - fi(t(i - 1))	mi - n*pi	(mi - n*pi)^2/n*pi
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-	-	-	-	- niesk.	-0,5	-	-	-
1	- niesk.	0,28	5	-1,403594	-0,4198	0,0802	1,23	0,40
2	0,28	0,34	4	-0,836116	-0,2985	0,1213	-1,70	0,51
3	0,34	0,40	11	-0,268637	-0,1059	0,1926	1,95	0,42
4	0,40	0,46	10	0,298841	0,1175	0,2234	-0,50	0,02
5	0,46	0,52	7	0,866319	0,3068	0,1894	-1,90	0,41
6	0,52	0,58	4	1,433797	0,4242	0,1173	-1,52	0,42
7	0,58	+ niesk.	6	+ niesk.	0,5	0,0758	2,44	1,67
Sumy:			n = 47	-	-	1	-	"chi kwadrat" = = 3,84

Liczba stopni swobody: $k = l - 3 = 4$

Tabela 11 Porównanie skośności i kurtozy z ich średnimi błędami kwadratowymi

L.p.	stanowisko	liczba pomiarów n	skośność	średni błąd kwadratowy skośności	iloraz kolumn 4 / 5	kurtoza	średni błąd kwadratowy kurtozy	iloraz kolumn 7 / 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1a	10	-1,4028	0,6145	2,3	0,7607	0,9224	0,8
2	2a	12	0,7497	0,5818	1,3	-0,0649	0,9165	0,1
3	2b	15	-0,0611	0,5401	0,1	-0,4128	0,8921	0,5
4	2c	20	0,3358	0,4858	0,7	-1,1429	0,8412	1,4
5	3a	22	-0,6445	0,4681	1,4	-0,4466	0,8210	0,5
6	3b	21	0,2059	0,4767	0,4	1,0474	0,8310	1,3
7	3c	22	-0,0979	0,4681	0,2	-0,8236	0,8210	1,0
8	3d	25	0,1359	0,4447	0,3	0,1625	0,7921	0,2
9	3e	22	0,4367	0,4681	0,9	-0,4472	0,8210	0,5
10	3f	25	1,1513	0,4447	2,6	0,1039	0,7921	0,1
11	4a	47	0,2006	0,3391	0,6	-0,6869	0,6372	1,1
12	4b	10	0,5971	0,6145	1,0	-0,2655	0,9224	0,3
13	4c	22	-1,2993	0,4681	2,8	0,8564	0,8210	1,0
14	5a	12	0,1679	0,5818	0,3	-0,5182	0,9165	0,6



Rys.50 Histogramy rozkładu wyników pomiarów ugięć skorygowanych na czternastu stanowiskach pomiarowych; oś odciętych: klasy jako przedziały wartości ugięć skorygowanych; oś rzędnych: liczba wyników w danej klasie

5.4.5. Analiza wyników badań

5.4.5.1. Porównanie wyników badań

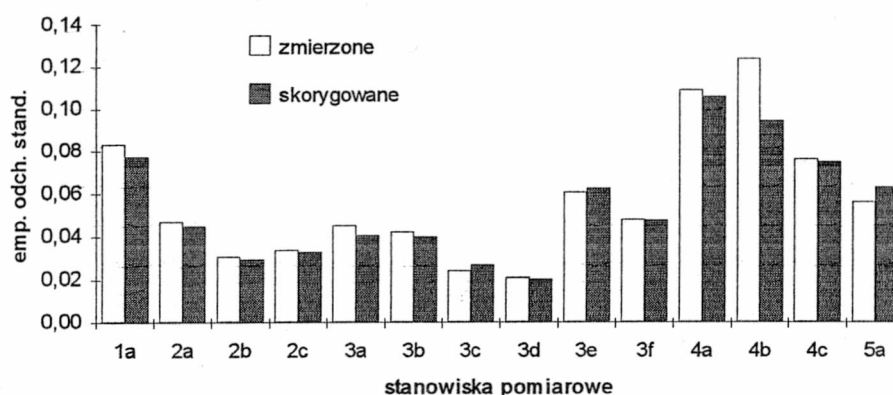
Zestawienie porównawcze wyników badań terenowych przedstawiono w tabeli 12. Tabela ta składa się z czterech głównych części (kolumn):

- I - dane identyfikujące badane typy torów i stanowiska pomiarowe,
- II - dane dotyczące pionowych nacisków koła na szynę,
- III - dane dotyczące zmierzonych ugięć szyny,
- IV - dane dotyczące przeliczonych ugięć skorygowanych szyny.

W podsumowaniu tabeli zamieszczono dwie wielkości wyliczone dla wszystkich stanowisk: ogólną liczbę pomiarów wziętych pod uwagę do analiz oraz wartość średnią ze wszystkich odnotowanych podczas pomiarów nacisków koła na szynę P_{sr} wyliczoną jako średnią ważoną z wagami w postaci liczby pomiarów na danym stanowisku (kolumna 5 tabeli 12).

Obliczone naciski koła na szynę (kolumna nr 6 tabeli 12), mimo dwu odmiennych typów wagonów i różnych napełnień cechuje małe zróżnicowanie. Dla poszczególnych stanowisk pomiarowych empiryczne odchylenia standardowe stanowiły tylko od 1 do 7 % wartości średnich nacisków koła na szynę występujących podczas pomiarów (kolumna nr 7 tabeli 12). Przyczyną tak niewielkiego zróżnicowania nacisków koła na szynę jest zapewne fakt, iż pomiary terenowe wykonano w okresie wakacyjnym, przy niewielkich napełnieniach taboru.

Wartości zmierzonych ugięć szyny (kolumna nr 8 tabeli 12), mimo ich obciążenia błędem systematycznym (zróżnicowanie nacisków koła na szynę), zostały wzięte pod uwagę w analizie w celu ich porównania z ugięciami skorygowanymi szyny i wykazania w ten sposób, że procedura usunięcia wspomnianego błędu systematycznego jest w założeniach poprawna. Jeżeli zróżnicowanie nacisków koła na szynę potraktowalibyśmy jako jeden z błędów przypadkowych obciążających dodatkowo pomiar ugięcia szyny i nie dokonywalibyśmy przeliczenia na ugięcia skorygowane, to należałoby się spodziewać większego rozrzutu wartości ugięć uzyskiwanych z pomiarów w stosunku do wartości średniej, a co za tym idzie większych wartości empirycznych odchyleń standardowych. Na rys. 51 przedstawiono porównanie empirycznych odchyleń standardowych ugięć szyny - zmierzonych w stosunku do skorygowanych.



Rys.51 Porównanie empirycznych odchyleń standardowych ugięć szyny zmierzonych w stosunku do skorygowanych

Tabela 12 Zestawienie porównawcze wyników badań terenowych ugięć szyny

I					II		III		IV								
Lp	typ toru	stano- wisko pomia- rowe	wiek toru [lata]	liczba pomia- rów n	naciski koła na szynę P		ugięcia szyny y		ugięcia skorygowane szyny ys								
									wartość średnia				empir. odch.st. dla stanow.	współczynnik zmienności			
					wart. średn. [kN]	wsp. zm. %	dla stanowiska		dla stanow. [mm]	śr. dla typu toru				dla stanow.	śr. dla typu toru		
							wart.śr. [mm]	emp. odch.st.		bezwzgl. [mm]	porów- nawczo	miara rozrz.	bezwzgl.		porów- nawczo	miara rozrz.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	na podkł.dr.	1a	2	10	22,85	4	0,326	0,083	0,316	0,316	2,5	-	0,077	0,245	0,245	4,5	-
2	na podkł.bet.	2a	2	12	21,45	3	0,200	0,047	0,206	0,214	1,5	21%	0,045	0,217	0,173	3	31%
3		2b	2	15	21,96	3	0,259	0,031	0,261				0,029	0,112			
4		2c	1	20	21,43	2	0,167	0,034	0,173				0,033	0,191			
5	na podpo- rach punktowych	3a	5	22	23,01	5	0,124	0,045	0,119	0,139	1	24%	0,040	0,340	0,290	5	38%
6		3b	4	21	22,53	3	0,178	0,042	0,175				0,040	0,228			
7		3c	3	22	21,83	4	0,154	0,024	0,157				0,027	0,172			
8		3d	2	25	21,79	3	0,103	0,021	0,105				0,020	0,194			
9		3e	1	22	21,81	2	0,172	0,060	0,175				0,062	0,355			
10		3f	1	25	22,65	3	0,107	0,048	0,105				0,047	0,452			
11	węgierski	4a	7	47	22,47	5	0,434	0,109	0,428	0,440	3	5%	0,106	0,247	0,210	3,5	21%
12		4b	5	10	22,76	7	0,442	0,123	0,428				0,094	0,221			
13		4c	1	22	22,39	3	0,468	0,076	0,464				0,075	0,161			
14	z wkł. gum.	5a	2	12	21,69	1	1,075	0,056	1,101	1,101	8	-	0,063	0,057	0,057	1	-
ogólna liczba pomiarów = 285																	
wartość średnia ze wszystkich odnotowanych podczas pomiarów nacisków koła na szynę Pśr = 22,2																	

Na ogólną liczbę 14 stanowisk pomiarowych w 11 przypadkach zastosowanie przeliczenia na ugięcia skorygowane spowodowało zmniejszenie wartości empirycznych odchylenia standardowych. Jedynie w przypadku trzech stanowisk: 3c, 3e i 5a empiryczne odchylenia standardowe uległy niewielkiemu wzrostowi, co można jednakże wytłumaczyć znacznie mniejszymi napełnieniami taboru w przypadku tych trzech stanowisk pomiarowych, przez co zróżnicowanie nacisku koła na szynę było na tych stanowiskach niewielkie i nie ono miało decydujący wpływ na zróżnicowanie wartości ugięć.

Jako miarę optymalnych wartości ugięć skorygowanych szyny zastosowano obliczone wartości średnie (kolumny 10 i 11 tabeli 12). Jako bezwzględną miarę zróżnicowania wartości ugięć skorygowanych szyny zastosowano obliczone empiryczne odchylenia standardowe (kolumna 14 tabeli 12), natomiast jako względną miarę zróżnicowania wartości ugięć skorygowanych szyny - obliczone współczynniki zmienności (kolumny 15 i 16 tabeli 12).

Analizę porównawczą ugięć skorygowanych szyny przeprowadzono na dwóch poziomach:

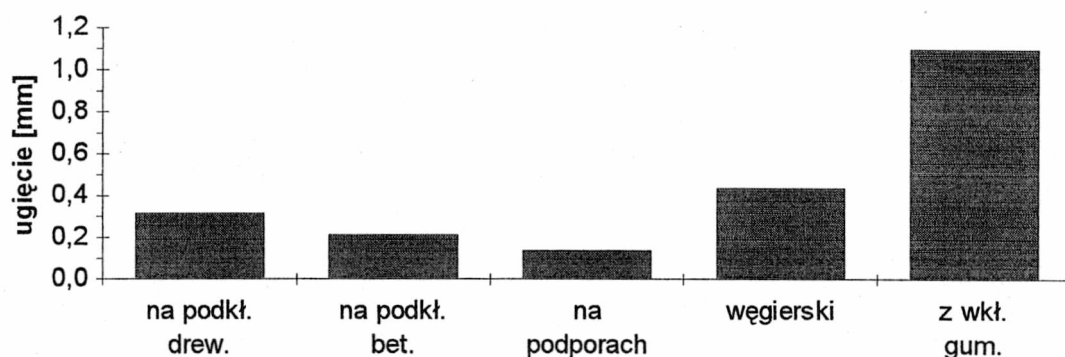
- ogólnym - z punktu widzenia odrębnych pięciu typów torów,
- szczegółowym - z punktu widzenia osobnych stanowisk pomiarowych.

Porównując wyniki pomiarów dla pięciu przebadanych typów torów (poziom ogólny), wartości średnie ugięć skorygowanych szyny (kolumna 11 tabeli 12) i odpowiadających im współczynników zmienności (kolumna 16 tabeli 12) dla typów torów przebadanych na więcej niż jednym stanowisku (wiersze $2 \div 4$; $5 \div 10$; $11 \div 13$ tabeli 12) obliczono bez uwzględnienia wag pomiarów, jakimi mogłyby być liczby dokonanych pomiarów na każdym ze stanowisk (kolumna 5 tabeli 12), gdyż mimo iż rozważane są odpowiednio nawierzchnie tego samego typu, to zostały one wykonane w innym czasie, w innych warunkach, z materiałów nie zawsze tych samych producentów, a w niektórych przypadkach - z drobnymi różnicami konstrukcyjnymi, dlatego nie mogą być traktowane jako osobne serie pomiarów tej samej wielkości. Uwzględnienie wag w tej sytuacji dyskryminowałoby stanowiska z mniejszą liczbą pomiarów, a chodziło tu o określenie wartości średnich ze zdarzeń równoprawdopodobnych.

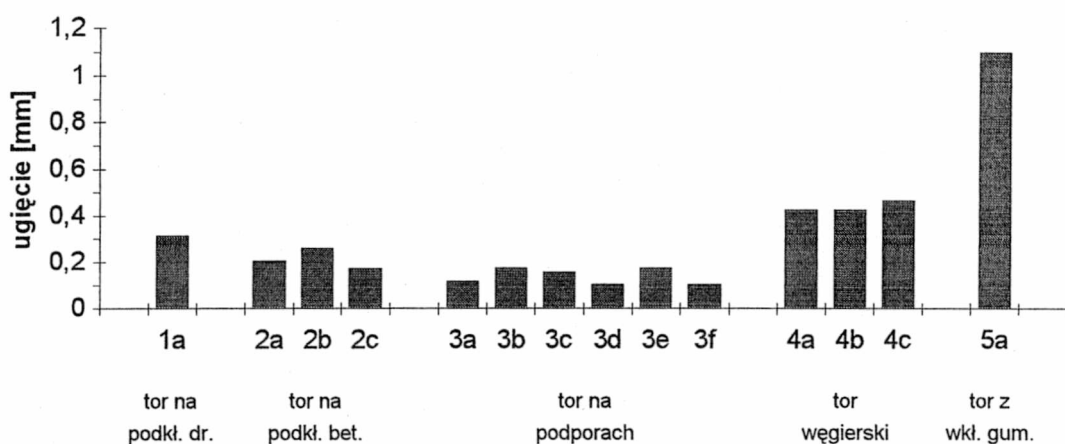
W celu oceny zróżnicowania uzyskanych wartości średnich i współczynników zmienności ugięć skorygowanych szyny dla typów torów przebadanych na więcej niż jednym stanowisku, ale tylko w zakresie danego typu toru, obliczono ich miary rozrzutu w postaci procentowo wyrażonych współczynników zmienności (kolumny 13 i 18 tabeli 12).

Analizę porównawczą ugięć skorygowanych szyny przedstawiono graficznie na rysunkach 52 - 55.

Porównując ugięcia skorygowane szyny uzyskane dla pięciu analizowanych typów torowisk zabudowanych (poziom ogólny - rys.52), najmniejsze wartości ugięć osiągnął tor na podporach punktowych, bardziej podatne były kolejno tory: na podkładach betonowych, na podkładach drewnianych i węgierski, natomiast najbardziej podatny okazał się tor z wkładkami gumowymi. Wartości ugięć dla pięciu przebadanych typów torów po zaokrągleniu pozostają w stosunku jak **2,5 : 1,5 : 1 : 3 : 8** (kolumna 12 tabeli 12).



Rys.52 Średnie wartości ugięć skorygowanych szyny dla pięciu analizowanych typów torów

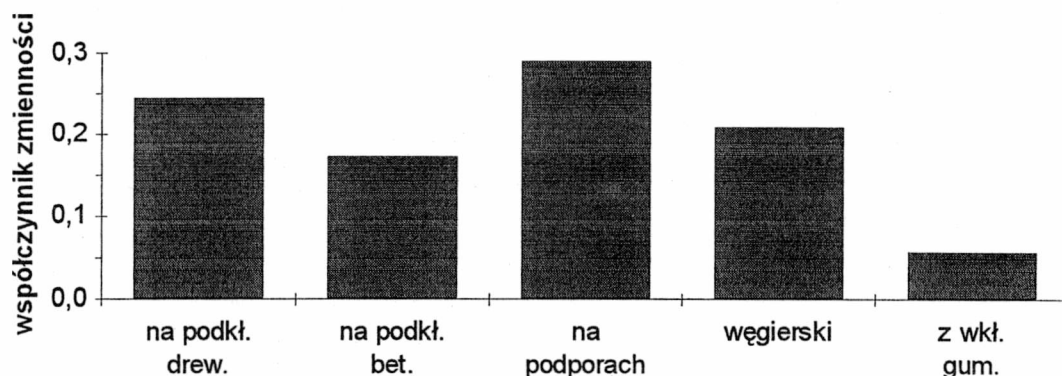


Rys.53 Średnie wartości ugięć skorygowanych szyny na czternastu stanowiskach pomiarowych

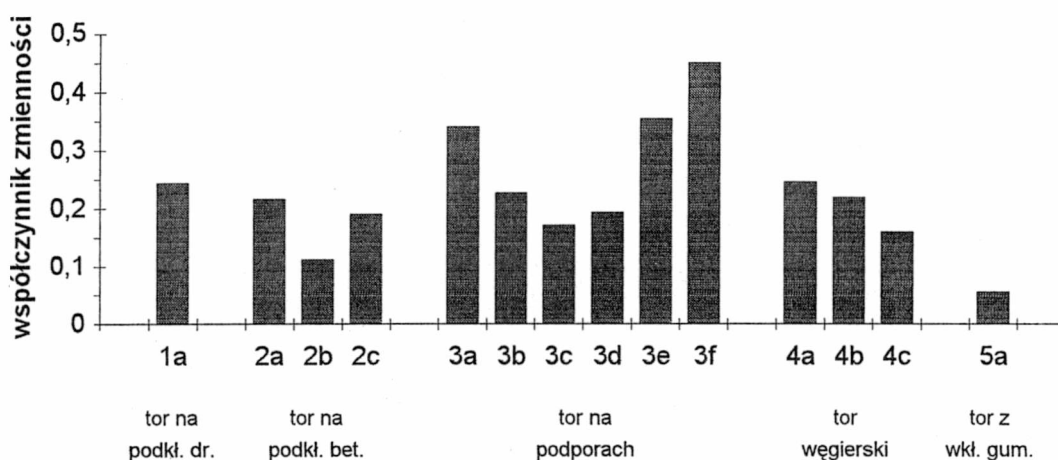
Porównując ugięcia skorygowane szyny uzyskane dla typów torów przebadanych na więcej niż jednym stanowisku (poziom szczegółowy - rys.53), zbliżone wartości uzyskano jedynie dla toru węgierskiego - przebadanego na trzech stanowiskach, praktycznie konstrukcyjnie zgodnych (za wyjątkiem warstwy podbudowy dolnej), a różniących się jedynie wiekiem. W przypadku torów na podkładach betonowych, przebadanych również na trzech stanowiskach, uzyskano dość rozbieżne wartości ugięć (około czterokrotnie bardziej rozbieżne niż w przypadku toru węgierskiego - kolumna 13 tabeli 12), mimo iż były to rozwiązania konstrukcje podobne, a różnica wieku była nieznaczna. W przypadku toru na podporach punktowych, przebadanego aż na sześciu stanowiskach, różniących się nie tylko wiekiem, ale i drobnymi szczegółami konstrukcyjnymi również uzyskano rozbieżne wartości ugięć (około pięciokrotnie bardziej rozbieżne niż w przypadku toru węgierskiego - kolumna 13 tabeli 12). Rozwiązania z przekładką podpodkładkową i podporą epoksydobetonową - 3a i 3f wykazały zgodność wartości ugięć, w przeciwieństwie do rozwiązań tylko z przekładką podpodkładkową - 3b i 3d; rozwiązania z przekładką poliuretanową - 3c i podlewem poliuretanowym - 3e uzyskały pośrednie wartości ugięć.

Porównując współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny uzyskane dla pięciu analizowanych typów torowisk zabudowanych (poziom ogólny - rys.54), najbardziej zbliżone wartości ugięć uzyskano dla toru z wkładkami gumowymi, znacznie bardziej rozbieżne dla pozostałych - kolejno: toru na podkładach betonowych,

węgierskiego, na podkładach drewnianych i toru na podporach punktowych. Wartości współczynników zmienności dla pięciu badanych typów torów po zaokrągleniu pozostają w stosunku jak 4,5 : 3 : 5 : 3,5 : 1 (kolumna 17 tabeli 12).



Rys.54 Współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny dla pięciu analizowanych typów torów



Rys.55 Współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny na czternastu stanowiskach pomiarowych

Porównując współczynniki zmienności wartości ugięć skorygowanych szyny uzyskane dla typów torów przebadanych na więcej niż jednym stanowisku (poziom szczegółowy - rys.55), analogicznie jak w przypadku porównywania ugięć skorygowanych szyny, zbliżone wartości uzyskano dla toru węgierskiego, bardziej rozbieżne dla torów na podkładach betonowych i na podporach punktowych (około odpowiednio półtora i dwa razy bardziej rozbieżne - kolumna 18 tabeli 12).

5.4.5.2. Zróźnicowanie wartości ugięć na długości toru

Zróźnicowanie wartości ugięć skorygowanych szyny uzyskane w pomiarach terenowych na poszczególnych stanowiskach jest spowodowane trzema następującymi przyczynami:

- błędem pomiaru ugięć,
- błędem w oszacowaniu wartości nacisku koła na szynę,
- niejednorodnością konstrukcyjną toru na długości badanych odcinków (stanowisk pomiarowych).

Dwie pierwsze przyczyny mają charakter błędów przypadkowych, zróżnicowanie ugięć szyny na długości toru spowodowane tymi przyczynami nie powinno wykazywać regularności. Trzecia przyczyna może natomiast powodować pewne regularności w zróżnicowaniu wartości ugięć szyny na długości toru.

Błąd (dokładność) pomiaru ugięć określono w punkcie 5.4.4.3. niniejszej pracy. Błąd w oszacowaniu wartości nacisku koła na szynę wynika z przyjętych uproszczeń dotyczących równomiernego rozmieszczenia masy i pasażerów w tramwajach oraz średniej masy pasażera. Ponadto masy tramwajów poddawanych przez wiele lat różnego rodzaju modernizacjom mogą różnić się od wartości określonych przez producenta.

Niejednorodność konstrukcyjna wzdłuż toru może być dwójaka:

- zamierzona - wynikająca z projektu konstrukcji toru (podparcie punktowe szyny, dylatacje podbudowy, styki płyt),
- niezamierzona - wynikająca z technologii wykonania konstrukcji toru oraz cech materiałowych jego elementów składowych (różny stopień zagęszczenia podsypki, niejednorodność podłoża, warstw podbudów, wibroizolacyjnych elementów podparć, zróżnicowanie grubości warstw).

Generalnie w analizowanych pięciu typach torów wystąpiły dwa rodzaje zamierzonej niejednorodności konstrukcyjnej toru:

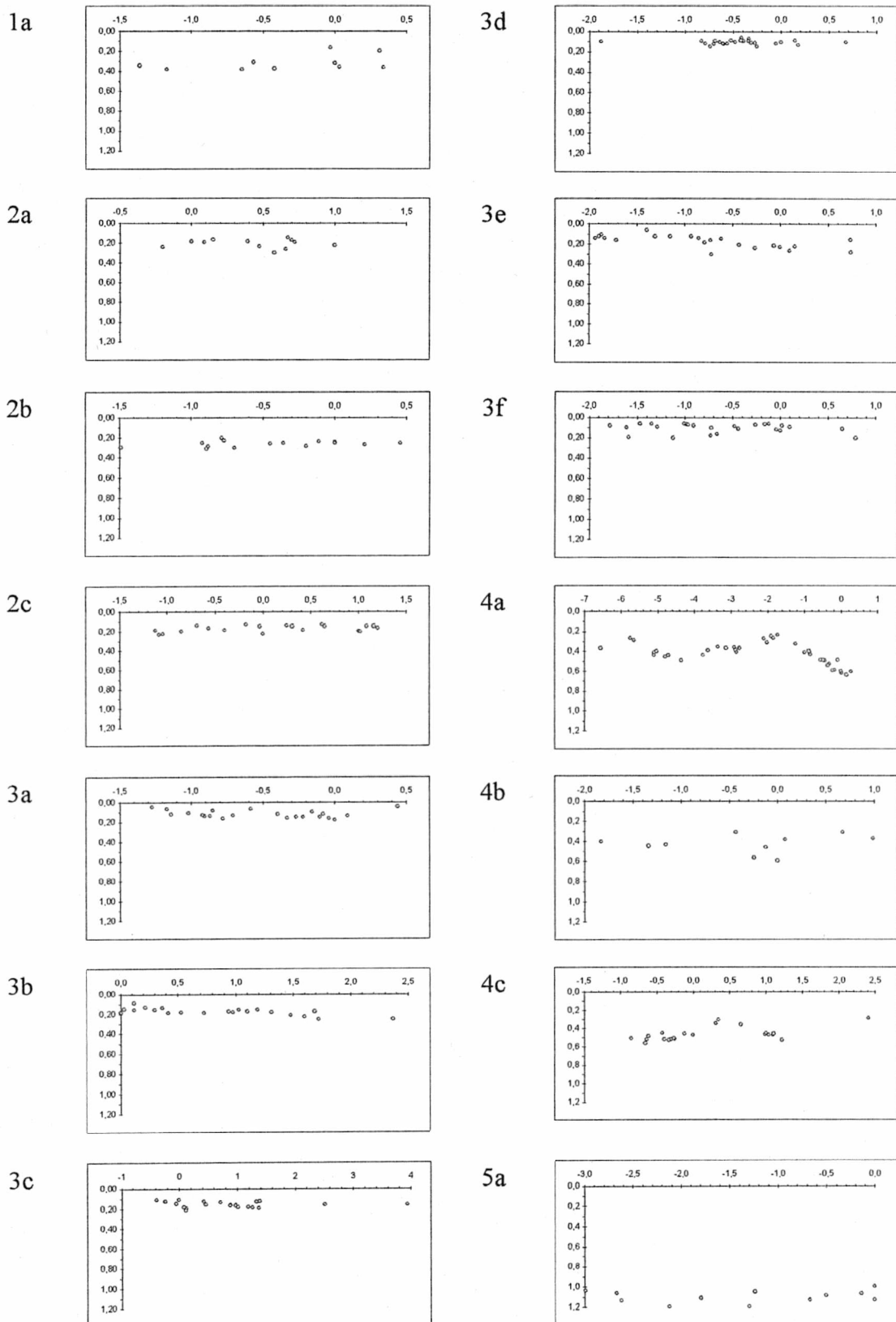
- punktowy model podparcia (podpory lub podkłady),
- brak ciągłości podbudowy (styki płyt węgierskich, dylatacje podbudowy betonowej).

Pomiary terenowe wykonywane były bez odkrywek. Tylko w niektórych przypadkach możliwe było uzyskanie informacji o zamierzonej niejednorodności konstrukcyjnej toru:

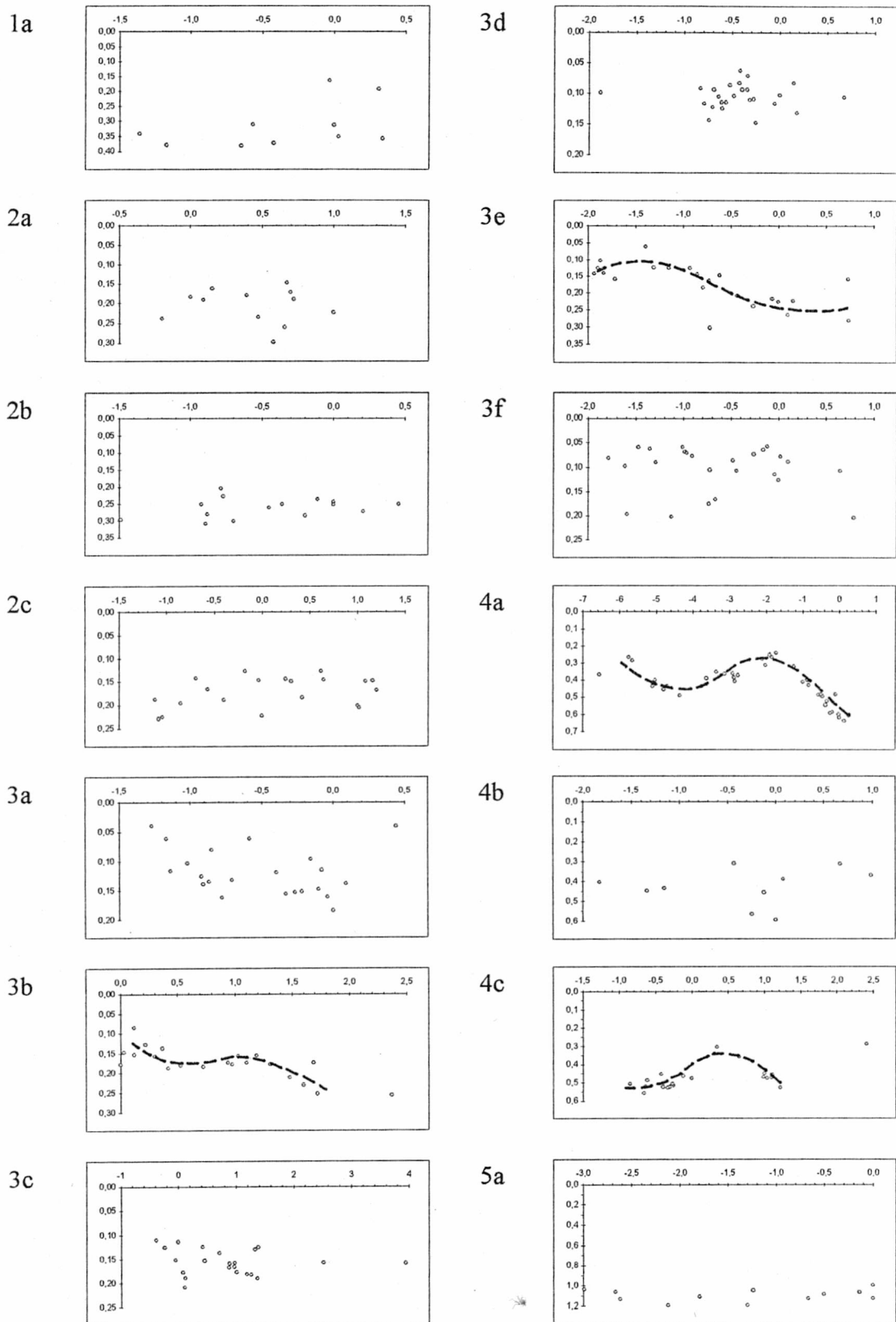
- stanowisko 2a - tor na podkładach strunobetonowych zabudowany płytami typu "Kutno" PPTxW (komory na sprężyny SB3 wyznaczały położenie podkładów),
- stanowisko 2c - tor na podkładach strunobetonowych, niezabudowany na międzytorzu (po odsypaniu podsypki rozpoznano położenie podkładów),
- stanowiska 4a, 4b i 4c - tor węgierski (styki płyt węgierskich).

W pozostałych przypadkach torów o punktowym modelu podparcia szyny (stanowiska: 1a, 2b, 3a ÷ 3f) znany był jedynie takt niejednorodności (rozstaw podkładów lub podpór). W przypadku torów z zastosowaniem dylatowanej podbudowy betonowej (stanowiska 3a ÷ 3f, 4b, 4c i 5a) biorąc pod uwagę fakt, że dylatacje te zgodnie z dokumentacją projektową były stosowane w rozstawie średnio co 6 m, natomiast długości wymienionych stanowisk pomiarowych nie przekraczały 5 m - należało zakładać, że na długości każdego stanowiska mogła wystąpić jedna dylatacja podbudowy betonowej.

Dla każdego stanowiska pomiarowego, w oparciu o wykresy ugięć będące częścią graficzną arkuszy pomiarów zamieszczonych w załączniku 1, przeprowadzono analizę zróżnicowania wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru. Wykresy te w formie zbiorczej przedstawiono na rys. 56 i 57. Na pierwszym z omawianych rysunków zastosowano taką samą skalę osi rzędnych wykresów, co pozwala na porównywanie kształtów zróżnicowania wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru dla poszczególnych stanowisk między sobą. Na drugim z omawianych rysunków zastosowano zmienną skalę osi rzędnych wykresów - dopasowaną do wartości maksymalnych ugięć uzyskiwanych na danym stanowisku, w celu uwydatnienia ewentualnych regularności w zróżnicowaniu wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru.



Rys.56 Zróznicowanie wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru dla czternastu stanowisk pomiarowych przy jednakowej skali osi rzędnych wykresów; oś odciętych: położenie punktu pomiarowego [m]; oś rzędnych: ugięcie skorygowane [mm]



Rys.57 Zróżnicowanie wartości ugięć skorygowanych szyny na długości toru dla czterenaście stanowisk pomiarowych przy zmiennej skali osi rzędnych wykresów; oś odciętych: położenie punktu pomiarowego [m]; oś rzędnych: ugięcie skorygowane [mm]

Zarówno w przypadku zamierzonej niejednorodności konstrukcyjnej toru o znanej lokalizacji jak i tylko o znanym takcie, nie wystąpiła zauważalna zależność wartości ugięć od tych niejednorodności. Potwierdza to poprawność konstrukcyjną analizowanych rozwiązań, w przypadku których zachowana jest idea konstrukcji toru o niejednorodnym modelu podparcia szyny (np. punktowym), w którym niejednorodności (np. podpory, podkłady) są rozmieszczone cyklicznie i na tyle często, że tor pracuje tak, jakby posiadał model podparcia jednorodny (ciągły).

Jednakże w przypadku niektórych stanowisk dla torów następujących dwóch typów:

- na podporach punktowych - stanowiska: 3b i 3e,
- węgierskiego - stanowiska: 4a i 4c,

wystąpiło zauważalne regularne zróżnicowanie wartości ugięć na długości toru, które na rys.57 zaznaczono grubą przerywaną linią.

Przyczyny owego zróżnicowania w przypadku toru węgierskiego mogą być następujące:

- niska jakość zastosowanego materiału (np. niejednorodność gumowej taśmy podszynowej),
- zła jakość robót (np. wypełnienie w pewnych miejscach rowków gumowej taśmy podszynowej piaskiem albo betonem).

Dociekanie prawdopodobnych przyczyn rozważanego zróżnicowania wartości ugięć na długości toru nie jest jednak celem niniejszej pracy. Generalnie sam fakt wystąpienia takiego zróżnicowania świadczy o złej jakości wykonania analizowanego toru.

6. OBLICZENIE TEORETYCZNYCH WARTOŚCI UGIĘĆ SZYNY DLA PRZEBADANYCH TOROWISK TRAMWAJOWYCH

6.1. Założenia

6.1.1. Metoda obliczeń

Obliczenia teoretycznych wartości ugięć szyny dla przebadanych na czternastu stanowiskach pięciu typów zabudowanych torowisk tramwajowych przeprowadzono według klasycznej teorii obliczania nawierzchni szynowej, opartej na modelu belki ciągłej na sprężystym podłożu, przedstawionej szczegółowo w rozdziale 4.2. niniejszej pracy.

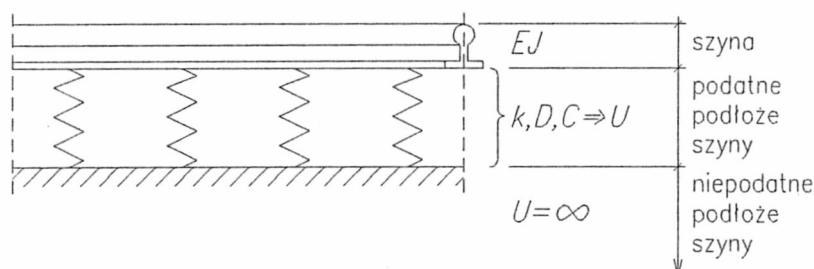
6.1.2. Schemat obciążenia

Jako schemat obciążenia szyny przyjęto naciski dwóch kół wózka tramwaju, za którym dokonywany był pomiar ugięcia szyny. Naciski kół pozostałych wózków tramwaju pominięto, uznając je za zbyt odległe (ponad 6 m).

6.1.3. Model obliczeniowy

Ze względu na znaczne zróżnicowanie konstrukcji przebadanych pięciu typów zabudowanych torowisk tramwajowych (klasyczne, bezpodsypkowe; z podparciem szyny: ciągłym, punktowym, pośrednim - strefowym) w celu ułatwienia obliczeń i późniejszej analizy porównawczej, w niniejszej pracy zdefiniowano, a następnie zastosowano uproszczony model obliczeniowy nawierzchni szynowej (rys.58), w którym konstrukcję toru podzielono ideowo na następujące trzy elementy:

- szynę,
- podatne podłoże szyny,
- niepodatne podłoże szyny.



Rys.58 Uproszczony model obliczeniowy nawierzchni szynowej

W zaproponowanym uproszczonym modelu obliczeniowym nawierzchni szynowej dyskretne oraz pośrednie (strefowe) podparcie i zamocowanie szyny zostaje sprowadzone do ciągłego. Model ten staje się dzięki temu uniwersalny - możliwy do zastosowania w przypadku wszystkich pięciu przebadanych typów zabudowanych torowisk tramwajowych.

Niepodatne podłoże szyny nie bierze udziału w procesie odkształceń toru, dlatego w obliczeniach ugięć nie jest potrzebna znajomość jego sztywności. Dla torów typu 1 i 2, ponieważ sztywność podatnego podłoża będzie wyrażana współczynnikiem podłoża szyny U ujmującym z definicji podatność wszystkich elementów składowych konstrukcji toru od stopki szyny w dół, nie jest potrzebna znajomość położenia granicy pomiędzy podatnym a niepodatnym podłożem. Dla torów typu 3, 4 i 5, ze względu na około 4 tysiące razy większy moduł sprężystości dla betonów podbudów, w porównaniu do gumowych i poliuretanowych podatnych elementów przytwierdzeń lub podparć szyn (tabele 1 - 5), założono że wspomniane podbudowy betonowe będą stanowiły

niepodatne podłoże tych torów (tory typów 3 i 5 - ławy o grubości ok. 25 cm z betonów klasy B25 ÷ B35 na zagęszczonym podłożu; tory typu 4 - prefabrykowane żelbetowe płyty o grubości 18 cm z betonu klasy B35).

Podatne podłoże szyny w zależności od typu toru obejmuje następujące jego elementy składowe:

- dla toru typu 1 - przekładki w przytwierdzeniu, podkład drewniany, podsypkę i grunty podłoża,
- dla toru typu 2 - przekładkę w przytwierdzeniu, podsypkę i grunty podłoża,
- dla torów typu 3, 4 i 5 - przekładki i podlewy w podparciu i przytwierdzeniu szyny.

Szywność zastępcza podatnego podłoża szyny w obliczeniach ugięć wyrażana jest wstępnie najbardziej odpowiednim dla danego typu konstrukcji współczynnikiem szywności (U , k , D albo C), a w przypadku gdy nie jest to współczynnik podłoża szyny U zostaje ostatecznie na niego przeliczona.

Szywność w obliczeniach ugięć każdego z pięciu przebadanych typów torowisk jest reprezentowana przez moduł sprężystości stali szynowej E oraz moment bezwładności przekroju poprzecznego względem obojętnej osi poziomej J .

Konstrukcje torów typu 4 i 5 są rozwiązaniami typowo tramwajowymi. W ich przypadku dane dotyczące szywności podatnego podłoża szyny zaczerpnięte z literatury lub opracowań badawczych nadają się bezpośrednio do zastosowania w obliczeniach będących przedmiotem niniejszego opracowania. Inaczej jest w przypadku konstrukcji torów typu 1, 2 i 3 wywodzących się z rozwiązań typowo kolejowych. W ich przypadku dane dotyczące szywności podatnego podłoża szyny odpowiadają charakterystyce ruchu kolejowego (wartości obciążeń, wymiary elementów) i wymagają dostosowania do specyfiki ruchu tramwajowego.

Dla przekładek stosowanych w torach kolejowych ich szywność wyznacza się najczęściej z przedziałów obciążeń 15 - 90 kN [106] albo 18 - 68 kN [124] dla krzywych obciążania. Dolna granica przedziałów wynika z siły docisku łapek w przytwierdzeniach, którą ze względu na stosowanie tych samych rozwiązań możemy uznać za właściwą również dla torów tramwajowych - w niniejszym opracowaniu przyjęto wartość 15 kN. Górna granica przedziałów wynika natomiast ze średniego maksymalnego nacisku na przekładkę występującego w eksploatacji, która jest kilkukrotnie mniejsza w ruchu tramwajowym niż w kolejowym. Uwzględniając średnią wartość nacisku koła na szynę uzyskaną w badaniach terenowych wynoszącą $P_{sr} = 22,2$ kN oraz fakt, że dla poprawnie zaprojektowanej nawierzchni szynowej na podporę przypada w przybliżeniu połowa nacisku koła na szynę [64] przyjęto w niniejszym opracowaniu za górną granicę przedziału obciążeń przy wyznaczaniu szywności przekładek w torach tramwajowych uważać wartość: $15 \text{ kN} + 0,5 \times 22,2 \text{ kN} \approx 25 \text{ kN}$. Ze względu na fakt, iż w badaniach terenowych mierzono nie tyle ugięcie szyny pod działaniem obciążenia, co wartość zaniku ugięcia po zdjęciu obciążenia z szyny, w niniejszym opracowaniu przy obliczaniu ugięć szyny bardziej odpowiednia okazuje się być szywność elementów podatnych wyznaczona dla cyklu odciążania, a nie obciążania.

Dla przekładek i podlewów, w przypadku których dostępne były wykresy charakterystyk "siła - ugięcie", dokonano w niniejszym opracowaniu ustalenia własnych wartości ich szywności statycznej:

- z przedziału obciążeń 15 - 25 kN,
- dla krzywych odciążania (jeśli były dostępne).

Miary szywności podatnego podłoża szyny zastosowane w uproszczonym modelu obliczeniowym nawierzchni szynowej cechuje uzależnienie od temperatury. Terenowe badania ugięć szyny zostały wykonane w okresie lata, przy temperaturach

powietrza pomiędzy 20 a 25°C - zgodnych z przedziałami temperatur, w jakich według przepisów określa się sztywności przekładek i podlewów:

- $21 \pm 3^{\circ}\text{C}$ - według karty UIC [128],
- $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ - według normy [32],
- temperatura pokojowa $\pm 2^{\circ}\text{C}$ - według normy [124].

Ponadto ze względu na fakt, iż badane torowiska posiadały konstrukcje zabudowaną nie istniało niebezpieczeństwo, że przy słonecznej pogodzie temperatura elementów składowych nawierzchni szynowej mogła być znacznie wyższa od temperatury powietrza. Można więc uznać, że zastosowane w obliczeniach ugięć szyny miary sztywności podatnego podłoża szyny, nie wymagały korekty ze względu na temperaturę.

W uproszczonym modelu obliczeniowym nawierzchni szynowej nie uwzględniono wpływu podparcia bocznego obudowanej szyny na wartości pionowych jej ugięć. W literaturze oraz opracowaniach badawczych brak jest informacji na ten temat, jednocześnie z punktu widzenia właściwej współpracy szyny i sąsiadującej z nią zabudowy nawierzchni drogowej wskazane jest aby materiał występujący na styku obu rozważanych elementów nie powodował wzajemnego uzależnienia ich ugięć pionowych, a jedynie zapewnił szczelność nawierzchni. Dlatego właśnie w torze typu 5 stosuje się wkładki boczne gumowe z pustkami powietrznymi, a nie pełne. Z kolei w torach typu 1 i 2 boczne podparcie szyny osiada razem z podkładem i podsypką - jego wpływ jest więc mniejszy niż w torach bezpodsypkowych (dotyczy jedynie składowej ugięcia szyny na przekładce podszykowej, a nie pełnego ugięcia łącznie z podkładem drewnianym i podsypką).

W uproszczonym modelu obliczeniowym nawierzchni szynowej z podparciem pośrednim - strefowym (tor typu 3) nie uwzględniono wpływu podparcia szyny na odcinkach pomiędzy podporami (podlew z mas bitumicznych). Zgodnie z dokumentacją projektową materiał zastosowany pod stopką szyny pomiędzy podporami powinien pełnić rolę jedynie wypełniacza i nie uczestniczyć w przenoszeniu obciążeń.

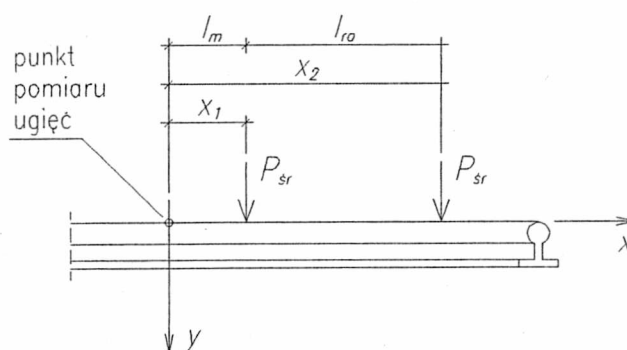
6.2. Dane do obliczeń

6.2.1. Obciążenie zewnętrzne

Uwzględniając określone podczas badań terenowych: średnią wartość nacisku koła na szynę $P_{sr} = 22,2 \text{ kN}$ oraz odległość ustawienia macki ugięciomierza od osi zestawu kołowego $l_m = 0,261 \text{ m}$, jak również rozstaw osi w wózkach tramwajów 102 i 105 wynoszący $l_{ro} = 1,9 \text{ m}$, jako obciążenie zewnętrzne szyny (rys.59) przyjęto naciski dwóch sił P_{sr} oddalonych od miejsca pomiaru ugięcia o:

$$x_1 = l_m = 0,261 \text{ m}$$

$$x_2 = l_m + l_{ro} = 2,161 \text{ m}.$$



Rys.59 Schemat obciążenia zewnętrznego szyny

6.2.2. Szyna

W przebadanych pięciu typach zabudowanych torowisk tramwajowych występowały dwa rodzaje szyn:

- rowkowa Ri60N - o momencie bezwładności $J = 3299 \text{ cm}^4$,
- blokowa B1 - o momencie bezwładności $J = 304 \text{ cm}^4$.

Moduł sprężystości stali szynowej przyjęto: $E = 210\,000 \text{ MPa}$

6.2.3. Podatne podłoże szyny

W przypadku torów typu 1 i 2, ze względu na ich podobieństwo do klasycznego toru kolejowego, sztywność podatnego podłoża szyny określono w postaci współczynnika podłoża szyny U .

Według badań krajowych [13] w torach kolejowych w okresie letnim uzyskuje się następujące wartości współczynnika podłoża szyny U (tabela 7):

- 40 MPa - dla podkładów drewnianych,
- 80 MPa - dla podkładów betonowych.

Wartości te nie nadają się jednak bezpośrednio do zastosowania w przypadku torowisk tramwajowych, gdyż pomiędzy obu rodzajami nawierzchni szynowych występują następujące różnice:

- w torach tramwajowych stosuje się większy rozstaw podkładów (zwykle $l = 0,67 \text{ m}$) niż w torach kolejowych (zwykle $l = 0,6 \text{ m}$),
- podkłady strunobetonowe w torach tramwajowych mają mniejszą powierzchnię oparcia podkładu o podsypkę (np. dla PST 94 $A_{op} = 0,6229 \text{ m}^2$) niż w kolejowych (np. dla PS 94 $A_{op} = 0,6805 \text{ m}^2$),

W celu uwzględnienia tych różnic konieczne jest określenie analitycznej zależności współczynnika podłoża szyny U od rozstawu podkładów l oraz powierzchni ich oparcia o podsypkę A_{op} . Jeżeli do równania (24) podstawimy równanie (22) oraz iloczyn $b_p \cdot a$ zastąpimy wyrażeniem A_{op} , po przekształceniach otrzymamy wzór:

$$U = \frac{A_{op}}{l} \cdot C \cdot \frac{\alpha}{2} \quad (56)$$

na podstawie którego można wnioskować, iż wartość współczynnika podłoża szyny U jest wprost proporcjonalna do powierzchni oparcia podkładu o podsypkę A_{op} , natomiast odwrotnie proporcjonalna do rozstawu podkładów w torze l .

Zakładając, że współczynnik C charakteryzujący jedynie warstwy znajdujące się pod podkładem, przyjmuje takie same wartości w torach tramwajowych jak i w kolejowych, przedstawione powyżej wartości U dla toru kolejowego zredukowano do: $0,6 \text{ m} / 0,67 \text{ m} \times 100 \% \approx 90 \%$, a w przypadku toru na podkładach betonowych dodatkowo do: $0,6229 \text{ m}^2 / 0,6805 \text{ m}^2 \times 100 \% \approx 92 \%$ uzyskując ostatecznie dla toru tramwajowego:

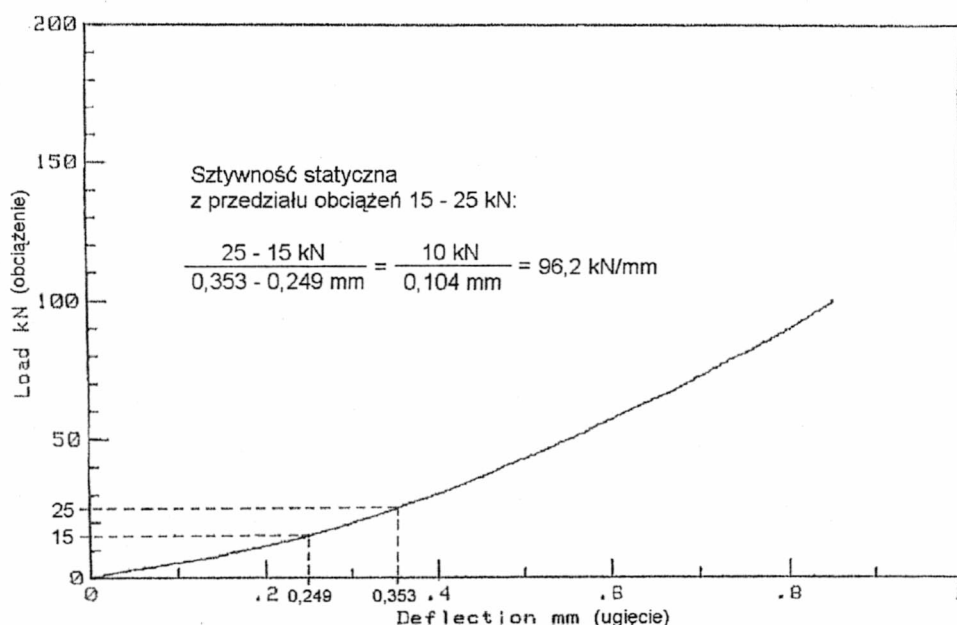
$U = 36 \text{ MPa}$ - dla podkładów drewnianych (stanowisko 1a)

66 MPa - dla podkładów betonowych (stanowiska 2a, 2b i 2c)

W przypadku toru typu 3, ze względu na dyskretny charakter podparcia i zamocowania szyny do podbudowy betonowej, sztywność podatnego podłoża szyny określono wstępnie w postaci współczynnika podparcia szyny D , równego sztywności zastępczej podpory k_{zp} . Dla każdego z sześciu stanowisk od 3a do 3f zastępcza sztywność podpory k_{zp} jest wynikiem szeregowego połączenia przekładki podszynowej o sztywności k_{ps} oraz przekładki lub podlewu podpodkładkowego (pod podkładką

żebrową) o sztywności k_{pp} pozostających we wzajemnej zależności według wzoru (21). Znając wartość współczynnika podparcia szyny D dokonano jego przeliczenia według wzoru (22) na wartość współczynnika podłoża szyny U .

W przypadku przekładek podszytowych w niniejszym opracowaniu przyjęto w charakterze wzorca przekładkę typu Tiflex FC 584 o wymiarach 140×140×10 mm, dla której sztywność statyczna w temperaturze 24°C obliczona z przedziału obciążeń 20 ÷ 82,5 kN wynosi według danych producenta [122] $k = 136,8$ kN/mm. Dla potrzeb niniejszego opracowania, w oparciu o wykres charakterystyki "siła - ugięcie" (rys.60), dokonano ustalenia sztywności statycznej adekwatnej dla przeprowadzonych pomiarów terenowych - z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN, uzyskując wartość $k_{ps} = 96,2$ kN/mm.



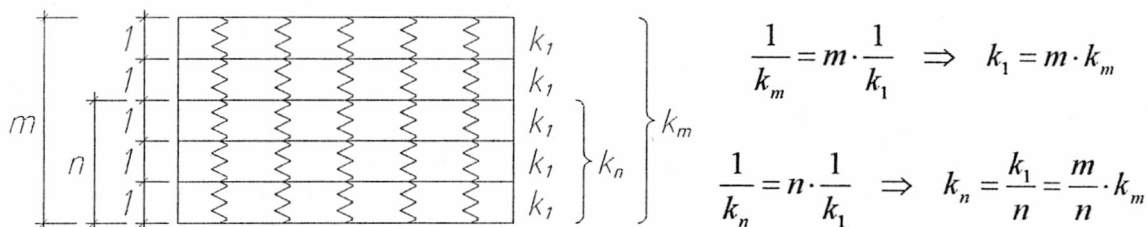
Rys.60 Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowej przekładki podszykowej

Rozważana przekładka wzorcowa - typowa dla torów kolejowych, posiada jednak wymiary odbiegające od stosowanych w torowiskach tramwajowych, gdzie ze względu na szerszą stopę szyny używa się przekładek o polu podstawy 180×140 mm oraz oprócz grubości 10 mm również 8 i 6 mm.

W celu uwzględnienia tych różnic konieczne jest określenie analitycznych zależności współczynnika sztywności przekładki k od pola jej powierzchni A oraz grubości h .

Na podstawie wzoru (34) można wnioskować, iż wartości współczynnika sztywności k przekładki z podatnego, jednorodnego materiału przy stałej jej grubości (przy stałym C) jest wprost proporcjonalna do pola jej powierzchni A .

Szukając zależności współczynnika sztywności przekładki k od jej grubości h przy nie zmienionej długości i szerokości, należy rozważyć układ będący szeregowym połączeniem wielu przekładek wykonanych z tego samego jednorodnego, podatnego materiału o elementarnych grubościach, na przykład 1 mm (rys.61). Odpowiednio stosując wzór (21) można wnioskować, że w przypadku zmiany grubości przekładki z m do n przy nie zmienionej długości i szerokości, jej sztywność statyczna ulega zmianie o iloraz m/n .

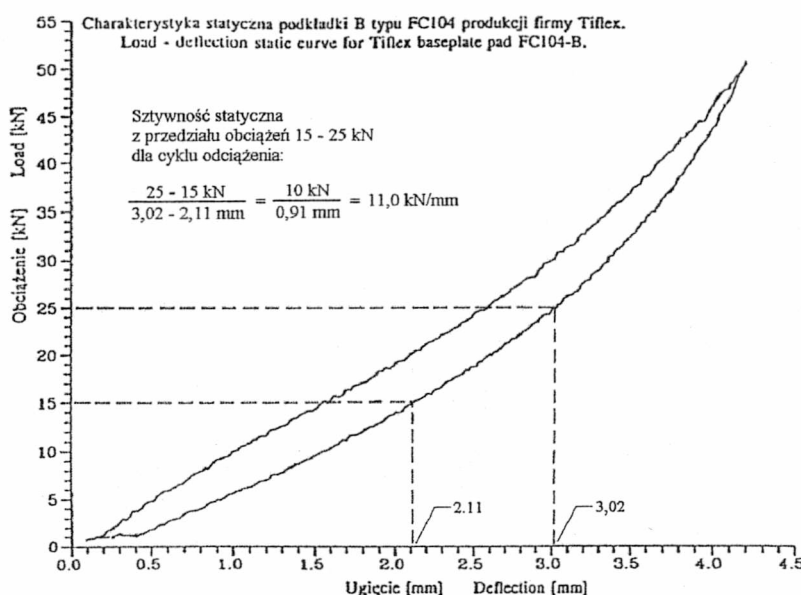


Rys.61 Zależności współczynnika sztywności przekładki od jej grubości.

Wyliczoną powyżej wartość sztywności przekładki wzorcowej $k_{ps} = 96,2 \text{ kN/mm}$ adekwatną dla przeprowadzonych pomiarów terenowych, ze względu na większą powierzchnię oparcia w torach tramwajowych zwiększono do: $180 \times 140 \text{ mm} / 140 \times 140 \text{ mm} \times 100 \% \approx 129 \%$, a w przypadku przekładek o mniejszych grubościach dodatkowo zwiększono do: $10 \text{ mm} / 8 \text{ mm} \times 100 \% \approx 125 \%$ - dla grubości 8 mm oraz $10 \text{ mm} / 6 \text{ mm} \times 100 \% \approx 167 \%$ - dla grubości 6 mm, uzyskując ostatecznie dla tramwajowych przekładek podszynowych:

$k_{ps} =$ 124 kN/mm - dla grubości przekładki 10 mm (stanowiska 3c ÷ 3f),
 155 kN/mm - dla grubości przekładki 8 mm (stanowisko 3b),
 207 kN/mm - dla grubości przekładki 6 mm (stanowisko 3a).

W przypadku gumowych lub elastomerowych przekładek podpodkładowych (stanowiska 3a, 3b, 3d i 3f) w niniejszym opracowaniu przyjęto w charakterze wzorca przekładkę typu Tiflex FC 104 o wymiarach $370 \times 160 \times 15 \text{ mm}$, dla której sztywność statyczna obliczona z przedziału obciążeń $15 \div 35 \text{ kN}$ wynosi według [89] $k = 11,4 \text{ kN/mm}$. Dla potrzeb niniejszego opracowania, w oparciu o wykres charakterystyki "siła - ugięcie" (rys.62), dokonano ustalenia sztywności statycznej adekwatnej dla przeprowadzonych pomiarów terenowych - z przedziału obciążeń $15 \div 25 \text{ kN}$ dla krzywej odciążania, uzyskując wartość $k_{pp} = 11,0 \text{ kN/mm}$.



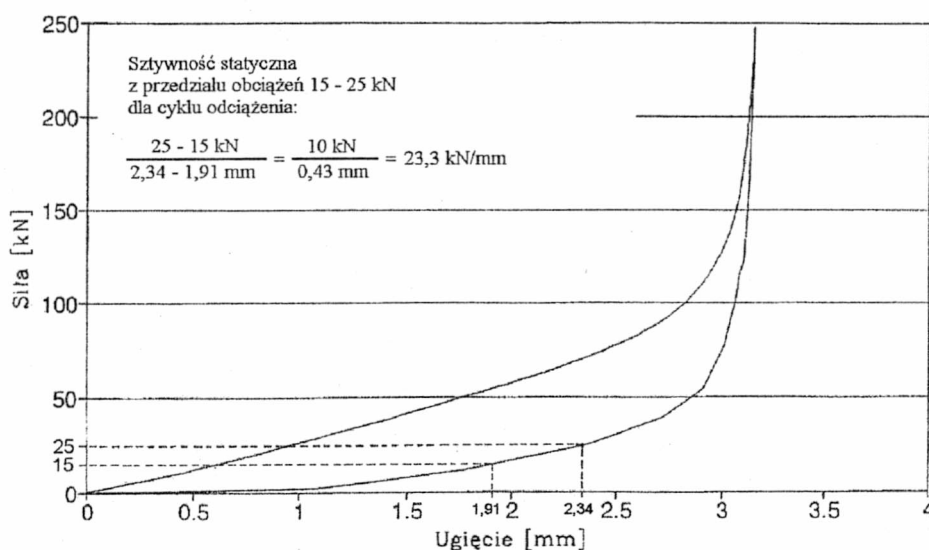
Rys.62 Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń $15 \div 25 \text{ kN}$ dla wzorcowej przekładki podpodkładowej - gumowej lub elastomerowej

Rozważana przekładka wzorcowa - typowa dla torów kolejowych, posiada jednak wymiary odbiegające od stosowanych w torowiskach tramwajowych, gdzie ze względu na szerszą stopę szyny używa się przekładek o polu podstawy 400×140 mm oraz mniejszych grubościach: 10, 8 i 7 mm.

Wyliczoną powyżej wartość sztywności przekładki wzorcowej $k_{pp} = 11,0$ kN/mm adekwatną dla przeprowadzonych pomiarów terenowych, ze względu na mniejszą powierzchnię oparcia w torach tramwajowych zmniejszono do: 400×140 mm / 370×160 mm × 100 % ≈ 95 %, a następnie ze względu na mniejsze grubości przekładek zwiększono do: 15 mm / 10 mm × 100 % ≈ 150 % - dla grubości przekładki 10 mm; 15 mm / 8 mm × 100 % ≈ 188 % - dla grubości 8 mm oraz 15 mm / 7 mm × 100 % ≈ 214 % - dla grubości 7 mm, uzyskując ostatecznie dla gumowych lub elastomerowych tramwajowych przekładek podpodkładowych:

$$k_{pp} = \begin{aligned} &15,7 \text{ kN/mm} - \text{dla grubości przekładki 10 mm (stanowisko 3f),} \\ &19,6 \text{ kN/mm} - \text{dla grubości przekładki 8 mm (stanowiska 3b i 3d),} \\ &22,4 \text{ kN/mm} - \text{dla grubości przekładki 7 mm (stanowisko 3a).} \end{aligned}$$

W przypadku poliuretanowej dołkowanej gęstej przekładki podpodkładowej (stanowisko 3c) w niniejszym opracowaniu przyjęto w charakterze wzorca przekładkę podszynową typu PKW-60A2 o wymiarze powierzchni obciążanej 150×160 mm, dla której sztywność statyczna obliczona z przedziału obciążeń 15 ÷ 90 kN wynosi według [65] $k = 36$ kN/mm. Dla potrzeb niniejszego opracowania, w oparciu o wykres charakterystyki "siła - ugięcie" (rys.63), dokonano ustalenia sztywności statycznej adekwatnej dla przeprowadzonych pomiarów terenowych - z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla krzywej odciążania, uzyskując wartość $k_{pp} = 23,3$ kN/mm.

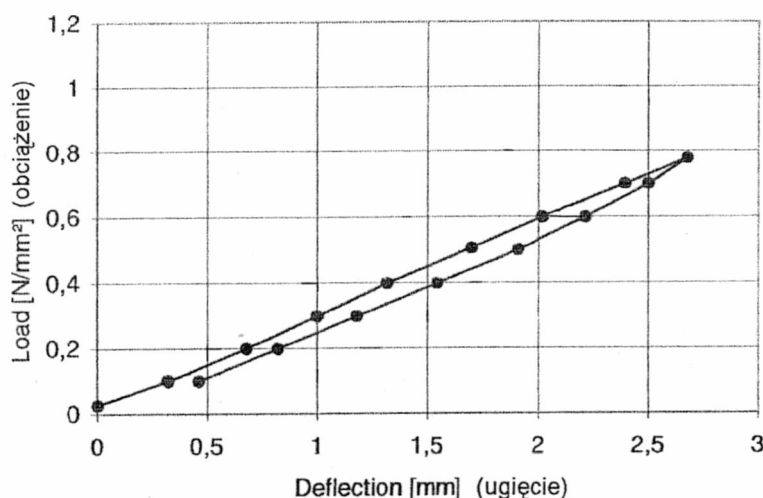


Rys.63 Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń 15 ÷ 25 kN dla wzorcowej przekładki podpodkładowej – poliuretanowej dołkowanej gęstej

Rozważana przekładka wzorcowa - podszynowa, posiada jednak wymiary powierzchni obciążanej znacznie mniejsze od stosowanych przekładek podpodkładowych.

Wyliczoną powyżej wartość sztywności przekładki wzorcowej $k_{pp} = 23,3$ kN/mm adekwatną dla przeprowadzonych pomiarów terenowych, ze względu na większą powierzchnię oparcia dla przekładki podpodkładowej zwiększono do: 400×140 mm / 150×160 mm $\times 100 \% \approx 233 \%$ uzyskując ostatecznie dla poliuretanowych dołkowanych gęstych tramwajowych przekładek podpodkładowych $k_{pp} = 54,3$ kN/mm (stanowisko 3c).

W przypadku poliuretanowego podlewu podpodkładowego (stanowisko 3e) w niniejszym opracowaniu przyjęto w charakterze wzorca materiał typu Icosit KC 330/5, dla którego w przypadku próbki o wymiarach $360 \times 160 \times 25$ mm według badań [115] sztywność statyczna z przedziału obciążeń $0 \div 45$ kN wynosi $k = 10,9$ kN/mm. Ze względu na liniowy kształt charakterystyki "siła - ugięcie" (rys.64) w badanym przedziale obciążeń oraz równoległość krzywych obciążeń i odciążenia, dla potrzeb niniejszego opracowania przyjęto sztywność statyczną adekwatną dla przeprowadzonych pomiarów terenowych o wartości $k_{pp} = 10,9$ kN/mm.



Rys.64 Określenie sztywności statycznej z przedziału obciążeń $15 \div 25$ kN dla wzorcowego podlewu poliuretanowego podpodkładowego

Rozważany poliuretanowy podlew wzorcowy - typowy dla torów kolejowych, posiada jednak wymiary odbiegające od stosowanych w torowiskach tramwajowych, gdzie ze względu na szerszą stopę szyny używa się podlew o polu podstawy 400×140 mm oraz mniejszej grubości wynoszącej 15 mm.

Przyjętą powyżej wartość sztywności podlew wzorcowego $k_{pp} = 10,9$ kN/mm adekwatną dla przeprowadzonych pomiarów terenowych, ze względu na mniejszą powierzchnię oparcia w torach tramwajowych zmniejszono do: 400×140 mm / 360×160 mm $\times 100 \% \approx 97 \%$, a następnie ze względu na mniejszą grubość podlew zwiększono do: 25 mm / 15 mm $\times 100 \% \approx 167 \%$ uzyskując ostatecznie dla poliuretanowego podlew podpodkładowego: $k_{pp} = 17,7$ kN/mm (stanowisko 3e).

W przypadku torów typu 4 i 5, ze względu na ciągłe podparcie szyny za pośrednictwem gumowej przekładki podszynowej na podbudowie betonowej, sztywność podatnego podłoża szyny określono wstępnie w postaci współczynnika sztywności gumowej przekładki podszynowej k_{psc} , ustalonego dla wymiaru poprzecznego równego szerokości stopki szyny, natomiast podłużnego - równego 1 m. Znajac wartość tego

współczynnika dokonano jego przeliczenia według wzoru (34) na wartość współczynnika podłoża C , a następnie według wzoru (35) na wartość współczynnika podłoża szyny U .

W przypadku toru typu 5 sztywność statyczna zastosowanej w nim przekładki podszynowej typu Phoenix M 384 18 według [46] wynosi $k_{psc} = 8,8 \text{ kN/mm}$ (stanowisko 5a).

W przypadku toru typu 4 brak jest w literaturze i opracowaniach badawczych informacji na temat sztywności statycznej zastosowanej w nim gumowej rowkowanej taśmy podszynowej, dlatego w niniejszym opracowaniu przyjęto w tym przypadku sztywność statyczną najbardziej zbliżonej kształtem przekładki podszynowej typu Phoenix M 384 58, której wartość według [46] wynosi $k_{psc} = 45 \text{ kN/mm}$, jednakże ze względu na mniejszą szerokość stopki szyny blokowej w stosunku do rowkowej, zgodnie ze wzorem (34) wartość przyjętej sztywności statycznej zmniejszono do: $156 \text{ mm} / 180 \text{ mm} \times 100 \% \approx 87 \%$ uzyskując ostatecznie dla gumowej rowkowanej taśmy podszynowej $k_{psc} = 39 \text{ kN/mm}$ (stanowiska 4a, 4b i 4c).

6.3. Wzory obliczeniowe

Obliczenia teoretycznych wartości ugięć szyny, zgodnie z rozdziałem 4.2. niniejszej pracy, przeprowadzono w oparciu o następujące wzory:

$$y_i = \frac{P_{sr}}{2UL} \cdot (\eta_1 + \eta_2) \quad (57)$$

$$\eta_1 = e^{-\frac{x_1}{L}} \cdot \left(\cos \frac{x_1}{L} + \sin \frac{x_1}{L} \right) \quad (58)$$

$$\eta_2 = e^{-\frac{x_2}{L}} \cdot \left(\cos \frac{x_2}{L} + \sin \frac{x_2}{L} \right) \quad (59)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EJ}{U}} \quad (60)$$

ponadto dla toru typu 3:

$$U = \frac{D}{l} \quad (61)$$

$$D = k_{zp} \quad (62)$$

$$\frac{1}{k_{zp}} = \frac{1}{k_{ps}} + \frac{1}{k_{pp}} \quad (63)$$

natomiast w przypadku torów typu 4 i 5:

$$U = C \cdot b \quad (64)$$

$$C = \frac{k_{psc}}{b \cdot 1m} \quad (65)$$

gdzie:

- y_t - teoretyczne ugięcie szyny [mm]
- P_{sr} - średnia wartość nacisku koła na szynę [kN]
- U - współczynnik podłoża szyny [MPa]
- L - długość zastępcza belki na sprężystym podłożu [m]
- η_1, η_2 - współczynniki kształtu linii ugięcia
- e - podstawa logarytmu naturalnego
- x_1, x_2 - odległości oddalenia kół od miejsca pomiaru ugięcia
- E - moduł sprężystości stali szynowej [MPa]
- J - moment bezwładności przekroju poprzecznego szyny względem obojętnej osi poziomej
- D - współczynnik podparcia szyny [kN/mm]
- k_{zp} - sztywność zastępcza podpory [kN/mm]
- k_{ps} - sztywność przekładki podszynowej [kN/mm]
- k_{pp} - sztywność przekładki podpodkładkowej [kN/mm]
- C - współczynnik podłoża [N/mm³]
- b - szerokość stopki szyny [mm]
- k_{psc} - sztywność przekładki podszynowej ciągłej określona dla długości przekładki wynoszącej 1 m [kN/mm]

6.4. Wyniki obliczeń

Obliczenia teoretycznych wartości ugięć szyny przeprowadzono z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego Excel. Zestawienie porównawcze wyników obliczeń przedstawiono w tabeli 13.

Tabela 13 Zestawienie porównawcze wyników obliczeń teoretycznych ugięć szyny

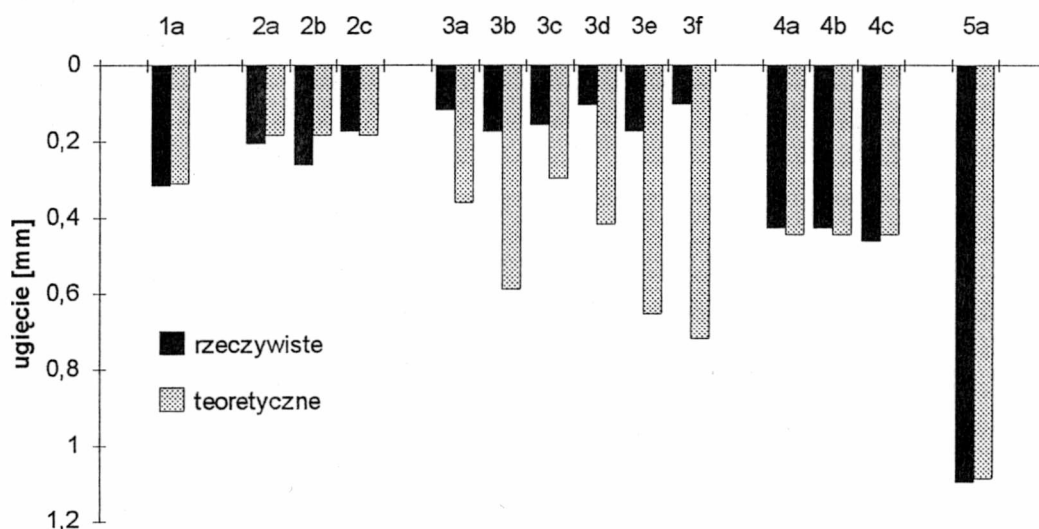
	wielkość	jednostka	Stanowisko									
			1a	2a, 2b i 2c	3a	3b	3c	3d	3e	3f	4a, 4b i 4c	5a
Obciążenie zewnętrzne	$P_{\Sigma r}$	[kN]	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
	x_1	[m]	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261
	x_2	[m]	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161	2,161
Szyna	E	[MPa]	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000	210 000
	J	[cm ⁴]	3299	3299	3299	3299	3299	3299	3299	3299	304	3299
	b	[mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	156	180
Podatne podłoże szyny	l	[m]	-	-	0,67	1	1	0,66	1	1	-	-
	k_{ps}	[kN/mm]	-	-	207	155	124	124	124	124	-	-
	k_{pp}	[kN/mm]	-	-	22,4	19,6	54,3	19,6	17,7	15,7	-	-
	k_{zp}	[kN/mm]	-	-	20,2	17,4	37,8	16,9	15,5	13,9	-	-
	k_{psc}	[kN/mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	39	8,8
	C	[N/mm ³]	-	-	-	-	-	-	-	-	0,25	0,0489
	D	[kN/mm]	-	-	20,2	17,4	37,8	16,9	15,5	13,9	-	-
	U	[MPa]	36	66	30,2	17,4	37,8	25,6	15,5	13,9	39	8,8
Obliczenie ugięcia teoretycznego	L	[m]	0,937	0,805	0,979	1,123	0,926	1,020	1,157	1,188	0,506	1,332
	x_1/L	-	0,279	0,324	0,267	0,232	0,282	0,256	0,226	0,220	0,516	0,196
	x_2/L	-	2,307	2,685	2,207	1,924	2,335	2,120	1,869	1,820	4,272	1,622
	η_1	-	0,9358	0,9158	0,9407	0,9539	0,9344	0,9449	0,9563	0,9584	0,8137	0,9664
	η_2	-	0,0069	-0,0311	0,0231	0,0866	0,0029	0,0398	0,1023	0,1171	-0,0186	0,1870
	y_t	[mm]	0,310	0,185	0,362	0,591	0,298	0,418	0,656	0,721	0,447	1,092

7. ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW BADAŃ TERENOWYCH I OBLICZEŃ TEORETYCZNYCH

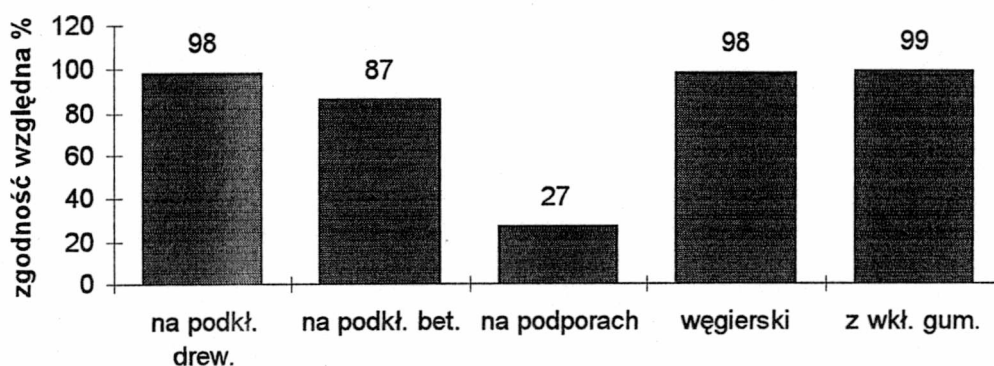
Wartości skorygowanych ugięć szyny y_s , uzyskane w wyniku przeprowadzonych pomiarów terenowych, które w dalszej części niniejszej pracy nazywane będą ugięciami rzeczywistymi, porównano z obliczonymi wartościami teoretycznych ugięć szyny y_t . W celu ułatwienia porównania analizowanych wielkości określono miarę zgodności względnej z_w [%] według następującego wzoru:

$$z_w = \frac{\min(y_s; y_t)}{\max(y_s; y_t)} \cdot 100\% \quad (66)$$

Wyniki analizy porównawczej przedstawiono w tabeli 14 oraz graficznie na rys.65 i 66.



Rys.65 Porównanie rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny dla nacisku koła 22,2 kN na każdym z przebadanych stanowisk



Rys.66 Zgodność względna rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny dla przeanalizowanych pięciu typów torowisk zabudowanych

Tabela 14 Analiza porównawcza ugięć rzeczywistych i teoretycznych

Lp	typ toru	stano- wisko pomia- rowe	wiek toru [lata]	ugięcia szyny dla nacisku koła 22,2 kN					zgodność względna zw	
				rzeczywiste ys			teoretyczne yt			
				liczba pomia- rów n	dla stano- wiska [mm]	dla typu toru [mm]	dla stano- wiska [mm]	śr. dla typu toru [mm]	dla stano- wiska [%]	dla typu toru [%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	podkł.dr.	1a	2	10	0,316	0,316	0,310	0,310	98	98
2	podkł.bet.	2a	2	12	0,206	0,214	0,185	0,185	90	87
3		2b	2	15	0,261		0,185		71	
4		2c	1	20	0,173		0,185		93	
5	na podpo- rach punkt.	3a	5	22	0,119	0,139	0,362	0,508	33	27
6		3b	4	21	0,175		0,591		30	
7		3c	3	22	0,157		0,298		53	
8		3d	2	25	0,105		0,418		25	
9		3e	1	22	0,175		0,656		27	
10		3f	1	25	0,105		0,721		15	
11	węgierski	4a	7	47	0,428	0,440	0,447	0,447	96	98
12		4b	5	10	0,428		0,447		96	
13		4c	1	22	0,464		0,447		96	
14	z wkł. gum.	5a	2	12	1,101	1,101	1,092	1,092	99	99

W wyniku porównania rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny, średnich dla danego typu toru, uzyskano bardzo dobrą zgodność (98 i 99 %) dla torów z podkładami drewnianymi, węgierskiego i z wkładkami gumowymi oraz dobrą (87 %) - dla toru z podkładami betonowymi, co pozwala wysnuć wniosek, że konstrukcje te w rzeczywistości pracują poprawnie - to znaczy w sposób zgodny z teoretycznymi założeniami, według których zostały zaprojektowane.

Zaskakująca jest natomiast bardzo niska zgodność (27 %) uzyskana dla toru na podporach punktowych, gdzie ugięcia rzeczywiste średnio okazały się około czterokrotnie mniejsze od teoretycznych. Nie jest to na pewno spowodowane wpływem podparcia bocznego obudowanej szyny, gdyż prawie identyczny typ zabudowy zastosowano w torach z podkładami betonowymi i drewnianymi, które uzyskały dobrą i bardzo dobrą zgodność analizowanych ugięć. Przyczyn takiego stanu rzeczy należy więc upatrywać w zastosowaniu zbyt twardych mas podlewowych na odcinkach pomiędzy podporami, co powoduje, że tor na podporach punktowych pracuje w sposób niewłaściwy:

- masy podlewowe, które miały pełnić jedynie rolę wypełniacza stają się tak naprawdę podporą przekazującą obciążenia na betonową podbudowę, co może powodować ich szybką degradację,
- tor taki nie daje efektu tłumienia drgań, jaki powinny zapewnić materiały wibroizolacyjne zastosowane w podporach,
- zniszczenie mas podlewowych może powodować dalszą degradację następnych elementów składowych konstrukcji toru.

W przypadku toru na podporach punktowych konieczna jest więc zmiana materiału stosowanego pod stopką szyny na odcinkach pomiędzy podporami albo odejście od stosowania konstrukcji toru tego typu w torowiskach zabudowanych.

Spośród pięciu analizowanych typów torów, trzy z nich przebadano na więcej niż jednym stanowisku. W przypadku stanowisk toru na podporach punktowych występowały drobne różnice konstrukcyjne (materiał pod podkładką żebrową i rozstaw podpór), z czego wynikało zróżnicowanie wartości ugięć odpowiednio teoretycznych i rzeczywistych na poszczególnych stanowiskach. Stanowiska torów z podkładami betonowymi i węgierskiego były w swoich typach konstrukcyjnie zgodne, dlatego posiadały te same wartości ugięć teoretycznych. Dla toru z podkładami betonowymi uzyskano większe zróżnicowanie ugięć rzeczywistych na poszczególnych stanowiskach niż dla toru węgierskiego, co wydaje się być słuszne, gdyż w tym pierwszym przypadku elementem podatnym odpowiedzialnym za wartości ugięć jest głównie warstwa podsypki tłuczniowej zagęszczana na budowie, przez co może osiągać bardziej zróżnicowane wartości miar sprężystości, niż gumowa taśma podszynowa w torze węgierskim. Stąd zapewne wynika również niższa zgodność względna uzyskana dla toru z podkładami betonowymi, niż dla toru węgierskiego. Generalnie, stosując opisywaną metodę kontroli zgodności ugięć rzeczywistych i teoretycznych należy zawsze mieć na względzie, że nawierzchnie klasyczne na podsypce tłuczniowej będą dawać bardziej rozbieżne wyniki, niż nawierzchnie niekonwencjonalne na sztywnych podbudowach z betonu z zastosowaniem prefabrykowanych przekładek wibroizolacyjnych o właściwie dobranej sprężystości.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Zaproponowana w niniejszej pracy metoda diagnostycznej oceny konstrukcji toru tramwajowego z punktu widzenia jego nośności składa się z trzech następujących elementów:
 - przeprowadzenia badań terenowych rzeczywistych ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół taboru, wyznaczenia wartości średniej i odchylenia standardowego ugięć oraz oceny tych wartości,
 - analizy zróżnicowania wartości ugięć rzeczywistych szyny na długości toru,
 - obliczenia wartości teoretycznych ugięć szyny i porównania ich z wartościami rzeczywistymi.Zaproponowana metoda oceny obejmuje:
 - sprawdzenie poprawności założeń teoretycznych konstrukcji toru,
 - sprawdzenie zgodności rzeczywistego modelu pracy toru pod obciążeniem z teoretycznym, a przez to określenie:
 - jakości wykonania toru oraz zastosowanych materiałów,
 - stanu toru eksploatowanego, w postaci stopnia jego zużycia (pod kątem utraty nośności).Zaproponowana metoda oceny konstrukcji toru dotyczy następujących trzech etapów jego funkcjonowania:
 - projektowania,
 - wykonawstwa,
 - eksploatacji.
2. Dzięki przeprowadzonym badaniom terenowym ugięć szyny, pomimo uproszczeń metody (głównie jeśli chodzi o określenie wartości nacisku koła na szynę) oraz przy określonej dokładności przyrządu pomiarowego, dla każdego typu analizowanych konstrukcji torowisk zabudowanych uzyskano odpowiadające im wartości ugięć szyny tramwajowej (wartości średnie) oraz przedziały zróżnicowania tych wartości (odchylenia standardowe).
3. Metoda pomiarowa okazała się wystarczająco dokładna aby określić, dla których z badanych stanowisk tor nie wykazywał regularności w zróżnicowaniu wartości ugięć na jego długości, a dla których takie regularności wystąpiły.
4. Klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej w oparciu o model belki ciągłej na sprężystym podłożu okazała się być wygodnym i wystarczająco dobrym narzędziem do obliczenia ugięć teoretycznych analizowanych konstrukcji torowisk zabudowanych, w wyniku czego uzyskano wartości zbliżone do występujących w rzeczywistości dla torowisk prawidłowo skonstruowanych i wykonanych, o niewielkim stopniu zużycia.
5. Na przykładzie analizy zgodności rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny przeprowadzonej dla pięciu przebadanych typów torowisk tramwajowych zabudowanych wykazano, że stanowi ona prosty, diagnostyczny sposób oceny poprawności pracy konstrukcji toru tramwajowego pod obciążeniem. Tor na podporach punktowych, jako jedyny okazał się nie pracować w sposób zgodny z teoretycznymi założeniami, według których został zaprojektowany.
6. W wyniku przeprowadzonych badań terenowych ujawnione zostały zalety proponowanej metody pomiarowej:
 - jest nieniszcząca (bez naruszania konstrukcji toru),
 - nadaje się do zastosowania zarówno w przypadku torowisk nowo zbudowanych lub wyremontowanych (pomiaru ugięć szyny w trakcie odbioru powykonawczego

podczas jazd próbnych wagonem tramwajowym), jak i eksploatowanych, gdzie powoduje minimalne utrudnienia w liniowym ruchu tramwajowym.

7. Zaproponowana w niniejszej pracy metoda oceny konstrukcji torowisk tramwajowych może być stosowana w ramach diagnostyki: powykonawczej, eksploatacyjnej i przedmodernizacyjnej. W pierwszym przypadku konieczne jest jednak określenie odpowiednio mniejszych wartości odchyłek dopuszczalnych.
8. W wyniku przeprowadzonych badań i analiz potwierdzona została przydatność wartości uzyskiwanych z pomiarów ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwaju przy pomocy drogowego ugięciomierza belkowego, do oceny konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych z punktu widzenia ich nośności. Wniosek ten stanowi udowodnienie przyjętej tezy pracy.
9. Celem niniejszej pracy nie jest analizowanie jakie wartości ugięć szyny byłyby najbardziej odpowiednie dla danego typu konstrukcji toru. Analiza taka jest osobnym, bardzo obszernym zagadnieniem naukowo-badawczym, wymagającym uwzględnienia między innymi aspektów takich jak: szczelność nawierzchni, emisja drgań i hałasu, zużycie faliste szyn, trwałość i niezawodność toru.
10. Zaproponowany w niniejszej pracy sposób oceny nośności toru nie służy do określenia maksymalnych ugięć jakim mogą ulegać szyny w zabudowanych torowiskach tramwajowych podczas eksploatacji, gdyż po pierwsze pomiar jest wykonywany w pewnej odległości za osią zestawu kołowego (miejscem największego ugięcia), a po drugie zagadnienie ugięć szyny jest rozpatrywane jedynie w ujęciu statycznym.
11. Zakładanie braku ugięć szyny tramwajowej pod przejeżdżającym taborem jako kryterium poprawności wykonania nawierzchni tramwajowej, usankcjonowane zapisem w obowiązujących do tej pory wytycznych projektowania torów tramwajowych [136] jest błędem. Przy najbliższej nowelizacji wspomnianych przepisów należałoby usunąć ten zapis, natomiast do zakresu diagnostyki torowisk tramwajowych wprowadzić proponowany w niniejszej pracy sposób oceny ich nośności.
12. W przypadku podatnych materiałów stosowanych w różnych systemach przytwierdzenia i podparcia szyny (przekładki, podlewy) wskazane jest wprowadzenie wymogu określania przez producentów tych materiałów ich statycznych charakterystyk sprężystych w formie wykresów "siła - ugięcie", z uwzględnieniem cyklu obciążania i odciążania.
13. W obecnych czasach, kiedy to zarządy miast decydują się na stosowanie nowych, niekonwencjonalnych rozwiązań konstrukcji zabudowanych torowisk tramwajowych, proponowana analiza zgodności rzeczywistych i teoretycznych ugięć szyny jest metodą godną polecenia, gdyż jak wykazano na przykładzie toru na podporach punktowych stosowanego od kilku lat we Wrocławiu, użycie drogich materiałów (elastomery modyfikowane, żywice poliuretanowe) nie zawsze idzie w parze z wykorzystaniem w pełni ich właściwości.

9. KIERUNKI I MOŻLIWOŚCI PROWADZENIA DALSZYCH BADAŃ

Wyniki badań i analiz uzyskane w ramach niniejszego opracowania potwierdzają słuszność założenia przyjętego w tezie pracy, nie stanowią natomiast wystarczająco pełnej podstawy do ostatecznego opracowania postulowanej metody oceny konstrukcji torowisk tramwajowych. W tym celu konieczne jest:

- przeprowadzenie znacznie szerszych badań terenowych i analiz ich wyników obejmujących również odbiory powykonawcze, w celu uściślenia optymalnych wartości ugięć i ich odchyłek dla konkretnych typów konstrukcji torowisk zabudowanych oraz zakresu diagnostyki (powykonawcza, eksploatacyjna),
- wykonanie własnych badań laboratoryjnych w celu określenia sztywności statycznej materiałów podatnych stosowanych w konstrukcjach torowisk tramwajowych,
- przeprowadzenie obliczeń teoretycznych ugięć szyny według metod innych, niż zastosowana w niniejszym opracowaniu (współczesnych, z wykorzystaniem komputerowych technik obliczeniowych - np. metody elementów skończonych),
- rozpoznanie zagadnienia wpływu zamocowania bocznego szyny na jej ugięcia, zarówno w formie badań laboratoryjnych, jak i obliczeń teoretycznych,
- określenie wpływu na wartości ugięć szyny parametrów takich jak:
 - wiek toru (np. przez pomiary terenowe tych samych odcinków toru co roku),
 - czas działania obciążenia przed pomiarem ugięcia szyny,
 - temperatura otoczenia (np. przez pomiary terenowe również jesienią, zimą i wiosną).

Dalsze badania nad analizowanym zagadnieniem powinny zmierzać w kierunku:

- sprecyzowania procedury:
 - badań terenowych (wybór odcinka pomiarowego, określenie jego długości i liczby pomiarów),
 - obliczeń ugięć teoretycznych (dane wejściowe, metoda i model obliczeniowy),
 - analiz wyników badań i obliczeń (zgodność ugięć rzeczywistych i teoretycznych, zróżnicowanie ugięć na długości toru, analiza progowa, wadliwość, syntetyczny wskaźnik jakości toru),
- opracowania systemu eksperckiego badania nośności zabudowanych torowisk tramwajowych z wykorzystaniem pomiarów ugięć szyny ugięciomierzem belkowym.

Możliwe są również następujące inne kierunki badań nad analizowanym zagadnieniem:

- rozpoznanie możliwości stosowania metody w torowiskach niezabudowanych,
- rozpoznanie możliwości adaptacji innych drogowych metod oceny nośności,
- opracowanie urządzenia służącego do obciążania szyny (analogicznie jak przy badaniach płytą VSS) - tak aby znana była wartość nacisku wywieranego na szynę oraz aby można było wykonywać pomiary ugięć szyny w trakcie budowy przed odbiorem końcowym, natomiast w torowiskach eksploatowanych - aby uniezależnić wykonywanie pomiarów od kursujących tramwajów,
- opracowanie urządzenia do pomiaru ciągłego ugięć szyny - na zasadzie drezyny pomiarowej, a najlepiej pojazdu samochodowego z opuszczanymi kolejowymi zestawami kołowymi.

LITERATURA

- [1] Bałuch H.: Analiza węzła przytwierdzenia szyn w tunelu linii średnicowej w Warszawie (Opinia projektu opracowanego przez Sp. z o.o. "Metroprojekt" SA). Warszawa 1998.
- [2] Bałuch H.: Diagnostyka nawierzchni kolejowej. WKiŁ, Warszawa 1978.
- [3] Bałuch H.: Sposoby wyznaczania charakterystyk podłoża kolejowego. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 39, 1967, str. 119 - 136.
- [4] Bałuch H.: Trwałość i niezawodność eksploatacyjna nawierzchni kolejowej. WKiŁ, Warszawa 1980.
- [5] Bałuch H.: Właściwości i praca potrójnych pierścieni sprężystych. Przegląd Kolejowy Drogowy 10/1968, str. 227 - 232.
- [6] Bałuch H.: Wpływ przekładek podszynowych na trwałość przytwierdzeń szyn do podkładów. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 98, 1984, str. 60 - 93.
- [7] Bałuch H.: Wpływ przekładek podszynowych na utrzymanie nawierzchni. II Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Poznań - Rydzyna 1983.
- [8] Bałuch H.: Wspomaganie decyzji w drogach kolejowych. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, 1994.
- [9] Bałuch H.: Wykorzystanie wyników badań laboratoryjnych do symulacji działania przytwierdzeń szyn do podkładów. Drogi Kolejowe 3/1978, str. 65 - 71.
- [10] Bałuch H.: Zastosowanie informatyki w drogach kolejowych. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [11] Bałuch H.: Zróżnicowanie odkształceń sprężystych nawierzchni S60. Przegląd Kolejowy Drogowy 9/1973, str. 4 - 15.
- [12] Basiewicz T.: Nawierzchnia kolejowa na podłożu betonowym typu CBP - 74. Konferencja Naukowa "Konstrukcja i utrzymanie nawierzchni kolejowej", Gdańsk 1975.
- [13] Basiewicz T.: Nawierzchnia kolejowa z podkładami betonowymi. WKiŁ, Warszawa 1969.
- [14] Basiewicz T.: Uogólniony model nawierzchni kolejowej i jej obliczanie. Przegląd Kolejowy 6/1959, str. 201 - 207.
- [15] BN-64/8931-02 Drogi samochodowe. Oznaczenie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą.
- [16] BN-70/8931-06 Drogi samochodowe. Pomiar ugięć nawierzchni podatnych ugięciomierzem belkowym.
- [17] BN-91/8938-01 Torowiska tramwajowe. Wymagania i badania techniczne przy odbiorze.
- [18] Brunner F. K., Woschitz H.: In-Situ Messungen von Schienenbewegungen. EI-Eisenbahningenieur (52) 6/2001, str. 34 - 38.
- [19] Bukowski M.: Problemy współpracy nawierzchni i podtorza. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 102, 1987, str. 114 - 151.
- [20] Cejmer J.: Tłumienie oddziaływań dynamicznych w węzłach przytwierdzeń w rozjazdach. Referat wygłoszony na IV Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk - Sobieszewo 2002, niezamieszczony w materiałach konferencyjnych - maszynopis.
- [21] Chełmecki W.: Modyfikacja konstrukcji toru tramwajowego w aspekcie rewaloryzacji zabytkowych ulic śródmiejskich. IX Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków - Kościelisko 1997.
- [22] Chełmecki W.: Niekonwencjonalne nawierzchnie w miejskiej komunikacji szynowej. III Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985.

- [23] Chelmecki W.: Projektowanie toru tramwajowego konstrukcji węgierskiej w istniejących układach urbanistycznych. Sympozjum Naukowo - Techniczne "Racjonalne wykorzystanie infrastruktury szynowej", Kraków - Zakopane 1995.
- [24] Chelmecki W.: Przepisy i normy związane z projektowaniem, budową i utrzymaniem linii tramwajowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna "Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej", Wrocław 2000.
- [25] Contitech-Clouth: Ballast Mat Program.
- [26] D1 - Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych. PKP Polskie Linie Kolejowe, Warszawa 2002.
- [27] D4 - Instrukcja o utrzymaniu podtorza kolejowego. Dyrekcja Generalna PKP, Warszawa 1993.
- [28] D6 - Instrukcja o oględzinach, badaniach technicznych i utrzymaniu rozjazdów. Dyrekcja Generalna PKP, Warszawa 1991.
- [29] D75 - Instrukcja o dokonywaniu pomiarów, badań i oceny stanu torów. Dyrekcja Generalna PKP, Warszawa 1991.
- [30] Desai C. S., Siriwardane H., J.: Numerical model for track support structures. Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT3, March 1982, str. 461 - 480.
- [31] Diagnostyka Podtorza - Instrukcja eksperckiego systemu doradczego. CNTK, Zakład Dróg Kolejowych, 1993.
- [32] DIN 53 577 Determination of compression stress value and compression stress-strain characteristic for flexible cellular materials. January 1976.
- [33] Dmitruk S., Izbicki S., Suchnicka H.: Mechanika ośrodków rozdrobnionych. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1982.
- [34] Duda G.: O obliczaniu metodą różnicową belek na sprężystym podłożu. II Konferencja Naukowa "Problemy badawcze w inżynierii lądowej", Wrocław 1978.
- [35] Ekspertyza stanu technicznego odcinka linii tramwajowej na wydzielonym torowisku w ciągu ul. Powstańców Śl. we Wrocławiu. SITK Oddział Wrocław, 1995.
- [36] EN 13146: 2002 Railway applications - Track - Test Methods for fastenings systems.
- [37] EN 13481: 2001 Railway applications - Track - Performance requirements for fastenings systems.
- [38] Feil A.: Nowa konstrukcja toru tramwajowego. Transport Miejski 12/1992, str.: 18 - 20.
- [39] Fraskerti S.: Nowoczesny kompleksowy system nadbudówki (podkładów wraz z szynami) torów kolei drogowej w budapeszteńskim przedsiębiorstwie komunikacyjnym. Tłumaczenie z języka węgierskiego - maszynopis.
- [40] Friszman M. A.: Tor kolejowy i jego współpraca z pojazdami. WKiŁ, 1983.
- [41] Gaweł K., Morawski M., Oczykowski A.: Rozwój konstrukcji sprężystych przytwierdzeń szyn do podkładów na PKP. III Krajowa Naukowa Konferencja "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985.
- [42] Gaweł K., Oczykowski A.: Zagadnienia obliczania nawierzchni kolejowej. Przegląd Kolejowy Drogowy, 11/1964, str. 169 - 175.
- [43] Gorbunow - Posadow M. I.: Obliczanie konstrukcji na podłożu sprężystym. Warszawa 1956.
- [44] Greń J.: Statystyka matematyczna. Modele i zadania. PWN, Warszawa 1978.

- [45] Grol W., Gąsiński T., Szolc T., Krzysztofik Z.: Doświadczalne badanie własności dynamicznych i statycznych toru kolejowego w warunkach Polskich Kolei Państwowych. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 134, 2001, str. 51 - 76.
- [46] Gumowe izolatory wibroakustyczne systemu PHOENIX do nawierzchni torowych. Aprobata techniczna IBDiM Nr AT/2001-04-1045. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, 2001.
- [47] Hanker R.: Eisenbahn Oberbau. Wien 1952.
- [48] Jacyna W.: O współczynniku podłoża (C) w świetle badań prof. A. Wasiutyńskiego. Przegląd Kolejowy 2 i 3/1949.
- [49] Jamróży Z.: Beton i jego technologie. PWN, 2000.
- [50] Jankowski Z.: Nowe technologie i konstrukcje torowe systemu Polmar - Halpol wprowadzone w 1990 r. na terenie Warszawy. Transport Miejski 1/1991, str. 5 - 7.
- [51] Kamiński L.: Teoria konstrukcji inżynierskich. PWN, Warszawa 1982.
- [52] Kamiński L., Szydło A.: Drogi - projektowanie i budowa. Politechnika Wrocławska, 1981.
- [53] Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP, Warszawa 1997.
- [54] Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych. GDDP, Warszawa 2001.
- [55] Kaun M., Luxemburk F.: Torowiska tramwajowe z płyt z szynami blokowymi - praskie doświadczenia. Transport Miejski 1/1990, str. 7 - 9.
- [56] Kisilowski J.: Dynamika układu mechanicznego pojazd szynowy - tor. PWN, 1991.
- [57] Klin S.: Analiza konstrukcji torów tramwajowych na przykładach rozwiązań stosowanych w Polsce. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej 15, Seria: Monografie 2, Wrocław 1975.
- [58] Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów. PWN, 1999.
- [59] Kłosek K.: Nominalny model rusztu torowego w ujęciu MES. III Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985.
- [60] Kłosek K.: Nowe rozwiązania nawierzchni tramwajowej w aglomeracji górnośląskiej. Sympozjum Naukowo - Techniczne "Racjonalne wykorzystanie infrastruktury szynowej", Kraków - Zakopane 1995.
- [61] Kłosek K.: Podłoże rusztu torowego w ujęciu rozwiązań mechaniki ośrodków dyskretnych. II Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Poznań - Rydzyna 1983.
- [62] Kłosek K.: W sprawie kryteriów oceny nośności podtorza kolejowego. III Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków - Muszyna 1985.
- [63] Kłosek K.: Wzmocnienie słabo nośnych torowisk z wykorzystaniem geokompozytowych poduszek. Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna "Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej", Wrocław 2000.
- [64] Koczorowski A.: Obliczanie nawierzchni kolejowej. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1956.
- [65] Korab D.: Porównawcze badania laboratoryjne przekładek obustronnie dołkowanych jako amortyzatora drgań nawierzchni z podkładami betonowymi. Praca CNTK nr 6084/22, Warszawa 1997.
- [66] Kotyrba A., Kłosek K.: Georadarowa diagnostyka konstrukcji oraz podłoża dróg kolejowych i samochodowych. Konferencja Naukowo - Techniczna "Problemy modernizacji i napraw podtorza kolejowego", Wrocław - Żmigród 2000.
- [67] Krocak S., Mazur S., Dudek Z.: Teoretyczna analiza wpływu zmiennej sztywności i sposobu podparcia podkładu kolejowego na jego pracę. II Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Poznań - Rydzyna 1983.

- [68] Krużyński M., Makuch J.: Podbudowy i nawierzchnie tramwajowe. Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna "Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej", Wrocław 2000.
- [69] Krużyński M., Piotrowski A., Makuch J.: Problemy infrastruktury drogowej transportu tramwajowego. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Tom 4 - Infrastruktura Inżynieryjna Miast, Krynica 2000.
- [70] Krużyński M., Szydło A., Piotrowski A., Makuch J., Mazurkiewicz R., Trupkiewicz R.: Ocena stanu technicznego torowiska tramwajowego w ciągu ulic Nowowiejskiej i Piastowskiej we Wrocławiu. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Raport SPR 129/99, Wrocław 1999.
- [71] Krużyński M., Szydło A., Piotrowski A., Makuch J., Mazurkiewicz R., Trupkiewicz R.: Ocena stanu technicznego torowiska tramwajowego w ulicy Grabiszyńskiej we Wrocławiu. Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Raport SPR 130/99, Wrocław 1999.
- [72] Kubalski J.: Tory tramwajowe. WKiŁ, 1978.
- [73] Lewinowski C.: Wymiarowanie konstrukcji jezdni drogowych z betonu cementowego. PWN, 1982.
- [74] Lewinowski C.: Wymiarowanie podatnych nawierzchni drogowych. PWN, 1980.
- [75] Makuch J.: Konstrukcje torowisk tramwajowych stosowanych we Wrocławiu od początku lat 90-tych. IX Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Kraków - Kościelisko 1997.
- [76] Makuch J.: Pomiary ugięć szyny w zabudowanych torowiskach tramwajowych. XI Konferencja Naukowo - Techniczna "Drogi Kolejowe", Wrocław 2001.
- [77] Makuch J.: Zastosowanie tworzyw sztucznych w nowoczesnych rozwiązaniach konstrukcji torowisk tramwajowych w Polsce. XLVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Tom 4 - Inżynieria Komunikacyjna, Krynica 2001.
- [78] Makuch J.: Zgodność teoretycznych i rzeczywistych ugięć szyny jako parametr oceny poprawności pracy nawierzchni tramwajowych zabudowanych. IV Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk - Sobieszewo 2002.
- [79] Massel A.: Pomiary torów tramwajowych - wnioski z badań stanu torów ZKM Gdańsk. Trzecie Seminarium Diagnostyki Nawierzchni Szynowych, Gdańsk 2001.
- [80] Mazurkiewicz R.: Identyfikacja współczynnika sztywności dla potrzeb modeli nawierzchni kolejowej. XI Konferencja Naukowo - Techniczna "Drogi Kolejowe", Wrocław 2001.
- [81] Mazurek T.: Budowa kolei. WKiŁ, Warszawa 1964.
- [82] Mazur S.: Postęp techniczny w budowie i utrzymaniu torów tramwajowych. XV Krajowy Zjazd Komunikacji Miejskiej, Lublin 1974.
- [83] Mazur S.: Wybrane zagadnienia nośności nawierzchni kolejowej. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej 27, Seria: Monografie 8, Wrocław 1983.
- [84] Morawski M.: Sprężyste przytwierdzenie szyn do podkładów betonowych. II Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Poznań - Rydzyna 1983.
- [85] Niezgodziński M. E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. PWN, 1996.
- [86] Nowa A., Porębski R.: Ocena budowy i wstępnej eksploatacji niekonwencjonalnej nawierzchni tramwajowej w Poznaniu. IV Konferencja Naukowa "Drogi Kolejowe", Warszawa - Jachranka 1987.
- [87] Nowacki W.: Mechanika budowli. PWN, Warszawa 1975.

- [88] Nowa technologia budowy rozjazdu tramwajowego. Miejski Zakład Torów, Sieci i Podstacji Trakcyjnych, Kraków 1997.
- [89] Oleksiewicz W.: Aktualne potrzeby badawczo - rozwojowe dotyczące toru tramwajowego. Transcomp, Warszawa 1996.
- [90] Oleksiewicz W.: Kierunki modernizacji torów tramwajowych. Ogólnopolska Konferencja Naukowo - Techniczna "Kierunki rozwoju komunikacji tramwajowej w Polsce", Katowice 1998.
- [91] Oleksiewicz W.: Projekt ciągłego, sprężystego podparcia szyny na podbudowie betonowej w torze tramwajowym wspólnym z jezdnią. Transcomp, Warszawa 1997.
- [92] Oleksiewicz W.: Wdrażanie systemu wspomagania decyzji o utrzymaniu toru w Tramwajach Warszawskich. Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna "Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej", Wrocław 2000.
- [93] Ortec: Die Flüsterschiene von Ortec.
- [94] Pęski W.: Zarządzanie zrównoważonym rozwojem miast. Arkady, Warszawa 1999.
- [95] Phoenix: Sub ballast mats for track technology.
- [96] Piotrowski A.: Uwagi dotyczące kryteriów oceny stanu technicznego torowisk tramwajowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowo - Techniczna "Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej", Wrocław 2000.
- [97] Pisarczyk S.: Mechanika Gruntów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [98] PN-B-03020: 1981 Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [99] PN-B-03264: 1999 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia i projektowanie.
- [100] PN-K-92009: 1998 Komunikacja miejska. Skrajnia budowli. Wymagania.
- [101] PN-K-92011: 1998 Torowiska tramwajowe. Wymagania i badania.
- [102] PN-S-02205: 1998. Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- [103] Polimer: Materiały do systemu wibroizolacji torów tramwajowych. Katalog, Katowice 1996.
- [104] Problemy modernizacji konstrukcji nawierzchni tramwajowych. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej 18, Seria: Studia i materiały 11, Wrocław 1976.
- [105] Profillidis V. A.: Le comportement mécanique de la traverse. Rail International, Février 2001, str. 25 - 33.
- [106] QUESTION D170 - ORE Track component dimensions. Standardisation of characteristic and acceptance tests. Report No. 2: Comparison of various current test methods of fastenings. Utrecht, April 1989.
- [107] Rolla S.: Badania materiałów i nawierzchni drogowych. WKiŁ, Warszawa 1985.
- [108] Rolla S.: Projektowanie nawierzchni. WKiŁ, 1979.
- [109] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Nr 151 z 15.12.1998, pozycja 987.
- [110] Rumszyski L. Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu. PWN, Warszawa 1973.

- [111] Schnellbörg G., Hoffman M., Reich K.: Infundo Feste Fahrbahn. Leonhard Weiss GMBH & Co.
- [112] Siewczyński Ł.: O badaniach odkształcalności dla projektowania i przebudowy podtorza. Konferencja Naukowo - Techniczna "Problemy modernizacji i napraw podtorza kolejowego", Wrocław - Żmigród 2000.
- [113] Siewczyński Ł.: Parametry eksploatacyjne drogi a wymagania projektowe dla podtorza. Seminarium Naukowo - Techniczne "Racjonalne wykorzystanie infrastruktury szynowej", Zakopane - Kościelisko 1995.
- [114] Siewczyński Ł., Rychlewski J.: Komputerowe wspomaganie oceny stanu toru nawierzchni szynowej. Konferencja Naukowo - Techniczna "Techniki Komputerowe w projektowaniu, budowie i modernizacji linii kolejowych", Wrocław - Jelenia Góra 1997.
- [115] Sika Poland: Icosit KC 330/5 i KC 330/6, KC 340/45, KC 340/65. Karty techniczne produktów.
- [116] Skrzyński E., Sikora R.: Kolejowe budowle ziemne. Tom I. Utrzymanie i naprawy. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [117] Skrzyński E.: Wpływ dużego obciążenia ruchem oraz zwiększonych prędkości pociągów na pracę podtorza. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 67, 1975, str. 83 - 112.
- [118] Szacfajer R.: Problemy modernizacji konstrukcji torów tramwajowych w Miejskim Przedsiębiorstwie Komunikacyjnym we Wrocławiu. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej 24, Seria: Konferencje 7, "Drogi szynowe - zagadnienia badawczo konstrukcyjne i eksploatacyjne", Wrocław 1978.
- [119] Szczesniak W.: Wybrane zagadnienia kolejowe. Wzajemne oddziaływania w układzie pojazd - tor kolejowy - podtorze - podłoże gruntowe. Prace Naukowe, Budownictwo, Zeszyt 129. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
- [120] Szczygielski B.: Wytyczne do wyznaczania współczynnika podłoża C i wielkości naprężeń dopuszczalnych w szynie σ , przyjmowanych przy obliczaniu nawierzchni. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 14, 1960, str. 9 - 18.
- [121] Szydło A., Mackiewicz P.: Ocena nośności konstrukcji nawierzchni drogowych na podstawie pomiarów ugięć. Konferencja Naukowo - Techniczna "Utrzymanie i modernizacja dróg i ulic", Wrocław - Polanica Zdrój 1999.
- [122] Tiflex: Trackelast. Rail pads, baseplate pads, undersleeper pads, ballast mats, bearings.
- [123] Timoszenko S. P.: Teorija uprugosti. 1937 .
- [124] TL 918235 Technische Lieferbedingungen für elastische Zwischenlagen. Februar 1994.
- [125] Towpik K.: Kolejowe nawierzchnie bezpodsypkowe. Problemy Kolejnictwa, Zeszyt 129, 1999, str. 37 - 58.
- [126] Towpik K.: Utrzymanie nawierzchni kolejowej. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [127] Tyc P.: Spostrzeżenia związane z problematyką oceny odcinków doświadczalnych linii tramwajowych przy zastosowaniu płyt systemu BKV Budapeszt". Wyższa szkoła techniczna w Pradze, tłumaczenie z języka czeskiego - maszynopis.
- [128] UIC Leaflet 864-5 Technical specification for the supply of rail seat pads. International Union of Railways.
- [129] Vossloh: Rail Fastening Systems.
- [130] Waluk J.: Laboratorium z mechaniki gruntów. Politechnika Wrocławska, 1989.
- [131] Warunki techniczne. Przekładki podszytowe i podpodkładkowe z polietylenu i poliuretanu do rozjazdów na podrozjazdnicach strunobetonowych. Wymagania i

- badania. Nr WT-KD4-518/7-9/95. Dyrekcja Generalna PKP, Naczelny Zarząd Utrzymania Kolei, 1995.
- [132] Wątopek K.: Budowa kolei żelaznych. Warszawa 1924.
- [133] Wihun Z.: Zarys geotechniki. WKiŁ, 2001.
- [134] Winkler E.: Die Lehre von der Elasticität und Festigkeit. Prag 1867.
- [135] Winkler E.: Vorträge über Eisenbahnbau. Erstes Heft: Der Eisenbahn-Oberbau. Prag 1875.
- [136] Wytyczne techniczne projektowania, budowy i utrzymania torów tramwajowych. Ministerstwo Administracji Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska, Warszawa 1983.
- [137] Zadecki W.: Systemy drogowo - torowe Polmar - Halpol. Transport Miejski 1/1991, str. 3 - 4.
- [138] Zątek R.: Wielka płyta w torowisku tramwajowym. Transport Miejski 3/1988, str. 72 - 73.
- [139] Zimmermann H.: Die Berechnung des Eisenbahnoberbaus. Berlin 1930.

STRESZCZENIE

Jednym z wymagań stawianych konstrukcjom torowisk tramwajowych jest ich nośność, rozumiana jako zdolność przenoszenia obciążeń od taboru bez powstawania nadmiernych odkształceń. Niestety obowiązujące normy i przepisy zawierają nieaktualne i nieprecyzyjne zapisy dotyczące kontroli ugięć szyny, brak jest również jednoznacznego określenia metody oceny nośności torowisk tramwajowych.

W niniejszej pracy podjęto próbę rozpoznania możliwości opracowania diagnostycznej metody oceny konstrukcji zabudowanego toru tramwajowego z punktu widzenia jego nośności, dzięki adaptacji metody pomiaru ugięć nawierzchni drogowej ugięciomierzem belkowym (belką Benkelmanna) do pomiarów ugięć szyny tramwajowej pod statycznym naciskiem kół tramwajowych w torowiskach zabudowanych. Przedmiotem pracy było określenie rzeczywistych wartości ugięć szyny przy pomocy drogowego ugięciomierza belkowego dla różnych typów konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych, a następnie porównanie ich ze sobą oraz z ugięciami teoretycznymi uzyskanymi z obliczeń.

We wstępnej części pracy omówiono zagadnienia związane z zakresem i metodami diagnostyki torowisk tramwajowych w świetle obowiązujących przepisów, ilustrując je przykładami opracowań krajowych, wskazując na podobieństwa i różnice w stosunku do diagnostyki stosowanej w torach na kolei.

Dokonano przeglądu typów konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych, z rozróżnieniem na rozwiązania stosowane we Wrocławiu, w innych miastach Polski oraz poza granicami kraju, przedstawiając ich genezę, rysunki i opisy, okresy i miejsca zastosowań, wady i zalety rozwiązań.

Przeprowadzono analizę zagadnienia ugięć szyny w ujęciu teoretycznym i empirycznym, dokonując przeglądu metod i modeli obliczeń nawierzchni szynowych, ich założeń i uproszczeń. Szerzej przedstawiono klasyczną metodę obliczania nawierzchni szynowej jako belki na sprężystym podłożu. Usystematyzowano stosowane miary sztywności toru, dokonano przeglądu ich wartości, przeanalizowano ich zróżnicowanie i wzajemne zależności oraz wpływ innych czynników.

W zasadniczej części pracy zaprezentowano przebieg i wyniki terenowych badań ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwajowych, przeprowadzonych przy użyciu ugięciomierza belkowego, dla pięciu obecnie najczęściej stosowanych we Wrocławiu typów zabudowanych torowisk tramwajowych - dwóch klasycznych podsypkowych: na podkładach drewnianych i betonowych, oraz trzech niekonwencjonalnych z podbudową betonową: na podporach punktowych, typu węgierskiego i z szyną obłożoną wkładkami gumowymi. Przedstawiono szczegółowy opis stanowisk badawczych oraz metody badań, w tym koniecznych modyfikacji drogowej metody pomiarów ugięć. Dokonano statystycznego opracowania wyników badań, z określeniem rzeczywistej wartości mierzonej wielkości oraz oceny dokładności pomiaru. Przeprowadzono analizę porównawczą wyników ugięć szyny dla różnych typów konstrukcji torowisk oraz zróżnicowania wartości ugięć szyny na długości toru, uzyskując w ten sposób podstawę do wnioskowania o poprawności założeń teoretycznych konstrukcji torowisk oraz jakości ich wykonania i zastosowanych materiałów.

W dalszej części pracy przeprowadzono obliczenia teoretycznych wartości ugięć szyny dla przebadanych wcześniej typów torowisk tramwajowych, według klasycznej teorii obliczania nawierzchni szynowej jako belki na sprężystym podłożu. Zdefiniowano w tym celu, a następnie zastosowano uproszczony model nawierzchni szynowej, określono również sztywności podłoża szyny dla różnych typów badanych torowisk.

Wyliczone wartości ugięć teoretycznych szyny porównano z rzeczywistymi, uzyskując w ten sposób podstawę do wnioskowania o poprawności pracy konstrukcji toru pod obciążeniem oraz stopniu jego zużycia. Tor na podporach punktowych jako jedyny nie spełnił tego kryterium.

Główne wnioski sformułowane w podsumowaniu pracy, będące między innymi udowodnieniem przyjętej tezy, są następujące:

- w wyniku przeprowadzonych pomiarów, dla każdego typu konstrukcji torowisk zabudowanych uzyskano odpowiadające im wartości ugięć szyny tramwajowej (wartości średnie) oraz przedziały zróżnicowania tych wartości (odchylenia standardowe),
- metoda pomiarowa okazała się wystarczająco dokładna dla wykazania obecności lub braku regularności w zróżnicowaniu wartości ugięć szyny na długości toru,
- klasyczna teoria obliczania nawierzchni szynowej jako belki ciągłej na sprężystym podłożu okazała się być wygodnym i wystarczająco dobrym narzędziem do obliczenia ugięć teoretycznych,
- w wyniku przeprowadzonych badań i analiz potwierdzona została przydatność wartości uzyskiwanych z pomiarów ugięć szyny pod statycznym naciskiem kół tramwaju przy pomocy drogowego ugięciomierza belkowego, do oceny konstrukcji torowisk tramwajowych zabudowanych z punktu widzenia ich nośności.

Pracę zakończono omówieniem kierunków i możliwości prowadzenia dalszych badań dotyczących podjętej problematyki, z których najważniejsze to:

- przeprowadzenie znacznie szerszych badań terenowych ugięć szyny, badań laboratoryjnych sztywności statycznej elementów podparć szyny i jej zamocowania bocznego oraz obliczeń teoretycznych ugięć szyny według innych dostępnych metod,
- sprecyzowanie procedury badań terenowych ugięć szyny, obliczeń ugięć teoretycznych oraz analiz wyników badań i obliczeń,
- opracowanie systemu eksperckiego badania nośności zabudowanych torowisk tramwajowych z wykorzystaniem pomiarów ugięć szyny ugięciomierzem belkowym.

RAIL DEFLECTION AS AN ESTIMATION PARAMETER OF TRAM TRACK CONSTRUCTION

SUMMARY

One of tram track construction requirement is their carrying capacity, understood as ability of vehicle load transfer without excessive deformations. Unfortunately obligatory norms and rules contain out-of-date and inaccurate notations relating rail deflection inspections, there is no exact method of estimation of tram track load capacity, either.

In this work a possibility of tram track construction estimation by adaptation of road pavement deflection measurement method (Benkelmann's beam) to measurement of rail deflection in built-up tram tracks was undertaken to recognize. The aim of this work was to define real values of rail deflections for different types of built-up tram track constructions, and then comparison of them with oneself and with theoretical deflections obtained from calculations.

In the initial part of the work problems connected with range and methods of tram tracks diagnostics in obligatory regulations were discussed. They were illustrated with examples of local studies, showing the similarities and differences in relation to practical railway tracks diagnostics.

Review of built-up tram track construction types with distinction on solutions from Wrocław, other cities of Poland and outside the country border was made. Their genesis, schemes and descriptions, terms and places of use, advantages and disadvantages were presented.

Theoretical and empirical analysis of rail deflection problem was made. Review of methods and models of rail track calculations with their foundations and simplifications was done. Classical method of rail track calculation as a beam on elastics foundation was presented more widely. Systematization of track stiffness practical measures and review of their values, differentiation, interdependence and influence of other factors was made.

In the principle part of the work course and results of in-situ rail deflection measurements under static pressure of tram vehicle wheels were presented. The investigations were made by the use of Benkelmann's beam, for five present the most often applied in Wrocław built-up tram track construction types - two classical ballasted: on wooden and concrete sleepers, and three unconventional with concrete foundation: on point supports, the Hungarian type and with rail covered with rubber profiles. Detailed description of positions and methods of investigations was made, including necessary modifications of road pavement deflection measurement method. Statistical study of investigation results, with estimation of real values and accuracy of measurement was done. Comparison analysis of rail deflection results for different types of tram track construction and differentiation analysis of rail deflection results on track length were made, as a base to conclude about correctness of theoretical construction tram track establishments and quality of realization and used materials.

In the further part of the work calculations of theoretical values of rail deflections for five examined tram track types, according to classical theory of track calculation as a beam on elastic foundation were passed. A simplified model of rail track was defined and used. Stiffness of rail foundations for different types of examined tram tracks were calculated. Values of theoretical rail deflections were compared with real values from

investigations. It was base to conclude about correctness of track construction work. Track on point supports did not realize this criterion.

The main conclusions, formulated in the sum up of the work, are as follows:

- as a result of measurements, for every type of built-up tram track construction obtained corresponding to them values of rail deflections (average values) and intervals of these values differentiation (standard deviations),
- measuring method was sufficiently exact for detection of presence or lack of rail deflection value differentiation regularity on length of the track,
- classical theory of track calculation as a beam on elastic foundation was comfortable and sufficiently good tool for calculations of theoretical deflections,
- as a result of investigations and analyses usefulness of values obtained from deflections of rail measurements under static pressure of tram vehicle wheels by Benkelmann's beam to tram track construction estimation was confirmed.

The work was finished with discussion of directions and possibilities of further research. The most important are as follows:

- realization of considerably wider investigations of in-situ rail deflections, laboratory tests of static stiffness for elements of rail supports and lateral fastenings, and rail deflection theoretical calculations according to other accessible methods,
- specifying procedures of rail deflection in-situ investigations, theoretical calculations and result analysis,
- elaboration of expert system of built-up tram track load capacity investigation with utilization of rail deflection measurement method by Benkelmann's beam.

ZAŁĄCZNIK NR 1

Formularze z wynikami pomiarów badań terenowych

stanowisko: 1a

data: 18.07.2001

godzina: 11.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 23 C

miejsce: ul. Hallera / Mielecka

kierunek: do ul. Powstańców Śl.

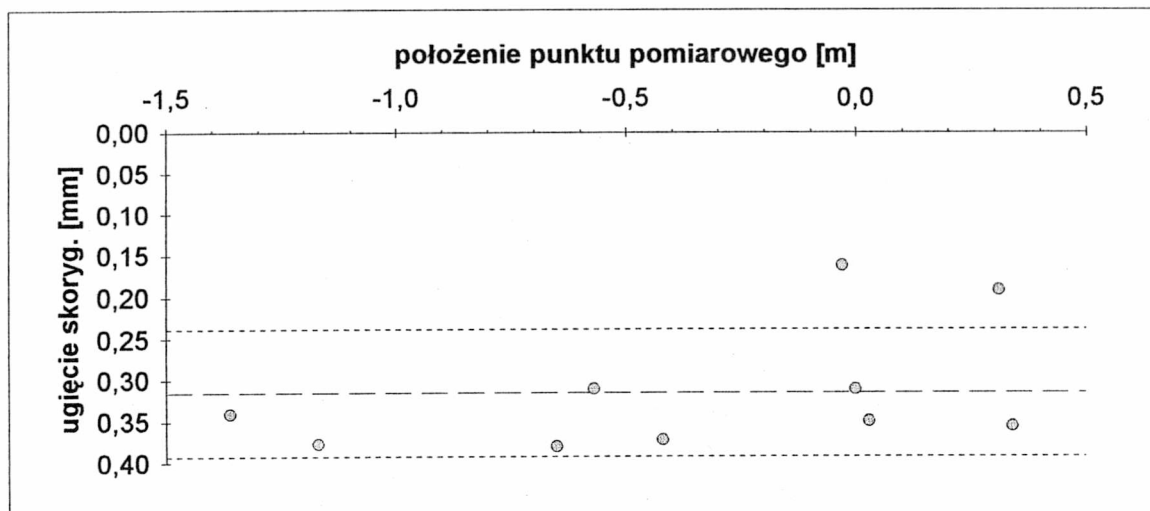
szyna: prawa

typ toru: z podkł. drewn.

wiek: 2 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	102	17	24,17	0	996	979	0,34	0,312
2	102	12	23,32	-65	996	976	0,40	0,381
3	102	13	23,49	-117	998	978	0,40	0,378
4	105	7	21,80	-3	996	988	0,16	0,163
5	102	14	23,66	34	999	980	0,38	0,357
6	102	5	22,11	-136	997	980	0,34	0,341
7	102	11	23,14	31	998	988	0,20	0,192
8	102	1	21,43	-57	999	984	0,30	0,311
9	102	9	22,80	3	1003	985	0,36	0,351
10	102	8	22,63	-42	996	977	0,38	0,373
wart.śr.=			22,85	wart.śr.=			0,326	0,316
odch.st.=			0,83	odch.st.=			0,0833	0,0772
wsp.zm.=			4%	wsp.zm.=			0,256	0,245

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podkładów - 67 cm

stanowisko: 2a

data: 20.07.2001

godzina: 11.10

pogoda: pochmurno

temp.: + 22 C

miejsce: ul. Ślężna / Wiśniowa

kierunek: do Parku Pd

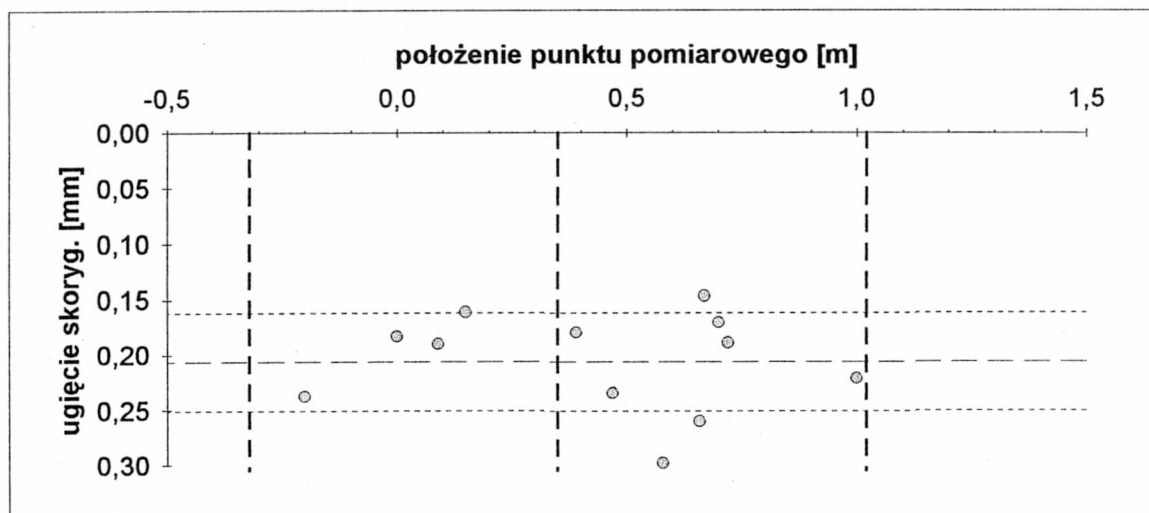
szyna: prawa

typ toru: z podkł. bet.

wiek: 2 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	7	21,80	0	986	977	0,18	0,183
2	105	3	21,12	67	984	977	0,14	0,147
3	105	9	22,15	9	985	975,5	0,19	0,190
4	105	3	21,12	72	986	977	0,18	0,189
5	105	5	21,46	-20	986,5	975	0,23	0,238
6	105	14	23,00	100	992,5	981	0,23	0,222
7	105	1	20,77	70	991	983	0,16	0,171
8	105	0	20,60	15	987	979,5	0,15	0,162
9	105	10	22,32	58	986	971	0,30	0,298
10	105	1	20,77	47	987	976	0,22	0,235
11	105	2	20,94	39	986	977,5	0,17	0,180
12	105	4	21,29	66	987	974,5	0,25	0,261
wart.śr.=			21,45	wart.śr.=			0,200	0,206
odch.st.=			0,70	odch.st.=			0,0469	0,0447
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,235	0,217

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



pozioma linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych
 poziome linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

pionowe linie przerywane - osie podkładów

stanowisko: 2b

data: 13.07.2001

godzina: 12.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 25 C

miejsce: ul. Powstańców Śl / Jaworowa

kierunek: do ul. Hallera

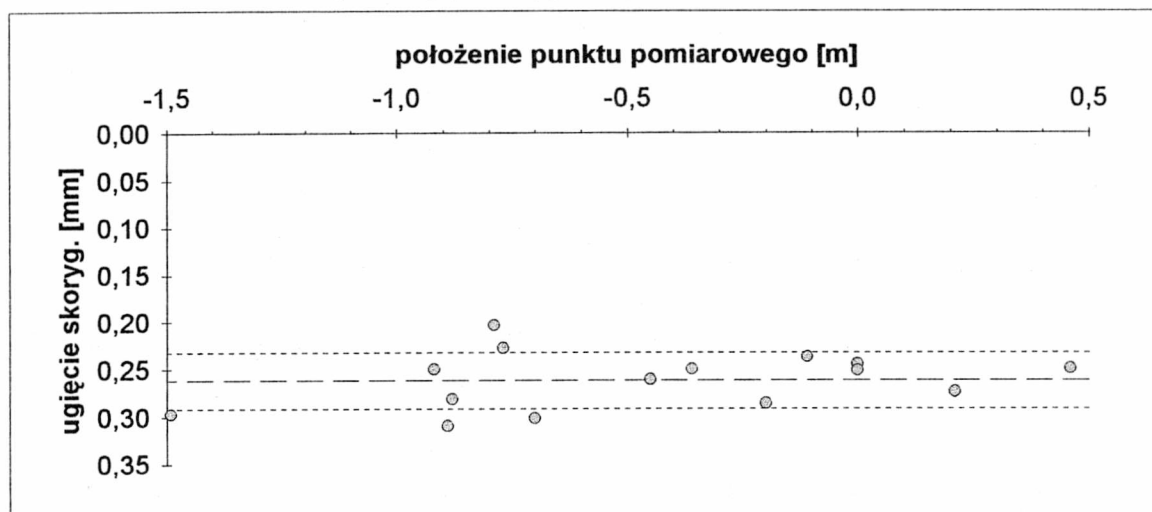
szyna: prawa

typ toru: z podkł. bet.

wiek: 2 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	7	21,80	0	500	488	0,24	0,244
2	105	3	21,12	21	898	885	0,26	0,273
3	102	10	22,97	0	1000	987	0,26	0,251
4	102	11	23,14	46	1002	989	0,26	0,249
5	105	4	21,29	-36	500	488	0,24	0,250
6	105	5	21,46	-77	501	490	0,22	0,228
7	102	7	22,46	-11	898	886	0,24	0,237
8	102	3	21,77	-20	800	786	0,28	0,286
9	105	4	21,29	-92	500	488	0,24	0,250
10	102	5	22,11	-45	500	487	0,26	0,261
11	102	5	22,11	-70	801	786	0,30	0,301
12	102	10	22,97	-89	500	484	0,32	0,309
13	105	7	21,80	-79	502	492	0,20	0,204
14	105	2	20,94	-149	900	886	0,28	0,297
15	102	5	22,11	-88	800	786	0,28	0,281
wart.śr.=			21,96	wart.śr.=			0,259	0,261
odch.st.=			0,67	odch.st.=			0,0307	0,0294
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,119	0,112

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podkładów - 67 cm

stanowisko: 2c

data: 18.07.2001

godzina: 7.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 20 C

miejsce: ul. Grabiszyńska / Zaporoska

kierunek: do Oporowa

szyna: prawa

typ toru: z podkł. bet.

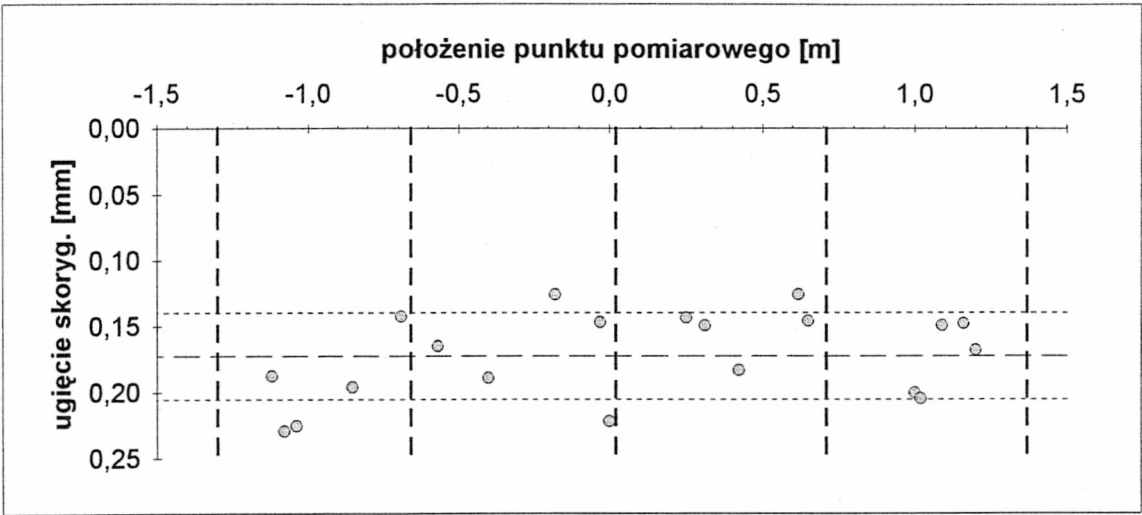
wiek: 1 rok

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	8	21,97	0	1900	1889	0,22	0,222
2	102	5	22,11	100	1502	1492	0,20	0,201
3	105	6	21,63	-104	1999	1988	0,22	0,226
4	105	6	21,63	102	1502	1492	0,20	0,205
5	105	4	21,29	-108	1899	1888	0,22	0,229
6	105	6	21,63	25	1502	1495	0,14	0,144
7	105	4	21,29	-112	999	990	0,18	0,188
8	102	8	22,63	-85	1399	1389	0,20	0,196
9	105	2	20,94	116	1002	995	0,14	0,148
10	105	3	21,12	-40	997	988	0,18	0,189
11	105	3	21,12	-3	996	989	0,14	0,147
12	105	1	20,77	109	1199	1192	0,14	0,150
13	105	3	21,12	120	998	990	0,16	0,168
14	102	3	21,77	42	998	989	0,18	0,184
15	105	4	21,29	65	999	992	0,14	0,146
16	105	5	21,46	-57	994	986	0,16	0,166
17	105	7	21,80	-69	998	991	0,14	0,143
18	105	3	21,12	62	999	993	0,12	0,126
19	105	3	21,12	-18	1000	994	0,12	0,126
20	105	1	20,77	31	999	992	0,14	0,150
wart.śr.=			21,43	wart.śr.=			0,167	0,173
odch.st.=			0,46	odch.st.=			0,0339	0,0330
wsp.zm.=			2%	wsp.zm.=			0,203	0,191

stanowisko: 2c

typ toru: z podkł. bet.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



pozioma linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych
poziome linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej
pionowe linie przerywane - osie podkładów

stanowisko: 3a

data: 20.07.2001

godzina: 8.45

pogoda: słonecznie

temp.: + 25 C

miejsce: ul. Świdnicka / Piłsudskiego

kierunek: od Krzyków

szyna: prawa

typ toru: na podporach punkt.

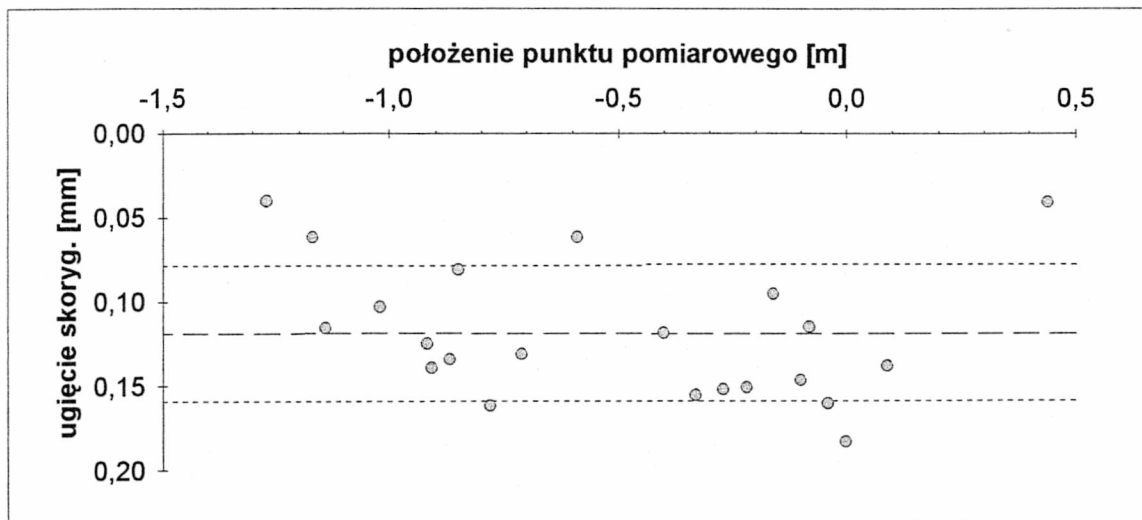
wiek: 5 lat

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	102	17	24,17	0	986	976	0,20	0,184
2	102	11	23,14	-16	988	983	0,10	0,096
3	102	7	22,46	9	984	977	0,14	0,138
4	105	6	21,63	44	987	985	0,04	0,041
5	105	10	22,32	-91	985	978	0,14	0,139
6	102	12	23,32	-27	982	974	0,16	0,152
7	102	21	24,86	-4	987	978	0,18	0,161
8	102	14	23,66	-71	986	979	0,14	0,131
9	105	4	21,29	-92	985	979	0,12	0,125
10	105	14	23,00	-114	987	981	0,12	0,116
11	105	6	21,63	-117	989	986	0,06	0,062
12	102	13	23,49	-22	992	984	0,16	0,151
13	102	9	22,80	-33	988	980	0,16	0,156
14	102	17	24,17	-10	994	986	0,16	0,147
15	105	8	21,97	-85	988	984	0,08	0,081
16	102	11	23,14	-8	990	984	0,12	0,115
17	105	9	22,15	-127	991	989	0,04	0,040
18	102	20	24,69	-78	960	951	0,18	0,162
19	102	11	23,14	-87	988	981	0,14	0,134
20	102	23	25,20	-59	988	984,5	0,07	0,062
21	105	5	21,46	-102	986	981	0,10	0,103
22	102	7	22,46	-40	987	981	0,12	0,119
wart.śr.=			23,01	wart.śr.=			0,124	0,119
odch.st.=			1,10	odch.st.=			0,0450	0,0405
wsp.zm.=			5%	wsp.zm.=			0,363	0,340

stanowisko: 3a

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 67 cm

stanowisko: 3b

data: 20.07.2001

godzina: 7.20

pogoda: pochmurno

temp.: + 20 C

miejsce: ul. Podwale / Świdnicka

kierunek: od ul. Sądowej

szyna: prawa

typ toru: na podporach punkt.

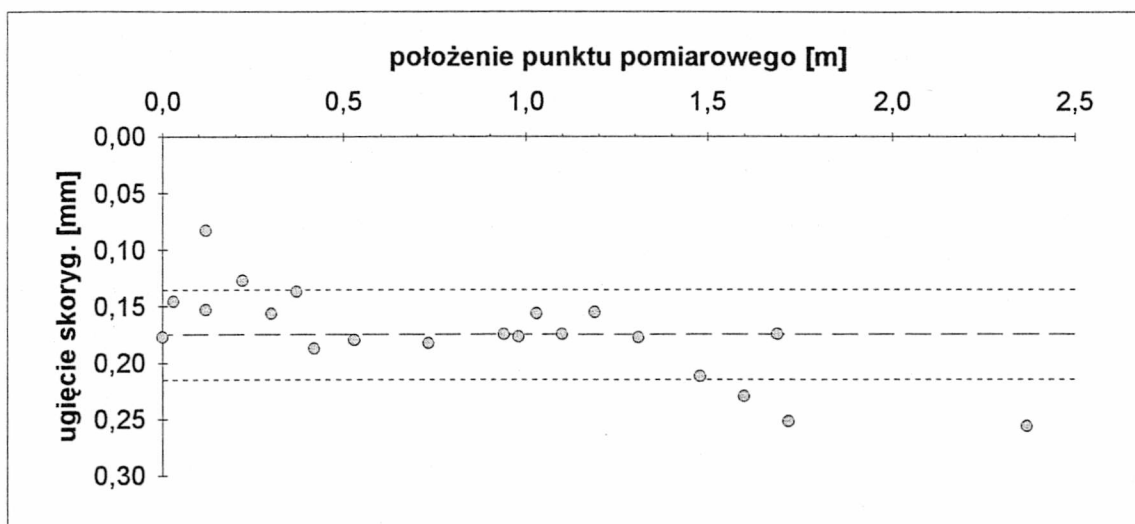
wiek: 4 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	11	22,49	0	998	989	0,18	0,178
2	102	9	22,80	119	992	984	0,16	0,156
3	105	4	21,29	42	993	984	0,18	0,188
4	105	3	21,12	172	990	978	0,24	0,252
5	105	9	22,15	53	987	978	0,18	0,180
6	102	7	22,46	131	989	980	0,18	0,178
7	102	11	23,14	160	988	976	0,24	0,230
8	105	14	23,00	148	988	977	0,22	0,212
9	105	4	21,29	12	988	984	0,08	0,083
10	105	11	22,49	98	987	978	0,18	0,178
11	102	17	24,17	237	985	971	0,28	0,257
12	102	11	23,14	12	989	981	0,16	0,153
13	105	12	22,66	22	987	980,5	0,13	0,127
14	102	9	22,80	3	990	982,5	0,15	0,146
15	105	7	21,80	73	988	979	0,18	0,183
16	102	9	22,80	110	988	979	0,18	0,175
17	102	8	22,63	103	989	981	0,16	0,157
18	105	13	22,83	169	988	979	0,18	0,175
19	102	8	22,63	37	988	981	0,14	0,137
20	105	12	22,66	30	989	981	0,16	0,157
21	102	9	22,80	94	986	977	0,18	0,175
wart.śr.=			22,53	wart.śr.=			0,178	0,175
odch.st.=			0,69	odch.st.=			0,0420	0,0399
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,236	0,228

stanowisko: 3b

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 1 m

stanowisko: 3c

data: 23.07.2001

godzina: 9.20

pogoda: lekkie zachmurzenie

temp.: + 22 C

miesce: ul. Dubois / Pomorska

kierunek: od mostów Mieszczańskich

szyna: prawa

typ toru: na podporach punkt.

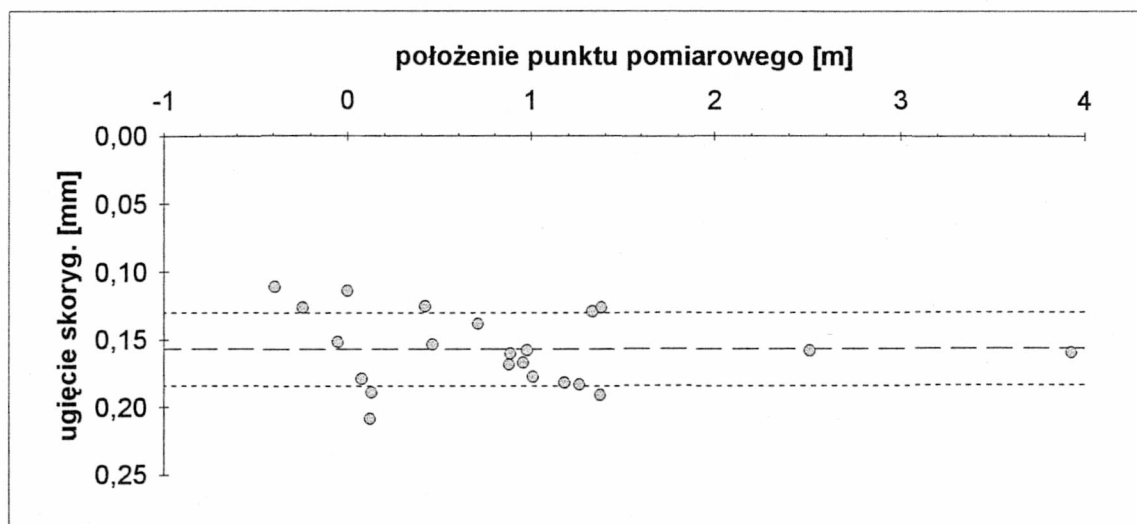
wiek: 3 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	5	21,46	0	993	987,5	0,11	0,114
2	105	20	24,03	-39	992	986	0,12	0,111
3	105	10	22,32	133	992	985,5	0,13	0,129
4	105	4	21,29	42	992	986	0,12	0,125
5	105	1	20,77	89	992,5	985	0,15	0,160
6	105	8	21,97	118	990,5	981,5	0,18	0,182
7	105	7	21,80	126	987,5	978,5	0,18	0,183
8	105	3	21,12	-24	992	986	0,12	0,126
9	105	9	22,15	393	993	985	0,16	0,160
10	102	11	23,14	46	991,5	983,5	0,16	0,153
11	105	3	21,12	13	992	983	0,18	0,189
12	105	11	22,49	71	993	986	0,14	0,138
13	102	9	22,80	138	993,5	987	0,13	0,127
14	105	3	21,12	8	990,5	982	0,17	0,179
15	105	8	21,97	-5	992	984,5	0,15	0,152
16	105	3	21,12	88	992	984	0,16	0,168
17	105	11	22,49	98	993	985	0,16	0,158
18	102	7	22,46	251	992,5	984,5	0,16	0,158
19	105	2	20,94	137	991	982	0,18	0,191
20	102	0	21,26	12	993	983	0,20	0,209
21	102	0	21,26	101	993	984,5	0,17	0,178
22	105	4	21,29	96	992,5	984,5	0,16	0,167
wart.śr.=			21,83	wart.śr.=			0,154	0,157
odch.st.=			0,81	odch.st.=			0,0242	0,0271
wsp.zm.=			4%	wsp.zm.=			0,157	0,172

stanowisko: 3c

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 1 m

stanowisko: 3d

data: 20.07.2001

godzina: 9.40

pogoda: słonecznie

temp.: + 25 C

miejsce: ul. Piłsudskiego / Świdnicka

kierunek: od dworca Gł.

szyna: prawa

typ toru: na podporach punkt.

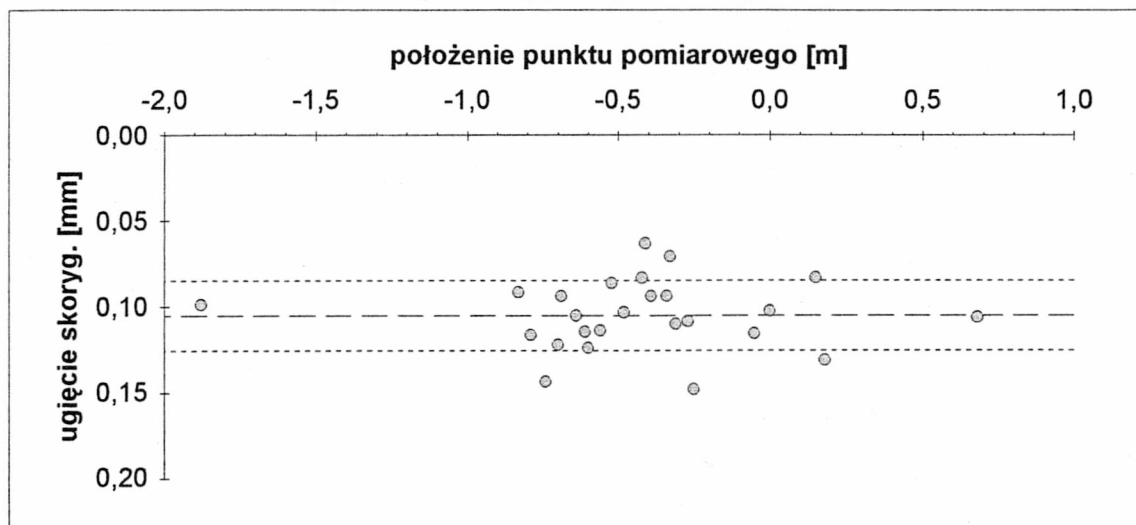
wiek: 2 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugięcie zmierz- ne yi	ugięcie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	6	21,63	0	988	983	0,10	0,103
2	105	3	21,12	-64	973	968	0,10	0,105
3	105	4	21,29	15	987	983	0,08	0,083
4	105	11	22,49	-188	996	991	0,10	0,099
5	102	7	22,46	-25	991	983,5	0,15	0,148
6	105	14	23,00	-5	987	981	0,12	0,116
7	105	7	21,80	-83	985	980,5	0,09	0,092
8	105	5	21,46	-60	982	976	0,12	0,124
9	105	5	21,46	-56	990	984,5	0,11	0,114
10	105	8	21,97	-33	988,5	985	0,07	0,071
11	105	9	22,15	-31	982	976,5	0,11	0,110
12	105	3	21,12	-41	989	986	0,06	0,063
13	105	6	21,63	-74	988	981	0,14	0,144
14	102	11	23,14	-52	989,5	985	0,09	0,086
15	105	2	20,94	-79	987	981,5	0,11	0,117
16	105	4	21,29	-61	982	976,5	0,11	0,115
17	105	4	21,29	-69	985	980,5	0,09	0,094
18	105	7	21,80	-70	986	980	0,12	0,122
19	105	5	21,46	-48	993,5	988,5	0,10	0,103
20	105	11	22,49	-27	988,5	983	0,11	0,109
21	102	0	21,26	-34	985	980,5	0,09	0,094
22	105	4	21,29	-39	988,5	984	0,09	0,094
23	105	8	21,97	18	985	978,5	0,13	0,131
24	105	4	21,29	-42	988,5	984,5	0,08	0,083
25	102	10	22,97	68	994	988,5	0,11	0,106
wart.śr.=			21,79	wart.śr.=			0,103	0,105
odch.st.=			0,63	odch.st.=			0,0208	0,0204
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,201	0,194

stanowisko: 3d

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 66 cm

stanowisko: 3e

data: 18.07.2001

godzina: 9.45

pogoda: słonecznie

temp.: + 21 C

miejsce: ul. Grabiszyńska / Pereca

kierunek: do pl. Legionów

szyna: prawa

typ toru: na podporach punkt.

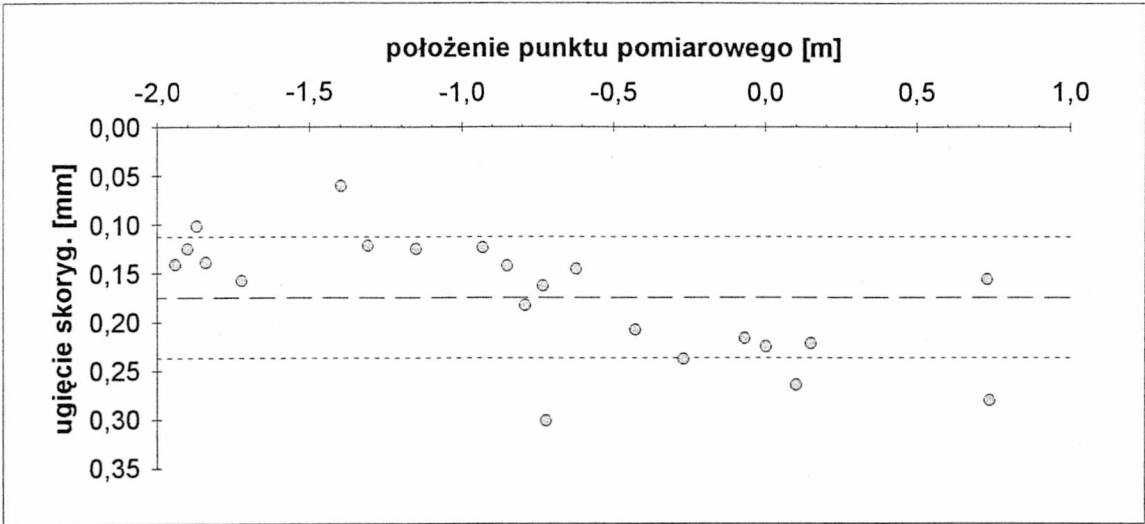
wiek: 1 rok

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi [kN]	położenie punktu pomiar. lbi [cm]	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi [mm]	ugiecie skorygo- wane ysi [mm]
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	6	21,63	0	999	988	0,22	0,226
2	102	5	22,11	74	994	980	0,28	0,281
3	105	0	20,60	-72	996	982	0,28	0,302
4	105	8	21,97	-194	997	990	0,14	0,141
5	105	7	21,80	-187	995	990	0,10	0,102
6	105	4	21,29	-43	988	978	0,20	0,209
7	102	4	21,94	-140	999	996	0,06	0,061
8	105	5	21,46	-93	997	991	0,12	0,124
9	105	7	21,80	10	993	980	0,26	0,265
10	105	4	21,29	-115	996	990	0,12	0,125
11	102	4	21,94	15	998	987	0,22	0,223
12	105	10	22,32	-27	998	986	0,24	0,239
13	105	7	21,80	-131	996	990	0,12	0,122
14	105	7	21,80	-73	997	989	0,16	0,163
15	105	11	22,49	-7	997	986	0,22	0,217
16	105	11	22,49	-172	998	990	0,16	0,158
17	105	7	21,80	-85	996	989	0,14	0,143
18	105	4	21,29	-62	997	990	0,14	0,146
19	105	4	21,29	-190	999	993	0,12	0,125
20	105	12	22,66	73	997	989	0,16	0,157
21	105	7	21,80	-79	998	989	0,18	0,183
22	105	10	22,32	-184	997	990	0,14	0,139
wart.śr.=			21,81	wart.śr.=			0,172	0,175
odch.st.=			0,48	odch.st.=			0,0604	0,0621
wsp.zm.=			2%	wsp.zm.=			0,351	0,355

stanowisko: 3e

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 1 m

stanowisko: 3f
 data: 23.07.2001
 godzina: 7.20

pogoda: słonecznie
 temp.: + 22 C

miejsce: ul. Legnicka / Wejherowska
 kierunek: od centrum
 szyna: prawa

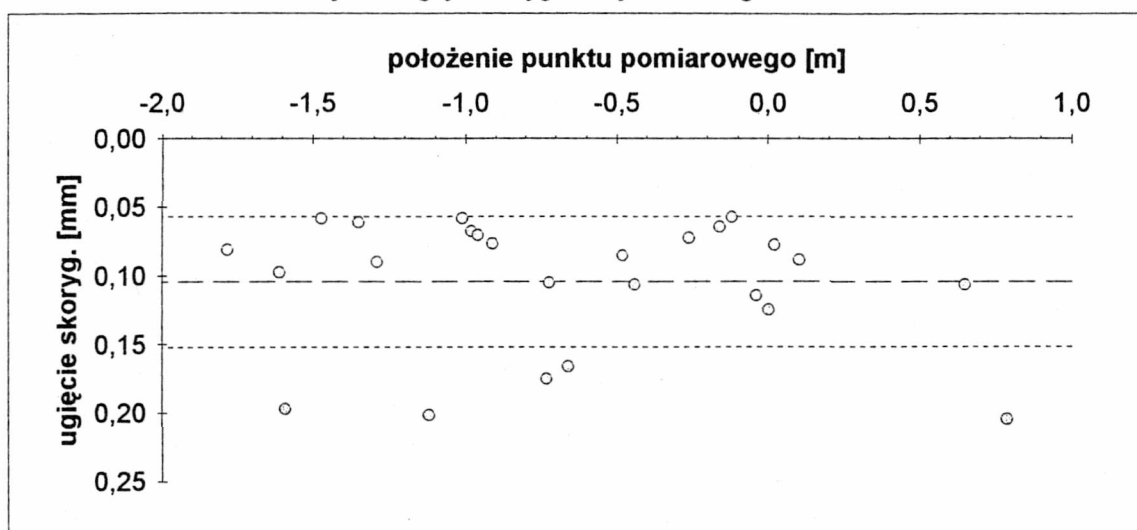
typ toru: na podporach punkt.
 wiek: 1 rok

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi	ugiecie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	14	23,00	0	989	982,5	0,13	0,125
2	105	20	24,03	-16	994	990,5	0,07	0,065
3	105	15	23,18	-4	989	983	0,12	0,115
4	105	12	22,66	-66	991,5	983	0,17	0,167
5	105	8	21,97	-112	994	984	0,20	0,202
6	105	12	22,66	-147	993	990	0,06	0,059
7	105	15	23,18	-72	995	989,5	0,11	0,105
8	105	11	22,49	-159	993	983	0,20	0,197
9	105	13	22,83	-98	992,5	989	0,07	0,068
10	105	20	24,03	-73	992,5	983	0,19	0,175
11	105	6	21,63	-135	993	990	0,06	0,062
12	105	11	22,49	10	992	987,5	0,09	0,089
13	105	14	23,00	-12	995	992	0,06	0,058
14	105	16	23,35	-48	993	988,5	0,09	0,086
15	105	12	22,66	-101	994	991	0,06	0,059
16	105	13	22,83	2	994	990	0,08	0,078
17	105	13	22,83	65	992	986,5	0,11	0,107
18	105	12	22,66	-161	991	986	0,10	0,098
19	105	4	21,29	-26	993	989,5	0,07	0,073
20	105	9	22,15	-129	991,5	987	0,09	0,090
21	105	14	23,00	-91	992	988	0,08	0,077
22	105	13	22,83	-44	993	987,5	0,11	0,107
23	105	7	21,80	-178	992	988	0,08	0,081
24	105	8	21,97	-96	992	988,5	0,07	0,071
25	105	6	21,63	79	993	983	0,20	0,205
wart.śr.=			22,65	wart.śr.=			0,107	0,105
odch.st.=			0,67	odch.st.=			0,0478	0,0474
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,448	0,452

stanowisko: 3f

typ toru: na podporach punkt.

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

rozstaw podpór - 1 m

stanowisko: 4a

data: 13.07.2001

godzina: 7.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 22 C

miejsce: pl. Bema

kierunek: od pl. Kromera

szyna: prawa

typ toru: węgierski

wiek: 7 lat

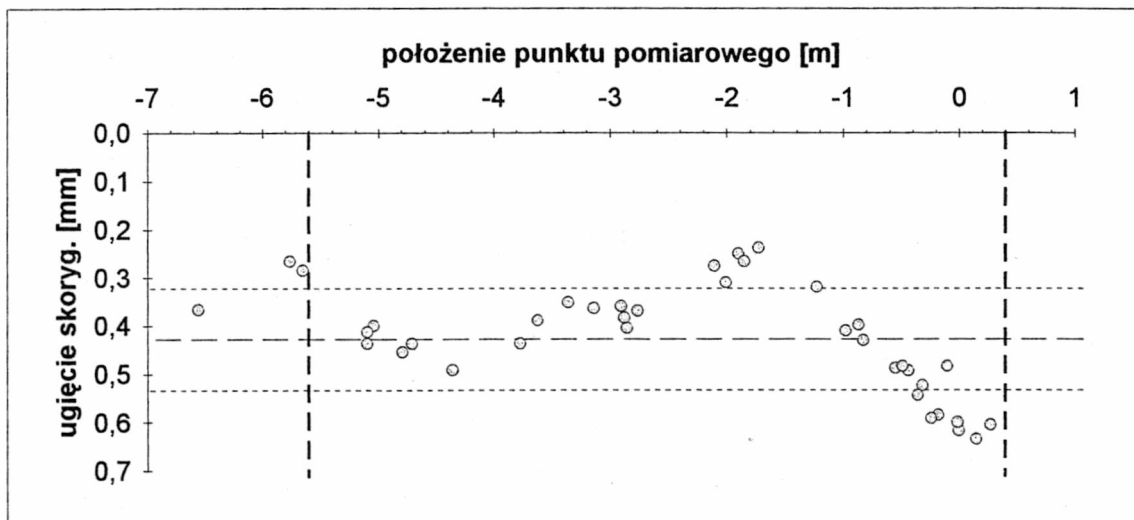
Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi [kN]	położenie punktu pomiar. lbi [cm]	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- ne yi [mm]	ugiecie skorygo- wane ysi [mm]
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	18	23,69	0	498	465	0,66	0,618
2	102	30	26,41	858	996	972	0,48	0,404
3	105	3	21,12	-32	501	476	0,50	0,526
4	105	18	23,69	-83	500	477	0,46	0,431
5	105	12	22,66	27	501	470	0,62	0,607
6	105	22	24,38	-314	1000	980	0,40	0,364
7	102	17	24,17	881	999	978	0,42	0,386
8	105	8	21,97	-18	500	471	0,58	0,586
9	105	1	20,77	-123	500	485	0,30	0,321
10	105	16	23,35	-44	500	474	0,52	0,494
11	105	3	21,12	-87	501	482	0,38	0,400
12	105	2	20,94	-24	499	471	0,56	0,594
13	105	9	22,15	-1	500	470	0,60	0,601
14	102	14	23,66	844	501	475	0,52	0,488
15	105	13	22,83	-36	499	471	0,56	0,544
16	105	7	21,80	-55	500	476	0,48	0,489
17	105	12	22,66	-98	500	479	0,42	0,411
18	102	15	23,83	803	500	475	0,50	0,466
19	105	2	20,94	15	500	470	0,60	0,636
20	105	8	21,97	-49	500	476	0,48	0,485
21	105	10	22,32	-173	500	488	0,24	0,239
22	105	6	21,63	-277	498	480	0,36	0,369
23	102	17	24,17	572	500	470	0,60	0,551
24	105	1	20,77	-286	501	482	0,38	0,406
25	105	8	21,97	-288	500	481	0,38	0,384
26	105	12	22,66	-336	498	480	0,36	0,353
27	105	6	21,63	-362	499	480	0,38	0,390
28	105	2	20,94	-291	500	483	0,34	0,360
29	102	11	23,14	551	500	470	0,60	0,576
30	105	13	22,83	-201	500	484	0,32	0,311
31	105	11	22,49	-211	498	484	0,28	0,276
32	105	4	21,29	-190	500	488	0,24	0,250
33	105	6	21,63	-185	502	489	0,26	0,267
34	102	12	23,32	740	503	484	0,38	0,362
35	105	8	21,97	-10	501	477	0,48	0,485
36	105	14	23,00	-656	500	481	0,38	0,367
37	105	5	21,46	-479	502	480	0,44	0,455
38	105	4	21,29	-510	496	475	0,42	0,438
39	102	14	23,66	356	501	484	0,34	0,319
40	105	10	22,32	-471	501	479	0,44	0,438
41	105	9	22,15	-504	502	482	0,40	0,401

42	105	16	23,35	-377	500	477	0,46	0,437
43	105	6	21,63	-436	500	476	0,48	0,493
44	102	15	23,83	308	500	479	0,42	0,391
45	105	5	21,46	-510	500	480	0,40	0,414
46	105	6	21,63	-576	501	488	0,26	0,267
47	105	16	23,35	-565	700	685	0,30	0,285
wart.śr.=			22,47	wart.śr.=			0,434	0,428
odch.st.=			1,18	odch.st.=			0,1087	0,1057
wsp.zm.=			5%	wsp.zm.=			0,251	0,247

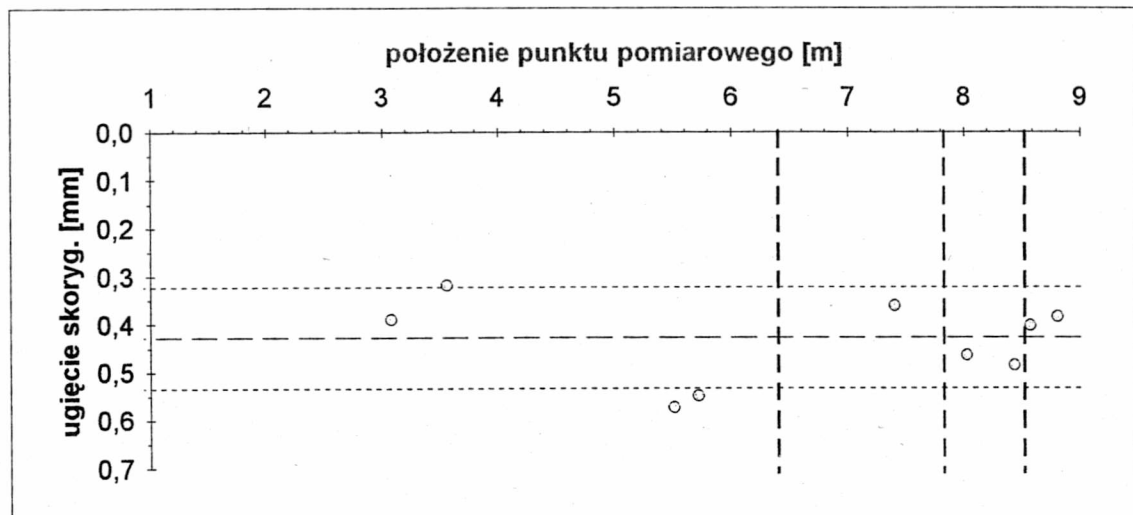
stanowisko: 4a

typ toru: węgierski

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru - część 1



Wykres ugięć skorygowanych na długości toru - część 2



pozioma linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych
poziome linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

pionowe linie przerywane - styki płyt węgierskich

stanowisko: 4b

data: 18.07.2001

godzina: 13.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 23 C

miesce: pl. Wróblewskiego

kierunek: do pl. Dominikańskiego

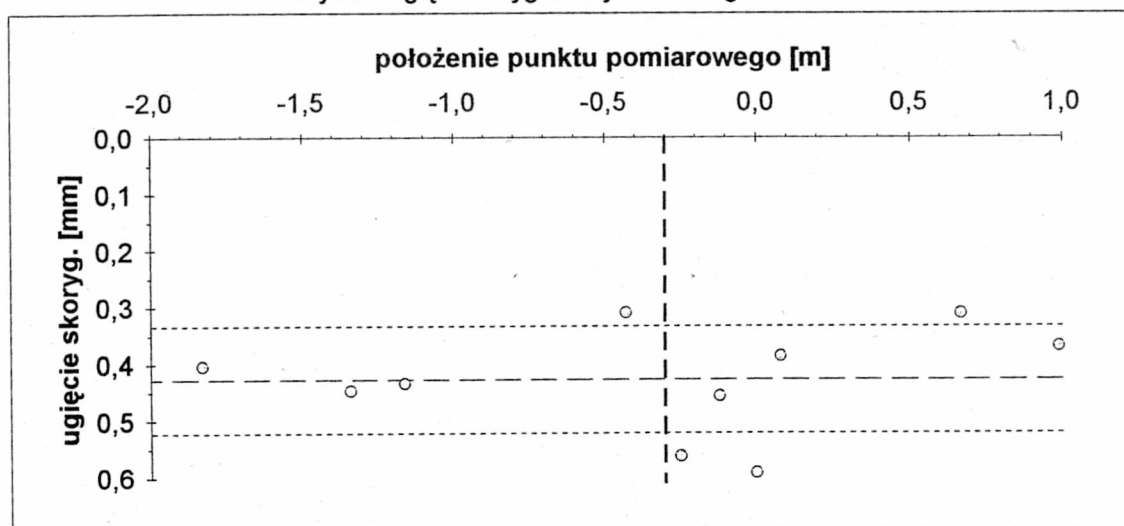
szyna: prawa

typ toru: węgierski

wiek: 5 lat

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi [kN]	położenie punktu pomiar. lbi [cm]	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- one yi [mm]	ugiecie skorygo- wane ysi [mm]
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	102	33	26,92	0	1003	967	0,72	0,594
2	105	13	22,83	-25	900	871	0,58	0,564
3	105	5	21,46	-43	502	487	0,30	0,310
4	105	7	21,80	8	898	879	0,38	0,387
5	105	8	21,97	-183	701	681	0,40	0,404
6	102	17	24,17	67	1500	1483	0,34	0,312
7	105	10	22,32	-12	598	575	0,46	0,458
8	105	5	21,46	-116	500	479	0,42	0,434
9	105	13	22,83	99	600	581	0,38	0,369
10	105	7	21,80	-134	501	479	0,44	0,448
			wart.śr.= 22,76				wart.śr.= 0,442	0,428
			odch.st.= 1,59				odch.st.= 0,1235	0,0944
			wsp.zm.= 7%				wsp.zm.= 0,279	0,221

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



pozioma linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych
poziome linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

pionowe linie przerywane - styki płyt węgierskich

stanowisko: 4c

data: 23.07.2001

godzina: 11.15

pogoda: pochmurno

temp.: + 23 C

miejsce: ul. Piaskowa / Hala Targowa

kierunek: do pl. Bema

szyna: prawa

typ toru: węgierski

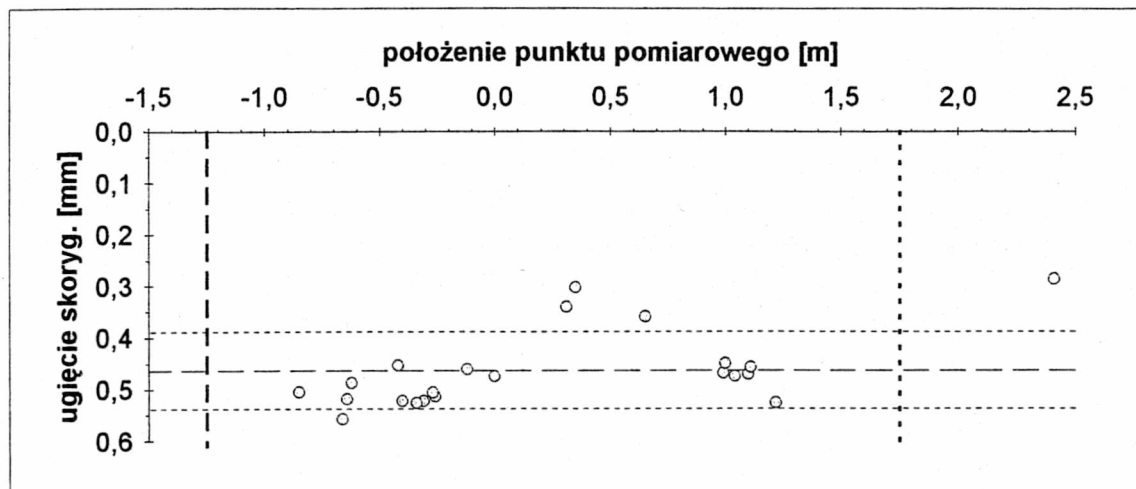
wiek: 1 rok

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi	położenie punktu pomiar. lbi	odczyt wskazań czujnika zegarowego		ugięcie zmierz- ne yi	ugięcie skorygo- wane ysi
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	105	13	22,83	0	990,5	966	0,49	0,476
2	105	10	22,32	122	992,5	966	0,53	0,527
3	105	18	23,69	-85	995,5	968,5	0,54	0,506
4	105	3	21,12	-26	992,5	968	0,49	0,515
5	105	7	21,80	-62	994	970	0,48	0,489
6	105	6	21,63	-12	992,5	970	0,45	0,462
7	105	5	21,46	31	994	977,5	0,33	0,341
8	105	8	21,97	35	994	979	0,30	0,303
9	105	11	22,49	-42	992	969	0,46	0,454
10	105	6	21,63	-31	994	968,5	0,51	0,523
11	105	10	22,32	-27	992,5	967	0,51	0,507
12	105	11	22,49	-40	994	967,5	0,53	0,523
13	105	7	21,80	-64	991,5	966	0,51	0,519
14	105	17	23,52	110	993	968	0,50	0,472
15	105	12	22,66	-66	992	963,5	0,57	0,558
16	105	10	22,32	-34	991,5	965	0,53	0,527
17	105	15	23,18	241	991,5	976,5	0,30	0,287
18	105	13	22,83	65	993	974,5	0,37	0,360
19	105	15	23,18	99	992,5	968	0,49	0,469
20	105	12	22,66	100	992	969	0,46	0,451
21	105	7	21,80	111	991	968,5	0,45	0,458
22	105	13	22,83	104	995	970,5	0,49	0,476
wart.śr.=			22,39	wart.śr.=			0,468	0,464
odch.st.=			0,67	odch.st.=			0,0760	0,0748
wsp.zm.=			3%	wsp.zm.=			0,163	0,161

stanowisko: 4c

typ toru: węgierski

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



pozioma linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych

poziome linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

pionowa linia przerywana rzadka - styk płyt węgierskich

pionowa linia przerywana gęsta - środek płyty węgierskiej

stanowisko: 5a

data: 13.07.2001

godzina: 11.30

pogoda: słonecznie

temp.: + 25 C

miejsce: ul. Karkonoska

kierunek: oba

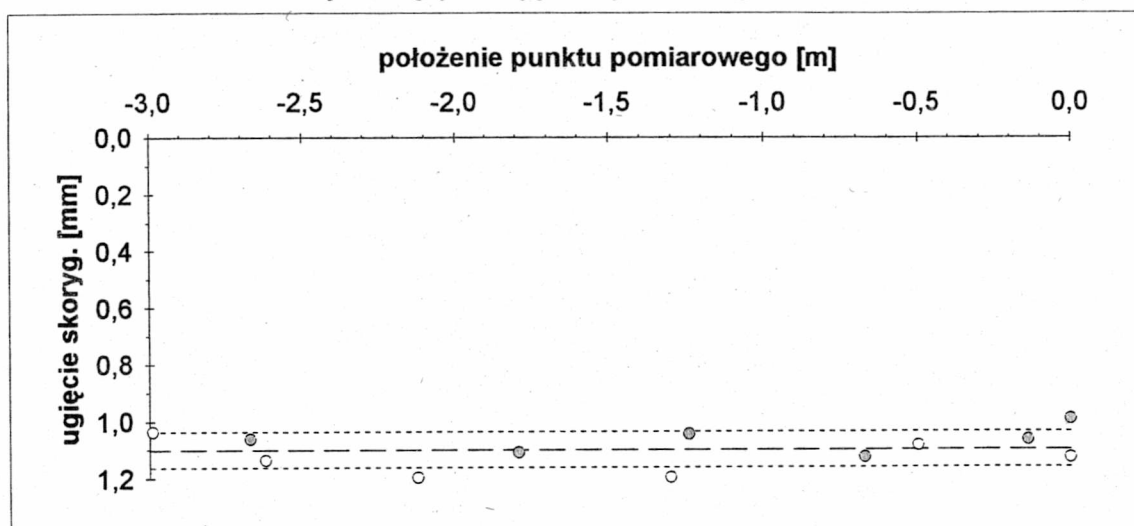
szyna: lewa

typ toru: z wkładkami gum.

wiek: 2 lata

Nr po- miaru i	typ tabo- ru	liczba pasa- żerów ipi	nacisk koła na szynę Pi [kN]	położenie punktu pomiar. lbi [cm]	odczyt wskaźń czujnika zegarowego		ugiecie zmierz- one yi [mm]	ugiecie skorygo- wane ysi [mm]
					przed odj. tram. y0i	po odj. tram. y1i		
-	-	-	[kN]	[cm]	[0,01 x mm]		[mm]	[mm]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
kierunek: do Kleciny								
1	105	10	22,32	0	798	748	1,00	0,995
3	105	6	21,63	-14	494	442	1,04	1,067
5	105	6	21,63	-67	600	545	1,10	1,129
7	105	6	21,63	-124	501	450	1,02	1,047
9	105	8	21,97	-179	797	742	1,10	1,111
11	105	4	21,29	-267	1000	949	1,02	1,064
kierunek: do centrum								
2	105	8	21,97	0	500	444	1,12	1,131
4	105	5	21,46	-130	1503	1445	1,16	1,200
6	105	6	21,63	-50	998	945	1,06	1,088
8	105	5	21,46	-212	500	442	1,16	1,200
10	105	5	21,46	-262	495	440	1,10	1,138
12	105	7	21,80	-299	1003	952	1,02	1,039
wart.śr.=			21,69	wart.śr.=			1,075	1,101
odch.st.=			0,27	odch.st.=			0,0560	0,0630
wsp.zm.=			1%	wsp.zm.=			0,052	0,057

Wykres ugięć skorygowanych na długości toru



linia przerywana rzadka - wartość średnia ugięć skorygowanych
linie przerywane gęste - odchylenia standardowe od wartości średniej

punkty szare - tor dla kierunku do Kleciny
punkty białe - tor dla kierunku do centrum

Mgr inż. Jacek Makuch



Zakład Kolei
Instytut Inżynierii Lądowej
Politechniki Wrocławskiej
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Raport wpłynął do Redakcji Wydawnictw I-14 Politechniki Wrocławskiej w grudniu 2002 r.

Lista odbiorców:

- | | |
|--------------------|----------|
| 1. Biblioteka I-14 | - 2 egz. |
| 2. Recenzenci | - 2 egz. |
| 3. Promotor | - 1 egz. |
| 4. Autor | - 2 egz. |
| 5. Zakład Kolei | - 1 egz. |

Razem - 8 egz.