



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA



OBCIĄŻENIE DRÓG PRZEZ POJAZDY CIĘŻKIE I ICH WPŁYW NA TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI PODATNYCH I PÓLSZTYWNYCH

*Loading of roads by heavy vehicles and their impact on fatigue life
of flexible and semi-rigid pavement structures*

Dawid Ryś

PRACA DOKTORSKA
PhD Thesis

Promotor: prof. dr hab. inż. Józef Judycki
Promotor pomocniczy: dr inż. Piotr Jaskuła

GDAŃSK 2015

POLITECHNIKA GDAŃSKA
KATEDRA INŻYNIERII DROGOWEJ
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Tel.: +48 58 347 13 47
Fax.: +48 58 347 10 95
e. mail: sekretariat.kid@wilis.pg.gda.pl
www.wilis.pg.gda.pl

Dziękuję Promotorom pracy
prof. dr hab. inż. Józefowi Judyckiemu oraz dr inż. Piotrowi Jaskule
za poświęcony czas, za wytyczenie kierunków badań, porady i wsparcie.

Dziękuję koleżankom i kolegom z Katedry Inżynierii Drogowej
za pomoc w realizacji badań.

Niniejszą pracę dedykuję Rodzinie.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	5
Streszczenie.....	7
Abstract.....	9
1. Wstęp.....	11
1.1. Wprowadzenie.....	11
1.2. Cel pracy	12
1.3. Zakres pracy.....	13
2. Studia literatury	15
2.1. Metody określania obciążenia ruchem do projektowania nawierzchni	15
2.1.1. Rys historyczny metod stosowanych w Polsce	15
2.1.2. Niemieckie katalogi nawierzchni drogowych RSTO.....	18
2.1.3. Katalog austriacki RVS 03.08.63.....	20
2.1.4. Metoda brytyjska	22
2.1.5. Metoda i katalog francuski.....	23
2.1.6. Metoda AASHTO 1993 (USA)	25
2.1.7. Przewodnik do mechnistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni MEPDG (USA).....	26
2.2. Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie	28
2.2.1. Metody pomiaru obciążenia wywieranego przez pojazdy ciężkie	28
2.2.2. Rozwój technologii ważenia pojazdów w ruchu	31
2.2.3. Rozkład obciążenia pojazdów i ich osi	32
2.2.4. Dynamiczne obciążenie pojazdów.....	33
2.2.5. Rozkład obciążeń od kół pojazdów na szerokości pasa ruchu	35
2.2.6. Maksymalne dopuszczalne obciążenia pojazdów i ich osi oraz ruch pojazdów przeciążonych	36
2.3. Wpływ pojazdów ciężkich na trwałość nawierzchni podatnych i półsztywnych	39
2.3.1. Skutki niszczącego oddziaływania pojazdów na nawierzchnie podatne i półsztywne	39
2.3.2. Równoważna oś standardowa i współczynniki równoważności obciążenia osi.....	41

2.3.3.	Empiryczne metody określania współczynników równoważności obciążenia osi	42
2.3.4.	Mechanistyczno-empiryczne metody określania współczynników równoważności obciążenia.....	46
2.3.5.	Metody obliczania reakcji nawierzchni wywołanej obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi	47
2.3.6.	Naprężenia kontaktowe i powierzchni styku opony z nawierzchnią ..	50
3.	Analiza danych pomiarowych z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu (WIM).	55
3.1.	Cel i zakres analiz	55
3.2.	Metodyka analizy	55
3.3.	Weryfikacja danych wejściowych	56
3.4.	Struktura ruchu ciężkiego.....	60
3.4.1.	Klasyfikacja pojazdów	60
3.4.2.	Struktura ruchu ciężkiego.....	63
3.4.3.	Udział poszczególnych typów osi pojazdów.....	65
3.4.4.	Średnia liczba osi przypadająca na pojazd	67
3.5.	Analiza średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów ciężkich	68
3.5.1.	Metodyka obliczeń	68
3.5.2.	Porównanie metod wyznaczania współczynników równoważności obciążenia pojazdów.....	69
3.5.3.	Analiza średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów obliczonych wg wzoru czwartej potęgi.	72
3.5.4.	Agresywność względna pojazdów.....	78
3.6.	Obciążenie pojazdów	79
3.6.1.	Matematyczny opis rozkładów masy całkowitej pojazdów lub rozkładów obciążenia osi pojazdów	79
3.6.2.	Rozkłady masy całkowitej pojazdów	81
3.6.3.	Rozkłady obciążenia osi pojazdów.....	85
3.6.4.	Średnie rozkłady obciążenia osi pojazdów dla dróg w Polsce.....	87
3.6.5.	Analiza błęd oszacowania średnich współczynników równoważności obciążenia osi na podstawie uśrednionych rozkładów obciążenia osi pojazdów	89
3.7.	Zmiany ruchu pojazdów ciężkich w ciągu roku, tygodnia i doby.....	92
3.7.1.	Zmiany ruchu ciężkiego w ciągu roku	92

3.7.2.	Zmiany obciążenia nawierzchni w ciągu roku.....	95
3.7.3.	Tygodniowy rozkład ruchu ciężkiego	100
3.7.4.	Dobowy rozkład ruchu ciężkiego	100
3.8.	Podsumowanie	101
4.	Analiza oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie podatne	105
4.1.	Cel i zakres analizy.....	105
4.2.	Założenia do obliczeń.....	105
4.2.1.	Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni.....	105
4.2.2.	Układ kół w pojazdach.....	107
4.2.3.	Naprężenie kontaktowe i powierzchnia styku opony i nawierzchni..	110
4.3.	Analizy obliczeniowe	113
4.3.1.	Trwałość zmęczeniowa nawierzchni.....	113
4.3.2.	Odształcenia w nawierzchni wywołane obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi	114
4.3.3.	Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana pojedynczym obciążeniem osi pojedynczych i wielokrotnych	123
4.3.4.	Współczynniki równoważności obciążenia osi.....	127
4.3.5.	Średnia jednostkowa szkoda zmęczeniowa i średnie współczynniki równoważności obciążenia osi	139
4.4.	Podsumowanie	142
5.	Wpływ pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni	145
5.1.	Cel i zakres analizy.....	145
5.2.	Problem ruchu pojazdów przeciążonych w Polsce	145
5.2.1.	Udział pojazdów przeciążonych w ruchu na podstawie danych ze stacji WIM.....	145
5.2.2.	Udział pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni	151
5.3.	Analiza wpływu pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia oraz na trwałość zmęczeniową nawierzchni.....	153
5.3.1.	Metodyka analizy i wskaźniki stosowane do oceny wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni	153
5.3.2.	Wpływ udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdu przy rozpatrywaniu każdej ze stacji WIM z osobna	157
5.3.3.	Wpływ udziału pojazdów przeciążonych i parametrów charakteryzujących rozkłady obciążenia osi na współczynniki	

równoważności obciążenia osi przy rozpatrywaniu wszystkich stacji WIM łącznie.....	162
5.3.4. Porównanie metody 1 i 2 analizy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdów	168
5.3.5. Przykład obliczeniowy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnej.....	170
5.4. Podsumowanie.....	171
6. Wnioski końcowe	175
Literatura.....	179

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

A	– powierzchnia styku opony i nawierzchni [m^2]
A_t	– agresywność względna oddziaływania pojazdu typu t na nawierzchnię [%]
a	– promień kołowego śladu styku opony i nawierzchni [m]
D	– (od ang. „Damage”) szkoda zmęczeniowa danej warstwy nawierzchni wywołana ruchem pojazdów ciężkich w określonym czasie [-]
D_p	– szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana pojazdami przeciążonymi [-]
D_{FC}	– całkowita szkoda zmęczeniowa nawierzchni przy wystąpieniu spękań zmęczeniowych na procentowej części FC całkowitej powierzchni pasa ruchu [-]
DFL	– (od ang. „Decrease of Fatigue Life”) wskaźnik zmniejszenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni na skutek ruchu pojazdów przeciążonych
d_j	– jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią o obciążeniu Q_j
d_{100}	– jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią standardową 100 kN
E	– moduł sztywności sprężystej warstwy nawierzchni [MPa]
F_j	– współczynnik równoważności obciążenia osi o danym obciążeniu Q_j [osi 100 kN]
F_k	– średni współczynnik równoważności obciążenia osi danego typu k [osi 100 kN/oś]
F_p	– średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów przeciążonych [osi 100 kN/pojazd]
F_{sr}	– średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów lub osi bez rozróżniania poszczególnych kategorii i typów [osi 100 kN/pojazd] lub [osi 100 kN/oś]
F_t	– średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów danego typu lub kategorii t [osi 100 kN/pojazd]
F_{UP}	– średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przy danym udziale pojazdów przeciążonych UP
F_v	– współczynnik równoważności obciążenia jednego pojazdu [osi 100 kN]
F_0	– średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów przy zerowej liczbie pojazdów przeciążonych
FC	– (od ang. „Fatigue Cracking”) procent spękanej powierzchni na całym pasie ruchu [%],
f_A	– średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki [osi/pojazd],
h_{AC}	– łączna grubość warstw asfaltowych [cm]
IFL	– (od ang. „Increase of Fatigue Life”) wskaźnik zwiększenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni w wyniku zmniejszenia udziału pojazdów przeciążonych w ruchu ciężkim
k	– typ osi w pojeździe
L	– średnia dobowo liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w danym okresie
MAF	– (od ang. „Monthly Adjustment Factor”) miesięczny współczynnik korygujący
N	– sumaryczna liczba wszystkich pojazdów ciężkich, o masie całkowitej powyżej 3,5 tony
N_p	– sumaryczna liczba pojazdów sklasyfikowanych jako przeciążone,
N_f	– trwałość zmęczeniowa nawierzchni czyli liczba powtarzalnych obciążeń potrzebna do osiągnięcia stanu zniszczenia danej warstwy nawierzchni
NT_f	– liczba pojazdów ciężkich, które wywołają stan zniszczenia danej warstwy nawierzchni
n_o	– liczba osi w pojeździe
n_t	– liczba pojazdów typu lub kategorii t, jaka przejechała w rozpatrywanym okresie czasu
p_j	– udział osi w danym przedziale obciążenia j [%]
Q_j	– obciążenie osi j pojazdu [kN]
Q_s	– obciążenie równoważnej osi standardowej [kN]
q	– naprężenie kontaktowe na styku opony i nawierzchni [kPa]
RIF	– (od ang. „Relative Increase of Load Equivalency Factor”) względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu
SDR	– średni dobowy ruch pojazdów ciężkich w danym okresie

- t – typ pojazdu; lub kategoria pojazdu
- UO_k – udział osi typu k [%]
- UP – udział pojazdów przeciążonych w ruchu ciężkim [%]
- UP_{sr} – średni, rzeczywisty udział pojazdów przeciążonych w ruchu ciężkim na danej stacji w danym okresie [%]
- UPD – udział szkody zmęczeniowej nawierzchni wywołanej pojazdami przeciążonymi [%]
- V_b – efektywna zawartość asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej [% objętościowo]
- V_a – efektywna zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej [% objętościowo]
- ε – odkształcenie sprężyste w modelu konstrukcji nawierzchni [μ strain]
- μ – wartość oczekiwana rozkładu obciążenia osi
- σ – naprężenie w modelu konstrukcji nawierzchni [MPa]; lub odchylenie standardowe rozkładu obciążenia osi
- γ – skośność (trzeci moment centralny) rozkładu obciążenia osi
- ν – współczynnik Poissona [-]

Streszczenie

Rozprawa doktorska dotyczy obciążenia dróg przez pojazdy ciężkie oraz wpływu tych pojazdów na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnych i półsztywnych. Na drogach poruszają się różne rodzaje pojazdów. Pojazdy te są obciążone w różny sposób i w różnym stopniu oddziałują na konstrukcję nawierzchni. Skutkiem obciążenia nawierzchni ruchem ciężkim jest stopniowe narastanie uszkodzeń nawierzchni, które prowadzi do wyczerpania trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni.

Studia literatury zawierają obszerny opis zagadnień związanych z ruchem ciężkim i oddziaływaniem pojazdów na nawierzchnie drogowe. Przedstawiono przegląd metod określania obciążenia ruchem do projektowania nawierzchni drogowych. Omówiono szereg zagadnień dotyczących obciążenia wywieranego na nawierzchnie przez pojazdy. Przedstawiono opis technologii ważenia pojazdów w ruchu. Dokonano przeglądu metod określania współczynników równoważności obciążenia osi oraz metod określania reakcji nawierzchni wywołanej obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi.

Rozpoznanie charakterystyki ruchu ciężkiego i analizę obciążenia nawierzchni drogowych ruchem ciężkim przeprowadzono na podstawie danych z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu (WIM). Dane obejmowały pomiary z 11 stacji w Polsce, na których okres pomiaru wynosił od roku do trzech lat. Łącznie przeanalizowano ponad 11 milionów pojazdów ciężkich. Zbadano strukturę i średni dobowy ruch pojazdów ciężkich. Przeprowadzono obliczenia i porównanie wyników średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów według czterech metod: wzoru czwartej potęgi, metody AASHTO (ang. „*American Association of State Highway and Transportation Officials*”), metody francuskiej i metody Politechniki Gdańskiej. Określono rozkłady masy całkowitej pojazdów oraz obciążenia osi pojazdów. Wyprowadzono modele statystyczne obciążenia osi pojazdów i wyznaczono średnie rozkłady obciążenia osi dla dróg w Polsce. Przeprowadzono analizę rocznych, tygodniowych i dobowych zmian ruchu ciężkiego.

W części pracy dotyczącej analizy oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie przeprowadzono obliczenia szkody zmęczeniowej nawierzchni i współczynników równoważności obciążenia osi pojazdów z zastosowaniem metody mechanistyczno-empirycznej. Przyjęto model nawierzchni podatnej i na jego podstawie obliczono odkształcenia i naprężenia w nawierzchni wywołane osiami pojedynczymi i wielokrotnymi o zmiennych obciążeniach. Do określenia trwałości zmęczeniowej nawierzchni zastosowano najnowsze kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z metody MEPDG (ang. „*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*”) z 2004 r. Przeprowadzono również porównanie metod określania współczynników równoważności obciążenia osi pojedynczych i wielokrotnych.

Ważnym elementem pracy jest ocena wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni. W celu przeprowadzenia tej oceny opracowano dwie metody analizy, na podstawie których wyznaczono zależności statystyczne pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych w ruchu a średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdów. Przedstawiono również przykład obliczeniowy wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnej.

W oparciu o przeprowadzone badania ruchu ciężkiego i analizy obliczeniowe wpływu pojazdów ciężkich na trwałość zmęczeniową nawierzchni stwierdzono, że:

1. Charakterystyka ruchu ciężkiego różni się na poszczególnych drogach, co przekłada się na zróżnicowanie we współczynnikach równoważności obciążenia pojazdów.
2. Ruch ciężki i współczynniki równoważności obciążenia pojazdów zmieniają się w czasie.
3. Pięcioosiowe ciągniki siodłowe z naczepą typu Cs+N 113 w największym stopniu przyczyniają się do powstawania uszkodzeń nawierzchni na drogach krajowych i autostradach w Polsce. Udział tych pojazdów w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni wynosi od 58% do 84%.
4. W metodzie mechanistyczno-empirycznej współczynniki równoważności obciążenia osi zależą od grubości i parametrów warstw konstrukcji nawierzchni oraz od rodzaju stosowanego kryterium zmęczeniowego.
5. Metody określania oddziaływania pojazdów na nawierzchnie pól sztywne nie są jeszcze dobrze poznane i dają rozbieżne wyniki.
6. Współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone ze wzoru czwartej potęgi, metody AASHTO oraz z metody francuskiej są niedoszacowane w porównaniu do współczynników równoważności obciążenia osi określonych z mechanistyczno-empirycznej analizy konstrukcji nawierzchni oraz określonych z metody Politechniki Gdańskiej.
7. Na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN, rzeczywiste obciążenia osi oraz średnie współczynniki równoważności obciążenia osi są wyższe niż na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN.
8. Zjawisko przeciążania pojazdów jest poważnym problemem w Polsce. Udział pojazdów przeciążonych na rozpatrywanych w pracy drogach wynosi od 14% do 23% i jednocześnie pojazdy przeciążone wywołują od 35% do 70% całkowitej szkody zmęczeniowej nawierzchni.
9. Wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% spowoduje spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni średnio o 55% i wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdów średnio od 100% do 160%.
10. W obliczeniach trwałości zmęczeniowej przeprowadzonych dla przykładowej nawierzchni podatnej wykazano, że zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 20% do 10% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji o 4 lata, a dalsze zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 10% do 0% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni o kolejne 6 lat.

Abstract

The doctoral dissertation concerns the analysis of loading of roads by heavy vehicles and their impact on pavement fatigue life. Different types of vehicles move on roads. The loads of vehicles and their damaging effects on pavement structures are different. In consequence of heavy traffic the pavement damages accumulate gradually, and it leads to pavement failure.

The literature review contains wide description of issues connected with heavy traffic and its effects on pavement structures. Different methods of traffic assessment for pavement design were reviewed. A number of issues related to the load applied by heavy vehicles to pavement were discussed. The technology of weigh in motion was described. The different methods of determination of load equivalency factor and determination of reaction of pavement structure caused by single and multiple axles loads were reviewed.

The analysis of the traffic characteristic and loading were conducted on the basis of the data from weigh in motion. The data include measurements from 11 stations in Poland, where the measurement period ranged from one to three years. The traffic structure and volume were analysed. The calculation of average load equivalency factors were conducted with use of four methods: fourth power equation, AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) method, French method and Gdansk University of Technology method and the comparison of this methods was conducted. The gross weight distributions and the axle load distributions were determined. The statistical models of axle load distributions and the average axle load distributions for roads in Poland were also determined. The annual, weekly and daily changes in heavy traffic were analysed.

In the section of the analysis of the impact of heavy vehicles on pavement structures the calculation of the pavement fatigue damage and the equivalent axle load factors were conducted. The mechanistic-empirical method was used for this calculations. The flexible pavement model was assumed and it was the base for calculation of strains and stresses caused in the pavement by single and multiple axles with various loads. To determine the pavement fatigue life the newest MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) 2004 criterion was applied. Different methods of determination of load equivalency factors for single and multiple axles were compared.

The assessment of the impact of overloaded vehicles on pavement fatigue life was an important part of the thesis. In this case two methods of analysis were developed and they were a base for the calculation of statistical relationship between the percentage of overloaded vehicles and the average load equivalency factor. The computational example of the impact of overloaded vehicles on pavement fatigue life was also presented.

The following conclusions were drawn on the basis of the traffic analysis and calculation of the impact of heavy vehicles on pavement fatigue life conducted in this research:

1. The heavy traffic characteristic differs on each roads, which results in differentiation in load equivalency factors.
2. The heavy traffic and the load equivalency factors are changing over time.
3. Five-axles trucks with semi-trailer type Cs+N 113 contribute to pavement distress to the greatest extent. The contribution of this vehicles in pavement failure ranges from 58% to 84%
4. In the mechanistic-empirical method the equivalent axle load factors depend on the thickness and mechanical parameters of pavement structure layers, and the type of used fatigue criterion.
5. The methods of determination of the effects of heavy vehicles on semi-rigid pavements are not well known and provide diverging results.
6. The equivalent axle load factors delivered from four power equation, AASHTO method and French method are underestimated in comparison with the equivalent axle load factors delivered from mechanistic-empirical pavement analysis and from method of Gdansk University of Technology.
7. The real axle loads and load equivalency factors are higher for roads with maximum legal axle load limit 115 kN than in roads with maximum legal axle load limit 100 kN.
8. The overloading phenomenon is a serious problem in Poland. The percentage of overloaded vehicles on the analyzed roads ranges from 14% to 23% and these vehicles cause from 35% to 70% of pavement fatigue damage.
9. Increase of the percentage of overloaded vehicles from 0% to 20% cause the decrease of pavement fatigue life in average by 55% and simultaneously increase of load equivalency factor in average from 100% to 160%.
10. It was proven in the calculation of fatigue life for the exemplary flexible pavement, that reduction of percentage of overloaded vehicles from 20% to 10% will cause the increase of pavement serviceability period by 4 years, further decrease of percentage of overloaded vehicles from 10% to 0% will cause the increase of pavement serviceability period by next 6 years

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

W Polsce w okresie ostatnich 10 lat (2004 - 2014) wybudowano ponad 2000 km nowych autostrad i dróg ekspresowych, przebudowano również wiele odcinków istniejących dróg. Społeczeństwo oczekuje, aby nawierzchnie drogowe jak najdłużej były w dobrym stanie technicznym i zapewniały bezpieczeństwo i komfort podróżnym. Stan techniczny nawierzchni zależy od jej trwałości i wieku, z kolei na trwałość nawierzchni wpływają warunki klimatyczne, jej konstrukcja i właściwości materiałów, z której została wykonana, a przede wszystkim obciążenie ruchem drogowym.

Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni, której analiza stanowi ważny element w niniejszej pracy, jest to sumaryczna liczba powtarzalnych obciążeń od osi pojazdów jaką może przenieść nawierzchnia do wystąpienia stanu krytycznego, określonego liczbą spękań zmęczeniowych, głębokością kolein lub nierównością podłużną. Obciążenia przekazywane na nawierzchnię od poszczególnych osi pojazdów są zmienne, dlatego do projektowania i analiz konstrukcji nawierzchni obciążenia te są przeliczane na liczbę obciążeń równoważną osią standardową za pomocą współczynników równoważności obciążenia. W zależności od tego, czy rozpatrywane jest oddziaływanie na nawierzchnie całych pojazdów, czy osi w pojazdach, stosuje się współczynniki równoważności odpowiednio pojazdowi lub osi.

W okresie ostatnich 25 lat ruch ciężki na drogach krajowych w Polsce wzrósł trzykrotnie. Istotnie zmieniła się również struktura ruchu ciężkiego, przy czym obecnie w transporcie drogowym najczęściej występującymi pojazdami są ciągniki siodłowe z naczepą, których dopuszczalna masa całkowita wynosi do 40 ton¹. Wzrosły również dopuszczalne obciążenia osi pojazdów, które wynoszą maksymalnie 115 kN. Zmieniły się rodzaje opon stosowane w pojazdach i wprowadzono opony typu super single w wyniku czego naprężenia kontaktowe na styku opony i nawierzchni są wyższe niż dawniej. Skutkiem tych zmian jest przyspieszenie procesu narastania uszkodzeń nawierzchni, dlatego właściwa ocena oddziaływania pojazdów na nawierzchnie jest podstawą do projektowania konstrukcji nawierzchni trwałych i zarazem ekonomicznych.

Można powiedzieć, że niszczące oddziaływanie pojazdów na nawierzchnie podatne w przybliżeniu rośnie wraz z obciążeniem osi pojazdów podniesionym do czwartej potęgi. Szczególnie istotny wpływ na trwałość nawierzchni mają zatem pojazdy najcięższe, wśród których znaczna część to pojazdy przeciążone. Wraz ze wzrostem ruchu ciężkiego zaczął nasilać się problem ruchu pojazdów

¹ W transporcie kombinowanym masa całkowita pojazdu może wynosić do 44 ton

przeciążonych. Jednym z elementów przeciwdziałania zjawisku przeciążania pojazdów są stacje preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu WIM (ang. „*Weigh in Motion*”). W ostatnich kilku latach nastąpił znaczący rozwój technologii ważenia pojazdów w ruchu a dane z tych stacji są wykorzystywane do badań obciążenia dróg przez pojazdy. Wyniki tych badań mają praktyczne zastosowanie do projektowania i analiz konstrukcji nawierzchni nowych i remontowanych, a także do zarządzania ruchem drogowym.

W okresie ostatnich lat w USA opracowano nową metodę mechanistyczno-empirycznego projektowania konstrukcji nawierzchni MEPDG (ang. „*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*”). Dzięki kryteriom zmęczeniowym rozwiniętym w nowej metodzie MEPDG możliwa jest bardziej dokładna niż dawniej ocena rzeczywistego oddziaływania pojazdów na nawierzchnie drogowe. Warto zaznaczyć, że zagadnienie obciążenia dróg przez pojazdy ciężkie i ich oddziaływanie na nawierzchnie od wielu lat jest aktualne i często poruszane w publikacjach naukowych.

Katedra Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej od wielu lat prowadzi badania nad oddziaływaniem pojazdów ciężkich na nawierzchnie drogowe. Badania te zostały zapoczątkowane przez prof. Józefa Judyckiego a ich wyniki zostały opublikowane w licznych pracach naukowych. W latach 2009 - 2012 realizowano program badawczy na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad pt.: „Weryfikacja i aktualizacja Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych” [78] w ramach którego między innymi opracowano nowe współczynniki przeliczeniowe pojazdów ciężkich na równoważne osie standardowe oraz udoskonalono metodę określania ruchu projektowego do wymiarowania nawierzchni podatnych i półsztywnych. Równoległe na Politechnice Wrocławskiej opracowano Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych [148] i podano w nim współczynniki przeliczeniowe odpowiednie dla nawierzchni sztywnych. Przeprowadzone w niniejszej pracy analizy oddziaływania pojazdów ciężkich oraz wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni nie dotyczą nawierzchni sztywnych.

1.2. Cel pracy

Głównym problemem naukowym stawianym w badaniach przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy jest ocena obciążenia pojazdów i ich oddziaływania na nawierzchnie podatne i półsztywne. Ocena ta została przeprowadzona poprzez realizację następujących celów pracy:

1. Rozpoznanie charakterystyki ruchu ciężkiego i analiza obciążenia nawierzchni drogowych ruchem ciężkim na podstawie danych ze stacji preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu.
2. Określenie i analiza współczynników równoważności obciążenia osi i pojazdów na podstawie metod dostępnych w literaturze oraz w oparciu o

analizę mechanistyczno-empiryczną konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.

3. Określenie zależności pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych w ruchu a współczynnikami równoważności obciążenia pojazdów.
4. Analiza oddziaływania pojazdów ciężkich i wpływ pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnych.

1.3. Zakres pracy

Praca doktorska składa się z sześciu rozdziałów:

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w omawiane w pracy zagadnienia, uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań oraz postawione cele badawcze i zakres pracy.

Rozdział 2 zawiera studia literatury dotyczące obciążenia dróg przez pojazdy ciężkie i ich wpływu na trwałość nawierzchni. Opisano metody określania obciążenia ruchem do projektowania nawierzchni stosowane w wybranych krajach europejskich i w USA. Przedstawiono studia dotyczące obciążenia pojazdów oraz technologii ciągłego ważenia pojazdów w ruchu. Opisano wpływ niszczącego oddziaływania pojazdów na trwałość nawierzchni podatnych i półsztywnych oraz podano metody określania współczynników równoważności obciążenia osi pojedynczych i wielokrotnych.

Rozdział 3 dotyczy analizy danych pomiarowych z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu. Przedstawiono w nim metodykę oraz wyniki przeprowadzonych analiz obciążenia dróg przez pojazdy ciężkie. Opisano strukturę ruchu ciężkiego oraz określono rozkłady masy całkowitej pojazdów i rozkłady obciążenia osi pojazdów. Zbudowano modele statystyczne opisujące rozkłady obciążenia osi pojazdów. Zamieszczono obliczenia i analizę średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów oraz porównano wybrane metody wyznaczania współczynników równoważności obciążenia pojazdów. Określono agresywność względną poszczególnych typów pojazdów. Przedstawiono analizę rocznych, tygodniowych i dobowych zmian w ruchu ciężkim.

Rozdział 4 dotyczy analizy oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie podatne. Analizę obliczeniową przeprowadzono na założonym modelu nawierzchni podatnej. Analizowano odkształcenia i naprężenia powstające w modelu nawierzchni na skutek obciążenia osi pojedynczych i wielokrotnych o zmiennym obciążeniu. Określono funkcję jednostkowej szkody zmęczeniowej nawierzchni i funkcję współczynników równoważności obciążenia osi w zależności od obciążenia osi. Na podstawie wyznaczonych funkcji oraz rozkładów obciążenia osi obliczono średnie współczynniki równoważności obciążenia osi pojazdów.

Rozdział 5 zawiera analizę obliczeniową wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość konstrukcji nawierzchni podatnych. Przedstawiono problem ruchu pojazdów przeciążonych oraz podano procentowy udział pojazdów przeciążonych w ruchu i ich udział w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni. Określono modele statystyczne na podstawie których analizowano wpływ udziału pojazdów przeciążonych w ruchu na współczynniki równoważności obciążenia pojazdów oraz na trwałość nawierzchni.

Rozdział 6 zawiera wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz oraz kierunki dalszych prac.

2. Studia literatury

2.1. Metody określania obciążenia ruchem do projektowania nawierzchni

2.1.1. Rys historyczny metod stosowanych w Polsce

Zarówno w Polsce, jak i na świecie do lat 60. XX wieku stosowano metody wymiarowania nawierzchni polegające na przyjęciu do obliczeń maksymalnego obciążenie od koła pojazdu, przekazywanego przez siłę skupioną, albo przez kołową lub eliptyczną powierzchnię o zadanym ciśnieniu kontaktowym [74], [89], [149], [150] lub w zależności od obciążenia wyrażonego w tonach brutto na dobę [119]. W latach 60. XX wieku opracowano metody projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych, w których ruch projektowy określony był poprzez liczbę pojazdów porównawczych, do których zalicza się m.in. metodę OSZD i polską metodę PJ-IBD [104]. Sposób określania ruchu projektowego wg metody PJ-IBD wprowadzony został do polskich przepisów w zarządzeniu Ministra Komunikacji z 1968 r. [173] i później w polskim Katalogu Jezdni Podatnych z roku 1983 [102]. Liczbę pojazdów rzeczywistych przeliczano na liczbę pojazdów porównawczych za pomocą wzoru:

$$\log N_{por} = 0,77 \cdot \frac{p_i D_i}{170} + \frac{p_i D_i}{170} \cdot \log N_i - 0,77 \quad (2.1)$$

gdzie:

N_{por} – liczba pojazdów porównawczych 80 kN odpowiadająca określonej liczbie N_i samochodów typu i o danym iloczynie $p_i D_i$,

$p_i D_i$ – iloczyn ciśnienia jednostkowego przekazywanego na powierzchnię jezdni i średnicy zastępczej śladu koła samochodu typu i , dla samochodu porównawczego iloczyn ten był równy 170,

N_i – liczba pojazdów o jednakowym iloczynie $p_i \cdot D_i$.

Do przeliczenia liczby pojazdów rzeczywistych na liczbę pojazdów porównawczych wykorzystywano odpowiednio przygotowany nomogram z naniesionymi charakterystykami typowych pojazdów ciężarowych najczęściej poruszających się w tym czasie po polskich drogach (np. Tarpan, Star, Jelcz). Przy projektowaniu nawierzchni uwzględniono współczynnik obliczeniowego pasa ruchu. Kategorię ruchu wyznaczano według liczby pojazdów porównawczych na dobę na pas obliczeniowy i wyróżniano 6 kategorii ruchu od R1 do R6. Liczba pojazdów porównawczych w najcięższej kategorii R6 wynosiła > 335 pojazdów porównawczych. W katalogu z 1983 r. wprowadzono modyfikację do metody PJ-IBD w postaci zmiany pojazdu porównawczego (z pojazdu o iloczynie $p \cdot D = 170$ na pojazd Jelcz 315 o iloczynie $p \cdot D = 200$).

W Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 1997 roku [142] wprowadzono wiele zmian w metodzie wyznaczania ruchu obliczeniowego względem katalogu z roku 1983 [102]. Najistotniejsze zmiany polegały na:

- wprowadzeniu klasyfikacji ruchu na podstawie liczby równoważnych osi standardowych 100 kN oraz rezygnacji z klasyfikacji ruchu na podstawie liczby pojazdów porównawczych,
- wprowadzeniu nowych kategorii ruchu,
- wprowadzeniu podziału ruchu ciężkiego na trzy kategorie pojazdów: samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe z przyczepami, autobusy,
- podaniu współczynników przeliczeniowych pojazdów ciężkich na osie obliczeniowe 100 kN.

Kategorię ruchu w katalogu z 1997 r. wyznaczało się na podstawie liczby równoważnych osi standardowych na dobę na pas, obliczonej według wzoru 2.2, dla średniego dobowego ruchu w dziesiątym roku po oddaniu drogi do eksploatacji lub na podstawie prognozowanego sumarycznego ruchu w całym okresie projektowym. Następnie na podstawie liczby osi obliczeniowych L ruch klasyfikuje się wg kategorii ruchu od KR1 (ruch najłżejszy) do KR6 (ruch najcięższy).

$$L = (N_1 \cdot r_1 + N_2 \cdot r_2 + N_3 \cdot r_3) \cdot f_1 \quad (2.2)$$

gdzie:

L – liczba równoważnych osi standardowych na dobę na pas obliczeniowy w dziesiątym roku po oddaniu drogi do eksploatacji,

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu,

N_1 – średni dobowy ruch samochodów ciężarowych bez przyczep w przekroju drogi, w dziesiątym roku po oddaniu drogi do eksploatacji lub sumaryczna liczba samochodów ciężarowych bez przyczep w całym okresie projektowym,

N_2 – j.w., lecz samochodów ciężarowych z przyczepami,

N_3 – j.w., lecz autobusów,

r_1, r_2, r_3 – współczynniki przeliczeniowe pojazdów na równoważne osie standardowe 100 kN.

Metodę określania ruchu projektowego przeniesiono do Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych z 2001 r. [144] oraz do Katalogu Wzmocnień i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 2001 r. [143]. Różnica polegała na możliwości wyznaczania ruchu projektowego dla równoważnych osi standardowych 100 kN i 115 kN, a w przypadku katalogu nawierzchni sztywnych również na innych wartościach współczynników przeliczeniowych.

W latach 2009-2013 w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej został opracowany nowy Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych I Półsztywnych [78], w którym wprowadzono wiele zmian w metodzie określania ruchu projektowego. Zmiany te zostały również wprowadzone w nowym Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych [148], który został opracowany na Politechnice Wrocławskiej. Uzasadnienie wprowadzonych zmian szerzej opisano w publikacjach [76], [77], [79], [127] a najistotniejsze z nich polegały na

- uaktualnieniu współczynników przeliczeniowych pojazdów na osie 100 kN, oraz uzależnieniu doboru współczynników przeliczeniowych ze względu na rodzaj drogi i dopuszczalne obciążenie osi,
- wprowadzeniu dodatkowych współczynników szerokości pasa ruchu oraz współczynników pochylenia niwelety drogi,
- wprowadzeniu nowej kategorii ruchu KR7 oraz modyfikacji zakresów kategorii KR5 i KR6,
- wydłużeniu okresu projektowego z 20 na 30 lat dla dróg ekspresowych i autostrad.

Zgodnie z katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 2013 r. ruch projektowy określa się na podstawie wzoru:

$$N_{100} = (N_C \cdot r_C + N_{C+P} \cdot r_{C+P} + N_A \cdot r_A) \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \quad (2.3)$$

gdzie:

N_{100} – liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w okresie projektowym przypadająca na pas obliczeniowy,

N_C , N_{C+P} , N_A – sumaryczna liczba pojazdów odpowiednio samochodów ciężarowych bez przyczepy, samochodów ciężarowych z przyczepą, autobusów w całym okresie projektowym,

r_C , r_{C+P} , r_A – współczynniki przeliczeniowe pojazdów na osie standardowe 100 kN (tablica 2.1.),

f_1 – współczynnik pasa obliczeniowego,

f_2 – współczynnik szerokości pasa,

f_3 – współczynnik pochylenia niwelety drogi.

Tablica 2.1. Współczynniki przeliczeniowe pojazdów na równoważne osie standardowe do projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych [78], [142]

Rodzaj pojazdu	Katalog 1997	Katalog 2013			
	Wszystkie drogi	Autostrady i drogi ekspresowe	Drogi krajowe	Pozostałe drogi o dopuszczalnym nacisku osi napędowej 115 kN	Pozostałe drogi o dopuszczalnym nacisku osi napędowej 100 kN
Samochody ciężarowe bez przyczep	0,109 ¹⁾	0,50	0,50	0,45	0,45
Samochody ciężarowe z przyczepami	1,245 ¹⁾ 1,940 ²⁾	1,95	1,80	1,70	1,60
Autobusy	0,594	1,25	1,20	1,15	1,05

1) gdy udział pojazdów o obciążeniu osi 115 kN wynosi do 8%

2) gdy udział pojazdów o obciążeniu osi 115 kN wynosi od 8% do 20%

2.1.2. Niemieckie katalogi nawierzchni drogowych RSTO

W katalogach niemieckich RSTO 86 z 1986 r. [116], RSTO 01 z 2001 r. [117] i RSTO 12 z 2012 r. [118] do projektowania uwzględnia się pojazdy ciężkie o masie powyżej 3,5 tony. W katalogu RSTO 86 z 1986 r. ruch klasyfikowany był na podstawie *miarodajnego liczbowego wskaźnika obciążenia ruchem* (VB). Wyszczególniono siedem kategorii ruchu (VI – ruch najłżejszy, V, IV, III, II, I i SV – ruch najcięższy). W nowszych wydaniach katalogu RSTO 01 i RSTO 12 ruch projektowy określano poprzez sumaryczną liczbę równoważnych osi standardowych o obciążeniu 100 kN (B), którą można obliczyć korzystając z pomiarów średniego dobowego ruchu (metoda 1) lub z danych z ważenia pojazdów w ruchu (metoda 2). Pozostawiono siedem kategorii ruchu lecz podział ruchu na kategorie dostosowano do obciążenia wyrażonego liczbą osi standardowych 100 kN.

Przy znanym średnim dobowym ruchu pojazdów ciężkich wzór na obliczenie równoważnej liczby osi standardowych 100 kN B wg przepisów RSTO 01 i RSTO 12 można zapisać w następujący sposób (metoda 1):

$$B = DTV^{SV} \cdot f_A \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_Z \cdot N \cdot 365 \quad (2.4)$$

gdzie:

B – ruch projektowy, liczba równoważnych osi standardowych 100 kN,

DTV^{SV} – średni dobowy ruch pojazdów ciężkich,

f_A – współczynnik liczby osi, czyli średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki, wartości f_A zestawiono w tablicy 2.2,

q_{Bm} – współczynnik przeliczeniowy uwzględniający średnie obciążenie osi; wartości q_{Bm} zestawiono w tablicy 2.2,

- f_1 – współczynnik liczby pasów ruchu, przyjmuje wartości między 1,0 dla pojedynczego pasa ruchu, a 0,8 dla 3 i więcej pasów ruchu w jednym kierunku,
- f_2 – współczynnik szerokości pasa ruchu, przyjmuje wartości od 1,0 (dla pasa o szerokości $\geq 3,75$ m) do 2,0 (dla pasa o szerokości $< 2,0$ m),
- f_3 – współczynnik pochylenia niwelety, przyjmuje wartości od 1,0 przy pochyleniu $< 2\%$ do 1,45 dla pochylenia $> 10\%$,
- f_z – współczynnik wzrostu ruchu ciężkiego,
- N – zakładany okres projektowy, najczęściej 30 lat.

Tablica 2.2. Zestawienie współczynników liczby osi f_A i współczynników przeliczeniowych q_{Bm} stosowanych w niemieckich katalogach RSTO 01 i RSTO 12

Rodzaj drogi	Współczynnik średniej liczby osi przypadającej na jeden pojazd f_A		Współczynnik przeliczeniowy osi rzeczywistych na osie standardowe q_{Bm}		Współczynnik przeliczeniowy pojazdu na osie standardowe $f_A \cdot q_{Bm}$	
	RSTO 01	RSTO 12	RSTO 01	RSTO 12	RSTO 01	RSTO 12
Autostrady	4,2	4,5	0,26	0,33	1,092	1,485
Drogi krajowe	3,7	4,0	0,2	0,25	0,740	1,000
Pozostałe drogi	3,1	3,3	0,18	0,23	0,558	0,759

Metoda określania ruchu projektowego B oraz współczynniki przeliczeniowe q_{Bm} są takie same zarówno dla nawierzchni podatnych, półsztywnych jak i sztywnych. Jak wynika z tablicy 2.2 współczynnik q_{Bm} uległ zwiększeniu średnio o 26%. Oznacza to, że w Niemczech w czasie 11 lat wzrosły obciążenia pojazdów. Zmieniła się również struktura ruchu na co wskazuje wzrost współczynnika f_A , który nastąpił w wyniku zwiększenia udziału w ruchu pojazdów o większej liczbie osi.

Jeżeli dostępne są dane z ważenia pojazdów w ruchu liczbę równoważnych osi standardowych 100 kN B oblicza się według wzoru (metoda 2):

$$B = 365 \cdot \sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{k=1}^K \left[DTA_{(i-1)k}^{(SV)} \left(\frac{L_k}{L_0} \right)^4 \right] \cdot f_{1i} \cdot f_{2i} \cdot (1 + p_i) \right\} \quad (2.5)$$

gdzie:

B – ruch projektowy, liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w okresie projektowym,

$DTA_{(i-1)k}^{(SV)}$ – średnia dobowo liczba osi pojazdów ciężkich w danej klasie obciążenia k w danym roku $i-1$,

L_k – średnie obciążenie osi w klasie obciążenia k ,

L_0 – obciążenie osi standardowej równe 100 kN,

- f_{1i} – współczynnik liczby pasów ruchu w danym roku i ,
- f_{2i} – współczynnik szerokości pasa ruchu w danym roku i ,
- p_i – procentowy wzrost ruchu w danym roku i ,
- N – zakładany okres projektowy,
- K – liczba klas obciążenia osi.

Do obliczenia równoważnej liczby osi standardowych na podstawie danych rzeczywistych obciążeniach osi stosuje się wzór czwartej potęgi. Należy zaznaczyć, że wykładnik potęgi $n=4$ stosuje się zarówno dla nawierzchni podatnych, półsztywnych jak i sztywnych. Warto zwrócić uwagę na fakt, że nie rozróżnia się oddziaływania osi wielokrotnych (podwójnych i potrójnych) i obliczenia w każdym przypadku przeprowadza się jak dla osi pojedynczych. Każdą oś traktuje się oddzielnie. W rezultacie ruch projektowy obliczony wg RSTO będzie wyższy niż ruch projektowy obliczony według wzoru czwartej potęgi z uwzględnieniem osi podwójnych i potrójnych, opisanego w dalszej części pracy w rozdziale 2.3.3.2.

2.1.3. Katalog austriacki RVS 03.08.63

Ruch projektowy według katalogu austriackiego RVS 03.08.63 z 2008 r. [124] klasyfikuje się według siedmiu kategorii ruchu: VI – ruch najłżejszy, V, IV, III, II, I i S – ruch najcięższy. Aby określić kategorię ruchu należy obliczyć liczbę równoważnych osi standardowych BNLW zgodnie ze wzorem:

$$BNLW = NLW_{dziennie} \cdot R \cdot V \cdot S \cdot 365 \cdot n \cdot z \quad (2.6)$$

gdzie:

- $BNLW$ – ruch projektowy, liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w okresie projektowym,
- $NLW_{dziennie}$ – dobowo liczbę równoważnych osi standardowych dla całego przekroju w chwili oddania drogi do ruchu,
- R – współczynnik podziału ruchu ciężkiego ze względu na kierunek ruchu (0,5 przy równomiernym podziale ruchu ciężkiego w obu kierunkach jazdy),
- V – współczynnik uwzględniający rozkład ruchu ciężkiego na większą liczbę pasów ruchu w danym kierunku ($V=1$ przy 1 lub 2 pasach ruchu, $V=0,9$ przy 3 i więcej pasach ruchu w danym kierunku),
- S – zmniejszający współczynnik uwzględniający rozkład śladu kół w obrębie pasa ruchu, przyjmuje wartości od 0,7 (dla pasa o szerokości $\geq 4,0$ m) do 1,0 (dla pasa o szerokości $< 3,0$ m)
- n – okres projektowy (najczęściej 20 lat dla nawierzchni asfaltowych lub z kostki brukowej, 30 lat dla nawierzchni z betonu cementowego),
- z – współczynnik wzrostu ruchu w kolejnych latach.

Dobową liczbę równoważnych osi standardowych $NLW_{dzienne}$ oblicza się w zależności od znajomości struktury rodzajowej pojazdów:

a) gdy znany jest średni dobowy ruch poszczególnych kategorii pojazdów:

$$NLW_{dzienne} = \sum_{i=1}^K JDTV_i \cdot \ddot{A}_i \quad (2.7)$$

gdzie:

\ddot{A}_i – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu ciężkiego i-tej kategorii,

$JDTV_i$ – średni dobowy ruch i-tej kategorii pojazdów w roku,

K – liczba kategorii pojazdów.

b) gdy nie jest znany podział ruchu na poszczególne kategorie pojazdów:

$$NLW_{dzienne} = JDTV_{całkowite} \cdot \ddot{A}_{JDTV} \quad (2.8)$$

gdzie:

\ddot{A}_{JDTV} – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu ciężkiego,

$JDTV_{całkowite}$ – średni dobowy ruch pojazdów ciężkich w roku.

Tablica 2.3. Współczynniki równoważności obciążenia pojazdów stosowane w katalogu austriackim RVS 03.08.63

Kategoria pojazdu	\ddot{A}_i (znana jest struktura ruchu)	\ddot{A}_{JDTV} (brak danych dotyczących struktury ruchu)	
		Autostrady	Pozostałe drogi
Samochód ciężarowy bez przyczepy	0,7	1,0	0,9
Samochód ciężarowy z przyczepą lub ciągnik siodłowy z naczepą	1,2		
Autokar / Autobus	0,6		
Autobus miejski (transport publiczny)	0,8		
Autobus miejski przegubowy	1,4		

Można zauważyć, że w RVS 03.08.63 stosowany jest bardzo podobny podział na kategorie pojazdów, jak w polskim katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.

W przypadku nawierzchni betonowych stosowane są inne przedziały liczby równoważnych osi standardowych w poszczególnych kategoriach ruchu, przy

czym współczynniki równoważności obciążenia pojazdu są takie same jak w przypadku nawierzchni podatnych.

2.1.4. Metoda brytyjska

Ruch projektowy określany według brytyjskich przepisów projektowania nawierzchni [34] wyrażony jest za pomocą sumarycznej liczby równoważnych osi standardowych 80 kN (T). Nie wprowadzono kategorii ruchu, a grubość konstrukcji nawierzchni dobiera się na podstawie nomogramów. Ruch projektowy T oblicza się według wzoru:

$$T = Y \cdot P \cdot 365 \cdot \sum_{i=1}^K F_i \cdot G_i \cdot W_i \quad (2.9)$$









gdzie:

- T – ruch projektowy, liczba równoważnych osi standardowych 80 kN w okresie projektowym,
- Y – okres projektowy,
- P – procent pojazdów ciężkich na najbardziej obciążonym pasie drogi,
- F_i – średni dobowy ruch pojazdów i -tej kategorii w pierwszym roku okresu eksploatacji nawierzchni,
- G_i – wskaźnik wzrostu ruchu i -tej kategorii pojazdów,
- W_i – współczynnik równoważności obciążenia pojazdu (ang. *wear factor - współczynnik zużycia nawierzchni*) i -tej kategorii pojazdu,
- K – liczba kategorii pojazdów,

Brytyjskie przepisy HD24/06 [34] klasyfikują pojazdy według trzech kategorii (PSV – pojazd użytku publicznego, OGV1 – pojazdy do przewozu towarów lekkich, OGV2 – pojazdy do przewozu towarów ciężkich). Dodatkowo w obrębie tych kategorii wyszczególnionych zostało osiem klas pojazdów. Warto zwrócić uwagę na fakt, że brytyjski podział pojazdów na kategorie jest bardzo podobny do podziału stosowanego w Polsce, kategoria OGV1 odpowiadałaby polskiej kategorii samochodów ciężarowych bez przyczep, OGV2 – kategorii samochodów ciężarowych z przyczepami, PSV – autobusom. Różnica polega na przypisaniu czteroosiowego pojazdu ciężarowego bez przyczepy do kategorii OGV2.

Współczynniki równoważności obciążenia pojazdów W (ang. *wear factor - współczynnik zużycia*) zostały wyznaczone dla każdej klasy pojazdu i podano je w dwóch wariantach: dla projektowania dróg nowych (W_N) oraz utrzymania dróg istniejących (W_M). Ponieważ współczynniki W wyrażają obciążenie równoważną osią standardową 80 kN, aby umożliwić porównanie ze współczynnikami równoważności obciążenia pojazdów stosowanymi w innych krajach, przeliczono je w niniejszej pracy na równoważne obciążenie osią standardową 100 kN. Do przeliczenia zastosowano wzór czwartej potęgi. Współczynniki W podane oryginalnie w opracowaniu dla osi obliczeniowej 80 kN oraz po przeliczeniu dla osi obliczeniowej 100 kN zestawiono w tablicy 2.4.

Tablica 2.4. Współczynniki równoważności obciążenia pojazdu wg przepisów brytyjskich HD24/06

Kategoria pojazdu	Typ pojazdu	Współczynniki równoważności obciążenia pojazdu (współczynniki zużycia nawierzchni)					
		Oś standardowa 80 kN (według oryginału)			Oś standardowa 100 kN (po przeliczeniu ze wzoru czwartej potęgi)		
		W_M drogi istniejące	W_N drogi nowe	Średnia z WIM	W_M drogi istniejące	W_N drogi nowe	Średnia z WIM
PSV		2,6	3,6	1,97	1,1	1,5	0,81
OGV1		0,4	0,6	0,28	0,2	0,2	0,11
		2,3	3,4	1,72	0,9	1,4	0,70
OGV2		1,7	2,5	1,24	0,7	1,0	0,51
		3,0	4,6	2,28	1,2	1,9	0,93
		1,7	2,5	1,24	0,7	1,0	0,51
		2,9	4,4	2,18	1,2	1,8	0,89
		3,7	5,6	2,79	1,5	2,3	1,14
OGV1+PSV		0,6	1,0	0,48	0,48	0,4	0,20
OGV2		3,0	4,4	2,22	2,22	1,8	0,91

Do wyznaczenia współczynników równoważności obciążenia pojazdów W wykorzystano dane z ważenia pojazdów w ruchu (WIM) prowadzonego na kilku drogach w Wielkiej Brytanii. Na podstawie rzeczywistych rozkładów obciążenia osi pojazdów obliczono średnie współczynniki równoważności obciążenia dla każdej z grup pojazdów stosując wzór czwartej potęgi. Następnie średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów przemnożono przez współczynniki bezpieczeństwa: 1,35 dla dróg istniejących oraz 2 dla dróg nowych. Brytyjczycy argumentują zastosowanie takich współczynników bezpieczeństwa przede wszystkim możliwością wzrostu ciężarów pojazdów w przyszłości (w Wielkiej Brytanii zaleca się projektowanie nawierzchni na 40 lat!) [8].

2.1.5. Metoda i katalog francuski

Zgodnie z katalogiem francuskim [18] konstrukcje nawierzchni drogowych wymiaruje się w zależności od kategorii ruchu, którą określa się na podstawie sumarycznej liczby równoważnych osi standardowych NE 130 kN w całym okresie eksploatacji nawierzchni. Liczbę osi standardowych oblicza się według wzoru (2.10).

$$NE = TC \cdot CAM \quad (2.10)$$

gdzie:

NE – ruch projektowy, liczba równoważnych osi standardowych 130 kN w okresie projektowym,

TC – sumaryczna liczba pojazdów o masie powyżej 3,5 tony w całym okresie projektowym,

CAM – (fr. *Coefficient d'Aggressivité Moyenne du trafic - współczynnik skumulowany agresywności ruchu pojazdów*), współczynnik przeliczeniowy pojazdów na równoważne osie standardowe 130 kN dobierany w zależności od:

- średniego dobowego ruchu pojazdów ciężkich w roku oddania nawierzchni do eksploatacji,
- rodzaju konstrukcji nawierzchni i typu projektowanej warstwy.

Współczynniki CAM dobiera się według tablicy 2.5.

Tablica 2.5. Współczynniki równoważności obciążenia pojazdu wg katalogu i metody francuskiej [18], [25]

Obciążenie nawierzchni ruchem	Współczynnik równoważności obciążenia pojazdu CAM				
	CAM	0,4	0,5	0,7	0,8
Drogi o małym ruchu do 150 poj./dobę/pas	Kategoria ruchu	T5	T4	T3-	T3+
	CAM	0,8	1	1,3	
Drogi o średnim i wysokim ruchu ponad 150 poj./dobę/pas	Rodzaj warstwy lub nawierzchni	Warstwy bitumiczne nawierzchni kompozytowych lub odwróconych	Nawierzchnie asfaltowe na pełną głębokość o grubości ponad 20 cm	Warstwy z materiałów związanych spoiwem hydraulicznym oraz z betonu cementowego	
		Nawierzchnie w których grubość warstw bitumicznych przekracza 20cm	Warstwy niezwiązane oraz podłoże gruntowe		

W francuskiej normie NF P98-082 [101] podano metodę obliczania współczynników równoważności obciążenia osi A (fr. „*Aggressivité d'un essieu*” - *agresywność osi*), którą później zamieszczono w instrukcji [25], na podstawie której opracowano katalog francuski i współczynniki CAM [18]. Do obliczenia współczynników CAM należy dysponować rozkładem obciążenia osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych. Według metody tej współczynnik równoważności obciążenia osi wyznacza się z następującego wzoru (2.11).

$$A = K \left(\frac{P_c}{P_0} \right)^\alpha \quad (2.11)$$

gdzie:

- A – (fr. „Agressivité d'un essieu” – agresywność osi) – współczynnik równoważności obciążenia osi,
 P_c – obciążenie rzeczywiste jednej osi, w przypadku osi podwójnych i potrójnych do wzoru podstawia się obciążenia każdej z osi składowych,
 P_0 – obciążenie osi standardowej (we Francji równe 130 kN),
 K – współczynnik zależny od układu osi w pojeździe, (tablica 2.6),
 α – współczynnik zależny od typu konstrukcji nawierzchni (tablica 2.6).

Tablica 2.6. Współczynniki K i α dobierane w francuskiej metodzie obliczania współczynników równoważności obciążenia osi [18], [25], [101]

	Wartość współczynnika α	Wartość współczynnika K		
		Osie pojedyncze	Osie podwójne	Osie potrójne
Nawierzchnie podatne nowe remontowane	$\alpha=5$ $\alpha=5$	K=1 K=1	K=0,75 K=1	K=1,1 K=1
Nawierzchnie półsztywne nowe remontowane	$\alpha=12$ $\alpha=12$	K=1 K=1	K=12 K=1	K=113 K=1
Nawierzchnie sztywne betonowe o ciągłym zbrojeniu	$\alpha=12$ $\alpha=12$	K=1 K=1	K=12 K=1,3	K=113 K=6,5

2.1.6. Metoda AASHTO 1993 (USA)

Metoda określania ruchu projektowego według przewodnika AASHTO 1993 [2] oparta jest o wyniki testu drogowego AASHO [156], szerzej opisanego w punkcie 2.3.2.

W metodzie AASHTO 1993 nie stosuje się podziału ruchu projektowego na kategorie, a konstrukcję nawierzchni projektuje się na podstawie nomogramów. Ruch projektowy oblicza się poprzez przeliczenie ruchu rzeczywistego (ang. "mixed traffic") według następującej procedury:

- 1) Określenie aktualnego średniego ruchu dobowego dla każdego typu pojazdów, wyrażonego liczbą pojazdów danego typu.
- 2) Wyznaczenie współczynników wzrostu ruchu i okresu projektowego (w metodzie AASHTO 1993 przyjmuje się wzrost o stały procent p w kolejnych latach).
- 3) Ustalenie rozkładu obciążenia rzeczywistych osi, na ogół z gradacją co 2 000 lbs (907 kg), z podziałem na osie podwójne i potrójne.
- 4) Ustalenie dla każdego przedziału obciążenia osi współczynników równoważności obciążenia osi $EALF$, w zależności od typu konstrukcji

nawierzchni (podatna lub sztywna). Współczynniki *EALF* dla nawierzchni podatnych oblicza się na podstawie wzoru 2.20, podanego w rozdziale 2.3.3.1.

- 5) Obliczenie wartości współczynnika *ESAL* (w_{18}) zgodnie ze wzorem 2.12,
- 6) Przemnożeniu współczynnika *ESAL* przez współczynniki kierunkowego rozkładu ruchu D_D i współczynnika rozkładu ruchu na pasy D_L .

Ruch projektowy, czyli równoważne obciążenie osiami pojedynczą w okresie projektowym (ang. *Equivalent Single-Axle Load ESAL*) oblicza się zgodnie ze wzorem:

$$ESAL = \sum_{g=1}^3 \sum_{j=1}^m F_{j,g} n_{j,g} \quad (2.12)$$

gdzie:

ESAL – ang. *Equivalent Single-Axle Load* – równoważne obciążenie osiami pojedynczą w okresie projektowym (ruch projektowy), oznaczane również jako w_{18} ,

$F_{j,g}$ – współczynnik równoważności obciążenia osi (*EALF*) dla *j*-tego przedziału obciążenia osi w danej grupie osi *g*,

$n_{j,g}$ – liczba osi z *j*-tym przedziałem obciążenia w grupie osi *g* w czasie całego okresu projektowego,

g – grupa osi, liczba osi w zespole (*g*=1 – oś pojedyncza, *g*=2 – oś podwójna, *g*=3 – oś potrójna),

j – numer przedziału obciążenia osi,

m – liczba przedziałów obciążenia osi.

W praktyce najczęściej rozkłady obciążenia osi na danej drodze nie są dostępne, dlatego w metodzie stosuje się współczynniki obciążenia pojazdów *TF* (ang. „Truck Factor”) lub współczynniki równoważności obciążenia osi *LEF* (ang. „Load Equivalency Factor”) [133]. Współczynniki *TF* i *LEF* określa się dla rozkładów obciążenia osi z pomiarów na podobnych drogach w danym stanie. Współczynnik w_{18} oblicza się na podstawie *TF* lub *LEF* oraz danych o liczbie poszczególnych typów pojazdów lub osi, rozkładzie kierunkowym ruchu i wzroście ruchu w kolejnych latach eksploatacji drogi, zgodnie z załącznikiem D metody AASHTO 1993 [2].

2.1.7. Przewodnik do mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni MEPDG (USA)

W metodzie MEPDG z roku 2004 (od ang. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide – przewodnik do mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni, w literaturze spotykany jest również skrót AASHTO 2004) [46] wprowadzono zupełnie nowe podejście do określania obciążenia ruchem

drogowym w celu projektowania konstrukcji nawierzchni. Odstąpiono od charakteryzowania ruchu za pomocą liczby równoważnych osi standardowych. Idea metody MEPDG polega na tym, że szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana rzeczywistymi osiami o zmiennych obciążeniach liczona jest w kolejnych godzinach i w kolejnych miesiącach w trakcie całego okresu eksploatacji nawierzchni. Metoda taka umożliwi bardzo wnikliwe i dokładne opisanie narastania uszkodzeń nawierzchni. W metodzie MEPDG wykorzystuje się szereg różnych parametrów określających ruch drogowy i jego oddziaływanie na nawierzchnię drogową. Do ich określenia potrzebne są dane z pomiarów, które ze względu na stopień szczegółowości można podzielić na trzy poziomy:

- Poziom 1 – wyniki z pomiarów przeprowadzonych na danej drodze,
- Poziom 2 – uśrednione wyniki pomiarów określone dla danego regionu,
- Poziom 3 – uśrednione wyniki określone z pomiarów w USA (inaczej wartości domyślne).

Parametrami charakteryzującymi ruch do projektowania nawierzchni wg metody MEPDG są:

- Średni dobowy ruch pojazdów ciężkich w roku oddania nawierzchni do eksploatacji.
- Procentowy udział poszczególnych kategorii pojazdów ciężkich w ruchu *TTC* (ang. „*Truck Traffic Classification*”),
- Rozkład obciążenia osi (ang. „*Axle Load Distribution Factors*”), określany osobno dla poszczególnych kategorii pojazdów i rodzajów osi (pojedyncze, podwójne, potrójne i czterokrotne) w kolejnych miesiącach w roku.
- Współczynnik korygujący z uwagi na zmiany ruchu w ciągu roku *MAF* (ang. „*Monthly Adjustment Factor*”).
- Współczynniki rozkładu godzinowego ruchu pojazdów ciężkich *HDF* (ang. „*Hourly Distribution Factors*”).
- Współczynniki procentowego wzrostu ruchu w kolejnych latach eksploatacji nawierzchni.
- Współczynnik kierunkowego podziału ruchu pojazdów (*DDF* ang. „*Direction Distribution Factor*”), który domyślnie przyjmuje wartości średnie w przedziale 0,5 do 0,6 i może się zmieniać w zależności od klasy pojazdu. Współczynnik *DDF* nie dotyczy udziału pojazdów na poszczególnych pasach.
- Udział procentowy pojazdów na pasie projektowym (*LDF* ang. „*Lane Distribution Factor*”), którego wartości domyślne wynoszą:
 - $LDF = 1,00$, gdy występuje pojedynczy pas ruchu,
 - $LDF = 0,90$, gdy występują dwa pasy ruchu w każdym kierunku,
 - $LDF = 0,60$, gdy występują trzy pasy ruchu w każdym kierunku,
 - $LDF = 0,45$, gdy występują cztery pasy ruchu w każdym kierunku.Udział procentowy pojazdów na pasie projektowym dotyczy pojazdów jadących w tym samym kierunku jazdy.

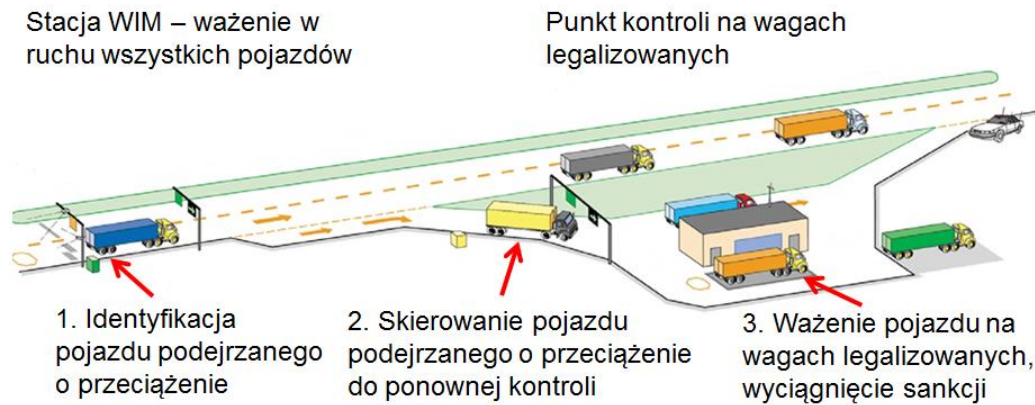
- Ciśnienie kontaktowe na styku opony i nawierzchni, którego wartość *domyślna* wynosi 120 psi, co jest równe 827 kPa.
- Odstęp między osiami (51,6 in = 131 cm dla osi podwójnych i 49,2 in = 125 cm dla osi potrójnych), rozstaw kół na szerokości osi (8,5 ft = 259 cm) i rozstaw opon w kole bliźniaczym (12 in = 30,5 cm).
- Prędkość pojazdów ciężkich, domyślnie przyjmowana na poziomie 60 mph = 96 km/h.
- Szerokość pasów ruchu (domyślnie 12 ft = 3,66 m).

Większość parametrów można określić wyłącznie na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu. Domyślne parametry (poziom 3) zostały określone na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w różnych regionach USA. Dostosowanie parametrów ruchowych do warunków regionalnych (poziom 2) było tematem wielu publikacji, m.in. [21], [39], [90], [130], [138], [175], [176]. Specyfika ruchu istotnie wpływa na stopień i tempo przyrostu uszkodzeń nawierzchni, a także na to, które uszkodzenia będą dominującymi. Wyprowadzenie parametrów do metody MEPDG dla polskiej stacji DK46 dla roku 2011 zostało przeprowadzone przez Zofkę i wsp. [176]. Z publikacji tej wynika, że ruch na polskiej drodze DK46 istotnie różni się od ruchu w USA. Ciekawym spostrzeżeniem jest, że w porównaniu do domyślnych parametrów ruchu ustalonych na podstawie danych z dróg w USA, ruch określony dla polskiej stacji wywołuje większe deformacje trwałe nawierzchni.

2.2. Obciążenie dróg przez pojazdy ciężkie

2.2.1. Metody pomiaru obciążenia wywieranego przez pojazdy ciężkie

Pomiar obciążenia pojazdów można przeprowadzić na dwa sposoby, poprzez ważenie na wagach statycznych losowo wybranych pojazdów z ruchu lub poprzez ważenie pojazdów w ruchu (WIM od ang. „*weigh in motion*”). Ważenie pojazdów w ruchu ma tę przewagę nad ważeniem na wagach statycznych, że pojazdy nie muszą zatrzymywać się do kontroli, dzięki czemu kontrolowany jest cały potok ruchu pojazdów, a na podstawie zgromadzonych danych można przeprowadzić analizy ruchu oparte o ciągły pomiar. Z drugiej strony błąd popełniany podczas ważenia pojazdów w ruchu jest większy niż podczas ważenia na wagach statycznych, dlatego ważenie pojazdów w ruchu ma na celu preselekcję pojazdów i skierowaniu do dokładnej kontroli pojazdów podejrzanych o przeciążenie. Ideę systemu preselekcji wagowej pokazano na rysunku 2.1.

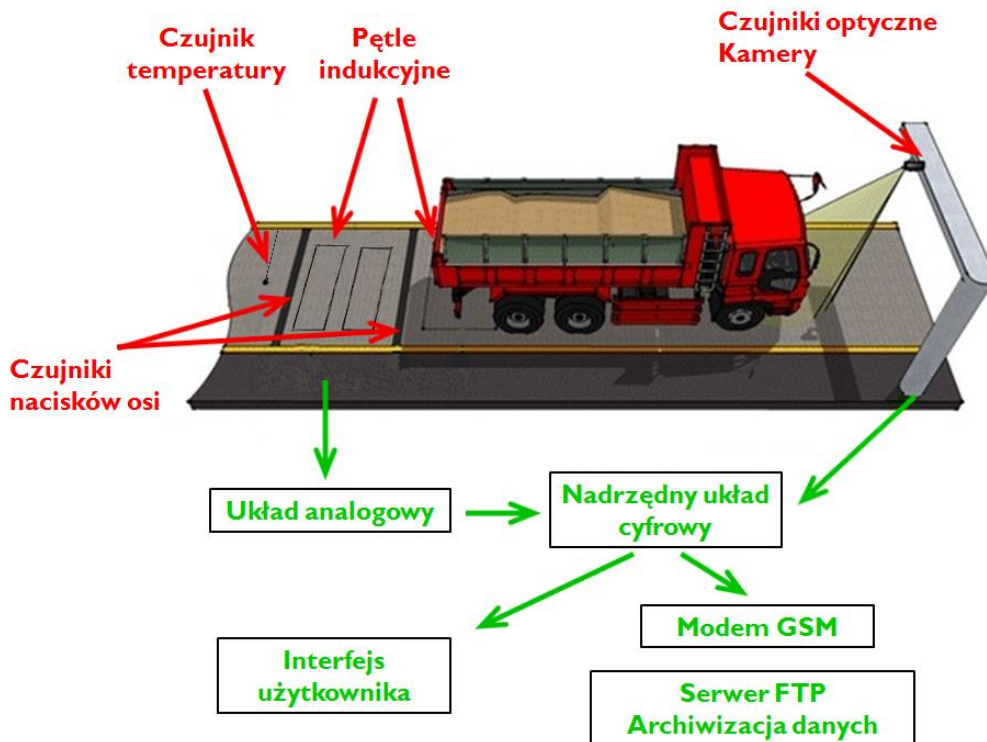


Rysunek 2.1. Schemat działania systemu preselekcji wagowej [195]

W niniejszej pracy bazowano na danych pomiarowych otrzymanych z 11 stacji WIM. Stacje zostały wykonane i są konserwowane przez firmy Cat-Traffic (stacje DK11 i A2) oraz Neurosoft (S7, DK1, DK4, DK7, DK22, DK46, DK75, DK79 i DK94). Każda z firm wypracowała własny system instalacji stacji WIM. Rozpatrywane stacje WIM składają się z następujących elementów (por. rysunek 2.2):

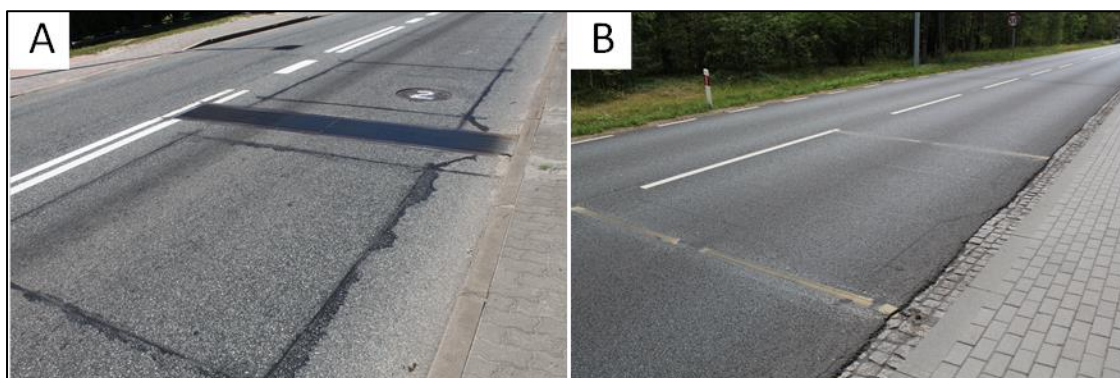
- Czujniki nacisków osi - czujniki montowane w kierunku poprzecznym drogi na całej szerokości pasa ruchu, które ze względu na konstrukcję dzielą się na dwa rodzaje:
 - a) Płyta zginana (Kruger PAT DAW 100[®]) – stosowana w systemie firmy Cat-Traffic - płyta stalowa, zginana pod wpływem przejeżdżającego koła. Na podstawie odczytu z czujników tensometrycznych obliczana jest siła nacisku wywierana przez każde z kół.
 - b) Czujniki piezoelektryczne (Kistler Lineas Quartz Sensor[®]) – stosowane w systemie firmy Neurosoft - czujniki te wykorzystują zjawisko indukowania się ładunku elektrycznego (w tym przypadku w kwarcu) pod wpływem działania naprężenia.
- Pętle indukcyjne - w wyniku oddziaływania pojazdu przejeżdżającego przez pole magnetyczne indukowane przez pętlę możliwa jest jego detekcja, pomiar prędkości, długości i rejestracja tzw. profilu magnetycznego pojazdu, na podstawie którego rozpoznawany jest typ pojazdu.
- Czujnik temperatury - instalowany jest w celu zbierania danych potrzebnych do autokalibracji wag.
- Kamery wizyjne i czujniki optyczne - służą do podglądu stacji a w połączeniu z układem cyfrowym i odpowiednim oprogramowaniem, również do identyfikacji i rozpoznania pojazdów. Mogą być również instalowane dalmierze laserowe, które służą do określania gabarytów pojazdu.
- Układy elektroniczne (analogowe i cyfrowe) służą do przetwarzania danych przesyłanych z wszystkich czujników i przekazywaniu ich w czasie

rzeczywistym do użytkowników stacji (funkcjonariusze Policji lub Inspekcji Transportu Drogowego, administracja drogowa).



Rysunek 2.2. Schemat poglądowy budowy i działania stacji WIM [192]

Na rysunku 2.3 zamieszczono zdjęcia przedstawiające dwa rodzaje czujników nacisków osi zainstalowanych na stacjach WIM oraz na rysunku 2.4 przedstawiono zdjęcie z ogólnym widokiem jednej ze stacji ważenia pojazdów w ruchu w ciągu drogi DK46 w Grodźcu.



Rysunek 2.3. Czujniki nacisków osi i pętle indukcyjne a) system Cat-Traffic, stacja DK11 w Bieczynie b) system Neurosoft, stacja DK46 w Grodźcu c) widok ogólny stacji DK46 w Grodźcu [źródło własne]



Rysunek 2.4. Widok ogólny stacji ważenia pojazdów w ruchu na DK46 w Grodźcu
[źródło własne]

2.2.2. Rozwój technologii ważenia pojazdów w ruchu

Technologia ważenia pojazdów w ruchu WIM na świecie zaczęła rozwijać się już w latach 50 XX wieku. Jakkolwiek pierwsze stacje były wyposażone w czujniki nacisków osi to nie istniały odpowiednie instrumenty do przetwarzania i archiwizowania surowych danych. Ze względów technologicznych błąd pomiaru był dość duży. Intensywny rozwój technologii WIM zapoczątkowany został w latach 80. XX w. i trwa do teraz. W tym czasie poprawiła się dokładność, wiarygodność i trwałości czujników nacisków osi, zaczęto też stosować moduły rozpoznania pojazdów wykorzystujące pętle indukcyjne, kamery oraz urządzenia do cyfrowej analizy zdjęć pojazdów. W początkowej fazie rozwoju technologia WIM stosowana była do zbierania informacji statystycznych. Wraz z jej udoskonalaniem stacje WIM zaczęto wykorzystywać do preselekcji wagowej, a w niektórych krajach (np. w Czechach) stacje WIM stosowane są do automatycznego nakładania mandatów na kierowców, którzy przeciążają swoje pojazdy [88].

Badania nad technologią WIM w Europie były początkowo prowadzone w narodowych ośrodkach badawczych, w Wielkiej Brytanii przez TRL [10], [45], we Francji przez LCPC [93], w Niemczech przez BAST. Od lat 90. Komisja Europejska wspiera rozwój technologii WIM poprzez zlecenie międzynarodowych programów badawczych, do których należą:

- Akcja COST 323 (1992 – 1998) [27], [67], [180],
- Program badawczy WAVE (1996 – 1999) [68],
- Program badawczy Top-Trial (2000 – 2002) [191],
- Projekt REMOVE (2000 – 2006) [120], [186],

- Projekt FiWi (2007 – 2009) [182].

W programach tych rozpatrywano różne zagadnienia związane z budową i działaniem stacji WIM, sposobem lokalizowania stacji, instalacją i kalibracją urządzeń, oraz ich utrzymaniem. W ramach programów REMOVE i FiWi rozpatrywano również problemy legislacyjne i administracyjne związane z ruchem pojazdów przeciążonych. Oprócz wymienionych programów badawczych prowadzonych w Europie warto przytoczyć projekty prowadzone w USA. Obszerny opis doświadczeń USA znaleźć można m.in. w podręczniku [94]. Innym ważnym amerykańskim dokumentem określającym standardy lokalizowania i kalibracji stacji WIM jest norma ASTM E1318-94 [6]. Obecnie w wielu ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są prace badawcze mające na celu poprawę dokładności pomiaru na stacjach WIM i umożliwienie automatycznego nakładania mandatów w oparciu wyłącznie o wskazania ze stacji WIM [36], [66], [186].

W Polsce do drugiej połowy lat 90. technologia WIM nie rozwijała się wcale. Wraz z intensywnym rozwojem transportu samochodowego po 1990 r. narastał problem przeciążania pojazdów. Pierwszą stację do preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu wykonano w miejscowości Siedlec na DK2 (obecnie DK92) w 1997 r. Obecnie w Polsce jest kilkadziesiąt stacji WIM zlokalizowanych na różnych drogach krajowych i wojewódzkich oraz na drogach miejskich. Badania nad technologią WIM są prowadzone w Akademii Górniczo-Hutniczej, a ich efektem jest rozprawa doktorska autorstwa Piotra Burnosa z 2009 r. [14] oraz publikacje [15], [16], [17], które dotyczą budowy, oceny dokładności i autokalibracji systemów WIM. W roku 2010 odbyła się konferencja tematyczna poświęcona rozwojowi technologii WIM w Polsce pod tytułem "Inteligentny System Preselekcji Wagowej Pojazdów" [187], na której zaprezentowano m.in. osiągnięcia polskich firm w zakresie realizacji stacji WIM oraz udoskonalania modułów rozpoznania pojazdów i poprawy dokładności pomiaru. Obecnie w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów prowadzone są prace nad wprowadzeniem w polskich warunkach stacji WIM przeznaczonych do legalizowanej kontroli pojazdów. Pozytywne rezultaty badań zostały zaprezentowane w 2013 roku na konferencji w Kielcach pt.: "Identyfikacja i ważenie pojazdów przeciążonych" [185]. Badania nad wykorzystaniem danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu do analizy obciążenia dróg są prowadzone na Politechnice Wrocławskiej [152], [153], [154], [168], [169], w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów [95], [176] oraz na Politechnice Gdańskiej [77], [127]. Dane z ważenia pojazdów w ruchu znajdują coraz szersze zastosowanie, również do tworzenia systemów zarządzania i utrzymania nawierzchni drogowych [177], [178].

2.2.3. Rozkład obciążenia pojazdów i ich osi

Na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu możliwe jest wykonanie rozkładów masy całkowitej pojazdów oraz rozkładów nacisków osi. Od strony projektowania i analizy konstrukcji nawierzchni większe znaczenie mają rozkłady obciążenia osi, ponieważ wykorzystuje się je przy określeniu średnich

współczynników równoważności obciążenia pojazdu lub osi, a także są wykorzystywane w metodzie projektowej MEPDG [46]. Rozkłady masy całkowitej pojazdów i obciążenia ich osi są ważne nie tylko ze względu na zastosowanie do projektowania nawierzchni drogowych lecz również mają zastosowanie do projektowania i analizy różnych konstrukcji inżynierskich infrastruktury drogowej, takich jak obiekty mostowe, mury oporowe, przepusty itp. Rozkłady obciążenia osi można wyrazić w sposób dyskretny poprzez obliczenie procentowego udziału liczby osi w kolejnych przedziałach obciążenia. Na podstawie rozkładu dyskretnego można określić matematyczny model, wyrażony jako równanie regresji dystrybuanty lub jako funkcja rozkładu prawdopodobieństwa.

Opis rozkładu obciążenia osi za pomocą modelu regresji dystrybuanty był przedmiotem badań Kima i wsp. [86] oraz Wu [171]. Częściej spotykaną w literaturze metodą opisu matematycznego rozkładu obciążenia osi lub masy całkowitej jest funkcja rozkładu prawdopodobieństwa. W Polsce modelowaniem funkcji rozkładu prawdopodobieństwa obciążenia osi zajmował się Wardęga, co było tematem publikacji [169] oraz elementem rozprawy doktorskiej [170]. Wardęga zaproponował, aby rozkład obciążenia osi był opisany w zależności od umiejscowienia osi w pojeździe i rodzaju pojazdu funkcją rozkładu normalnego lub funkcją rozkładu wykładniczego, lub funkcją rozkładu gamma. Funkcję rozkładu wykładniczego lub rozkładu gamma przyjęto dla rozkładów jednomodalnych, niesymetrycznych lewostronnych, dla pozostałych rozkładów przyjęto funkcję rozkładu normalnego.

Mohammadi i Shah [97] sugerowali, że najwłaściwszym modelem teoretycznym rozkładu masy całkowitej byłoby połączenie rozkładu beta i logonormalnego, nie rozwinęli jednak takiego modelu. Tim i wsp. [159] określili metodę modelowania rozkładu obciążenia osi za pomocą dwóch rozkładów logonormalnych. Haider i Harichandran [48], [49], [50], [51], [52] rozwinęli modele złożone z dwóch rozkładów normalnych lub z rozkładu normalnego i logonormalnego, oraz wyprowadzili równania na cztery momenty centralne złożonych rozkładów dwumodalnych. Według wszystkich wymienionych badaczy złożone rozkłady dwumodalne wystarczająco dobrze opisują rozkład obciążenia osi lub masy całkowitej pojazdów.

2.2.4. Dynamiczne obciążenie pojazdów

Podczas ruchu pojazdu obserwuje się odchylenia nacisków osi od nacisku statycznego, co jest spowodowane nierównościami nawierzchni. Pomiarem dynamicznych nacisków osi zajmowali m.in. Cebon i Winkler [20]. Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa nacisków osi zmierzonych podczas ruchu pojazdu przedstawiono na rysunku 2.5. Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Glilespie i wsp. [43] wartość oczekiwana rozkładu prawdopodobieństwa

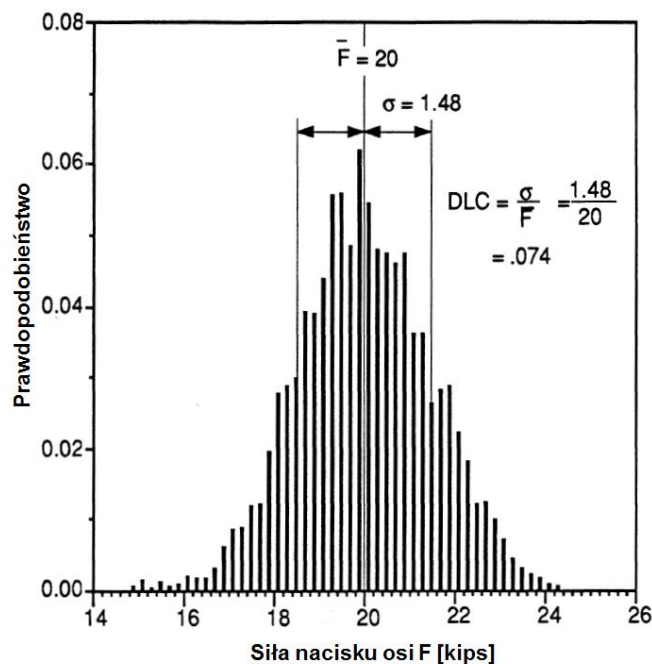
przeważnie pokrywa się z naciskiem statycznym osi. Współczynnik obciążenia dynamicznego DLC (ang. „*Dynamic Load Coefficient*”) jest miarą charakteryzującą rozkład prawdopodobieństwa dynamicznych nacisków osi i jest opisany wzorem (2.13).

$$DLC = \frac{\sigma}{\bar{F}} \quad (2.13)$$

gdzie:

σ - odchylenie standardowe siły nacisku osi.

\bar{F} - średnia wartość siły nacisku osi w przybliżeniu równa naciskowi statycznemu.



Rysunek 2.5. Przykładowy rozkład prawdopodobieństwa nacisku osi pojedynczej (zawieszenie klasyczne, prędkość pojazdu 90 km/h, przeciętna równość nawierzchni) [43]

Na wartość współczynnika DLC wpływ mają prędkość pojazdu, równość nawierzchni, charakterystyka zawieszenia i obciążenie osi. Sweatman badał wpływ równości nawierzchni i prędkości pojazdów na współczynnik DLC przy różnych systemach zawieszenia pojazdów [96], [146]. Z badań tych wynika, że współczynnik DLC rośnie wraz ze wzrostem prędkości, co jest również potwierdzone badaniami Gillespie i wsp. [43]. W raporcie FHWA [96] przedstawiono i porównano ze sobą różne modele matematyczne zawieszenia pojazdów ciężkich. Z analizy wynika, że parametry zawieszenia takie jak sztywność i zdolność tłumienia drgań istotnie wpływają na wskaźnik DLC. Wykazano również, że wskaźnik DLC jest proporcjonalny do współczynnika IRI opisującego równość nawierzchni. Podobną analizę i spostrzeżenia przedstawili w swojej publikacji Shi i Cai [136].

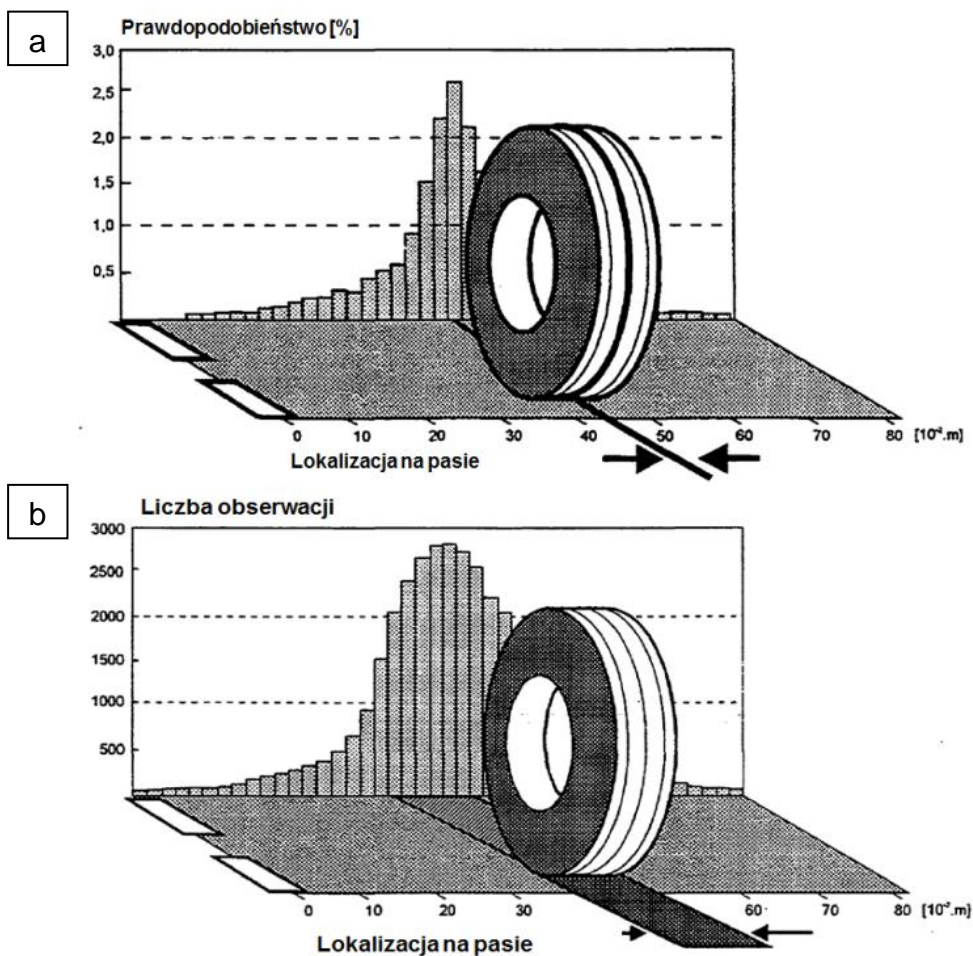
Gillespie i wsp. [43] badali wpływ oddziaływań dynamicznych pojazdów na trwałość nawierzchni drogowych. W badaniach przeprowadzono m.in. analizę wpływu rodzaju zawieszenia na trwałość nawierzchni podatnych, z której wynika, że pojazdy wyposażone w zawieszenie klasyczne (z resorami piórowymi) wywołują większą szkodę zmęczeniową nawierzchni wyrażoną spękaniem zmęczeniowymi niż pojazdy wyposażone w zawieszenie pneumatyczne. W przypadku deformacji trwałych wpływ rodzaju zawieszenia i obciążeń dynamicznych z nim związanych ma pomijalnie mały wpływ. Wpływ rodzaju zawieszenia był również przedmiotem analiz prowadzonych w ramach projektu DIVINE [37], zgodnie z którymi nawierzchnie obciążone ruchem pojazdów wyposażonych w zawieszenia klasyczne ulegają uszkodzeniom w czasie o 15% krótszym niż nawierzchnie obciążone pojazdami wyposażonymi w zawieszenia pneumatyczne.

2.2.5. Rozkład obciążeń od kół pojazdów na szerokości pasa ruchu

Blab i wsp. [12], [13] przeprowadzili pomiary poprzecznego rozkładu obciążenia, które polegały na automatycznym rejestrowaniu lokalizacji na szerokości pasa ruchu przejazdów kół. Przykład wyników pomiarowych pokazano na rysunku 2.6. Elementem badań było wykonanie analizy regresji wpływu parametrów takich jak szerokość pasa, głębokość koleiny i prędkość pojazdów na rozkład obciążeń od kół pojazdów ciężkich na szerokości pasa. Wnioski z przeprowadzonych analiz są następujące:

- a) W sytuacji, gdy koleina nie występuje lub jej głębokość jest niewielka (< 10 mm) szerokość pasa ruchu jest czynnikiem najbardziej wpływającym na rozkład poprzeczny obciążeń. Wraz ze zmniejszaniem się szerokości pasa ruchu obciążenia bardziej koncentrują się.
- b) Większe prędkości pojazdów prowadzą do koncentracji rozkładu poprzecznego obciążeń.
- c) Wraz ze wzrostem głębokości koleiny wzrasta efekt skanalizowania ruchu. Na drogach z koleiną o głębokości ponad 15 mm szerokość pasa ruchu przestaje wpływać na rozkład poprzeczny obciążeń.

Poprzeczny rozkład obciążenia jest uwzględniony przy obliczaniu szkody zmęczeniowej w metodzie MEPDG [46]. Na podstawie przyjętego dla zadanej szerokości pasa ruchu normalnego rozkładu obciążenia poprzecznego kół, wyznacza się pięć lokalizacji ścieżki koła (o równym prawdopodobieństwie wystąpienia) i następnie obliczana jest szkoda zmęczeniowa nawierzchni w jednym punkcie, wypadającym w centralnej ścieżce koła.



Rysunek 2.6. Częstość występowania obciążenia od kół pojazdów ciężkich na pasie ruchu w wariancie pomiaru a) ścieżki koła (przypadającej w środku śladu koła oraz b) w pełnym śladzie koła [13]

2.2.6. Maksymalne dopuszczalne obciążenia pojazdów i ich osi oraz ruch pojazdów przeciążonych

Maksymalne dopuszczalne obciążenie pojazdów i ich osi określone są prawem w celu ochrony infrastruktury drogowej oraz w celu zapewnienia bezpieczeństwa ruchu. Dopuszczalne obciążenia mogą mieć różne wartości zależnie od decyzji rządu w danym państwie. Według raportu ELPAG [1] wartości maksymalnego dopuszczalnego obciążenia osi pojedynczej w wybranych państwach wynoszą od 80 kN do 130 kN. W Unii Europejskiej ustalono na mocy dyrektywy [38], że w ruchu międzynarodowym dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej, napędowej pojazdu może wynosić 115 kN. Oprócz tego każdy z krajów członkowskich dla ruchu krajowego może ustalić indywidualnie dopuszczalne obciążenia osi. W Polsce dopuszczalne obciążenia osi pojazdów zmieniały się, co zostało opisane m.in. w publikacjach [75], [124], [147], [151]. Obecnie zgodnie z Ustawą o drogach publicznych [163] oraz rozporządzeniami ministra transportu [121], [122],[123] po najważniejszych drogach (autostrady, drogi międzynarodowe)

mogą poruszać się pojazdy o obciążeniu osi napędowej do 115 kN, po wybranych, ważnych drogach krajowych i wojewódzkich pojazdy o obciążeniu osi do 100 kN, a na pozostałych drogach pojazdy o obciążeniu osi do 80 kN.

Pewna część kierowców i firm przewozowych nie podporządkowuje się przepisom i przeładowuje swoje pojazdy. Przyczyn przeciążania pojazdów może być kilka, do najistotniejszych należą zwiększenie zysku poprzez zminimalizowanie kosztu transportu towaru lub brak świadomości o popełnianiu wykroczenia.

Zjawisko przeciążania pojazdów i jego wpływ na trwałość nawierzchni oraz na koszty utrzymania dróg było tematem wielu publikacji, w tym [69], [97], [98], [105], [130]. Wynika z nich, że pojazdy przeciążone istotnie skracają okres trwałości nawierzchni. W porównaniu z prawidłowo obciążonymi pojazdami, pojazdy przeciążone w ruchu występują rzadziej, ale ich potencjał do wywoływania uszkodzeń w nawierzchni jest znacznie wyższy. Szybsze narastanie uszkodzeń nawierzchni wywołane ruchem pojazdów przeciążonych powoduje zwiększenie kosztów utrzymania i zwiększenie częstotliwości napraw. Według Paisa i wsp. [105] koszt utrzymania drogi przeliczony dla jednego pojazdu przeciążonego jest większy o 100% niż ten sam koszt obliczony dla pojazdu obciążanego prawidłowo.

Najprostszą statystyką opisującą zjawisko przeciążania pojazdów jest udział pojazdów przeciążonych w ruchu. Ze względu na sposób przeciążenia pojazdu można wyróżnić:

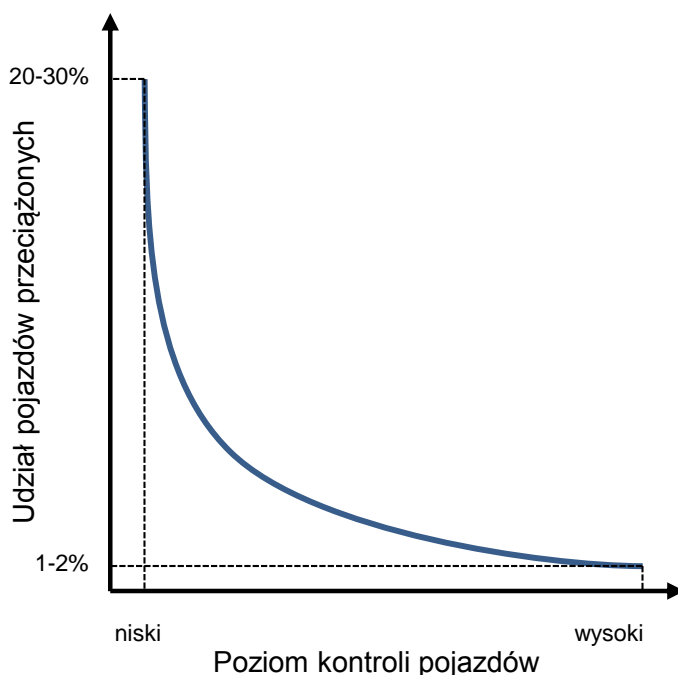
- udział pojazdów przekraczających dopuszczalną masę pojazdu,
- udział pojazdów przekraczających dopuszczalne obciążenia osi,
- udział pojazdów przeciążonych - przekraczających dopuszczalną masę lub dopuszczalne obciążenie osi składowych.

Należy dodać, że w pojeździe przeciążonym nie zawsze jest jednocześnie przekroczona masa dopuszczalna i dopuszczalne obciążenie osi. Według publikacji [98], [100], [175] w niektórych krajach jak np. Chiny, Filipiny czy Indie udział pojazdów przeciążonych może osiągać ekstremalnie wysoki poziom 80%, ale przeważnie w krajach rozwiniętych i rozwijających się udział pojazdów przeciążonych zawiera się w przedziale 10-30%. Niemniej jednak w przypadku niektórych klas pojazdów, jak np. pięcio- lub sześćo-osiowe ciągniki siodłowe z naczepą, udział ten może być wyższy i wynosić ok 40% [97], [105]. Na trwałość zmęczeniową nawierzchni wpływa nie tylko udział pojazdów przeciążonych, ale również rozkład obciążenia pojazdów (masy całkowitej lub nacisków osi) w zakresie przekraczającym dopuszczalne wartości. Zgodnie z Zhao i wsp. [175] udział pojazdów przeciążonych jest silnie skorelowany z rozkładem obciążenia osi.

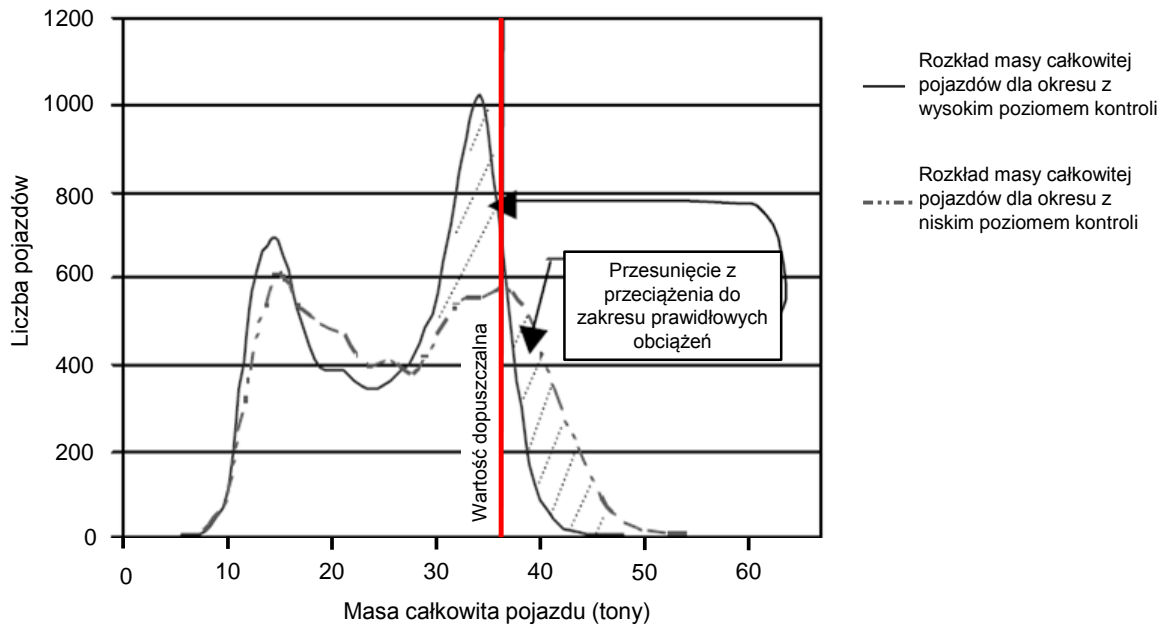
Ruch pojazdów przeciążonych powoduje również szybsze narastanie uszkodzeń mostów. Zgodnie z publikacją Jacoba i Labry [65], przekroczenie masy całkowitej pojazdu o 15% może powodować aż 2-krotne zwiększenie szkody zmęczeniowej

mostu. Przeciążanie pojazdów również negatywnie wpływa na bezpieczeństwo ruchu ze względu na dłuższą odległość zatrzymania przy hamowaniu awaryjnym oraz ze względu na kiepski stan techniczny pojazdów często przeciążonych [161].

Udział pojazdów przeciążonych może być zredukowany przez regularną kontrolę pojazdów i nakładanie kar na kierujących pojazdami przeciążonymi. Jednym z narzędzi pozwalającym zredukować liczbę pojazdów przeciążonych jest system preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu (WIM). Taylor i wsp. [155] oraz Stephens i wsp. [141] prowadzili badania nad wpływem intensywności kontroli pojazdów na udział pojazdów przeciążonych, z których wynika, że stała kontrola pojazdów może obniżyć udział pojazdów przeciążonych z ok 25% do ok 1% (por. rysunek 2.7). Z drugiej strony stała, długotrwała kontrola pojazdów powoduje przesunięcie ładunków przewożonych przez pojazdy przeciążone na pojazdy obciążone prawidłowo w górnych przedziałach obciążenia, co zostało zobrazowane na rysunku 2.8. Niemniej jednak zgodnie z badaniami Stephensa i wsp. [141] ładunek przewieziony przez większą liczbę pojazdów obciążonych prawidłowo wywoła mniejszą szkodę zmęczeniową nawierzchni niż ten sam ładunek przewieziony przez mniejszą liczbę pojazdów przeciążonych.



Rysunek 2.7. Wpływ poziomu kontroli na udział pojazdów przeciążonych [155]



Rysunek 2.8. Schemat zmiany rozkładu obciążenia osi lub masy całkowitej pojazdów na skutek zwiększenia kontroli i spadku udziału pojazdów przeciążonych w ruchu [141]

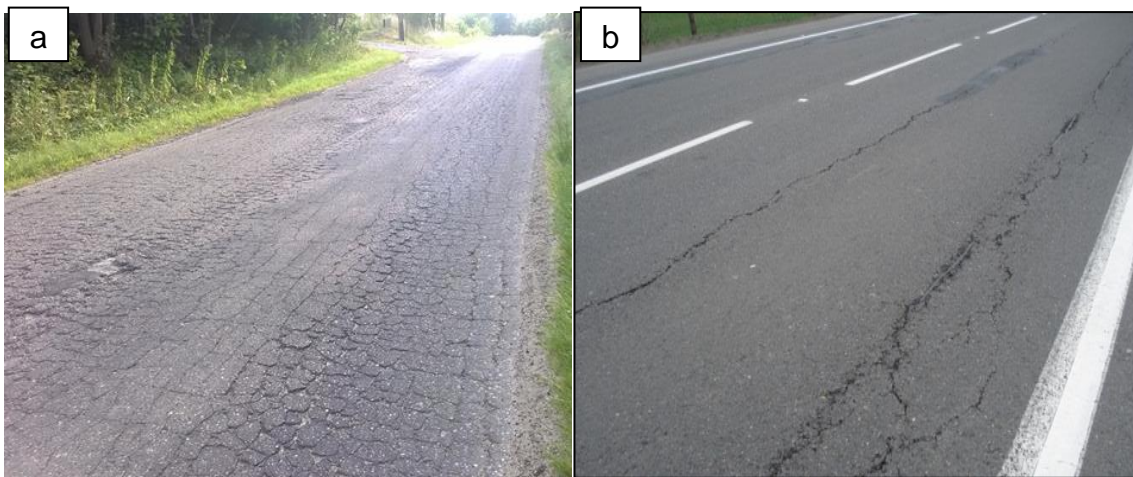
2.3. Wpływ pojazdów ciężkich na trwałość nawierzchni podatnych i półsztywnych

2.3.1. Skutki niszczącego oddziaływania pojazdów na nawierzchnie podatne i półsztywne

Skutkiem ruchu pojazdów ciężkich jest stopniowe narastanie uszkodzeń nawierzchni. Do typowych uszkodzeń nawierzchni podatnych wywołanych przez ruch ciężki zalicza się:

- spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych z dołu do góry oraz z góry na dół,
- deformacje trwałe podłoża gruntowego, niezwiązanych warstw konstrukcji nawierzchni oraz warstw asfaltowych,
- spękania zmęczeniowe podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym w przypadku nawierzchni półsztywnych.
- utrata równości podłużnej nawierzchni,

Należy dodać, że skutkiem oddziaływania pojazdów jest również stopniowa utrata nośności nawierzchni, czyli spadek modułów sprężystości warstw asfaltowych. Na rysunkach 2.9-2.10 przedstawiono przykłady uszkodzeń nawierzchni, wywołanych oddziaływaniem pojazdów ciężkich.



Rysunek 2.9. Spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych: (a) z dołu do góry i (b) z góry na dół [archiwum katedry]



Rysunek 2.10. Trwałe deformacje nawierzchni (koleiny) [archiwum katedry]

Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad prowadzi coroczną ocenę stanu technicznego nawierzchni - SOSN [183]. Z oceny przeprowadzonej w 2012 r. [115] wynika, że spośród łącznej długości 18,5 tys. km dróg krajowych 13,5% odcinków dróg jest w stanie złym, wymagającym natychmiastowego remontu a 23,8% jest w stanie niezadawalającym, wymagającym planowania remontu w najbliższym czasie. Z raportu wynika również, że przy przyjęciu podziału na poszczególne rodzaje uszkodzeń nawierzchni, długość odcinków znajdująca się w stanie niezadawalającym lub złym wynosi:

- 10,5% ze względu na intensywne spękania,
- 6,9% ze względu na duże nierówności podłużne ,
- 16,9% ze względu na zbyt głębokie koleiny.

Należy dodać, że drogi krajowe są najważniejszymi drogami w Polsce, a ich stan w porównaniu z pozostałymi drogami (wojewódzkimi, powiatowymi i gminnymi) jest dużo lepszy.

2.3.2. Równoważna oś standardowa i współczynniki równoważności obciążenia osi

Obciążenie drogi wywołane ruchem pojazdów o zmiennych naciskach osi można przeliczyć na obciążenie równoważne, wyrażone liczbą równoważnych osi standardowych. Do przeliczenia osi o zmiennym obciążeniu na obciążenie wyrażone liczbą równoważnych osi standardowych stosuje się współczynniki równoważności obciążenia osi. Historia powstania koncepcji równoważnej osi standardowej i współczynników równoważności obciążenia osi została obszernie opisana w publikacjach [19], [33], [74], [81]. Pojęcia równoważnej osi standardowej i współczynników równoważności obciążenia osi zostało po raz pierwszy wprowadzone w USA przez organizację AASHO, jako jedno z osiągnięć testu drogowego AASHO. Obszerne studia literatury dotyczące współczynników równoważności obciążenia osi zostały podane m.in. w raportach badawczych [81], [84], [174].

Współczynnik równoważności obciążenia osi (ang. *Equivalent Axle Load Factor* – EALF) definiowany jest w następujący sposób:

$$F_j = \frac{W_{ts}}{W_{tj}} \quad (2.14)$$

gdzie:

- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi (EALF) dla obciążenia osi Q_j ,
- W_{ts} – łączna liczba przyłożonych obciążeń osią standardową o obciążeniu Q_s (w Polsce $Q_s=100$ kN) na końcu danego okresu t ,
- W_{tj} – łączna liczba przyłożonych obciążeń osią o danym obciążeniu Q_j na końcu danego okresu t .

Jeżeli założy się, że nawierzchnia na końcu okresu t wyczerpie swoją trwałość zmęczeniową, którą wyraża się liczbą powtarzalnych obciążeń N_f , to równanie (2.14) można przedstawić w następujący sposób:

$$F_j = \frac{N_{fs}}{N_{fj}} \quad (2.15)$$

gdzie:

- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi (EALF) dla obciążenia osi Q_j ,
- N_{fs} – liczba równoważnych osi standardowych o obciążeniu Q_s (w Polsce $Q_s=100$ kN) do osiągnięcia założonego stanu zniszczenia przez nawierzchnię,
- N_{fj} – liczba osi o obciążeniu Q_j do osiągnięcia założonego stanu zniszczenia przez nawierzchnię.

Badania nad określaniem współczynników równoważności obciążenia osi można podzielić na następujące kategorie ze względu na metodykę ich prowadzenia:

- Empiryczne - oparte o analizę statystyczną danych doświadczalnych. Współczynnik równoważności obciążenia jest obliczany jako stosunek liczby przejazdów osi standardowych do liczby przejazdów osi (pojedynczych lub wielokrotnych) o rzeczywistym obciążeniu, która wywoła ten sam efekt niszczący w nawierzchni. Przykładem podejścia empirycznego jest analiza wyników testu AASHO.
- Mechanistyczno-empiryczne - oparte o analizę teoretyczną reakcji nawierzchni na zadane obciążenia od pojazdów i o analizą danych doświadczalnych.

2.3.3. Empiryczne metody określania współczynników równoważności obciążenia osi

2.3.3.1. Test drogowy AASHO

Test AASHO i badania z nim związane były przeprowadzone w latach 50 i 60 XX wieku w stanie Illinois w USA. Celem eksperymentu było zbadanie trwałości nawierzchni drogowych o znanej grubości obciążonej określonym ruchem drogowym.

W teście AASHO do określenia stanu technicznego nawierzchni stosowano miarę *PSR* (ang. „*Present Serviceability Ratio*”), która została określona na podstawie badań ankietowych przeprowadzonych wśród kierowców i jest wyrażona średnią oceną w skali od 0 (najgorszy) do 5 (najlepszy). W ramach testu AASHO wypracowano regresję parametrów technicznych drogi z oceną i wprowadzono wskaźnik *PSI* (ang. „*Present Serviceability Index*”), który odpowiada wskaźnikowi *PSR* i w przypadku nawierzchni podatnych jest opisany następującym równaniem:

$$PSI = 5,03 - 1,91 \log(1 + SV) - 1,38\overline{RD}^2 - 0,01\sqrt{C + P} \quad (2.16)$$

gdzie

PSI – wskaźnik terminalny przydatności eksploatacyjnej nawierzchni (ang. *Present Serviceability Index*), odpowiednik *PSR*,

SV – średnia wariancja mikroprofilu podłużnego nawierzchni wyznaczona na podstawie badania profilografem CHLOE,

RD – średnia głębokość kolein mierzona 4 stopową (1,22 m) łata [cale],

C – łączna długość spękań na 1000 ft² nawierzchni,

P – łączna powierzchnia łat na 1000 ft² nawierzchni,

Wskaźnik *PSI* w niewielkim stopniu zależy od długości spękań i powierzchni łat, natomiast znacznie spada wraz ze wzrostem głębokości koleiny, a także wraz ze wzrostem nierówności podłużnych nawierzchni.

Na podstawie wyników testu stworzono model matematyczny zmiany wskaźnika *PSI* w wyniku działania obciążenia nawierzchni ruchem. Na podstawie tego modelu wyprowadzono równania (2.17-2.20), na podstawie którym można obliczyć współczynnik równoważności obciążenia osi F_j . Funkcja regresji określona na podstawie wyników testu drogowego AASHO została dostosowana przez autora do obciążenia osią standardową 100 kN (oryginalnie obciążenie osi standardowej wynosi 80 kN).

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t22,5}}\right) = 4,79 \cdot \log(22,5 + 1) - 4,79 \cdot \log(L_x + L_2) + 4,33 \cdot \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{22,5}} \quad (2.17)$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right) \quad (2.18)$$

$$\beta_x = 0,44 + \frac{0,081 \cdot (L_x + L_2)^{3,23}}{(SN + 1)^{5,19} \cdot L_2^{3,23}} \quad (2.19)$$

gdzie:

- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi x, przypadającego w połowie przedziału obciążenia osi i,
- W_{tx} – liczba przyłożonych obciążeń osi x w okresie t,
- $W_{t22,5}$ – liczba przyłożonych obciążeń osi standardowych 100 kN (22,5 kip), w okresie t
- L_x – obciążenie przypadające na oś pojedynczą lub oś wielokrotną (kip).
- L_2 – kod osi: 1 dla osi pojedynczej, 2 dla osi podwójnej, 3 dla osi potrójnej,
- SN – liczba strukturalna, będąca funkcją grubości i modułów sprężystości każdej warstwy konstrukcji nawierzchni, oraz warunków gruntowo-wodnych w podłożu,
- p_t – wskaźnik *PSI* (ang. "*Present Serviceability Index*") na końcu okresu obliczeniowego nawierzchni t,
- G_t – funkcja zależna od p_t .
- β_x – funkcja zmiennych projektowych i zmiennych obciążenia, która wpływa na kształt zależności przydatności eksploatacyjnej rozpatrywanej nawierzchni p_t względem liczby obciążeń osi x W_{tx} .
- $\beta_{22,5}$ – jest wartością β_x , kiedy L_x jest równe 22,5 kip i L_2 jest równe 1.

Równania (2.17) - (2.19) po podstawieniu do równania (2.14) i uproszczeniu można przedstawić w następującej postaci:

$$F_j = \left(\frac{L_x + L_2}{22,5 + 1} \right)^{4,79} \cdot \frac{10^{\frac{G_t}{\beta_x}}}{10^{\frac{G_t}{\beta_{22,5}}}} \cdot L_2^{-4,33} \quad (2.20)$$

Jak wynika z analizy modelu, przy granicznym stanie technicznym nawierzchni na końcu okresu eksploatacji $p_t=1,5$ konstrukcja nawierzchni nie wpływa na współczynnik $EALF$ (G_t przyjmuje wartość 0).

Wzory do określania współczynników równoważności obciążenia osi, opracowane podczas testu AASHO, zostały zaadoptowane do kolejnych edycji metod projektowania nawierzchni AASHTO (1972, 1986 i 1993)

Wzory opracowane na podstawie wyników testu AASHO mają pewne ograniczenia, które wynikają z założeń przyjętych podczas planowania i przeprowadzania eksperymentu. Do ograniczeń tych należą:

- Ekstrapolacja modelu AASHO poza zakres testu. Ponieważ modele empiryczne przeważnie są prawidłowe w zakresie danych, w którym zostały określone, model AASHO jest teoretycznie odpowiedni tylko dla warunków zbliżonych do tych, które występowały podczas przeprowadzania testu. Warunki te dotyczą zakresu obciążenia nawierzchni pojazdami, rodzajów konstrukcji nawierzchni i zastosowanych materiałów drogowych, parametrów podłoża gruntowego oraz warunków klimatycznych.
- Pojawienie się osi potrójnych. Przykładem ekstrapolacji modelu AASHO poza zakres parametrów testu jest określenie współczynników równoważności obciążenia osi potrójnych, w teście stosowano tylko osie pojedyncze i podwójne.
- Zwiększenie ciśnienia w ogumieniu i pojawienie się nowych konstrukcji opon, nowych szerokości opon oraz kół typu super-single i wide-base super-single, a także nowych systemów zawieszenia pojazdów.
- Prędkość pojazdów (w teście AASHO była stała i wynosiła 35mil/h).
- Konstrukcja nawierzchni. W teście AASHO do wykonania warstw asfaltowych stosowano wyłącznie beton asfaltowy z kruszywa wapiennego i z asfaltem o penetracji 70/100. Maksymalna grubość warstw asfaltowych wynosiła 15 cm. Nie badano nawierzchni półsztywnych.
- Kryterium stanu zniszczenia nawierzchni. Bezpośrednim powodem osiągnięcia stanu krytycznego nawierzchni, wyrażonym wskaźnikiem p_t (PSI na końcu okresu eksploatacji), jest utrata przez nawierzchnię równości podłużnej i przyrost głębokości koleiny. Spękania nawierzchni w małym stopniu wpływają na wskaźnik PSI.

2.3.3.2. Wzór czwartej potęgi

Na podstawie wyników testu AASHO opracowano wiele innych modeli statystycznych, których przegląd znaleźć można m.in. w [72]. Prostsza formą przedstawienia wzoru na obliczenie współczynników równoważności obciążenia osi jest wzór czwartej potęgi:

$$F_j = \left(\frac{Q_j}{Q_s}\right)^n \quad (2.21)$$

gdzie:

F_j – współczynnik równoważności obciążenia danej osi j ,

Q_j – obciążenie danej osi j [kN],

Q_s – obciążenie równoważnej osi standardowej [kN],

n – wykładnik potęgi równy 4.

Zależność została po raz pierwszy opublikowana w 1970 r. [133] i w niedługim czasie została zaadoptowana do określania ruchu projektowego w wielu krajach. Późniejsze badania skoncentrowane były nad wykładnikiem potęgi oraz nad zastosowaniem wzoru do określenia oddziaływania osi podwójnych i potrójnych.

Według pracy Judyckiego [74] do określenia współczynników równoważności obciążenia osi podwójnych i potrójnych należy przyjąć obciążenie Q_j we wzorze 2.21 jako sumę obciążenia osi składowych, natomiast jako wartość Q_s należy przyjąć $Q_s = 184$ kN w przypadku osi podwójnych i $Q_s = 263$ kN w przypadku osi potrójnych. Wartości $Q_s = 184$ kN i $Q_s = 263$ kN wynikają ze wzorów AASHO opisanych równaniem 2.17 - 2.20, dla $SN = 5,15$ i $p_t = 2,5$. Jednakowe podejście w swojej pracy zastosował Scala w 1970 r. [133].

Zgodnie ze wzorami AASHO, wykładnik potęgi n określony dla nawierzchni podatnych osiąga wartości od 3,6 do 4,6 [61], [82]. Hudson i wsp. [60] i Irick [64] przeanalizowali dane zamieszczone w raporcie z testu AASHO z rozróżnieniem poszczególnych pętli. Każda z pętli dała inny model, w których wykładnik potęgi zmieniał się od 2,5 do 6, przy czym średnia wynosiła 4. Badania na odcinkach testowych przeprowadzone przez Huhtala i Pihlajamaki [61] wykazały, że wykładnik potęgi zmienia się wraz ze stopniem zmęczenia nawierzchni i wynosi od 2, na początku okresu eksploatacji, do 9, gdy nawierzchnia jest intensywnie spękana. Wykładnik potęgi n przyjmuje różne wartości w zależności od przyjętego kryterium stanu zniszczenia nawierzchni. W przypadku przyjęcia jako kryterium deformacji trwałych podłoża, wykładnik n przyjmuje wartości bliższe 4 w przypadku gruntów spoistych, a w przypadku gruntów niespoistych bliższe 3 [72], [157]. W sytuacji, gdy rozpatrywane są spękania zmęczeniowe warstw związanych cementem w konstrukcjach półsztywnych wykładnik n może przyjmować wartości od 8 do 12 [25], [61]. Współczynnik równoważności obciążenia osi obliczony ze

wzoru czwartej potęgi jest tylko ogólnym zarysem i przybliżeniem. Duże wahania wykładnika n wywołane są wieloma czynnikami, takimi jak grubość konstrukcji nawierzchni, stopień jej zniszczenia, czy kryterium stanu zniszczenia.

2.3.4. Mechanistyczno-empiryczne metody określania współczynników równoważności obciążenia

2.3.4.1. Podstawy teoretyczne

Trwałość zmęczeniowa nawierzchni N_f określana jest w metodach mechanistyczno-empirycznych na podstawie modeli zmęczeniowych warstw nawierzchni. Modele te zostały opracowane na podstawie danych z badań laboratoryjnych i obserwacji terenowych. W każdym modelu określone jest kryterium stanu nawierzchni, którym może być:

- powierzchnia spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych,
- deformacja trwała podłoża gruntowego,
- sumaryczna deformacja trwała warstw asfaltowych, warstw z mieszanek niezwiązanych oraz podłoża gruntowego,
- stan spękań zmęczeniowych podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym.

W metodach mechanistyczno-empirycznych określa się teoretyczną reakcję nawierzchni na zadane, zmienne obciążenie od osi pojazdów. Reakcję nawierzchni w zależności od przyjętego kryterium zmęczeniowego lub metody określania współczynników równoważności obciążenia osi można wyrazić poprzez:

- maksymalne ugięcie pionowe nawierzchni,
- maksymalne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych,
- maksymalne odkształcenie pionowe w połowie grubości warstwy asfaltowej,
- maksymalne odkształcenia pionowe na górze podłoża gruntowego,
- maksymalne naprężenie rozciągające w warstwach związanych spoiwem hydraulicznym,
- energię rozproszoną.

Reakcję nawierzchni określa się na podstawie obliczeń teoretycznych. W obliczeniach stosuje się model wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej lub lepko-sprężystej, lub korzysta się z metody elementów skończonych. Zagadnienia związane z teorią modeli nawierzchni drogowych zostały szeroko opisane m.in. w następujących podręcznikach: [59], [87], [119], [172]. Mechanistyczne metody określania współczynników równoważności obciążenia osi były przedmiotem badań opisanych m.in. w następujących publikacjach: [24], [33], [44], [53], [60], [61], [62], [63], [64], [72], [83], [84], [111], [133], [135], [157], [174].

2.3.4.2. Metoda Politechniki Gdańskiej

W ramach prac na zlecenie GDDKiA w latach 2005 - 2006 na Politechnice Gdańskiej opracowano metodę wyznaczania współczynników równoważności obciążenia osi. Dokładny opis metody oraz sposób jej wyznaczenia przedstawiono w raportach badawczych [80], [81]. Podstawą do opracowania tej metody była analiza mechaniczna wybranych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych oraz analiza następujących kryteriów zmęczeniowych: spękań warstw asfaltowych i deformacji trwałych podłoża gruntowego wg Instytutu Asfaltowego, oraz kryterium spękań podbudowy związanej cementem Dempsey'a. Współczynniki równoważności obciążenia osi obliczane są według ogólnych wzorów:

a) w przypadku warstw asfaltowych i podłoża gruntowego

$$\log F_j = a \log^2 \left(\frac{Q_j}{Q_s} \right) + b \log \left(\frac{Q_j}{Q_s} \right) + c \quad (2.22)$$

b) w przypadku warstw stabilizowanych spoiwem hydraulicznym

$$\log F_j = a \log^3 \left(\frac{Q_j}{Q_s} \right) + b \log^2 \left(\frac{Q_j}{Q_s} \right) + c \log \left(\frac{Q_j}{Q_s} \right) + d \quad (2.23)$$

gdzie:

F_j – współczynnik równoważności obciążenia danej osi j ,

Q_j – obciążenie danej osi j , w przypadku osi podwójnych i potrójnych jest to suma obciążeń osi składowych [kN],

Q_s – obciążenie porównawcze osi, w przypadku osi pojedynczych $Q_s = 100 \text{ kN}$, w przypadku osi podwójnych $Q_s = 184 \text{ kN}$, w przypadku osi potrójnych $Q_s = 263 \text{ kN}$,

a, b, c, d – współczynniki liczbowe zależne od typu i grubości konstrukcji, oraz od ciśnienia kontaktowego wywieranego przez koło na nawierzchnię, zestawione w opracowaniu [80].

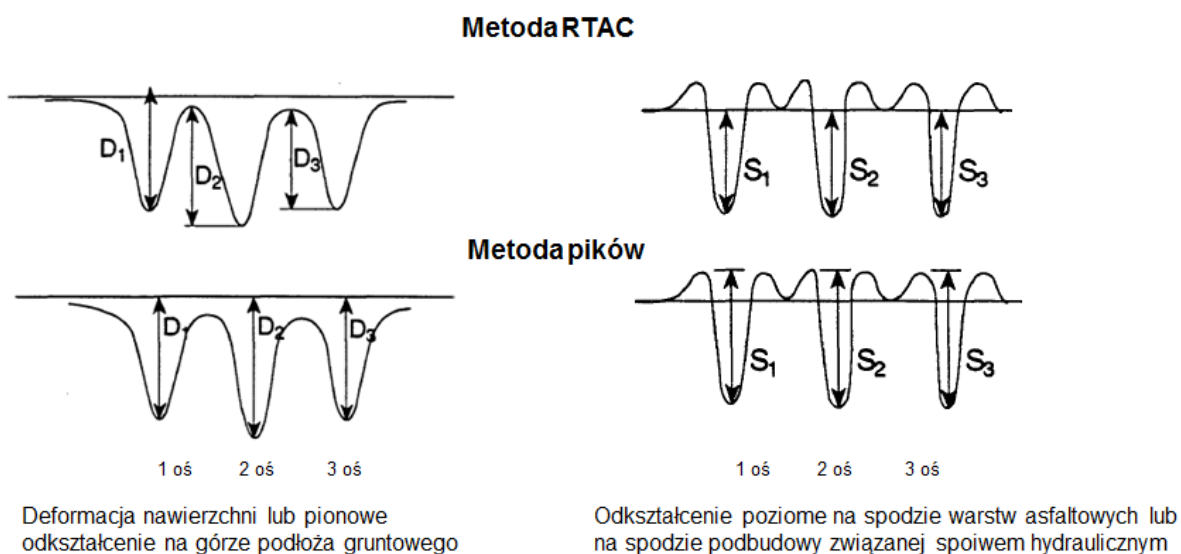
2.3.5. Metody obliczania reakcji nawierzchni wywołanej obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi

Modele zmęczeniowe nawierzchni drogowych najczęściej budowane są w oparciu o reakcję nawierzchni w tzw. miejscu krytycznym, czyli w miejscu, gdzie reakcja nawierzchni jest najbardziej niekorzystna. Na przykład w przypadku kryteriów spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z dołu do góry rozpatrywaną reakcją nawierzchni będzie maksymalne odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych. W przypadku obciążenia pojedynczym kołem (zakładając równomierne ciśnienie kontaktowe) maksymalne odkształcenie na spodzie warstw

asfaltowych wypadnie dokładnie pod środkiem obciążenia. W przypadku obciążenia kołem bliźniaczym maksymalne odkształcenie może wypaść pod środkiem koła lub pomiędzy kołami, w zależności od właściwości konstrukcji nawierzchni i podłoża, oraz odległości między kołami. Podobnie w przypadku oddziaływania osi wielokrotnych (podwójnych i potrójnych) określenie reakcji nawierzchni zależy od właściwości konstrukcji nawierzchni i odległości między osiami.

Zgodnie ze studiami przeprowadzonymi przez Hajeka i Agarwala [53] oraz Salama i wsp. [131] wyróżnić można następujące metody określania reakcji nawierzchni na obciążenie osią wielokrotną:

- Metoda RTAC (ang. „*Road and Transportation Association of Canada*”) (rysunek 2.11) – ekstremum pod pierwszą osią jest rejestrowany najpierw, następnie rejestrowane są kolejne różnice na krzywej pomiędzy lokalnym minimum przypadającym między osiami i lokalnym maksimum pod następującymi pod siebie osiami. Obliczone wartości reakcji są dodawane do siebie. Metoda ta została również opisana przez Huanga [30] i zastosowana w programie Kenlayer.
- Metoda pików (rysunek 2.11) – metoda polega na określeniu różnicy pomiędzy ekstremalnymi wartościami na wykresie reakcji nawierzchni, wywołanych przejazdem kolejnych osi składowych w osi wielokrotnej. Obliczone wartości reakcji są dodawane do siebie.
- Metoda całkowania – polega na obliczeniu pola ograniczonej wykresem reakcji nawierzchni. Metoda ta ma tę zaletę, że uwzględnione są nie tylko ekstremalne wartości reakcji nawierzchni, ale również czas trwania obciążenia i kształt wykresu reakcji nawierzchni.



Rysunek 2.11. Porównanie metody pików i RTAC do określania oddziaływania osi wielokrotnych na nawierzchni [53]

Hajek i Agarwal [53] przeprowadzili obliczenia współczynników równoważności obciążenia osi różnymi metodami przy uwzględnieniu zmiennej odległości między sąsiednimi osiami. Z obliczeń wynika, że metody pików i RTAC dają znacząco różne wyniki. Generalnie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone metodą pików są wyższe, niż obliczone metodą RTAC. Z badań wynika również, że obliczenia wykonane według wzorów AASHTO (patrz rozdz. 2.3.3.1) powodują niedoszacowanie niszczonego efektu oddziaływania osi podwójnych i potrójnych.

We francuskim instytucie LCPC Homsji i wsp. [57], [58] przeprowadzili badania dotyczące wpływu kształtu zmiany obciążenia w czasie na trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych. Kształt zmiany obciążenia był dobierany w taki sposób, aby symulować obciążenie osiami pojedynczymi, podwójnymi i potrójnymi. W wyniku przeprowadzonych testów stwierdzono, że wzrost poziomu odkształceń oraz wzrost liczby pików (liczby obciążeń) powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej warstw asfaltowych. Jednocześnie trwałość zmęczeniowa wzrasta gdy pole ograniczone wykresem funkcji odkształcenia i czasu rośnie. Na podstawie analizy wyników badań stworzono model zmęczeniowy warstw asfaltowych, w którym oprócz ekstremalnych wartości odkształcenia (pików) uwzględniono parametry charakteryzujące kształt funkcji odkształcenia w czasie. Model ten został wykorzystany przez Ambassa i wsp. [5] do obliczenia współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych z zastosowaniem lepko-sprężystego modelu nawierzchni zbudowanego z wykorzystaniem metody elementów skończonych [5]. Stwierdzono, że współczynnik równoważności obciążenia osi jest w przybliżeniu liniowo zależny od liczby osi w grupie, a współczynnik proporcji zależy od grubości konstrukcji nawierzchni, temperatury nawierzchni i prędkości pojazdu, przy czym w typowych warunkach jest on mniejszy bądź równy 1.

Badania wpływu odległości między sąsiednimi osiami na współczynniki równoważności obciążenia osi były prowadzone w RPA przez Prozzi i de Beera [111]. Z badań wynika, że w przypadku osi podwójnych i potrójnych współczynnik równoważności obciążenia rośnie wraz ze wzrostem odległości między osiami. Autorzy tłumaczą to wpływem osi sąsiedniej, która powoduje zmniejszenie poziomych naprężeń rozciągających na spodzie warstw asfaltowych.

Szerokie badania wpływu osi wielokrotnych na trwałość nawierzchni drogowych były przeprowadzone przez Uniwersytet Stanowy w Michigan (USA) [23], [131], [132]. Program badawczy obejmował obserwacje terenowe oraz badania laboratoryjne. Sformułowano następujące, ogólne wnioski z badań:

- Przy rozpatrywaniu spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych osie pojedyncze wywołują większą szkodę zmęczeniową liczoną na jedno obciążenie niż osie wielokrotne.

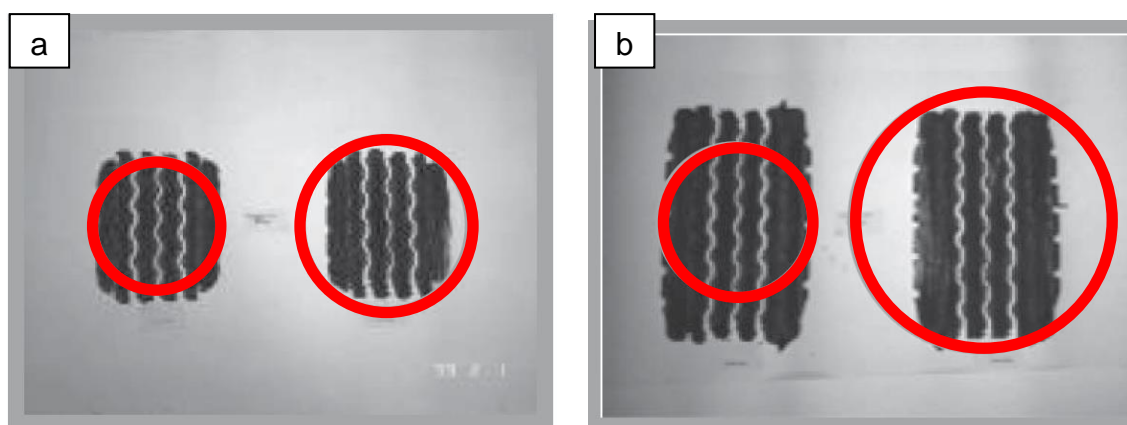
- Przy rozpatrywaniu deformacji trwałych podłoża i warstw asfaltowych stwierdzono, że szkoda zmęczeniowa jest bardziej proporcjonalna do całkowitego obciążenia przekazanego na nawierzchnię przez grupę osi.

2.3.6. Naprężenia kontaktowe i powierzchni styku opony z nawierzchnią

Powierzchnia styku opony i nawierzchni jest jedynym miejscem kontaktu pomiędzy pojazdem i nawierzchnią poprzez które obciążenia od pojazdów są przekazywane na konstrukcję nawierzchni, dlatego poznanie zjawisk zachodzących na niej jest bardzo ważne ze względu na projektowanie konstrukcji nawierzchni.

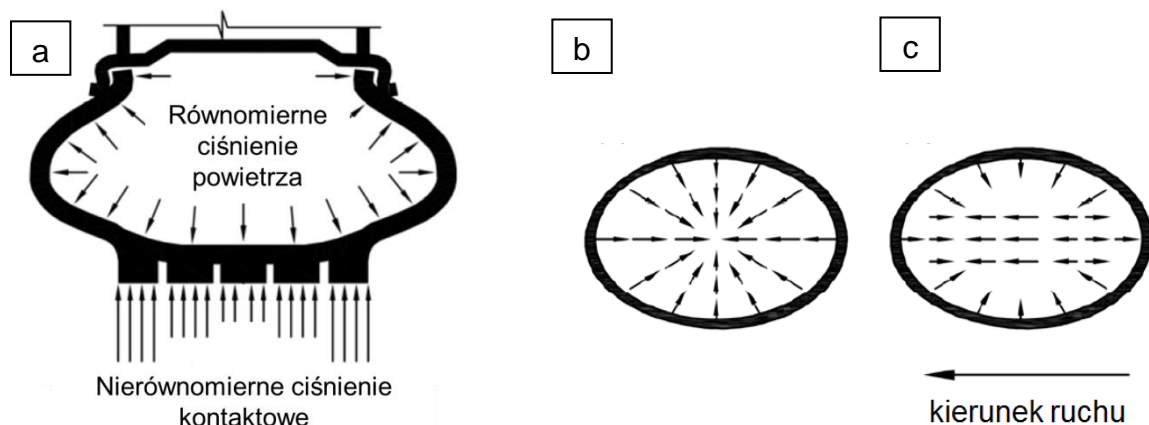
Do projektowania nawierzchni najczęściej przyjmuje się uproszczenie, według którego siła przekazywana jest z kół pojazdu na nawierzchnię poprzez obciążenie równomiernie rozłożonego (ciśnienie kontaktowe) na kołowej powierzchni styku opony i nawierzchni. Na przykład według polskiego katalogu wzmocnień i remontów z 2001 r. [143] do projektowania nawierzchni metodą mechanistyczno-empiryczną przyjmuje się stałe ciśnienie kontaktowe $q = 650 \text{ kPa}$, kołowy ślad zastępczy i obciążenie pojedynczego koła $Q = 50 \text{ kN}$. Obecnie w nowych polskich katalogach [78], [145], [148] ciśnienie kontaktowe do projektowania konstrukcji nawierzchni zostało zwiększone do wartości $q = 850 \text{ kPa}$.

W oprogramowaniu wykorzystującym teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej do obliczania naprężeń i odkształceń w nawierzchni (np. Bisar, Veroad, Pads itp.) przyjmuje się kołowy kształt powierzchni styku opony i nawierzchni. W rzeczywistości kształt powierzchni styku jest bardziej zbliżony do prostokąta niż do koła (por. rysunek 2.12.). Teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej obciążonej stałym naprężeniem kontaktowym o prostokątnym kształcie rozwinął Maina i wsp. [92]. Wynika z niej, że kołowy kształt powierzchni styku powoduje niedoszacowanie odkształceń i naprężeń w nawierzchni przy niskich wartościach naprężenia kontaktowego i ich przeszacowanie przy dużym wartościach.



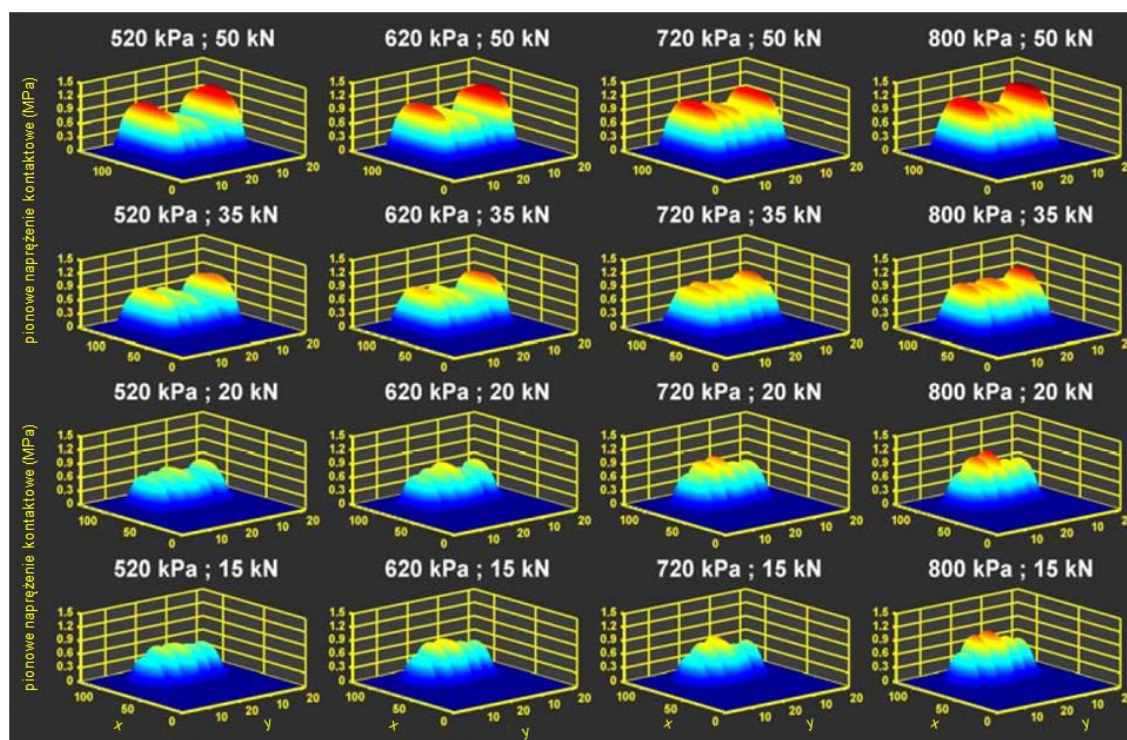
Rysunek 2.12. Ślady opon bliźniaczych 12R22,5 wraz z zaznaczonym kołowym przybliżeniem (śladem zastępczym) a) obciążenie 30 kN i ciśnienie powietrza w oponie 420 kPa b) obciążenie 70 kN i ciśnienie powietrza w oponie 420 kPa [91]

Często spotykaną praktyką jest przyjmowanie naprężenia kontaktowego równego ciśnieniu powietrza w ogumieniu równomiernie rozłożonego na powierzchni styku. Heukelom i Klomp [55] oraz Judycki i Urbański [83] przeprowadzili studia zalecanych przez producentów ciśnień powietrza w różnych typach opon do samochodów ciężarowych. Wykazali tym samym, że w kołach przeznaczonych do wyższych obciążeń stosuje się wyższe ciśnienie powietrza w ogumieniu. Przyjęcie równomiernego rozkładu naprężenia kontaktowego jest dużym uproszczeniem. Rozkład ciśnienia kontaktowego jest bardziej skomplikowany, co wynika z budowy i właściwości opony [158]. Schemat naprężeń pionowych i poziomych przekazywanych przez oponę na powierzchnię przedstawiono na rysunku 2.13.



Rysunek 2.13. Schemat obciążenia przekazywanego przez oponę na powierzchnię (ciśnienie kontaktowe) a) pionowe b) styczne gdy pojazd nie porusza się c) styczne podczas ruchu pojazdu [158]

Badania pomiarowe naprężeń kontaktowych przeprowadzili m.in.: Hensen i wsp. [54], Himeno i Takuya [56], Costanzi i wsp. [29] oraz de Beer i wsp. [31]. Stosowano techniki pomiaru takie jak rejestracja śladu na specjalnym filmie reagującym na zmienne obciążenie [29], [54] lub tablicy z odpowiednio rozmieszczonymi czujnikami piezoelektrycznymi mierzącymi naprężenia w trzech kierunkach [32], [56]. Technika pomiaru wykorzystująca czujniki piezoelektryczne została rozwinięta umożliwiając ciągły pomiar naprężeń pojazdów w ruchu (ang. „Stress in Motion”) [30]. Na rysunku 2.14 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów pionowych naprężeń kontaktowych, opublikowane przez de Beer'a i wsp [32]. Zaprezentowany sposób przekazywania obciążenia na powierzchnię nazywany jest często w literaturze naprężeniem kontaktowym 3-D.



Rysunek 2.14. Pionowe naprężenia kontaktowe zmierzone na styku opony i nawierzchni (opona 12R22,5 do kół bliźniaczych) przy zmiennym obciążeniu i przy zmiennym ciśnieniu powietrza w ogumieniu, oś x- pozycja podłużna (mm), oś y- pozycja poprzeczna (mm) [32].

Maksymalna wartość naprężenia kontaktowego 3-D może być znacznie wyższa niż ciśnienie powietrza w oponie. Przy stałym obciążeniu koła naprężenia na środku powierzchni styku rosną względem naprężeń na krawędzi gdy ciśnienie powietrza w ogumieniu rośnie. Przy stałym ciśnieniu powietrza w oponie naprężenia na środku powierzchni styku maleją względem naprężeń na krawędziach wraz ze wzrostem obciążenia koła [32], [107], [108]. Według badań Himeno i Takuya [56] rozkład ciśnienia kontaktowego w dużej mierze zależy od typu opony, a w szczególności od typu bieżnika. Średnia wartość ciśnienia kontaktowego (pionowego) obliczona z rozkładu naprężeń 3-D jest liniowo zależna od obciążenia koła i na zależność tą praktycznie nie wpływa ciśnienie powietrza w ogumieniu i prędkość pojazdu.

Sebaaly i Tabatabaee [135] badali wpływ ciśnienia w ogumieniu, typu opony i jej obciążenia na odkształcenie na spodzie warstw asfaltowych i na współczynniki równoważności obciążenia osi. Wyniki testu wskazały, że ciśnienie powietrza w ogumieniu ma niewielki wpływ na odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych, natomiast istotny wpływ ma typ opony. Obliczenia naprężeń i odkształceń w nawierzchni wywołanych rzeczywistym obciążeniem kontaktowym można przeprowadzić stosując teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej lub lepkosprężystej poprzez zadanie obciążenia za pomocą modelu składającego się kilku rzędów obciążeń o kołowym kształcie i zadanych obciążeniach wynikających

z rzeczywistego rozkładu obciążenia kontaktowego [91], [112]. Innym sposobem jest zastosowanie metody elementów skończonych. W metodzie tej naprężenia kontaktowe mogą być określone na podstawie pomiarów [7], [40], [107] lub też mogą być przekazane na nawierzchnię poprzez model opony [164], [165]. Bez względu na sposób wykonania modelu, wnioski z przeprowadzonych badań są podobne. Naprężenia kontaktowe 3-D wywołują większe naprężenia pionowe i poziome blisko powierzchni nawierzchni. Sugeruje to, że przyjęcie uproszczonego, kołowego kształtu obciążenia równomiernie rozłożonego może powodować znaczące niedoszacowanie spękań przy powierzchni (top-down). Ponadto naprężenia kontaktowe 3-D wywołują większe naprężenia poziome w kierunku poprzecznym na spodzie warstw asfaltowych i większe naprężenia pionowe na podłożu gruntowym, przy czym różnice te są większe w przypadku nawierzchni cieńszych. Różnice w reakcji nawierzchni wywołanej uproszczonym, równomiernie rozłożonym ciśnieniem kontaktowym o kołowym kształcie, a w reakcji nawierzchni wywołanej naprężeniem kontaktowym 3-D maleją wraz ze wzrostem obciążenia koła.

Typ opony i kół istotnie wpływa na reakcję nawierzchni i współczynniki równoważności obciążenia osi. Już we wczesnych badaniach prowadzonych przez Deacona [33] wykazano, że osie z kołami pojedynczymi (w pracy Deacona były to osie sterowne) są trzy razy bardziej agresywne niż osie z kołami bliźniaczymi. W późniejszych badaniach prowadzonych przez Sebaaly i Tabatabaee [135] wykazano, że osie pojedyncze tzw. super-single (np. 350/75 R22,5 lub 385/65 R22,5), stosowane do osi w przyczepach i w naczepach zamiast osi z kołami bliźniaczymi (np. 12R 22,5), dają współczynniki równoważności obciążenia od 1,5 do 1,7 razy wyższe. W przypadku osi podwójnych współczynniki te mogą być aż do 2 razy wyższe. Generalnie wśród badaczy dominuje opinia, że opony typu super-single wywołują większe naprężenia w nawierzchni niż koła podwójne, a tym samym ruch pojazdów wyposażonych w takie opony powoduje szybsze narastanie uszkodzeń [3], [28], [85], [165]. Z drugiej strony, jak wynika z pracy Wanga i Roque [167] koła wyposażone w opony super-single nowej generacji, o szerokiej podstawie (np. 425/65 R22,5 i 445/50 R22,5) wywołują zbliżone, lub mniejsze naprężenia w nawierzchni niż koła bliźniacze.

3. Analiza danych pomiarowych z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu (WIM)

3.1. Cel i zakres analiz

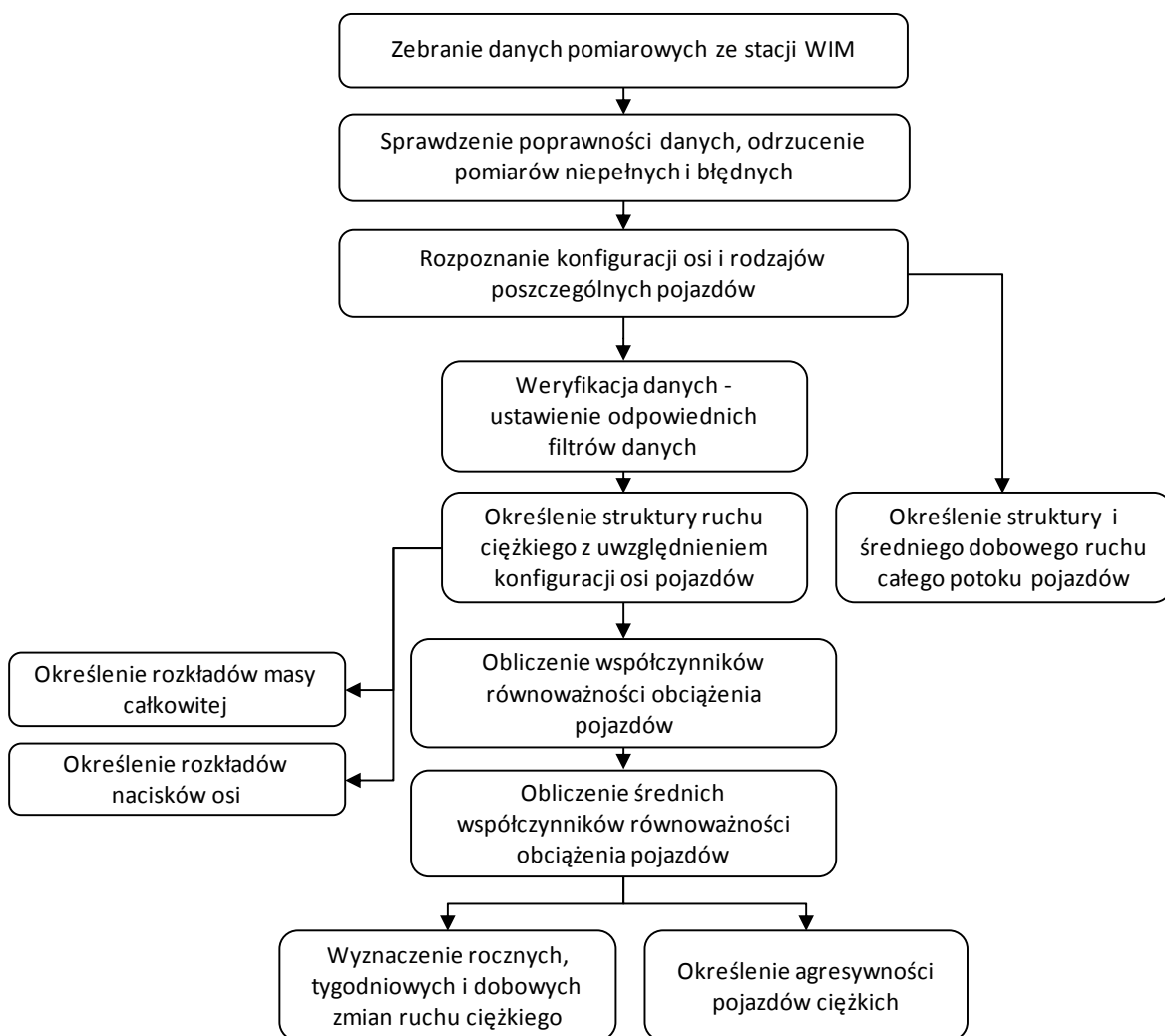
Głównym celem przeprowadzonej i opisanej w niniejszym rozdziale analizy było rozpoznanie charakterystyki ruchu ciężkiego i analiza obciążenia nawierzchni drogowych ruchem ciężkim na podstawie danych z polskich stacji preselekcyjnego ważenia pojazdów w ruchu (WIM). W zakres niniejszego rozdziału wchodzi obliczenia i analizy:

1. ruchu dobowego pojazdów ciężkich,
2. struktury ruchu ciężkiego,
3. współczynników równoważności obciążenia pojazdów dla nawierzchni podatnych i półsztywnych w oparciu o metody obliczeniowe: AASHTO, wzór czwartej potęgi, francuską, Politechniki Gdańskiej,
4. rozkładów obciążenia osi i rozkładów masy całkowitej pojazdów,
5. miesięcznych, tygodniowych i dobowych zmian ruchu ciężkiego.

3.2. Metodyka analizy

Dane pomiarowe uzyskane z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu były analizowane według schematu przedstawionego na rysunku 3.1. Analiza polegała na:

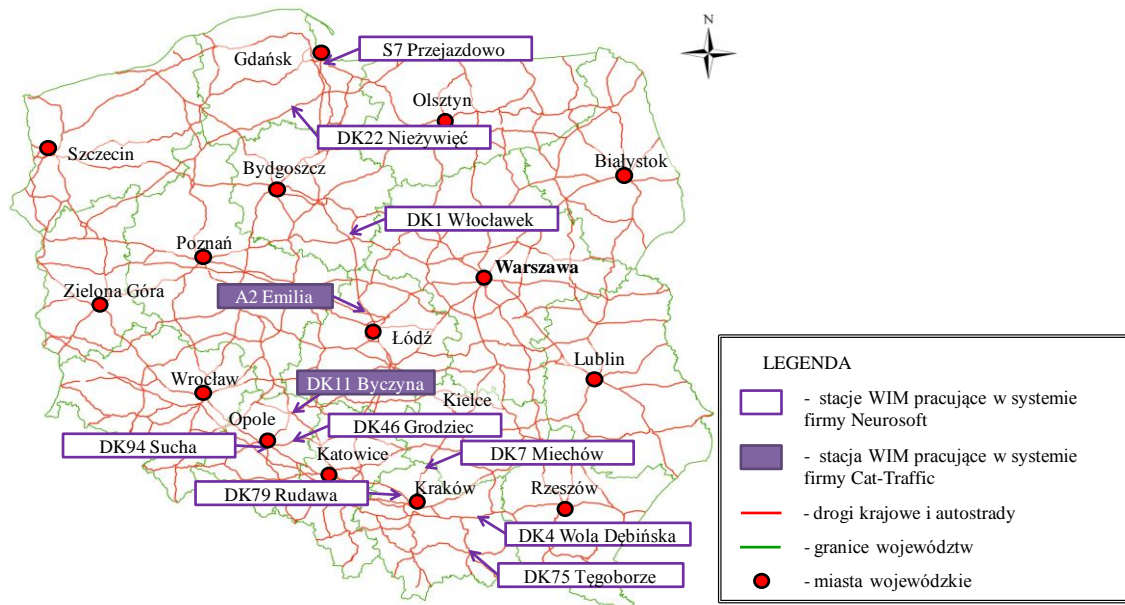
1. sprawdzeniu poprawności danych wejściowych i ich weryfikacji,
2. wykonaniu stosownych obliczeń (zgodnie ze schematem na rysunku 3.1),
3. interpretacji otrzymanych wyników obliczeń,
4. zestawieniu i porównaniu ze sobą wyników otrzymanych dla poszczególnych stacji, typów pojazdów i metod obliczeniowych,
5. porównaniu wyników otrzymanych dla danych z polskich stacji WIM z wynikami otrzymanymi w innych krajach,
6. wyciągnięciu odpowiednich wniosków i wskazaniu tych elementów analizy, które mogą mieć praktyczne zastosowanie.



Rysunek 3.1. Schemat blokowy analizy obliczeniowej danych pomiarowych z ciągłego ważenia pojazdów w ruchu (WIM)

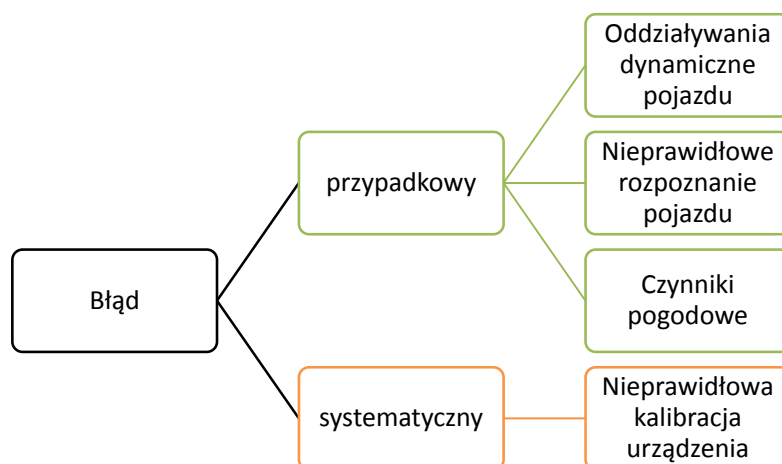
3.3. Weryfikacja danych wejściowych

Dostęp do danych pomiarowych uzyskano w 2010 r. w ramach prac nad weryfikacją i aktualizacją Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 1997 r., które były prowadzone w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej na zlecenie GDDKiA w latach 2009-2013. Dane pochodzą łącznie z 11 stacji ważenia pojazdów w ruchu, zainstalowanych i obsługiwanych przez firmy Neurosoft i Cat-Traffic. Na rysunku 3.1 przedstawiono mapę Polski z zaznaczoną lokalizacją stacji ważenia pojazdów w ruchu.



Rysunek 3.2. Mapa z lokalizacją stacji ważenia pojazdów w ruchu WIM

Dotychczas w Europie nie opracowano procedur weryfikacji i analizy danych WIM, próby określenia zaleceń podjęto jednak w Stanach Zjednoczonych i zawarto je w przewodniku opublikowanym przez Federalną Agencję Autostrad FHWA [114]. W przewodniku opisano między innymi rodzaje i przyczyny błędów w pomiarach na stacjach WIM. Część z wymienionych w [114] błędów nie występuje na rozpatrywanych w pracy polskich stacjach, natomiast te, które mają wpływ na dane zestawiono na rysunku 3.3. Błędy systematyczne wynikają z nieprawidłowej kalibracji urządzenia i objawiają się stale zawyżonymi lub zaniżonymi odczytami nacisków osi pojazdów. Stacje ważenia w okresie swojego działania są systematycznie kalibrowane. Jeżeli z jakichś powodów urządzenie w danym okresie nie działa poprawnie to dane z tego okresu nie są archiwizowane, a po usunięciu usterki waga jest sprawdzana i jest ponownie kalibrowana o ile istnieje taka potrzeba. Błąd systematyczny został zatem wyeliminowany na etapie zbierania danych. Do dalszych obliczeń wybrano dni, w których pomiar zawierał komplet danych i trwał nieprzerwanie przez 24 h. W tabelicy 3.1 zestawiono informacje dotyczące okresu pomiaru i liczby miarodajnych dni pomiarowych. Na wszystkich stacjach poza DK1 okres pomiaru wynosił co najmniej jeden rok. Zdarzały się przypadki, np. na stacji DK4 lub DK46, że na jednym z kierunków ruchu wystąpiła dłuższa (kilkumiesięczna) przerwa w działaniu w stacji WIM. W takiej sytuacji uwzględniono na każdym kierunku ruchu lata, w których pomiar prowadzony był we wszystkich miesiącach roku.



Rysunek 3.3. Schemat rodzajów błędów w danych pochodzących ze stacji ważenia pojazdów w ruchu

Tablica 3.1. Zestawienie informacji dotyczących okresu pomiarów na stacjach WIM

Lp	Droga	Punkt pomiarowy	Kierunek ruchu	Okres pomiaru	Liczba dni objętych pomiarem
1	A2	Emilia	Warszawa	I 2011 - XII 2012	559
			Poznań	I 2011 - XII 2012	559
2	S7	Przejazdowo	Elbląg	I 2013 - XII 2013	296
3	DK1	Włocławek	Łódź	I,II,III,VII,VIII 2011	114
4	DK4	Wola Dębińska	Kraków	I 2011 - XII 2013	822
			Tarnów	I 2012 - XII 2013	530
5	DK7	Antołka	Kraków	I 2012 - XII 2013	542
		Miechów	Kielce	I 2012 - XII 2013	714
6	DK11	Byczyna / Gołkowice	Katowice	I 2010 - XII 2011	711
7	DK22	Nierzywiec	Chojnice	I 2013 - XII 2013	354
			Człuchów	I 2013 - XII 2013	355
8	DK46	Grodziec	Opole	I 2011 - XII 2013	1 025
			Częstochowa	I 2011 - XII 2012	692
9	DK75	Kurów	Brzesko	I 2012 - XII 2013	526
		Tęgoborze	Nowy Sącz	I 2012 - XII 2013	642
10	DK79	Rudawa	Kraków	I 2013 - XII 2013	352
11	DK94	Sucha	Opole	I 2013 - XII 2013	322
			Katowice	I 2013 - XII 2013	359

Po utworzeniu baz danych rozpoznano kategorie poszczególnych pojazdów na podstawie wskazań modułu rozpoznania pojazdów na stacji WIM. Na tym etapie wyznaczono strukturę i średni dobowy ruch pojazdów (SDR) w punktach pomiarowych, które są opisane w rozdziale 3.4. Następnie odrzucono dane dotyczące samochodów osobowych i dostawczych, których masa całkowita nie przekracza 3,5 t. Oddziaływanie tych pojazdów na nawierzchnię drogową jest

pomijalnie niskie, co zostało dowiedzione w teście AASHO [156]. W kolejnym kroku określono konfigurację osi w każdym pojeździe z osobna i sklasyfikowano pojazdy (por. rysunek 3.4 na stronie 63). Z dalszych obliczeń wykluczono pojazdy nietypowe pod względem konfiguracji osi, które w ruchu występują bardzo rzadko.

Pomiary, mimo przeprowadzanych okresowych kalibracji, zawierają błędy przypadkowe, które należy zweryfikować przed dalszą analizą. Zgodnie z przewodnikiem FHWA [114] weryfikacja błędów powinna polegać na założeniu odpowiednich filtrów wielkości mierzonych, aby wyeliminować odczyty nierzeczywiste. Podstawą do rozpoznania błędnych rekordów, oprócz przewodnika FHWA [114], były studia parametrów technicznych pojazdów poruszających się po polskich drogach na podstawie literatury [110], informacji podawanych przez producentów pojazdów [188], [189], [194], oraz przepisów dotyczących wymagań wymiarów i obciążenia pojazdów drogowych [38], [121]. Zestawienie przyjętych przedziałów prawidłowych wartości wielkości mierzonych na stacji WIM podano w tablicy 3.2.

Tablica 3.2. Przyjęte przedziały prawidłowych wartości pomiarów pojazdów ciężkich na stacjach WIM

Wielkość mierzona	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
Nacisk osi [kN]	5	200
Masa całkowita [tony]	3,5	-
Długość pojazdu [m]	3	20
Odległość między osiami [m]	0,5	20
Prędkość [km/h]	5	180

W tablicy 3.3. zestawiono informację o liczebności próby pomiarowej, czyli o liczbie wszystkich zważonych pojazdów (łącznie z samochodami osobowymi i dostawczymi), oraz o liczbie zważonych pojazdów ciężkich, których pomiary spełniały kryteria podane w tablicy 3.2. W tablicy 3.3. podano również informację o udziale procentowym pojazdów nierozpoznanych, czyli takich pojazdów, dla których rekordy pomiarowe są puste lub zawierają niepełne dane, lub są oznaczone jako błędne przez system WIM. Na stacji DK1 procent pojazdów nierozpoznanych był szczególnie wysoki, dlatego dane z tej stacji nie będą wykorzystywane do wszystkich analiz. Dane po weryfikacji zawierają łącznie pomiary ponad 11,8 mln pojazdów ciężkich.

Tablica 3.3. Zestawienie informacji dotyczących liczby zważonych pojazdów

Stacja pomiarowa	Pojazdy wszystkich kategorii		Pojazdy ciężkie		
	Łączna liczba wszystkich zważonych pojazdów	Procent pojazdów nierozpoznanych przez system WIM	Liczba pojazdów o masie >3,5 tony	Procent odrzuconych pojazdów ciężkich-niepełniających kryteriów z tab. 3.2	Liczba pojazdów przyjęta do obliczeń
A2	8 411 233	4,6	2 680 121	3,7	2 580 957
S7	3 661 002	3,8	421 399	1,0	417 185
DK1	1 027 590	34,8	143 378	0,4	142 804
DK4	17 030 795	2,6	3 367 363	0,8	3 340 424
DK7	11 239 857	2,4	1 097 010	0,7	1 089 331
DK11	2 968 179	3,6	818 339	0,8	811 792
DK22	3 969 641	2,7	644 068	0,8	638 915
DK46	6 585 462	1,7	1 262 334	1,0	1 249 711
DK75	8 873 963	5,9	868 442	0,8	861 494
DK79	3 012 197	2,4	255 772	0,6	254 237
DK94	3 607 302	4,6	474 909	0,5	472 534
Suma	70 387 221	-	12 033 133	-	11 859 384

Analizę struktury ruchu, masy całkowitej pojazdów i obciążenia ich osi, oraz współczynników równoważności obciążenia osi przeprowadzono na pełnym dostępnym na każdej stacji zbiorze danych, co znaczy, że liczebność próby pomiaru na każdej ze stacji różniła się, lecz jest ona na tyle duża, że nie wpływa na wyniki analiz. Dane obejmują pełne lata pomiaru, dzięki czemu wyeliminowano w analizach błąd spowodowany sezonowymi zmianami w ruchu.

3.4. Struktura ruchu ciężkiego

3.4.1. Klasyfikacja pojazdów

Na polskich drogach można zaobserwować kilkanaście różnych typów pojazdów, które w różny sposób oddziałują na konstrukcje nawierzchni drogowej. Na świecie istnieje wiele różnych systemów klasyfikacji pojazdów. W Unii Europejskiej do przeprowadzenia homologacji pojazdów należy stosować klasyfikację zawartą w dyrektywie UE [38], która kategoryzuje pojazdy w zależności od całkowitej masy pojazdu i od przeznaczenia (pojazdy silnikowe do przewozu osób, towarów oraz przyczepy lub naczepy). W europejskiej specyfikacji dotyczącej stacji WIM COST 323 [27] podano inne niż w dyrektywie UE [38] zalecenie co do klasyfikacji pojazdów. Klasyfikacja COST obejmuje 8 grup pojazdów podzielonych w zależności od rodzaju i liczby osi. W Stanach Zjednoczonych obowiązuje jedna klasyfikacja pojazdów podana przez FHWA, która dotyczy zarówno homologacji pojazdów, jak i jest wykorzystywana do

projektowania nawierzchni. Klasyfikacja FHWA dzieli pojazdy na 13 grup w zależności od rodzaju pojazdu (motocykle, samochody osobowe, ciężarowe, autobusy) i liczby osi w pojeździe. W Polsce do projektowania konstrukcji nawierzchni oraz do przeprowadzania analiz ruchu drogowego stosuje się następującą klasyfikację pojazdów:

- motocykle i rowery **M, R**,
- samochody osobowe **O**,
- samochody dostawcze (lekkie samochody ciężarowe) **D**,
- samochody ciężarowe **C**,
- samochody ciężarowe z przyczepami (w tym ciągniki siodłowe z naczepami) **C+P, Cs+N**,
- autobusy **A**,
- inne **I**.

Powyższa klasyfikacja obowiązuje podczas przeprowadzania generalnych pomiarów ruchu oraz stosowana jest do projektowania nowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych [103] oraz do projektowania wzmocnień nawierzchni [143]. Do projektowania konstrukcji nawierzchni sztywnych dodatkowo grupę samochodów ciężarowych z przyczepami podzielono ze względu na liczbę osi (5-osiove i 6-osiove) [144].

Na stacjach WIM pojazdy klasyfikowane są według indywidualnych systemów producenta modułu rozpoznania pojazdu lecz mimo to systemy te są na tyle dokładne, że umożliwiają przypisanie danego pojazdu do konkretnej grupy według dowolnie przyjętej klasyfikacji. Na rozpatrywanych stacjach pracujących w systemie Neurosoft pojazdy klasyfikowane są wg podziału na 11 kategorii (bez rozróżniania liczby i konfiguracji osi, konieczne jest zatem ustawienie dodatkowych algorytmów w celu precyzyjnego rozpoznania). W systemie Cat-Traffic pojazdy klasyfikowane są wg rodzaju pojazdu oraz konfiguracji osi.

Struktura ruchu na poszczególnych stacjach WIM zgodnie z polską klasyfikacją stosowaną w generalnych pomiarach ruchu (GPR) oraz średni dobowy ruch pojazdów zostały podane w tabelicy 3.4. Przedstawione wyniki sporządzono na podstawie wskazań modułu rozpoznania pojazdu na stacjach WIM dla całego dostępnego okresu pomiarów. Występują kilkuprocentowe różnice względem wartości podanych w raporcie z generalnego pomiaru ruchu 2010 [103], które mogą wynikać przede wszystkim z ograniczeń czasowych GPR, pomiar na stacjach WIM jest ciągły.

Tablica 3.4. Struktura ruchu i średni dobowy ruch pojazdów określone na podstawie danych ze stacji WIM

Stacja WIM	Struktura ruchu						SDR wszystkie pojazdy	SDR pojazdy ciężkie
	Osobowe [%]	Dostawcze [%]	Ciężarowe [%]	Ciężarowe z przyczepą [%]	Autobusy [%]	Inne [%]		
A2	53,6	12,9	5,9	26,6	0,9	0,1	15 047	5 026
S7	74,4	13,0	2,6	8,9	0,5	0,6	24 737	2 960
DK1	68,2	10,1	4,2	16,1	1,1	0,3	18 028	3 858
DK4	68,6	10,8	6,0	13,5	0,8	0,3	25 193	5 114
DK7	76,1	13,6	3,3	6,3	0,4	0,3	17 898	1 790
DK11	71,3 ¹⁾		5,8	22,3	0,5	0,1	8 349	2 388
DK22	67,8	15,2	3,6	12,6	0,5	0,3	11 198	1 867
DK46	69,9	9,9	3,5	14,9	1,1	0,7	7 671	1 496
DK75	75,0	13,8	4,4	5,3	0,7	0,8	15 195	1 580
DK79	76,8	13,5	2,7	5,5	0,5	1,0	17 115	1 489
DK94	71,0	14,1	4,3	8,8	0,7	1,1	10 594	1 462

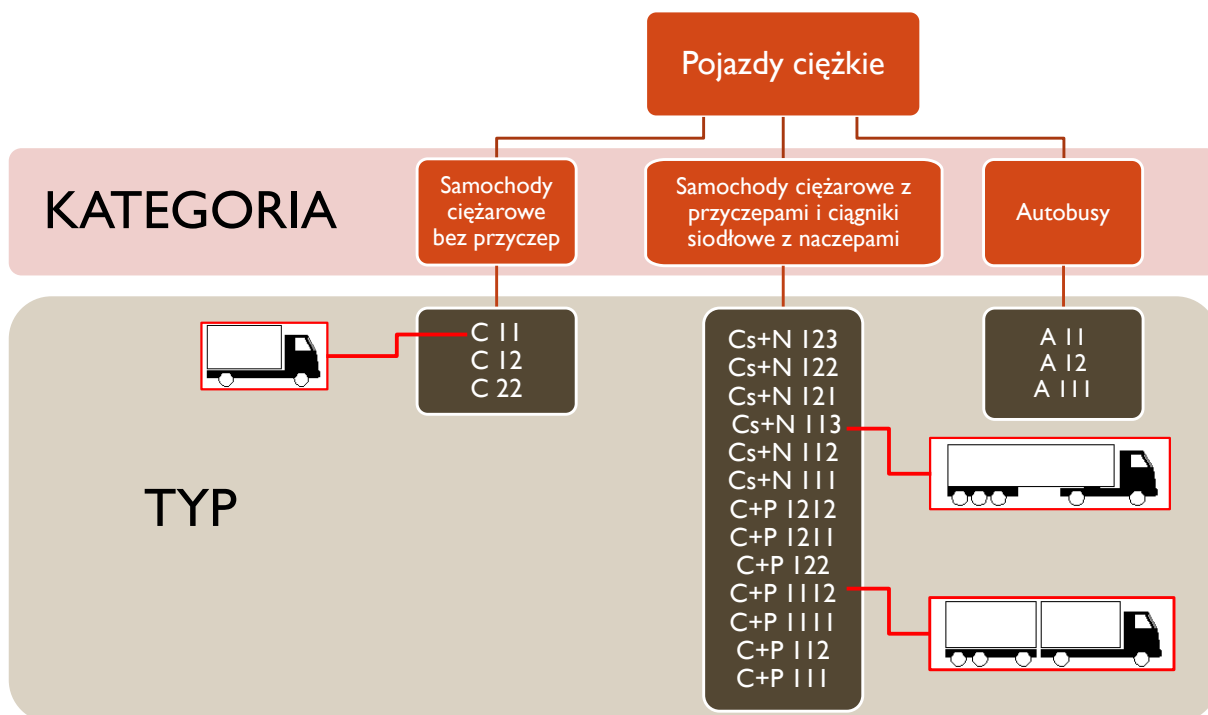
1) Na stacji DK11 samochody osobowe i dostawcze nie są rozróżniane przez moduł rozpoznania pojazdu

Żadna z wymienionych wcześniej klasyfikacji nie uwzględnia konfiguracji osi w pojeździe, która jest ważna ze względu na naprężenia powstające w nawierzchni, dlatego na potrzeby tej pracy klasyfikację pojazdów ciężkich stosowaną w Polsce uzupełniono wprowadzając oznaczenie konfiguracji osi. Osie mogą być:

- pojedyncze, gdy odległość od osi sąsiedniej $d > 1,8$ m, oznaczone są cyfrą **1**,
- podwójne, gdy dwie sąsiednie osie znajdują się w odległości $d \leq 1,8$ m, oznaczone są cyfrą **2**,
- potrójne, gdy trzy sąsiednie osie znajdują się w odległości $d \leq 1,8$ m, oznaczone są cyfrą **3**.

Odległość $d \leq 1,8$ m klasyfikująca osie jako podwójne lub potrójne w przepisach prawnych dotyczących maksymalnych dopuszczalnych nacisków osi pojazdów [38], [121] i wynika z nakładania się naprężeń w nawierzchni od sąsiednich osi pojazdu. Przy określaniu liczby osi i ich konfiguracji w pojeździe należy rozpatrywać wyłącznie osie mające styk z nawierzchnią¹. Klasyfikację oraz oznaczenia typów pojazdów zastosowaną w analizie pokazano na rysunku 3.4. W ruchu drogowym mogą sporadycznie pojawiać się pojazdy o innej konfiguracji osi niż przyjęto w klasyfikacji na rysunku 3.4, ale ich udział w sumarycznej liczbie pojazdów ciężkich jest bardzo mały.

¹ Często spotyka się, że 5 osiowy ciągnik siodłowy z naczepą ma uniesioną jedną z osi w naczepie, w takiej sytuacji pojazd ten będzie sklasyfikowany jako Cs+N 112.

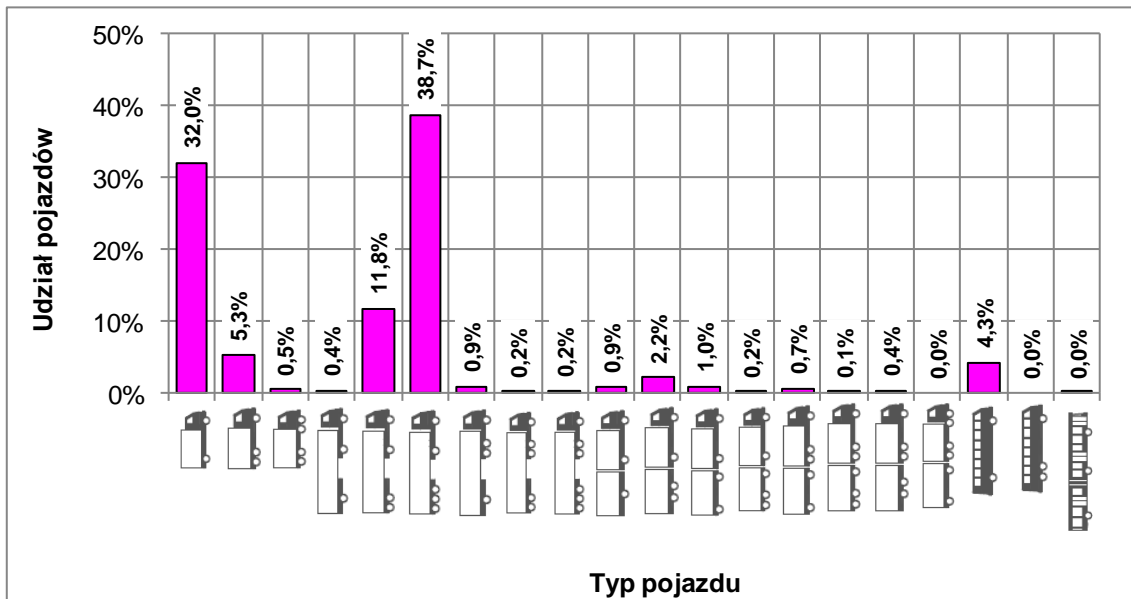


Rysunek 3.4. Podział pojazdów ciężkich zastosowany w raporcie wraz z ilustracjami przykładowych pojazdów

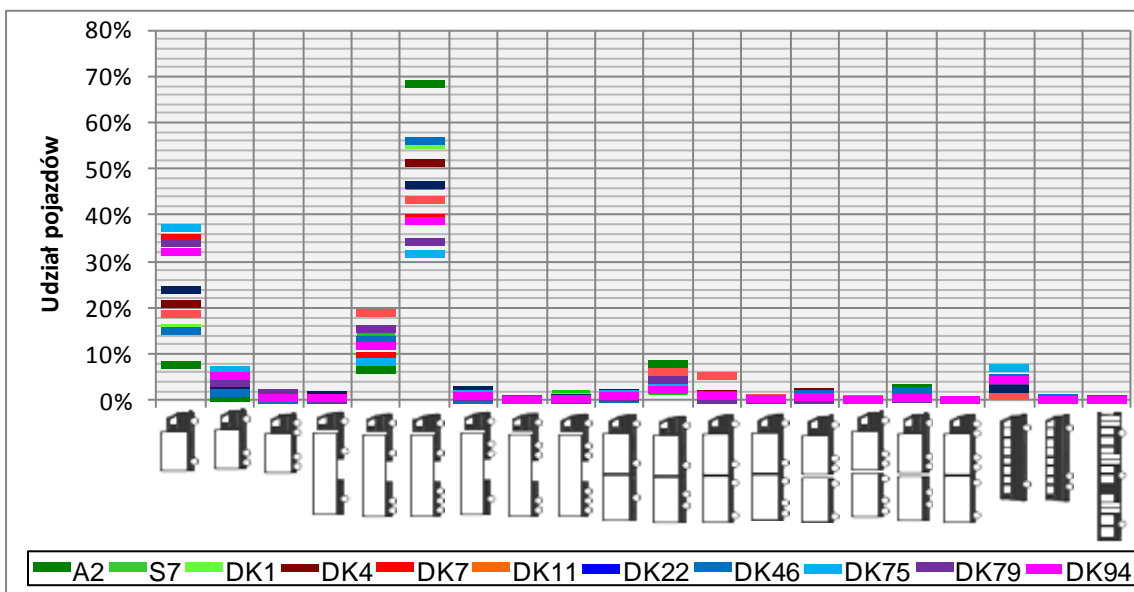
Moduł rozpoznania pojazdu na stacji WIM klasyfikuje pojazdy w oparciu o profil magnetyczny pojazdu lub wskazania czujników optycznych, dlatego pojazdy o masie powyżej 3,5 tony mogą być zakwalifikowane do grupy samochodów dostawczych i odwrotnie, pojazdy o masie poniżej 3,5 tony mogą być zakwalifikowane jako samochody ciężarowe. Ze względu na problem w rozróżnianiu samochodów dostawczych od ciężarowych w niniejszej pracy wprowadzono założenie, że wszystkie pojazdy o masie powyżej 3,5 tony będą klasyfikowane jako pojazdy ciężkie i w zależności od konfiguracji osi będą przypisane do odpowiedniej kategorii i typu. Pojazdy ciężkie klasyfikowano w pierwszej kolejności na podstawie konfiguracji osi (zgodnie ze schematem podanym na rysunku 3.4), w drugiej kolejności na podstawie wskazań modułu rozpoznania pojazdów na stacji WIM.

3.4.2. Struktura ruchu ciężkiego

Strukturę ruchu ciężkiego, czyli procentowy udział pojazdów danego typu w liczbie wszystkich pojazdów ciężkich podano w dla poszczególnych stacji w załączniku A.1, natomiast na rysunku 3.5 przedstawiono przykład dla stacji DK94 Sucha. W celu porównania ze sobą struktury ruchu na poszczególnych stacjach na rysunku 3.6 przedstawiono graficzne zestawienie wartości udziału poszczególnych pojazdów w ruchu ciężkim. Wartości udziału pojazdów w ruchu odznaczane są na rysunku 3.6 poziomą linią. Kolor linii przypisany jest danej stacji pomiarowej. Na przykład wartości zamieszczone na wykresie kolumnowym (rysunek 3.5) dla stacji DK94 Sucha są takie same jak wartości oznaczone poziomą linią na rysunku 3.6.



Rysunek 3.5. Przykład struktury ruchu ciężkiego na DK94



Rysunek 3.6. Zestawienie struktury ruchu ciężkiego na poszczególnych stacjach

Na wszystkich rozpatrywanych stacjach najczęściej występującym typem pojazdu jest pięcioosiowy ciągnik siodłowy z naczepą typu Cs+N 113, a jego udział w ruchu ciężkim wynosi od 32% do 68%. Innymi bardzo często obserwowanymi pojazdami są pojedyncze samochody ciężarowe typu C 11 (od 8 do 38%) oraz ciągniki siodłowe z naczepą typu Cs+N 112 (od 8% do 18%). Pozostałe typy pojazdów stanowią na badanych stacjach mniej niż 10% wszystkich pojazdów ciężkich. Warto dodać, że spośród 20 rozpatrywanych typów pojazdów łączny udział 7 najczęściej obserwowanych typów: C 11, C 12, Cs+N 112, Cs+N 113, C+P 112, C+P 1111 i A 11 na każdej stacji wynosi ponad 94%.

3.4.3. Udział poszczególnych typów osi pojazdów

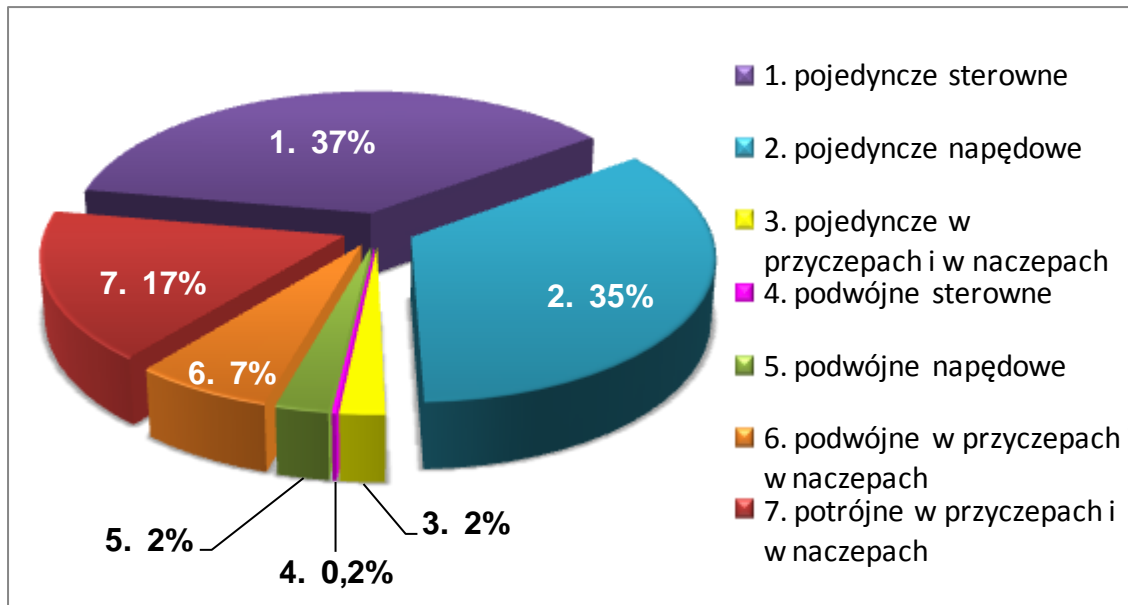
Osie pojazdów najlepiej jest grupować według ich cech charakterystycznych, czyli przeznaczenia, liczby kół w osi oraz odległości od osi sąsiednich (rozdzielenie na osie pojedyncze, podwójne i potrójne). W analizie zastosowano następujący podział osi w pojazdach:

- osie pojedyncze sterowne, występują jako pierwsza oś w pojeździe samochodowym,
- osie pojedyncze napędowe, występują jako druga oś w pojazdach samochodowych,
- osie pojedyncze w naczepach i w przyczepach,
- osie podwójne sterowne, występują jako pierwsza oś w pojazdach typu C 22 i C+P 2211,
- osie podwójne napędowe, występują jako druga oś w pojazdach samochodowych typu C 12, C 22, A 12, C+P 1211, C+P 1212, C+P 122, C+P 2211, Cs+N 121, Cs+N 122, Cs+N 123,
- osie podwójne w przyczepach i naczepach,
- osie potrójne, do których zaliczane są osie w naczepach pojazdów typu Cs+N 113 i Cs+N 123.

W tabelicy 3.5 zestawiono udziały poszczególnych typów osi w grupie wszystkich pojazdów ciężkich z rozróżnieniem poszczególnych stacji oraz średnią z wszystkich stacji, która przedstawiono również na rysunku 3.7. Z tabelicy 3.5 i z rysunku 3.7 wynika, że najczęściej występującymi osiami obok osi pojedynczych sterownych i pojedynczych napędowych są osie podwójne i potrójne w naczepach lub w przyczepach.

Tablica 3.5. Udział poszczególnych typów osi pojazdów w ruchu

Stacja WIM	Pojedyncze			Podwójne			Potrójne w przyczepach i w naczepach [%]
	Sterowne [%]	Napędowe [%]	W przyczepach i w naczepach [%]	Sterowne [%]	Napędowe [%]	W przyczepach i w naczepach [%]	
A2	34,4	32,3	2,1	0,0	2,1	6,6	22,5
S7	36,8	34,2	1,5	0,3	3,2	6,4	17,6
DK1	35,8	33,6	1,8	0,1	2,5	6,1	20,0
DK4	36,4	33,9	1,8	0,2	3,0	6,2	18,5
DK7	39,7	37,4	1,6	0,1	2,4	5,0	13,8
DK11	35,1	33,5	5,3	0,0	1,1	9,4	15,6
DK22	37,0	34,1	2,1	0,1	3,0	6,4	17,3
DK46	35,8	33,8	2,1	0,1	2,1	6,8	19,4
DK75	40,0	36,5	2,6	0,5	4,0	4,7	11,7
DK79	38,1	36,4	0,6	0,6	2,7	8,1	13,5
DK94	39,2	36,2	1,8	0,2	1,3	6,0	15,3
Średnia	37,1	34,7	2,1	0,2	2,5	6,5	16,8
	74,0			9,2			



Rysunek 3.7. Średni udział poszczególnych typów osi w ruchu

Na rysunku 3.8 zestawiono udział osi w zależności od grupy (osie pojedyncze, podwójne i potrójne), wyszczególniając autostradę A2 i drogę ekspresową S7 od pozostałych dróg. Dla dróg krajowych wyciągnięto średnią z 9 stacji WIM. Rysunek 3.8 zamieszczono również w celu porównania rodzajów pojazdów ciężkich poruszających się w Polsce (czyli także w Unii Europejskiej) i pojazdów poruszających się w USA. Należy uściślić, że udział poszczególnych typów osi w ruchu dla USA został obliczony w oparciu o domyślne dane podane w przewodniku MEPDG 2004 [46] (patrz rozdział 2.1.7) zgodnie ze wzorem:

$$UO_k = \frac{\sum_{t=4}^{13} TCD_t AGPV_{t,k}}{\sum_{k=1}^3 \sum_{t=4}^{13} TCD_t AGPV_{t,k}} \quad (3.1)$$

gdzie:

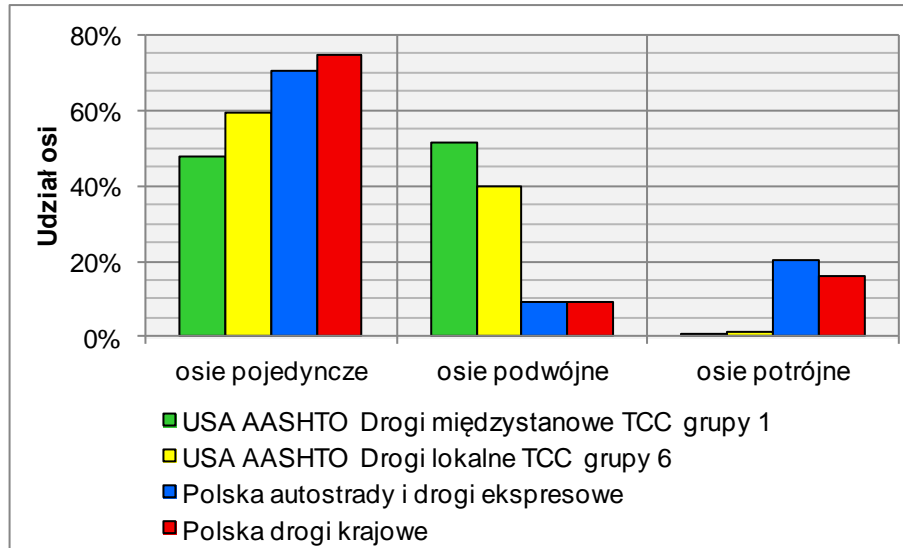
UO_k – udział osi typu k

k – numer typu osi: $k=1$ dla osi pojedynczych, $k=2$ dla osi podwójnych, $k=3$ dla osi potrójnych

t – numer klasy pojazdu wg klasyfikacji FHWA (klasy od 4 do 13)

TCD_t – (ang. Truck Traffic Distribution) – udział pojazdów klasy t w ruchu ciężkim (wartości domyślne z instrukcji MEPDG)

$AGPV_{t,k}$ – (ang. Average Number of Axle Group per Vehicle) – średnia liczba osi typu k dla danej klasy pojazdu t (wartości domyślne z instrukcji MEPDG)



Rysunek 3.8. Porównanie udziału poszczególnych typów osi na stacjach WIM w Polsce i w USA wg wartości domyślnych z metody MEPDG

Z rysunku 3.8 wynika, że w USA osie potrójne stanowią zaledwie 1% wszystkich osi, podczas gdy w Polsce udział ten średnio na drogach krajowych wynosi 16% a na autostradach i drogach ekspresowych 22%. W Stanach Zjednoczonych znacznie wyższy jest udział osi podwójnych, z kolei udział osi pojedynczych jest niższy niż w Polsce. Można wnioskować, że pojazdy poruszające się w USA i w Polsce znacząco różnią się pod względem konfiguracji osi.

3.4.4. Średnia liczba osi przypadająca na pojazd

Jednym z parametrów charakteryzujących strukturę ruchu ciężkiego jest średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki. Parametr ten wykorzystuje się do projektowania konstrukcji nawierzchni m.in. w metodzie MEPDG [46] jako wskaźnik AGPV oraz w katalogu niemieckim jako współczynnik liczby osi f_A [117]. W tabelicy 3.6 zestawiono wartości średniej liczby osi przypadającej na jeden pojazd dla każdej ze stacji. Do obliczenia średniej liczby osi osie podwójne liczone są jako dwie osie i osie potrójne jako trzy osie, a nie jako jedna oś. Wartości podane dla metody AASHTO obliczono zgodnie ze wzorem:

$$f_A = \sum_{k=1}^3 \sum_{t=4}^{13} TCD_t AGPV_{t,k} \quad (3.2)$$

gdzie:

f_A – średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki
pozostałe oznaczenia jak we wzorze 3.1.

Tablica 3.6. Średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki na polskich stacjach WIM oraz wg katalogu niemieckiego RSTO 01 [117] i wg metody MEPDG [46]

Kraj	Droga	Średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd ciężki f_A
Polska Stacje ważenia WIM	A2	4,51
	S7	3,91
	DK1	4,16
	DK4	4,04
	DK7	3,59
	DK11	4,04
	DK22	3,91
	DK46	4,18
	DK75	3,36
	DK79	3,55
	DK94	3,61
Niemcy Katalog niemiecki RSTO 01 [117]	Autostrady	4,20
	Drogi krajowe	3,70
	Pozostałe drogi	3,10
USA MEPDG (wartości domyślne) [46]	Drogi międzystanowe TCC grupy 1	2,99
	Drogi lokalne TCC grupy 6	2,65

Jak wynika z tablicy 3.6 średnia liczba osi przypadająca na jeden pojazd w USA jest niższa niż w Polsce i Niemczech, wynika to z innej struktury ruchu i konfiguracji osi w pojazdach na drogach w USA niż na drogach w krajach UE. Struktura ruchu ciężkiego w Polsce jest podobna do struktury w Niemczech, świadczą o tym zbliżone wartości współczynników f_A .

3.5. Analiza średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów ciężkich

3.5.1. Metodyka obliczeń

W rozdziale 2 opisano cztery metody obliczania współczynników równoważności obciążenia osi: metodę AASHTO, wzór czwartej potęgi, metodę francuską i metodę Politechniki Gdańskiej. W niniejszym rozdziale przedstawiono obliczenia z wykorzystaniem pomiarów nacisków osi pojazdów ze stacji WIM, wykonane według przytoczonych metod, których wynikiem są średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów.

Kolejność obliczeń przy wyznaczaniu średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów była następująca:

1. Obliczono współczynniki równoważności obciążenia każdego pojazdu z osobna zgodnie ze wzorem:

$$F_v = \sum_{j=1}^{n_o} F_j \quad (3.3)$$

gdzie:

F_v – współczynnik równoważności obciążenia pojedynczego pojazdu, czyli liczba przejazdów osi standardowej 100 kN równoważna jednemu przejazdowi danego pojazdu,

F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi j w pojeździe z uwzględnieniem typu osi (pojedyncza, podwójna, potrójna),

j – numer kolejnej osi w pojeździe,

n_o – liczba osi w pojeździe.

2. Obliczono średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów w danej grupie zgodnie ze wzorem:

$$F_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} F_{v,i} \quad (3.4)$$

gdzie:

F_t – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów t ,

i – kolejne pojazdy w grupie pojazdów t ,

n_t – liczba pojazdów t , jaka przejechała w rozpatrywanym okresie czasu,

t – kategoria lub typ pojazdu, t przyjmuje oznaczenia zgodnie z rys. 3.4.

3.5.2. Porównanie metod wyznaczania współczynników równoważności obciążenia pojazdów

Porównanie metod przedstawiono dla wyników obliczeń tylko dla jednej stacji DK46 ze względu na czytelność analizy. Próba pomiarowa ze stacji DK46 jest duża i obejmuje trzy pełne lata. Celem porównania jest przede wszystkim wskazanie różnic w wynikach otrzymanych z różnych metod obliczeniowych dla tego samego ruchu.

Opis stosowanych metod obliczeniowych oraz odpowiednie wzory zamieszczono w rozdziale 2.3. W przypadku metody AASHTO [2] i metody Politechniki Gdańskiej [80] należy uściślić dane niezbędne do obliczenia współczynników. Danymi tymi są: w przypadku metody AASHTO liczba strukturalna nawierzchni SN i wskaźnik przydatności eksploatacyjnej nawierzchni na końcu okresu projektowego p_t , a w przypadku metody PG ciśnienie kontaktowe, typ konstrukcji nawierzchni i konfiguracja kół i osi w pojeździe. Do analiz przyjęto typowe konstrukcje

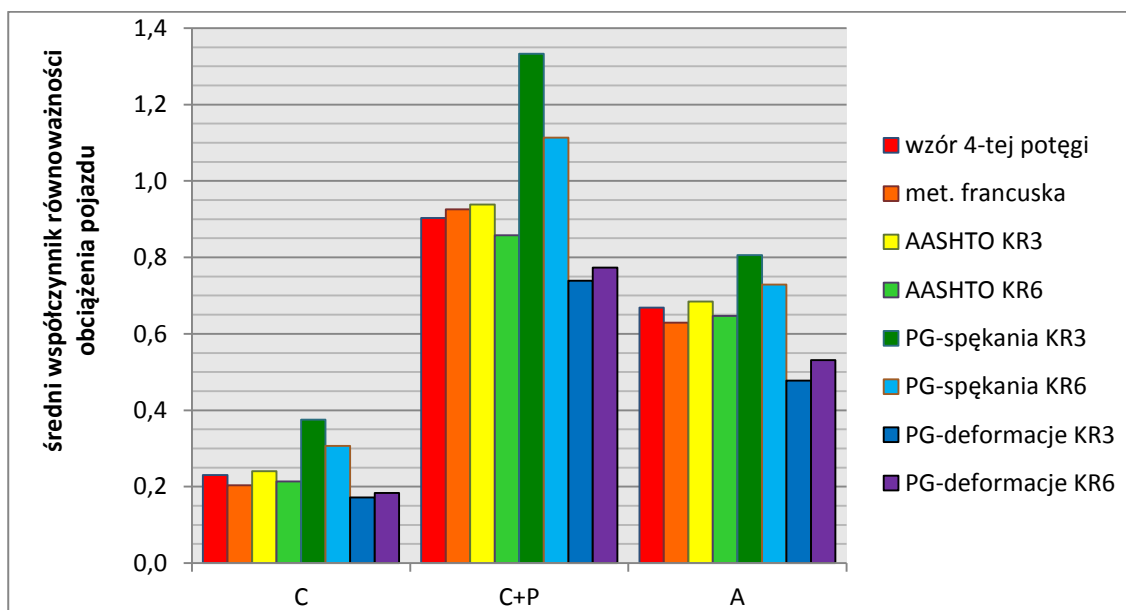
nawierzchni podatnych i półsztywnych według katalogu z 1997 r. [78]. Dane dotyczące założeń do obliczeń przedstawiono w tabelicy 3.7. Na rysunku 3.9 przedstawiono porównanie współczynników równoważności obciążenia pojazdów określone dla nawierzchni podatnych.

Tablica 3.7. Założenia do obliczeń współczynników równoważności obciążenia pojazdów wg metody AASHTO i metody PG

Typ konstrukcji	Założenia do metody AASHTO		Założenia do metody PG		
	SN ¹⁾	p _t ²⁾	Układ warstw konstrukcji	Ciśnienie kontaktowe	Układ kół w pojeździe
KR3 podatna	4,27	2,5	Warstwy z AC 18 cm Podbudowa z MN 20 cm	850 kPa	Osie napędowe – koła bliźniacze Pozostałe osie - koła pojedyncze
KR6 podatna	6,54	2,5	Warstwy z AC 31 cm Podbudowa z MN 20 cm		
KR3 półsztywna	Nie dotyczy		Warstwy z AC 14 cm Podbudowa z MZSH 20 cm		
KR6 półsztywna	Nie dotyczy		Warstwy z AC 25 cm Podbudowa z MZSH 22 cm		

1) liczba strukturalna konstrukcji nawierzchni wyznaczona wg metody AASHTO [2]

2) wskaźnik przydatności eksploatacyjnej nawierzchni na końcu okresu projektowego



Rysunek 3.9. Porównanie średnich współczynników równoważności obciążenia w poszczególnych kategoriach pojazdów na przykładzie stacji DK46. Nawierzchnie podatne

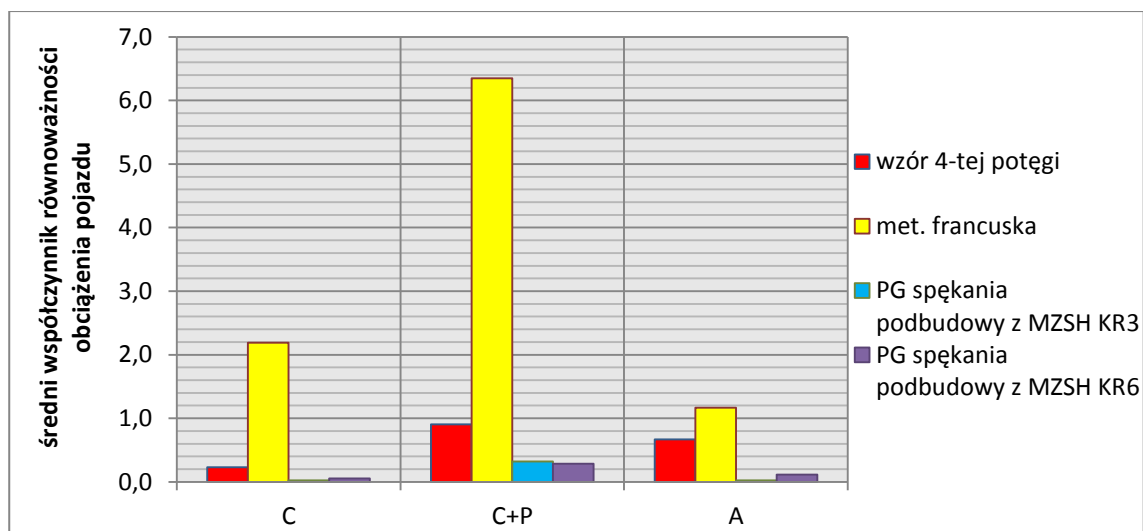
Współczynniki określone według metody AASHTO, metody francuskiej i wzoru czwartej potęgi są zbliżone a względne różnice nie przekraczają 11%. Znaczne różnice stwierdzono w metodzie PG. Współczynniki równoważności są wyższe w przypadku kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych i niższe w przypadku kryterium deformacji podłoża. Względna różnica średnich współczynników równoważności obliczonych wg metody PG w stosunku do wzoru

czwartej potęgi zależy od kategorii pojazdów i konstrukcji nawierzchni i dochodzi do 63% w przypadku kryterium spękań warstw asfaltowych konstrukcji KR3 w kategorii pojazdów C. Warto zwrócić uwagę, że wartość współczynników równoważności wg metody PG dla kryterium spękań zmęczeniowych jest wyższa dla konstrukcji cieńszych KR3, dla kryterium deformacji podłoża sytuacja jest odwrotna i współczynnik równoważności jest wyższy dla konstrukcji grubszych KR6.

Wyjaśnienia rozbieżności w obliczonych wartościach współczynników równoważności według poszczególnych metod należałoby szukać w różnicach w samych metodach. Metoda PG została opracowana z zastosowaniem kryteriów zmęczeniowych warstw asfaltowych oraz na podstawie odkształceń i naprężeń w nawierzchni obliczonych z wykorzystaniem teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Z drugiej strony metoda AASHTO i jej uproszczenie w postaci wzoru czwartej potęgi powstały w oparciu o pomiary zmiany stanu nawierzchni pod wpływem oddziaływania ruchu na odcinkach doświadczalnych. Należy zwrócić uwagę na kryterium krytycznego stanu nawierzchni na końcu okresu obliczeniowego w obu metodach. W metodzie PG kryterium tym jest procent powierzchni spękanej względem całej powierzchni nawierzchni lub też głębokość koleiny strukturalnej. W metodzie AASHTO kryterium jest wskaźnik p_t , czyli PSI na końcu okresu obliczeniowego. PSI jest funkcją powierzchni spękań nawierzchni, całkowitej głębokości koleiny oraz równości nawierzchni, przy czym decydującym czynnikiem jest równość nawierzchni, natomiast spękania w niewielkim stopniu wpływają na wartość PSI.

Na rysunku 3.10 zamieszczono współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone dla nawierzchni półsztywnych według metody francuskiej i metody PG, oraz obliczone wg wzoru czwartej potęgi. Należy zaznaczyć, że zarówno w metodzie francuskiej, jak i w metodzie PG współczynniki równoważności obciążenia określone są dla kryterium spękań zmęczeniowych warstw związanych spoiwem hydraulicznym.

Stwierdzono, że wyniki otrzymane według metody francuskiej są bardzo wysokie, wątpliwym jest zatem zasadność przełożenia tej metody do warunków polskich. We Francji oś standardowa, jak i dopuszczalne obciążenie osi pojazdów wynosi 130 kN, do tego obciążenia osi opracowano również metodę obliczeniową. W Polsce dopuszczalne obciążenie osi wynosi 115 kN, a obciążenie osi standardowej 100 kN. W odróżnieniu od nawierzchni podatnych, w przypadku nawierzchni półsztywnych wartość maksymalnego obciążenia osi ma istotne znaczenie przy określaniu współczynników równoważności obciążenia. Współczynniki równoważności wyznaczone wg metody PG dla nawierzchni KR3 i KR6 są znacznie niższe niż obliczone według wzoru czwartej potęgi. Metody określania współczynników równoważności obciążenia dla nawierzchni półsztywnych dają rozbieżne wyniki i nie są jeszcze dobrze poznane.



Rysunek 3.10. Porównanie średnich współczynników równoważności obciążenia w poszczególnych kategoriach pojazdów na przykładzie stacji DK46 dla nawierzchni półsztywnych

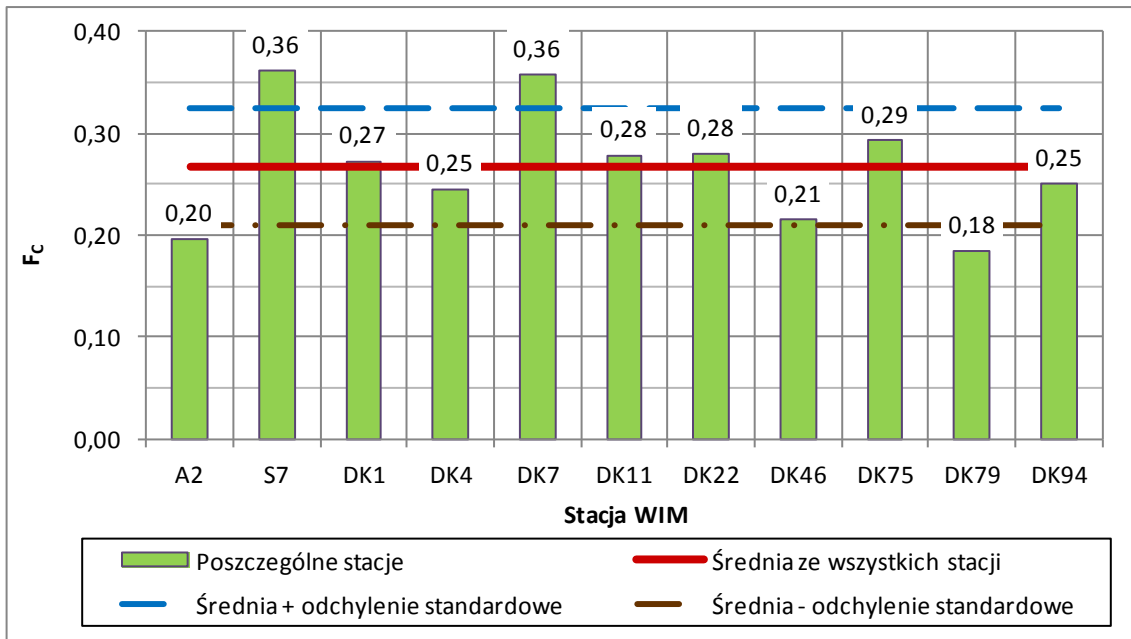
Z analizy rysunków 3.9 i 3.10 można stwierdzić, że obliczenia średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdu wykonane według wzoru czwartej potęgi nigdy nie dają skrajnych wyników. Wyniki otrzymane ze wzoru czwartej potęgi dostarczają wypośredkowanej informacji o oddziaływaniu danego typu lub kategorii pojazdów na nawierzchnie podatne i półsztywne. Ze względu na czytelność, dalszą analizę przedstawiono w oparciu o obliczenia wykonane według wzoru czwartej potęgi. Należy jednak mieć na uwadze, że zastosowanie innej metody określania współczynników równoważności obciążenia pojazdów, w szczególności metody mechanistyczno-empirycznej Politechniki Gdańskiej, mogłoby dać nieznacznie inne wyniki.

3.5.3. Analiza średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów obliczonych według wzoru czwartej potęgi

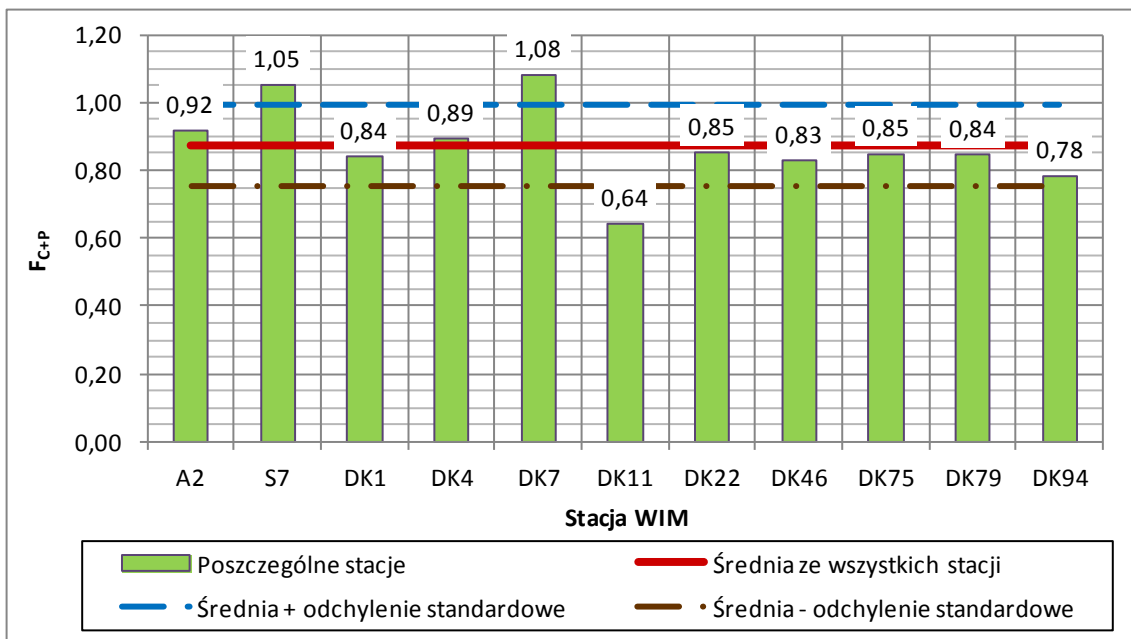
Średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów obliczono niezależnie dla każdej ze stacji grupując pojazdy na dwa sposoby:

- 1) w zależności od kategorii pojazdu (rys. 3.11-3.13)
- 2) w zależności od typu pojazdu (załącznik A.2 i rys. 3.14)

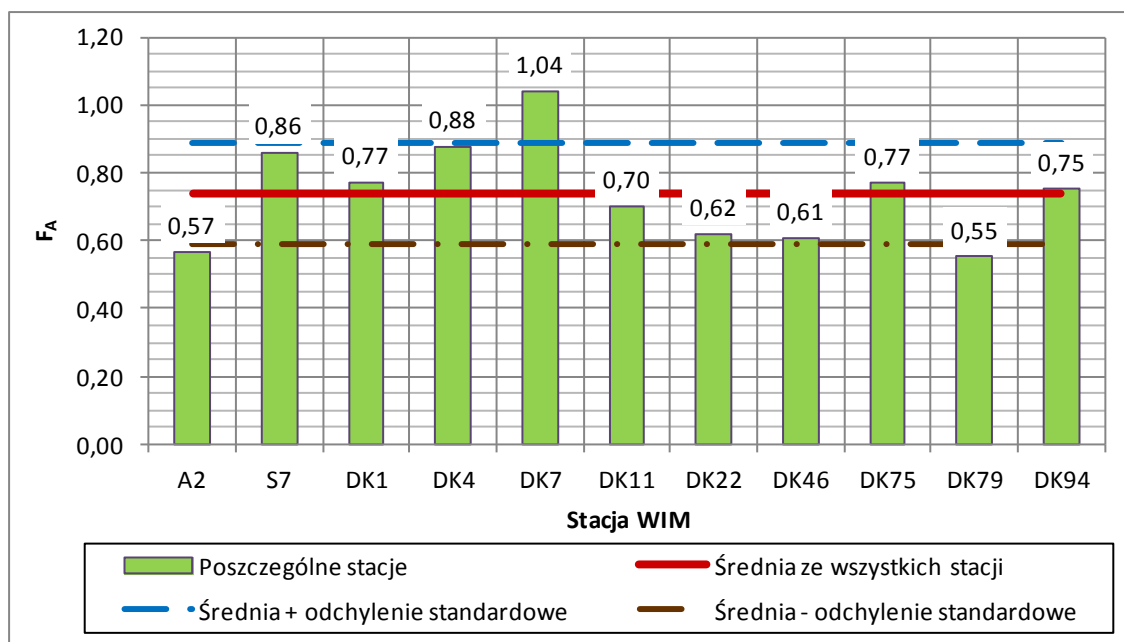
Dodatkowo na rys. 3.11-3.13 zaznaczono średnią obliczoną dla wyników z 11 stacji WIM oraz zaznaczono średnią odpowiednio powiększoną i pomniejszoną o odchylenie standardowe σ .



Rysunek 3.11. Średnie współczynniki równoważności obciążenia samochodów ciężarowych bez przyczepy według wzoru czwartej potęgi

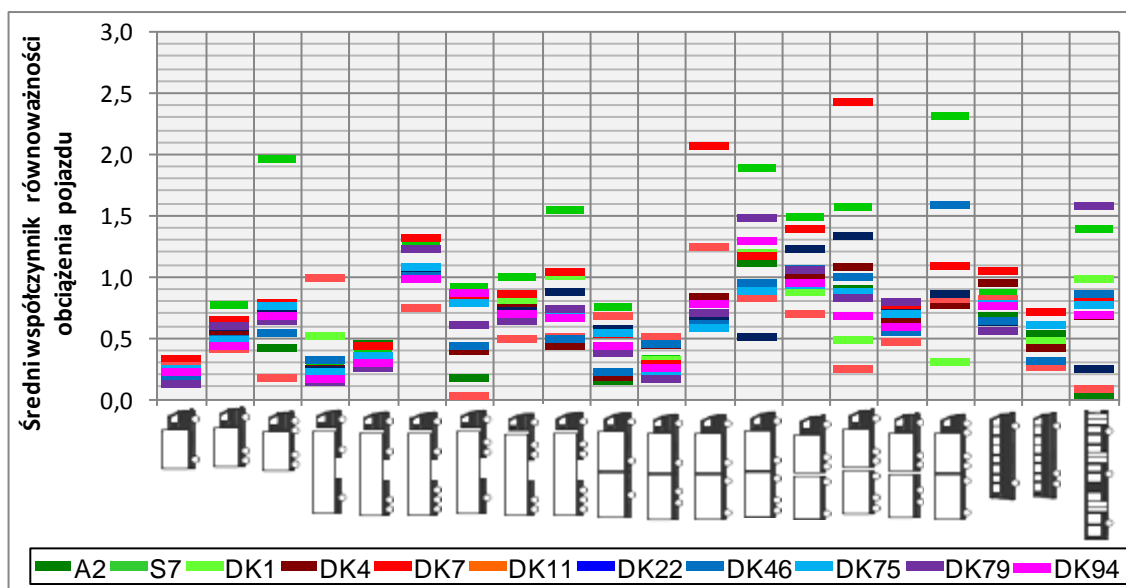


Rysunek 3.12. Średnie współczynniki równoważności obciążenia samochodów ciężarowych z przyczepami według wzoru czwartej potęgi



Rysunek 3.13. Średnie współczynniki równoważności obciążenia autobusów według wzoru czwartej potęgi

Z rysunków 3.11-3.13 można odczytać, że samochody ciężarowe bez przyczep mają najniższe średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów. Warto zwrócić uwagę na różnice w obliczonych współczynnikach F_C , F_{C+P} i F_A na poszczególnych stacjach. Najwyższe wartości współczynników F_C , F_{C+P} i F_A stwierdzono na stacji DK7, najniższy współczynnik F_{C+P} na stacji DK11 i najniższe współczynniki F_C i F_A na stacji DK79. Różnice te oznaczają, że na poszczególnych drogach obciążenie i oddziaływanie pojazdów na nawierzchnie drogowe jest różne. Najmniejsze różnice pomiędzy średnimi współczynnikami równoważności obciążenia pojazdu określonymi dla poszczególnych stacji stwierdzono w przypadku samochodów ciężarowych bez przyczepy, największe w przypadku autobusów.



Rysunek 3.14. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów według wzoru czwartej potęgi

W poszczególnych kategoriach występują pojazdy o różnych średnich współczynnikach równoważności obciążenia, czyli o różnym stopniu oddziaływania na nawierzchnię. Z rysunku 3.14 można odczytać, że średnie współczynniki równoważności obciążenia niektórych typów pojazdów (np. $F_{C+P\ 1111}$) mogą znacznie różnić się od siebie lub w innych przypadkach (np. $F_{C\ 11}$ lub $F_{Cs+N\ 112}$) mają zbliżone wartości. Warto porównać wartości $F_{Cs+N\ 113}$ i $F_{Cs+N\ 112}$ (rys. 3.14). Jak wynika z rozkładu masy całkowitej tych pojazdów (por. rys. 3.22 na stronie 85) pojazdy $Cs+N\ 112$ przeważnie nie przewożą ładunku, co ma bezpośrednie przełożenie na ich niższy stopień oddziaływania na nawierzchnię niż w przypadku pojazdów $Cs+N\ 113$.

Na wartość średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu bardzo istotnie wpływa konfiguracja osi w pojeździe, czego dobrym przykładem jest porównanie średnich współczynników równoważności obciążenia autobusów i samochodów ciężarowych z przyczepą. Średnie współczynniki równoważności obciążenia dla autobusów są niewiele niższe niż dla samochodów ciężarowych z przyczepą. Jak wynika ze struktury ruchu, w kategorii pojazdów A przeważają dwuosiowe autobusy, których masa całkowita nie przekracza 20 ton, podczas gdy w kategorii pojazdów C+P najwięcej jest 5-osiowych pojazdów typu $Cs+N\ 113$, których zdecydowana większość ma masę powyżej 20 ton a masa dopuszczalna wynosi 40 ton (występują również pojazdy przeciążone). Wysoka wartość współczynnika równoważności autobusów wynika z wysokich nacisków przekazywanych przez tylną oś tych pojazdów. W pojazdach typu $Cs+N\ 113$ znaczna część obciążenia przekazywana jest przez oś potrójną. Obciążenie osi potrójnej rzadko przekracza wartość mianownika we wzorze czwartej potęgi dla tych osi, który jest równy 263 kN. Jak wynika ze wzoru czwartej potęgi oddziaływanie osi potrójnych o rzeczywistym obciążeniu jest niższe w stosunku do

osi pojedynczych napędowych w autobusach, których obciążenie przeważnie zbliżone jest do wartości 100 kN.

Obliczone średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów porównano z odpowiadającymi im współczynnikami podanymi w metodach określania ruchu projektowego, stosowanych w wybranych krajach europejskich. Zestawienie współczynników zamieszczono w tabeli 3.8. Szczegóły dotyczące poszczególnych metod obliczania ruchu projektowego znaleźć można w rozdziale 2.1 oraz w publikacji [124]. Z porównania wynika, że współczynniki przeliczeniowe z polskiego katalogu z 1997 r. [142] mają inne wartości niż wyznaczono na podstawie danych WIM. Obliczone średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów mają podobne wartości do odpowiadających im współczynników podanych w katalogach niemieckim [117], austriackim [124] czy raporcie TRL [9] zawierającym wyniki analiz pomiarów WIM na drogach w Wielkiej Brytanii. Współczynniki stosowane w katalogu francuskim są wyższe, lecz należy pamiętać, że we Francji dopuszcza się również większe obciążenia osi pojazdów 130 kN, co przekłada się na wyższe obciążenia osi i wyższe współczynniki równoważności obciążenia pojazdów. Współczynniki stosowane w metodzie brytyjskiej powstały jako iloczyn średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów otrzymany na podstawie danych WIM z dróg brytyjskich i współczynników bezpieczeństwa, stąd ich wartości są wyższe niż współczynników obliczonych na podstawie pomiarów na polskich stacjach WIM, które podano w tabeli 3.8 jako wyniki obliczeń bez współczynników bezpieczeństwa.

Tablica 3.8. Porównanie średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów ze współczynnikami stosowanymi do projektowania nawierzchni w wybranych krajach UE

Katalog lub metoda projektowania nawierzchni / pomiary WIM		Współczynnik równoważności obciążenia pojazdu (przeliczone do obciążenia osi standardowej 100 kN)			
		Łącznie pojazdy ciężkie	Kategoria pojazdów		
			C	C+P	A
Pomiary WIM w Polsce (przedział) Obliczenia wg wzoru czwartej potęgi		0,570-0,849	0,185-0,362	0,642-1,080	0,554-1,041
Polski katalog nawierzchni podatnych i półsztywnych z 2013 r. [78]	Autostrady i drogi ekspresowe	Nie podano	0,5	1,95	1,25
	Drogi krajowe	Nie podano	0,5	1,80	1,20
	Pozostałe drogi	Nie podano	0,45	1,70 1,60 ¹⁾	1,15 1,05 ¹⁾
Polski katalog nawierzchni podatnych i półsztywnych z 1997 r.[142]		Nie podano	0,109	1,245 1,95	0,594
RSTO 01 [117]	Autostrady	1,092	nie rozróżnia się kategorii pojazdów		
	Drogi krajowe	0,74			
	Pozostałe drogi	0,558			
Katalog austriacki [124]	Autostrady	1	0,7	1,2	0,6 - 1,4
	Pozostałe drogi	0,9			
Katalog francuski [18]		1,14 - 2,29 (zależnie od natężenia ruchu)	nie rozróżnia się kategorii pojazdów		
Metoda brytyjska [34]	drogi nowe ³⁾	nie podano	0,4 ²⁾	1,8	0,4 ²⁾
	drogi remontowane ³⁾		0,2 ²⁾	1,2	0,2 ²⁾
Pomiary WIM w UK (TRL PPR 066) [9]		nie podano	0,2 ²⁾	0,91	0,2 ²⁾

1) W przypadku, gdy dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej do projektowania nawierzchni wynosi 100 kN

2) Kategorie pojazdów w metodzie brytyjskiej nieznacznie różnią się od kategorii polskich. W brytyjskiej metodzie współczynniki podawane są łącznie dla kategorii OGV1 (odpowiednik C) i PSV (autobusy). Dodatkowo do kategorii OGV2 (odpowiednik C+P) przypisuje się samochody ciężarowe typu C22

3) W metodzie brytyjskiej średnie współczynniki równoważności obciążenia osi podawane są osobno dla dróg nowoprojektowanych i dróg istniejących, na których projektuje się remont

3.5.4. Agresywność względna pojazdów

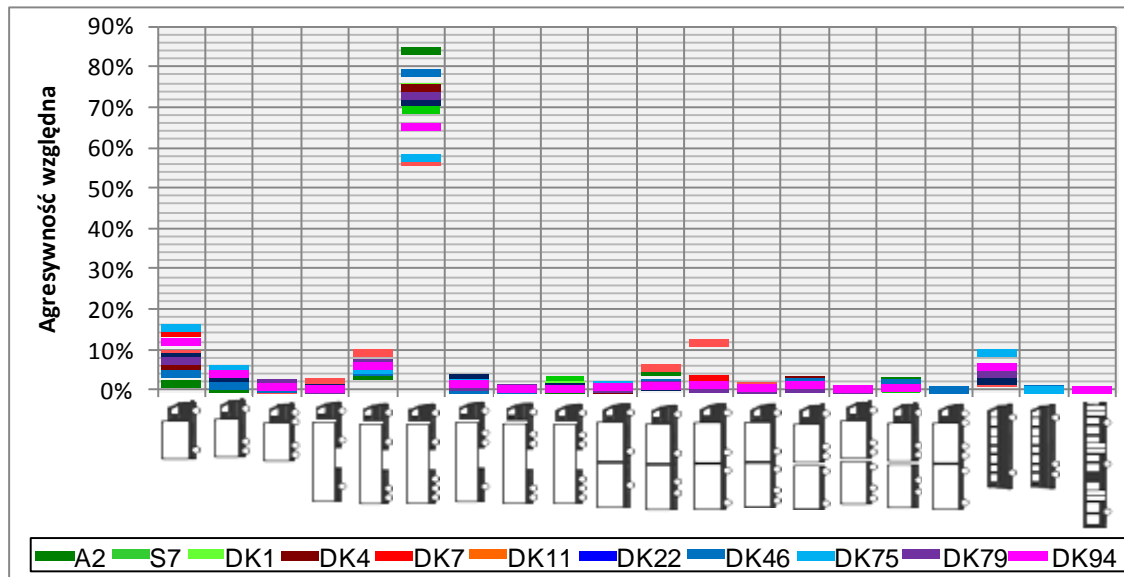
W celu poznania udziału poszczególnych typów pojazdów w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni wywoływanej przez ruch ciężki wprowadzono miarę tzw. agresywności względnej pojazdów. Agresywność względną obliczono stosując wzór 3.5. Analizę agresywności względnej pojazdów oparto o obliczenia średnich współczynników równoważności pojazdów wg wzoru czwartej potęgi.

$$A_t = \frac{n_t F_t}{\sum_{t=1}^N n_t F_t} \quad (3.5)$$

gdzie:

- A_t – agresywność względna oddziaływania pojazdu typu t na nawierzchnię [%],
- F_t – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów typu t, obliczony wg wzoru czwartej potęgi,
- n_t – sumaryczna liczba pojazdów danego typu t,
- t – typ pojazdu, t przyjmuje oznaczenia zgodnie z rys. 3.4
- N – liczba wszystkich typów pojazdów ciężkich (N=20).

Wyniki obliczeń w zależności od poszczególnych typów pojazdów zamieszczono w załączniku A.3 oraz na rys. 3.15. Z przedstawionych obliczeń wynika, że zdecydowanie największy wpływ na szkodę zmęczeniową nawierzchni mają pojazdy typu Cs+N 113, których agresywność wynosi 58-85%. Pojazdy te cechuje najwyższa liczebność spośród wszystkich pojazdów ciężkich i wysoki, lecz nie najwyższy, średni współczynnik równoważności obciążenia F_t .



Rysunek 3.15. Agresywność względna A_t poszczególnych typów pojazdów t w oparciu o wzór czwartej potęgi

3.6. Obciążenie pojazdów

3.6.1. Matematyczny opis rozkładów masy całkowitej pojazdów lub rozkładów obciążenia osi pojazdów

Rozkłady masy całkowitej lub obciążenia osi można wyrazić w sposób dyskretny poprzez obliczenie procentowego udziału liczby osi w kolejnych przedziałach obciążenia, zgodnie ze wzorem:

$$p(Q_i) = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^m n_i} \quad (3.6)$$

gdzie:

$p(Q_i)$ – udział procentowy osi o obciążeniu z przedziału Q_i ,

n_i – liczba osi w przedziale obciążenia Q_i ,

i – kolejne numery przedziałów osi,

m – łączna liczba przedziałów obciążenia osi.

W analogiczny sposób można określić rozkład masy całkowitej pojazdów.

Model rozkładu obciążenia osi pojazdu lub rozkładu masy całkowitej można określić na dwa sposoby:

- 1) jako równanie regresji dystrybuanty,
- 2) jako funkcję rozkładu prawdopodobieństwa.

Równanie regresji rozkładu obciążenia osi lub masy pojazdu można opisać za pomocą następującej funkcji skumulowanego rozkładu prawdopodobieństwa (dystrybuanty) [86] [171]:

$$CF = a_1 Q_1 + a_2 Q_2 + \dots + a_n Q_n + a_i \quad (3.7)$$

gdzie:

$a_1, a_2, \dots, a_n, a_i$ – współczynniki regresji,

Q_1, Q_2, Q_n – obciążenie osi, wzgl. masa całkowita pojazdu

CF – skumulowany rozkład prawdopodobieństwa,

n – liczba przyjętych w modelu przedziałów obciążenia.

Jak wynika ze studiów literatury [48], [49], [50], [159] rozkład obciążenia osi pojazdów można zamodelować za pomocą rozkładu złożonego z dwóch rozkładów normalnych. Na rysunku 3.16 przedstawiono schemat złożonego rozkładu dwumodalnego. Wzór ogólny na model rozkładu złożonego z dwóch lub więcej rozkładów można przedstawić w sposób następujący:

$$f^* = \sum_i^n p_i f_i \quad (3.8)$$

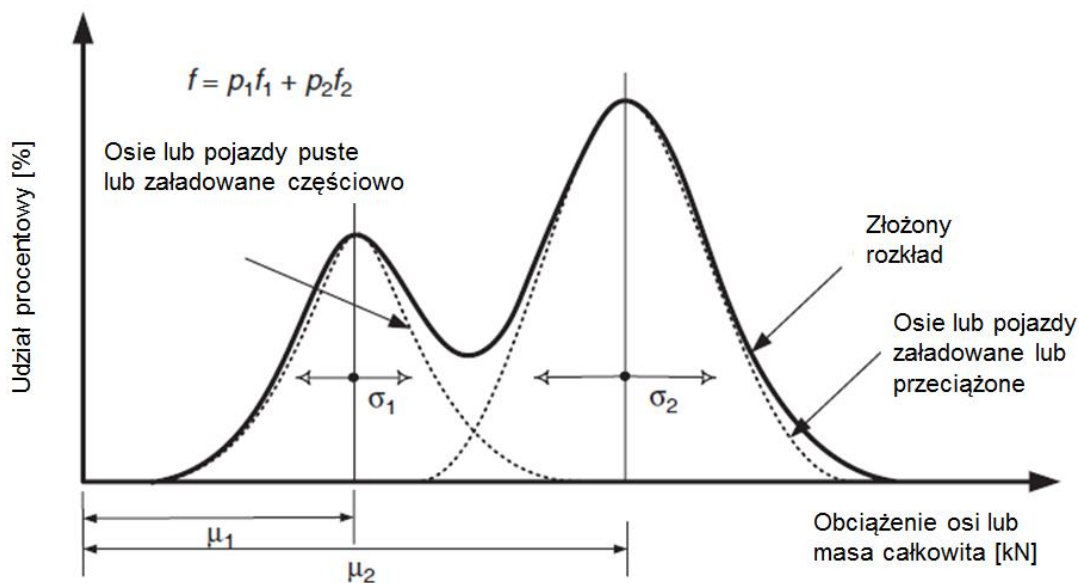
gdzie:

f^* – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa rozkładu złożonego,

- i – numer i -tej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa,
- n – liczba zastosowanych w modelu funkcji rozkładów prawdopodobieństwa,
- p_i – proporcja (waga) dla każdej i -tej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa,
- f_i – i -ta funkcja rozkładu prawdopodobieństwa.

Jak wynika z rysunku 3.16 do scharakteryzowania złożonego rozkładu dwumodalnego potrzebnych jest 5 parametrów ($\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, p_1$, przy czym $p_2=1-p_1$). Najistotniejszym etapem tworzenia modelu rozkładu jest estymacja parametrów rozkładu, którą można przeprowadzić stosując jeden ze sposobów:

1. Wg Tima i wsp. [159] parametry rozkładu można dobierać iteracyjnie, w taki sposób, aby zapewnić najlepsze dopasowanie rozkładu teoretycznego do rozkładu dyskretnego, określonego z pomiaru. Do mierzenia mocy dopasowania stosuje się współczynnik determinacji R^2 który osiąga maksimum dla najlepszego dopasowania parametrów.
2. Wg Haidera i Harichandrana [48], [49], [50] parametry rozkładu można obliczyć przyrównując trzy pierwsze momenty centralne wyznaczone dla rozkładu dyskretnego (z pomiaru) i rozkładu teoretycznego.



Rysunek 3.16. Schemat złożonego rozkładu dwumodalnego

Aby przyrównać momenty centralne wpieryw należy wyznaczyć równanie momentów centralnych dla rozkładu złożonego, dwumodalnego. Ogólna postać równania na n -ty moment centralny $m^{(n)}$ jest następująca:

$$m^{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f^*(x) dx \quad (3.9)$$

gdzie:

$f^*(x)$ – funkcja rozkładu prawdopodobieństwa rozkładu złożonego.

Pierwszym momentem centralnym rozkładu prawdopodobieństwa jest wartość oczekiwana. Równanie wartości oczekiwanej przyjmuje postać:

$$\mu^* = \int_{-\infty}^{\infty} x f^*(x) dx = p_1 \mu_1 + p_2 \mu_2 \quad (3.10)$$

gdzie:

μ^* – wartość oczekiwana rozkładu dwumodalnego,
pozostałe oznaczenia wg rysunku 3.16.

Równanie wariancji (drugiego momentu centralnego), jest następujące:

$$\sigma^{2*} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu^*)^2 f^*(x) dx = p_1 \sigma_1^2 + p_1 (\mu_1 - \mu)^2 + p_2 \sigma_2^2 + p_2 (\mu_2 - \mu)^2 \quad (3.11)$$

gdzie:

σ^{2*} – wariancja rozkładu dwumodalnego,
pozostałe oznaczenia wg rysunku 3.16.

Trzecim momentem centralnym jest skośność, której równaniem jest:

$$\begin{aligned} \gamma^* &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu^*)^3 f^*(x) dx = \\ &= 3p_1 (\mu_1 - \mu) \sigma_1^2 + p_1 (\mu_1 - \mu)^3 + 3p_2 (\mu_2 - \mu) \sigma_2^2 + p_2 (\mu_2 - \mu)^3 \end{aligned} \quad (3.12)$$

gdzie:

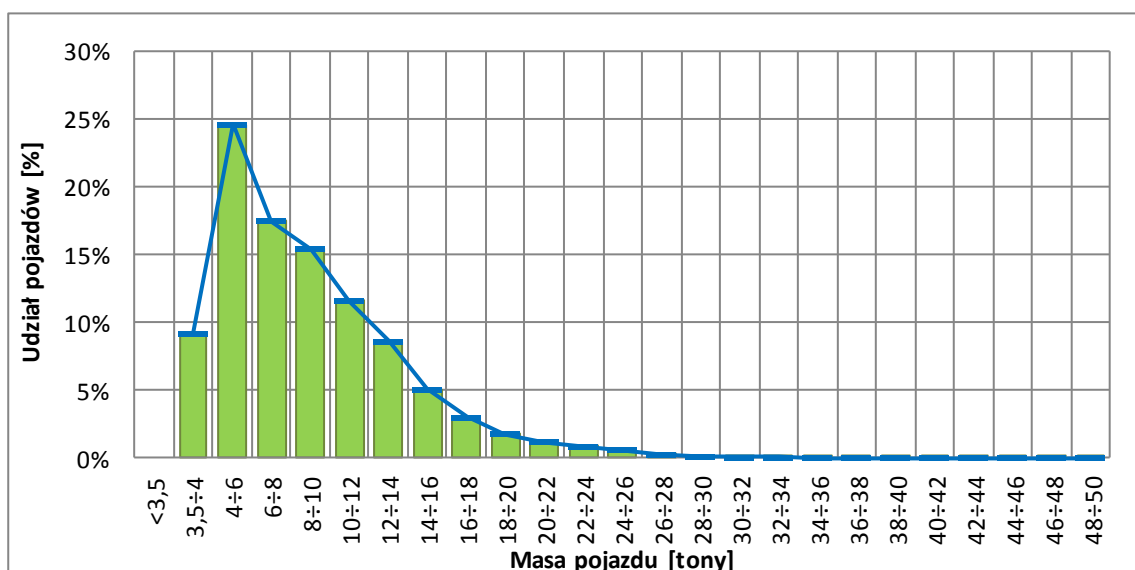
γ^* – skośność (trzeci moment centralny) rozkładu dwumodalnego,
pozostałe oznaczenia wg rysunku 3.16.

Według procedury podanej w [50] wielkości μ^* , σ^{2*} , γ^* określa się na podstawie pomiaru. Wartości oczekiwane μ_1 i μ_2 przyjmuje się w miejscu maksimum lokalnego rozkładu lub przyjmuje się na zasadzie najlepszego dopasowania rozkładu teoretycznego do wartości z pomiaru. Pozostałe niewiadome, czyli σ_1 , σ_2 , p_1 , oblicza się z układu trzech równań (3.10), (3.11) i (3.12).

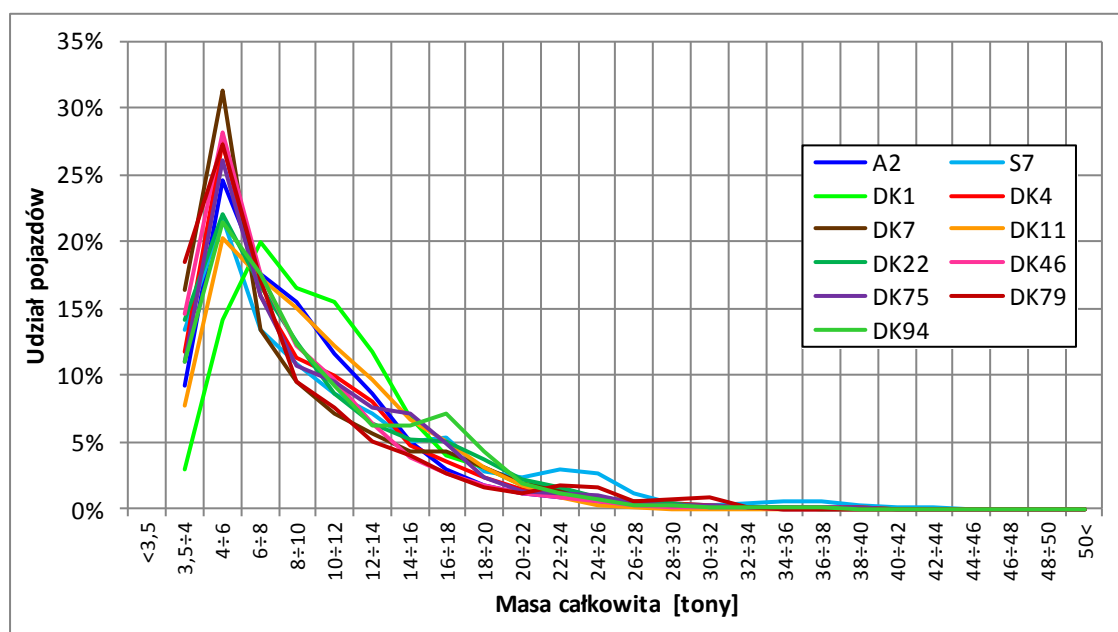
3.6.2. Rozkłady masy całkowitej pojazdów

Rozkłady masy całkowitej określono w sposób dyskretny, korzystając ze wzoru (3.6). Przyjęto przedział masy całkowitej równy 2 tony, przy czym dolna granica masy całkowitej pojazdów wynosi 3,5 tony, co wynika z definicji pojazdu ciężkiego. Rozkłady sporządzono w zależności od kategorii pojazdów, osobno dla wszystkich stacji pomiarowych i zamieszczono w załączniku A.4. Przykład rozkładu dyskretnego masy całkowitej samochodów ciężarowych bez przyczep (kategoria

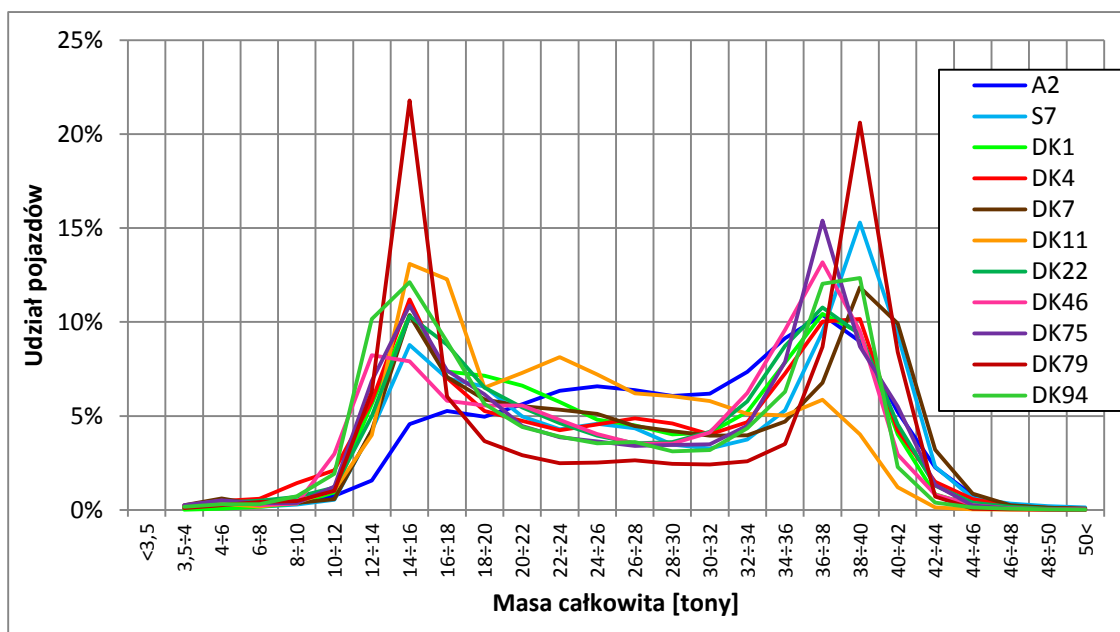
C), sporządzony dla stacji A2 Emilia przedstawiono na rysunku 3.17. Niebieska linia na rysunku 3.17 łączy punkty udziału procentowego pojazdów o masie z kolejnych przedziałów. Na rysunkach 3.18 przedstawiono zestawienie rozkładów masy całkowitej samochodów ciężarowych bez przyczep sporządzone dla wszystkich stacji na jednym wykresie w formie histogramów liniowych (niebieska linia dla stacji A2 odpowiada linii z rysunku 3.17). Podobnie na rysunku 3.19 przedstawiono zestawienie histogramów masy całkowitej samochodów ciężarowych z przyczepą a na rysunku 3.20 histogramów masy całkowitej autobusów.



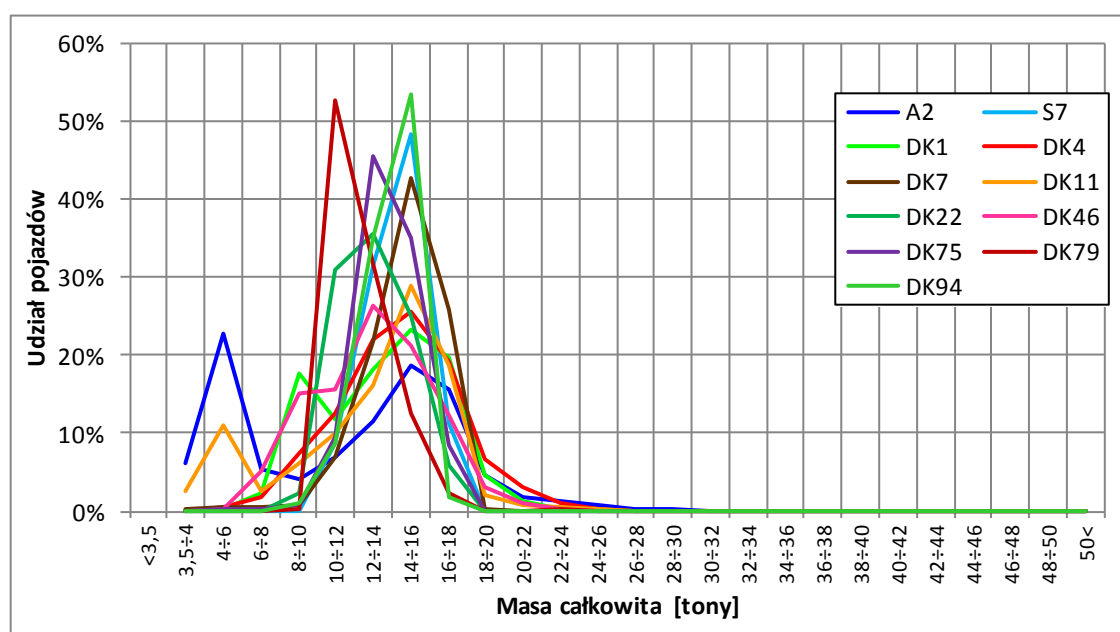
Rysunek 3.17. Przykładowy rozkład masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji A2 Emilia



Rysunek 3.18. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na wszystkich analizowanych stacjach



Rysunek 3.19. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na wszystkich analizowanych stacjach



Rysunek 3.20. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na wszystkich analizowanych stacjach

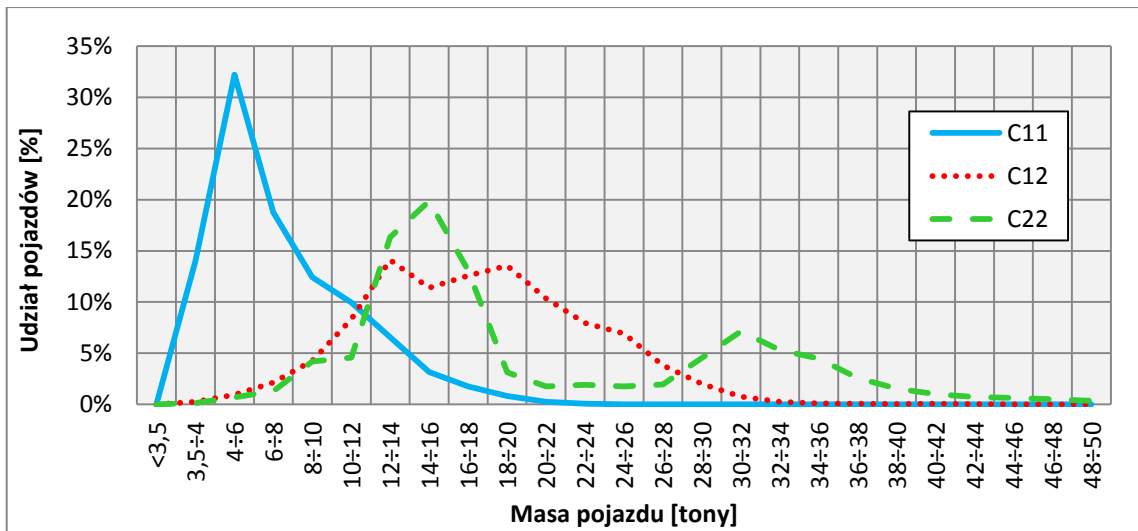
Z porównania rozkładów masy całkowitej na poszczególnych stacjach, przedstawionych na rysunkach 3.18 - 3.20 można wnioskować, że w zależności od kategorii pojazdów kształt rozkładu masy całkowitej pojazdów różni się, zatem struktura ruchu ciężkiego ma istotny wpływ na oddziaływanie pojazdów. Po przeanalizowaniu rozkładów masy całkowitej można sformułować następujące spostrzeżenia:

1. Rozkłady masy całkowitej samochodów ciężarowych bez przyczep mają przebieg jednomodalny, niesymetryczny, lewostronny. W grupie tej

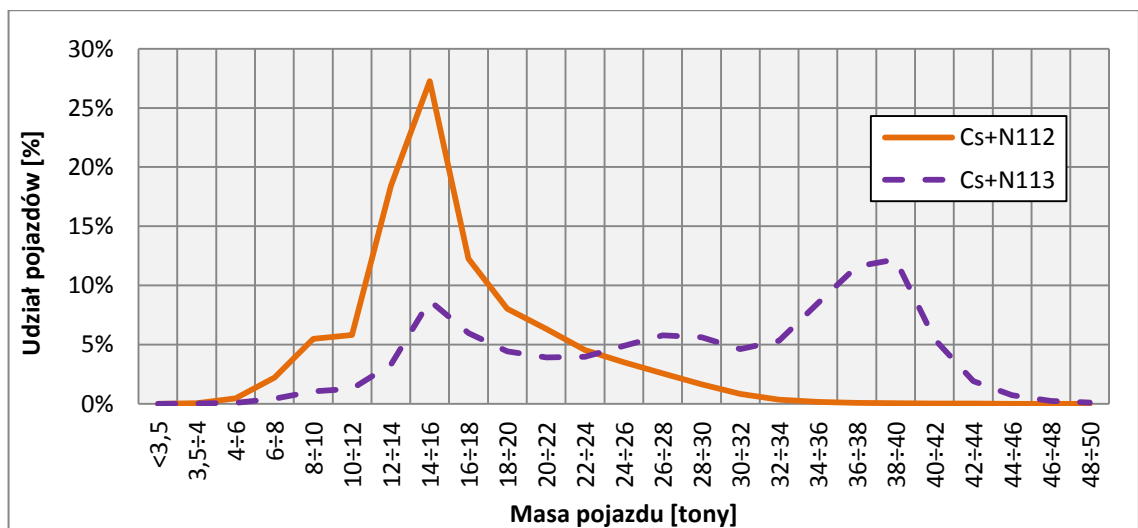
dominują pojazdy o masie z przedziału od 4 do 10 ton i niewielki jest udział pojazdów o masie powyżej 24 ton.

2. Rozkłady masy całkowitej samochodów ciężarowych z przyczepą mają przebieg dwumodalny przy czym pierwsza dominanta rozkładu mieści się w przedziale 14 – 18 ton i wynika z ruchu pojazdów niezaladowanych, natomiast druga dominanta mieści się w przedziale od 36 do 42 ton i wynika z ruchu pojazdów zaladowanych optymalnie.
3. Zaobserwowano, że w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami proporcje między samochodami lżejszymi i cięższymi różnią się na poszczególnych stacjach. Z rysunku 3.19 można odczytać, że na przykład na autostradzie A2 pojazdy cięższe występują z większą częstotliwością niż pojazdy lżejsze (rozkład prawostronny), odwrotną sytuację zaobserwowano na drodze DK11 (rozkład lewostronny).
4. Rozkłady masy całkowitej autobusów mają przeważnie przebieg jednomodalny symetryczny poza stacjami A2 i DK11 na których obserwuje się przebieg dwumodalny, który oznacza większy udział lekkich autobusów (busów) niż na pozostałych stacjach.
5. Obserwuje się pojazdy przeciążone a ich odsetek jest różny na poszczególnych stacjach.

Z porównania rysunków 3.18 - 3.20 wyraźnie widać, że struktura ruchu ma istotny wpływ na obciążenie ruchem ciężkim. Bardziej wnikliwa analiza wykazała, że w obrębie kategorii pojazdów ciężkich, według których grupowano pojazdy do wykonania rozkładów masy całkowitej na rysunkach 3.18 - 3.20, znajdują się pojazdy o znacząco różnych obciążeniach, czego dobrym przykładem jest rozkład masy całkowitej poszczególnych typów pojazdów kategorii C (samochody ciężarowe bez przyczepy) przedstawiony dla przykładowej stacji DK4 na rysunku 3.21. W obrębie jednej kategorii pojazdów klasyfikuje się pojazdy typu C11, których percentyl 90% wynosi ok 14 ton i pojazdy C22, których percentyl 90% wynosi ok 34 ton. W przypadku DK4 o kształcie rozkładu masy całkowitej pojazdów kategorii C (rys. 3.18) w największym stopniu decydują pojazdy typu C11, ponieważ stanowią one najbardziej liczną grupę. Chociaż na rozpatrywanych w pracy stacjach pomiarowych struktura pojazdów w obrębie kategorii C była podobna, to na innych drogach, np. na drogach prowadzących do kopalń kruszywa, struktura może być inna i mogą dominować pojazdy typu C12 i C22, zatem obciążenie takiej nawierzchni będzie większe. Podobną zależność obserwuje się w grupie pojazdów C+P, w której najliczniejszą grupę stanowią ciągniki siodłowe z naczepą Cs+N113 i Cs+N112. Porównanie rozkładów masy całkowitej tych pojazdów dla przykładowej stacji DK4 zamieszczono na rysunku 3.22. Z obserwacji terenowej wynika, że pojazdy Cs+N112 są również pojazdami pięcioosiowymi przy czym jedna z osi naczepy jest uniesiona (tylko 2 osie mają kontakt z nawierzchnią).



Rysunek 3.21. Rozkłady masy całkowitej pojazdów typu C11, C12 i C22 na stacji DK4



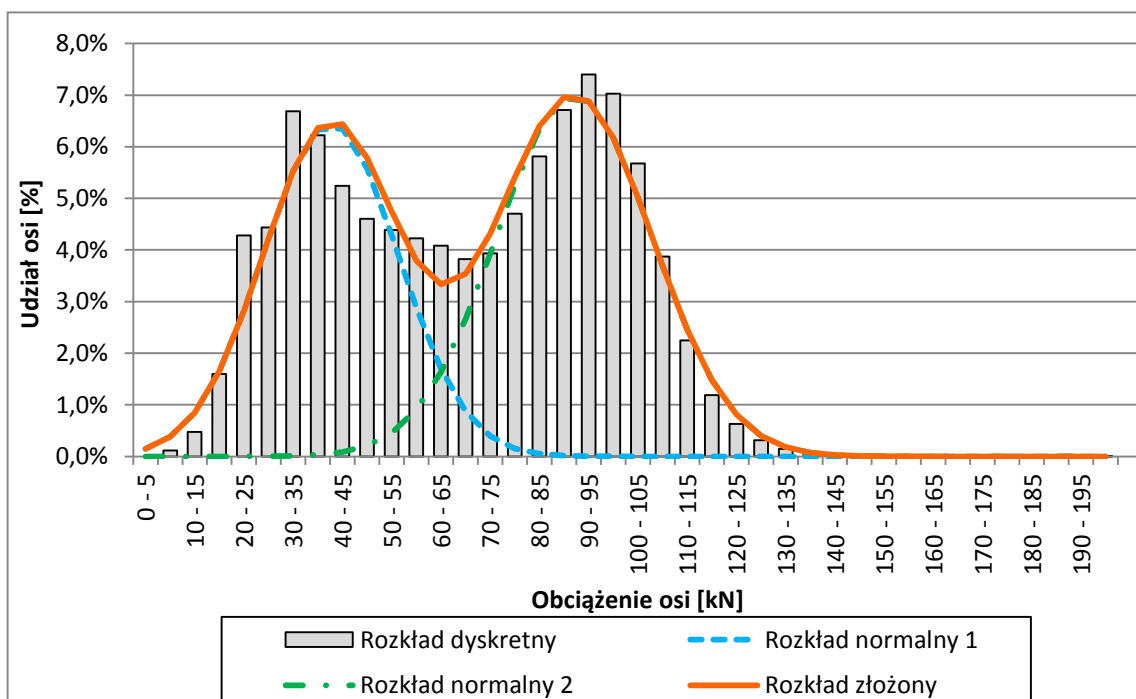
Rysunek 3.22. Rozkłady masy całkowitej pojazdów typu Cs+N112 i Cs+N113 na stacji DK4

3.6.3. Rozkłady obciążenia osi pojazdów

Do analizy oddziaływania pojazdów na nawierzchnię nie wystarczy wyłącznie znajomość rozkładu masy całkowitej pojazdu, konieczne jest również określenie rozkładów obciążenia osi. Nie jest celowe rozróżnianie rozkładów obciążenia osi w zależności od typu pojazdu, dlatego rozkłady wykonano jako łączne dla wszystkich występujących typów pojazdów. W pierwszym kroku określono dyskretny rozkład obciążenia poszczególnych typów osi zgodnie ze wzorem 3.6. Przyjęto przedziały obciążenia osi co 5 kN. Na podstawie określonego udziału procentowego osi w kolejnych przedziałach obciążenia obliczono trzy pierwsze momenty centralne rozkładu, czyli średnią, odchylenie standardowe i skośność. Następnie dopasowywano iteracyjnie wartości μ_1 i μ_2 w taki sposób, aby otrzymać maksymalny współczynnik determinacji R^2 modelu rozkładu złożonego z dwóch

rozkładów normalnych do rozkładu dyskretnego (procentowego). Do określenia współczynników μ_1 i μ_2 wykorzystano dodatek Solver w programie Excel. Pozostałe wielkości charakteryzujące rozkład, czyli σ_1 , σ_2 i p_1 otrzymano z rozwiązania układu trzech równań (3.10), (3.11) i (3.12).

Wyniki obliczeń parametrów modelu rozkładów złożonych dla poszczególnych rodzajów osi zestawiono w załączniku A.5 oraz w tabelicy 3.9 dla przykładowej stacji DK46. Na rysunku 3.23 przedstawiono przykład wykresu rozkładu dyskretnego osi pojedynczych napędowych wraz z nałożonymi wykresami poszczególnych dwóch rozkładów normalnych oraz rozkładu złożonego, sporządzony na podstawie danych ze stacji DK46.



Rysunek 3.23. Przykład rozkładu obciążenia osi pojedynczych napędowych sporządzony na podstawie danych ze stacji WIM DK46 Grodziec

Tablica 3.9. Zestawienie parametrów rozkładów obciążenia osi określonych na podstawie danych z przykładowej stacji ważenia na drodze DK46

Stacja WIM	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu						R ²
		μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2	
DK46	pojedyncze sterowne	27,38	10,83	0,21	60,17	8,23	0,79	0,984
	pojedyncze napędowe	40,11	13,70	0,44	89,57	15,87	0,56	0,971
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	25,18	11,38	0,46	78,50	21,75	0,54	0,967
	podwójne sterowne	74,00	4,91	0,24	99,00	26,51	0,76	0,970
	podwójne napędowe	99,94	30,68	0,68	158,45	28,13	0,32	0,980
	podwójne w przyczepach / naczepach	44,85	13,19	0,52	87,87	38,02	0,48	0,949
	potrójne w przyczepach / naczepach	91,91	34,22	0,41	204,21	25,08	0,59	0,965

W wyniku analizy rozkładów obciążenia osi dla danych z poszczególnych stacji pomiarowych stwierdzono, że uzyskuje się dobre lub bardzo dobre dopasowanie, wyrażone poprzez współczynnik determinacji R^2 . Nie zawsze rozkład złożony z dwóch rozkładów normalnych jest rozkładem dwumodalnym, czego przykładem są rozkłady osi podwójnych napędowych, które dla niektórych stacji pomiarowych są rozkładami jednomodalnymi (por. punkt A.5 w załączniku). We wszystkich rozpatrywanych przypadkach stwierdzono, że przyjęcie rozkładu złożonego daje lepsze dopasowanie do wartości z pomiaru (rozkład dyskretny) niż przyjęcie jednego rozkładu normalnego. W niektórych przypadkach (np. rozkłady obciążenia osi potrójnych) można by rozważyć rozwinięcie modelu matematycznego do rozkładu złożonego z trzech rozkładów normalnych. Uzyskałoby się wtedy lepsze dopasowanie do rozkładu dyskretnego. Aby uzyskać lepsze dopasowanie można rozważyć również zastąpienie jednego lub dwóch rozkładów normalnych innymi rozkładami (np. logonormalnym lub gamma). Ostatecznie przyjęto jednak, że model matematyczny złożony z dwóch rozkładów normalnych opisuje wszystkie poszczególne rozkłady obciążenia osi z wystarczającą dokładnością.

3.6.4. Średnie rozkłady obciążenia osi pojazdów dla dróg w Polsce

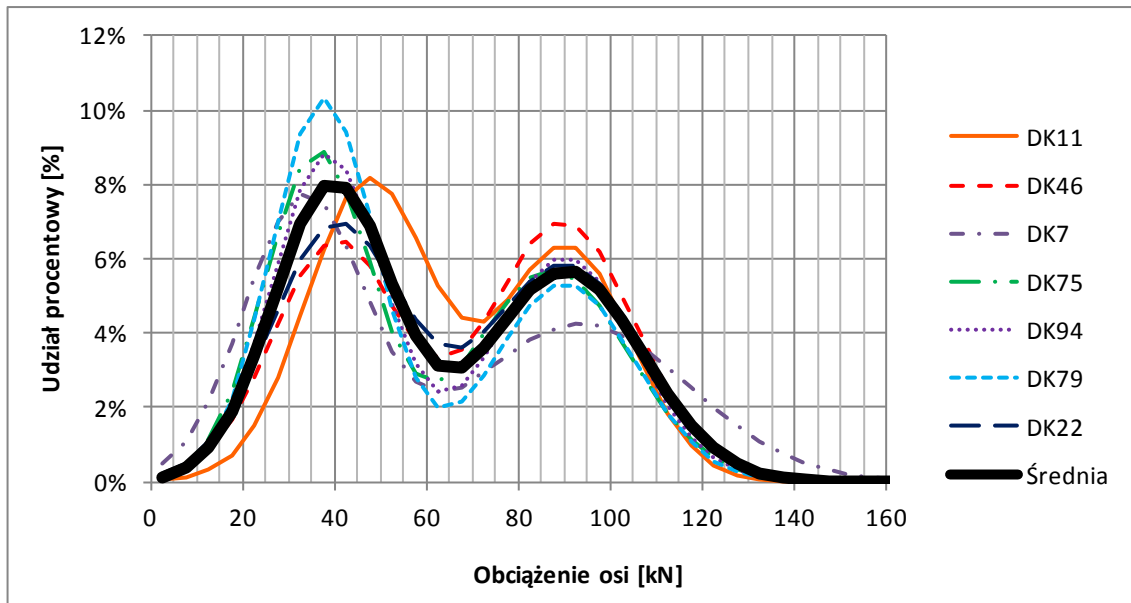
Określenie średnich rozkładów obciążenia osi pojazdów dla dróg w Polsce było poprzedzone analizą zależności parametrów rozkładów obciążenia osi od różnych czynników takich jak dopuszczalne obciążenie osi na danej drodze, struktura ruchu czy udział pojazdów przeciążonych. Stwierdzono, że wszystkie z wymienionych czynników mają wpływ na przebieg rozkładów obciążenia osi. Stwierdzono również, że określenie średnich rozkładów obciążenia dla wszystkich dróg spowodowałoby dość znaczne przeszacowanie obciążeń osi w przypadku dróg mniej obciążonych i niedoszacowanie w przypadku dróg mocniej obciążonych, dlatego do określenia średnich rozkładów obciążenia osi pojazdów wprowadzono podział. Przyjęto, że kryterium podziału będzie dopuszczalne obciążenie osi pojedynczych, napędowych pojazdów 115 kN lub 100 kN. Zgodnie z rozporządzeniami Ministra Infrastruktury [122], [123] na drogach: A2, S7 i DK4 obowiązuje dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej, napędowej pojazdów 115 kN, na pozostałych rozpatrywanych drogach, czyli na DK11, DK22, DK46, DK7, DK75, DK79 i DK94, obowiązuje dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej 100 kN. Parametry uśrednionych rozkładów obciążenia osi obliczono jako średnią ważoną parametrów rozkładów z poszczególnych stacji przyjmując, że wagą jest średni dobowy ruch pojazdów ciężkich (zgodnie z tabelicą 3.4). Do określenia średnich parametrów rozkładu dla kraju odrzucono dane ze stacji DK1, ponieważ nie obejmują one pełnego roku, w związku z czym rozkłady obciążenia osi dla tej stacji są obciążone błędem wynikającym z sezonowych zmian obciążenia pojazdów (patrz rozdział 3.7). Wartości średnich parametrów rozkładów obciążenia osi zestawiono w tabelicy 3.10.

Na rysunku 3.24 przedstawiono przykładowy wykres rozkładów obciążenia osi pojedynczych, napędowych sporządzony dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN wraz z naniesionym wykresem rozkładu uśrednionego. Analogiczny wykres dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN przedstawiono na rysunku 3.25.

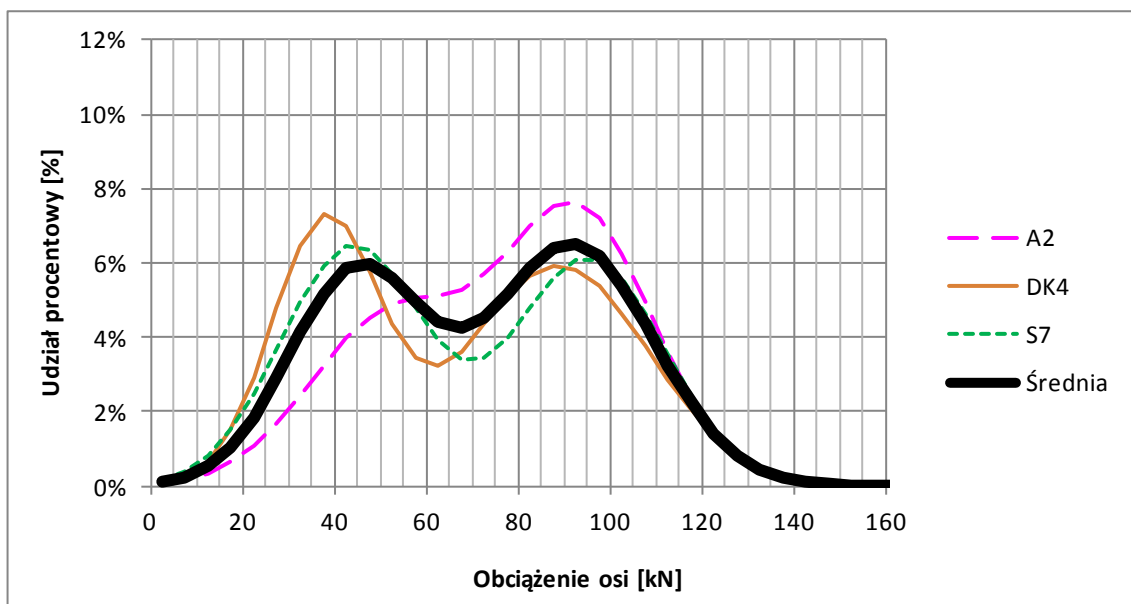
Tablica 3.10. Średnie parametry rozkładów obciążenia osi w zależności o dopuszczalnego obciążenia osi pojedynczej, napędowej 100 kN lub 115 kN

Dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu					
		μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2
100 kN	pojedyncze sterowne	25,33	8,50	0,25	59,46	8,99	0,75
	pojedyncze napędowe	39,56	12,96	0,52	90,17	16,84	0,48
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	27,41	9,96	0,55	73,30	22,49	0,45
	podwójne sterowne	80,39	7,36	0,55	115,56	22,34	0,45
	podwójne napędowe	94,39	29,38	0,58	152,87	26,53	0,42
	podwójne w przyczepach / naczepach	49,13	12,38	0,65	96,11	39,26	0,35
	potrójne w przyczepach / naczepach	94,19	35,48	0,50	210,29	21,12	0,50
115 kN	pojedyncze sterowne	31,66	12,46	0,24	61,77	7,74	0,76
	pojedyncze napędowe	44,73	14,67	0,43	91,76	17,65	0,57
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	24,37	10,58	0,66	82,96	26,54	0,34
	podwójne sterowne	83,06	11,66	0,51	128,48	23,23	0,49
	podwójne napędowe	91,13	23,57	0,25	140,85	37,55	0,75
	podwójne w przyczepach / naczepach	53,79	13,41	0,47	95,68	38,92	0,53
	potrójne w przyczepach / naczepach	100,27	37,11	0,47	208,05	25,46	0,53

Na podstawie parametrów rozkładów uśrednionych μ_2 , σ_2 , p_2 przedstawionych w tablicy 3.10 można stwierdzić, że na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN parametry te są przeważnie wyższe niż na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN. Oznacza to większy udział osi cięższych w ruchu na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN, co jest również wyraźnie widoczne na rysunkach 3.24 i 3.25. Z rysunków tych wynika, że rozkłady obciążenia osi na poszczególnych stacjach mogą dość istotnie różnić się od rozkładu uśrednionego. Na przykład w przypadku rozkładów ze stacji DK46 kształt rozkładu obciążenia osi pojedynczych napędowych (rysunek 3.24) bardziej odpowiada rozkładowi uśrednionemu dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN (rysunek 3.25), niż dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN. Świadczy to o tym, że na kształt rozkładów obciążenia osi na poszczególnych stacjach oprócz dopuszczalnego obciążenia osi wpływ mają lokalne uwarunkowania ruchu, w tym udział pojazdów przeciążonych.



Rysunek 3.24. Rozkłady obciążenia osi pojedynczych napędowych na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN



Rysunek 3.25. Rozkłady obciążenia osi pojedynczych napędowych na drogach z dopuszczalnym obciążeniem osi 115 kN

3.6.5. Analiza błędu oszacowania średnich współczynników równoważności obciążenia osi na podstawie uśrednionych rozkładów obciążenia osi pojazdów

Na podstawie rysunków 3.24 i 3.25 można stwierdzić, że wyprowadzenie średnich rozkładów obciążenia osi pojazdów wiąże się z popełnieniem pewnego błędu. Błąd ten może mieć szczególne znaczenie w przypadku rozpatrywania trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych. W analizie przyjęto, że miarą

oddziaływania pojazdów będą średnie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone według wzoru czwartej potęgi. Średni współczynnik równoważności obciążenia danego typu osi i dla danego rozkładu obciążenia można obliczyć na podstawie wzoru:

$$F_k = \sum_{j=0}^n p_j \cdot F_j \quad (3.13)$$

gdzie:

F_k – średni współczynnik równoważności danego typu osi k dla danego rozkładu obciążenia osi,

j – numer przedziału obciążenia osi,

n – łączna liczba przedziałów obciążenia osi,

p_j – udział osi w danym przedziale obciążenia j określony na podstawie funkcji rozkładu złożonego,

F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi dla danego obciążenia osi Q_j obliczony na podstawie wzoru czwartej potęgi.

Średni współczynnik równoważności obciążenia osi pojazdów F_{sr} dla rozkładu z danej stacji lub rozkładu średniego można obliczyć ze wzoru:

$$F_{sr} = \sum_{k=1}^7 u_o \cdot F_k \quad (3.14)$$

gdzie:

F_{sr} – średni współczynnik równoważności obciążenia osi,

u_o – udział danego rodzaju osi o w całym ruchu, na podstawie tablicy 3.5.

Obliczone średnie współczynniki równoważności obciążenia osi z dyskretnych rozkładów obciążenia osi na poszczególnych stacjach, oraz ze średnich rozkładów obciążenia osi dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi pojedynczej 100 kN i 115 kN przedstawiono w tablicy 3.11 oraz na rysunku 3.26. Na ich podstawie obliczono według wzoru (3.15) procentowy błąd współczynnika równoważności obciążenia osi dla rozkładu uśrednionego względem współczynnika równoważności dla rozkładu dyskretnego (dokładnego) na danej stacji pomiarowej.

$$\delta = \frac{F_{sr}^* - F_{sr}}{F_{sr}^*} \quad (3.15)$$

gdzie:

δ – błąd względny obliczonego średniego współczynnika równoważności obciążenia osi

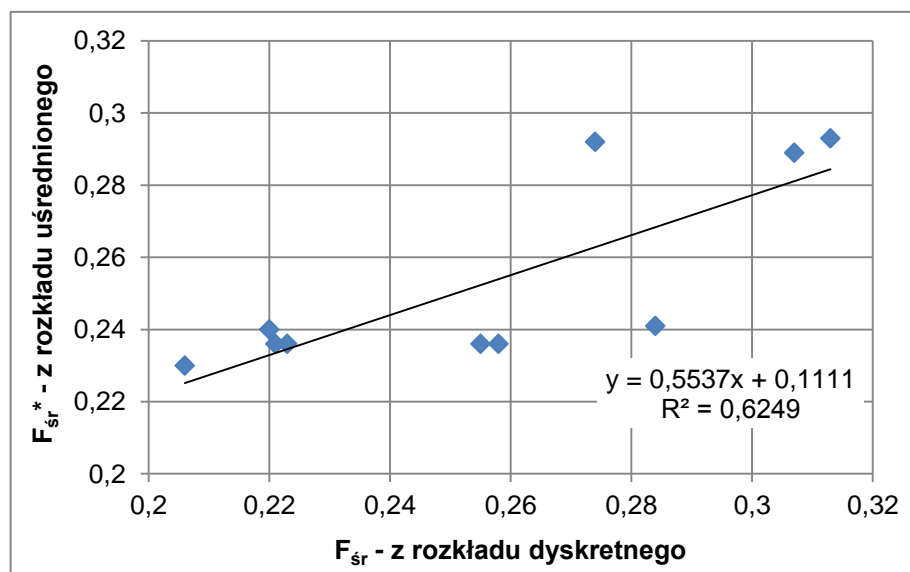
F_{sr}^* – współczynnik równoważności obciążenia osi obliczony na podstawie uśrednionego rozkładu obciążenia osi (wartość oszacowana),

F_{sr} – współczynnik równoważności obciążenia osi obliczony na podstawie rozkładu obciążenia osi na danej stacji pomiarowej (wartość dokładna).

Tablica 3.11. Błąd oszacowania średnich współczynników równoważności obciążenia osi na podstawie modelu rozkładu złożonego z dwóch rozkładów normalnych

	Stacja pomiarowa WIM									
	A2	DK11	DK46	DK7	DK75	DK4	DK94	DK79	S7	DK22
Dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej napędowej [kN]	115	100	100	100	100	115	100	100	115	100
Współczynnik równoważności obciążenia osi obliczony z rozkładu dyskretnego na danej stacji	0,307	0,206	0,258	0,284	0,220	0,274	0,223	0,221	0,313	0,255
Współczynnik równoważności obciążenia osi obliczony z rozkładu uśrednionego	0,289	0,230	0,236	0,241	0,240	0,292	0,236	0,236	0,293	0,236
Błąd względny	6%	10%	9%	18%	8%	6%	6%	6%	7%	8%

Na podstawie obliczeń, których wyniki zamieszczono w tablicy 3.11 można stwierdzić, że błąd względny średniego współczynnika równoważności obciążenia osi nie przekracza 18%.



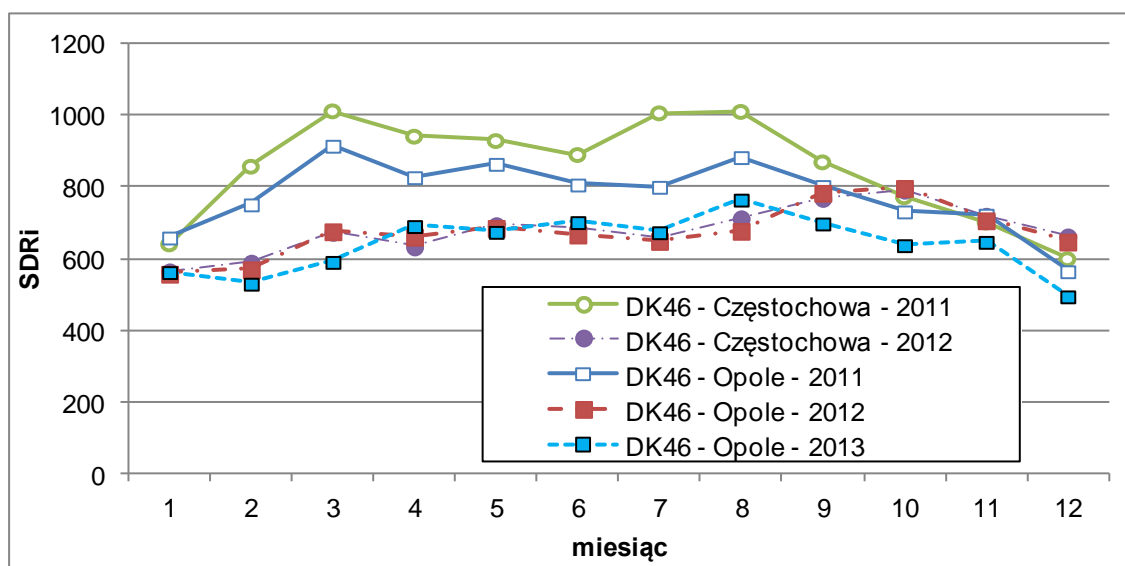
Rysunek 3.26. Średnie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone na podstawie rozkładu dyskretnego i uśrednionego rozkładu złożonego z dwóch rozkładów normalnych

3.7. Zmiany ruchu pojazdów ciężkich w ciągu roku, tygodnia i doby

3.7.1. Zmiany ruchu ciężkiego w ciągu roku

Ruchu drogowy, w tym ruch ciężki ulega wahaniom w ciągu roku. Rozkład ruchu ciężkiego w roku jest jedną z ważnych charakterystyk opisujących ruch drogowy, która znajduje wiele praktycznych zastosowań. Rozkład ruchu ciężkiego w roku jest stosowany do projektowania metodami mechanicznymi nawierzchni nowych i remontowanych. Stosowany jest również w różnego rodzaju analizach ruchu drogowego, między innymi do obliczania średniorocznego ruchu dobowego. Potencjalnym zastosowaniem może również być różnego rodzaju zarządzanie transportem drogowym oraz zarządzanie infrastrukturą drogową, jak np. planowanie remontów drogowych lub planowanie prowadzenia kontroli pojazdów ciężarowych w celu zmniejszenia liczby pojazdów przeciążonych. Rozkład ruchu ciężkiego w roku może mieć również zastosowanie w ekonomii jako jeden ze wskaźników zmian aktywności gospodarczej w kraju.

Aby dane ze stacji WIM mogły być wykorzystane do analizy zmian w ruchu w trakcie roku konieczne jest, aby obejmowały co najmniej jeden pełen rok, dlatego odrzucono dane ze stacji DK1. W pierwszej kolejności rozpatrywano zmiany liczby pojazdów. Ze względu na zmieniającą się liczbę miarodajnych dni pomiarowych w kolejnych miesiącach, jak również z uwagi na możliwe jedno lub kilku dniowe przerwy w pomiarach, posłużono się średnim dobowym ruchem w miesiącu SDR_i . Na rysunku 3.27 pokazano przykładowy wykres zmian SDR_i na stacji DK46 w Grodźcu z wyszczególnieniem kierunków ruchu i lat (w 2013 r. dostępne były dane tylko z jednego kierunku ruchu).



Rysunek 3.27. Przykład zmian średniego dobowego ruchu w kolejnych miesiącach (SDR_i) na stacji DK46 Grodziec

Rysunek 3.27 oprócz zmian w średnim dobowym ruchu w kolejnych miesiącach zawiera kilka interesujących informacji. Na drodze DK46 średni dobowy ruch pojazdów w roku 2011 był wyższy niż w kolejnych latach 2012 i 2013. Oznacza to, że ruch ciężki może w kolejnych latach eksploatacji drogi ulegać wahaniom i nie koniecznie jest stale rosnący. Kolejną ciekawą obserwacją jest podział ruchu na kierunki. Przykładowo na stacji DK46 w 2011 roku zaobserwowano większą nierównomierność średniego dobowego ruchu na poszczególnych kierunkach (55% pojazdów na kierunku w stronę Opola) podczas gdy w 2012 roku ruch ciężki rozkładał się równomiernie w obu kierunkach. Wyraźną nierównomierność w rozkładzie kierunkowym ruchu stwierdzono również na stacjach DK75 i A2. Należy zaznaczyć, że do projektowania nawierzchni ciężko jest przewidzieć w jaki sposób będzie rozkładać się ruch w poszczególnych kierunkach w kolejnych latach eksploatacji. Warto mieć jednak świadomość, że przyjmując równomierny rozkład kierunkowy ruchu można popełniać pewien błąd.

Miarą opisującą rozkład ruchu ciężkiego w poszczególnych miesiącach w roku może być udział procentowy sumarycznej liczby pojazdów w każdym miesiącu. Aby określić sumaryczną liczbę pojazdów w każdym miesiącu należałoby było dysponować nieprzerwanym pomiarem, co ze względów technicznych jest niemożliwe. Alternatywną miarą są współczynniki korygujące MAF (ang. „*Monthly Adjustment Factors*”) wprowadzone w metodzie MEPDG [46]. Współczynniki korygujące zaadoptowane do warunków polskich można obliczać na podstawie średniego dobowego ruchu SDR w kolejnych miesiącach zgodnie ze wzorem:

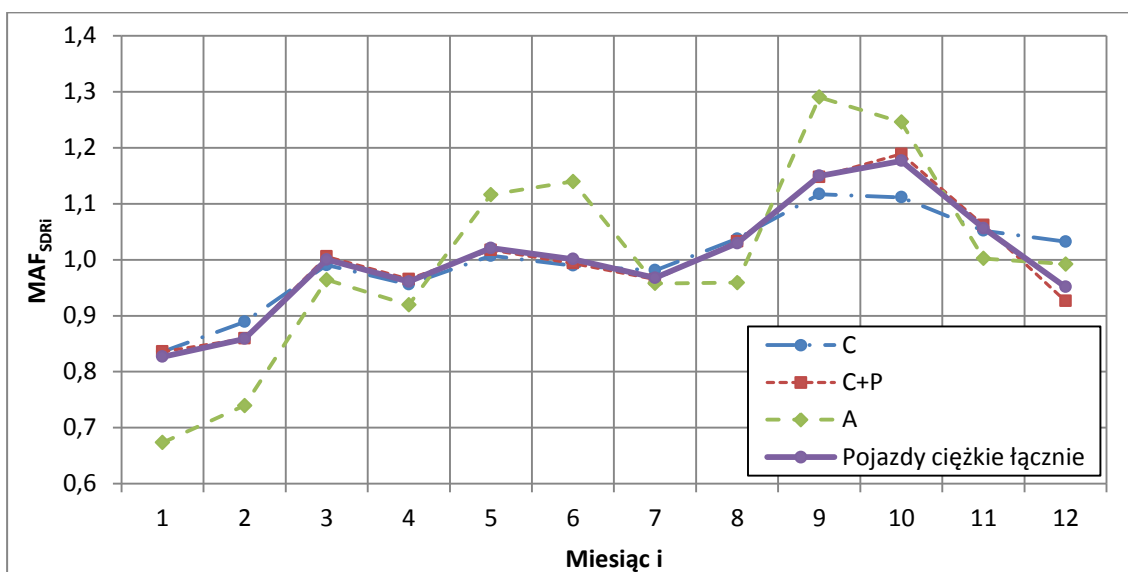
$$MAF_{SDRi} = \frac{SDR_i}{\sum_{i=1}^{12} SDR_i} \cdot 12 \quad (3.16)$$

gdzie:

MAF_{SDRi} – miesięczny współczynnik korygujący średni dobowy ruch dla miesiąca i ,
 SDR_i – średni dobowy ruch pojazdów ciężkich w miesiącu i .

Suma współczynników MAF_{SDRi} z wszystkich kolejnych miesięcy jest równa 12. W metodzie MEPDG MAF określany jest dla poszczególnych klas pojazdów. Oryginalnie MAF wyznaczany jest dla całego przekroju drogi, natomiast rozkład ruchu na poszczególne pasy uwzględnia się współczynnikiem DDF (ang. „*Directional Distribution Factor*”). W niniejsze analizie MAF wyznaczano osobno dla kierunków ruchu, ponieważ nie dla wszystkich stacji dostępny był pomiar z całego przekroju drogi. Przykład współczynników MAF_{SDRi} określonych w trzech polskich kategoriach pojazdów przedstawiono na rysunku dla stacji DK46 Grodziec w obu kierunkach ruchu w roku 2012. Jak widać zmiany ruchu pojazdów kategorii C i C+P są bardzo podobne, największe wahania sezonowe zaobserwowano w kategorii autobusów, ale ich udział w ruchu ciężkim jest niewielki (ok. 5%). W niniejszej pracy ze względu na uproszczenie obliczeń przyjęto, że MAF_{SDRi} będzie określany dla całego potoku ruchu ciężkiego. Jako wartość

domyślną MAF w metodzie MEPDG stosuje się w każdym miesiącu i w każdej klasie pojazdu wartość 1, co oznacza przyjęcie równomiernego ruchu w całym roku.

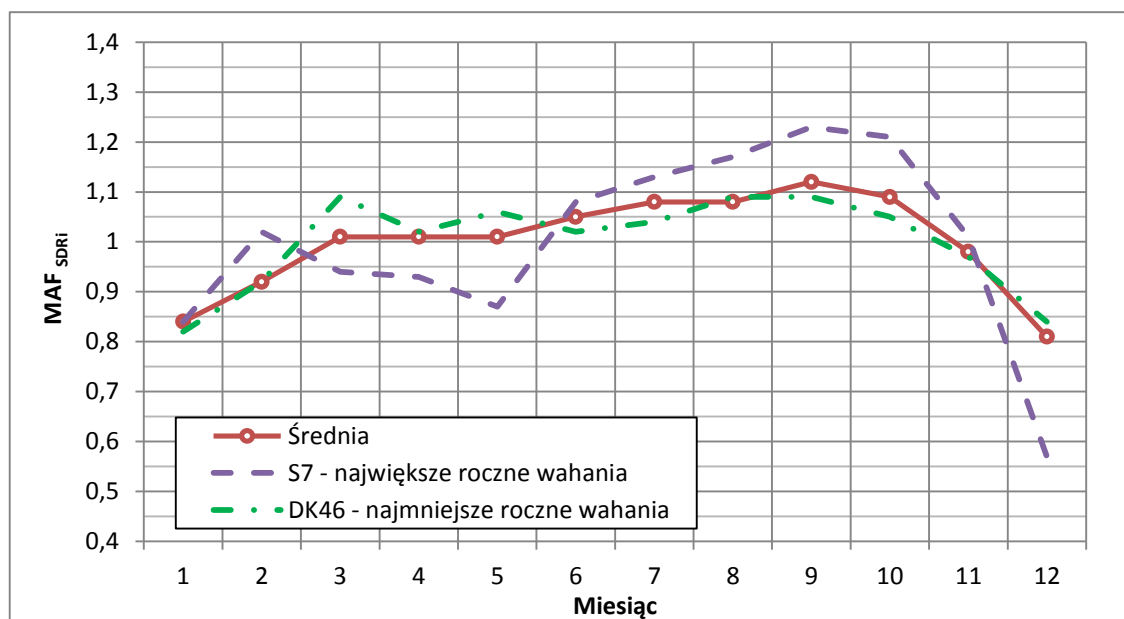


Rysunek 3.28. Miesięczne współczynniki korygujące MAF_{SDRi} na stacji DK46 w poszczególnych kategoriach pojazdów w obu kierunkach ruchu w roku 2012

W tabelicy 3.12 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników korygujących na analizowanych stacjach pomiarowych. Na autostradzie A2 zaobserwowano stale rosnącą w kolejnych miesiącach liczbę pojazdów. Zjawisko to może być uwarunkowane innymi czynnikami niż wahania sezonowe ruchu, jak np. prowadzone w tym okresie duże roboty budowlane. Na wszystkich pozostałych stacjach obserwuje się niższy SDR w miesiącach zimowych i wyższy w miesiącach letnich. Wykres zmian średniego współczynnika MAF_{SDRi} przedstawiono na rysunku 3.29, na którym zaznaczono również współczynniki MAF_{SDR} dla stacji z stwierdzonymi największymi i najmniejszymi wahaniami miesięcznego średniego dobowego ruchu SDR_i . Przyjęto, że stacja z najmniejszymi rocznymi wahaniami ruchu będzie mieć najmniejszą różnicę maksymalnego i minimalnego współczynnika MAF i analogicznie różnica ta będzie największa dla stacji z największymi rocznymi wahaniami.

Tablica 3.12. Miesięczne współczynniki korygujące MAF_{SDRi} na poszczególnych stacjach WIM

Miesiąc	Stacja WIM										Średnia
	DK46	DK4	DK7	DK75	DK79	DK94	DK22	DK11	A2	S7	
1	0,82	0,85	0,83	0,87	0,87	0,88	0,89	0,77	0,78	0,84	0,84
2	0,92	0,89	0,86	0,81	0,95	0,91	0,96	0,92	0,90	1,02	0,92
3	1,09	1,05	0,98	0,97	1,07	1,05	1,00	1,06	0,93	0,94	1,01
4	1,02	1,00	0,96	1,07	1,02	1,08	1,03	0,99	0,92	0,93	1,01
5	1,06	1,04	1,08	1,09	1,05	1,02	0,97	0,96	0,90	0,87	1,01
6	1,02	1,10	1,11	1,06	0,98	1,09	1,09	1,01	0,93	1,08	1,05
7	1,04	1,02	1,11	1,11	1,12	1,09	1,06	1,07	0,95	1,13	1,08
8	1,09	1,04	1,10	1,07	1,11	0,98	1,05	1,07	1,00	1,17	1,08
9	1,09	1,11	1,11	1,07	1,09	1,04	1,10	1,23	1,08	1,23	1,12
10	1,05	1,07	1,10	1,09	1,12	1,12	1,07	0,98	1,18	1,21	1,09
11	0,97	1,03	0,98	0,99	0,88	0,96	0,97	1,05	1,18	1,01	0,98
12	0,84	0,80	0,78	0,79	0,73	0,77	0,80	0,89	1,26	0,57	0,81



Rysunek 3.29. Wykres miesięcznych współczynników korygujących MAF_{SDRi} średni oraz dla stacji z największymi (S7) i najmniejszymi (DK46) wahaniami średniego dobowego ruchu

3.7.2. Zmiany obciążenia nawierzchni w ciągu roku

Okazuje się, że oprócz liczby pojazdów rocznym zmianom ulega również obciążenie pojazdów. Obciążenie nawierzchni najlepiej jest wyrazić poprzez średnią dobową liczbę równoważnych osi standardowych, ponieważ miara ta określa rzeczywiste oddziaływanie pojazdów na nawierzchnię. Liczbę

równoważnych osi standardowych przypadająca na dany miesiąc obliczono zgodnie ze wzorem:

$$L_i = F_{sr,i} \cdot SDR_i \quad (3.17)$$

gdzie:

L_i – średnia dobowa liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w danym miesiącu i ,

$F_{sr,i}$ – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu ciężkiego w danym miesiącu i ,

SDR_i – średni dobowy ruch pojazdów ciężkich w miesiącu i .

Współczynnik równoważności obciążenia pojazdu F_i zależy od nacisków osi składowych pojazdów, a zatem również od masy całkowitej pojazdu. Jeżeli średnia masa pojazdów ciężkich w danym okresie będzie rosła bądź maleć, to średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów również w tym okresie będzie odpowiednio rósł lub malał.

W sposób analogiczny jak w przypadku średniego dobowego ruchu określono miesięczne współczynniki korygujące dla średniej dobowej liczby równoważnych osi standardowych MAF_{Li} . Współczynniki MAF_{Li} obliczono zgodnie ze wzorem:

$$MAF_{Li} = \frac{L_i}{\sum_{i=1}^{12} L_i} \cdot 12$$

gdzie:

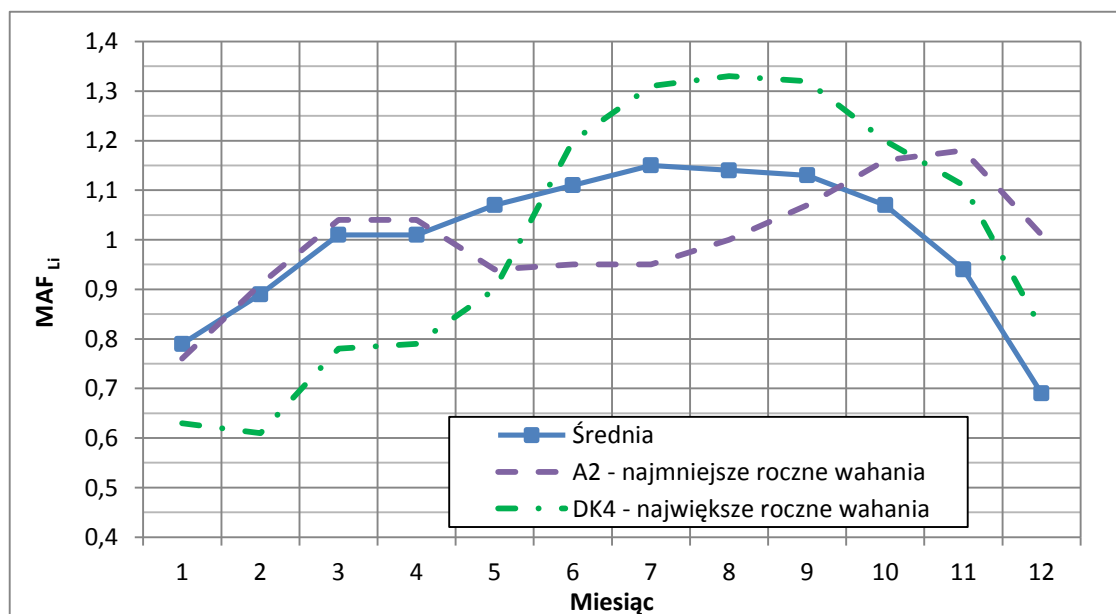
MAF_{Li} – miesięczny współczynnik korygujący liczbę równoważnych osi standardowych 100 kN dla danego miesiąca i ,

L_i – średnia dobowa liczba równoważnych osi standardowych 100 kN w danym miesiącu i .

W tabelicy 3.13 przedstawiono wyniki obliczeń współczynników MAF_{Li} przeprowadzonych dla poszczególnych stacji, oraz przedstawiono obliczoną średnią arytmetyczną współczynników MAF_{Li} dla wszystkich stacji. Wykres zmian średniego współczynnika MAF_{Li} przedstawiono na rysunku 3.30, na którym zaznaczono również współczynniki MAF_{SDR} dla stacji z stwierdzonymi największymi i najmniejszymi wahaniami miesięcznej średniej dobowej liczby równoważnych osi standardowych L_i . Warto zwrócić uwagę na fakt, że na poszczególnych stacjach zmiany średniego dobowego ruchu pojazdów ciężkich SDR_i (tabela 3.12 i rysunek 3.29) nie są jednakowe jak zmiany średniej dobowej liczby równoważnych osi standardowych L_i (tabela 3.13 i rysunek 3.30).

Tablica 3.13. Miesięczne współczynniki korygujące liczbę równoważnych osi standardowych 100 kN MAF_{Li} na poszczególnych stacjach

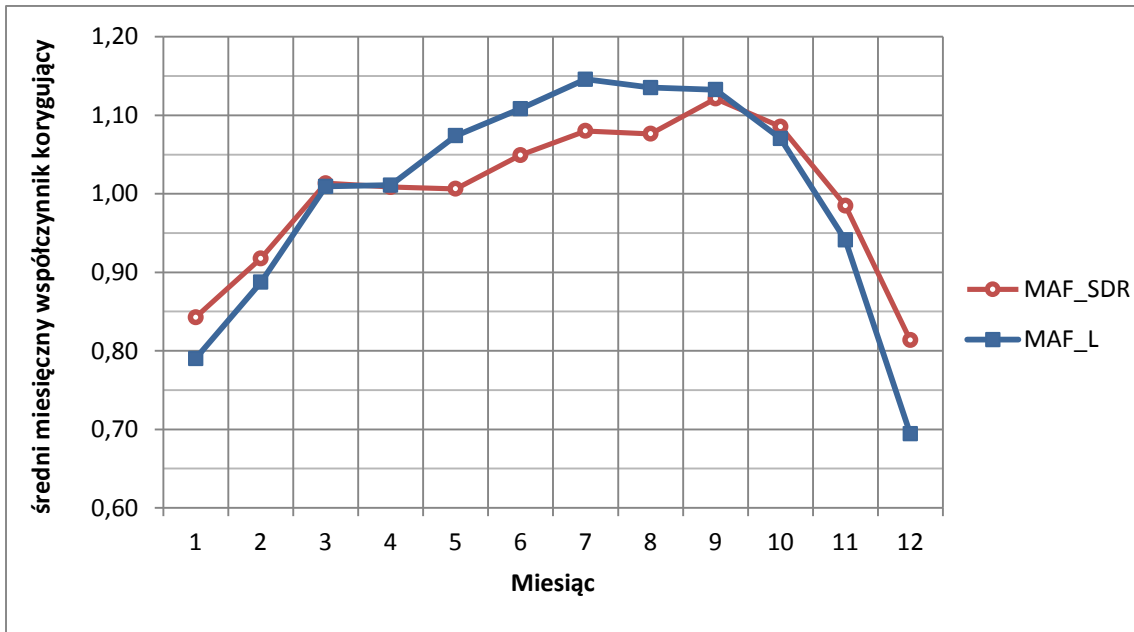
Miesiąc	Stacja WIM										Średnia
	DK46	DK4	DK7	DK75	DK79	DK94	DK22	DK11	A2	S7	
1	0,78	0,63	0,79	0,76	0,80	0,78	1,02	0,52	0,76	0,95	0,79
2	0,91	0,61	0,79	0,71	0,93	0,87	1,13	0,67	0,91	1,18	0,89
3	1,07	0,78	0,98	0,94	1,09	1,00	1,06	1,01	1,04	1,01	1,01
4	1,02	0,79	1,01	1,10	0,98	1,11	0,98	1,06	1,04	0,81	1,01
5	1,12	0,90	1,18	1,35	1,15	1,07	0,99	1,02	0,94	0,82	1,07
6	1,11	1,20	1,18	1,13	0,94	1,18	1,25	1,07	0,95	1,04	1,11
7	1,11	1,31	1,19	1,20	1,17	1,13	1,13	1,13	0,95	1,16	1,15
8	1,23	1,33	1,19	1,16	1,26	0,98	0,94	1,17	1,00	1,16	1,14
9	1,10	1,32	1,08	1,03	1,14	1,05	0,98	1,37	1,07	1,24	1,13
10	0,91	1,20	1,06	1,04	1,15	1,11	0,97	1,11	1,16	1,24	1,07
11	0,89	1,11	0,89	0,91	0,81	1,01	0,86	1,12	1,18	0,91	0,94
12	0,76	0,82	0,67	0,66	0,58	0,72	0,69	0,76	1,01	0,46	0,69



Rysunek 3.30. Wykres miesięcznych współczynników korygujących MAF_{Li} średni oraz dla stacji z największymi (DK4) i najmniejszymi (A2) rocznymi wahaniami średniej dobowej liczby równoważnych osi standardowych L_i

Porównanie średnich współczynników MAF_{SDR_i} , wyprowadzonych dla liczby pojazdów, ze średnimi współczynnikami MAF_{Li} , wyprowadzonych dla liczby osi standardowych 100 kN, zilustrowano na rysunku 3.31. Wynika z niego, że w okresie zimowym mniejszy jest SDR oraz niższe są obciążenia osi pojazdów, które wyraża się poprzez liczbę równoważnych osi standardowych L . W okresie od maja do sierpnia współczynniki średnie MAF_{Li} są wyższe niż średnie współczynniki

MAF_{SDR_i} . Oznacza to, że w tym okresie wzrost średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów F_i , co jest wynikiem wzrostu obciążeń osi pojazdów w tym okresie. Podobnie w okresie od listopada do lutego stwierdza się spadek obciążeń osi pojazdów.



Rysunek 3.31. Porównanie średnich współczynników MAF_{SDR_i} i MAF_{L_i}

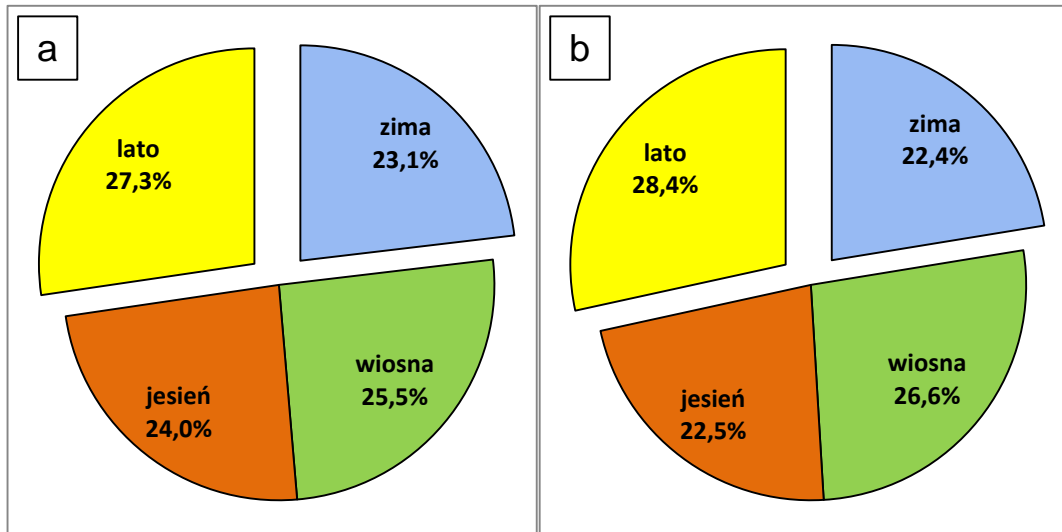
Wyniki przeprowadzonych obliczeń porównano z rozkładem ruchu ciężkiego w poszczególnych porach roku podanym w katalogu z 1997 r. [142]. Aby obliczyć rozkład ruchu w poszczególnych porach roku należy zsumować miesięczne współczynniki korygujące z odpowiednich miesięcy przypadających na daną porę roku i podzielić przez liczbę miesięcy w roku. Obliczenia sezonowego rozkładu ruchu wykonano w dwóch wariantach:

- a) rozkład liczby pojazdów ciężkich w poszczególnych porach roku,
- b) rozkład liczby równoważnych osi standardowych w poszczególnych porach roku.

Do obliczeń przyjęto średnie wartości współczynników MAF_{SDR_i} i MAF_{L_i} otrzymane ze wszystkich stacji WIM. Wyniki obliczeń podano w tabelicy 3.14. Na rysunku 3.32 przedstawiono wykres średniego rozkładu ruchu ciężkiego w poszczególnych porach roku.

Tablica 3.14. Rozkład ruchu ciężkiego na poszczególne okresy w roku

Okres	miesiące	Średni rozkład liczby pojazdów ciężkich na podstawie WIM		Średni rozkład liczby równoważnych osi standardowych na podstawie WIM		Katalog 1997 r.
zima	I, II, III	23,1%		22,4%		20%
wiosna	IV, V, VI	25,5%	Razem: 49,6%	26,6%	Razem: 49,2%	50%
jesień	X, XI, XII	24,0%		22,5%		
lato	VII, VIII, IX	27,3%		28,4%		30%



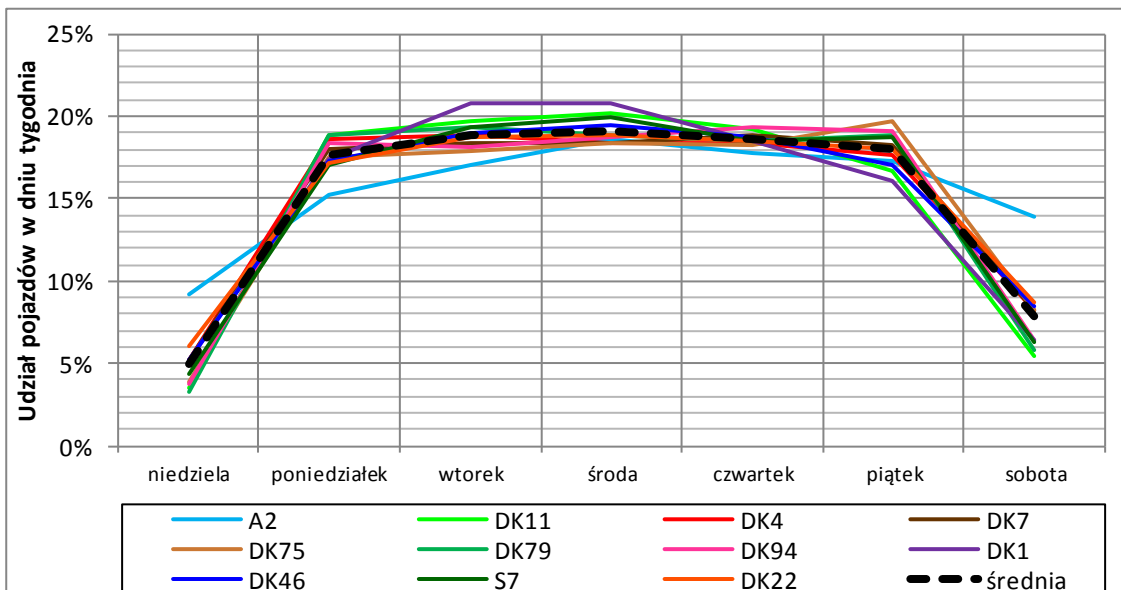
Rysunek 3.32. Rozkład ruchu ciężkiego na poszczególne pory roku na podstawie danych ze stacji WIM a) średni rozkład liczby pojazdów ciężkich b) średni rozkład liczby równoważnych osi standardowych

Przyjęty w Katalogu z 1997 r, rozkład ruchu w przybliżeniu pokrywa się z wynikami pomiarów ze stacji WIM. Na podstawie tablicy 3.14 i rysunku 3.32 można stwierdzić, że średnio największe obciążenie drogi przypada na miesiące od maja do października, najmniejsze w grudniu i w styczniu.

Współczynniki korygujące MAF mają praktyczne zastosowania. Podane w tablicy 3.12 średnie współczynniki MAF_{SDRi} można zastosować do przeliczania wyników pomiarów SDR otrzymanych dla jednego miesiąca do wartości uśrednionych dla całego roku. Średnie współczynniki MAF_{Li} (tablica 3.13) mogą być stosowane, gdy znany jest średni roczny ruch pojazdów a obliczenia konstrukcji nawierzchni mają być prowadzone z uwzględnieniem miesięcznych bądź sezonowych zmian ruchu. W ramach prac nad nowym Katalogiem typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 2013 roku [78] roczny rozkład ruchu ciężkiego został wykorzystany do określenia współczynników przeliczeniowych pojazdów ciężkich oraz do określenia temperatury ekwiwalentnej [77].

3.7.3. Tygodniowy rozkład ruchu ciężkiego

Tygodniowe rozkłady ruchu ciężkiego wyznaczono poprzez obliczenie procentowego udziału liczby pojazdów w kolejnych dniach tygodnia na pełnym dostępnym zbiorze danych z poszczególnych stacji. Nie rozróżniano poszczególnych kategorii pojazdów. Wyniki przedstawiono na rysunku 3.33. Na wszystkich drogach poza A2 zaobserwowano bardzo zbliżony przebieg tygodniowych rozkładów ruchu ciężkiego. Ruch ciężki jest wyrównany w dni robocze i maleje o ok. 70% w weekend, przy czym jest najniższy w niedzielę. Na autostradzie A2 ruch ciężki w tygodniu jest bardziej wyrównany niż na pozostałych stacjach, w weekend maleje o ok. 40% względem dni roboczych.



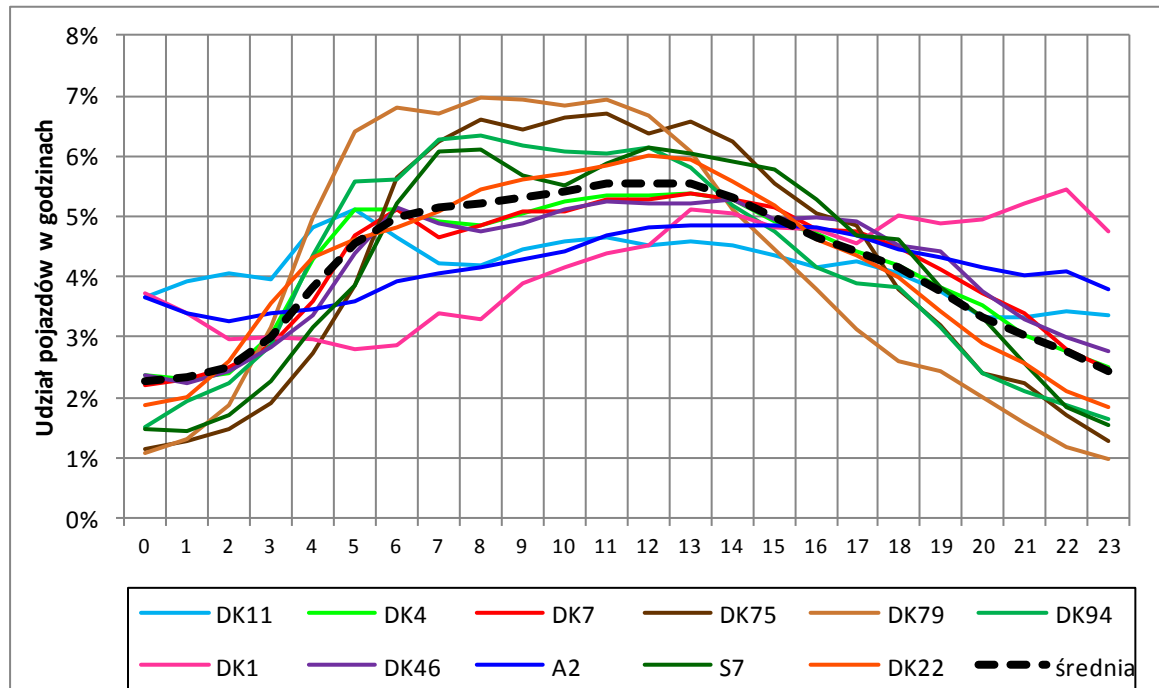
Rysunek 3.33. Tygodniowy rozkład ruchu ciężkiego

3.7.4. Dobowy rozkład ruchu ciężkiego

Dobowe rozkłady ruchu ciężkiego wyznaczono poprzez obliczenie procentowego udziału liczby pojazdów w kolejnych godzinach w całym dostępnym zbiorze danych na poszczególnych stacjach. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 3.34 osobno dla każdej ze stacji oraz zaznaczono średnią z wszystkich stacji. W obliczeniach nie rozróżniano poszczególnych kategorii pojazdów. Dobowy rozkład ruchu może mieć istotne znaczenie przy określaniu rzeczywistego oddziaływania pojazdów w okresie letnim, kiedy w ciągu dnia nawierzchnia mocno nagrzewa się. Rozkłady dobowe mogą mieć również zastosowanie w analizach i pomiarach ruchu drogowego, np. do przeliczenia próby pomiarowej obejmującej kilka godzin do wyników średniodobowych.

Na większości stacji ruch ciężki jest najniższy w nocy pomiędzy godziną 0 a 3, w godzinach 6.00 – 16.00 utrzymuje się na stałym poziomie i zaczyna stopniowo maleć po godzinie 16.00. Zaobserwowano, że na stacjach A2, DK11 i DK1 ruch

ciężki jest bardziej wyrównany w ciągu doby. Przypadek rozkładów dobowych jak i tygodniowych na autostradzie A2 świadczy o tym, że na ważnych drogach tranzytowych ruch ciężki ulega mniejszym wahaniom w trakcie doby i tygodnia niż na pozostałych drogach. Podobną tendencję obserwuje się w krajach wyżej rozwiniętych gospodarczo niż Polska np. w Wielkiej Brytanii [184].



Rysunek 3.34. Dobowy rozkład ruchu ciężkiego

3.8. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych pomiarowych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu WIM można sformułować następujące wnioski:

1. Dane ze stacji WIM dostarczają pełnych informacji dotyczących ruchu i obciążenia pojazdów ciężkich.
2. Należy przeprowadzić weryfikację surowych danych ze stacji WIM ze względu na występujące w nich błędy. Zaleca się, aby dane obejmowały co najmniej jeden pełen rok pomiaru, aby wyeliminować wpływ rocznych wahań ruchu na przeprowadzane analizy.
3. Do celów przeprowadzenia analizy oddziaływania pojazdów na nawierzchnie należy stosować klasyfikację pojazdów, która zawiera informację o rodzaju pojazdu i konfiguracji jego osi.
4. Najliczniejszą grupę pojazdów w ruchu ciężkim stanowią pięcioosiowe ciągniki siodłowe z naczepą typu Cs+N 113 oraz dwuosiowe samochody ciężarowe bez przyczep typu C 11.

5. Struktura ruchu ciężkiego na drogach krajowych w Polsce jest zbliżona do struktury ruchu w Niemczech, jednocześnie znacząco różni się od struktury ruchu w USA.
6. Kształt rozkładów masy całkowitej pojazdów istotnie zależy od kategorii i typu pojazdu.
7. Z rozkładów masy całkowitej najliczniejszej kategorii pojazdów C+P wynika, że pojazdy te są najczęściej albo załadowane optymalnie (blisko masy dopuszczalnej) albo poruszają się bez ładunku. Odsetek pojazdów załadowanych „do połowy” w tej kategorii pojazdów jest stosunkowo niski.
8. Rozkład obciążenia osi pojazdów zależy od typu osi (sterowna, napędowa, pojedyncza, podwójna itp.). Rozkłady obciążenia osi mogą mieć przebieg jednomodalny lub dwumodalny.
9. Na rozkład obciążenia osi pojazdów wpływa dopuszczalne obciążenie osi pojazdu, obowiązujące na danej drodze. Istotny wpływ mają również inne czynniki charakteryzujące ruch na danej drodze, jak np. udział pojazdów przeciążonych.
10. Określono model matematyczny rozkładu obciążenia osi złożony z dwóch rozkładów normalnych. Model ten opisuje rzeczywiste rozkłady obciążenia osi z wystarczającą dokładnością.
11. Obciążenia pojazdów na poszczególnych stacjach pomiarowych różnią się od siebie, przekłada się to na występowanie różnic w średnich współczynnikach równoważności obciążenia pojazdów.
12. Z porównania średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów otrzymanych dla polskich stacji WIM z odpowiadającymi im współczynnikami określonymi w wybranych krajach europejskich wynika, że współczynniki te są zbliżone w Polsce, Austrii, Niemczech i Wielkiej Brytanii, natomiast we Francji są wyższe.
13. Średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów obliczone dla nawierzchni podatnych wg metody AASHTO, metody francuskiej i wzoru czwartej potęgi dają podobne wyniki. Wyniki obliczeń z metody mechanistyczno-empirycznej PG są nieco inne niż z pozostałych rozpatrywanych metod.
14. Wyniki obliczeń z metody PG wskazują, że pojazdy mają wyższe średnie współczynniki równoważności obciążenia w przypadku zastosowania kryterium spękań zmęczeniowych i niższe w przypadku zastosowania kryterium deformacji podłoża.
15. Metody określania oddziaływania pojazdów na nawierzchnie półsztywne nie są jeszcze dobrze poznane i dają rozbieżne wyniki. Wątpliwa jest poprawność stosowania metody francuskiej do obliczania współczynników równoważności obciążenia pojazdów dla nawierzchni półsztywnych w warunkach polskich.
16. Największy udział w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni, czyli największą agresywność względną, stwierdzono w przypadku pojazdów typu Cs+N 113.

17. Ruch ciężki ulega wahaniom w ciągu roku. Zmianom ulega średni dobowy ruch pojazdów oraz obciążenie nawierzchni wyrażone poprzez średnią dobową liczbę równoważnych osi standardowych.
18. Stwierdzono, że na większości stacji ruch ciężki w weekendy jest niższy średnio o 70% względem ruchu w dni robocze.
19. Na głównych drogach tranzytowych, jak A2 czy DK1 ruch w ciągu doby jest bardziej wyrównany niż na pozostałych drogach, gdzie obserwuje się znaczne zwiększenie liczby pojazdów w godzinach od 6.00 do 16.00.

4. Analiza oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie podatne

4.1. Cel i zakres analizy

Głównym celem przeprowadzonej w niniejszym rozdziale analizy było obliczenie średnich współczynników równoważności obciążenia osi i pojazdów w oparciu o mechaniczno-empiryczną metodę analizy konstrukcji nawierzchni, z zastosowaniem kryterium spękań zmęczeniowych nawierzchni MEPDG. W zakres niniejszego rozdziału wchodzi:

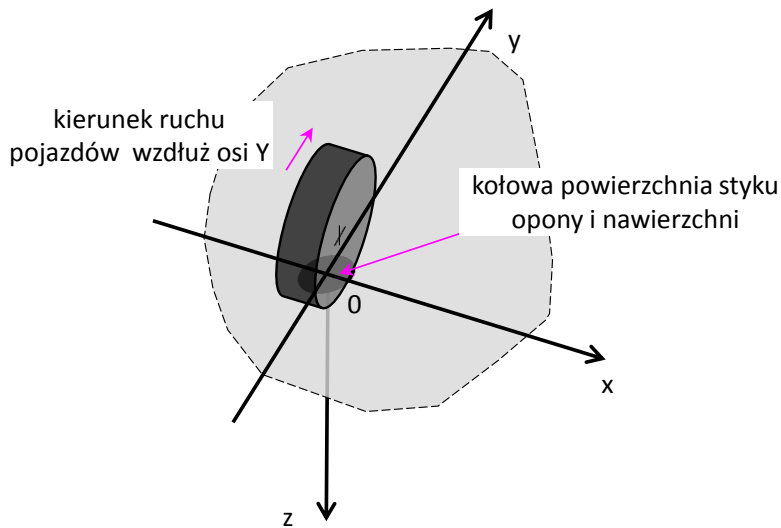
1. Przyjęcie modelu obliczeniowego konstrukcji nawierzchni oraz parametrów jej poszczególnych warstw.
2. Rozpoznanie i przyjęcie układu kół w pojazdach oraz odległości między osiami.
3. Wyznaczenie naprężeń kontaktowych i powierzchni styku opony i nawierzchni.
4. Obliczenie odkształceń w nawierzchni wywołanych obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi. Określenie wykresów zależności pomiędzy zmiennym obciążeniem osi a odkształceniami w punktach krytycznych.
5. Obliczenie jednostkowej szkody zmęczeniowej nawierzchni wywołanej obciążeniami osi pojedynczych i wielokrotnych.
6. Omówienie podstaw teoretycznych wyznaczania współczynników równoważności obciążenia osi.
7. Określenie współczynników równoważności obciążenia osi w zależności od obciążenia osi pojedynczych i wielokrotnych. Porównanie trzech metod obliczania współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych i wybór jednej z nich.
8. Obliczenie średniej jednostkowej szkody zmęczeniowej i średnich współczynników równoważności obciążenia osi i pojazdów w oparciu o rzeczywiste rozkłady obciążenia osi otrzymane z analizy danych z ważenia pojazdów w ruchu.
9. Podsumowanie i wyciągnięcie wniosków, oraz wskazanie tych elementów analizy, które mogą mieć praktyczne zastosowanie.

4.2. Założenia do obliczeń

4.2.1. Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni

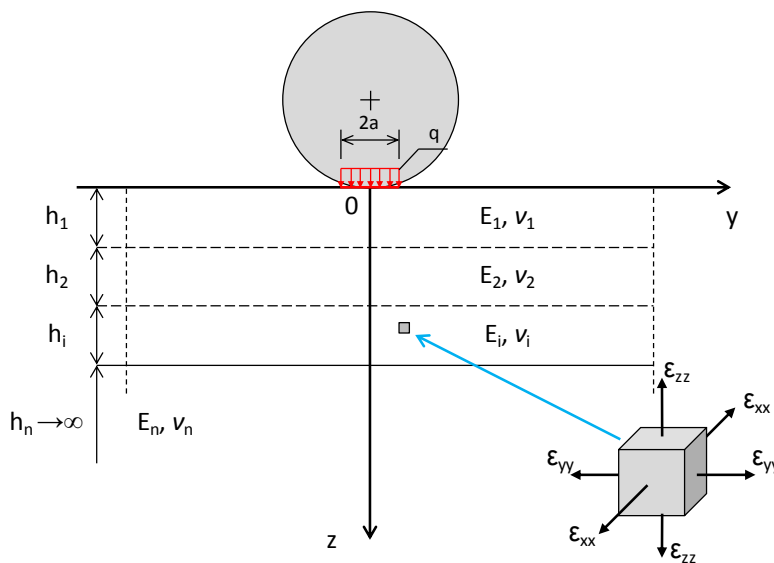
Do przeprowadzenia analizy oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnie podatne wykorzystano model oparty na teorii wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej. Model sprężysty jest właściwy w przypadku działania obciążeń krótkotrwałych, które są charakterystyczne dla pojazdów w ruchu. Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat obrazujący przyjęty układ współrzędnych oraz obciążenie

modelu nawierzchni pojedynczym kołem pojazdu. Opis osi ma znaczenie szczególnie przy rozpatrywaniu obciążenia nawierzchni kołami bliźniaczymi oraz osiami podwójnymi i potrójnymi. Schemat przyjętego modelu konstrukcji nawierzchni przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.1. Układ współrzędnych modelu konstrukcji nawierzchni

Parametry materiałowe warstw konstrukcji nawierzchni zestawiono w tabelicy 4.1 i są one zgodne z założeniami przyjętymi do obliczeń konstrukcji do Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych I Półsztywnych z 2013 r, [78], [79]. Moduły sprężystości E i współczynniki Poissona ν odpowiadają przeciętnym, rocznym wartościom określonym dla temperatury ekwiwalentnej nawierzchni 13°C . Moduły sprężystości mieszanek mineralno-asfaltowych określono zgodnie z metodą Shell. Przyjęto czas obciążenia nawierzchni $t = 0,02$ s. Grubości warstw nawierzchni odpowiadają konstrukcji typu A1 KR3 według katalogu [79].



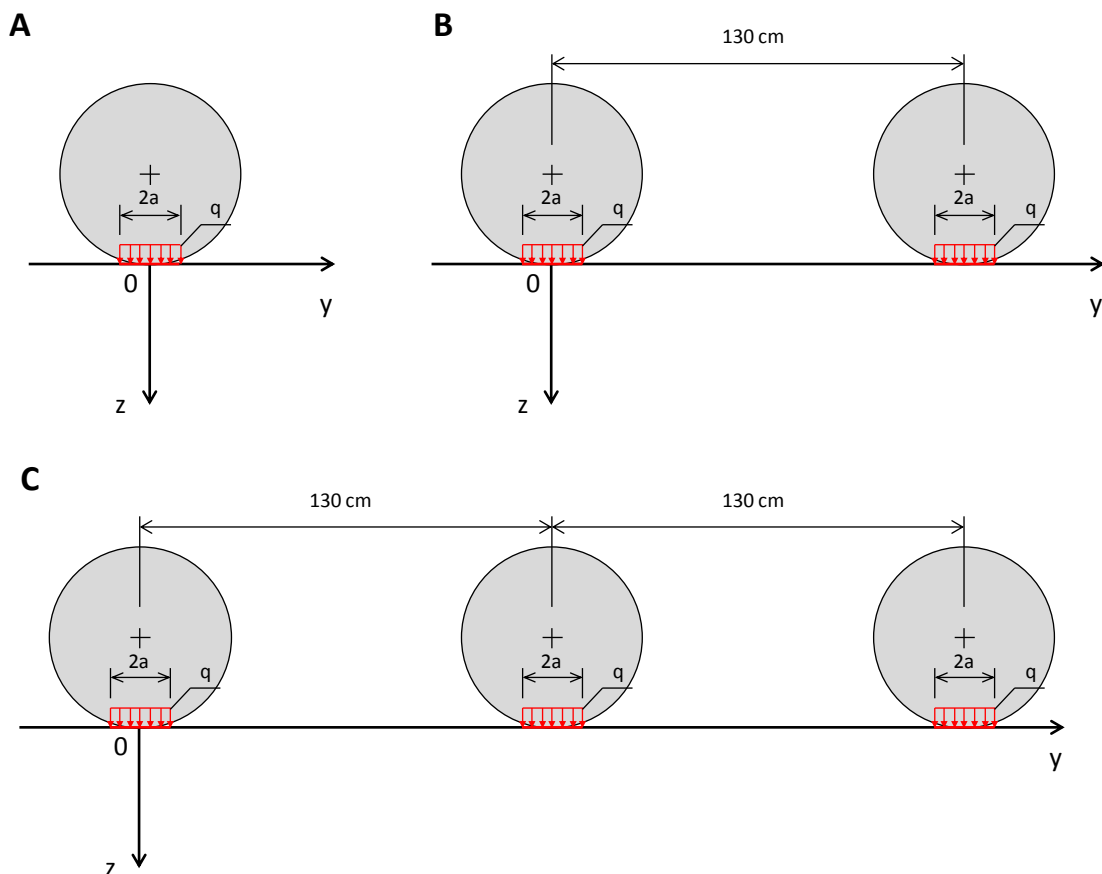
Rysunek 4.2. Schemat modelu konstrukcji nawierzchni w przyjętym układzie współrzędnych z zaznaczonymi odkształceniami poziomymi

Tablica 4.1. Parametry materiałowe warstw konstrukcji nawierzchni

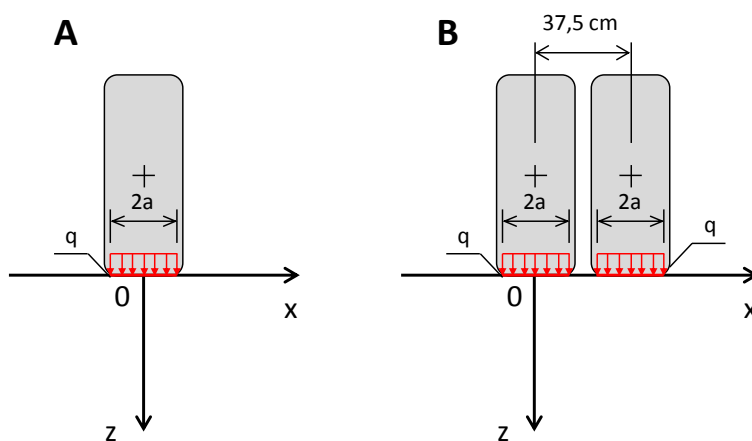
Nr warstwy i materiał	Grubość warstwy h [cm]	Moduł sprężystości E [MPa]	Współczynnik Poissona ν [-]	Wagowa zawartość asfaltu [% m/m]	Objętościowa zawartość asfaltu [% v/v]	Zawartość wolnych przestrzeni [% v/v]
1. Mastyks gryso- wy z asfaltem 50/70	4	7 300	0,3	6,3	16,0	3,0
2. Beton asfalto- wy do warstwy wiążącej, z asfaltem 35/50	5	10 300	0,3	4,1	10,5	6,0
3. Beton asfalto- wy do warstwy podbudowy, z asfaltem 35/50	7	9 800	0,3	3,9	10	7,0
4. Mieszanka niezwiązana z kruszywem C _{90/3}	20	400	0,3	-	-	-
5. Podłoże gruntowe	∞	100	0,35	-	-	-

4.2.2. Układ kół w pojazdach

Model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni został obciążony kołami osi pojedynczych i wielokrotnych. Przyjęto, że obciążenie osi rozkłada się równomiernie na koła. Model każdorazowo obciążono kołami z jednej strony osi. Wyróżniono osie pojedyncze, podwójne i potrójne, oraz koła pojedyncze i bliźniacze. Do obliczeń przyjęto, że osie pojedyncze napędowe są wyposażone w koła bliźniacze, natomiast osie sterowne oraz osie w przyczepach i naczepach są wyposażone w koła pojedyncze. Z obserwacji terenowych wynika, że osie w przyczepach i naczepach mogą być wyposażone również w koła bliźniacze ale w celu uproszczenia analizy i ze względu na brak danych o udziale osi wyposażonych w koła bliźniacze przyjęto, że wszystkie osie w przyczepach i naczepach wyposażone są w koła pojedyncze. Typ i rozstaw kół w poszczególnych rodzajach osi podano w tablicy 4.2. Na rysunkach 4.3 i 4.4 przedstawiono schemat obciążenia modelu konstrukcji nawierzchni kołami pojazdów. Środek obciążenia od pierwszego koła wypada zawsze w punkcie 0, natomiast kolejne koła są rozsunięte o odległość podaną w tablicy 4.2.



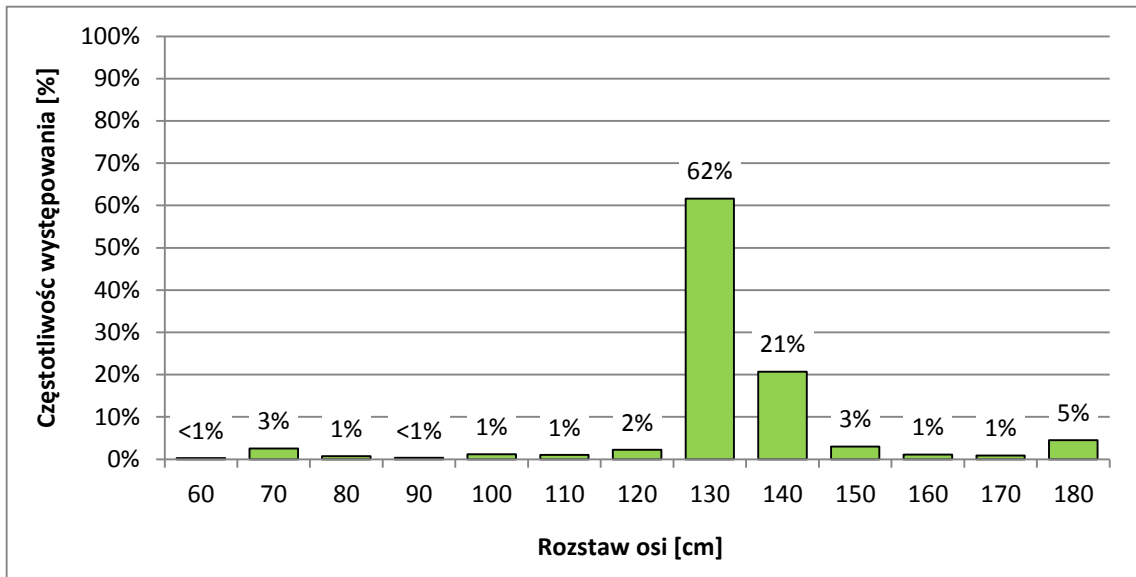
Rysunek 4.3. Schemat obciążenia modelu konstrukcji nawierzchni wzdłuż kierunku ruchu pojazdu a) osi pojedynczą b) osi podwójną c) osi potrójną



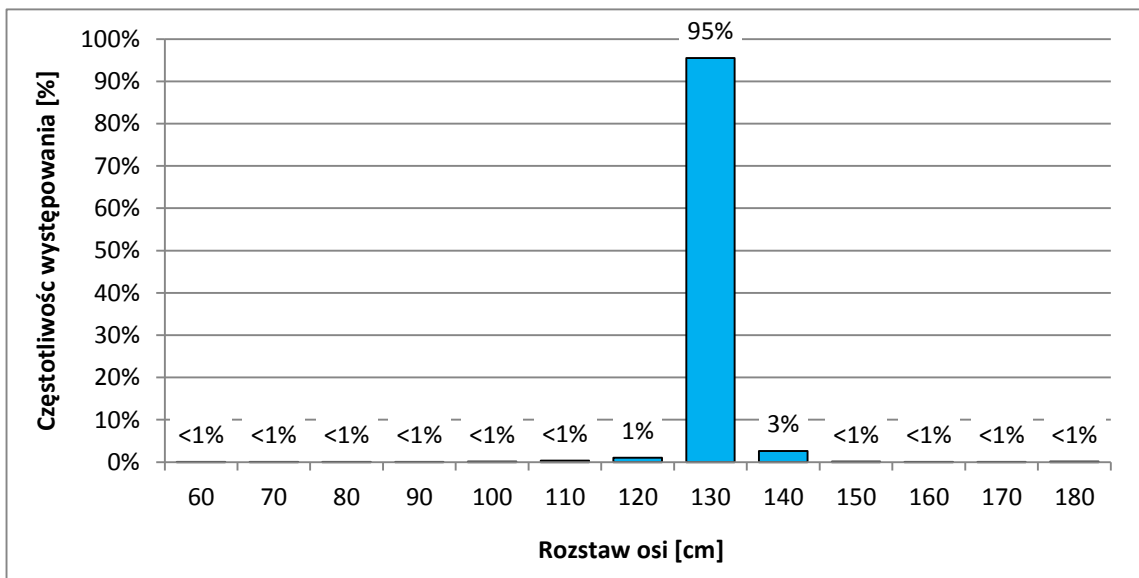
Rysunek 4.4. Schemat obciążenia modelu konstrukcji nawierzchni w kierunku poprzecznym do kierunku ruchu pojazdów a) osi o kołach pojedynczych b) osi o kołach bliźniaczych

Rozstaw kół bliźniaczych i odległości między osiami przyjęto po wcześniejszym przeprowadzeniu studiów danych technicznych pojazdów [110], [188], [189], [194] i francuskiej metody projektowania nawierzchni [25]. Dodatkowo określono rozkład

odległości między sąsiednimi osiami składowymi w osiach podwójnych i potrójnych na podstawie danych ze stacji WIM, zebranych w ramach niniejszej pracy. Do wykonania rozkładów odległości wykorzystano wszystkie dostępne dane bez rozróżniania poszczególnych stacji. Procentowe rozkłady odległości między sąsiednimi osiami przedstawiono na rysunku 4.5 dla osi podwójnych, oraz na rysunku 4.6 dla osi potrójnych. Jak wynika z rysunków 4.5 i 4.6 w zdecydowanej większości osi podwójnych i potrójnych rozstaw jest równy 130 cm.



Rysunek 4.5. Procentowy rozkład rozstawu między sąsiednimi osiami składowymi w osiach podwójnych na podstawie danych ze wszystkich rozpatrywanych stacji WIM



Rysunek 4.6. Procentowy rozkład rozstawu między sąsiednimi osiami składowymi w osiach potrójnych na podstawie danych ze wszystkich rozpatrywanych stacji WIM

Tablica 4.2. Układy kół i osi przyjęte do obliczeń

Rodzaj osi	Typ koła	Rozstaw osiowy kół bliźniaczych (wzdłuż osi 0X)	Odległość między sąsiednimi osiami (wzdłuż osi 0Y)
Pojedyncza (sterowna, w przyczepach lub w naczepach)	Pojedyncze	-	-
Pojedyncza (napędowa)	Bliźniacze	37,5 cm	-
Podwójna (sterowna, napędowa, w przyczepach lub w naczepach)	Pojedyncze	-	130 cm
Potrójna (w przyczepach lub w naczepach)	Pojedyncze	-	130 cm

4.2.3. Naprężenie kontaktowe i powierzchnia styku opony i nawierzchni

Przyjęto założenie, że obciążenie osi pojazdów jest równomiernie rozłożone na poszczególne koła, z których przekazywane jest na model konstrukcji nawierzchni przez kołową powierzchnię styku opony i nawierzchni. Przyjęto, że naprężenie kontaktowe na styku opony i nawierzchni jest równomierne, pominięto wpływ działania naprężeń stycznych. Zgodnie z założeniami zależność pomiędzy naprężeniem kontaktowym, powierzchnią styku i obciążeniem osi można przedstawić w następujący sposób:

$$q = \frac{Q}{nA} = \frac{Q}{n\pi a^2} \quad (4.1)$$

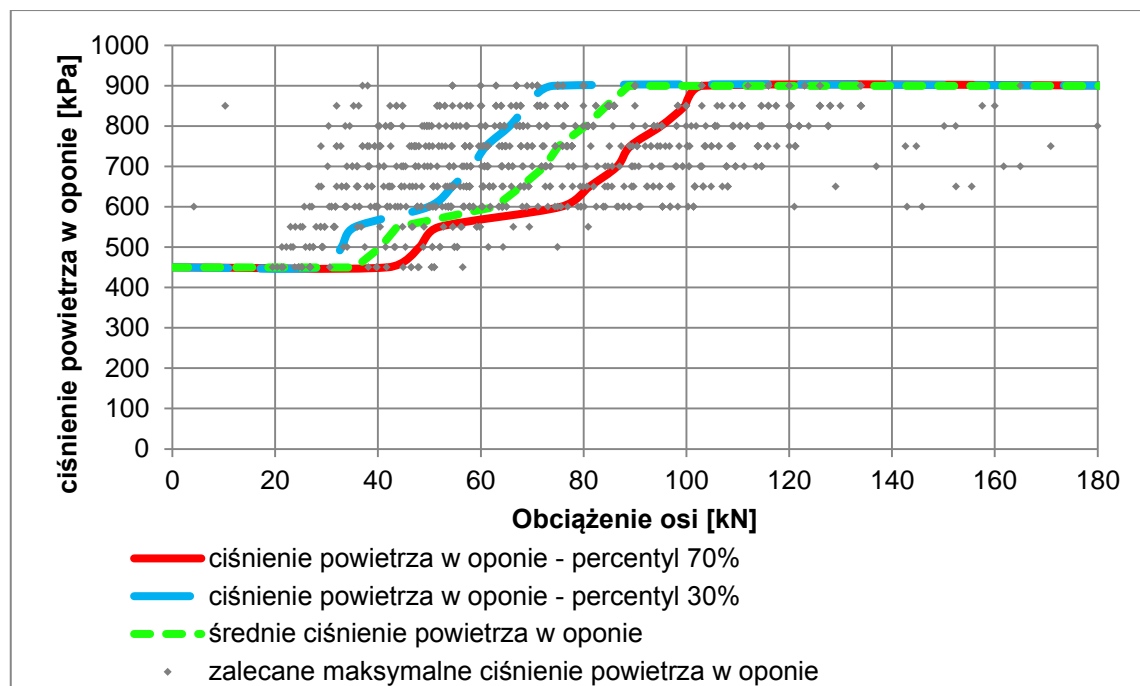
gdzie:

- q – naprężenie kontaktowe na styku opony i nawierzchni [kPa],
- Q – obciążenie osi pojazdu [kN],
- A – powierzchnia styku pojedynczej opony i nawierzchni [m²],
- n – liczba kół w osi,
- a – promień kołowego śladu styku opony i nawierzchni [m].

Do projektowania konstrukcji nawierzchni zazwyczaj przyjmuje się jedno obciążenie osi standardowej, dla którego ustala się powierzchnię styku opony i nawierzchni oraz naprężenie kontaktowe. Jeżeli analizowane są osie pojazdów o zmiennych obciążeniach to należy dla tych zmiennych obciążeń określić powierzchnię styku opony i nawierzchni i ciśnienie kontaktowe. Według przewodnika do mechanistyczno-empirycznego projektowania nawierzchni MEPDG (USA) [46] przyjmuje się stałe naprężenie kontaktowe $q=823$ kPa, jednak dla niskich obciążeń osi pojazdów przyjęcie tak wysokiego naprężenia kontaktowego jest nieuzasadnione, a powierzchnia styku opony i nawierzchni jest zbyt mała. Innym z wariantów byłoby przyjęcie stałej powierzchni styku, jednak w

tym przypadku naprężenia kontaktowe dla osi o małych obciążeniach mogłyby być zbyt niskie i jednocześnie zbyt wysokie dla osi o dużych obciążeniach. W celu ustalenia wartości naprężenia kontaktowego dla zmiennych obciążeń osi przeprowadzono analizę danych o ciśnieniu powietrza w ogumieniu pojazdów.

Opony w pojazdach należy pompować do ustalonego ciśnienia powietrza, którego wartość zależy od jej typu, przeznaczenia i od przewidywanego, maksymalnego obciążenia osi. Na rysunku 4.7. punktami oznaczono zalecane wartości ciśnienia powietrza w ogumieniu oraz odpowiadające im, maksymalne obciążenia osi sporządzone dla różnych rodzajów opon stosowanych w pojazdach ciężarowych. Rysunek 4.7. sporządzono na podstawie tabel ciśnień powietrza w oponach podanych przez firmy produkujące opony: Continental [181] i Michelin [190]. Dla określonych wartości ciśnień powietrza w oponie obliczono średnie obciążenie osi, oraz percentyle 30% i 70%.



Rysunek 4.7. Zalecane ciśnienie powietrza w oponie w zależności od obciążenia osi

Jak wynika z rysunku 4.7. rozrzut maksymalnego obciążenia osi przy zadanym ciśnieniu powietrza jest znaczny. Przy bardziej wnikliwej analizie można stwierdzić, że na wielkość ciśnienia powietrza w oponie wpływ również ma przeznaczenie opony (np. opony stosowane do kół bliźniaczych są mocniej pompowane). Ponadto naprężenia kontaktowe na styku opony i nawierzchni zależą istotnie od właściwości mechanicznych samej opony (por rozdział 2.3.6). Przyjęta do obliczeń zależność między naprężeniem kontaktowym a obciążeniem osi jest sporym uproszczeniem. Wiadomo też, że analiza naprężenia kontaktowego jest bardzo skomplikowana (patrz rozdział 2.3.6)

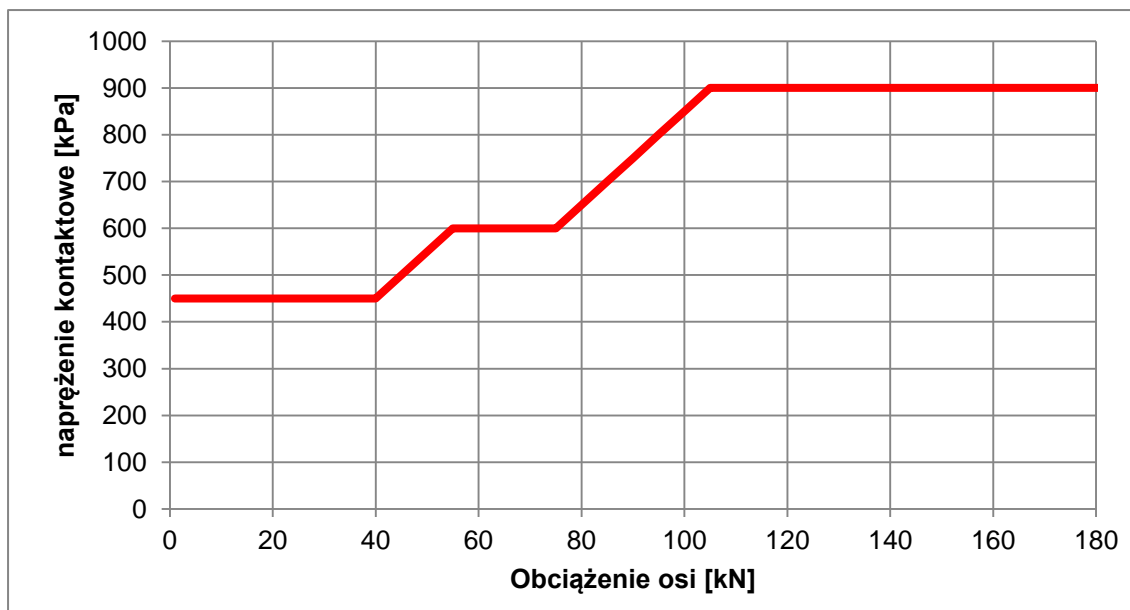
Do dalszych obliczeń przyjęto, że naprężenie kontaktowe na styku opony i nawierzchni jest liniowo zależne od obciążenia osi w odpowiednich przedziałach. Przyjęto również uproszczenie, że naprężenie kontaktowe jest równe ciśnieniu powietrza w ogumieniu, a także przyjęto, że zależność ta pokrywa się z przebiegiem 70% percentyla obciążenia osi dla zadanego ciśnienia powietrza w oponie. Przebieg zależności naprężenia kontaktowego od obciążenia osi opisano równaniem (4.2) i przedstawiono na rysunku 4.8.

$$\begin{cases} q = 450 & \text{dla } Q \in (0; 40) \\ q = 10 \cdot Q + 50 & \text{dla } Q \in (40; 55) \\ q = 600 & \text{dla } Q \in (55; 75) \\ q = 10 \cdot Q - 150 & \text{dla } Q \in (75; 105) \\ q = 900 & \text{dla } Q \in (105; 200) \end{cases} \quad (4.2)$$

gdzie:

q – naprężenie kontaktowe w kPa,

Q – obciążenie osi pojedynczej lub osi składowej w grupie osi w kN.



Rysunek 4.8. Przyjęta do obliczeń zależność naprężenia kontaktowego od obciążenia osi

4.3. Analizy obliczeniowe

4.3.1. Trwałość zmęczeniowa nawierzchni

Do analizy trwałości zmęczeniowej nawierzchni podatnych wybrano kryterium spękań zmęczeniowych z dołu do góry MEPDG, które określone jest poprzez następujący wzór [47], [77]:

$$N_f = D_{FC} \cdot 7,3557 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (4.3)$$

gdzie:

- N_f – trwałość zmęczeniowa nawierzchni, czyli liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych na procentowej części FC całkowitej powierzchni pasa ruchu,
- k'_1 – parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstwy asfaltowej,
- ε_t – poziome odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie,
- E – moduł sztywności sprężystej warstwy asfaltowej [MPa],
- C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej, określony wzorami:

$$C = 10^M$$
$$M = 4,84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \quad (4.4)$$

gdzie:

- V_b – efektywna zawartość asfaltu [% objętościowo],
- V_a – efektywna zawartość wolnych przestrzeni [% objętościowo].

Parametr D_{FC} wyraża całkowitą szkodę zmęczeniową nawierzchni przy wystąpieniu spękań zmęczeniowych na procentowej części FC całkowitej powierzchni pasa ruchu i oblicza się go ze wzoru:

$$D_{FC} = \frac{1}{100} 10^{(-C_1 C'_1 + \ln(\frac{100}{FC} - 1)) \frac{1}{C_2 C'_2}} \quad (4.5)$$

gdzie:

- FC – procent spękanej powierzchni na całym pasie ruchu,
- $C_1=1,0, C'_1=-2,0, C_2=1,0, C'_2=-2,40874 - 39,748 \left(1 + \frac{h_{AC}}{2,54}\right)^{-2,856}$ – współczynniki kalibracyjne,
- h_{AC} – łączna grubość warstw asfaltowych [cm].

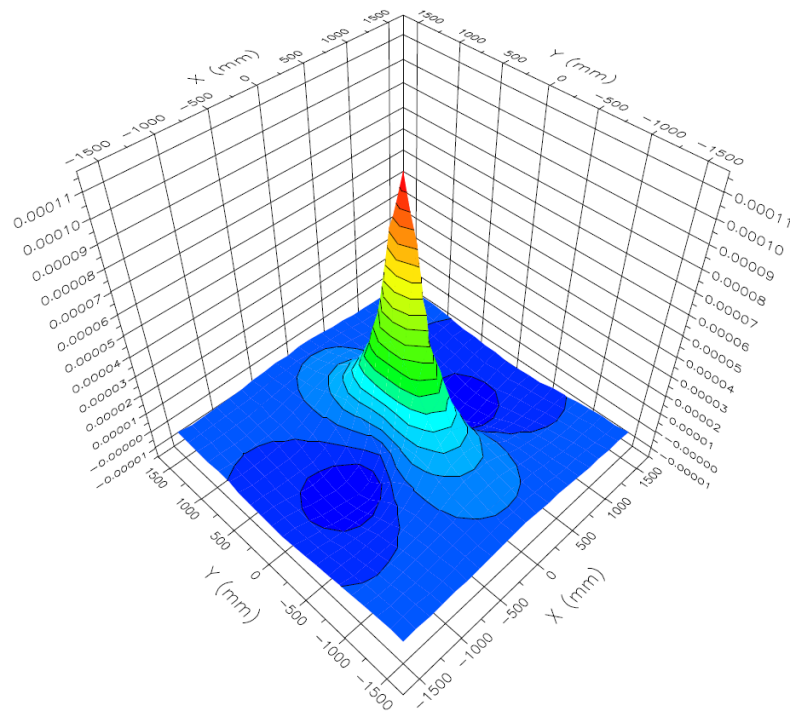
W tabelicy 4.3 zestawiono wszystkie parametry określone do obliczeń trwałości zmęczeniowej poza odkształceniami ϵ_t . Poziome odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych ϵ_t obliczono w zależności od obciążenia osi oraz jej konfiguracji. Sposób określania odkształceń ϵ_t podano w rozdziale 4.3.3.

Tablica 4.3. Zestawienie parametrów określonych do obliczeń trwałości zmęczeniowej wg kryterium spękań zmęczeniowych z dołu do góry MEPDG

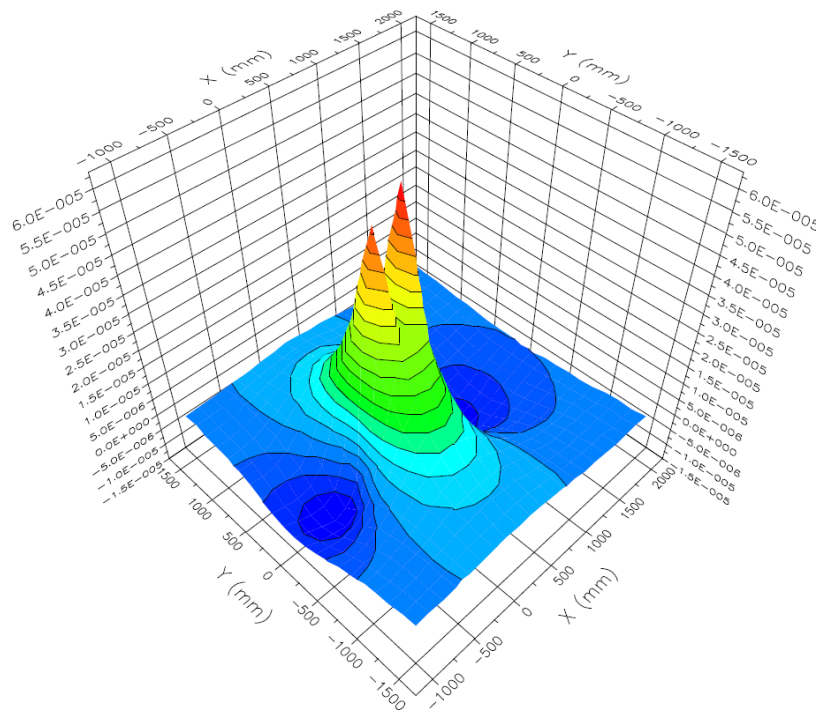
Łączna grubość warstw asfaltowych	h_{AC}	16 cm
Kryterium stanu zniszczenia - procent spękanej powierzchni pasa	FC	20
Współczynnik kalibracyjny	C2'	-2,55
Całkowita szkoda zmęczeniowa nawierzchni przy wystąpieniu spękań zmęczeniowych na procentowej części pasa ruchu FC	DFC	0,285
Efektywna zawartość asfaltu [% objętościowo]	Vb	10
Efektywna zawartość wolnych przestrzeni [% objętościowo]	Va	7
Współczynnik	C	0,32
Współczynnik kalibracyjny	k1'	250
Moduł sztywności warstwy asfaltowej	E	9820 MPa

4.3.2. Odkształcenia w nawierzchni wywołane obciążeniem osiami pojedynczymi i wielokrotnymi

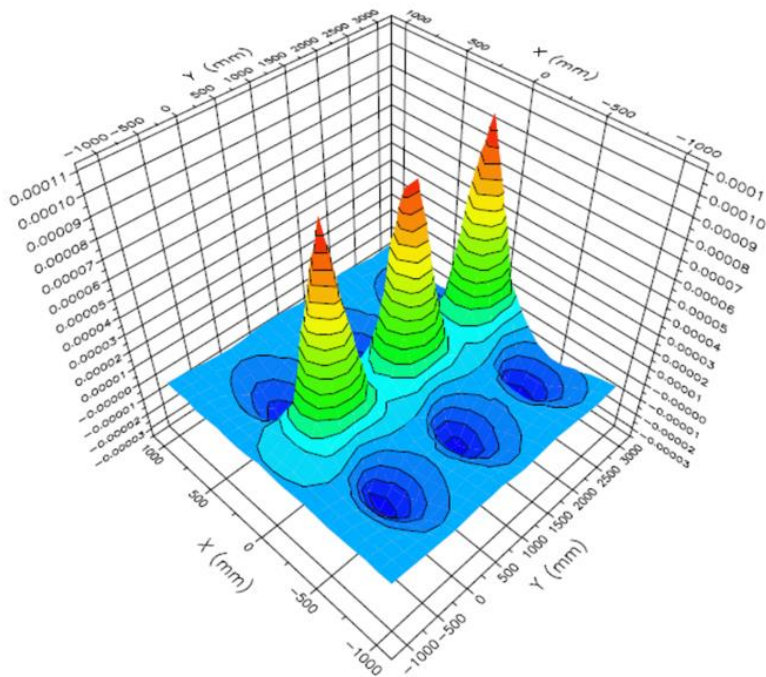
Naprężenia i odkształcenia w przyjętym modelu konstrukcji nawierzchni wywołane zadaniem obciążeniem od kół pojazdów zostało obliczone w oparciu o oprogramowanie komputerowe BISAR 3.0 [136] oraz PADS 1.1 [106]. W dalszej części szczególnie rozpatrywano poziome odkształcenia na spodzie warstw asfaltowych, gdyż są one najbardziej istotne przy analizie trwałości zmęczeniowej nawierzchni ze względu na spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych. Poglądowe przykłady wykresów odkształceń na spodzie warstw asfaltowych przedstawiono na rysunku 4.9 dla obciążenia osią pojedynczą o kołach pojedynczych, na rysunku 4.10 dla obciążenia osią pojedynczą o kołach bliźniaczych i na rysunku 4.12 dla obciążenia osią potrójną.



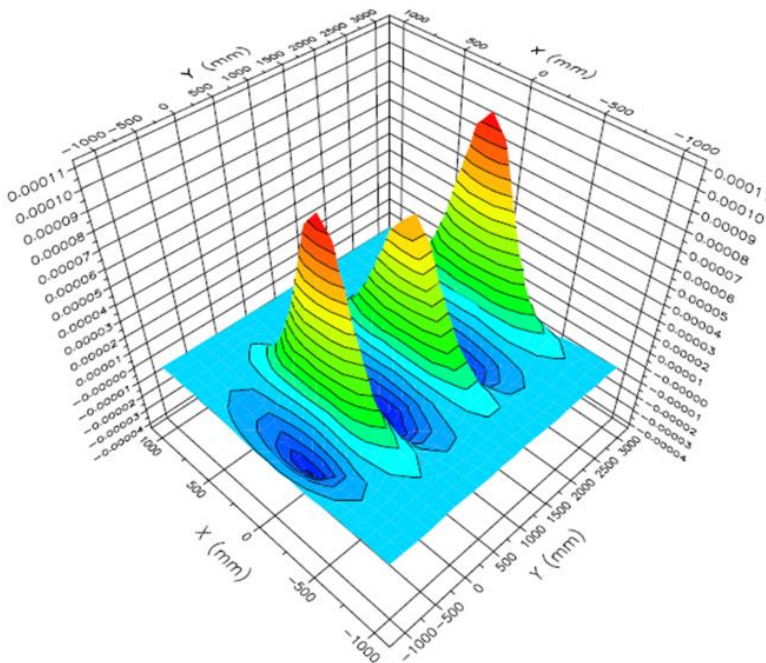
Rysunek 4.9. Odkształcenia poziome ϵ_{xx} na spodzie warstw asfaltowych pod obciążeniem osi pojedynczej o obciążeniu $Q=100$ kN wyposażonej w koło pojedyncze



Rysunek 4.10. Odkształcenia poziome ϵ_{xx} na spodzie warstw asfaltowych pod obciążeniem osi pojedynczej o obciążeniu $Q=100$ kN wyposażonej w koło bliźniacze



Rysunek 4.11 Odształcenia poziome ϵ_{xx} (poprzecznie do kierunku jazdy) na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia osią potrójną o obciążeniu $Q=240$ kN (po 40 kN na każde koło pojedyncze)

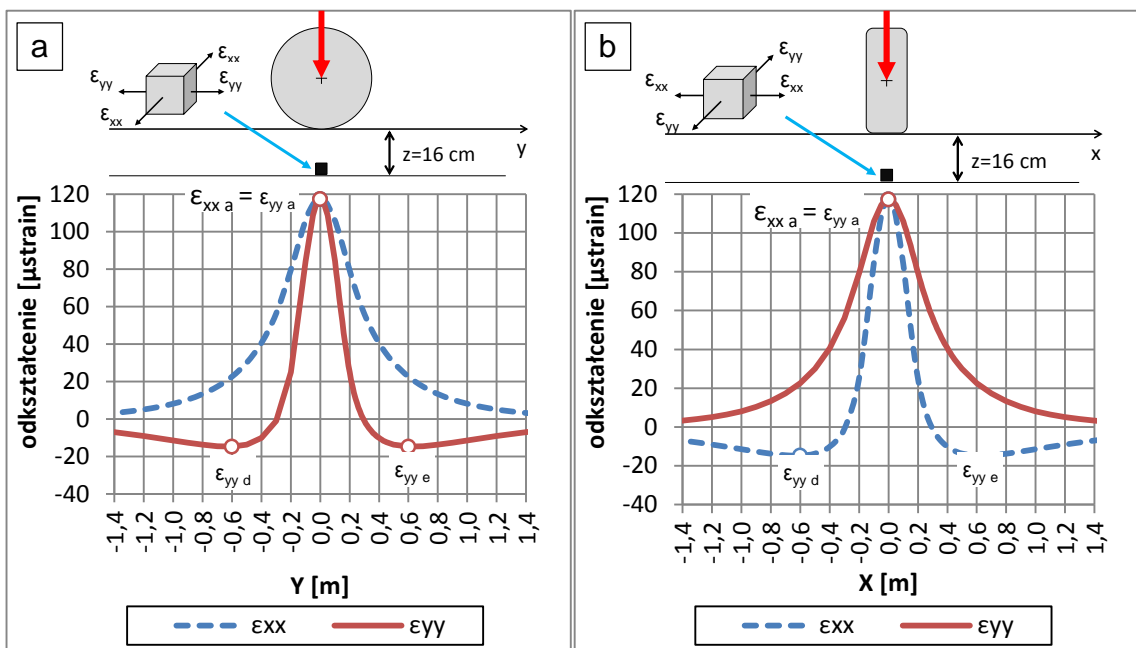


Rysunek 4.12 Odształcenia poziome ϵ_{yy} (wzdłuż kierunku jazdy) na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia osią potrójną o obciążeniu $Q=240$ kN (po 40 kN na każde koło pojedyncze)

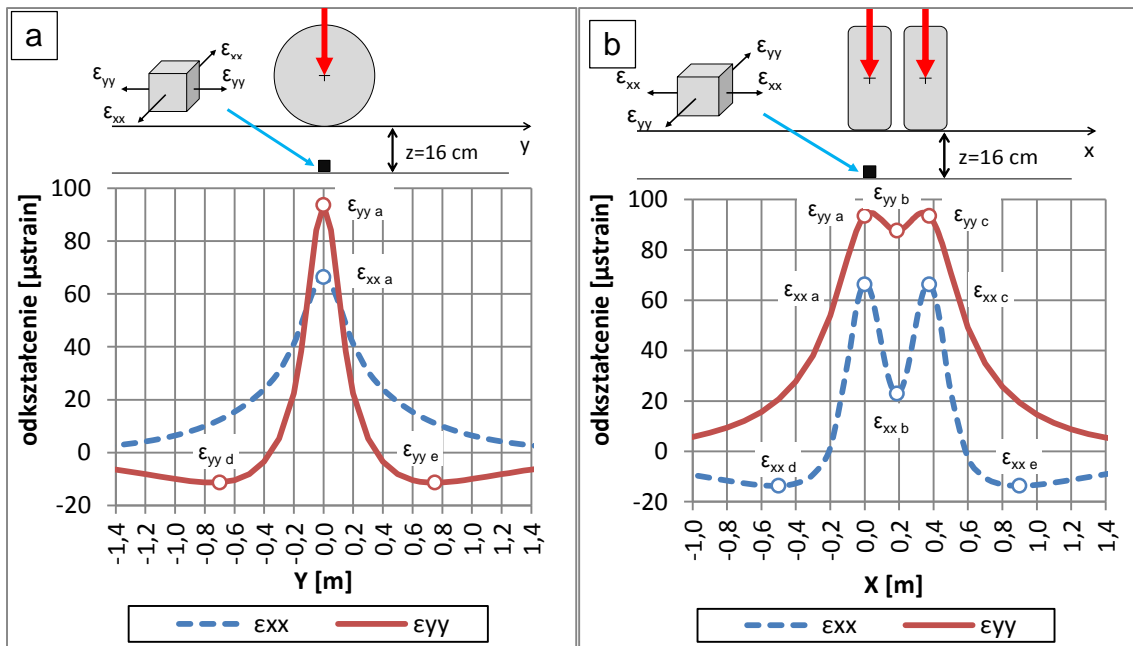
Odształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych ($z=h=16$ cm) osiągają swoje ekstrema lokalne w tzw. punktach krytycznych, które zostały oznaczone na rysunkach 4.13-4.16. W przypadku osi pojedynczych o kołach pojedynczych

odkształcenia maksymalne $\epsilon_{xx a}$ i $\epsilon_{yy a}$ są równe i wypadają w punkcie krytycznym dokładnie pod środkiem obciążenia koła (patrz rysunek 4.13). W przypadku osi pojedynczych o kołach bliźniaczych (rysunek 4.14) odkształcenia ekstremalne wypadają w punktach krytycznych w środku śladów poszczególnych kół ($\epsilon_{xx a} = \epsilon_{xx c}$ i $\epsilon_{yy a} = \epsilon_{yy c}$) lub w śladzie między kołami ($\epsilon_{xx b}$ i $\epsilon_{yy b}$). Warto zwrócić uwagę, że wzdłuż kierunku jazdy (oś Y) pojawiają się ekstremalne (minimalne) odkształcenia $\epsilon_{yy d}$ i $\epsilon_{yy e}$ przed i za obciążeniem osi. Analogicznie odkształcenia ekstremalne $\epsilon_{xx d}$ i $\epsilon_{xx e}$ pojawiają się wzdłuż osi X, poprzecznie do kierunku jazdy.

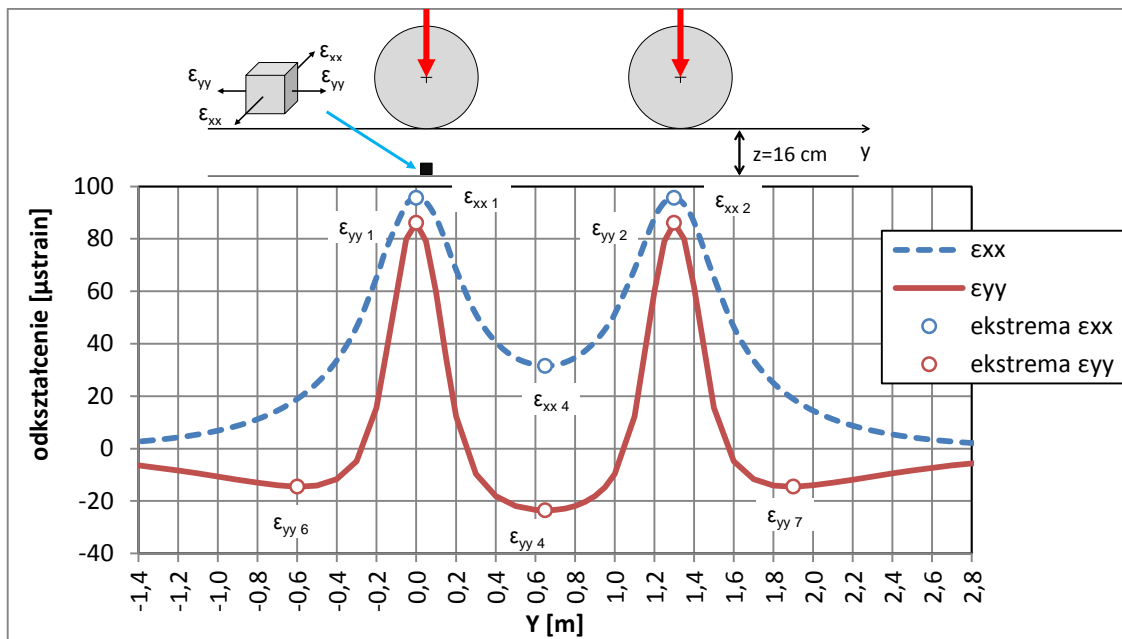
Przy rozpatrywaniu osi podwójnych i potrójnych o kołach pojedynczych odkształcenia ekstremalne występują pod środkami obciążenia osi ($\epsilon_{xx 1}$, $\epsilon_{xx 2}$, $\epsilon_{xx 3}$, $\epsilon_{yy 1}$, $\epsilon_{yy 2}$, $\epsilon_{yy 3}$), w połowie odległości między osiami ($\epsilon_{xx 4}$, $\epsilon_{xx 5}$, $\epsilon_{yy 4}$, $\epsilon_{yy 5}$), a w przypadku odkształceń ϵ_{xx} także przed pierwszą i za ostatnią osią ($\epsilon_{xx 6}$ i $\epsilon_{xx 7}$). Osie podwójne i potrójne wyposażone są w koła pojedyncze, dlatego rozpatrywano tylko odkształcenia powstające wzdłuż śladu koła ($x=0$), czyli wzdłuż osi Y.



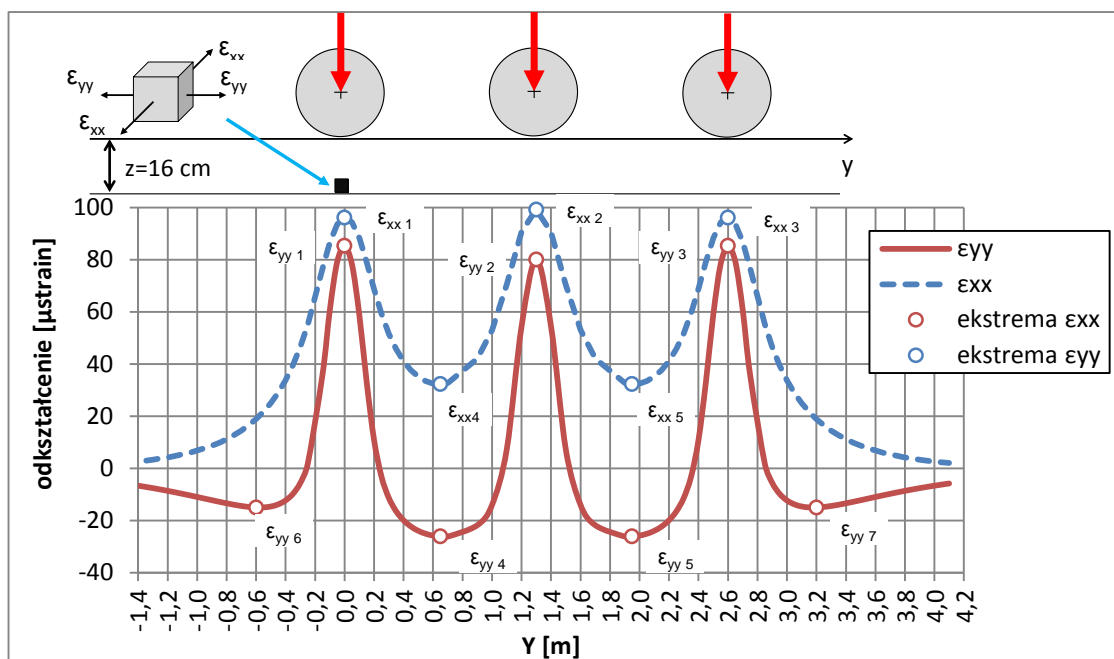
Rysunek 4.13 Odkształcenia ϵ_{xx} i ϵ_{yy} na spodzie warstw asfaltowych ($z=h=16\text{ cm}$) od osi pojedynczej o kołach pojedynczych i obciążeniu $Q=100\text{ kN}$ a) wzdłuż osi Y i $x=0$ b) wzdłuż osi X i $y=0$



Rysunek 4.14 Odształcenia ϵ_{xx} i ϵ_{yy} na spodzie warstw asfaltowych ($z=h=16$ cm) od osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i obciążeniu $Q=100$ kN a) wzdłuż osi Y i $x=0$ b) wzdłuż osi X i $y=0$

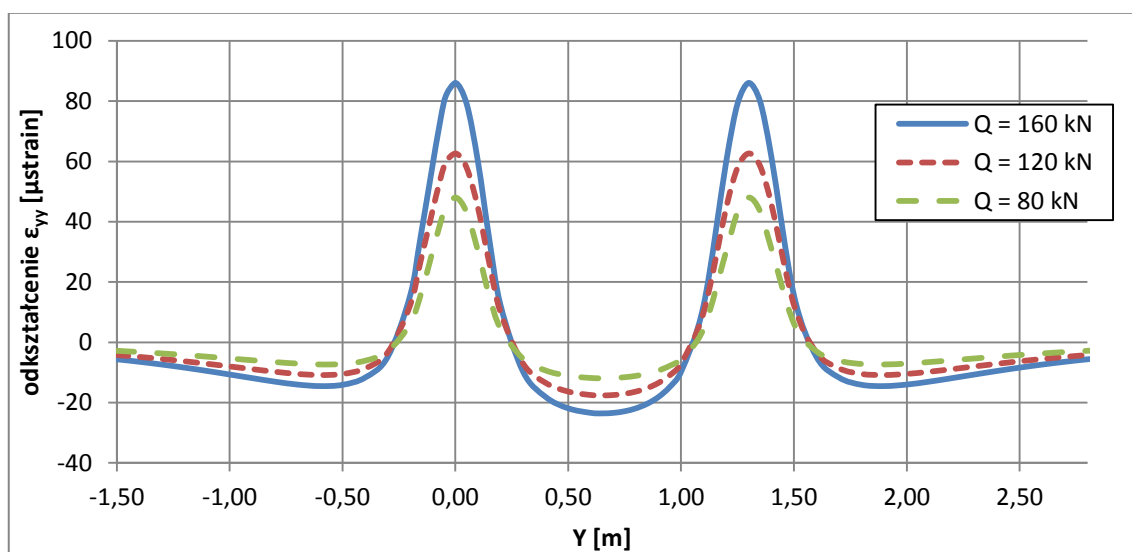


Rysunek 4.15 Odształcenia ϵ_{xx} i ϵ_{yy} wzdłuż osi Y dla $x=0$ i $z=h=16$ cm (spód warstw asfaltowych) od osi podwójnej o obciążeniu $Q = 160$ kN, kółkami oznaczono ekstrema lokalne odształceń w punktach krytycznych



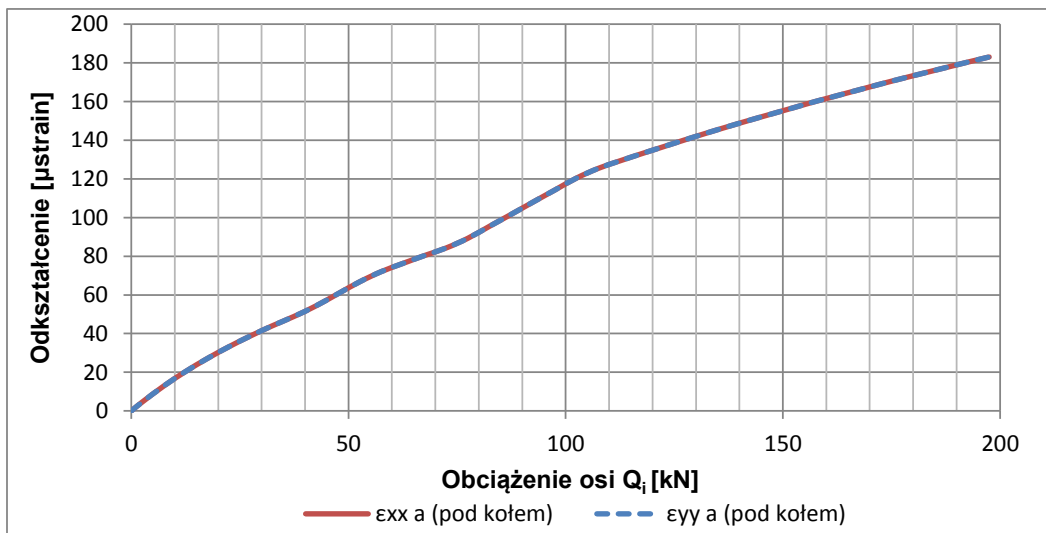
Rysunek 4.16 Odkształcenia na ϵ_{xx} i ϵ_{yy} wzdłuż osi Y dla $x=0$ i $z=h=16$ cm (spód warstw asfaltowych) od osi potrójnej o obciążeniu $Q=240$ kN, kółkami oznaczono punkty krytyczne (ekstrema lokalne)

Z analizy odkształceń wywołanych zmiennym obciążeniem osi Q i zmiennym naprężeniem kontaktowym q wynika, że wartości Q oraz q nie wpływają na lokalizację punktów krytycznych, punktów zerowych i lokalizacji stref rozciąganych i ściskanych pod warunkiem równomiernego obciążenia wszystkich kół w osi. Na rysunku 4.17 przedstawiono przykład wyników obliczeń dla osi podwójnej o kołach pojedynczych i trzech obciążeniach osi Q z odpowiednio dobranym naprężeniem kontaktowym q , obliczonym wg wzoru 4.2.

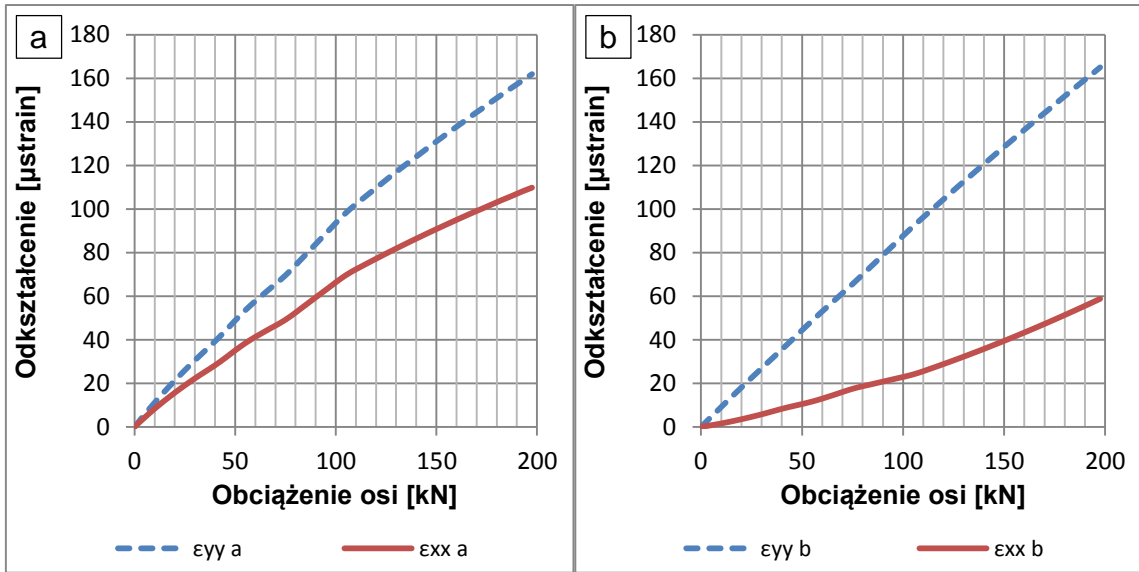


Rysunek 4.17 Odkształcenia ϵ_{yy} wzdłuż osi Y dla $x=0$ i $z=h=16$ cm (spód warstw asfaltowych) od osi podwójnej o obciążeniu $Q=240$ kN, $Q=120$ kN i $Q=80$ kN

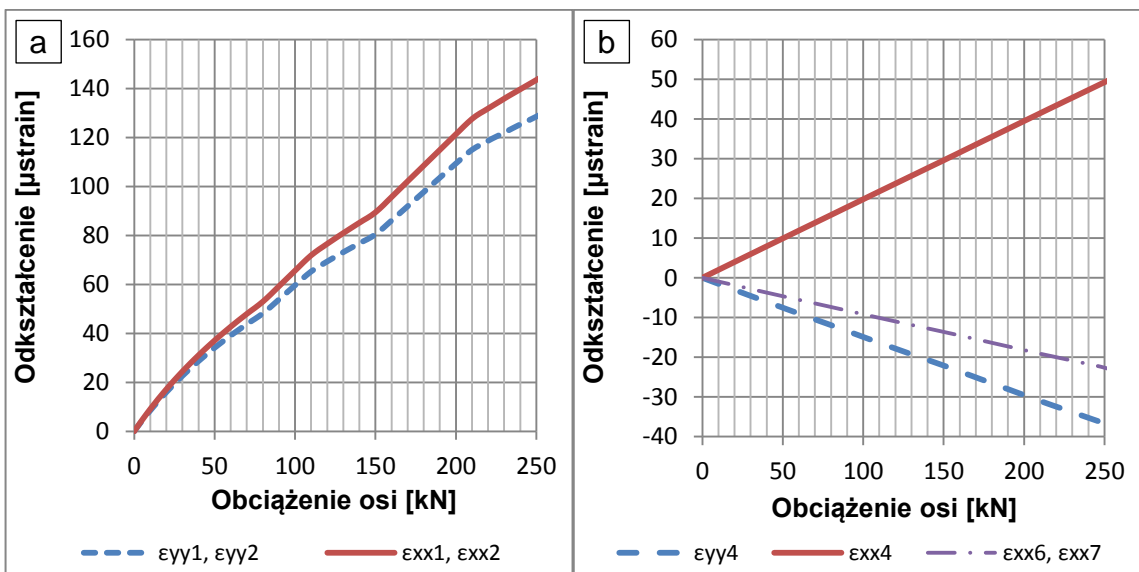
W kolejnym kroku obliczono ekstremalne odkształcenia ε_{xx} oraz ε_{yy} w punktach krytycznych w zależności od zmiennego obciążenia osi Q_i . W obliczeniach uwzględniono zmienne naprężenie kontaktowe na styku opony i nawierzchni q w zależności od obciążenia osi Q_i , zgodnie z równaniem 4.2. W przypadku osi pojedynczych o kołach pojedynczych odkształcenia $\varepsilon_{xx a} = \varepsilon_{yy a}$ niezależnie od obciążenia osi (rysunek 4.18). Gdy oś pojedyncza wyposażona jest w koła bliźniacze (rysunek 4.19) najwyższą wartość mają odkształcenia pod środkiem obciążenia koła $\varepsilon_{yy a}$ oraz w połowie odległości między kołami $\varepsilon_{yy b}$, przy czym $\varepsilon_{yy a} \neq \varepsilon_{yy b}$. Ekstremalne odkształcenia wywołane oddziaływaniem osi podwójnych i potrójnych, obliczone w punktach krytycznych, przedstawiono na rysunkach 4.20 i 4.21. Funkcje zależności odkształceń ekstremalnych od obciążenia osi Q są monotonicznie rosnące. „Nierówny” kształt przebiegu funkcji wynika z wprowadzenia zależności pomiędzy naprężeniem kontaktowym a obciążeniem osi Q_i , podanej wzorem (4.2).



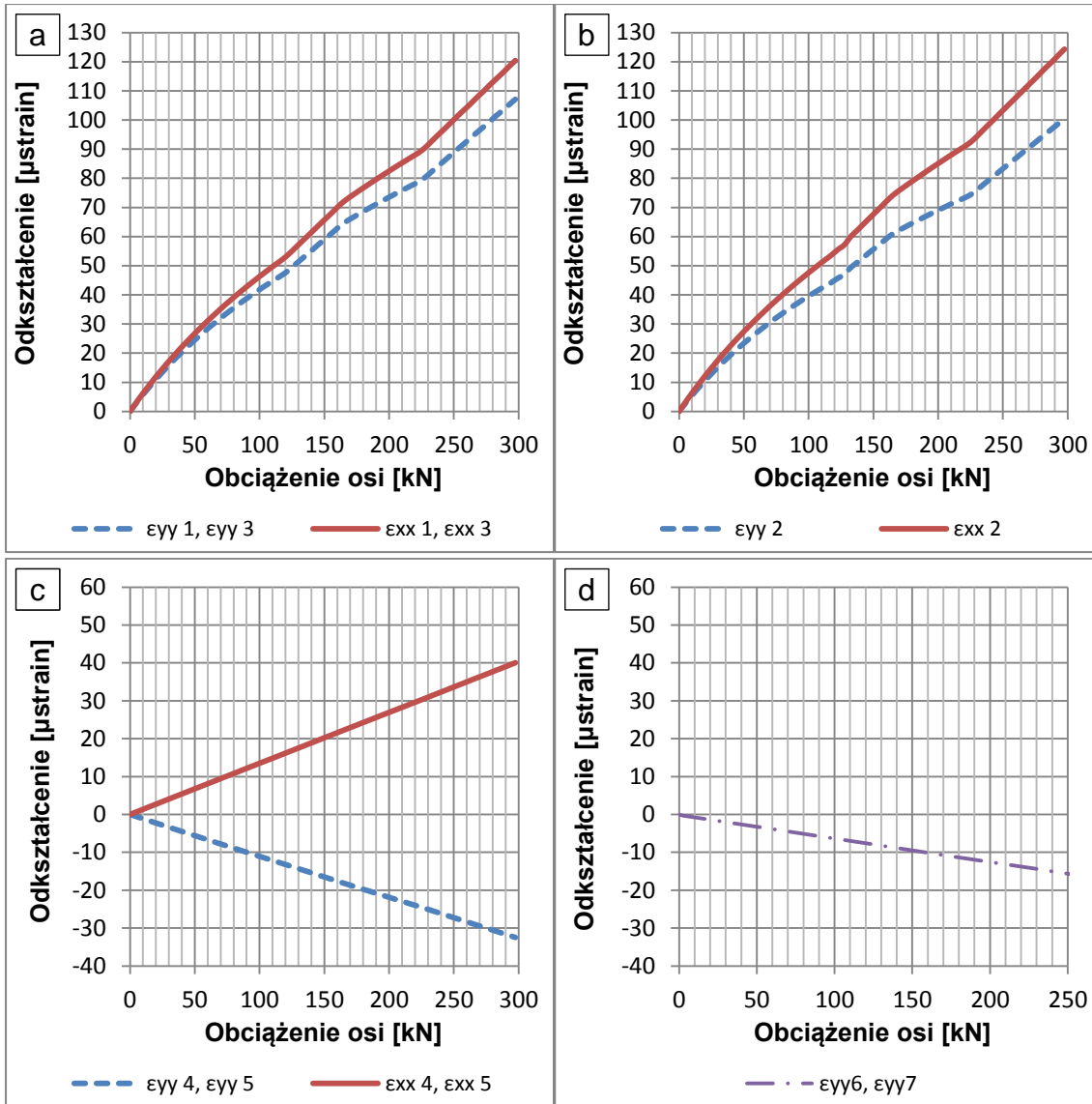
Rysunek 4.18 Ekstremalne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia Q_i wywieranego przez oś pojedynczą o kołach pojedynczych



Rysunek 4.19 Ekstremalne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia Q_j wywieranego przez oś pojedynczą o kołach bliźniaczych, obliczone w punktach krytycznych: a) pod kołami b) między kołami



Rysunek 4.20 Ekstremalne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia Q_j wywieranego przez oś podwójną o kołach pojedynczych, obliczone w punktach krytycznych: a) pod osią 1 ($\epsilon_{xx1}, \epsilon_{yy1}$) i osią 2 ($\epsilon_{xx2}, \epsilon_{yy2}$) b) między osiami ($\epsilon_{xx4}, \epsilon_{yy4}$) oraz przed osią 1 ($\epsilon_{xx6}, \epsilon_{yy6}$) i za osią 2 ($\epsilon_{xx7}, \epsilon_{yy7}$)



Rysunek 4.21 Ekstremalne odkształcenia poziome na spodzie warstw asfaltowych od obciążenia Q_j wywieranego przez oś potrójną o kołach pojedynczych, obliczone w punktach krytycznych: a) pod osią 1 ($\epsilon_{xx1}, \epsilon_{yy1}$) i pod osią 3 ($\epsilon_{xx3}, \epsilon_{yy3}$) b) pod osią 2 ($\epsilon_{xx2}, \epsilon_{yy2}$) c) między osiami ($\epsilon_{xx4}, \epsilon_{xx5}, \epsilon_{yy4}, \epsilon_{yy5}$) d) przed osią 1 (ϵ_{yy6}) i za osią 2 (ϵ_{yy7})

4.3.3. Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana pojedynczym obciążeniem osi pojedynczych i wielokrotnych

Każdy przejazd osi pojazdu wywołuje powstanie jednostkowej szkody zmęczeniowej w nawierzchni. W przypadku osi pojedynczych szkodę zmęczeniową można opisać następującym wzorem:

$$d_j = \frac{1}{N_{fj}} \quad (4.6)$$

gdzie:

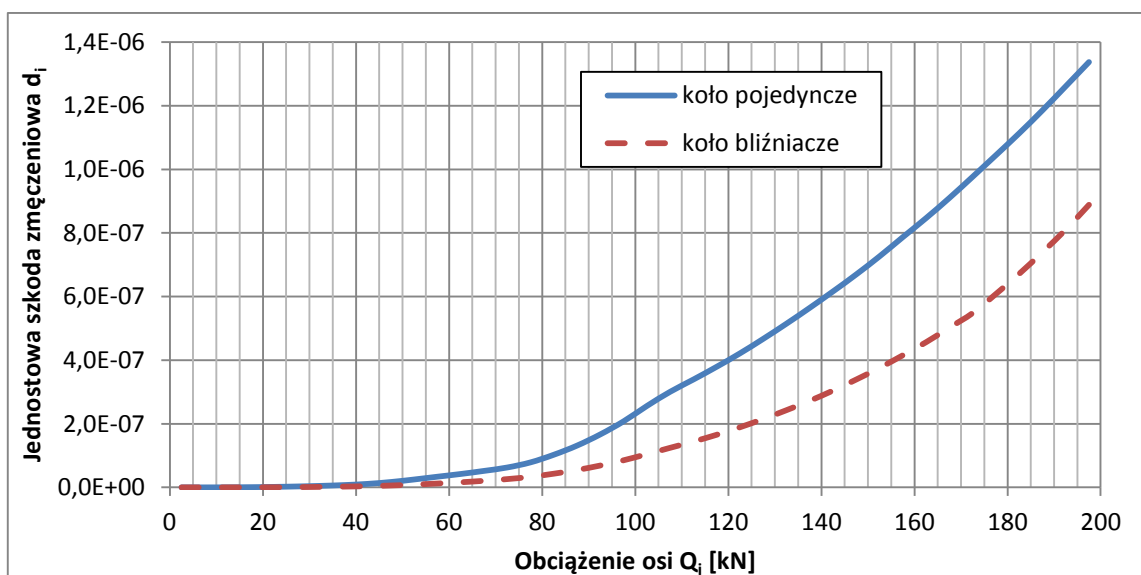
d_j – jednostkowa szkoda nawierzchni wywołana osią o obciążeniu Q_j ,

N_{fj} – trwałość zmęczeniowa nawierzchni czyli liczba powtarzalnych obciążeń osi Q_j do wystąpienia stanu zniszczenia nawierzchni, obliczona z zależności (4.3),

j – kolejny numer przedziału obciążenia osi.

Do obliczenia trwałości zmęczeniowej N_f należy określić krytyczne (maksymalne) odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych ε_t (patrz równanie (4.3)). W przypadku obciążenia osią pojedynczą o kołach pojedynczych na podstawie rysunków 4.13 4.18 stwierdza się, że $\varepsilon_t = \varepsilon_{xx a} = \varepsilon_{yy a}$. W przypadku osi pojedynczych o kołach bliźniaczych wybrano wartość maksymalną spośród $\varepsilon_{xx a}$, $\varepsilon_{yy a}$, $\varepsilon_{xx b}$, $\varepsilon_{yy b}$.

Wyniki obliczeń jednostkowej szkody zmęczeniowej nawierzchni przeprowadzonych dla osi pojedynczych o kołach pojedynczych i o kołach bliźniaczych, przedstawiono na rysunku 4.22.



Rysunek 4.22 Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana osią pojedynczą o kołach pojedynczych i o kołach bliźniaczych

Do obliczania szkody zmęczeniowej nawierzchni d_j wywołanej przejazdem osi wielokrotnych wzór (4.6) można rozwinąć do następującej postaci:

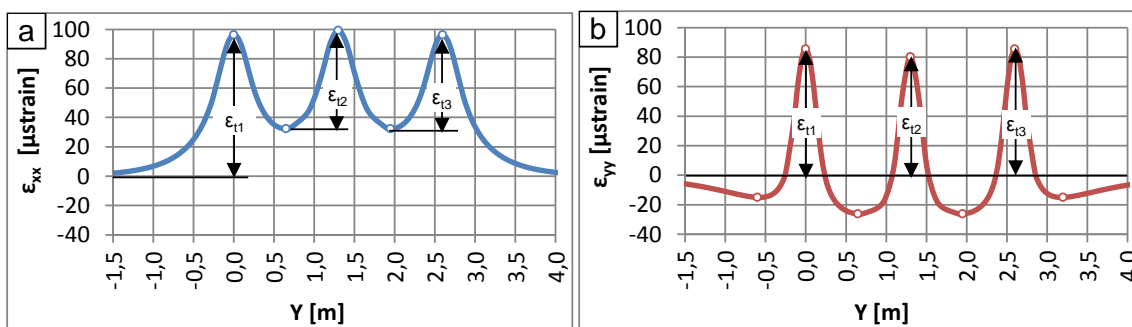
$$d_j = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{f_{i,j}}} \quad (4.7)$$

gdzie:

- $N_{f_{ij}}$ – trwałość zmęczeniowa nawierzchni obliczona dla odkształcenia ϵ_{ij} w danym punkcie krytycznym i ,
- i – kolejny numer punktu krytycznego,
- j – kolejny numer przedziału obciążenia osi,
- n – liczba krytycznych punktów przy przejeździe osi wielokrotnej Q_j , zależna od liczby osi składowych i metody obliczeń.

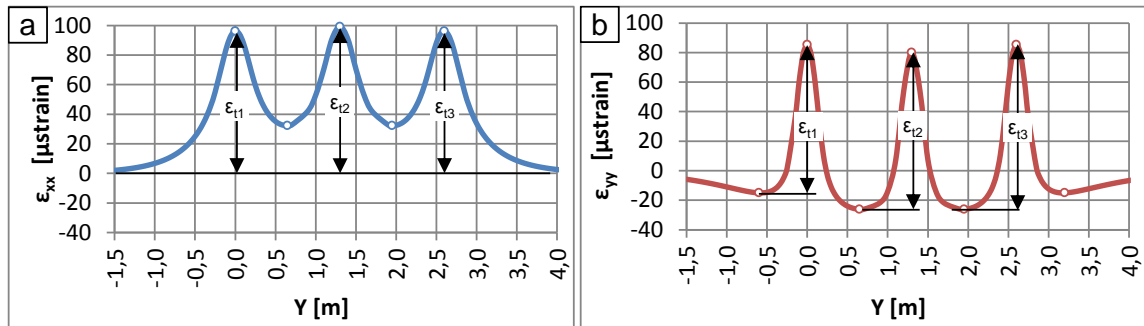
W przypadku osi wielokrotnych dobór punktów krytycznych oraz sposób określenia odkształcenia krytycznego ϵ_{ij} zależy od przyjętej metody obliczeniowej. W przedstawionych w tej pracy analizach rozpatrywano trzy metody określania odkształceń krytycznych ϵ_{ij} : metoda RTAC, metoda pików oraz metoda MEPDG.

Metoda RTAC (Skrót od ang. "Road and Transportation Association of Canada" - Kanadyjskie stowarzyszenie drogowo-transportowe) – metoda ta została zaproponowana po raz pierwszy przez Jordahla i Rauhut [70] i zastosowana w programie VESYS, była również rozwijana przez Christinsona [25]. Metoda ta została również wykorzystana przez Huanga [59] i zastosowana w programie KENLAYER. Schemat określania odkształceń ϵ_{ij} na przykładzie osi potrójnej o obciążeniu $Q_j=240$ kN przedstawiono na rysunku 4.23. Do obliczania szkody wywołanej pierwszą osią składową wybiera się maksymalną wartość odkształcenia obliczoną pod środkiem obciążenia osi. Szkodę zmęczeniową wywołaną obciążeniem kolejnych osi oblicza się jako różnicę pomiędzy maksymalnym odkształceniem obliczonym pod osią, a odkształceniem minimalnym obliczonym między osiami. W przypadku, gdy odkształcenia minimalne między osiami osiągają wartości ujemne (ściskanie) to szkodę zmęczeniową od drugiej i trzeciej osi składowej liczy się od zera do maksymalnego odkształcenia pod osią.



Rysunek 4.23 Schemat określania odkształceń krytycznych ϵ_{ij} według metody RTAC a) w przypadku odkształceń ϵ_{xx} b) w przypadku odkształceń ϵ_{yy}

Metoda pików została opisana przez Hajeka i Angerwala [53]. Procedura metody została opracowana na podstawie rekomendacji normy ASTM-E 1049-85 [8] dotyczących określania szkody zmęczeniowej w materiałach od obciążeń cyklicznych. Metoda polega na określaniu wartości maksymalnych i minimalnych odkształcenia w następujących po sobie wzrostach i spadkach odkształcenia. Schemat określania odkształceń ϵ_{ij} na przykładzie osi potrójnej o obciążeniu $Q_j=240$ kN przedstawiono na rysunku 4.24.



Rysunek 4.24 Schemat określania odkształceń krytycznych ϵ_{ij} według metody pików a) w przypadku odkształceń ϵ_{xx} b) w przypadku odkształceń ϵ_{yy}

Procedura obliczania szkody zmęczeniowej od osi wielokrotnych według metody MEPDG (od ang. „Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”) została opracowana przez AASHTO i jest stosowana jako jeden z elementów oprogramowania do projektowania nawierzchni AASHTOWare [179], które powstało w oparciu o zalecenia podręcznika MEPDG [47]. Według procedury MEPDG należy obliczyć odkształcenia w punktach krytycznych, których lokalizację przedstawiono na rysunku 4.25. Spośród odkształceń obliczonych wzdłuż osi X (kierunek poprzeczny do kierunku jazdy) wybiera się odkształcenia maksymalne dla danej lokalizacji wzdłuż osi Y. W rozpatrywanym przypadku dla osi podwójnych i potrójnych o kołach pojedynczych będą to odkształcenia w punktach o współrzędnej $x=0$ (wszystkie odkształcenia w kolumnie I wg rysunku 4.25). Spośród odkształceń ϵ_{xx} i ϵ_{yy} wybiera się odkształcenia maksymalne, czyli w rozpatrywanym przypadku będą to zawsze odkształcenia ϵ_{xx} . Po określeniu odkształceń krytycznych, którymi w rozpatrywanym przypadku będą: ϵ_{xx1} , ϵ_{xx2} , ϵ_{xx3} , ϵ_{xx4} , ϵ_{xx5} , oblicza się dla nich jednostkowe szkody zmęczeniowej d_j . Jednostkową szkodę zmęczeniową wywołaną osią wielokrotną oblicza się zgodnie z równaniem:

$$\begin{aligned} d_{j,os\ podwójna} &= \max(d_{j,1} + d_{j,2}; 2d_{j,4}) \\ d_{j,os\ potrójna} &= \max(d_{j,1} + 2d_{j,2}; 2d_{j,4} + d_{j,5}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

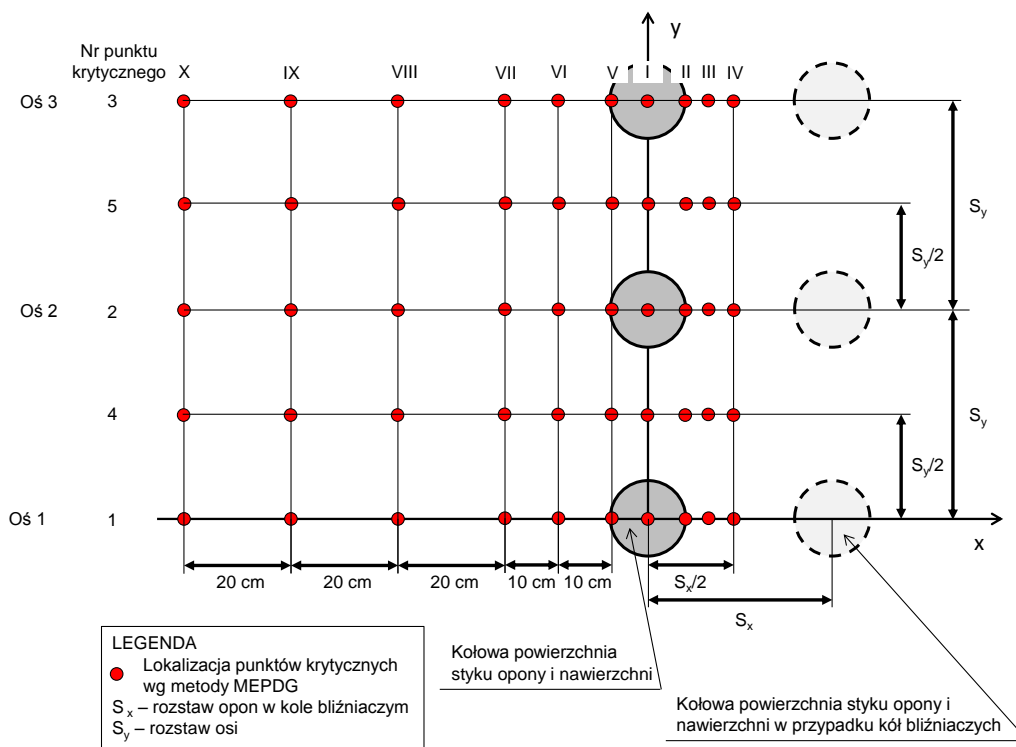
gdzie:

$d_{j,os\ podwójna}$ – jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią podwójną,

$d_{j,os\ potrójna}$ – jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią potrójną,

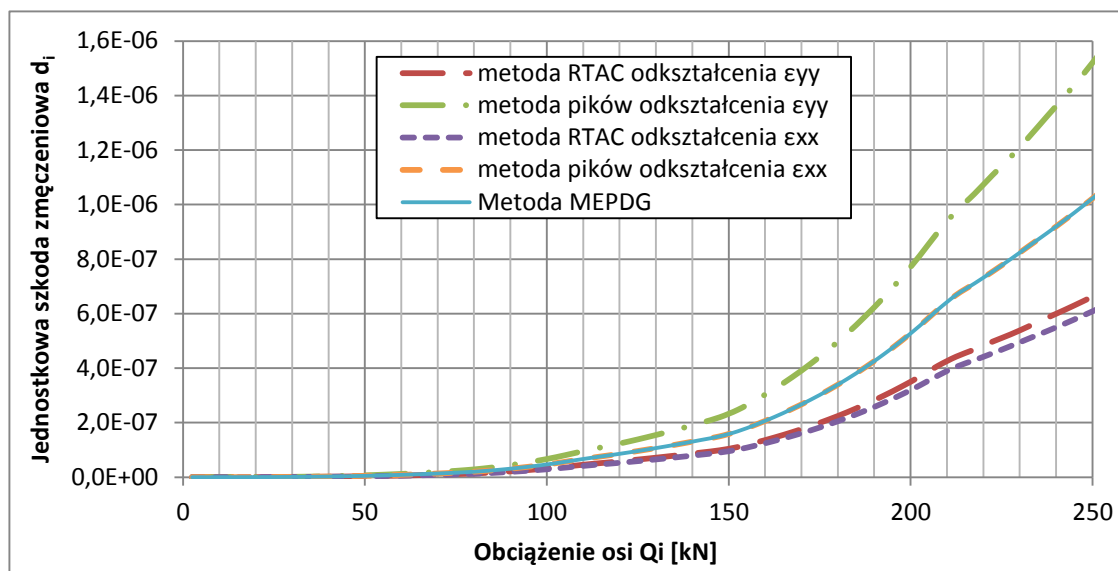
$d_{j,1}$, $d_{j,2}$, $d_{j,3}$, $d_{j,4}$, $d_{j,5}$ – jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana odkształceniem w punkcie krytycznym, w rozpatrywanym przypadku odpowiednio ϵ_{xx1} ,

ϵ_{xx2} , ϵ_{xx3} , ϵ_{xx4} , ϵ_{xx5} .

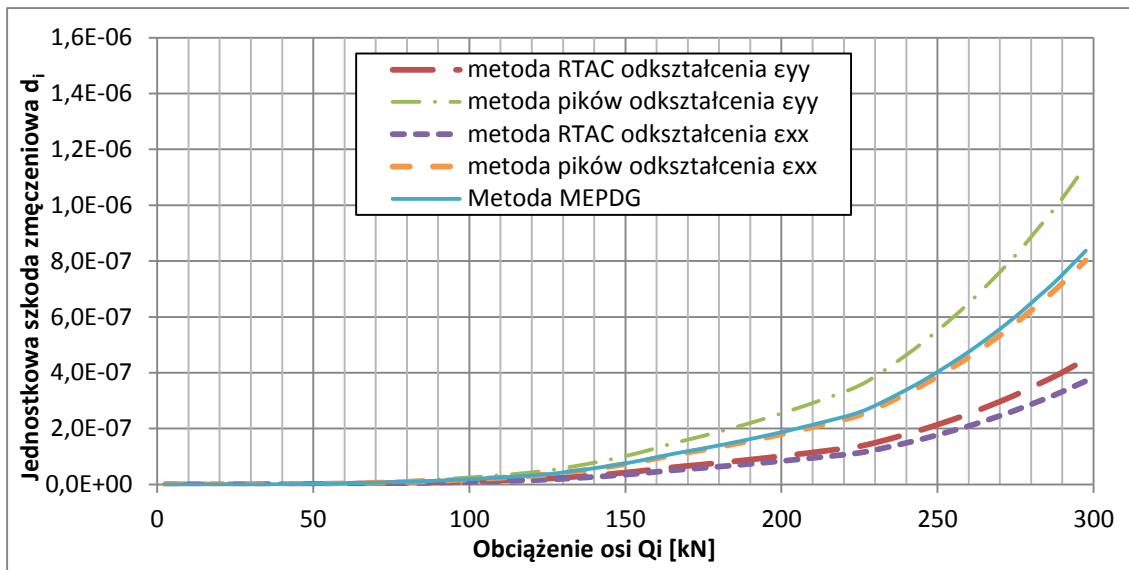


Rysunek 4.25 Schemat określania odkształceń krytycznych ϵ_{ij} według MEPDG

Na rysunkach 4.26 i 4.27 przedstawiono jednostkową szkodę zmęczeniową nawierzchni obliczoną odpowiednio dla osi podwójnych i potrójnych, przy czym wyodrębniono poszczególne metody obliczeniowe.



Rysunek 4.26 Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana osią podwójną o kołach pojedynczych w zależności od metody obliczeniowej i kierunku odkształcenia



Rysunek 4.27 Jednostkowa szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana osią potrójną o kołach pojedynczych w zależności od metody obliczeniowej i kierunku odkształcenia

4.3.4. Współczynniki równoważności obciążenia osi

4.3.4.1. Podstawy teoretyczne obliczania współczynników równoważności obciążenia osi

Współczynniki równoważności obciążenia osi o obciążeniu Q_j oblicza się na podstawie wywoływanej przez tę oś szkody zmęczeniowej, zgodnie z równaniem (4.9). Oś standardową przyjęto jako oś pojedynczą o kołach pojedynczych, obciążeniu $Q_s = 100$ kN i naprężeniu kontaktowym $q = 850$ kPa, zgodnie z Katalogiem Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [78].

$$F_j = \frac{d_j}{d_{100}} \quad (4.9)$$

gdzie:

F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi o obciążeniu Q_j ,

d_j – jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią o obciążeniu Q_j ,

d_{100} – jednostkowa szkoda zmęczeniowa wywołana osią standardową 100 kN.

Szkodę zmęczeniową d_j i d_{100} oblicza się na podstawie równań (4.6) i (4.7) zależnie od typu osi (pojedyncze, wielokrotne) i od trwałości zmęczeniowej N_f . Trwałość zmęczeniową oblicza się na podstawie danego modelu (kryterium) zmęczeniowego. Przedstawiono opis teoretyczny określania współczynników równoważności według następujących modeli zmęczeniowych:

1. spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych,
2. deformacji trwałych warstw asfaltowych,
3. deformacji trwałych podłoża gruntowego,
4. spękań zmęczeniowych podbudowy stabilizowanej cementem.

W dalszej części obliczeń rozpatrywano wyłącznie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone z wykorzystaniem kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z dołu do góry MEPDG dla jednego, przyjętego wcześniej modelu konstrukcji nawierzchni podatnej KR3. (patrz punkt 4.2.1).

4.3.4.1.1. Współczynniki równoważności obciążenia osi określone na podstawie kryteriów spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych

Modele zmęczeniowe warstw asfaltowych zostały zebrane i obszernie opisane w pracy Judyckiego [73]. Model zmęczeniowy warstw asfaltowych można zapisać ogólnym wzorem:

$$N_f = k_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^{n_1} \quad (4.10)$$

gdzie

N_f – trwałość zmęczeniowa warstw asfaltowych, liczba obciążeń potrzebna do osiągnięcia stanu zniszczenia warstwy, warunkowanego przez powierzchnię spękań zmęczeniowych,

k_1, n_1 – współczynniki empiryczne,

ε_t – krytyczne odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych.

Współczynnik równoważności obciążenia osi F_j można wyznaczyć podstawiając do równania (2.15) wzór (4.10) na obliczenie trwałości zmęczeniowej N_{fs} i N_{fj} odpowiednio dla obciążenia osią standardową Q_s oraz dla obciążenia osią o danym obciążeniu Q_j [72], [172]. Po skróceniu współczynników k_1 otrzymuje się zależność:

$$F_j = \left(\frac{\varepsilon_{tj}}{\varepsilon_{ts}} \right)^{n_1} \quad (4.11)$$

gdzie:

ε_{tj} – odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych wywołane obciążeniem osi Q_j ,

ε_{ts} – odkształcenie poziome na spodzie warstw asfaltowych wywołane obciążeniem osi standardowej Q_s ,

n_1 – współczynnik empiryczny określony dla danego modelu (patrz tablica 4.4)

W pracy Judyckiego [72] porównano wykładniki potęgi we wzorze (4.11), które określono dla następujących kryteriów zmęczeniowych warstw asfaltowych: Instytutu Asfaltowego, MEPDG, metody francuskiej, Uniwersytetu Nothingam, Shell, belgijskie i TRL. Wyniki porównania przedstawiono w tablicy 4.4.

Tablica 4.4. Zestawienie wykładników potęgi n_1 do określania współczynników równoważności obciążenia osi metodą mechanistyczną dla wybranych kryteriów zmęczeniowych spękań warstw asfaltowych [72]

Kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych	Wartość wykładnika n dla danego kryterium zmęczeniowego
Instytut Asfaltowy	3,291
MEPDG	3,942
Shell	5,000
Uniwersytet Nothingam	3,695-4,612
Metoda francuska	5,000
Metoda belgijska	4,762
TRL	4,160

4.3.4.1.2. Współczynniki równoważności obciążenia osi określone na podstawie kryteriów deformacji trwałych warstw asfaltowych

Następujący model deformacji trwałych warstw asfaltowych został zastosowany w metodzie MEPDG [46]:

$$\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r}\right) = \alpha_1 \beta_1 T^{\alpha_2 \beta_2} (N)^{\alpha_3 \beta_3} \quad (4.12)$$

gdzie:

ε_p – skumulowane odkształcenie plastyczne, pionowe wywołane liczbą przejazdów osi N ,

ε_r – odkształcenie sprężyste, pionowe w warstwie z mieszanki mineralno-asfaltowej wywołane zadaniem obciążeniem, mierzone w połowie grubości warstwy, będące funkcją parametrów mieszanki, temperatury i czasu obciążenia

T – temperatura,

N – liczba przejazdów osi,

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – współczynniki ustalone na podstawie wyników badań laboratoryjnych i modelu regresji nieliniowej,

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – współczynniki kalibracyjne, ustalone na podstawie badań terenowych.

Równanie (4.12) można przekształcić do następującej postaci:

$$N = \left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \beta_1 T^{\alpha_2 \beta_2}}\right)^{\frac{1}{\alpha_3 \beta_3}} \quad (4.13)$$

Jeżeli przyjąć, że N_{fs} oznacza liczbę obciążeń osi standardową do wywołania krytycznego odkształcenia plastycznego ε_p a N_{fj} oznacza liczbę obciążeń osi Q_j , która również wywoła krytyczne odkształcenie plastyczne ε_p w warstwie asfaltowej, to równanie (4.13) można podstawić do równania (2.15).

$$F_j = \left(\frac{\varepsilon_{rs}}{\varepsilon_{rj}} \right)^{\frac{1}{\alpha_3 \beta_3}} = \left(\frac{\varepsilon_{rs}}{\varepsilon_{rj}} \right)^{n_2} \quad (4.14)$$

gdzie:

ε_{rj} – odkształcenie sprężyste, pionowe w warstwie z mieszanki mineralno-asfaltowej wywołane zadaniem obciążeniem Q_j ,

ε_{rs} – odkształcenie sprężyste, pionowe w warstwie z mieszanki mineralno-asfaltowej wywołane zadaniem obciążeniem osią standardową Q_s .

n_2 – wykładnik, $n_2 = \frac{1}{\alpha_3 \beta_3}$.

W tablicy 4.5 przedstawiono wartości wykładnika n_2 określone wg metody MEPDG w dwóch wariantach, na podstawie modelu ustalonego z badań laboratoryjnych przy $\beta_3=1$ oraz po skalibrowaniu modelu z wynikami badań terenowych przeprowadzonych w USA.

Tablica 4.5. Zestawienie wykładników potęgi n_2 do określania współczynników równoważności obciążenia osi metodą mechanistyczną dla kryterium MEPDG deformacji trwałych mieszanek mineralno-asfaltowych

Kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych	Wartość wykładnika n_2 dla danego kryterium zmęczeniowego
MEPDG – na podstawie badań laboratoryjnych	2,504
MEPDG – po kalibracji terenowej	2,087

4.3.4.1.3. Współczynniki równoważności obciążenia osi określone na podstawie kryteriów zmęczeniowych deformacji trwałych podłoża

W pracy Judyckiego [72] rozpatrywano następujące modele zmęczeniowe deformacji trwałych podłoża: Shell, Instytutu asfaltowego, Uniwersytetu w Nothingam, Metody francuskiej i Metody belgijskiej. Wymienione modele zmęczeniowe deformacji trwałych podłoża można przedstawić za pomocą ogólnego wzoru:

$$N_f = k_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_c} \right)^{n_3} \quad (4.15)$$

gdzie

N_f – liczba obciążeń potrzebna do osiągnięcia określonej deformacji trwałej podłoża,

ε_c – krytyczne odkształcenie pionowe na górze podłoża gruntowego,

k_3, n_3 – współczynniki empiryczne,

Podobnie jak w przypadku modelu spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych po podstawieniu równania (4.15) do wzoru (2.15) otrzymuje się zależność (4.16).

$$F_j = \left(\frac{\varepsilon_{cj}}{\varepsilon_{cs}} \right)^{n_3} \quad (4.16)$$

gdzie:

ε_{cj} – krytyczne odkształcenie pionowe na górze podłoża gruntowego wywołane obciążeniem osią Q_j ,

ε_{cs} – krytyczne odkształcenie pionowe na górze podłoża gruntowego wywołane obciążeniem osią standardową Q_s ,

n_3 – współczynnik empiryczny określony dla danego modelu (patrz tablica 4.6)

W tablicy 4.6 zestawiono wykładniki potęgi n_3 określone dla wybranych modeli zmęczeniowych deformacji trwałych podłoża gruntowego. W zestawieniu nie uwzględniono kryterium deformacji podłoża i warstw niezwiązanych MEPDG ze względu na złożoność modelu i brak możliwości prostego podstawienia do równania (2.15).

Tablica 4.6. Zestawienie wykładników potęgi n_3 do określania współczynników równoważności obciążenia osi metodą mechanistyczną dla wybranych kryteriów zmęczeniowych deformacji trwałych podłoża [72]

Kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych	Wartość wykładnika n_3 dla danego kryterium zmęczeniowego
Shell (1965)	5,000
Shell (1994)	4,000
Instytut Asfaltowy	4,484
Uniwersytet Nothingam	3,571
Metoda francuska	4,500
Metoda belgijska	4,348
TRL	3,950

4.3.4.1.4. Współczynniki równoważności obciążenia osi określone na podstawie kryteriów spękań zmęczeniowych podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym

W pracy Judyckiego [72] rozpatrywano kryteria zmęczeniowe opracowane przez Uniwersytet w Illinois (USA), MEPDG, Centrum Badań Drogowych w Belgii oraz ośrodek badawczy CSIR w RPA. Wymienione trzy modele zmęczeniowe podbudowy związanej spoiwem można zapisać ogólnym równaniem:

$$\log N_f = k_4 - k_5 \left(\frac{R}{R_{lim}} \right) \quad (4.17)$$

gdzie:

N_f – trwałość podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,

k_4, k_5 – współczynniki empiryczne,

- R – reakcja nawierzchni wywołana zadaniem obciążeniem, może być określona poprzez odkształcenie lub naprężenie mierzone na spodzie podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym,
- R_{lim} – wytrzymałość na rozciąganie lub graniczne odkształcenie przy rozciąganiu materiału podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym.

Po przekształceniu i podstawieniu wzoru (4.17) do równania (2.15) otrzymamy następujące równanie:

$$\log F_j = k_5 \left(\frac{R_j - R_s}{R_{lim}} \right) \quad (4.18)$$

gdzie:

- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi,
- R_j – reakcja nawierzchni (odkształcenie lub naprężenie) wywołana zadaniem obciążeniem osi Q_j ,
- R_s – reakcja nawierzchni (odkształcenie lub naprężenie) wywołana obciążeniem osi standardowej Q_s ,
- R_{lim} – wytrzymałość na rozciąganie lub graniczne odkształcenie przy rozciąganiu materiału podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym.

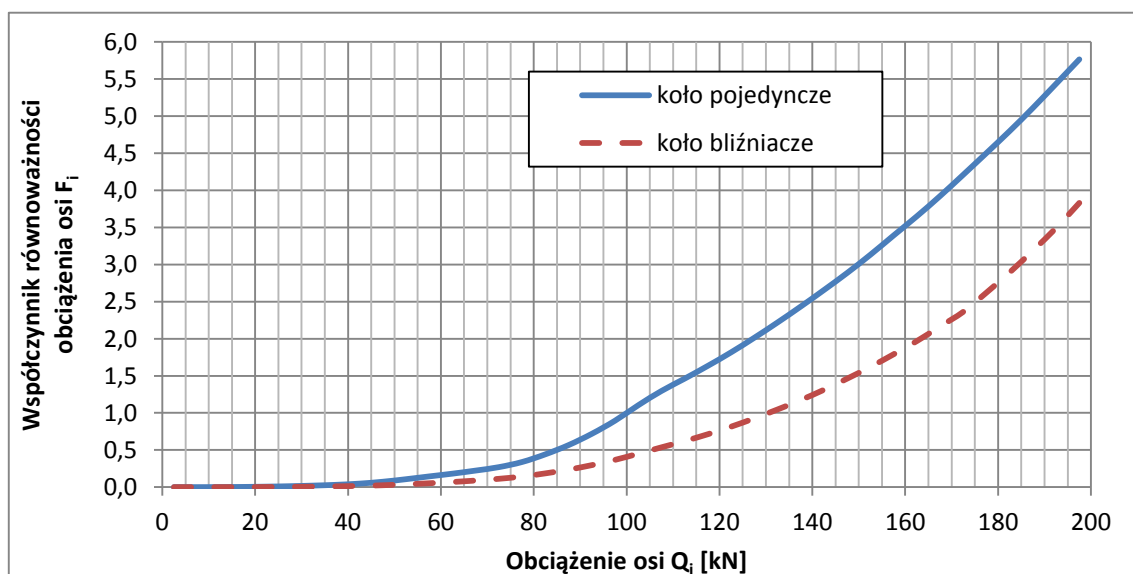
W tabelicy 4.7 zestawiono równania do obliczenia współczynników równoważności obciążenia osi dla wybranych kryteriów zmęczeniowych spękań podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym. Model zmęczeniowy CSIR Otte 1 różni się w swym ogólnym zapisie od modelu opisanego równaniem 4.17.

Tablica 4.7. Zestawienie równań do określania współczynników równoważności obciążenia osi metodą mechanistyczną dla wybranych kryteriów zmęczeniowych spękań podbudowy związanej spoiwem hydraulicznym [72]

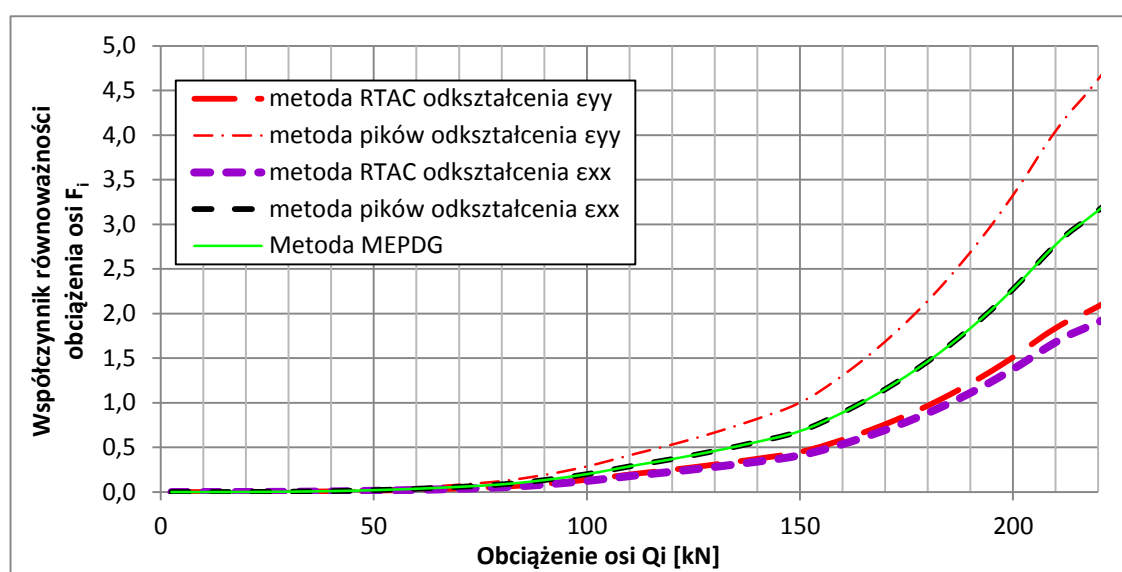
Kryterium zmęczeniowe warstw związanych spoiwem hydraulicznym w konstrukcjach półsztywnych	Równanie funkcji na obliczenie współczynnika równoważności obciążenia osi
Uniwersytet w Illinois (kryterium Dempsey'a) oraz MEPDG	$\log F_j = 12,121 \left(\frac{\sigma_j - \sigma_s}{\sigma_{lim}} \right)$
Centrum Badań Drogowych w Belgii	$\log F_j = 20 \left(\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_s}{\varepsilon_{lim}} \right)$
CSIR Otte 1	$F_j = \left(\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_s}{\varepsilon_{lim}} \right)^{12,7}$
CSIR Otte 2	$\log F_j = 9,091 \left(\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_s}{\varepsilon_{lim}} \right)$

4.3.4.2. Wybór metody określania odkształceń do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi

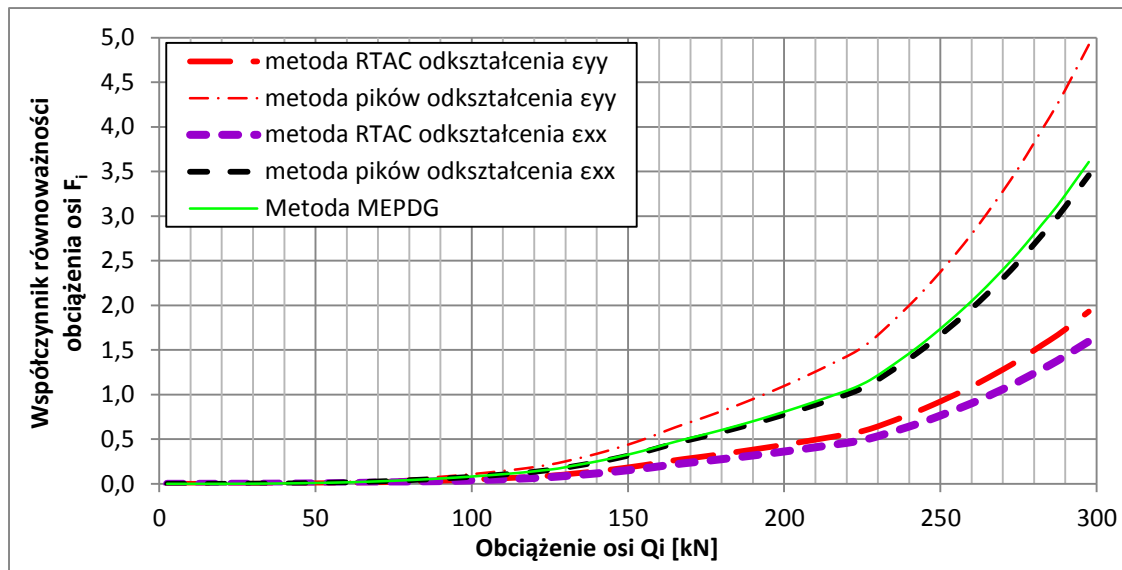
Współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone dla osi pojedynczych zestawiono na rysunku 4.28. Wartości współczynników są znacząco wyższe w przypadku osi o kołach pojedynczych. W przypadku osi podwójnych i potrójnych na rysunkach 4.29 i 4.30 zestawiono współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone w zależności od metody określania odkształceń do obliczania współczynników równoważności: RTAC, pików i MEPDG, oraz w zależności od kierunku działania odkształcenia.



Rysunek 4.28 Współczynniki równoważności obciążenia osi pojedynczych o kołach pojedynczych i bliźniaczych



Rysunek 4.29 Współczynniki równoważności obciążenia osi podwójnych o kołach pojedynczych



Rysunek 4.30 Współczynniki równoważności obciążenia osi potrójnych o kołach pojedynczych

Z porównania metod obliczeniowych współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych wynikają następujące wnioski:

- Wybór metody obliczeniowej znacząco wpływa na wartość współczynników równoważności obciążenia osi.
- Wybór kierunku odkształcenia ϵ_{xx} lub ϵ_{yy} w metodach RTAC i pików istotnie wpływa na obliczony współczynnik równoważności obciążenia osi.
- W metodach RTAC i pików otrzymano większą jednostkową szkodę zmęczeniową i współczynnik równoważności obciążenia osi dla odkształceń działających w kierunku ruchu pojazdów ϵ_{yy} .
- Do metody MEPDG przyjmuje się odkształcenia maksymalne spośród ϵ_{xx} i ϵ_{yy} , czyli w rozpatrywanym przypadku odkształcenia działające w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu ϵ_{xx} , które dla tej metody dają większe wartości współczynników równoważności obciążenia osi.
- Wyniki obliczeń dla metody MEPDG są tożsame z wynikami obliczeń metodą pików dla odkształceń ϵ_{xx} w przypadku osi podwójnych.

Aby uprościć analizę, spośród porównywanych metod obliczania szkody zmęczeniowej i współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych do dalszych analiz należy wybrać jedną metodę. Ponieważ zagadnienie jest dość trudne wybór metody został poprzedzony następującymi rozważaniami zalet i wad poszczególnych metod.

Za wyborem metody RTAC przemawia fakt, że jej wyniki są zgodne z niektórymi badaniami laboratoryjnymi i obserwacjami terenowymi [23], [57], [58], [131], [132]. Z przytoczonych publikacji wynika, że osie pojedyncze generalnie wywołują większą szkodę zmęczeniową liczoną na jedno obciążenie niż osie wielokrotne przy rozpatrywaniu spękań zmęczeniowych, co potwierdzają obliczenia wg metody

RTAC. Metoda RTAC daje ponadto podobne wyniki jak wzór czwartej potęgi. Z drugiej strony sposób określania odkształceń do obliczania szkody zmęczeniowej wg metody RTAC nie jest zgodny z zasadami przyjętymi do badań zmęczeniowych materiałów [8]. Sposób obliczania kolejnych odkształceń od osi drugiej i trzeciej (różnica między odkształceniem pod osią a odkształceniem między osiami) sugeruje, że pomijany jest wpływ działania odkształceń w strefie między osiami na trwałość nawierzchni.

Do opracowania metody pików wykorzystano identyczną procedurę określania odkształceń do liczenia szkody zmęczeniowej jak przy badaniach zmęczenia materiałów od obciążeń cyklicznych, czyli metoda ta ma silne podstawy teoretyczne, co jest jej główną zaletą. Warto w tym miejscu podkreślić, że do opracowania modeli matematycznych kryteriów zmęczeniowych badano zależność maksymalnego odkształcenia rozciągającego od osi pojedynczych do trwałości nawierzchni mierzonej w terenie. Logicznie rzecz biorąc, aby zaadoptować kryterium zmęczeniowe, które zostało opracowane w oparciu o oddziaływanie osi pojedynczych, do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych należy przyjąć maksymalne odkształcenia wywołane poszczególnymi osiami składowymi osi wielokrotnej, co przemawia za wyborem metody pików.

Na podstawie rysunku 4.24 stwierdza się, że maksymalne odkształcenia działają w kierunku ϵ_{xx} i odkształcenia te są dodatnie w strefach przed osią i między osiami. Maksymalne wartości odkształceń ϵ_{yy} są niższe niż odkształceń ϵ_{xx} ale odkształcenia ϵ_{yy} przyjmują wartości ujemne w strefach przed osią i między osiami tak, że ich różnica daje wyższą wartość niż odkształcenie mierzone pod osią (np. $\epsilon_{yy1} - \epsilon_{yy6} > \epsilon_{xx1}$ wg rysunków 4.15 i 4.16). Oznacza to, że materiał może być mocniej wyęźżany w kierunku działania odkształceń ϵ_{yy} niż w kierunku odkształceń ϵ_{xx} . Z drugiej strony podobną sytuację można stwierdzić w przypadku osi pojedynczych ($\epsilon_{yya} - \epsilon_{yyd} > \epsilon_{xxa}$ wg rysunku 4.13). Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że w punkcie pod osią odkształcenia te są równe. Mimo, że w strefie przed osią pojedynczą odkształcenia przyjmują znak ujemny, to do obliczenia szkody zmęczeniowej brane są wartości odkształceń liczone od 0, ponieważ w ten sposób były obliczane odkształcenia przy tworzeniu i kalibracji modeli matematycznych kryteriów zmęczeniowych. Zgodnie z tym podejściem do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi wielokrotnych bardziej zasadne jest przyjęcie maksymalnych wartości odkształceń liczonych od 0, czyli w rozpatrywanym przypadku odkształceń ϵ_{xx} .

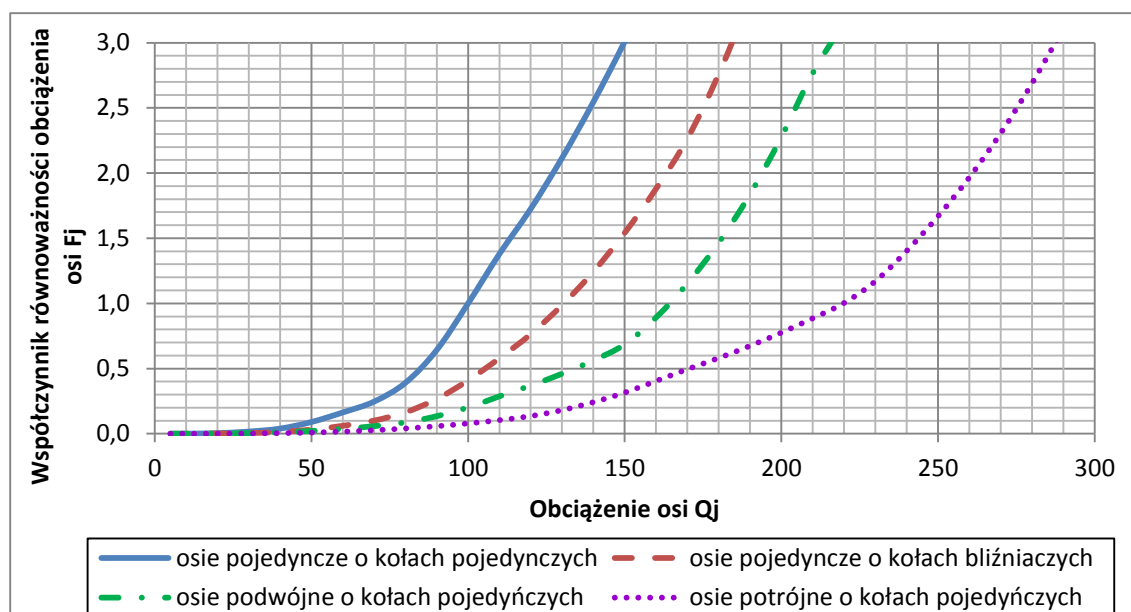
Metoda MEPDG jest najnowszą spośród rozpatrywanych metod, jednak nie jest dostępne szczegółowe wytłumaczenie co do metodyki jej opracowania. Metoda MEPDG daje wyniki tożsame, w przypadku osi podwójnych, lub bardzo zbliżone, w przypadku osi potrójnych, jak metoda pików. W związku z tym metodę MEPDG

odrzucono wskazując jednocześnie na mocniejsze uzasadnienie teoretyczne metody pików i na zbliżone wyniki obliczeń według obu metod.

Podsumowując rozważania, najlepsze uzasadnienie teoretyczne do obliczania szkody zmęczeniowej nawierzchni ma metoda pików dla odkształceń działających w kierunku ε_{xx} . Metoda ta została przyjęta do dalszych obliczeń.

4.3.4.3. Porównanie współczynników równoważności obciążenia osi obliczonych według metody mechanistyczno-empirycznej ze współczynnikami obliczonymi metodami empirycznymi

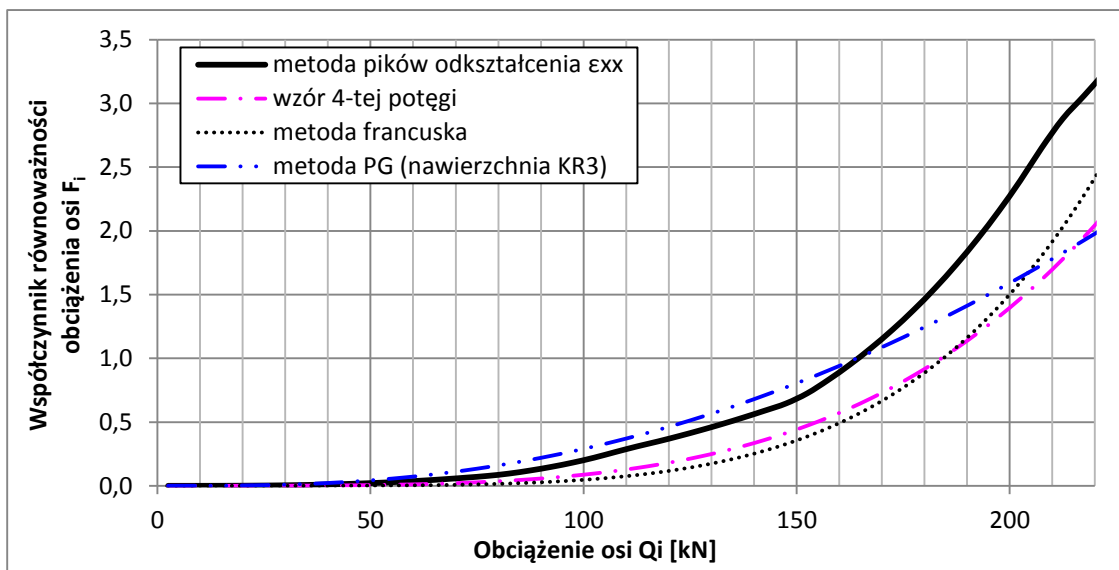
W tabelicy 4.8 i na rysunku 4.31 zestawiono współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone dla osi pojedynczych i osi wielokrotnych według metody pików dla odkształceń ε_{xx} . Współczynniki osi podwójnych i potrójnych porównano z wynikami obliczeń przeprowadzonymi według metod empirycznych: wzoru czwartej potęgi i metody francuskiej, oraz z wynikami obliczeń otrzymanymi z metody PG dla konstrukcji podatnej KR3. Porównanie metod przedstawiono na rysunkach 4.32 i 4.33.



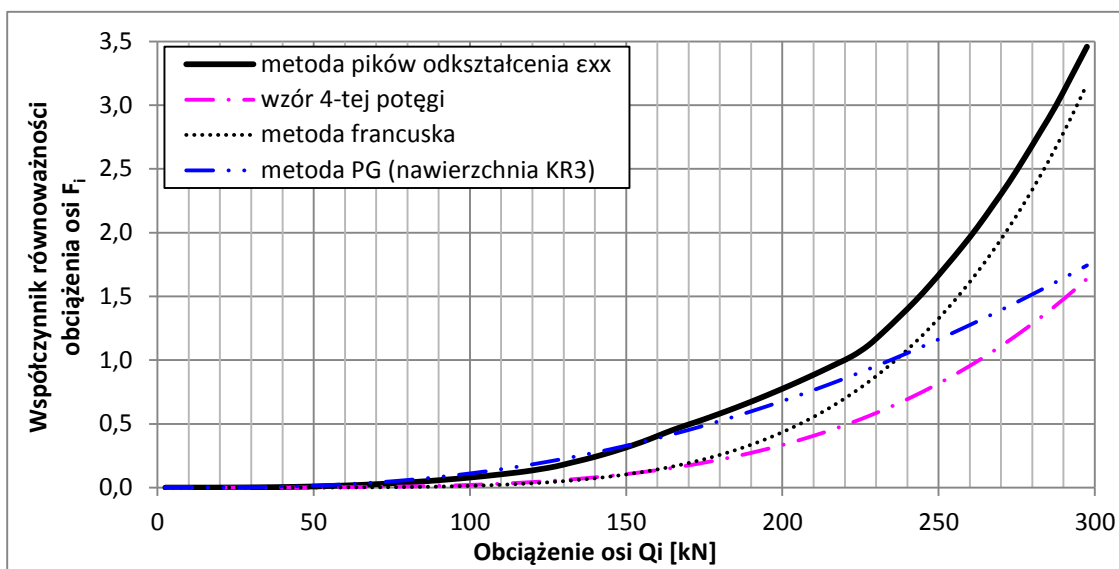
Rysunek 4.31 Współczynniki równoważności obciążenia osi

Tablica 4.8. Zestawienie współczynników równoważności obciążenia osi

Obciążenie osi Q_i	oś pojedyncza, koło pojedyncze	oś pojedyncza, koło bliźniacze	oś podwójna, metoda pików odkształcenia ϵ_{xx}	oś potrójna, metoda pików odkształcenia ϵ_{xx}
10	0,00008	0,00002	-	-
20	0,00058	0,00012	0,0001	-
30	0,005	0,001	0,001	0,0004
40	0,04	0,01	0,01	0,004
50	0,09	0,03	0,02	0,01
60	0,16	0,06	0,04	0,02
70	0,25	0,10	0,06	0,03
80	0,39	0,16	0,09	0,04
90	0,64	0,27	0,13	0,06
100	1,00	0,41	0,20	0,08
110	1,38	0,58	0,29	0,10
120	1,73	0,76	0,37	0,14
130	2,12	0,99	0,46	0,18
140	2,55	1,24	0,56	0,24
150	3,01	1,54	0,69	0,32
160	3,52	1,88	0,89	0,40
170	4,07	2,26	1,15	0,49
180	4,65	2,76	1,46	0,58
190	5,27	3,34	1,84	0,67
200	-	-	2,27	0,78
210	-	-	2,76	0,89
220	-	-	3,16	1,00
230	-	-	3,55	1,17
240	-	-	3,97	1,40
250	-	-	4,41	1,67
260	-	-	-	1,97
270	-	-	-	2,30
280	-	-	-	2,69
290	-	-	-	3,11



Rysunek 4.32 Porównanie współczynników równoważności obciążenia osi podwójnych



Rysunek 4.33 Porównanie współczynniki równoważności obciążenia osi potrójnych

Z przedstawionego porównania wynika, że współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone na podstawie metody pików są wyższe niż współczynniki obliczone z metody francuskiej i wzoru czwartej potęgi. Stwierdzono również, że w przedziale wysokich obciążeń osi przyrost funkcji współczynników równoważności obliczonych z metody pików jest większy niż w przypadku wzoru czwartej potęgi i metody PG, i jest porównywalny do przyrostu funkcji współczynników równoważności obliczonych z metody francuskiej. Przede wszystkim oznacza to, że współczynniki równoważności obciążenia osi podwójnych i potrójnych obliczone ze wzoru czwartej potęgi mogą być niedoszacowane.

4.3.5. Średnia jednostkowa szkoda zmęczeniowa i średnie współczynniki równoważności obciążenia osi

Poprzez termin średnia jednostkowa szkoda zmęczeniowa rozumie się szkodę zmęczeniową, jaką statystycznie wywołuje jedna oś w rzeczywistym potoku ruchu pojazdów ciężkich. Średnią jednostkową szkodę zmęczeniową można obliczyć na podstawie funkcji jednostkowej szkody zmęczeniowej od obciążenia osi oraz rzeczywistych rozkładów obciążenia osi pojazdów, określonych na podstawie ważenia pojazdów w ruchu (por rozdział 3.6.3). W przedstawionej analizie przyjęto podobny tok postępowania, jaki wcześniej przyjął w swojej pracy doktorskiej Wardęga [170]. Do obliczenia średniej jednostkowej szkody zmęczeniowej zastosowano wzór (4.19), którego graficzną interpretację przedstawiono na rysunku 4.34.

$$D_k = \sum_{j=1}^n d_j p_j \quad (4.19)$$

gdzie:

D_k – średnia szkoda zmęczeniowa wywołana rzeczywistymi osiami typu k,

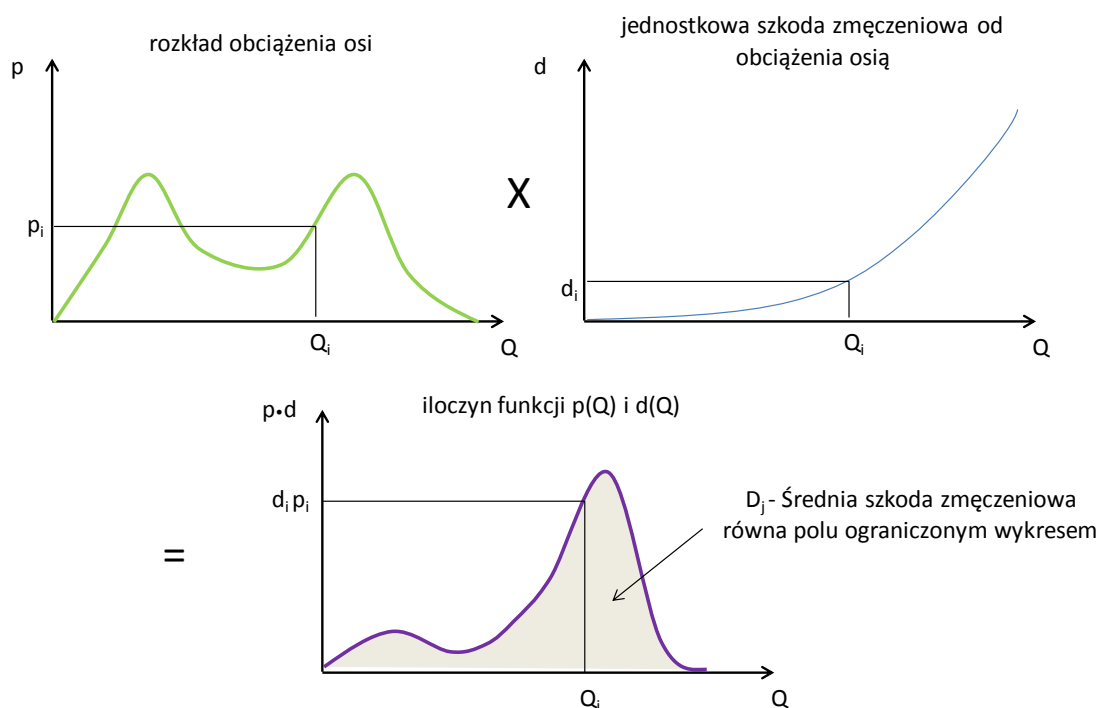
d_i – jednostkowa szkoda zmęczeniowa obliczona dla obciążenia osi Q_i zgodnie z równaniem (4.6),

p_i – procentowy udział osi o obciążeniu Q_i w ruchu, podany w rozdziale 3.6.3,

$i = 1, 2, \dots, n$ – numer przedziału obciążenia osi Q_i ,

n – liczba przedziałów obciążenia osi,

j – numer porządkowy typu osi, zgodnie z tabelą 4.9.



Rysunek 4.34 Interpretacja graficzna metody określania średniej szkody zmęczeniowej nawierzchni

Średnią szkodę zmęczeniową D_k obliczono w zależności od rozkładu obciążenia osi scharakteryzowanego dla danej stacji WIM oraz od typu osi i zestawiono je w tablicy 4.9. Przyjęto dyskretne rozkłady obciążenia osi z gradacją przedziałów obciążenia osi co 5 kN. Jednostkową szkodę zmęczeniową obliczano dla obciążenia przypadającego w połowie przedziału.

Tablica 4.9. Zestawienie obliczonych wartości średniej jednostkowej szkody zmęczeniowej D_k

Stacja WIM	Typ i numer porządkowy osi						
	Osie pojedyncze			Osie podwójne			7. Osie potrójne w przyczepach i w naczepach
	1. sterowne	2. napędowe	3. w przyczepach i w naczepach	4. sterowne	5. napędowe	6. w przyczepach i w naczepach	
A2	3,9E-08	1,4E-08	1,6E-08	5,4E-08	1,3E-07	4,9E-08	1,2E-07
S7	3,4E-08	1,2E-08	6,6E-08	1,2E-07	2,4E-07	3,6E-08	1,6E-07
DK1	3,6E-08	1,1E-08	2,9E-08	5,9E-08	1,2E-07	2,5E-08	1,1E-07
DK4	2,9E-08	1,1E-08	1,3E-07	5,5E-08	1,4E-07	2,6E-08	1,2E-07
DK7	2,7E-08	1,1E-08	1,1E-07	6,9E-08	1,7E-07	3,1E-08	1,4E-07
DK11	3,2E-08	9,3E-09	4,5E-08	3,4E-08	8,5E-08	2,4E-08	7,7E-08
DK22	3,4E-08	1,0E-08	4,1E-08	6,9E-08	1,6E-07	2,5E-08	1,3E-07
DK46	3,2E-08	1,1E-08	6,8E-08	5,7E-08	1,2E-07	2,7E-08	1,3E-07
DK75	2,5E-08	8,6E-09	1,8E-08	5,0E-08	1,4E-07	3,6E-08	1,4E-07
DK79	2,8E-08	8,0E-09	2,3E-08	6,0E-08	1,2E-07	1,5E-08	1,7E-07
DK94	2,9E-08	9,1E-09	3,2E-08	5,2E-08	1,6E-07	2,2E-08	1,2E-07

Na podstawie średniej szkody zmęczeniowej D_k oraz danej liczby osi przejeżdżających przez obliczeniowy pas ruchu w określonym czasie, np. w ciągu jednego roku, można obliczyć całkowitą szkodę zmęczeniową D , zgodnie ze wzorem:

$$D = \sum_{k=1}^7 D_k N_k \quad (4.20)$$

gdzie:

D – całkowita szkoda zmęczeniowa w określonym czasie (np. w trakcie jednego roku),

D_k – szkoda zmęczeniowa wywołana rzeczywistymi osiami j ,

N_k – sumaryczna liczba osi j w danym okresie czasu,

k – numer porządkowy typu osi.

Średnie współczynniki równoważności obciążenia osi na poszczególnych stacjach WIM określono na podstawie wzoru:

$$F_k = \sum_{j=1}^n F_j p_j \quad (4.21)$$

gdzie:

- F_k – średni współczynnik równoważności obciążenia osi k na danej stacji WIM,
- F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi dla obciążenia osi Q_j ,
- P_j – procentowy udział osi o obciążeniu Q_j w ruchu, podany w rozdziale 3.6.3,
- k – typ osi w pojeździe,
- j – numer przedziału obciążenia osi Q_j ,
- n – liczba przedziałów obciążenia osi.

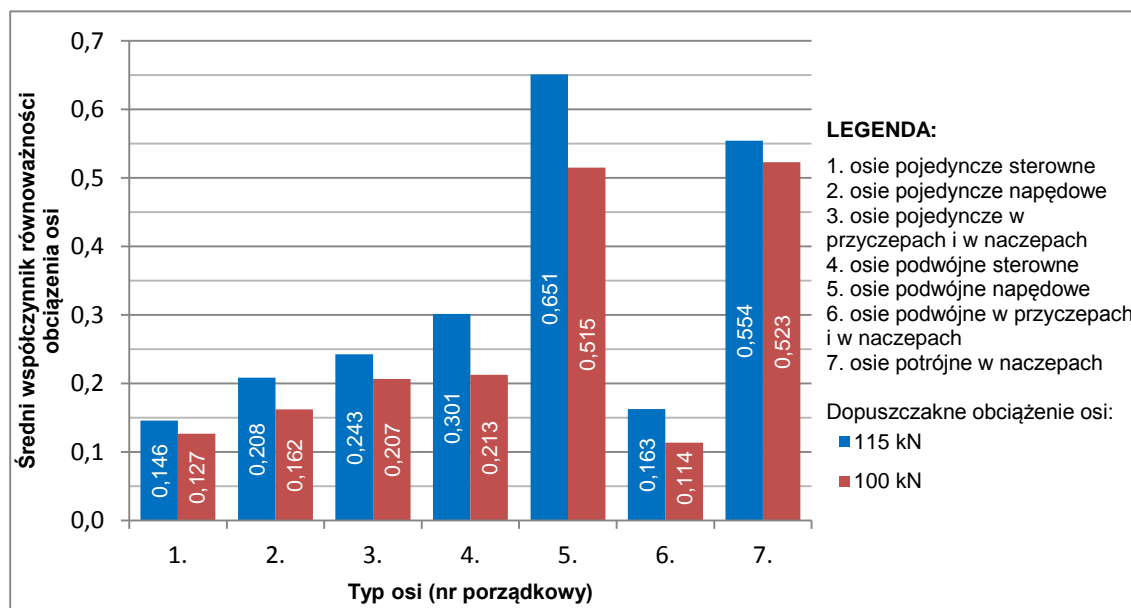
Interpretacja graficzna metody określania średnich współczynników równoważności obciążenia osi jest analogiczna jak schemat podany na rysunku 4.34 dla określania średniej szkody zmęczeniowej. Wyniki obliczeń średnich współczynników równoważności obciążenia osi na poszczególnych stacjach WIM zestawiono w tabelicy 4.10.

Tablica 4.10. Zestawienie obliczonych wartości średnich współczynników równoważności obciążenia osi F_k

Stacja WIM	Typ i numer porządkowy osi k						
	Osie pojedyncze			Osie podwójne			7. Osie potrójne w przyczepach i w naczepach
	1. sterowne	2. napędowe	3. w przyczepach i w naczepach	4. sterowne	5. napędowe	6. w przyczepach i w naczepach	
A2	0,169	0,231	0,069	0,231	0,545	0,211	0,525
S7	0,148	0,206	0,285	0,535	1,023	0,156	0,682
DK1	0,154	0,190	0,126	0,252	0,512	0,108	0,481
DK4	0,125	0,191	0,560	0,235	0,619	0,113	0,522
DK7	0,117	0,191	0,484	0,296	0,735	0,132	0,584
DK11	0,137	0,156	0,193	0,146	0,365	0,104	0,332
DK22	0,145	0,171	0,176	0,296	0,685	0,107	0,550
DK46	0,138	0,179	0,295	0,246	0,512	0,115	0,557
DK75	0,109	0,144	0,080	0,216	0,619	0,157	0,583
DK79	0,122	0,135	0,099	0,259	0,524	0,066	0,736
DK94	0,123	0,152	0,137	0,224	0,684	0,094	0,509

Średnie współczynniki równoważności obciążenia dla Polski obliczono w oparciu o model uśrednionych rozkładów obciążenia osi złożony z dwóch rozkładów normalnych. Parametry rozkładów obciążenia osi zestawione są w tabelicy 3.10 w rozdziale 3.6.3. Obliczenia przeprowadzono w sposób dyskretny, przyjmując gradację przedziałów obciążenia osi co 5 kN. Jednostkową szkodę zmęczeniową obliczano dla obciążenia przypadającego w połowie przedziału. Wyniki obliczeń

przedstawiono na rysunku 4.35. Należy zaznaczyć, że współczynniki zostały określone tylko dla jednego typu konstrukcji podatnej na podbudowie z kruszywa i dla jednej grubości pakietu warstw asfaltowych $h = 16$ cm (typ A1 KR3 wg katalogu [78], patrz rozdział 4.2.1). Również należy podkreślić, że do wyznaczenia współczynników równoważności obciążenia osi wykorzystano jedynie kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych. Zmiana kryterium zmęczeniowego np. na kryterium deformacji trwałych warstw asfaltowych lub deformacji trwałych podłoża, lub zmiana grubości konstrukcji nawierzchni wpłynie na wartości średnich współczynników równoważności obciążenia osi.



Rysunek 4.35 Średnie współczynniki równoważności obciążenia osi dla dróg o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN i 115 kN dla nawierzchni podatnej typu A1 KR3 wg katalogu [78]

Z rysunku 4.35 można odczytać, że średni współczynnik równoważności osi pojedynczych w przyczepach lub w naczepach jest wyższy niż współczynnik obliczony dla osi napędowych pomimo, że osie napędowe są mocniej obciążane. Wynika to z faktu, że do obliczeń przyjęto koła bliźniacze w osiach napędowych. Gdyby osie napędowe były wyposażone w koła pojedyncze to ich współczynnik równoważności byłby wyższy. Na podstawie rysunku 4.35 można wnioskować, że największe oddziaływanie na nawierzchnię wywołują osie podwójne napędowe i osie potrójne w naczepach.

4.4. Podsumowanie

1. Przedstawiono obliczenia mechanistyczno-empiryczne oddziaływania pojazdów ciężkich na nawierzchnię podatną. Przyjęto model nawierzchni podatnej na podbudowie z kruszywa według polskiego Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 2013 r. Model nawierzchni oparto o teorię wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej.

2. Stwierdzono na podstawie pomiarów na stacjach WIM, że rozstaw osi składowych w osiach podwójnych i potrójnych wynosi najczęściej 130 cm. Rozstaw 130 cm przyjęto do dalszych obliczeń.
3. Stwierdzono, że ciśnienie powietrza w ogumieniu zmienia się w zależności od obciążenia osi. Do obliczeń przyjęto funkcję zależności naprężenia kontaktowego od obciążenia osi.
4. Przeprowadzono obliczenia i analizę odkształceń w nawierzchni. Określono funkcję odkształcenia w zależności od obciążenia osi i konfiguracji osi.
5. Do obliczenia szkody zmęczeniowej nawierzchni przyjęto najnowsze kryterium zmęczeniowe warstw asfaltowych MEPDG.
6. Przeanalizowano trzy metody obliczania szkody zmęczeniowej wywołanej obciążeniami osiami podwójnych i potrójnych: RTAC, pików i MEPDG. Wskazano, że najwłaściwszą metodą do obliczania szkody zmęczeniowej nawierzchni jest metoda pików i podano teoretyczne uzasadnienie dokonanego wyboru metody.
7. Na podstawie wyznaczonej szkody zmęczeniowej od osi pojedynczych i wielokrotnych obliczono współczynniki równoważności obciążenia osi i porównano je z wynikami obliczeń według wzoru czwartej potęgi, metody francuskiej i metody Politechniki Gdańskiej. Z porównania wynika, że współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone ze wzoru czwartej potęgi lub metody francuskiej są niedoszacowane.
8. Wykonano obliczenia średniej jednostkowej szkody zmęczeniowej nawierzchni, wywołanej rzeczywistym ruchem pojazdów. Obliczenia wykonano w oparciu o dyskretne rozkłady obciążenia osi na poszczególnych stacjach, wyznaczone na podstawie ważenia pojazdów w ruchu.
9. W sposób analogiczny do obliczeń średniej jednostkowej szkody zmęczeniowej, wykonano obliczenia średnich współczynników równoważności obciążenia osi. Dodatkowo wykonano obliczenia w oparciu o uśrednione rozkłady obciążenia osi, wyznaczone dla dróg w Polsce o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN i 115 kN.
10. Stwierdzono, że osie podwójne napędowe oraz osie potrójne w naczepach wywierają największe niszczące oddziaływanie na nawierzchnie podatne w Polsce.
11. Przedstawiona procedura określania szkody zmęczeniowej nawierzchni może znaleźć praktyczne zastosowanie do: projektowania indywidualnego konstrukcji nawierzchni, wyznaczania współczynników równoważności obciążenia osi, analizy szkody zmęczeniowej nawierzchni wywołanej rzeczywistym ruchem ciężkim, oceny możliwości zwiększenia lub potrzeby zmniejszenia dopuszczalnego obciążenia osi na danej drodze, oraz oceny wpływu oddziaływania pojazdów przeciążonych na nawierzchnie drogowe.

5. Wpływ pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni

5.1. Cel i zakres analizy

Głównym celem przedstawionej w niniejszym rozdziale analizy było określenie wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni i średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów. Do realizacji założonego celu opracowano dwie metody analizy, na podstawie których wyznaczono zależność pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych w ruchu a średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdów. Wprowadzono również wskaźniki, za pomocą których badano wpływ udziału pojazdów przeciążonych na trwałość nawierzchni.

W zakres niniejszego rozdziału wchodzi:

1. Studia polskich przepisów w zakresie dopuszczalnego obciążenia pojazdów ciężkich.
2. Obliczenie udziału pojazdów przeciążonych w ruchu na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu.
3. Obliczenie udziału pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni.
4. Określenie i analiza zależności pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych a współczynnikami równoważności obciążenia pojazdu na podstawie dwuparametrowych modeli regresji (metoda 1).
5. Określenie i analiza wieloparametrowego modelu regresji pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych i parametrami charakteryzującymi zastępczy rozkład obciążenia osi a współczynnikami równoważności obciążenia pojazdu (metoda 2).
6. Przeprowadzenie analizy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową przykładowej nawierzchni podatnej.
7. Wyciągnięcie wniosków z przeprowadzonej analizy.





















5.2. Problem ruchu pojazdów przeciążonych w Polsce

5.2.1. Udział pojazdów przeciążonych w ruchu na podstawie danych ze stacji WIM

Szczegółowe zapisy dotyczące dopuszczalnego obciążenia osi pojazdów oraz dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów zostały określone w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia [121]. Rozporządzenie jest zgodne z treścią dyrektywy Unii Europejskiej [38], w której określono parametry techniczne pojazdów poruszających się w ruchu międzynarodowym w krajach UE.

W tabelicy 5.1 zestawiono wartości dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów, które zależą od typu pojazdu.

Tablica 5.1. Zestawienie maksymalnej dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów poruszających się w Polsce na podstawie [121]

Typ pojazdu		Dopuszczalna masa całkowita pojazdu [tony]	Typ pojazdu		Dopuszczalna masa całkowita pojazdu [tony]
C 11		18	A 11		18
C 12		26	A 12		26
C 22		32	A 111		28
C+P 111		28	Cs+N111		28
C+P 112		36	Cs+N 112		36
C+P 1111		36	Cs+N 113		40
C+P 1112		40	Cs+N 121		36
C+P 122		40	Cs+N 122		40
C+P 1211		40	Cs+N 123		40 (44*)
C+P 1212		40	C+P 2211		40

* jeżeli pojazd przewozi 40 stopowy kontener ISO w transporcie kombinowanym masa całkowita może wynosić 44 kN

Wartości dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów są jednakowe na wszystkich drogach w Polsce bez względu na dopuszczalne obciążenie osi pojazdów, które w zależności od danej drogi może wynosić 115 kN, 100 kN lub 80 kN. Wykaz dróg po których mogą poruszać się pojazdy o maksymalnym obciążeniu osi odpowiednio 115 kN i 100 kN podano w rozporządzeniach [122] i [123]. Na pozostałych drogach, nie wymienionych w wykazach [122] i [123], obciążenie osi pojazdów nie może przekraczać 80 kN [163]. Ponadto zgodnie z rozporządzeniem dotyczącym warunków technicznych jakim powinny odpowiadać pojazdy [121] wartości dopuszczalnego obciążenia osi zależą od rodzaju osi oraz w przypadku osi wielokrotnych od odległości między osiami sąsiednimi. Na podstawie wymienionych przepisów zestawiono wartości dopuszczalnego obciążenia osi pojazdów i podano je w tabelicy 5.2.

Tablica 5.2. Zestawienie maksymalnych dopuszczalnych obciążeń osi pojazdów

Odległość między osiami sąsiednimi d [m]	Maksymalne dopuszczalne obciążenie osi pojedynczej lub osi wielokrotnej		
	Na drogach po których mogą poruszać się pojazdy o obciążeniu 115 kN na oś napędową, zamieszczonych w wykazie [122]	Na drogach po których mogą poruszać się pojazdy o obciążeniu 100 kN na oś, zamieszczonych w wykazie [123] ²⁾	Na drogach nie ujętych w wykazach [122] i [123], na których dopuszczalne obciążenie osi wynosi 80kN ²⁾
Oś pojedyncza, nienapędowa w pojazdach silnikowych, przyczepach i naczepach			
d ≥ 1,8	100 kN	100 kN	80 kN
Oś podwójna, nienapędowa w pojazdach silnikowych, przyczepach i naczepach			
d < 1,0	110 kN	110 kN	80 kN
1,0 ≤ d < 1,3	160 kN	144 kN	130 kN
1,3 ≤ d < 1,8	180 kN	160 kN	145 kN
Oś potrójna w przyczepach i naczepach			
d ≤ 1,3	210 kN	210 kN	195 kN
1,3 < d ≤ 1,4	240 kN	240 kN	218 kN
Oś pojedyncza, napędowa w pojazdach silnikowych			
d ≥ 1,8	115 kN	100 kN	80 kN
Oś podwójna, napędowa w pojazdach silnikowych			
d < 1,0	115 kN	-	-
1,0 ≤ d < 1,3	160 kN	144 kN	130 kN
1,3 ≤ d < 1,8	180 (190 ³⁾ kN	160 (170 ³⁾ kN	145 (152 ³⁾ kN

1) zgodnie z warunkami technicznymi pojazdów

2) zgodnie z załącznikiem 1 Ustawy o Drogach Publicznych [163], obowiązującym do dnia 19 października 2012r.

3) dla osi wyposażonych w koła bliźniacze, zawieszenie pneumatyczne i przy równomiernym obciążeniu obu osi

Dane z ważenia pojazdów w ruchu zostały wykorzystane do obliczenia udziału pojazdów przeciążonych w ruchu. Analizowano każdy z zaobserwowanych pojazdów z osobna. **Jeżeli masa całkowita danego pojazdu lub gdy obciążenie co najmniej jednej z jego osi przekraczało dopuszczoną w przepisach wartość (tablica 5.2 i 5.1) dany pojazd został zakwalifikowany jako przeciążony.** Udział pojazdów przeciążonych w ruchu ciężkim obliczono zgodnie z ogólnym wzorem:

$$UP = \frac{N_p}{N} \quad (5.1)$$

gdzie:

UP – udział pojazdów przeciążonych,

N_p – sumaryczna liczba pojazdów sklasyfikowanych jako przeciążone,

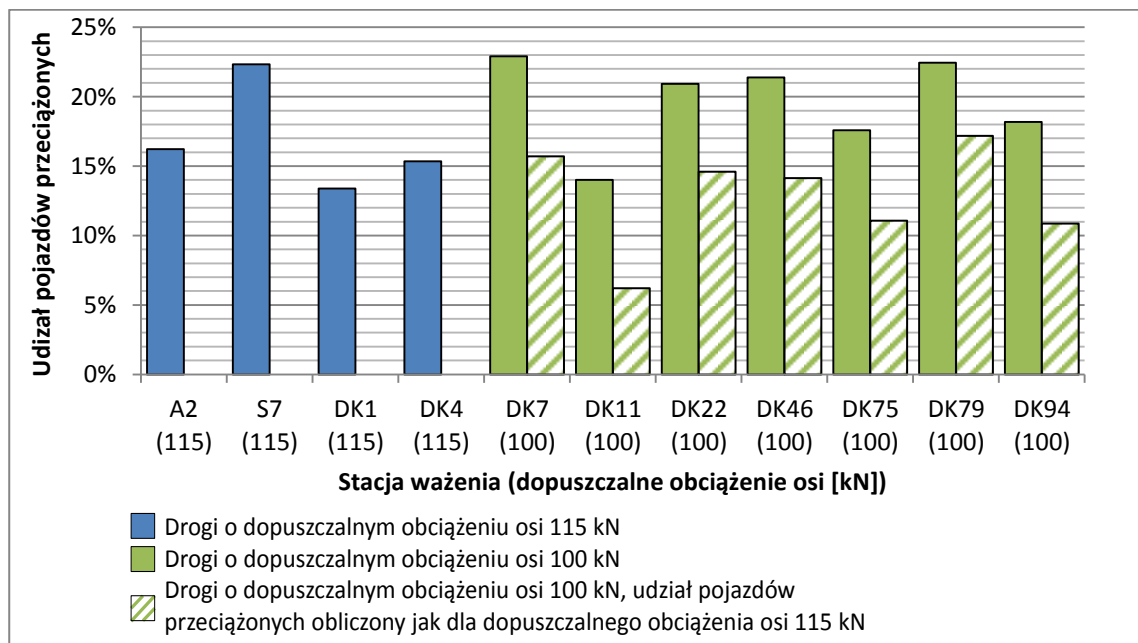
N – sumaryczna liczba wszystkich pojazdów ciężkich, o masie całkowitej powyżej 3,5 tony.

Należy podkreślić, że dany pojazd nie musi mieć jednocześnie przekroczonej masy dopuszczalnej i dopuszczalnego obciążenia osi, aby zostać sklasyfikowany

jako przeciążony. Ze względu na sposób przeciążenia obliczono udział pojazdów przeciążonych w zależności od:

- przekroczenia dopuszczalnej masy całkowitej lub maksymalnego dopuszczalnego obciążenia osi,
- przekroczenia maksymalnego dopuszczalnego obciążenia co najmniej jednej z osi pojazdu, niezależnie od masy całkowitej pojazdu,
- przekroczenia dopuszczalnej masy całkowitej, niezależnie od obciążenia osi.

Obliczenia udziału pojazdów przeciążonych wykonano na pełnym zakresie danych na każdej ze stacji (patrz rozdział 3.3) Na rysunkach 5.1 i 5.2 przedstawiono wyniki obliczeń. Na rozpatrywanych drogach występowały dwie wartości dopuszczalnego obciążenia osi pojazdów 100 kN i 115 kN, co ma wpływ na udział pojazdów przeciążonych na danej drodze. Stwierdzono, że udział pojazdów przeciążonych jest wyższy na stacjach, na których dopuszczalne obciążenie osi wynosi 100 kN. Średni udział pojazdów przeciążonych na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN wynosi 17%, natomiast na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN 20%. Aby porównać udział pojazdów przeciążonych na wszystkich stacjach dodatkowo wykonano obliczenia przy założeniu jednakowego kryterium maksymalnego dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN na wszystkich stacjach i wyniki tych obliczeń oznaczono na rysunku 5.1 jako kolumnę zakreskowaną. Przy tym założeniu średni udział pojazdów przeciążonych na rozpatrywanych stacjach wynosi 14%.

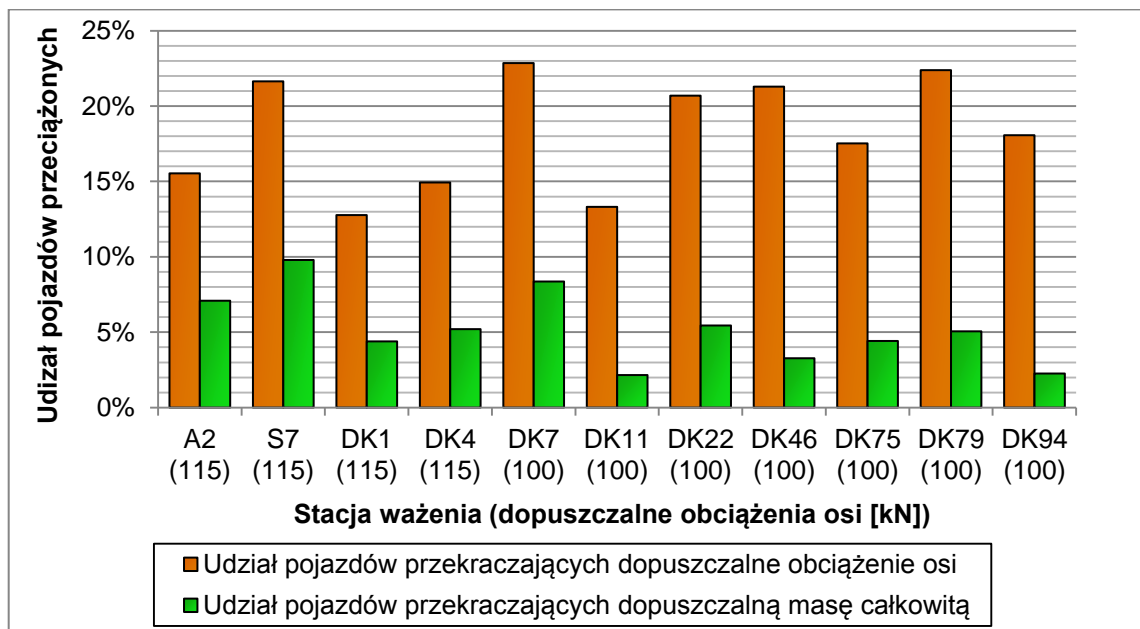


Rysunek 5.1 Udział pojazdów przeciążonych w ruchu pojazdów ciężkich

Z rysunku 5.1 wynika, że przy przejściu jednakowego dla wszystkich stacji maksymalnego dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN udział pojazdów przeciążonych na drodze DK11 jest ponad dwukrotnie niższy niż na pozostałych

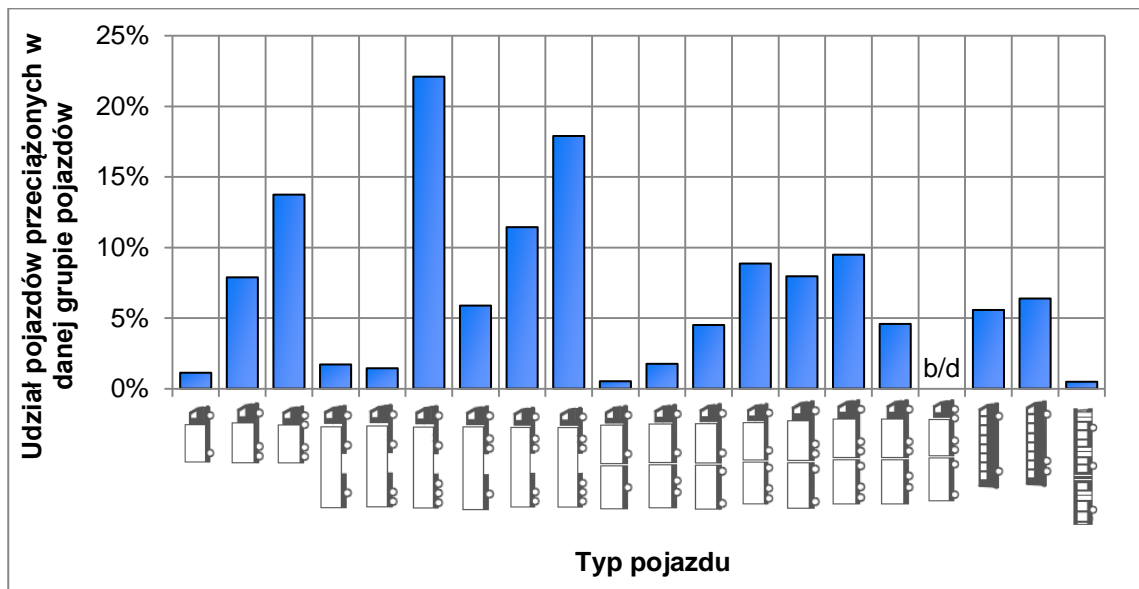
stacjach i wynosi 6%. Na drodze tej w miejscowości Byczyna mieści się oddział terenowy Wojewódzkiego Inspektoratu Transportu Drogowego i prowadzona jest tam stała kontrola pojazdów na wagach legalizowanych. Poziom kontroli pojazdów na stacji DK11 Byczyna jest znacznie wyższy niż na pozostałych stacjach preselekcyjnego ważenia, gdzie kontrole pojazdów prowadzone przez funkcjonariuszy Inspektoratu Transportu Drogowego są okresowe. Na podstawie rysunku 5.1 można wyciągnąć wniosek, że poziom kontroli pojazdów istotnie wpływa na udział pojazdów przeciążonych. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że stacje preselekcyjnego ważenia w pewnym stopniu działają „odstraszaająco” na kierowców, którzy przeciążają swoje pojazdy, w związku z czym udział pojazdów przeciążonych na innych drogach w kraju, na których nie są zainstalowane stacje preselekcyjnego ważenia, może być jeszcze wyższy.

Na rysunku 5.2 przedstawiono porównanie udziału pojazdów przekraczających dopuszczalne obciążenie osi i dopuszczalną masę całkowitą. Stwierdzono, że udział pojazdów przekraczających dopuszczalne obciążenie osi jest kilkakrotnie wyższy niż udział pojazdów przekraczających dopuszczalną masę całkowitą. Uwagę zwraca fakt, że na drogach, na których dopuszczalne obciążenie osi wynosi 100 kN dysproporcja jest większa. Polskie przepisy dotyczące dopuszczalnego obciążenia osi są dość zawile i część z kierowców może być nieświadoma, że osie ich pojazdu przekraczają dopuszczalne obciążenia. Dużo łatwiej jest ocenić kierowcy masę całkowitą pojazdu niż naciski poszczególnych osi. Ponadto zbyt mało uwagi przykładają się do równomiernego rozłożenia ładunku w pojazdach.



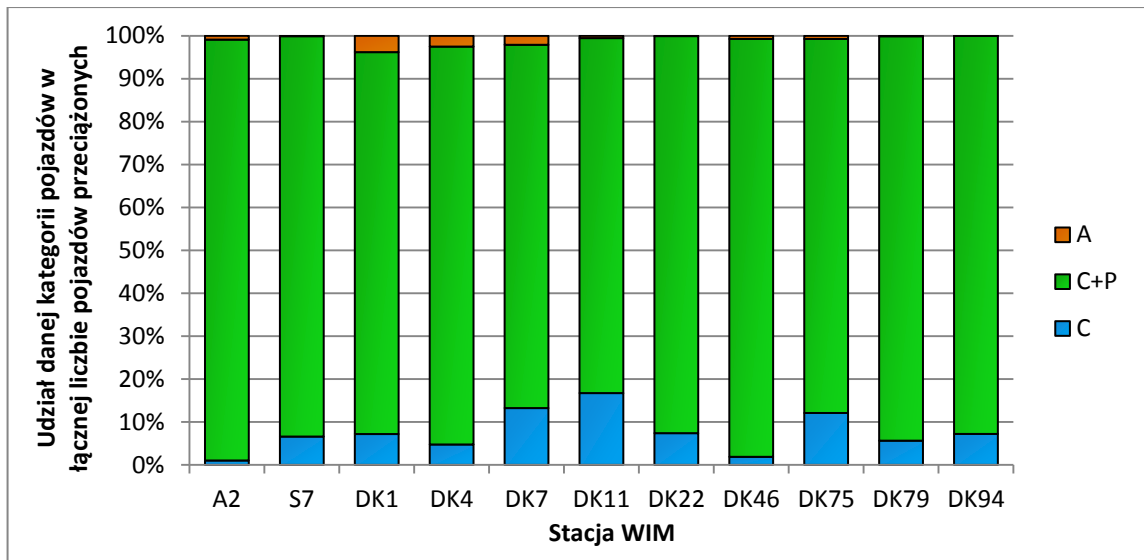
Rysunek 5.2 Porównanie udziału pojazdów przekraczających dopuszczalne obciążenie osi i dopuszczalną masę całkowitą

Elementem dalszych analiz było określenie udziału pojazdów przeciążonych dla poszczególnych typów pojazdów. Na rysunku 5.3 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla stacji A2 Emilia. Stwierdzono, że najczęściej przeciążanymi pojazdami są pojazdy typu Cs+N113, C22, Cs+N122 i Cs+N 123, przy czym pojazdy typu Cs+N113 najczęściej występują w ruchu ciężkim (por. rysunek 3.6 w rozdziale 3.4.2).



Rysunek 5.3 Przykład udziału pojazdów przeciążonych w poszczególnych grupach pojazdów, stacja A2 Emilia

Na rysunku 5.4 zestawiono udział pojazdów danej kategorii (C, C+P lub A) w grupie wszystkich pojazdów przeciążonych. Problem przeciążania pojazdów dotyczy głównie samochodów ciężarowych. Autobusy są sporadycznie, bo w około 5% przeciążane, a ich udział w łącznej liczby pojazdów przeciążonych jest bardzo mały. Z rysunku 5.4 można odczytać, że pojazdy przeciążone w zdecydowanej większości należą do kategorii pojazdów C+P.



Rysunek 5.4 Udział pojazdów danej kategorii w liczbie wszystkich pojazdów przeciążonych

5.2.2. Udział pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni

Efekt niszczącego oddziaływania pojazdów przeciążonych na nawierzchnię można wyrazić poprzez udział tych pojazdów w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni, który można obliczyć na podstawie następującego wzoru:

$$UPD = \frac{D_p}{D} \quad (5.2)$$

gdzie:

UPD – udział szkody zmęczeniowej nawierzchni wywołanej pojazdami przeciążonymi,

D_p – szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana pojazdami przeciążonymi,

D – szkoda zmęczeniowa nawierzchni wywołana wszystkimi pojazdami (przeciążonymi i o prawidłowych obciążeniach).

Szkodę zmęczeniową nawierzchni D_p i D można przedstawić odpowiednio w postaci równań (5.3) i (5.4)

$$D_p = \frac{N_p F_p}{N_f} \quad (5.3)$$

$$D = \frac{N F_{sr}}{N_f} \quad (5.4)$$

gdzie:

F_p – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów przeciążonych,

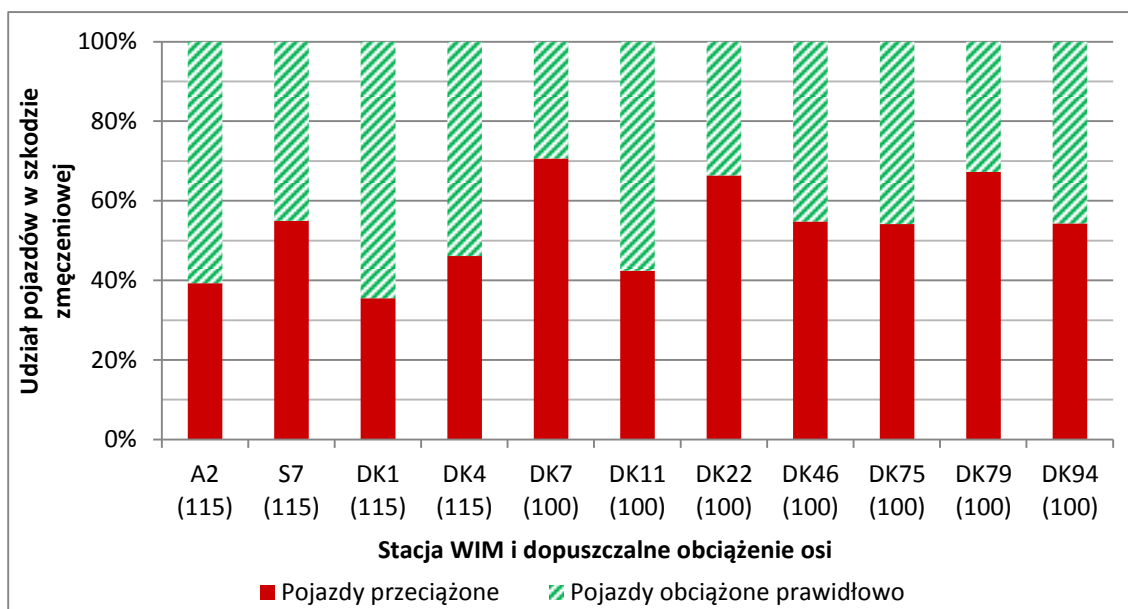
F_{sr} – średni współczynnik równoważności obciążenia wszystkich pojazdów ciężkich,

- N_p – sumaryczna liczba pojazdów sklasyfikowanych jako przeciążone,
 N – sumaryczna liczba wszystkich pojazdów,
 N_f – trwałość zmęczeniowa nawierzchni.

Po podstawieniu wzorów (5.3), (5.4) do równania (5.2) i uproszczeniu otrzymuje się:

$$UPD = \frac{N_p F_p}{N F_{sr}} \quad (5.5)$$

Do analizy przyjęto wzór czwartej potęgi do obliczenia współczynników równoważności obciążenia osi. Dla każdego pojazdu z osobna obliczono współczynnik równoważności obciążenia pojazdu zgodnie z metodyką podaną w punkcie 3.5.1, a następnie obliczono średnią dla danej grupy pojazdów (wyłącznie przeciążonych lub wszystkich pojazdów ciężkich). Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.5.



Rysunek 5.5 Udział pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni

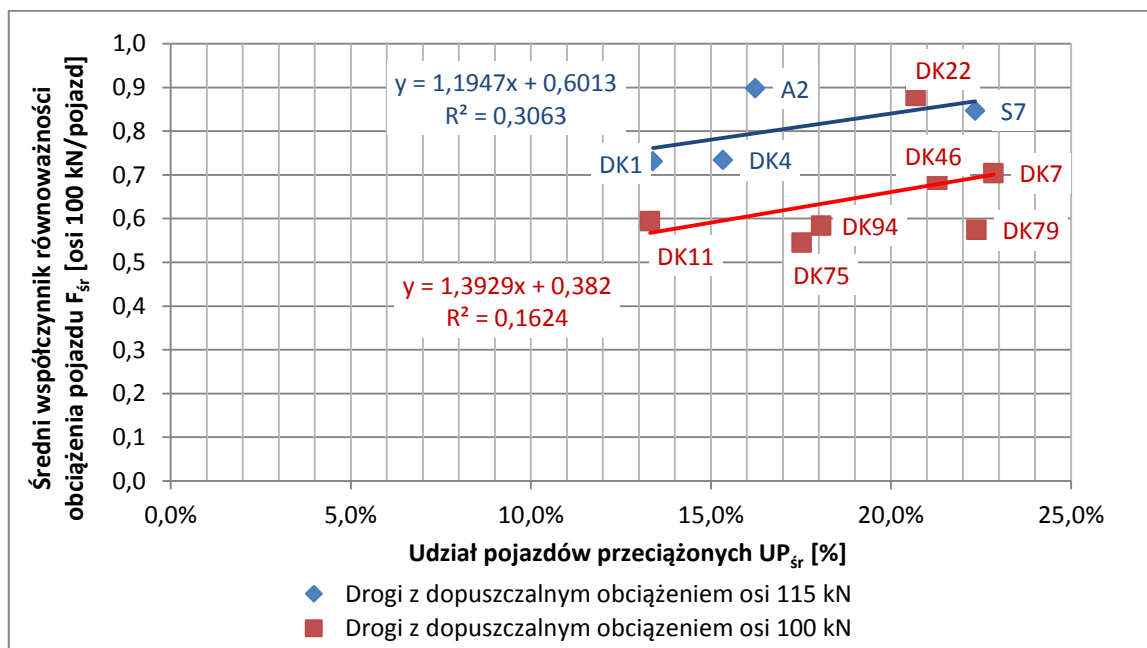
Jak wynika z rysunku 5.5 udział pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni jest znacznie wyższy niż udział liczby pojazdów przeciążonych w stosunku do liczby wszystkich pojazdów ciężkich. Można zauważyć, że na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN wartości udziału pojazdów przeciążonych w szkodzie zmęczeniowej nawierzchni są na ogół wyższe niż na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN. Udział pojazdów przeciążonych w szkodzie zmęczeniowej nawierzchni wynosi od 35% na stacji DK1 do 70% na stacji DK7. Wskazuje to na istotny problem związany z ruchem pojazdów przeciążonych oraz na konieczność przeciwdziałania zjawisku przeciążania pojazdów.

5.3. Analiza wpływu pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia oraz na trwałość zmęczeniową nawierzchni

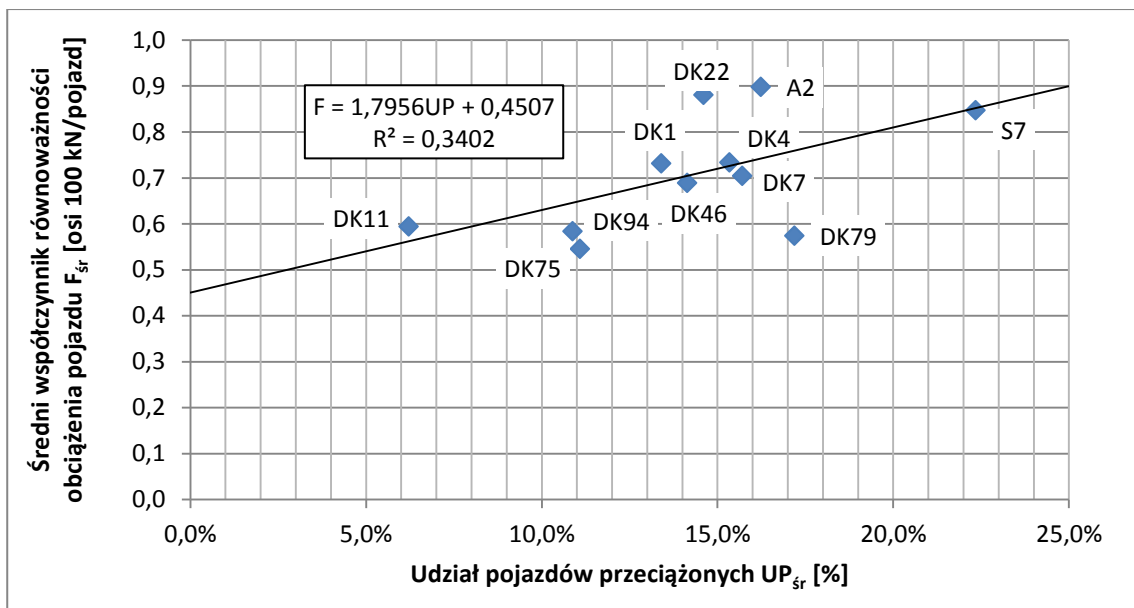
5.3.1. Metodyka analizy i wskaźniki stosowane do oceny wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni

Stwierdzono, że udział pojazdów przeciążonych oraz średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów zmienia się na poszczególnych stacjach, dlatego w pierwszym kroku analizy sprawdzono korelację pomiędzy tymi parametrami. Ponieważ na rozpatrywanych drogach występują dwie różne wartości dopuszczalnego obciążenia osi 100 kN i 115 kN, które mają wpływ na udział pojazdów przeciążonych, zależność pomiędzy współczynnikiem równoważności obciążenia osi a udziałem pojazdów przeciążonych rozpatrywano na dwa sposoby:

- osobno dla dróg z dopuszczalnym obciążeniem osi 100 kN i 115 kN (rysunek 5.6),
- przy założeniu jednakowego dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN na wszystkich stacjach (rysunek 5.7).



Rysunek 5.6 Zależność pomiędzy średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych w ruchu z rozróżnieniem dopuszczalnego obciążenia osi na stacjach WIM



Rysunek 5.7 Zależność pomiędzy średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych w ruchu przy założeniu jednakowego dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN na wszystkich stacjach WIM

Z rysunków 5.6 i 5.7 można odczytać trend wzrostu średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdów wraz ze wzrostem udziału pojazdów przeciążonych. Wpływ na wartość średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu ma również dopuszczalne obciążenie osi. Na stacjach, na których wynosi ono 115 kN wartość średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu jest większa. Rozpatrywane zależności są raczej słabe od $R^2 = 0,1624$ do $R^2 = 0,3402$, ponieważ oprócz udziału pojazdów przeciążonych na wielkość współczynników równoważności wpływają rozkłady obciążenia osi pojazdów obciążonych prawidłowo i struktura ruchu, czyli czynniki charakteryzujące ruch na danej stacji pomiarowej. Dlatego zdecydowano zbadać dwa przypadki:

- 1) Wpływ udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdu przy rozpatrywaniu każdej stacji WIM z osobna.
- 2) Wpływ udziału pojazdów przeciążonych i parametrów charakteryzujących rozkłady obciążenia osi na współczynniki równoważności obciążenia osi przy rozpatrywaniu wszystkich stacji WIM łącznie.

Do przeprowadzenia badań wymienionych dwóch przypadków zastosowano odpowiednio metody:

- 1) Metoda 1 – polegała na określeniu modeli regresji liniowej pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych a średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu osobno dla każdej stacji pomiarowej.
- 2) Metoda 2 – w pierwszej kolejności wyznaczono dla każdej stacji WIM zastępczy (uproszczony) rozkład obciążenia osi pojazdów i określono jego

charakterystyczne parametry, następnie określono model regresji liniowej pomiędzy tymi parametrami, udziałem pojazdów przeciążonych i średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu.

W obu metodach otrzymano model statystyczny, na podstawie którego można obliczyć współczynnik równoważności obciążenia pojazdu F . Zmienną podstawianą do modelu jest udział pojazdów przeciążonych UP , a w przypadku metody 2 zmiennymi są również parametry charakteryzujące zastępcze rozkłady obciążenia osi. Na podstawie otrzymanych modeli matematycznych oceniano wpływ pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Do przeprowadzenia oceny zaproponowano w niniejszej pracy następujące wskaźniki:

- Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu RIF (ang. „Relative Increase of Load Equivalency Factor”)¹,
- Spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni wywołany obecnym ruchem pojazdów przeciążonych DFL (ang. „Decrease of Fatigue Life”)¹.

Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu obliczono na podstawie następującego wzoru:

$$RIF = \frac{F_{UP} - F_0}{F_0} [\%] \quad (5.6)$$

gdzie:

RIF – względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu

F_{UP} – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przy danym udziale pojazdów przeciążonych UP ,

F_0 – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przy zerowej liczbie pojazdów przeciążonych.

Do obliczenia spadku trwałości zmęczeniowej nawierzchni wywołanej ruchem pojazdów przeciążonych DFL przyjęto założenie, że trwałość zmęczeniowa tej nawierzchni wynosi N_f równoważnych osi standardowych 100 kN. Nawierzchnia ta jest w stanie przenieść liczbę pojazdów NT_{UP} , wśród których pojazdy przeciążone stanowią UP procent wszystkich pojazdów. Średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdów wynosi F_{UP} . Gdyby pojazdy przeciążone nie występowały w ruchu, to rozpatrywana nawierzchnia byłaby w stanie przenieść NT_0 pojazdów, dla których średni współczynnik równoważności obciążenia wynosiłby F_0 . Przy powyższych założeniach prawdziwa jest następująca zależność:

$$N_f = NT_{f,UP} F_{UP} = NT_{f,0} F_0 \quad (5.7)$$

gdzie:

N_f – trwałość zmęczeniowa nawierzchni,

¹ Zastosowano oznaczenia angielskie ze względu na wcześniejsze użycie tych wskaźników przez autora w publikacji anglojęzycznej [129]

$NT_{f,0}$ – liczba pojazdów, wśród których nie ma pojazdów przeciążonych, jaką jest w stanie przenieść nawierzchnia do wyczerpania swojej trwałości,
 $NT_{f,UP}$ – liczba pojazdów, wśród których UP procent pojazdów jest przeciążona, jaką jest w stanie przenieść nawierzchnia do wyczerpania swojej trwałości, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (5.6).

Spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni DFL wywołany ruchem pojazdów przeciążonych wyrażony jest w następujący sposób:

$$DFL = \left(\frac{NT_{f,0} - NT_{f,UP}}{NT_{f,0}} \right) \cdot 100\% \quad (5.8)$$

Z równania 5.7 wynika, że $NT_{f,UP} = \frac{N_f}{F_{UP}}$ oraz $NT_{f,0} = \frac{N_f}{F_0}$, co po podstawieniu do równania 5.8 i przekształceniu daje:

$$DFL = \left(1 - \frac{F_0}{F_{UP}} \right) \cdot 100\% \quad (5.9)$$

Jednym z elementów analizy była ocena efektów wynikających z potencjalnego zmniejszenia udziału pojazdów przeciążonych. Parametrem, który zastosowano do tej oceny jest wskaźnik IFL (ang. „Increase of Fatigue Life”), który określa zwiększenie trwałości zmęczeniowej w wyniku zmniejszenia udziału pojazdów przeciążonych z obecnego poziomu UP do założonego poziomu $UP^* < UP$. Do określenia wskaźnika IFL przyjęto analogiczne założenie jak w przypadku wskaźnika DFL we wzorze (5.7):

$$N_f = NT_{f,UP} F_{UP} = NT_{f,UP^*} F_{UP^*} \quad (5.10)$$

gdzie:

N_f – trwałość zmęczeniowa nawierzchni wyrażona jako liczba osi standardowych 100 kN,

UP – obecny, średni udział pojazdów przeciążonych w ruchu na danej stacji,

UP^* – założony, pomniejszony udział pojazdów przeciążonych w ruchu na danej stacji,

$NT_{f,UP}, NT_{f,UP^*}$ – sumaryczna liczba pojazdów ciężkich, jaką jest w stanie przenieść nawierzchnia przy danym udziale pojazdów przeciążonych w ruchu,

F_{UP}, F_{UP^*} – współczynniki równoważności obciążenia pojazdu przy danym udziale pojazdów przeciążonych w ruchu.

Wzrost trwałości zmęczeniowej nawierzchni IFL obliczono według wzoru:

$$IFL = \frac{NT_{f,UP^*} - NT_{f,UP}}{NT_{f,UP^*}} \quad (5.11)$$

gdzie oznaczenia jak we wzorze (5.10).

Z równania (5.10) wynika, że $NT_{f,UP} = \frac{N_f}{F_{UP}}$ oraz $NT_{f,UP^*} = \frac{N_f}{F_{UP^*}}$, co po przekształceniu i podstawieniu do wzoru (5.11) daje:

$$IFL = 1 - \frac{F_{UP^*}}{F_{UP}} \quad (5.12)$$

Wskaźnik IFL może mieć duże praktyczne zastosowanie. Przykładowo jeżeli na danej drodze przewiduje się zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych w wyniku zaostrzenie kontroli pojazdów to na podstawie wskaźnika IFL można będzie oszacować jego efekt w postaci zwiększenia trwałości nawierzchni.

5.3.2. Wpływ udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdu przy rozpatrywaniu każdej ze stacji WIM z osobna

Zaobserwowano, że udział pojazdów przeciążonych w poszczególnych dniach zmienia się. Zmiany udziału pojazdów przeciążonych mogą być wywołane różnymi czynnikami w tym także prowadzeniem kontroli w pobliżu stacji WIM przez Inspekcję Transportu Drogowego. Podczas prowadzenia kontroli pojazdów kierujący pojazdami przeciążonymi mogą celowo zmieniać trasę podróży, aby uniknąć kontroli, przez co udział pojazdów przeciążonych w danym dniu spada.

Dla każdej stacji i każdego dnia z osobna określono udział pojazdów przeciążonych oraz obliczono średni dobowy współczynnik równoważności obciążenia pojazdu na podstawie wzoru czwartej potęgi (patrz rozdz. 3.5.3). Udział pojazdów przeciążonych oraz średni dobowy współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przyjęto jako zmienne losowe, które charakteryzują ruch na danej stacji w danym dniu. Następnie dla tych zmiennych przeprowadzono analizę regresji liniowej. Poziom korelacji liniowej opisano współczynnikiem determinacji R^2 . Wynikiem regresji liniowej są funkcje liniowe opisane ogólnym wzorem:

$$F_{UP} = a \cdot UP + b \quad (5.13)$$

gdzie:

F_{UP} – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu na danej stacji WIM przy danym udziale pojazdów przeciążonych UP,

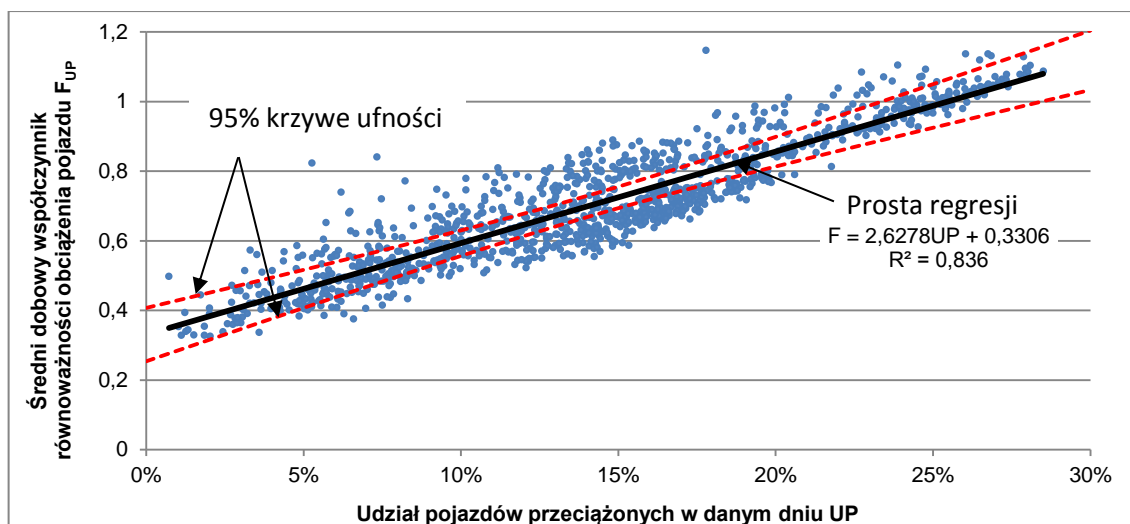
UP – udział pojazdów przeciążonych,

a, b – współczynniki korelacji liniowej przedstawione w tabelicy 5.3.

Tablica 5.3. Zestawienie współczynników funkcji korelacji liniowej między udziałem pojazdów przeciążonych a współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdów

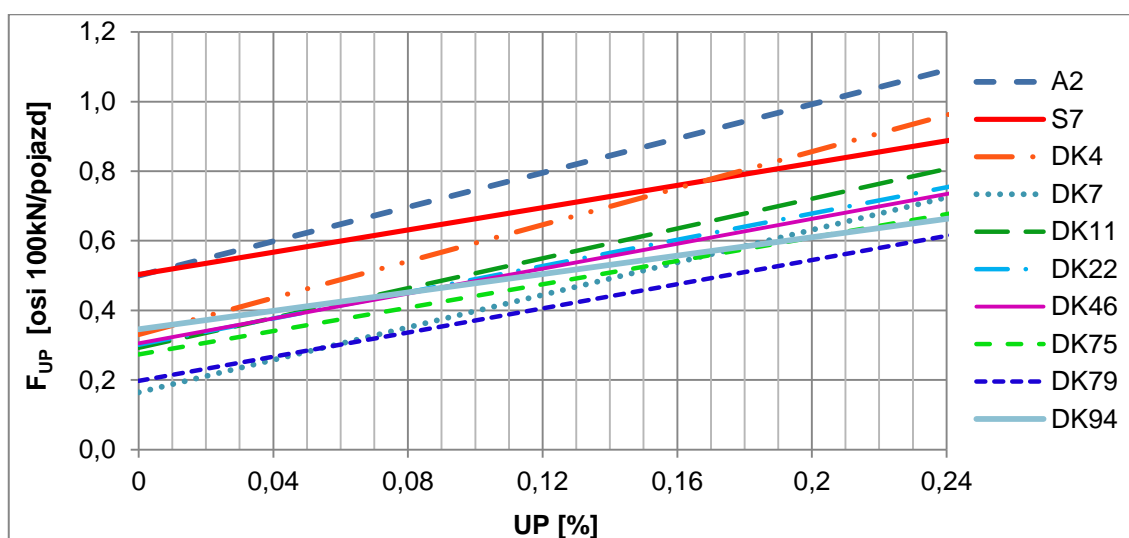
Stacja WIM	Dopuszczalne obciążenie osi [kN]	a	b	R^2	Błąd standardowy modelu regresji [%]	Błąd względny współczynnika F [%]
A2	115	2,462	0,500	0,958	3,2	3,6
S7	115	1,601	0,503	0,693	5,6	6,8
DK1	115	2,108	0,460	0,726	4,4	6,0
DK4	115	2,628	0,331	0,836	7,1	10,1
DK7	100	2,334	0,164	0,846	3,5	5,1
DK11	100	2,142	0,293	0,914	4,4	7,3
DK22	100	1,886	0,301	0,959	1,9	2,8
DK46	100	1,788	0,305	0,889	3,7	5,7
DK75	100	1,679	0,273	0,867	3,9	7,2
DK79	100	1,736	0,197	0,897	4,0	7,2
DK94	100	1,322	0,346	0,816	2,1	3,7

Stwierdzono, że uzyskuje się dość dobrą korelację zmiennych jeżeli każda ze stacji rozpatrywana jest osobno. Wykresy korelacji dla każdej stacji z osobna zamieszczono w załączniku B.1, natomiast przykład dla stacji DK4 przedstawiono na rysunku 5.8. Wpływ udziału pojazdów przeciążonych na współczynnik równoważności obciążenia pojazdu charakteryzowany jest przez współczynnik a według wzoru (5.13). Wpływ pojazdów obciążonych prawidłowo na współczynnik równoważności (5.13) obciążenia pojazdu określony jest przez współczynnik b według wzoru (5.13). Można przyjąć zgodnie z równaniem regresji (5.13), że jeżeli na danej drodze nie byłoby pojazdów przeciążonych ($UP=0\%$) to współczynnik równoważności obciążenia pojazdu byłby równy współczynnikowi b . Na rysunku 5.8 oznaczono również krzywe ufności dla poziomu ufności $\alpha=95\%$. Krzywe ufności przebiegają dość blisko prostej regresji, co oznacza, że przy szacowaniu współczynnika równoważności obciążenia pojazdu popełniany jest niewielki błąd. Błędy standardowe poszczególnych modeli regresji podano w tablicy i wynoszą one od 1,9% do 7,1%.

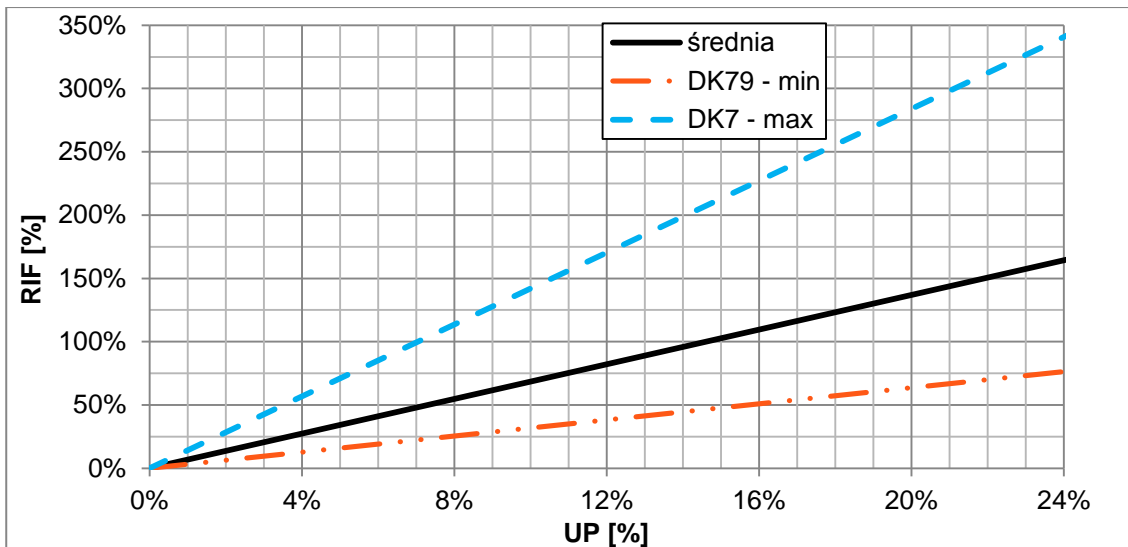


Rysunek 5.8 Przykład zależności pomiędzy średnim dobowym współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych na stacji DK4 Wola Dębińska

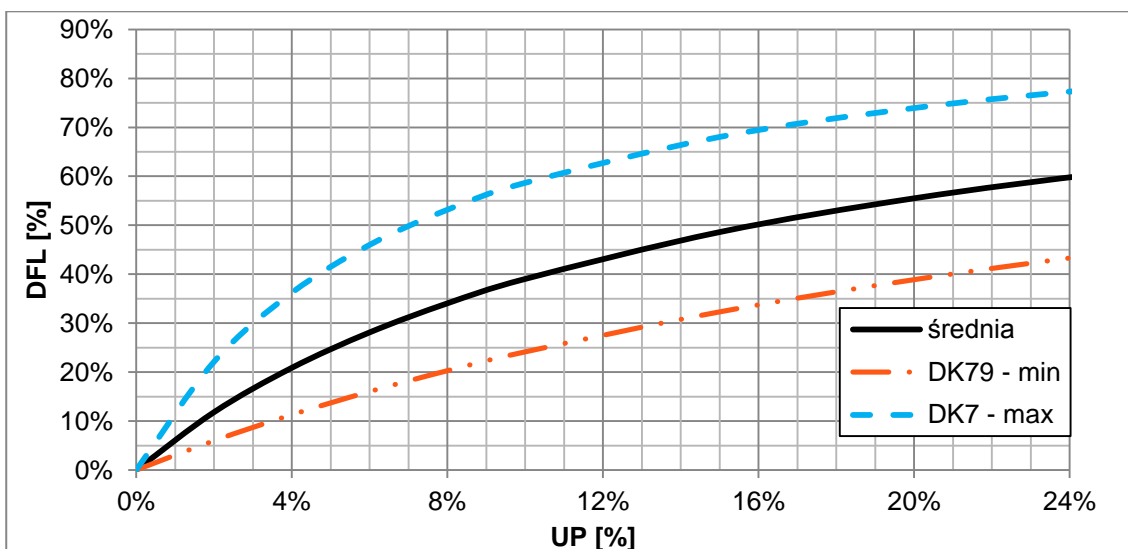
Zestawienie wykresów funkcji zależności pomiędzy średnim dobowym współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych dla wszystkich stacji WIM przedstawiono na rysunku 5.9. Wpływ udziału pojazdów przeciążonych na względny wzrost współczynnika równoważności pojazdu RIF przedstawiono na rysunku 5.10, natomiast spadek trwałości zmęczeniowej wywołany ruchem pojazdów przeciążonych DFL przedstawiono na rysunku 5.11. Na rysunkach zaznaczono wykresy funkcji RIF(UP) i DFL(UP) dla stacji DK79, na której funkcje miały najmniejszą wartości, dla stacji DK7 na której wartości były największe oraz zaznaczono średnie wartości obliczone dla wszystkich stacji.



Rysunek 5.9 Zestawienie wykresów funkcji zależności pomiędzy średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych



Rysunek 5.10 Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia osi RIF, w zależności od udziału pojazdów przeciążonych UP na podstawie metody 1



Rysunek 5.11 Spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni DFL w zależności od udziału pojazdów przeciążonych UP na podstawie metody 1

Na podstawie funkcji $RIF(UP)$ i $DFL(UP)$ można powiedzieć, że średnio wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% spowoduje wzrost średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdów o $RIF=160\%$ i spadek trwałości zmęczeniowej o $DFL=60\%$. Należy zaznaczyć, że na niektórych stacjach zmiany te są jeszcze większe.

Na podstawie wskaźnika IFL można oszacować, o ile wzrosłaby trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni, gdyby udział pojazdów przeciążonych został zmniejszony z obecnego poziomu do danego założonego poziomu UP.

Przyjęto założenie, że zwiększenie intensywności kontroli może spowodować spadek udziału pojazdów przeciążonych w ruchu UP do 10% na wszystkich stacjach. Dla tak przyjętego założenia obliczono współczynniki IFL, które dla poszczególnych stacji zestawiono w tabelicy 5.4. Przy tym założeniu obliczono, że wzrost trwałości zmęczeniowej IFL wyniesie od 14% (stacja DK11) do 43% (stacja DK7).

Według obserwacji prowadzonych przez Tailora i wsp. [155] w stanie Nowy Jork w USA, intensywne kontrole pojazdów mogą spowodować spadek udziału pojazdów przeciążonych w ruchu nawet do 2%. Obecnie stała kontrola pojazdów jest prowadzona na stacji DK11 Byczyna, gdzie mieści się siedziba Inspekcji Transportu Drogowego, na pozostałych stacjach prowadzona jest okresowa kontrola. Na stacji DK11 Byczyna średni udział pojazdów przeciążonych wynosi 14%. Na wszystkich rozpatrywanych stacjach występują dni, w których udział pojazdów przeciążonych jest niższy od 10%. Obserwacje te potwierdzają, że przyjęte założenie obniżenia udziału pojazdów przeciążonych do 10% jest możliwe do osiągnięcia.

Tablica 5.4. Współczynniki IFL obliczone według modelu 1 i przy założeniu zmniejszenia obecnego udziału pojazdów przeciążonych do 10%

Stacja WIM	Dopuszczalne obciążenie osi [kN]	Średni udział pojazdów przeciążonych na danej stacji		Współczynnik równoważności obciążenia pojazdu na danej stacji		Wzrost trwałości zmęczeniowej IFL [%]
		Obecny UP ₀ [%]	Przewidywany po wprowadzeniu częstszych kontroli pojazdów UP ₁ [%]	Rzeczywisty F(UP ₀) [osi 100 kN/poj.]	Przewidywany po wprowadzeniu częstszych kontroli pojazdów F(UP ₁) [osi 100 kN/poj.]	
A2	115	16,2	10,0	0,900	0,746	17
S7	115	22,3	10,0	0,861	0,663	23
DK4	115	15,3	10,0	0,734	0,593	19
DK7	100	22,9	10,0	0,699	0,398	43
DK11	100	14,0	10,0	0,593	0,507	14
DK22	100	20,9	10,0	0,696	0,490	30
DK46	100	21,4	10,0	0,688	0,484	30
DK75	100	17,6	10,0	0,569	0,441	22
DK79	100	22,4	10,0	0,587	0,371	37
DK94	100	18,2	10,0	0,586	0,478	18

Przedstawiony sposób analizy w dobry sposób oddaje wpływ zmiany współczynnika F na danej drodze na skutek zmiany udziału pojazdów przeciążonych UP. Do zastosowania metody 1 potrzebny jest pomiar ze stacji WIM na danej drodze. Należy zaznaczyć, że funkcje regresji zostały wyznaczone z uwzględnieniem obowiązującego na danej stacji dopuszczalnego obciążenia osi 100 kN lub 115 kN, które również wpływa na wielkość współczynnika

równoważności obciążenia pojazdu F. Ponieważ rozrzut wyników obliczeń RIF i DFL na poszczególnych stacjach jest dość duży, dlatego uśrednienie modelu obliczeniowego do wyznaczenia wpływu pojazdów przeciążonych na pozostałych drogach może wiązać się z popełnieniem znacznego błędu oszacowania współczynnika równoważności obciążenia pojazdu F. Model, który mógłby być zastosowany do określenia uśrednionego wpływu pojazdów przeciążonych na trwałość nawierzchni powinien oprócz udziału pojazdów przeciążonych uwzględniać również parametry rozkładów obciążenia osi pojazdów.

5.3.3. Wpływ udziału pojazdów przeciążonych i parametrów charakteryzujących rozkłady obciążenia osi na współczynniki równoważności obciążenia osi przy rozpatrywaniu wszystkich stacji WIM łącznie

Z analiz rozkładów obciążenia osi pojazdów, podanej w rozdziale 3.6.1 wynika, że charakterystyka obciążeń zależy od typu osi. Oprócz tego oddziaływanie osi podwójnych i potrójnych jest inne niż osi pojedynczych. Aby uwzględnić charakterystykę obciążenia osi pojazdów należałoby albo rozpatrywać rozkłady obciążenia poszczególnych typów osi, co mocno skomplikowałoby obliczenia, albo należałoby określić jeden zastępczy rozkład obciążenia na każdej stacji. W zaproponowanej metodzie przyjęto, że obciążenie osi na każdej ze stacji będzie wyrażone poprzez jeden zastępczy rozkład obciążenia. W tym celu wszystkie osie podwójne i potrójne przeliczono na zastępcze obciążenie osiami pojedynczymi, które wywołają ten sam efekt niszczący na nawierzchnie. Innymi słowy współczynnik równoważności obciążenia danej osi podwójnej o obciążeniu Q_{II} lub potrójnej o obciążeniu Q_{III} będzie równy współczynnikowi równoważności obciążenia zastępczej osi pojedynczej Q_I . Przeliczenie obciążenia osi podwójnych i potrójnych na obciążenie osiami zastępczymi pojedynczymi przeprowadzono na podstawie wzoru czwartej potęgi (por. rozdział 2.3.3.2), który przekształcono w następujący sposób:

$$F_j = \left(\frac{Q_I}{100}\right)^n = \left(\frac{Q_{II}}{184}\right)^n \quad \text{dla osi podwójnej} \quad (5.14a)$$

$$F_j = \left(\frac{Q_I}{100}\right)^n = \left(\frac{Q_{III}}{263}\right)^n \quad \text{dla osi potrójnej} \quad (5.14b)$$

$$Q_I = \frac{100}{184} \cdot Q_{II} \quad \text{dla osi podwójnej} \quad (5.15a)$$

$$Q_I = \frac{100}{263} \cdot Q_{III} \quad \text{dla osi potrójnej} \quad (5.15b)$$

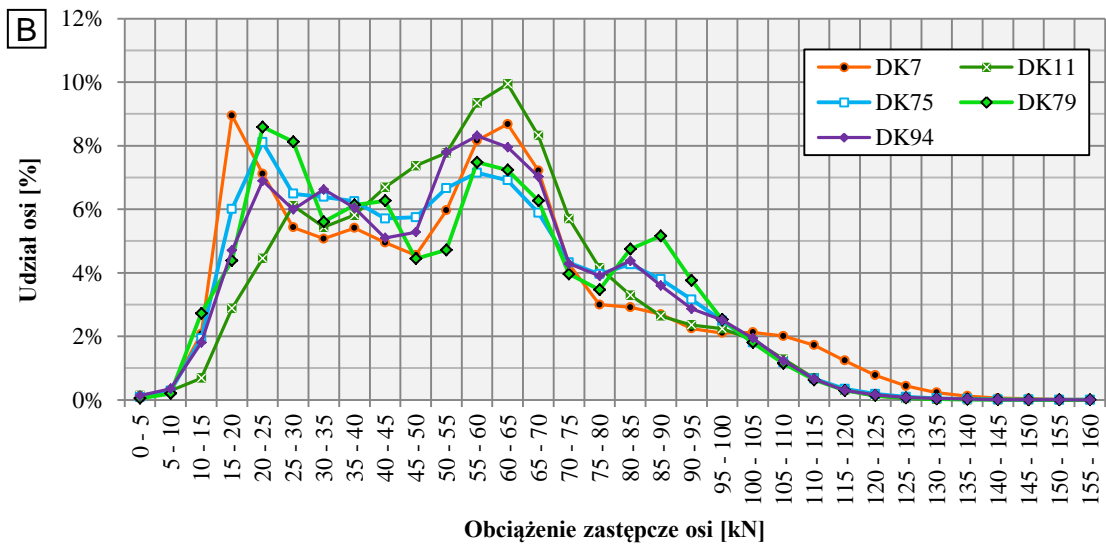
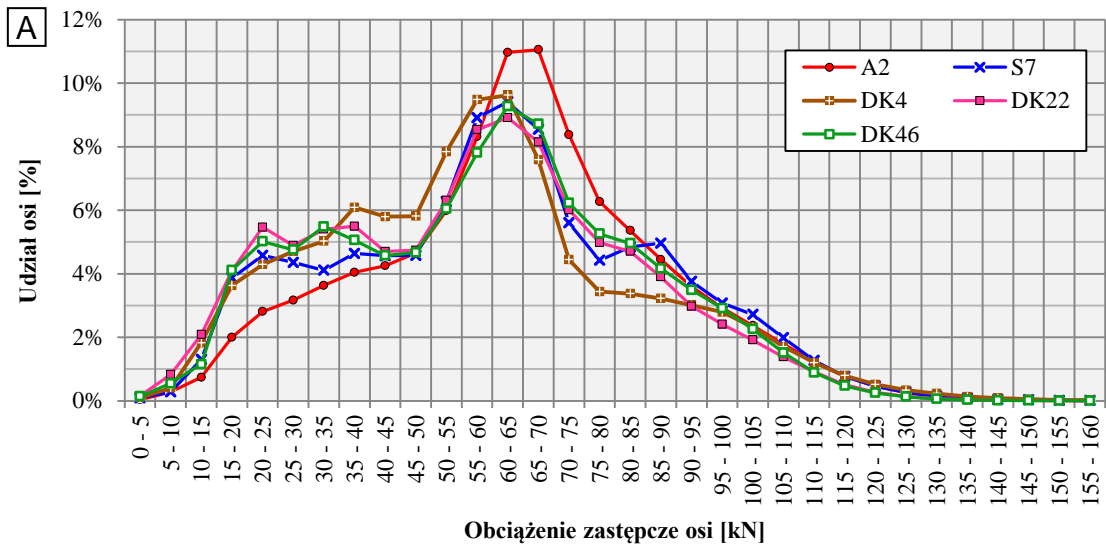
gdzie:

F_j – współczynnik równoważności obciążenia osi,

- Q_I – zastępcze obciążenie osią pojedynczą, równoważne obciążeniu osią podwójną lub potrójną [kN],
- Q_{II} – rzeczywiste obciążenie osi podwójnej (suma obciążeń dwóch osi składowych) [kN],
- Q_{III} – rzeczywiste obciążenie osi potrójnej (suma obciążeń trzech osi składowych) [kN],
- n – wykładnik równy 4.

Wartości $Q_s=184$ i $Q_s=263$ wynikają ze wzorów AASHO opisanych równaniami (2.17)-(2.20), dla liczby strukturalnej nawierzchni $SN = 5,15$ i terminalnego wskaźnika użyteczności nawierzchni $pt = 2,5$ i zostały wyprowadzone w pracy Judyckiego [74].

Zastępczy rozkład obciążenia osi jest sumą rozkładów obciążenia osi pojedynczych oraz rozkładów zastępczych obciążeń osią pojedynczą, równoważnych obciążeniu odpowiednio osią podwójną i potrójną. Zastępcze rozkłady obciążenia osi pojazdów wykonano dla pełnego, analizowanego okresu pomiaru dla każdej ze stacji (patrz rozdział 3.3). Z analizy wykluczono stację DK1 ponieważ okres pomiaru na niej był krótszy niż pełen rok. Na rysunku 5.12 przedstawiono wykresy zastępczych rozkładów obciążenia osi pojazdów przy czym rozróżniono stacje na których przeważały osie cięższe (o obciążeniu $Q_j > 60$ kN) i na których proporcje pomiędzy osiami cięższymi i lżejszymi były podobne. Jak wynika z rysunku 5.12 proporcje pomiędzy liczbą osi obciążonych bardziej i mniej mogą się zmieniać na poszczególnych stacjach. Można również zaobserwować, że w przypadku niektórych stacji (np. A2, DK4) rozkład obciążenia osi zastępczych jest wyraźnie jednomodalny, podczas gdy na innych stacjach jest dwumodalny (np. DK7, DK79). Można powiedzieć, że zastępcze rozkłady obciążenia osi charakteryzują lokalne warunki ruchu ciężkiego na danej drodze.

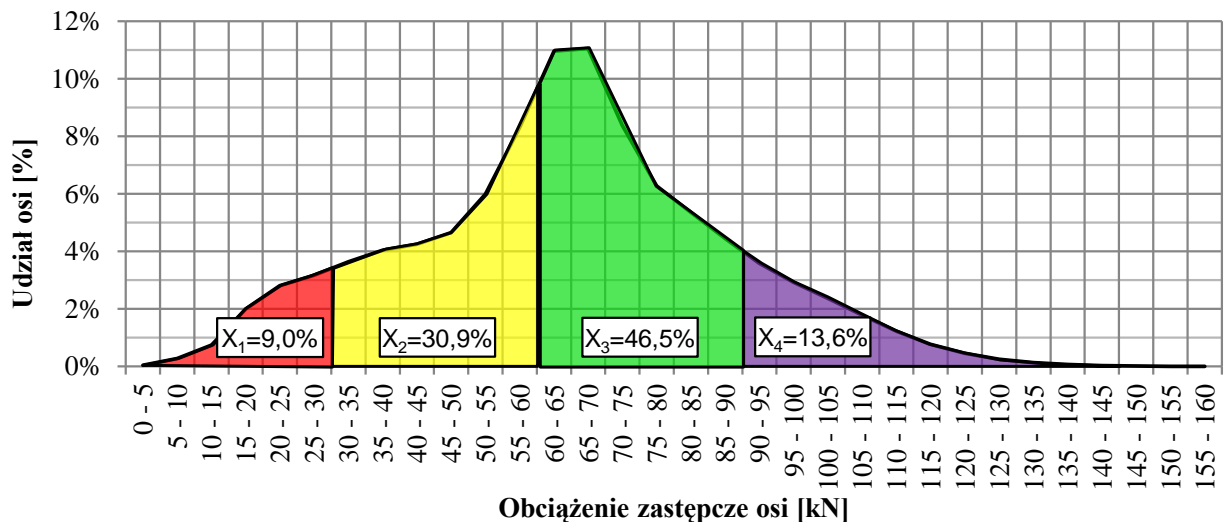


Rysunek 5.12 Zastępcze rozkłady obciążenia osi pojazdów a) stacje na których przeważają osie cięższe b) stacje na których proporcje między osiami cięższymi i lżejszymi są podobne

Do opisu charakterystyki zastępczych rozkładów obciążenia osi posłużono się udziałem procentowym osi zastępczych w czterech przedziałach obciążenia:

- 1) Obciążenie osi $Q_j < 30 \text{ kN}$,
- 2) Obciążenie osi $30 \text{ kN} \leq Q_j < 60 \text{ kN}$,
- 3) Obciążenie osi $60 \text{ kN} \leq Q_j < 90 \text{ kN}$,
- 4) Obciążenie osi $Q_j \geq 90 \text{ kN}$.

Przykład zastępczego rozkładu obciążenia osi wykonany dla stacji A2 wraz z oznaczonymi przedziałami obciążenia i udziałem osi X_1 , X_2 , X_3 i X_4 w tych przedziałach przedstawiono na rysunku 5.13.



Rysunek 5.13 Przykład zastępczego rozkładu obciążenia osi pojazdów wraz z zaznaczonymi wartościami zmiennych X_1 , X_2 , X_3 i X_4 na stacji A2 Emilia

Model regresji liniowej, określony równaniem (5.16), określa zależność pomiędzy charakterystyką obciążenia osi pojazdów, udziałem pojazdów przeciążonych a średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdów.

$$F_{UP} = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 UP \quad (5.16)$$

gdzie:

F_{UP} – średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przy danym udziale pojazdów przeciążonych UP,

a_1, a_2, a_3, a_4 – współczynniki regresji liniowej podane w tabelicy 5.6,

X_1 – udział osi w przedziale obciążenia $Q_j < 30 \text{ kN}$,

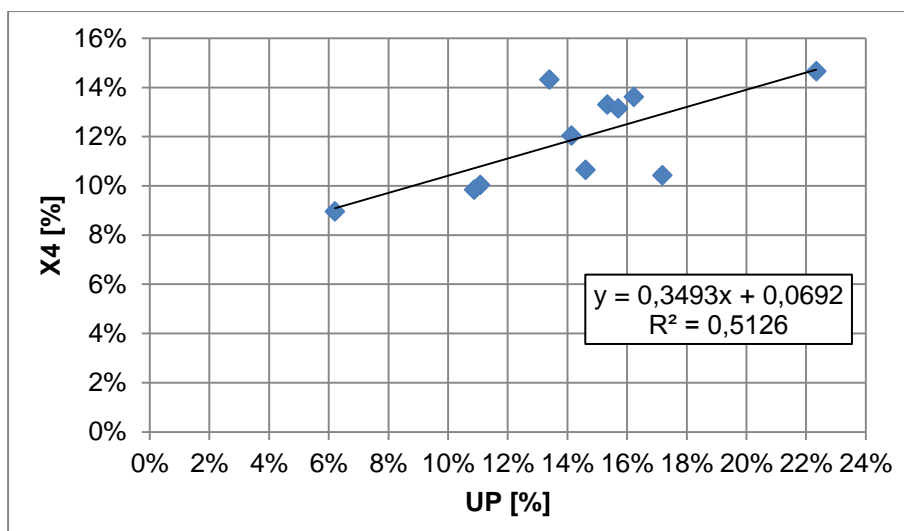
X_2 – udział osi w przedziale obciążenia $30 \text{ kN} \leq Q_j < 60 \text{ kN}$,

X_3 – udział osi w przedziale obciążenia $60 \text{ kN} \leq Q_j < 90 \text{ kN}$,

UP – udział pojazdów przeciążonych w ruchu.

Wartość X_4 ($Q_j \geq 90 \text{ kN}$) została wyłączona z modelu regresji ponieważ wynika bezpośrednio z wartości X_1, X_2, X_3 jako $X_4 = 100\% - X_1 - X_2 - X_3$. Stwierdzono również, że zmienna X_4 jest skorelowana linowo z udziałem pojazdów przeciążonych UP z $R^2 > 0,5$, co przedstawiono na rysunku 5.14. W tabelicy 5.5 przedstawiono zmienne dla zastępczych rozkładów obciążenia osi oraz udział pojazdów przeciążonych na poszczególnych stacjach WIM, na podstawie których obliczono współczynniki regresji liniowej a_1, a_2, a_3, a_4 .

W zaproponowanym modelu regresji liniowej nie występuje wyraz wolny ponieważ nie miałby on uzasadnienia fizycznego. Teoretycznie jeżeli zmienne X_1, X_2, X_3 i UP byłyby równe zero to oznaczałoby, że nie ma ruchu ciężkiego, zatem współczynnik równoważności obciążenia pojazdu F byłby równy 0.



Rysunek 5.14 Korelacja liniowa parametrów X4 i UP

Tablica 5.5. Zmienne X1, X2, X3 i X4 charakteryzujące zastępcze rozkładu obciążenia osi na poszczególnych stacjach

Stacja WIM	X1 [%]	X2 [%]	X3 [%]	X4 [%]	UP ²⁾ [%]	Średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu
A2	9,0	30,9	46,5	13,6	16,2	0,783
S7	14,5	33,1	37,8	14,7	22,3	0,893
DK4	15,0	40,1	31,7	13,3	15,3	0,700
DK7	24,0	34,1	28,8	13,1	15,7	0,841
Dk11	14,6	42,4	34,1	9,0	6,2	0,568
DK22	17,5	35,2	36,7	10,7	14,6	0,720
DK46	15,7	33,6	38,6	12,0	14,1	0,706
DK75	22,9	37,9	29,1	10,0	11,1	0,608
DK79	24,1	34,7	30,8	10,4	17,2	0,619
DK94	19,9	39,1	31,1	9,8	10,9	0,613
DK1 ¹⁾	5,9	42,3	37,6	14,3	13,4	0,725

1) stacja DK1 nie została uwzględniona przy obliczeniach modelu regresji ze względu na krótki okres pomiaru na stacji

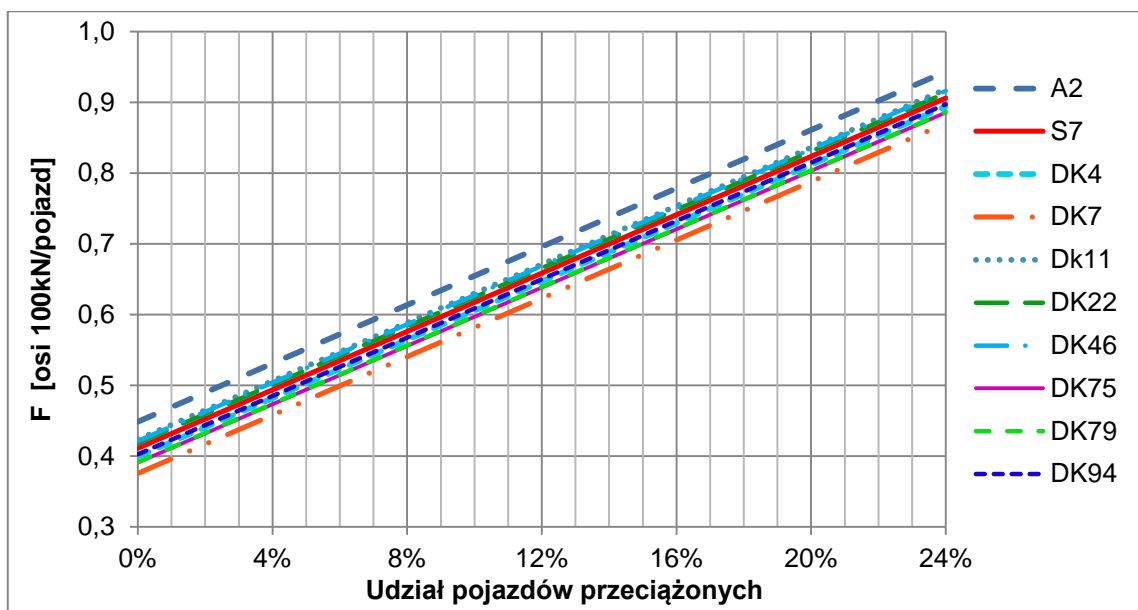
2) Podany udział pojazdów przeciążonych określono przy założeniu jednakowego dopuszczalnego obciążenia osi 115 kN na wszystkich stacjach

Współczynniki regresji liniowej a_1 , a_2 , a_3 i a_4 podano w tablicy 5.6. Do określenia współczynników regresji zastosowano metodę najmniejszych kwadratów i przyjęto 95% poziom ufności. Współczynnik determinacji $R^2=0,822$ oraz niski błąd względny oszacowania współczynnika F równy 11,2% świadczą o dobrym dopasowaniu modelu. Graficzną interpretację modelu przedstawiono na rysunku 5.15 jako obliczone na podstawie modelu wartości współczynników

równoważności obciążenia pojazdu F dla każdej z rozpatrywanych stacji i dla różnych poziomów udziału pojazdów przeciążonych. Linie na modelu są równoległe co wynika z postaci równania regresji (5.16). Pochylenie linii jest jednakowe na każdej ze stacji i wynosi a_4 . Przesunięcie linii w pionie na poszczególnych stacjach zależy od rozkładów obciążenia osi, które są charakteryzowane przez zmienne X_1 , X_2 i X_3 .

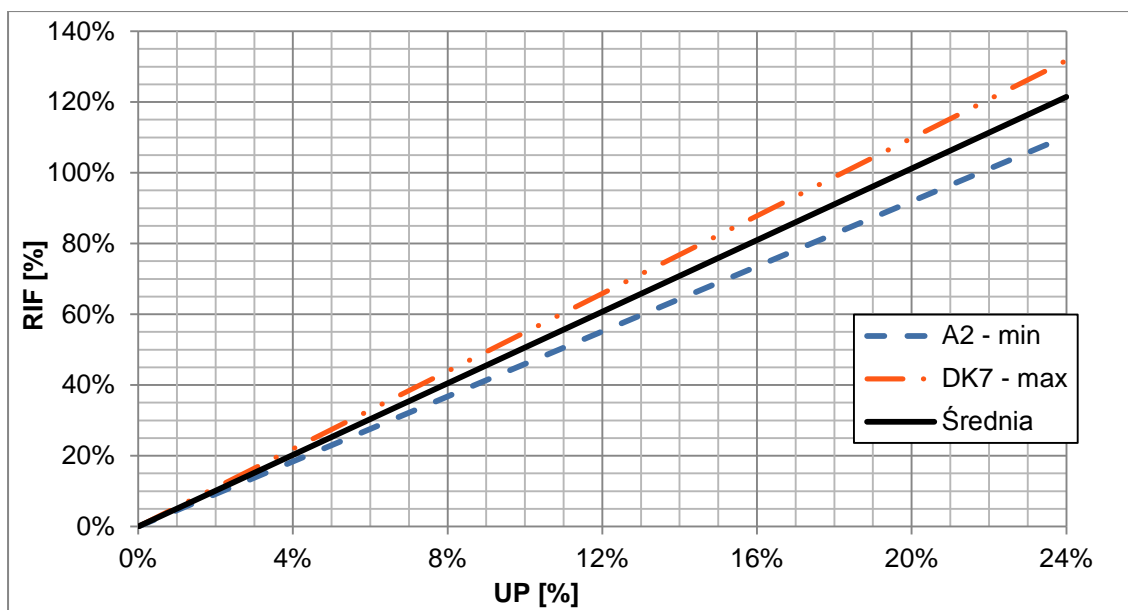
Tablica 5.6. Współczynniki modelu regresji liniowej

a_1	a_2	a_3	a_4	Dopasowany R^2	Błąd standardowy modelu regresji	Błąd względny współczynnika F
0,21	0,40	0,66	2,06	0,822	7,9%	11,2%

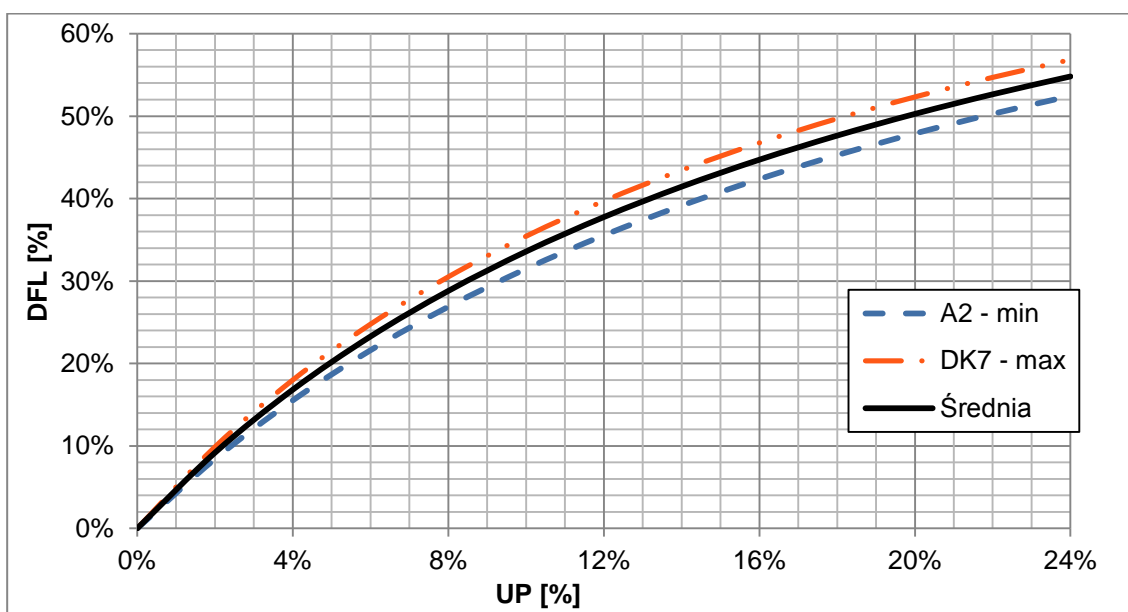


Rysunek 5.15 Zależność pomiędzy współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu i udziałem pojazdów przeciążonych na wszystkich rozpatrywanych stacjach WIM

Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia osi RIF w zależności od udziału pojazdów przeciążonych przedstawiono na rysunku 5.16. Zaznaczono średni RIF, RIF minimalny, jaki wystąpił na stacji A2, oraz RIF maksymalny, jaki wystąpił na stacji DK7. Podobnie na rysunku 5.17 przedstawiono wykres średniego, maksymalnego i minimalnego spadku trwałości zmęczeniowej DFL w zależności od udziału pojazdów przeciążonych.



Rysunek 5.16 Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia osi RIF, w zależności od udziału pojazdów przeciążonych UP na podstawie metody 2

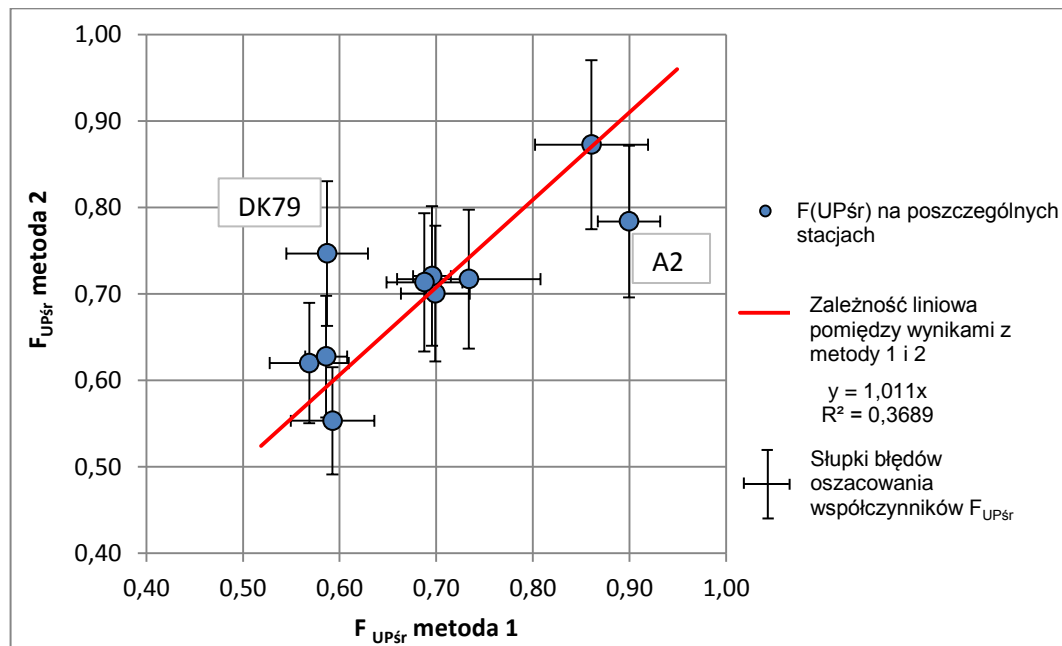


Rysunek 5.17 Spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni DFL w zależności od udziału pojazdów przeciążonych UP na podstawie metody 2

5.3.4. Porównanie metody 1 i 2 analizy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdów

Porównanie metody 1 i metody 2 przeprowadzono w następujący sposób. Dla każdej ze stacji z osobna na podstawie modeli statystycznych obliczono współczynniki równoważności obciążenia pojazdu F_{UP} . Do obliczeń przyjęto średni, rzeczywisty udział pojazdów przeciążonych zgodnie z rysunkiem 5.1.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 5.18. Na rysunku 5.18 oznaczono również słupki błędów oszacowania współczynników $F_{UP\acute{s}r}$ oraz zależność liniową pomiędzy wynikami obliczeń, przeprowadzonymi według metody 1 i metody 2. Można stwierdzić, że w większości przypadków różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z metod 1 i 2 mieszczą się w granicy błędu oszacowania. Na dwóch stacjach DK79 i A2 różnice są nieznacznie większe niż zakres błędu oszacowania wartości $F_{UP\acute{s}r}$ z modelu, co może być efektem lokalnych uwarunkowań ruchu na tych stacjach.



Rysunek 5.18 Porównanie metod 1 i 2 na podstawie wyników obliczeń współczynnika równoważności obciążenia pojazdu F_{UP} , obliczonego dla rzeczywistego, średniego udziału pojazdów przeciążonych $UP\acute{s}r$

Ponieważ błąd względny oszacowania współczynnika F jest mniejszy w przypadku metody 1, do określenia wpływu pojazdów przeciążonych na współczynnik równoważności obciążenia pojazdów na konkretnej drodze bardziej uzasadnione jest zastosowanie metody 1. Warunkiem jest dostęp do danych z ważenia pojazdów na tej drodze. Z porównania wyników metod analizy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdu wynika, że w metodzie 2 (rozdział 5.3.3) uzyskano znacznie mniejsze różnice we współczynnikach RIF i DFL niż w przypadku metody 1 (5.3.2). Zastosowanie metody 2 jest bardziej uzasadnione, gdy analizowany jest średni wpływ udziału pojazdów przeciążonych na współczynniki równoważności obciążenia pojazdu.

Średnie współczynniki RIF i DFL otrzymane z metod 1 i 2 są nieznacznie niższe w przypadku metody 2 niemniej ich wartości są porównywalne. Na podstawie wyników analizy przeprowadzonej według metody 2 można powiedzieć, że średnio

wzrost udziału pojazdów przeciążonych od 0% do 4% powoduje wzrost średniego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu o RIF=20% i spadek trwałości zmęczeniowej DFL=17%. Dalszy wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 4% do 20% spowoduje wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu o RIF=100% i spadek trwałości zmęczeniowej o DFL=50%.

5.3.5. Przykład obliczeniowy wpływu udziału pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnej

Celem przeprowadzenia przykładu obliczeniowego jest obliczenie trwałości warstw asfaltowych przykładowej nawierzchni przy zróżnicowanym poziomie udziału pojazdów przeciążonych w ruchu. Do obliczeń przyjęto model obliczeniowy konstrukcji nawierzchni przedstawiony w rozdziale 4.2.1, który odpowiada typowej konstrukcji nawierzchni podatnej na podbudowie z mieszanki niezwiązanej (typ A1) dla ruchu KR3, dobranej na podstawie katalogu [78]. Trwałość zmęczeniową nawierzchni obliczono zgodnie z kryterium spękań zmęczeniowym warstw asfaltowych z dołu do góry MEPDG dla kryterium powierzchni spękanej pasa FC=20% (patrz rozdział 4.3.1). Trwałość rozpatrywanej nawierzchni wynosi $N_{f,20\%}=5,09 \cdot 10^6$ [osi standardowych 100 kN].

Liczba pojazdów ciężkich, jaka musi przejechać przez dany pas ruchu aby wywołać spękania zmęczeniowe na powierzchni równej FC=20% pasa ruchu wynosi $NT_{f,20\%}$ i może być obliczona na podstawie wzoru:

$$NT_{f,20\%}(UP) = \frac{N_{f,20\%}}{F_{UP}} \quad (5.17)$$

gdzie:

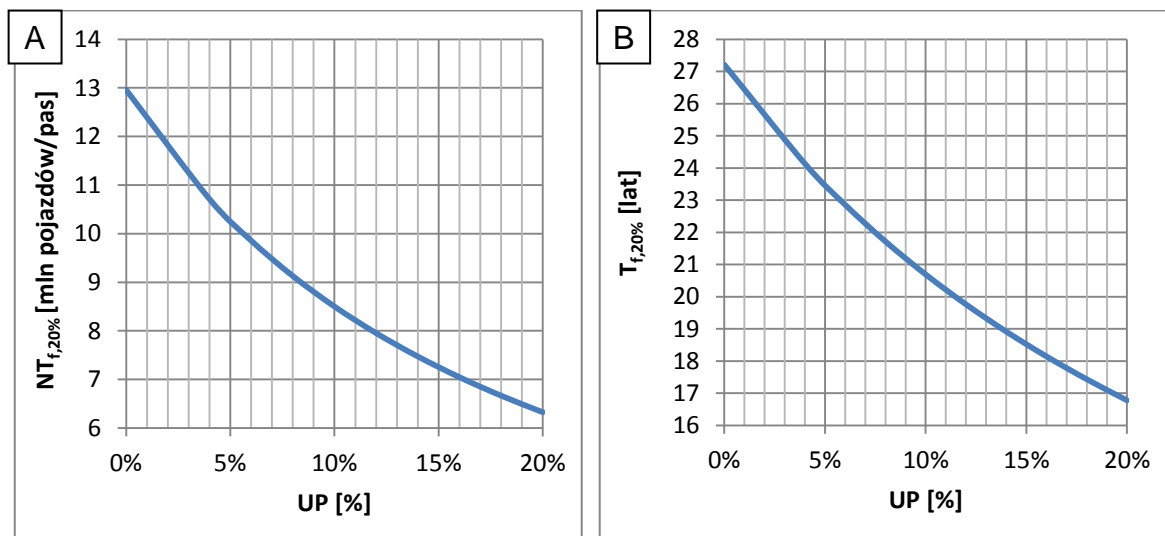
$NT_{f,20\%}$ – liczba pojazdów ciężkich, które wywołają spękania zmęczeniowe na FC=20% powierzchni pasa ruchu,

$N_{f,20\%}$ – trwałość zmęczeniowa nawierzchni ($N_{f,20\%} = 5,09 \cdot 10^6$ [osi standardowych 100 kN]),

F_{UP} – współczynnik równoważności obciążenia pojazdu przy udziale pojazdów przeciążonych w ruchu UP.

Na podstawie liczby pojazdów ciężkich $NT_{f,20\%}$ można obliczyć okres eksploatacji nawierzchni $T_{f,20\%}$ od oddania jej do ruchu do momentu wyczerpania trwałości zmęczeniowej N_f , czyli do pojawienia się spękań zmęczeniowych na powierzchni FC=20% pasa ruchu. Do przykładu obliczeniowego przyjęto dane otrzymane ze stacji DK79. Założono obciążenie ruchem w roku oddania nawierzchni do eksploatacji równe SDR=1489 pojazdów/dobę, co daje $2,7 \cdot 10^5$ pojazdów/pas/rok. Przyjęto, że ruch ciężki będzie w kolejnych latach rosł o stały procent $p = 4\%$. Współczynniki równoważności obciążenia pojazdu $F(UP)$ dobrano na podstawie

wyników obliczeń według metody 2 (rozdział 5.3.3). Wykresy zależności $NT_{f,20\%}(UP)$ oraz $T_{f,20\%}(UP)$ przedstawiono na rysunku 5.19. Z rysunku 5.19 a) można odczytać, że wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% spowoduje, że nawierzchnia przeniesie dwukrotnie mniej pojazdów do wystąpienia spękań zmęczeniowych na 20% powierzchni pasa ruchu. Na podstawie rysunku 5.19 b) można stwierdzić, że zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 20% do 10% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji o 4 lata, a dalsze zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 10% do 0% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni o kolejne 6 lat.



Rysunek 5.19 Trwałość zmęczeniowa nawierzchni do wystąpienia 20% powierzchni spękań na powierzchni pasa wyrażona poprzez a) sumaryczną liczbę pojazdów ciężkich b) okres eksploatacji nawierzchni

5.4. Podsumowanie

1. Zgodnie z przepisami, pojazd zostanie uznany za przeciążony, gdy masa całkowita pojazdu jest wyższa niż określona dla danego pojazdu lub przekroczone zostanie dopuszczalne obciążenie co najmniej jednej z jego osi składowych.
2. W polskich przepisach wyróżnia się trzy poziomy dopuszczalnego obciążenia osi: 80, 100 i 115 kN, przy czym wykaz dróg, na których mogą poruszać się pojazdy z obciążeniem osi do 100 kN lub do 115 kN ustalany jest na podstawie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [122], [123].
3. Dane z 11 stacji ważenia pojazdów w ruchu wskazują, że udział pojazdów przeciążonych na Polskich drogach wynosi od 14% na stacji DK11 do 23% na stacji DK7.

4. Zaobserwowano, że odsetek pojazdów przekraczających dopuszczalne obciążenie osi jest większy niż odsetek pojazdów przekraczających dopuszczalną masę całkowitą.
5. Duży wpływ na liczbę pojazdów przeciążonych ma nierównomierne załadowywanie pojazdów. Stwierdzono, że duża część pojazdów przeciążonych nie przekracza dopuszczalnej masy, podczas gdy przeciążona jest co najmniej jedna z osi pojazdu.
6. Najwyższy udział pojazdów przeciążonych, zaobserwowano dla kategorii pojazdów ciężarowych z przyczepą lub z naczepą C+P. Pojazdy tej kategorii najczęściej występują na drogach krajowych. W kategorii pojedynczych samochodów ciężarowych C pojazdy przeciążone występują rzadziej. Pojazdy przeciążone występują również w grupie autobusów.
7. Limit dopuszczalnego obciążenia osi 100 kN jest respektowany przez kierowców w znacznie mniejszym stopniu niż limit 115 kN na oś. Jest to wynikiem tego, że dany pojazd może poruszać się podczas jednej podróży po drogach o różnym dopuszczalnym obciążeniu osi.
8. Kontrola pojazdów pod kątem przeciążenia znacząco wpływa na zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych. Dowodem jest wysoki udział pojazdów przeciążonych w ruchu na stacjach A2 i S7 (bez ponownej kontroli i karania kierowców) i drodze krajowej DK 11 w miejscowości Byczyna, gdzie prowadzona jest stała kontrola Inspekcji Transportu Drogowego. Egzekwowanie przepisów w zakresie obciążenia pojazdów przyczyni się do zmniejszenia udziału pojazdów przeciążonych i wydłużenia trwałości dróg.
9. Udział pojazdów przeciążonych w szkodzie zmęczeniowej nawierzchni jest wysoki i wynosi od 35% na stacji DK11 do 70% na stacji DK7. Oznacza to, że pojazdy przeciążone w bardzo znaczącym stopniu przyczyniają się do powstawania uszkodzeń nawierzchni.
10. Stwierdzono, że średni współczynnik równoważności obciążenia pojazdu w danym potoku ruchu jest liniowo skorelowany z udziałem pojazdów przeciążonych. Wykazano, że na współczynnik równoważności obciążenia pojazdu wpływ ma również lokalna specyfika ruchu, opisana strukturą ruchu i rozkładem obciążenia osi pojazdów.
11. Wpływ pojazdów przeciążonych na trwałość zmęczeniową nawierzchni i na współczynniki równoważności obciążenia pojazdów określono poprzez przeprowadzenie analizy według dwóch metod. Pierwsza z metod polegała na określeniu modeli regresji liniowej pomiędzy udziałem pojazdów przeciążonych a średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu osobno dla każdej stacji pomiarowej. Druga metoda oparta była o model regresji liniowej pomiędzy parametrami opisującymi zastępczy rozkład obciążenia osi, udziałem pojazdów przeciążonych i średnim współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu.

12. Względny wzrost współczynnika równoważności obciążenia pojazdu na skutek wzrostu udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% wynosi średnio od 100% do 160%, w zależności od metody analizy.
13. Pojazdy przeciążone mają znaczący wpływ na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Wykazano, że wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% spowoduje średnio spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni o ok. 55%, przy czym w zależności od metody analizy i od stacji pomiarowej spadek ten może wynosić od 45% nawet do 75%. Wykazano również, że zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych na rozpatrywanych drogach z obecnego poziomu do poziomu 10% może skutkować wydłużeniem trwałości zmęczeniowej od 14% do 43%.
14. Przeprowadzono analizę wpływu ruchu pojazdów przeciążonych na okres eksploatacji przykładowej nawierzchni podatnej typu A1 KR3 według katalogu [78]. Wykazano w niej, że zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 20% do 10% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji o 4 lata, a dalsze zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 10% do 0% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni o kolejne 6 lat.

6. Wnioski końcowe

Wynikiem realizacji postawionych w pracy celi badawczych są następujące wnioski końcowe:

1. Dane ze stacji ważenia w ruchu (WIM) dostarczają pełnych informacji dotyczących ruchu i obciążenia pojazdów ciężkich. Analiza tych danych powinna być poprzedzona ich odpowiednią weryfikacją i sprawdzeniem pod względem poprawności.
2. Najliczniejszą grupę pojazdów w ruchu ciężkim w Polsce stanowią ciągniki siodłowe z naczepą typu Cs+N 113 i Cs+N 112, oraz dwuosiowe samochody ciężarowe bez przyczep typu C 11. Struktura ruchu ciężkiego na drogach w Polsce jest zbliżona do struktury ruchu w Niemczech, jednocześnie znacząco różni się od struktury ruchu w USA.
3. Obciążenia pojazdów i średnie współczynniki równoważności obciążenia pojazdów na poszczególnych stacjach pomiarowych różnią się od siebie. Wykazano, że na rozkład obciążenia osi pojazdów wpływa dopuszczalne obciążenie osi pojazdu obowiązujące na danej drodze. Istotny wpływ mają również inne czynniki charakteryzujące ruch ciężki takie jak udział pojazdów przeciążonych i struktura ruchu.
4. Rozkład obciążenia osi pojazdów zależy od typu osi (sterowna, napędowa, pojedyncza, podwójna itd.). Rozkłady obciążenia osi mogą mieć przebieg jednomodalny lub dwumodalny. Zastosowanie modelu rozkładu złożonego z dwóch rozkładów normalnych daje wystarczającą dokładność do opisu rozkładów obciążenia wszystkich typów osi pojazdów.
5. Z porównania średnich współczynników równoważności obciążenia pojazdów otrzymanych dla polskich stacji ważenia pojazdów w ruchu (WIM) z odpowiadającymi im współczynnikami określonymi w wybranych krajach europejskich wynika, że obciążenie pojazdów na drogach w Polsce, Austrii, Niemczech i Wielkiej Brytanii jest zbliżone, natomiast we Francji jest wyższe. Przyczyną jest większe dopuszczalne obciążenie osi pojazdów we Francji.
6. Na wartość współczynników równoważności wpływa grubość konstrukcji nawierzchni. Z metody AAHSTO (ang. „*American Association of State Highway and Transportation Officials*”) wynika, że na nawierzchni cieńszej wartości współczynników równoważności są wyższe czyli nawierzchnie cieńsze są bardziej wrażliwe na oddziaływanie ruchu ciężkiego. Taką samą zależność stwierdzono w przypadku wyników obliczeń według metody Politechniki Gdańskiej dla kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych, ale w przypadku zastosowania kryterium deformacji podłoża zależność ta jest odwrotna.
7. Metody określania oddziaływania pojazdów na nawierzchnie półsztywne nie są jeszcze dobrze poznane i dają rozbieżne wyniki. Wątpliwa jest poprawność stosowania metody francuskiej do obliczania współczynników

równoważności obciążenia pojazdów dla nawierzchni półsztywnych w warunkach polskich.

8. Największy udział w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni, czyli największą agresywność względną, stwierdzono w przypadku pojazdów typu Cs+N 113. Pojazdy te w największym stopniu powodują degradację nawierzchni a ich agresywność względną wynosi od 58% do 84%.
9. Ruch ciężki ulega wahaniom w ciągu doby, tygodnia i roku. Zmianom ulega średni dobowy ruch pojazdów oraz obciążenie nawierzchni wyrażone poprzez średnią dobową liczbę równoważnych osi standardowych.
10. Przeprowadzono analizę trzech metod mechanistyczno-empirycznych obliczania szkody zmęczeniowej wywołanej obciążeniami osiami wielokrotnych: RTAC (ang. „*Road and Transportation Association of Canada*”), „pików” oraz MEPDG (ang. „*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*”). Wskazano, że najwłaściwszą metodą do obliczania szkody zmęczeniowej nawierzchni jest metoda pików i podano teoretyczne uzasadnienie dokonanego wyboru metody. Niemniej jednak problem oddziaływania osi wielokrotnych na nawierzchnie nie jest rozwiązany i wymaga dalszych badań.
11. Współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone ze wzoru czwartej potęgi, metody AASHTO oraz z metody francuskiej są niedoszacowanie w porównaniu do współczynników równoważności obciążenia osi określonych z mechanistyczno-empirycznej analizy konstrukcji nawierzchni oraz określonych z metody Politechniki Gdańskiej.
12. Na podstawie danych z ważenia pojazdów w ruchu i analizy mechanistyczno-empirycznej konstrukcji nawierzchni podatnej wykazano, że współczynniki równoważności obciążenia osi podwójnych napędowych i osi potrójnych są najwyższe. Wykazano, że na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 115 kN średnie współczynniki równoważności obciążenia osi są wyższe niż na drogach o dopuszczalnym obciążeniu osi 100 kN.
13. Wykazano, że zjawisko przeciążania pojazdów jest ważnym problemem w Polsce. Udział pojazdów przeciążonych na rozpatrywanych w pracy drogach wynosi od 14% na stacji DK11 w Byczynie do 23% na stacji DK7 w Antolce i Miechowie. Jednocześnie udział pojazdów przeciążonych w całkowitej szkodzie zmęczeniowej nawierzchni jest znaczny i wynosi odpowiednio od 35% do 70%.
14. Kontrola pojazdów pod kątem przeciążenia znacząco wpływa na zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych w ruchu, czego dowodem jest najniższy udział pojazdów przeciążonych na stacji DK11 w Byczynie, na której prowadzona jest stała kontrola Inspekcji Transportu Drogowego.
15. Pojazdy przeciążone istotnie wpływają na trwałość zmęczeniową nawierzchni. Na podstawie modeli statystycznych wykazano, że wzrost udziału pojazdów przeciążonych z 0% do 20% spowoduje spadek trwałości zmęczeniowej nawierzchni średnio o połowę.

16. W obliczeniach trwałości zmęczeniowej przeprowadzonych dla przykładowej nawierzchni podatnej o grubości warstw asfaltowych 16 cm wykazano, że zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 20% do 10% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji o 4 lata, a dalsze zmniejszenie udziału pojazdów przeciążonych z 10% do 0% spowoduje wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni o kolejne 6 lat.

Na podstawie przedstawionych wniosków końcowych z pracy wytyczono następujące kierunki dalszych prac:

1. Badania nad oddziaływaniem osi podwójnych i potrójnych w oparciu o mechanikę pracy konstrukcji nawierzchni w celu uściślenia wpływu tych osi na powstawanie uszkodzeń nawierzchni.
2. Rozszerzenie i uzupełnienie badań nad oddziaływaniem pojazdów na warstwy związane spoiwem hydraulicznym w nawierzchniach półsztywnych w celu uzupełnienia praktycznej wiedzy dotyczącej trwałości tych nawierzchni.
3. Uzupełnienie danych pomiarowych o kolejne stacje ważenia pojazdów w ruchu i rozwinięcie modelu do analizy wpływu ruchu pojazdów przeciążonych na trwałość nawierzchni.
4. Powiązanie wyników badań obciążenia nawierzchni pojazdami i badań terenowych stanu nawierzchni z wynikami laboratoryjnych badań trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych.

Literatura

- [1] *A guide to the use of long-life semi-rigid pavements*. ELLPAG phase 2, FEHRL Report 2009/01, Bruksela, 2009.
- [2] *AASHTO guide for design of pavement structures 1993*. AASHTO, Waszyngton 1993.
- [3] Al-Quadi I.L., Janajreh I., Freeman T.E.: *Pavement response to dual tires and new wide-base tires at same tire pressure*. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board 1806, s 38-47. 2005.
- [4] Al-Qadi I.L., Yoo P.J., Elseifi M.A.: *Effects of tire configurations on pavement damage*. AAPT 74, 2005.
- [5] Ambassa Z., Allou F., Petit C., Eko R.M.: *Fatigue life prediction of an asphalt pavement subjected to multiple axle loadings with viscoelastic FEM*. Construction and Building Materials 43 s. 443-452, 2013.
- [6] American Society for Testing and Materials ASTM: *Standard specifications for highway weigh-in-motion (WIM) systems with user requirements and test method*. ASTM Designation E 1318-09, 1994.
- [7] Arteaga I.L., Steen R.: *Prediction of tyre/road contact stress distributions*. Raport nr DCT 2007.106, TU Eindhoven, Holandia, 2007.
- [8] ASTM: *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis ASTM-E 1049-85*, American Society for Testing and Materials, USA, 2005.
- [9] Atkinson V. M., Merrill D., Thom N.: *Pavement wear factors*. TRL Published Project Report PPR 066, Wielka Brytania, 2006.
- [10] Barbour, I.: *Multiple-sensor weigh-in-motion trials at Abingdon (A34)*. TRL Report RR375, 1993.
- [11] Bayat A., Knight M. A., Hamid R. Soleymani H.R.: *Field monitoring and comparison of thermal- and load-induced strains in asphalt pavement*. International Journal of Pavement Engineering, 13:6, s. 508-514, 2011.
- [12] Blab R., Litzka J.: *Measurements of the lateral distribution of heavy vehicles and its effects on the design of road pavements*. Road transport technology – 4, Proceedings of the Fourth International Symposium on Heavy Vehicles Weight and Dimensions, s.389-395, Ann Arbor, USA, 1995.
- [13] Blab R.: *Die Fahrspurverteilung als Einflussgröße bei der Bemessung des Straßenoberbaus*. Praca doktorska, Uniwersytet Techniczny w Wiedniu, 1995.
- [14] Burnos P.: *Autokalibracja systemów ważących pojazdy samochodowe w ruchu oraz analiza i korelacja wpływu temperatury na wyniki ważenia*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2009.
- [15] Burnos P.: *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 2: Rodzaje i charakterystyka systemów Weigh in Motion*. Drogownictwo nr 7-8/2014, 2014.

- [16] Burnos P.: *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 3: Czujniki nacisku stosowane w systemach Weigh in Motion (WIM)*. Drogownictwo nr 9/2014, 2014.
- [17] Burnos P.: *Ważenie pojazdów samochodowych w ruchu. Część 4: Ocena dokładności systemów Weigh in Motion (WIM)*. Drogownictwo nr 12/2014, 2014.
- [18] *Catalogue des structures types de chaussées neuves*. LCPC, SETRA, Francja 1998.
- [19] Cebon D.: *Hanbook of vehicle - road interaction*. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, 1999.
- [20] Cebon D.: Winkler Ch.: *A study of road damage due to dynamic wheel loads using a load measuring mat*. Raport techniczny nr UMTRI-90-13, 1990.
- [21] Ceylan H., Coree B., Gopalakrishnan K.: *Evaluation of the mechanistic-empirical pavement design guide for implementation in Iowa*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, vol. 4, s.5-12, 2009.
- [22] Chadbourn B. A., Newcomb D. E.: *Measured and theoretical comparisons of traffic loads and pavement response distributions*. 8th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements – Proceedings, s. 229-238, 1997.
- [23] Chatti K. et al.: *Effects of Michigan multi-axles trucks on pavement distress*. Final report, Michigan State University, 2009.
- [24] Chatti, K., D. Lee., T. Kim.: *Truck damage factors using dissipated energy vs. peak strains*. 6th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. s. 175-184, Saakatoon, Kanada, 2000.
- [25] Christison J.T.: *Vehicle weights and dimension study. Volume - Pavement response to heavy vehicle test program. Part 2 - Load equivalency factors*. Roads and Transportation Association of Canada, Ottawa, Canada, 1986.
- [26] Corte J.F. i wsp.: *Conception et dimensionnement des structures de chaussee*. LCPC, Francja, 1994.
- [27] *COST 323 Weight in motion of road vehicles*. Final Report, appendix 1 European WIM Specification, 1999.
- [28] *COST 334 Effects of Wide Single Tires and Dual Tires*. Final Report, 2001.
- [29] Costanzi M., Rouillard V., Cebon D.: *Effects of tyre contact pressure distribution on the deformation rates of pavements*. 19-th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics, Vol. 44, s.892-903, Park, USA, 2006.
- [30] De Beer M.: *Stress in Motion (SIM) a new tool for road infrastructure protection*. 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology HVTT10 - Proceedings, Francja, 2009.
- [31] De Beer M., Fisher C., Jooste F.J.: *Determination of pneumatic tire/pavement interface contact stresses under moving loads and some effects on pavement with thin asphalt surfacing layers*. 8th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - Proceedings, s. 179-227, Seattle, USA, 1997.

- [32] De Beer M., Sadzik E., Fisher C., Coetzee C.H.: *Tyre-pavement contact stress patterns from the test tyres of the gautrans heavy vehicle simulator (HVS) MK IV+*. SATC 2005: 24th Annual Southern African Transport Conference and Exhibition - Proceedings, s.1-19, Pretoria, RPA, 2005.
- [33] Deacon J. A.: *Load equivalency in flexible pavements*. AAPT, Vol 38, 465-494, 1969.
- [34] Design manual for roads and bridges, Volume 7, *Pavement design and maintenance, Section 2, Part 1 Traffic assessment*. Highways Agency, Wielka Brytania, 2006. Dostępny w Internecie: www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/vol7
- [35] Douglas R.A.: *Tyre/road contact stresses measured and modelled in three coordinate directions*. New Zeland Transport Agency. Nowa Zelandia, 2009.
- [36] Doupal E., Calderara R.: *Combined LS & HS WIM system for law enforcement and toll road applications*. Proceedings of the 10th International Conference on Heavy Vehicle, Francja, 2008.
- [37] *Dynamic Interaction between vehicles and infrastructure experiment (DIVINE project)*. Raport techniczny nr DSTI/DOT/RTR/IR6(98)1/FINAL, OECD, Paryż 1998.
- [38] Dyrektywa Rady 96/53/WE z dnia 25 lipca 1996 r. ustanawiająca dla niektórych pojazdów drogowych poruszających się na terytorium Wspólnoty maksymalne dopuszczalne wymiary w ruchu krajowym i międzynarodowym oraz maksymalne dopuszczalne obciążenia w ruchu międzynarodowym. Dz.U. L 235 z 17.9.1996, str. 59).
- [39] El-Badawy S., Bayomy F., Fugit S.: *Traffic characteristics and their impact on pavement performance for the implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide in Idaho*. International Journal of Pavement Research and Technology 5(6) s.386-394, 2012.
- [40] El-Kholy S.A., Galal S.A.: *A study on the effects of non-uniform tyre inflation pressure distribution on rigid pavement responses*. International Journal of Pavement Engineering 13:3, s. 244-258, 2012.
- [41] Federal Highway Administration (FHWA). *WIM scale calibration a vital activity for LTPP sites*. Publikacja nr FHWA-RD-98-104, McLean, USA, 1998.
- [42] Fekpe E., Clayton A.: *Prediction of heavy-vehicle weight distributions*. Journal of Transportation Engineering, 121(2), 158–1681 1995.
- [43] Gillespie T.D., Karamihis S.M., Sayers M., Nasim M. A., Hansen W., Ehsan N., Cebon D.: *Effects of heavy vehicles characteristic on pavement response and performance*. Final Report, The University of Michigan, NCHRP, 1992.
- [44] Gillmann R.: *Axle spacing and load equivalency factors*, TRR 1655, s. 227-232, 1999.
- [45] Glover M, H., Newton W, H.: *Evaluation of a multiple-sensor weigh-in-motion system*. TRL Report RR307, 1991
- [46] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report, Part 2 – Design Inputs, Chapter 4, Traffic, NCHRP, TRB, NRC, March 2004 r.

- [47] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. Final Report, Part 3 – Design Analysis, Chapter 3, Design of new an reconstructed flexible pavements, NCHRP, TRB, NRC, March 2004 r.
- [48] Haider, S., Harichandran, R.: *Relating axle load spectra to truck gross vehicle weights and volumes*. Journal of Transportation Engineering, 133(12), 696–705. ASCE, 2007.
- [49] Haider, S., Harichandran, R.: *Effect of axle load spectrum characteristics on flexible pavement performance*. Transportation Research Record 2095, 101-114. TRB, Waszyngton, 2009.
- [50] Haider, S. W., Harichandran, R. S., Dwaikat, M. B.: *The effect of axle load measurement errors on pavement performance and design reliabilities*. Transportation Research Record, 2160, 107–117. TRB, 2010.
- [51] Haider, S. W., Harichandran, R. S., Dwaikat, M. B.: *Closed-form solutions for bimodal axle load spectra and relative pavement damage estimation*. Journal of Transportation Engineering, 135(12), 974–983. ASCE, 2009.
- [52] Haider, S. W., Harichandran, R. S., Dwaikat, M. B.: *Impact of systematic axle load measurement error on pavement design using mechanistic-empirical pavement design guide*. Journal of Transportation Engineering, 138, 381–386. ASCE, 2012.
- [53] Hajek J. J., Agarwal A. C.: *Axle group spacing, influence on infrastructure damage*. 2nd International Symposium on Heavy Weights and Dimensions - Proceedings, Transportation Association of Canada, Kelowna, 1989.
- [54] Hensen R. W., Bertrand C., Marshek K. M., Hudson W.R.: *Truck tire pavement contact pressure distribution characteristics for super single 18-22.5 and smooth 11R22.5 tires*. FHWA, Austin, USA, 1989.
- [55] Heukelom W., Klomp A. J. G.: *Consideration of calculated strains at various depth in connection with the stability of asphalt pavements*. Proceedings of 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, s 155-168, 1967.
- [56] Himeno K., Takuya I.: *Distribution of tire contact preassure of vehicles and its influence on pavement damage*. 8th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - Proceedings, s. 129-139, Seattle, USA, 1997.
- [57] Homsy F, Bodin D., Yotte S., Breysse D., Balay J.M.: *Multiple axle loadings*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 15:5, 743-758, 2011.
- [58] Homsy F, Bodin D., Yotte S., Breysse D., Balay J.M.: *Fatigue life modeling of asphalt pavements under multiple-axle loadings*. Road Materials and Pavement Design, 13:4, 749-768, 2012.
- [59] Huang Y.: *Pavement analysis and design*. Uniwersytet Kentucky, Personal Education Inc., II wydanie, 2004.
- [60] Hudson, S. W., Anderson, V. L., Irick, P. E., Carmichael III, R. F., and McCullough, B. F.: *Impact of truck characteristics on pavements: truck load equivalency factors*. Final Report, 1992/07, s. 9201–9207, FHWA, 1992.

- [61] Huhtala M., Pihlajamä J.: New concepts on load equivalency measurements, Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements, s. 194-208, 1992
- [62] Hutchinson B.G.: Haas R.C.G, Meyer P., Hadipour K., Papagiannakis T.: *Equivalences of different axle load groups*. Proceedings of the 2nd North American Pavement Management Conference, Toronto, Kanada, 1985.
- [63] Ioannides A.M.: Khazanovich L.: *Load equivalency concepts: a mechanistic reappraisal*, TRR 1338, 42-51, 1993.
- [64] Irick, P. E.: *Characteristics of load equivalence relationships associated with pavement distress and performance*. Austin Research Engineers, Austin, USA 1989.
- [65] Jacob B., Labry D.: *Evaluation of the effects of heavy vehicles on bridges fatigue*. Proceedings of the 7th International Symposium on Heavy Vehicles Weights and Dimensions, Delft, Holandia, 2002.
- [66] Jacob B., Loo H.: *Weight in motion for enforcement in Europe*. Proceedings of the 10th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology, Francja, 2008.
- [67] Jacob B., O'Brien E.J. Jehaes S.: *COST 323 Weight in motion of road vehicles*. Final Report of COST 323 Action, LCPC, Paris, 2002.
- [68] Jacob B. i wsp.: *Weigh-in-motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE)*. General Report, LCPC, 2001.
- [69] Jessup E. L.: *An economic analysis of trucker's incentive to overload as affected by the judicial system*. Research in Transportation Economic, vol. 4, s. 131–159, 1996.
- [70] Jordahl P.R. Rauhut J.B.: Flexible Pavement Model VESYS IV-B, FHWA, USA, 1983.
- [71] Judycki J.: *Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004*. Drogi i Mosty nr 4/2011, s. 31-53, 2011.
- [72] Judycki J.: *Determination of axle load equivalency factors on the basis of fatigue criteria for flexible and semi-rigid pavements*. Journal of Road Materials and Pavement Design, vol. 11, nr 1/2010, s.187-202, 2010.
- [73] Judycki J.: *Fatigue of asphalt mixes*. Uniwersytet w Oulu, Finlandia, 1991.
- [74] Judycki J.: *Podstawy określania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni drogowych*. Drogi i Mosty 2/2006, s. 37-74, 2006.
- [75] Judycki J.: *Przepisy dotyczące dopuszczalnych wymiarów i ciężarów samochodów ciężarowych w Unii Europejskiej i w Polsce*. Drogownictwo 6/2003, 2003.
- [76] Judycki J.: Jaskuła P. *Przyczyny i kierunki weryfikacji konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Drogownictwo 6/2011, s. 183–188, 2011.
- [77] Judycki J. Jaskuła P, Przczoła M., Jaczewski M., Ryś D., Alenowicz J., Dołycki B., Stienss M.: *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. WKŁ, Warszawa, 2014.

- [78] Judycki J., Jaskuła P, Przczola M., Jaczewski M., Ryś D., Alenowicz J., Dołycki B., Stienss M.: *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. GDDKiA, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2013.
- [79] Judycki J., Jaskuła P, Przczola M., Jaczewski M., Ryś D., Alenowicz J., Dołycki B., Stienss M.: *Opracowanie nowego katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Konferencja w Krynicy, 2014.
- [80] Judycki J. Grajewska A., Wróbel M.: *Opracowanie zaleceń do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych, Etap II*. Politechnika Gdańska, GDDKiA, Gdańsk, 2006. Dostępny w Internecie: www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-zrealizow_3435//documents/gddkia-wrzesie2006.pdf
- [81] Judycki J., Michalska P., Grajewska A., Urbański P., Antoniewicz Ł.: *Opracowanie zaleceń do obliczania współczynników równoważności obciążenia osi do projektowania nawierzchni podatnych i półsztywnych, Etap I, Części 1,2,3*. Politechnika Gdańska, GDDKiA, Gdańsk, 2005.
- [82] Judycki J., Urbański P., Gajewski D.: *Analiza agresywności ciężkich pojazdów dopuszczonych do ruchu w Unii Europejskiej na polskie nawierzchnie drogowe*. Politechnika Gdańska, GDDKiA, Gdańsk, 2003.
- [83] Judycki J., Urbański P.: *Ciśnienie opon samochodów ciężarowych w projektowaniu nawierzchni*. Drogownictwo 9/2007, s. 281-286, 2007.
- [84] Kawa I., Zhang Z., Hudson W. R.: *Evaluation of the AASHTO 18-kip load equivalency concept*. Technical report, FHWA/TX-05/0-1713-1, FHWA 1998.
- [85] Kim D., Salgado R., Altschaeffl A.G.: *Effects of supersingle tire loadings on pavements*. Journal of Transportation Engineering, 2005.131:732-743. 2005.
- [86] Kim J. R., Titus-Glover L., Darter M. I., Kumapley R.K.: *Axle load distribution characterization for mechanistic pavement design*. Transportation Research Record 1629, 13-19. TRB, Waszyngton, 1998.
- [87] Kim R. Y.: *Modeling of Asphalt Concrete*. ASCE, 2009.
- [88] Koniditsiotis C.: *Weight in motion technology*. Austroroads, Sydney, 2000.
- [89] Lewinowski C.: *Zasady wymiarowania podatnych nawierzchni drogowych*. PWN Warszawa, 1980.
- [90] Li J., Pierce L.M., Hallenbeck M.E., Uhlmeyer J.: *Sensitivity of axle load spectra in the mechanistic-empirical pavement design guide for Washington State*. Transportation Research Record 2093, s. 50-56. TRB, Waszyngton, 2009.
- [91] Luo R., Prozzi J.A.: *Strain distribution in the asphalt layer under measured 3D tire-pavement contact stresses*. Road Materials and Pavement Design, 8:1, s. 61-86, 2007.
- [92] Maina J.W., Ozawa Y., Matsui K.: *Linear elastic analysis of pavement structure under non-circular loading*. Road Materials and Pavement Design, 13:3, s. 403-421, 2012.

- [93] Marchadour Y., Jacob B.: *Development and implementation of WIM network for enforcement in France*. Proceedings of International Conference on Heavy Vehicles, Londyn, 2008.
- [94] McCall B., Vodrazka W. C.: *States' successful practices weight in motion handbook*. FHWA, CTRE, Ames, USA, 1997.
- [95] Mechowski T., Harasim P.: *Aktualizacja wartości współczynników przeliczeniowych na osie 100 kN i 115 kN na podstawie analizy aktualnej wielkości i struktury ruchu drogowego. Sprawozdanie z realizacji pracy TD-73*. IBDiM, GDDKiA, Warszawa 2006.
- [96] Misaghi S., Nazarian S., Carrasco C. J.: *Impact of truck suspension and road roughness on loads exerted to pavements*. The University of Texas, FHWA, El Paso, USA, 2010.
- [97] Mohammadi J., Shah N.: *Statistical evaluation of truck overloads*. Journal of Transportation Engineering, 118, 651-665. ASCE, 1992.
- [98] Mulyono A.T., Antameng M.: *Analysis of loss cost of road pavement distress due to overloading freight transportation*. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.8, 2010.
- [99] Nagórski R.: *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie*. PWN, Warszawa 2014.
- [100] Narciso P., Sundo M., B.: *The impact of overloading on pavement life as influenced by the enforcement*. Symposium on Infrastructure Development and the Environment, Filipiny, 2006.
- [101] NF P 98-082, *Dimensionnement des chaussées routières détermination*. Francja 1994.
- [102] Olinger E. i wsp.: *Katalog typowych konstrukcji jezdni podatnych*. Wydanie II, IBDiM, Warszawa 1983.
- [103] Opoczyński K.: *Generalny pomiar ruchu 2010*, Transprojekt Warszawa, GDDKiA, Warszawa 2010. Dostępny w Internecie: www.gddkia.gov.pl/pl/987/gpr-2010
- [104] Pachowski J.: *Metoda wymiarowania konstrukcji nawierzchni podatnych na podstawie modułów sprężystości podłoża gruntowego i materiałów drogowych*. Prace Centralnego Ośrodka Badań i Rozwoju Techniki Drogowej Nr 3/1968. WKŁ, Warszawa 1968.
- [105] Pais J.C., Amorim S.I.R., Minhoto M.J.C.: *Impact of traffic overload on road pavement performance*. Journal of transportation Engineering, 139(9), 873-879. ASCE, 2013.
- [106] *Pavement analysis and design software (PADS) based on the south African mechanistic-empirical design method*. Council of Scientific and Industrial Research CSIR, RPA, 2001.
- [107] Park D.W., Martin A.E., Jeong J.H., Lee S.T.: *Effects of tire infiltration pressure and load on predicted pavement strains*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 3(4) s. 181 – 186, 2008.

- [108] Park D.W., Martin A.E., Masad E.: *Effects of nonuniform tire contact stresses on pavement response*. Journal of Transportation Engineering, 2005.131 s. 873 - 879, 2005.
- [109] Perret J., Dumont A.G.: *Strain and stress distributions in flexible pavements under moving loads*. Road Materials and Pavement Design, 5:sup1, s. 203-225, 2004.
- [110] Prochowski L., Żuchowski A.: *Samochody ciężarowe i autobusy*. WKiŁ, Warszawa, 2011.
- [111] Prozzi J. A., de Beer M.: *Mechanistic determination of equivalent damage factors for multiple load and axle configurations*. Proceedings of the 8th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements, s. 161-178, Seattle, USA, 1997.
- [112] Prozzi J.A., Luo R.: *Quantification of the joint effect of wheel load and tire inflation pressure on pavement response*. Journal of the Transportation Research Board 1919.1 s. 134-141., TRR, 2005.
- [113] Prozzi J.A., Hong F.: *Effect of weight-in-motion system measurement errors on load-pavement impact estimation*. Journal of Transportation Engineering, 133(1), 1–10. ASCE, 2007.
- [114] Quinley R.: *WIM Data Analyst's Manual*, FHWA, 2010.
- [115] Radzikowski M., Foryś G., Frączyk K.: *Raport o stanie technicznym sieci dróg krajowych na koniec 2012 roku.*, GDDKiA, Warszawa, 2013.
- [116] *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RSTO 86*. FGSV, Kolonia, Niemcy, 1986, wydanie 1989.
- [117] *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RSTO 01*. FGSV, Kolonia, Niemcy, 2001.
- [118] *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RSTO 12*. FGSV, Kolonia, Niemcy, 2012.
- [119] Rolla S.: *Projektowanie nawierzchni*. WKŁ, Warszawa, 1979.
- [120] Rooke A. i wsp.: *Project REMOVE*. Final Report, 2006.
- [121] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia*.
- [122] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 lipca 2010 r. w sprawie wykazu dróg krajowych, po których mogą poruszać się pojazdy o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi napędowej do 11,5 t*.
- [123] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 14 lipca 2010 r. w sprawie wykazu dróg krajowych oraz dróg wojewódzkich, po których mogą poruszać się pojazdy o dopuszczalnym nacisku pojedynczej osi do 10 t*.
- [124] *RVS 03.08.63 Oberbaubemessung*. FSV, Austria, 2008.
- [125] Ryś D.: *Pojazdy przeciążone na polskich drogach*. Drogownictwo 12/2012, s. 400-404, 2012.
- [126] Ryś D.: *Porównanie metod wyznaczania ruchu obliczeniowego do projektowania nawierzchni drogowych w wybranych krajach europejskich*. Drogownictwo 3/2012, s. 89-94, 2012.

- [127] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: *Aktualizacja współczynników równoważności pojazdów ciężarowych i autobusów*. Drogownictwo 7-8/2011, s. 245–249, 2011.
- [128] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: *Analiza rocznych zmian w ruchu ciężkim na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów (WIM) w Polsce*. Drogownictwo 11/2014, s. 361–367, 2014.
- [129] Ryś D., Judycki J., Jaskuła P.: *Analysis of effect of overloaded vehicles on fatigue life of flexible pavements based on weigh in motion (WIM) data*. International Journal of Pavement Engineering (przyjęty do druku), 2015.
- [130] Sadeghi J. M., Fathli M.: *Deterioration analysis of flexible pavements under overweight vehicles*. Journal of Transportation Engineering, 133, s. 625-633. ASCE, 2007.
- [131] Salama H. K., Chatti K., Lyles R. W.: *Effect of heavy multiple axle trucks on flexible pavement damage using in-service pavement performance data*. Journal of Transportation Engineering 132, s. 763-770 ASCE, 2006.
- [132] Salama H. K., Haider W.S, Chatti K.: *Evaluation of the mechanistic-empirical pavement design guide rutting models for multiple axle loads*. Journal of the Transportation Research Board 2005.1, s. 112-123, TRR, 2005.
- [133] Scala, A. J., W. J. Cogill, A. McNeil.: *Comparison of the response of pavements to single and tandem axle loads*. Proceedings of the 5th ARRB Conference (5A), s. 231-252, Sydney, Australia, 1970.
- [134] Scott J., Ferrara G.P.: *Index for estimating road vulnerability to damage from overweight vehicles*. Transportation Research Record 2235, 1-8. TRB, 2011.
- [135] Sebaaly, P. E., Tabatabaee, N.: *Effect of tire parameters on pavement damage and load-equivalency factors*. Journal of Transportation Engineering, 1992/11. 118(6), 1992.
- [136] Shell Bitumen Buisnes Group: *Bisar 3.0 user manual*, Shell, 1998.
- [137] Shi X.M., Cai C. S.: *Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3D interaction model*. Journal of Transportation Engineering, s. 135:736-744, ASCE, 2009.
- [138] Smith B.C., Diefenderfer B. K.: *Analysis of Virginia-specific traffic data inputs for use with the mechanistic-empirical pavement design guide*. Final report, VTRC 10-R19, Virginia, USA, 2010.
- [139] Southgate H.F., *An analytical investigation of ASHTO load equivalences*. Research report KTC-93-1, Kentucky Transportation Center, USA, 1993.
- [140] Southgate H.F., Deen R.C.: *Effects of load distribution and axle and tire configurations on pavement fatigue*. Proceedings of the 6th International Conference Structural Design of Asphalt Pavements. s. 83-93, USA, 1987.
- [141] Stephens J., Carson J., Hult D.A., Bisom D.: *Preservation of infrastructure by using weight-in-motion coordinated weight enforcement*. Transportation Research Record 1855, 143-150. TRB, 2003.
- [142] Sybilski D. i wsp.: *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. GDDP, IBDiM, Warszawa, 1997.

- [143] Sybilski D. i wsp.: *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*. GDDKiA, IBDiM, Warszawa, 2001.
- [144] Sybilski D., Nita P., Szydło A.: *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych*. GDDKiA, IBDiM, Warszawa, 2001.
- [145] Sybilski D. i wsp.: *Katalog przebudów i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*. GDDKiA, IBDiM, Warszawa, 2013. Dostępny w Internecie: www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/p/prace-naukowo-badawcze-w-trakcie_3434/KPRNPP%20i%20Zalaczniki%202013.pdf
- [146] Sweatman, P.F: *A Study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles*. Australian Road Research Board, Australia 1983.
- [147] Szpinek S.: *Nacisk osi 115 kN – prawda i mistyfikacja*. Magazyn Autostrady 1-2/2006, 2006.
- [148] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R., Krawczyk B.: *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych*. GDDKiA, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2013.
- [149] Szydło A. Kamiński L.: *Drogi – projektowanie i budowa*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1981.
- [150] Szydło A. Kukielka J.: *Projektowanie i budowa dróg. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1986.
- [151] Szydło A., Wardęga R.: *Porównanie współczynników agresywności pojazdów w Polsce i Unii Europejskiej*. Drogownictwo 5/2003, 2003.
- [152] Szydło A., Wardęga R.: *Obciążenia osi pojazdów na wybranych drogach w Polsce*. XLIX Techniczne Dni Drogowe, Szczyrk, 2006.
- [153] Szydło A., Wardęga R.: *Obciążenie dróg*. Magazyn Autostrady 5/2007, 2007.
- [154] Szydło A., Wardęga R., Mackiewicz P., Kowalski K.J.: *Wykorzystanie wag HS-WIM na polskich drogach*. Drogownictwo 4/2007, 2007.
- [155] Tailor B., Bergan A., Lindgren N., Berthelot C., *The importance of commercial vehicle weight enforcement in safety and road asset management*. Traffic Technology International, Annual Review, s. 234-237, 2000.
- [156] *The AASHO Road Test—Report 5, Pavement Research*. Special Report 61E. Washington, DC: Highway Research Board, USA, 1962.
- [157] *The Nordic Cooperative Research Project for the Application of the AASHO Road Test Results. Failure Models and Pavement Design and Rehabilitation System Developed and Adapted for Conditions Prevailing in the Nordic Countries, Volume I*. Proceedings of Fourth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, s. 903-919, 1977.
- [158] Tielking J.T., Roberts F.L.: *Tire Contact Pressure and its Effect on Pavement Strain*. Journal of Transportation Engineering, 1987.113 s. 56-71, 1987.
- [159] Timm, D., Tisdale, S., and Turochy, R.: *Axle Load Spectra Characterization by Mixed Distribution Modeling*. Journal of Transportation Engineering, 131(2), s. 83–88. ASCE, 2005.

- [160] Tran N.H., Hall K. D.: *Development and influence of statewide axle load spectra on flexible pavement performance*. Transportation Research Record 2037, 106-114. TRB, Waszyngton, 2008.
- [161] Turner D, Nicholson L A, Agent K.: *Oversize/overweight commercial vehicle safety*. Paper presented at the HVTT10 International Conference Heavy Vehicles, Paryż, 2008.
- [162] Turochy, R., Baker, S., and Timm, D.: *Spatial and Temporal Variations in Axle Load Spectra and Impacts on Pavement Design*. Journal of Transportation Engineering, 131(10), s. 802–808, ASCE, 2005.
- [163] Ustawa o drogach publicznych z dnia 21 marca 1985 r. Dz.U. 1985 Nr 14 poz. 60 (z późniejszymi nowelizacjami).
- [164] Wang H.: *Analysis of tire-pavement interaction and pavement responses using a decoupled modeling approach*. Rozprawa doktorska, Urbana, Illinois, USA, 2011.
- [165] Wang H., Al-Quadi I. L.: *Impact quantification of wide-base tire loading on secondary road flexible pavements*. Journal of Transportation Engineering, 2011.137, s. 630-639, ASCE 2011.
- [166] Wang Y., Hancher D.E., Mahboub K.: *Axle load distribution for mechanistic-empirical pavement design*. Journal of Transportation Engineering, 133(8), s. 469–479. ASCE, 2007.
- [167] Wang G., Roque R.: *Impact of wide-based tires on the near-surface pavement stress states based on three-dimensional tire-pavement interaction model*. Road Materials and Pavement Design, 12:3, s. 639-662, 2011.
- [168] Wardęga R.: *Pomiar obciążenia nawierzchni pojazdami w ruchu*. Drogownictwo 10/2005, 2005.
- [169] Wardęga R.: *Analiza nacisków osi pojazdów ciężarowych na nawierzchnie drogowe*. Drogownictwo 11/2010, 2010.
- [170] Wardęga R.: *Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych*. Praca doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
- [171] Wu S.S.: *Procedure to Estimate Loading From Weigh-in-Motion Data*. Transportation Research Record 1536, s. 19-24. TRB, Waszyngton, 1996.
- [172] Yoder E.J., Witczak M.W.: *Principles of pavement design*. John Wiley & Sons Inc., II wydanie, 1975.
- [173] Zarządzenie Ministra Komunikacji w sprawie projektowania drogowych nawierzchni podatnych z dnia 24 stycznia 1966 r.
- [174] Zhang Z., Kawa I., Hudson W.R.: *Impact of changing traffic characteristics and environmental conditions on performance of pavements*. Technical report, FHWA/TX-05/0-1713-2, FHWA, 2005.
- [175] Zhao Y., Tan Y., Zhou C.: *Determination of axle load spectra based on percentage of overloaded trucks for mechanistic-empirical pavement design*. Road Materials and Pavement Design, Vol. 13, nr 4, s. 850-863, 2012.

- [176] Zofka A., Urbaniak A., Maliszewski M., Bańskowski W., Sybilski D.: *Site specific traffic inputs for mechanistic-empirical pavement design guide in Poland*. Transportation Research Board, Annual Meeting, Waszyngton, 2014.
- [177] Zofka A., Josen R., Palikuatie M., Vaitkus A., Mechowski T., Maliszewski M.: *Elements of pavement management system: case study*. The Baltic Journal of Road and Bridges, vol. IX, nr 1, s. 1-9, 2014.
- [178] Zofka A., Lownes N.: *Applying transportation asset management in Connecticut*. The Connecticut Academy of Science and Engineering, 2008.

Strony internetowe

- [179] www.aashtoware.org/Pavement/Pages/default.aspx
- [180] www.cost.eu
- [181] www.conti-online.com/www/transport_pl_pl/misc/tech_info/apt_pl.html
- [182] www.fehrl.org
- [183] www.gddkia.gov.pl/pl/998/system-oceny-stanu-nawierzchni
- [184] www.gov.uk/government/statistical-data-sets/tra03-motor-vehicle-flow
- [185] www.ibdim.edu.pl/
- [186] www.iswim.free.fr
- [187] www.itspolska.pl
- [188] www.iveco.com
- [189] www.man.eu
- [190] www.michelin.pl
- [191] www.opitz-consult.de
- [192] www.preciseautomation.co.in
- [193] www.road-transport-technology.org
- [194] www.scania.com
- [195] www.us.mt.com

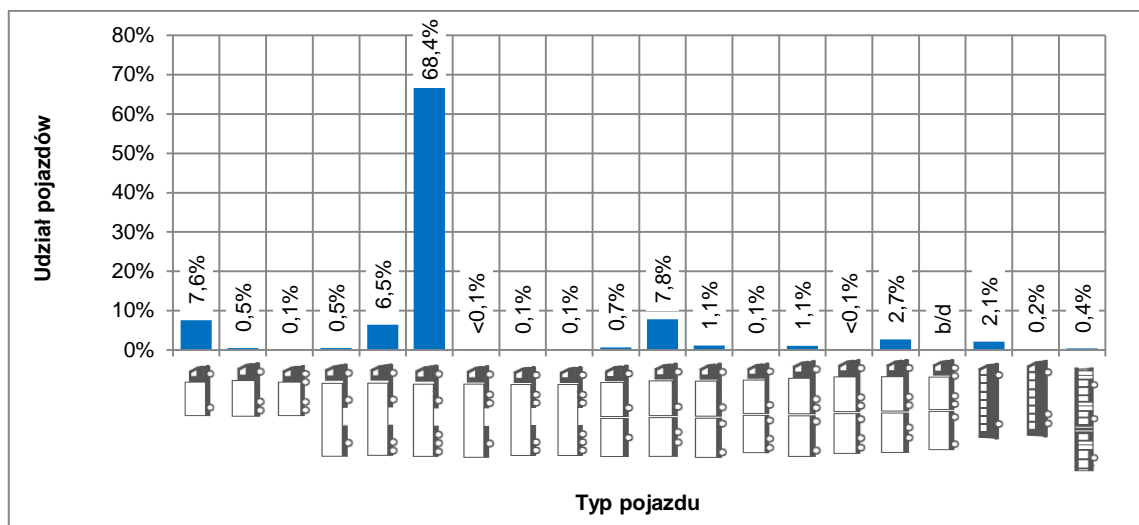
ZAŁĄCZNIK

Spis załączników

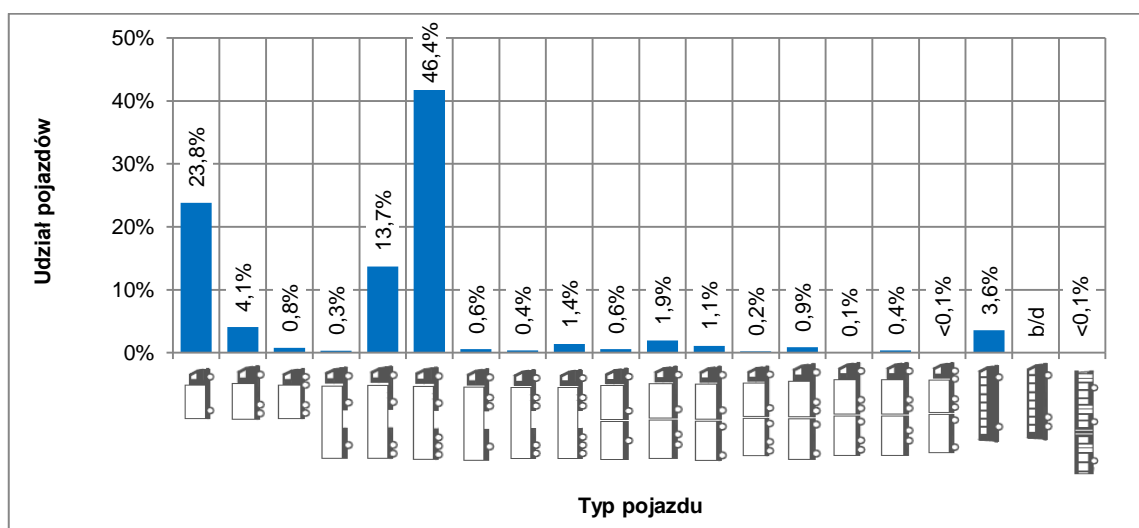
A.	Załącznik do rozdziału 3.....	3
A.1.	Struktura ruchu ciężkiego	3
A.2.	Średnie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone według wzoru czwartej potęgi	7
A.3.	Agresywność względna pojazdów ciężkich.....	11
A.4.	Rozkłady dyskretne masy całkowitej pojazdów	15
A.4.1.	Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C – samochody ciężarowe bez przyczep.....	15
A.4.2.	Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P – samochody ciężarowe z przyczepą i ciągniki siodłowe z naczepą.....	19
A.4.3.	Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A – autobusy	23
A.5.	Rozkłady dyskretne i modele obciążenia osi pojazdów	27
A.5.1.	Wykresy rozkładów obciążenia osi na przykładzie stacji DK46 Grodziec.....	27
A.5.2.	Zestawienie parametrów modeli rozkładów obciążenia osi.....	30
B.	Załącznik do rozdziału 5.....	33
B.1.	Zależności pomiędzy średnim dobowym współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych	33

A. Załącznik do rozdziału 3

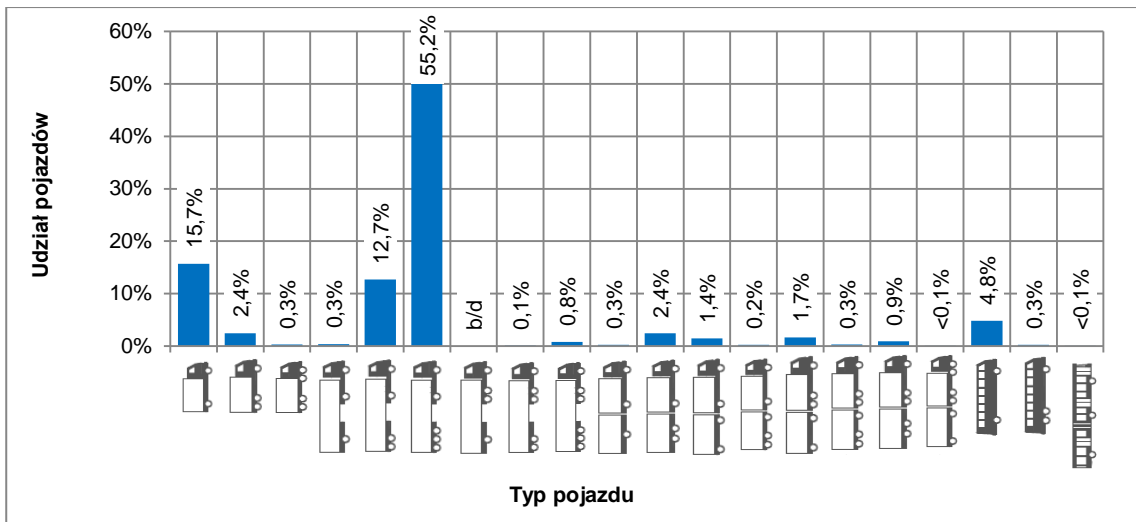
A.1. Struktura ruchu ciężkiego



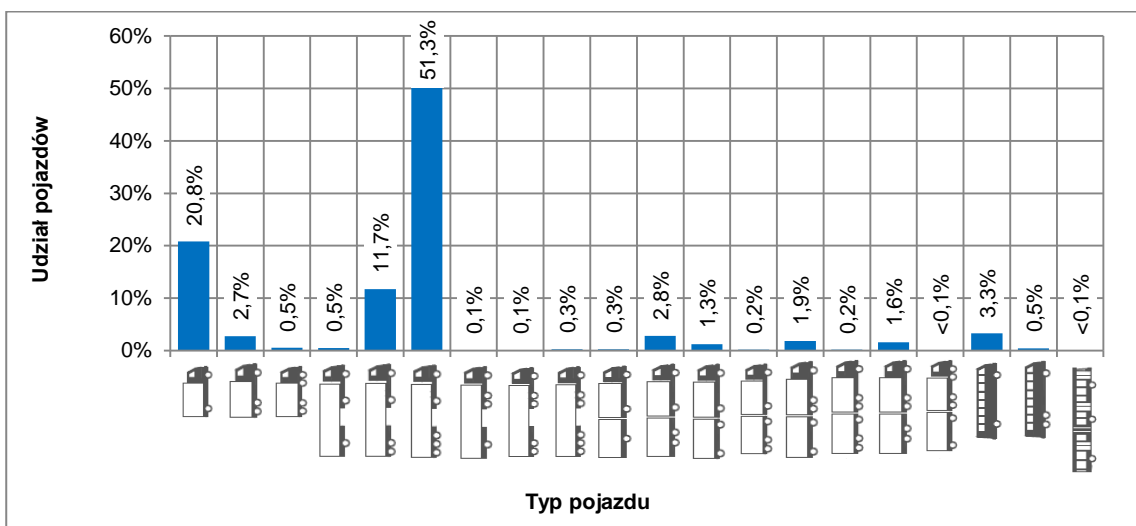
Rysunek A.1. Struktura ruchu ciężkiego na stacji A2



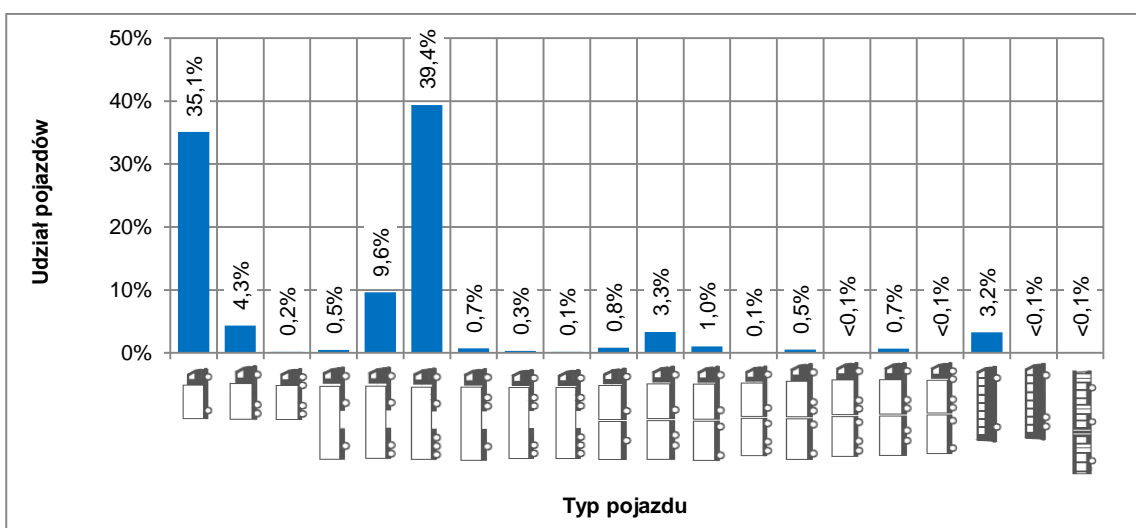
Rysunek A.2. Struktura ruchu ciężkiego na stacji S7



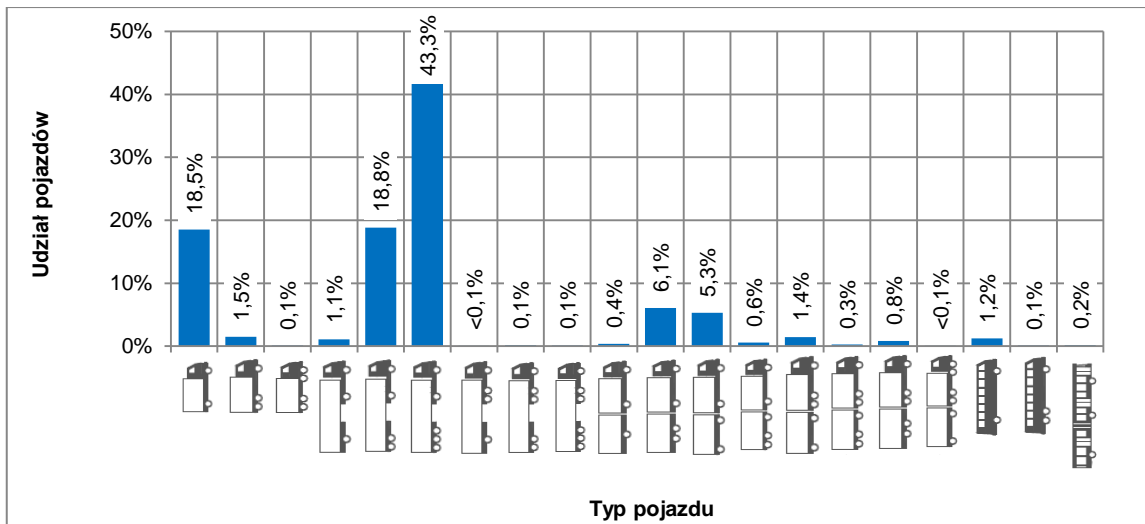
Rysunek A.3. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK1



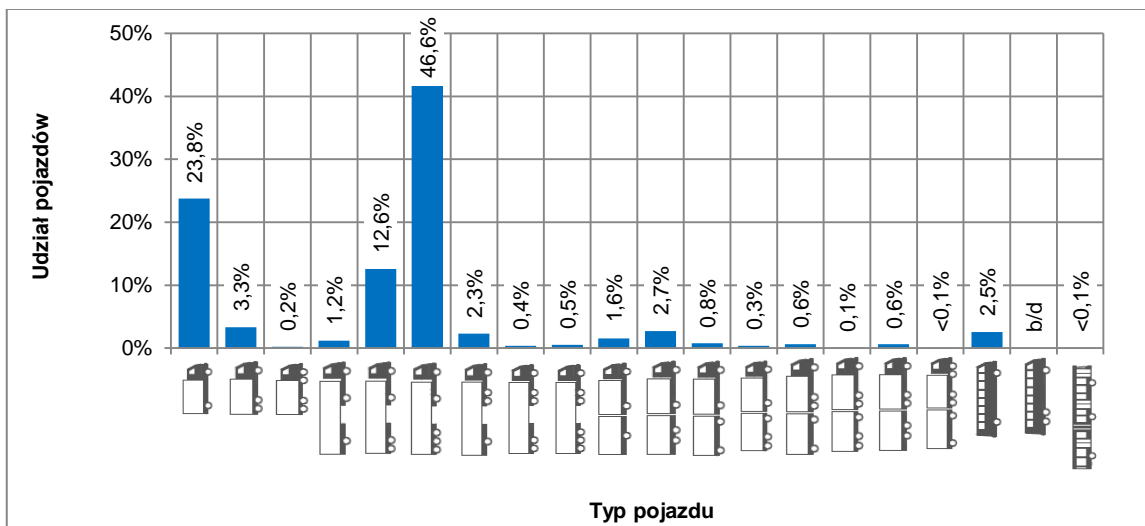
Rysunek A.4. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK4



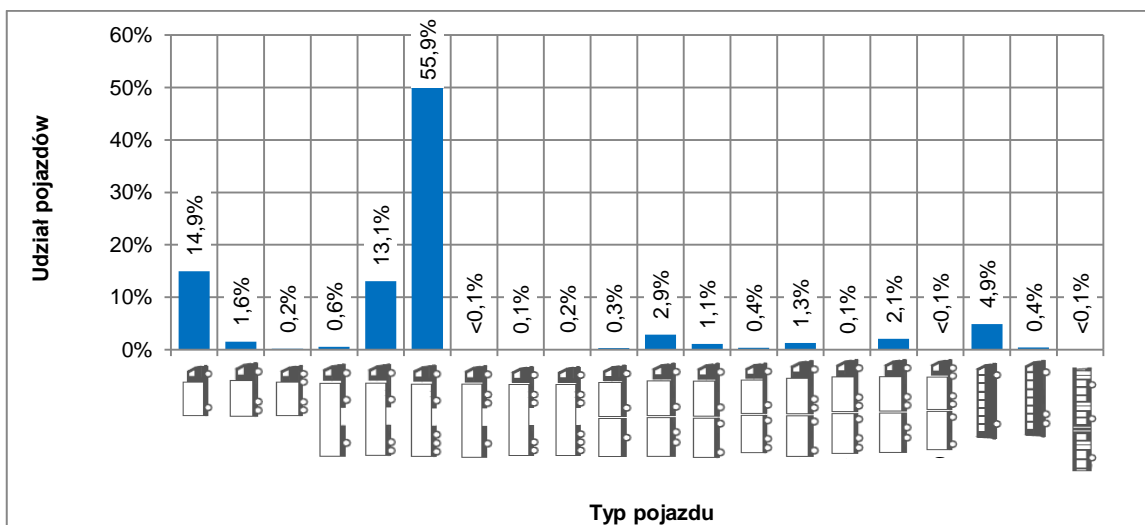
Rysunek A.5. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK7



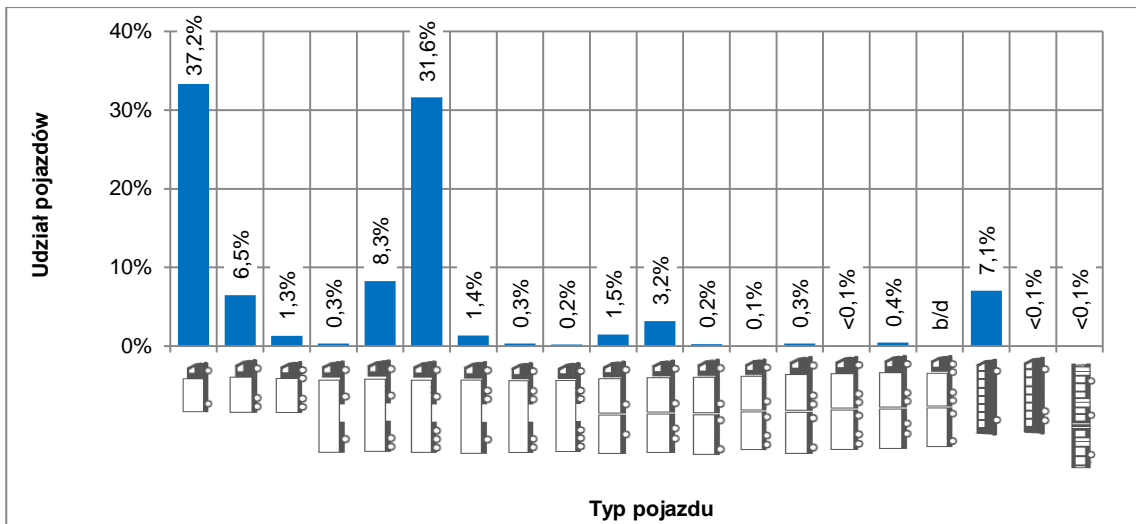
Rysunek A.6. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK11



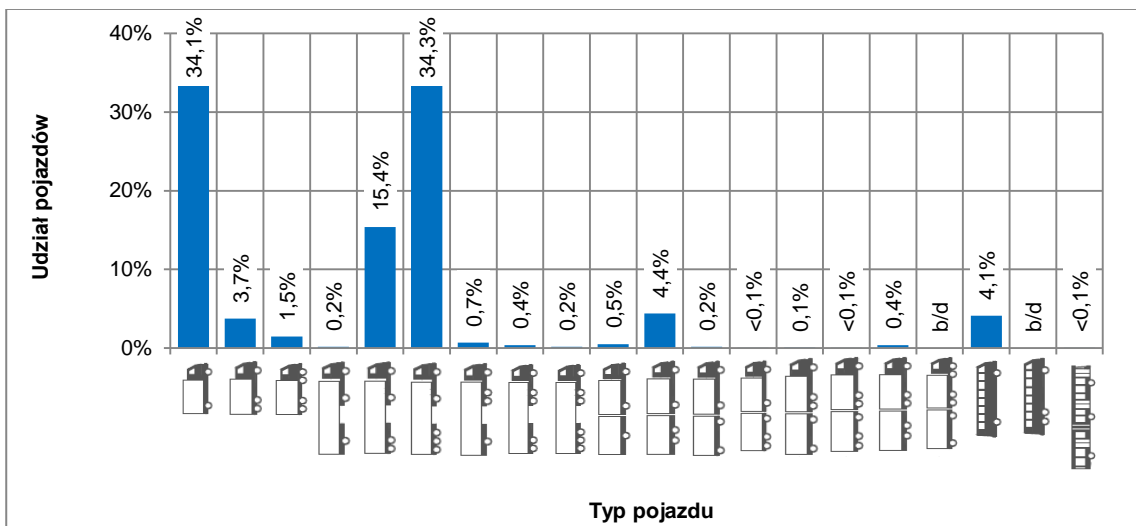
Rysunek A.7. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK22



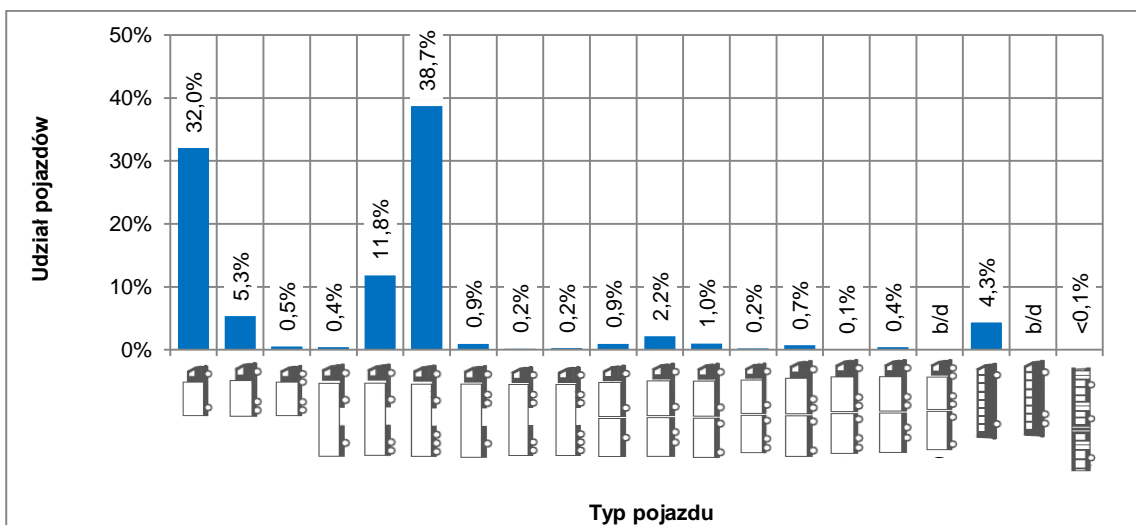
Rysunek A.8. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK46



Rysunek A.9. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK75

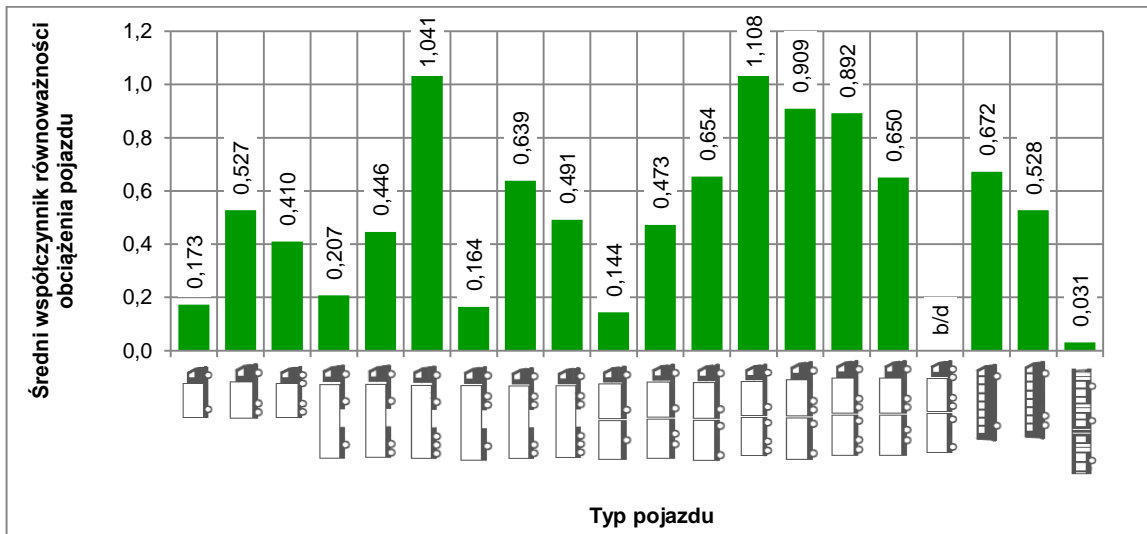


Rysunek A.10. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK79

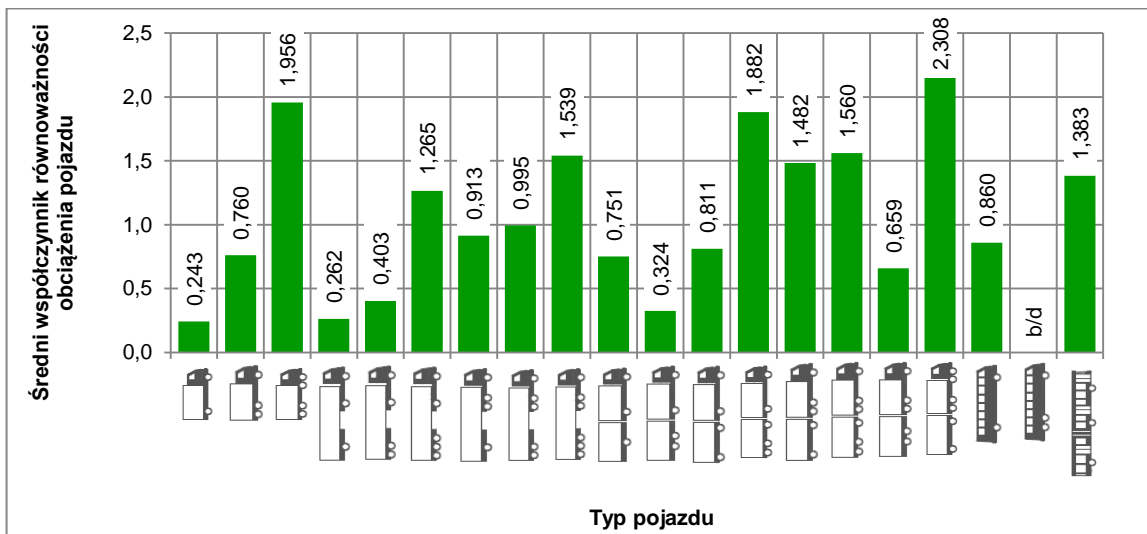


Rysunek A.11. Struktura ruchu ciężkiego na stacji DK94

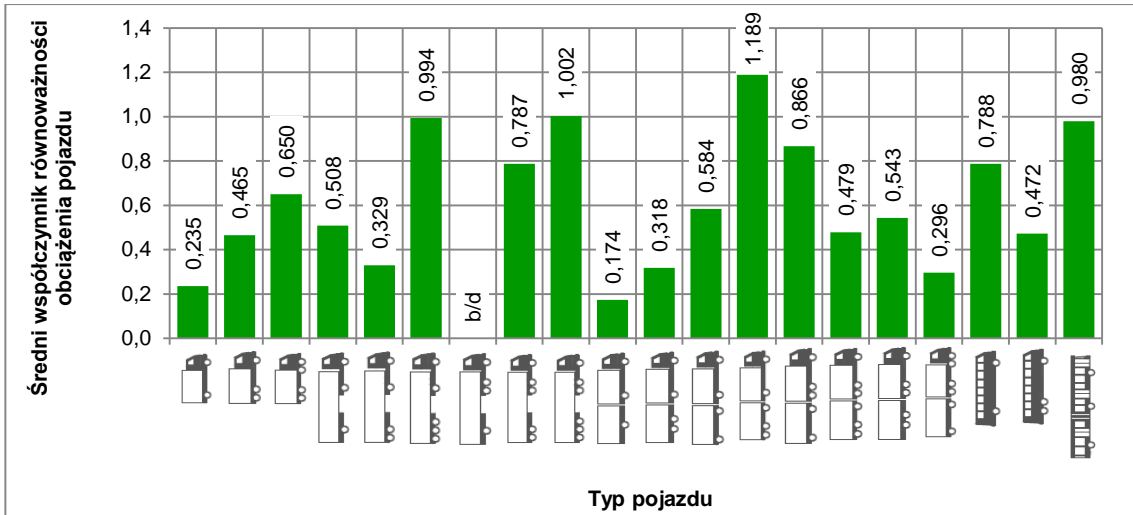
A.2. Średnie współczynniki równoważności obciążenia osi obliczone według wzoru czwartej potęgi



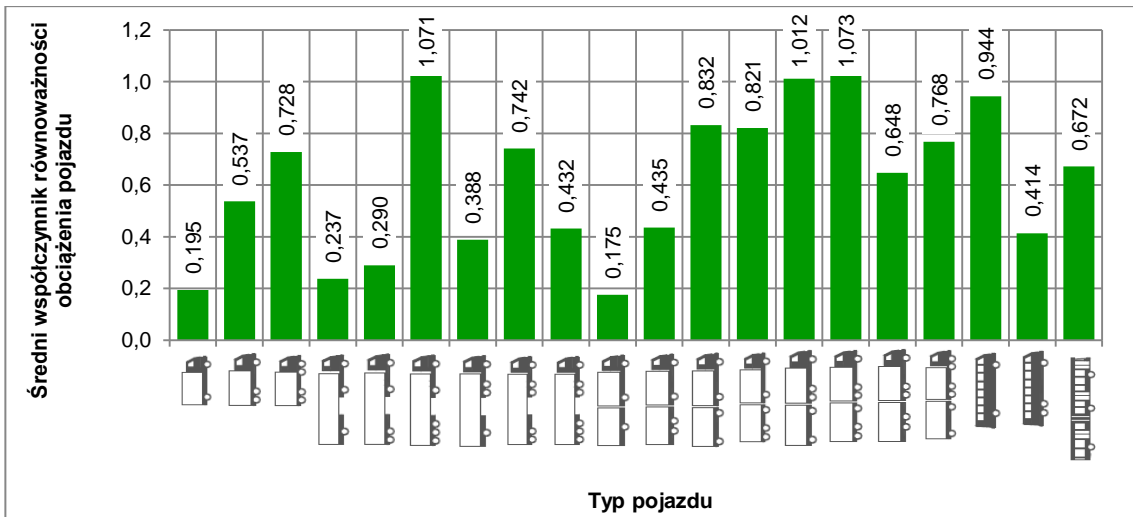
Rysunek A.12. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji A2



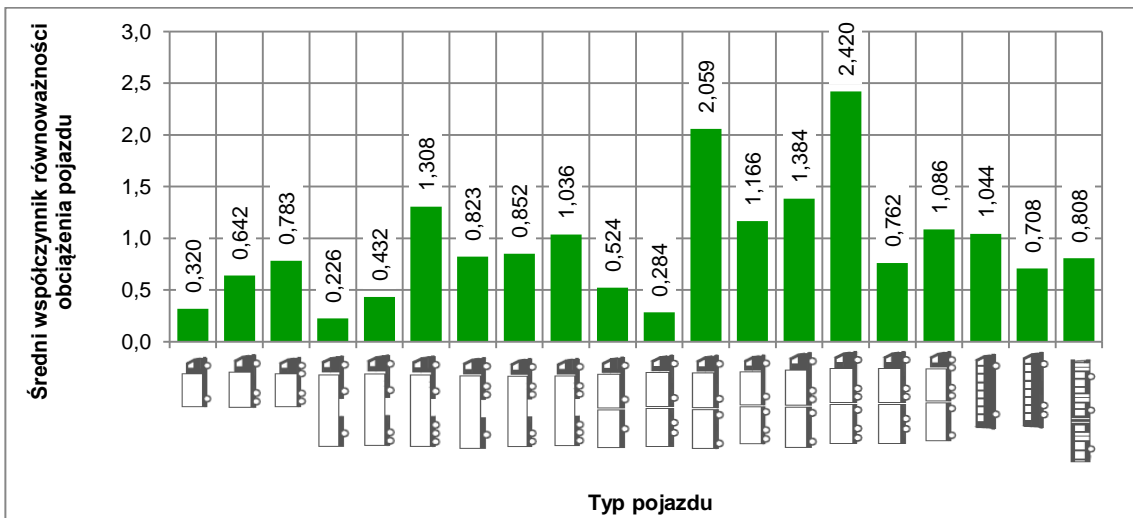
Rysunek A.13. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji S7



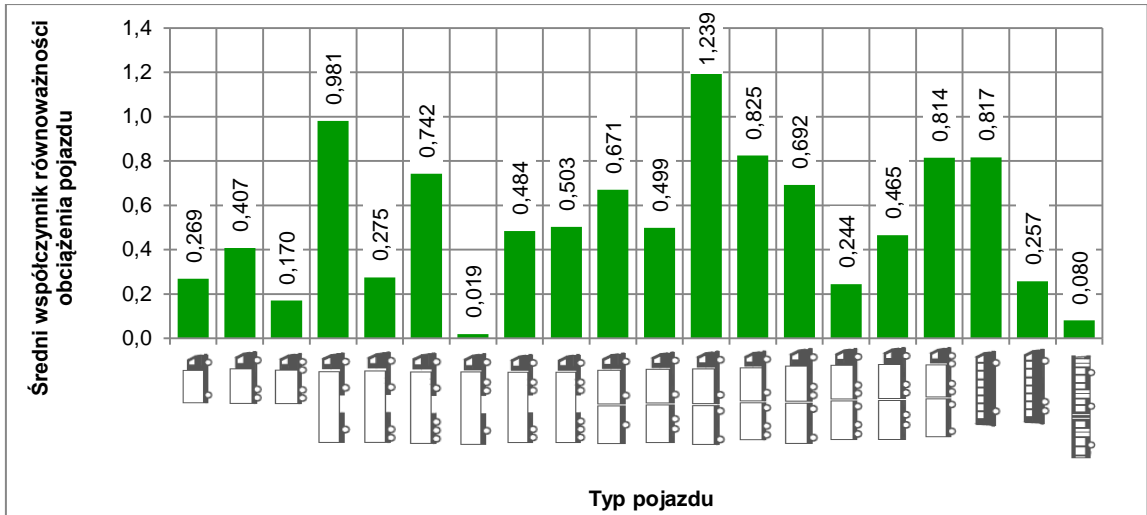
Rysunek A.14. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK1



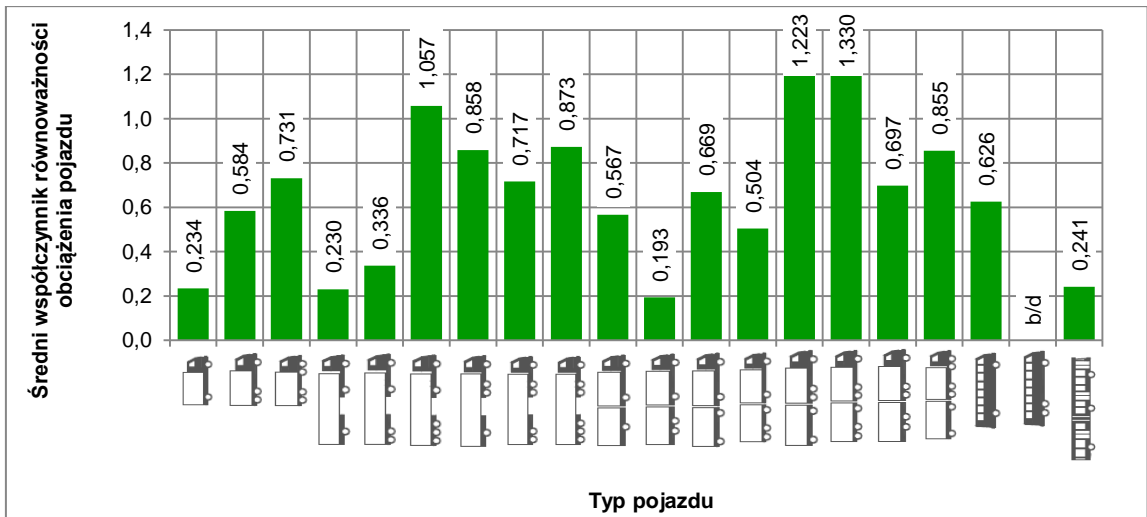
Rysunek A.15. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK4



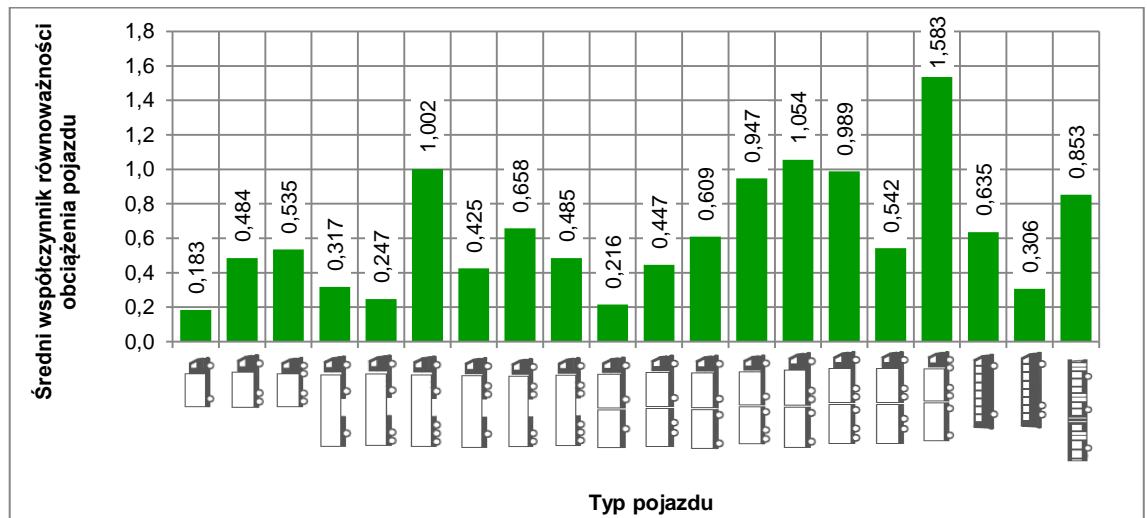
Rysunek A.16. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK7



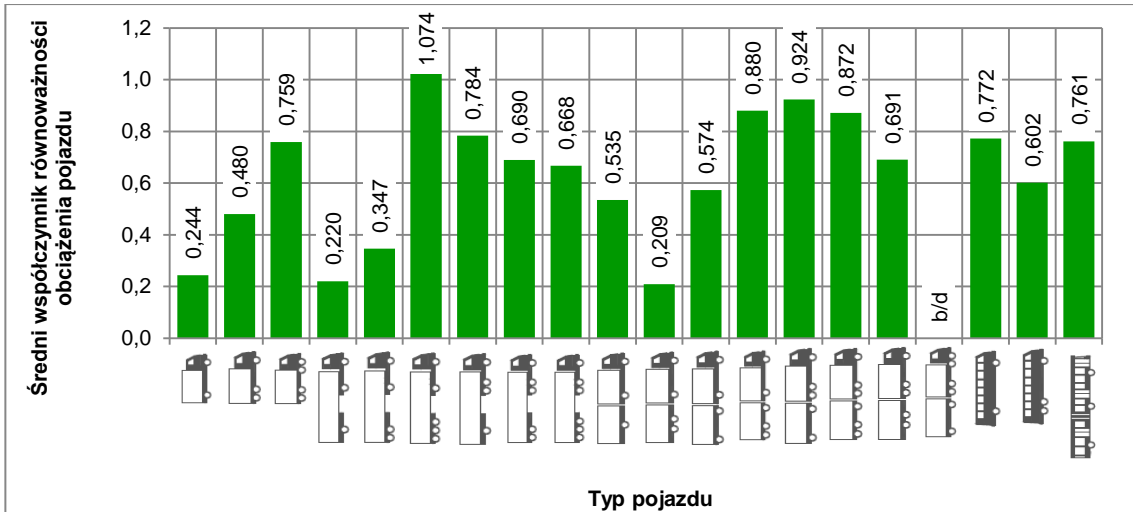
Rysunek A.17. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK11



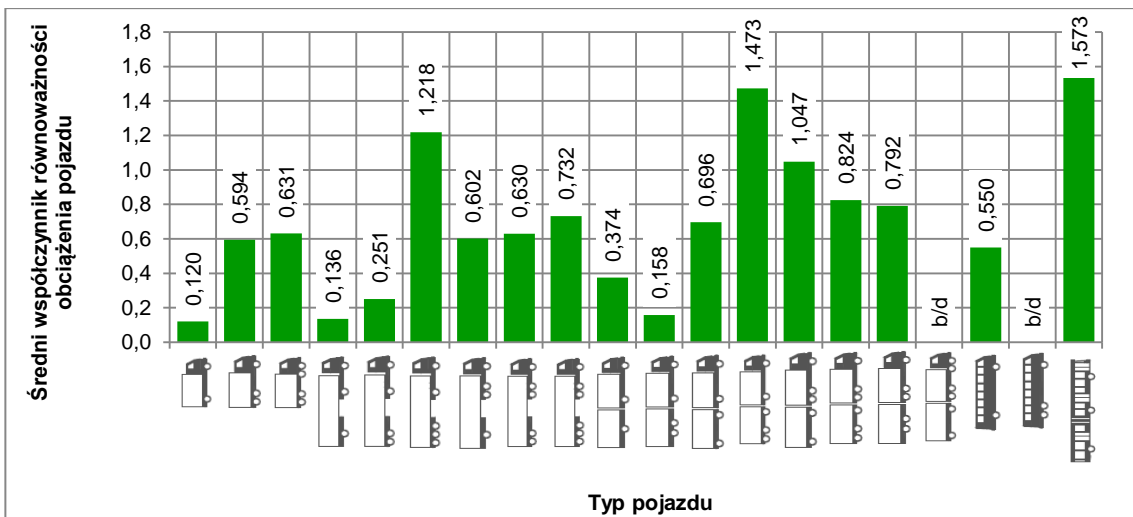
Rysunek A.18. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK22



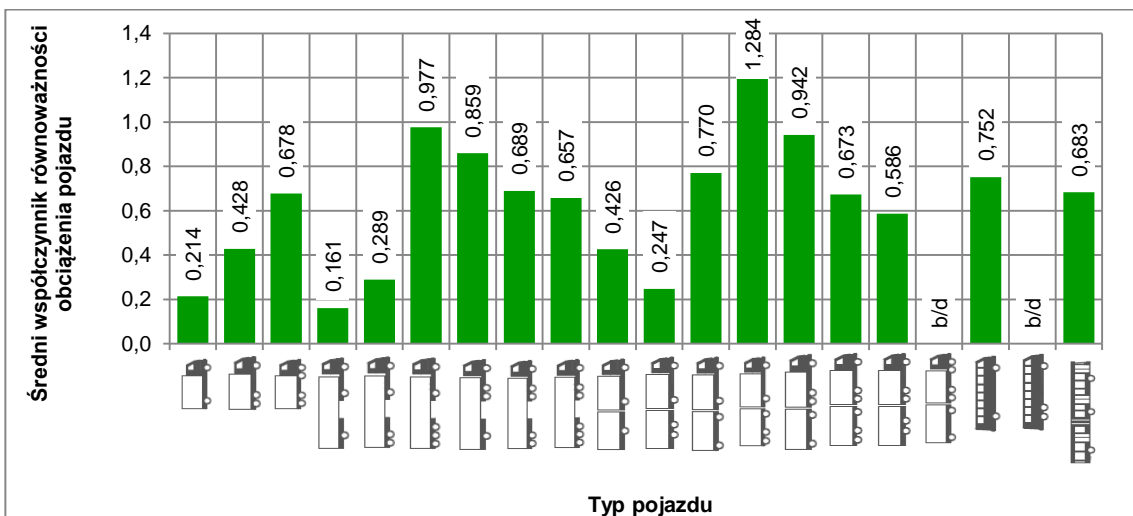
Rysunek A.19. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK46



Rysunek A.20. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK75

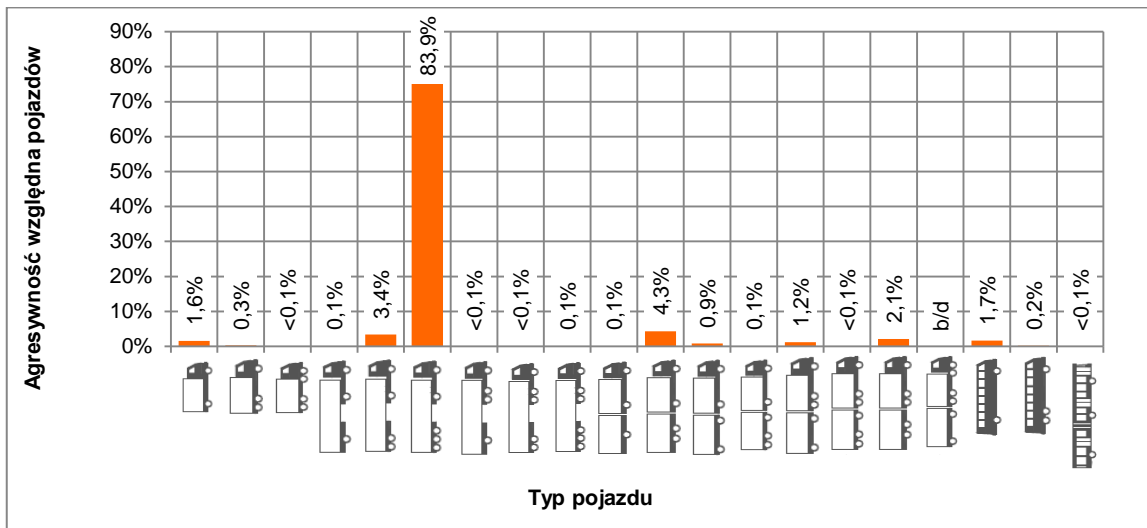


Rysunek A.21. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK79

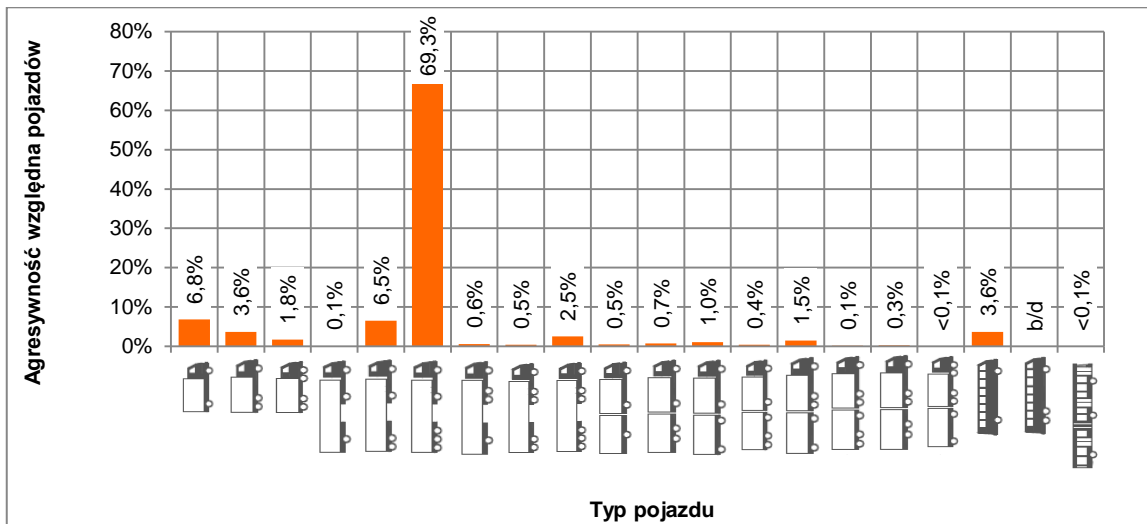


Rysunek A.22. Średnie współczynniki równoważności obciążenia poszczególnych typów pojazdów na stacji DK94

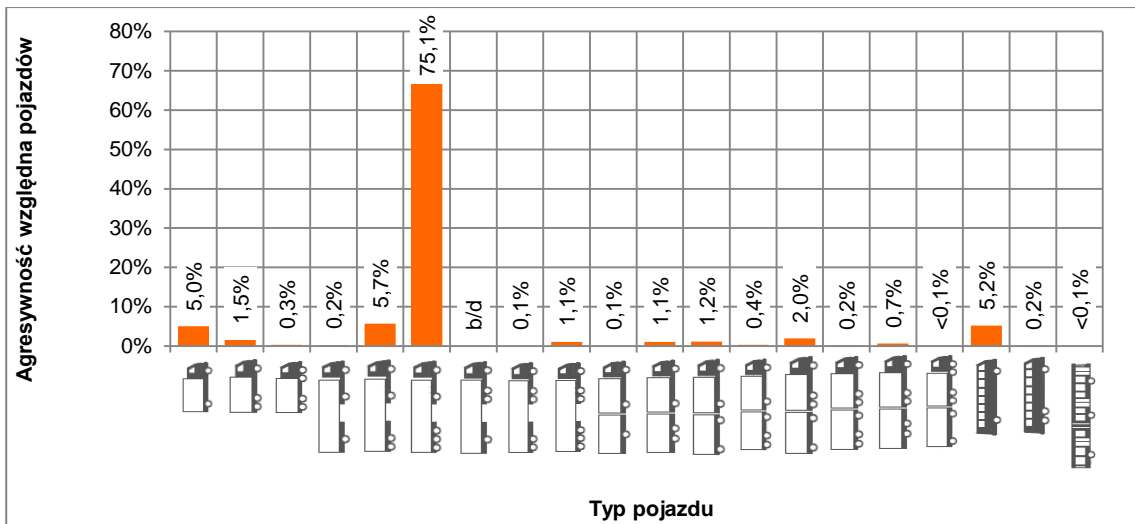
A.3. Agresywność względna pojazdów ciężkich



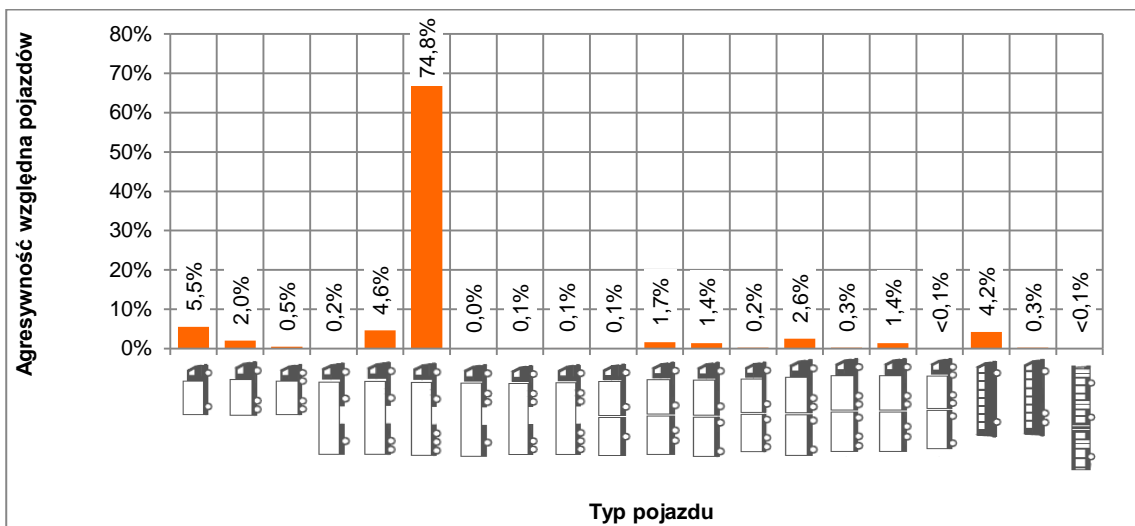
Rysunek A.23. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji A2



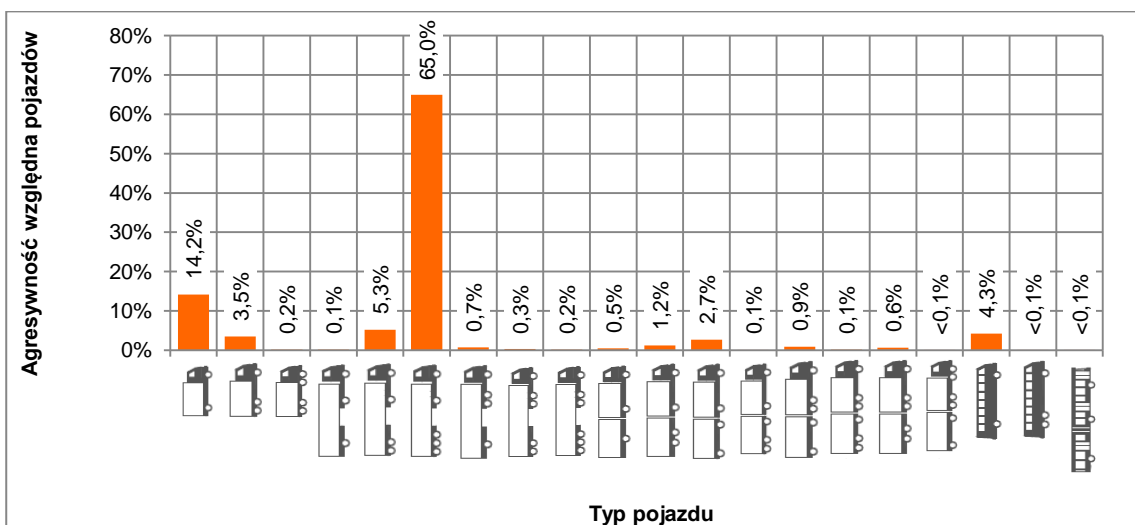
Rysunek A.24. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji S7



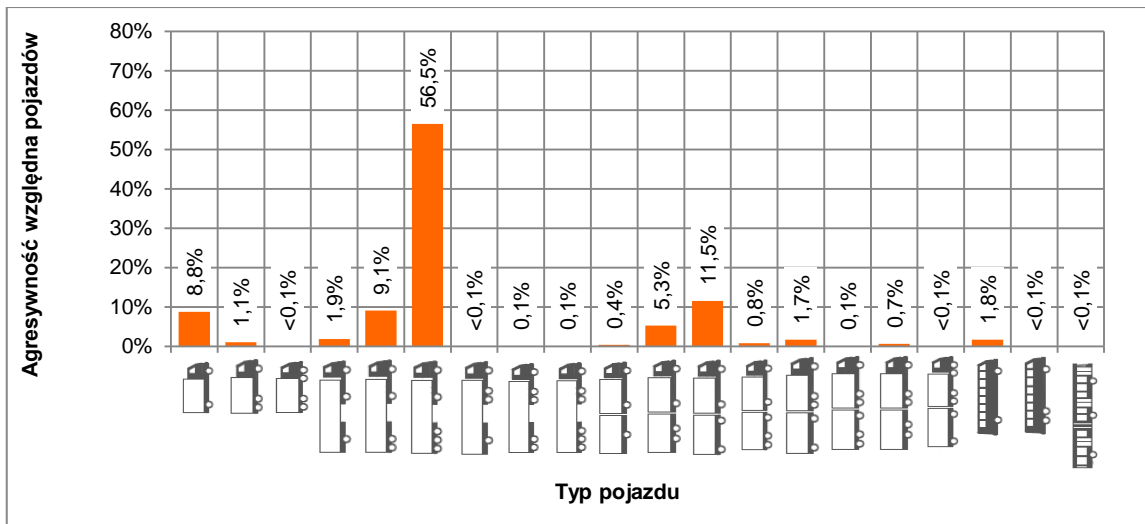
Rysunek A.25. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK1



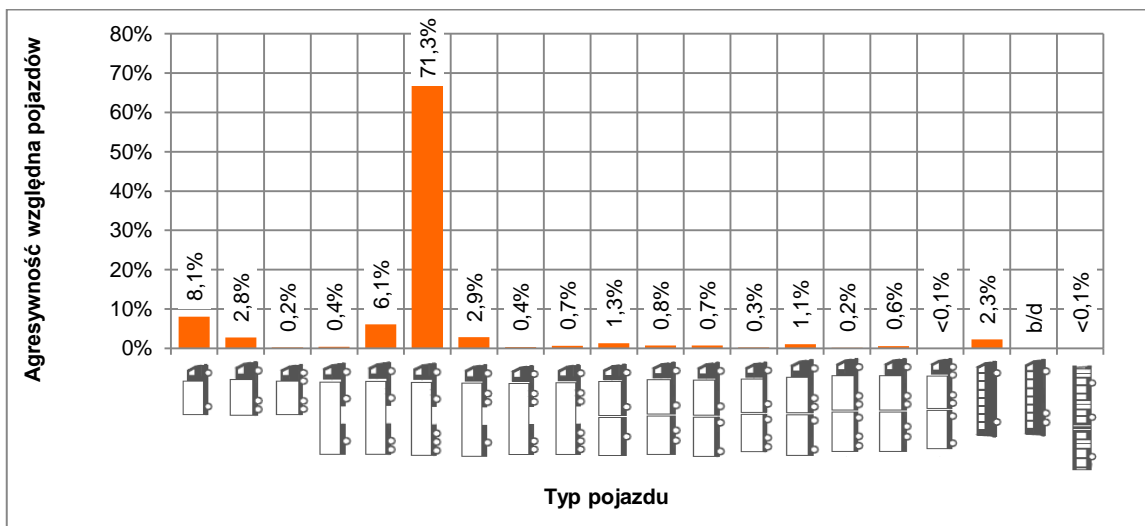
Rysunek A.26. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK4



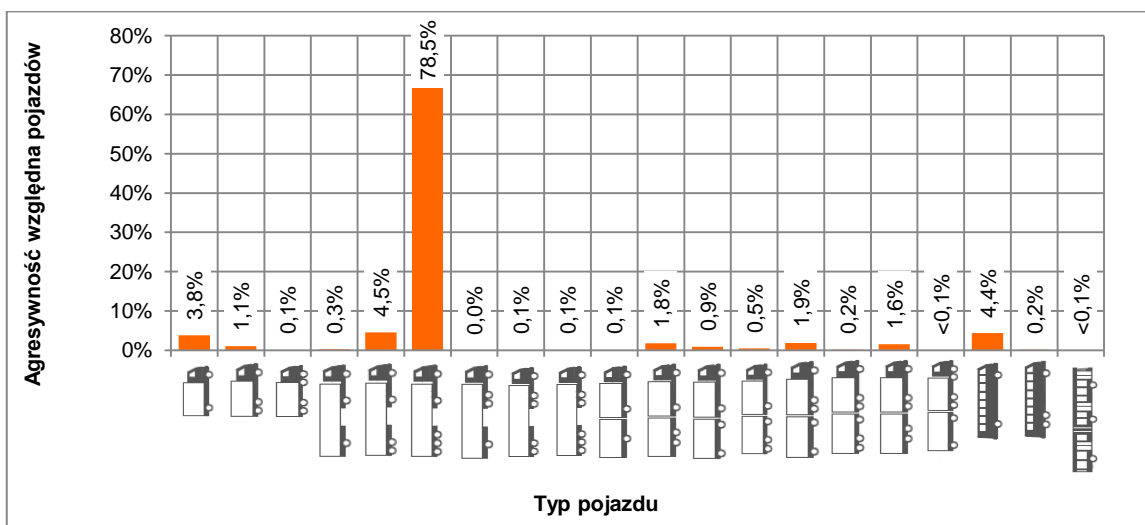
Rysunek A.27. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK7



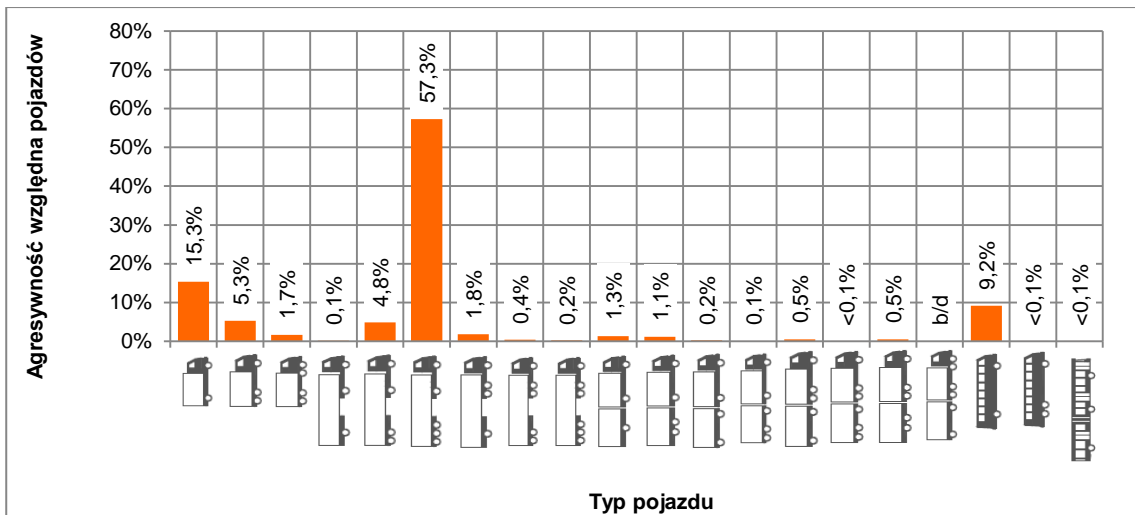
Rysunek A.28. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK11



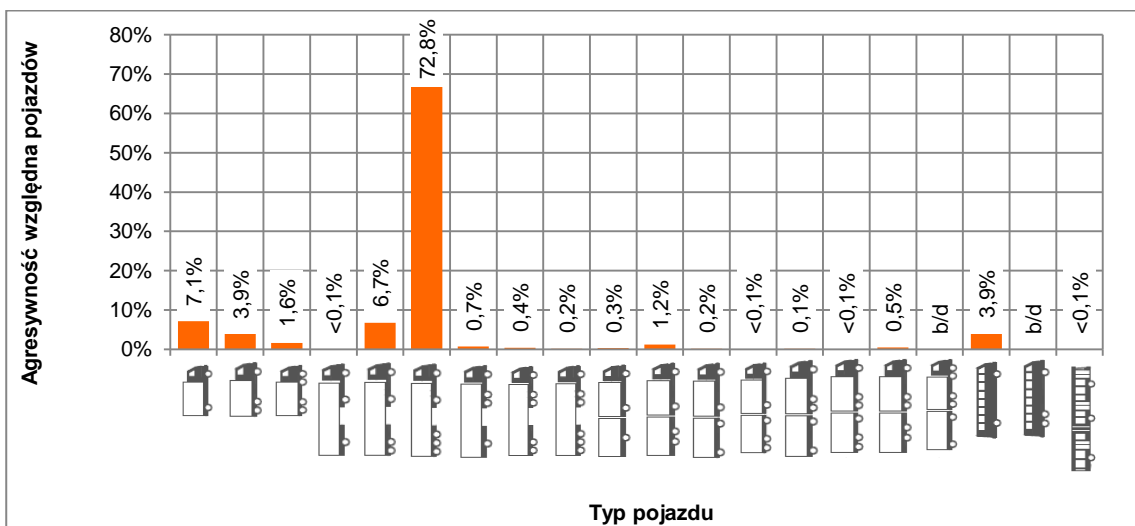
Rysunek A.29. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK22



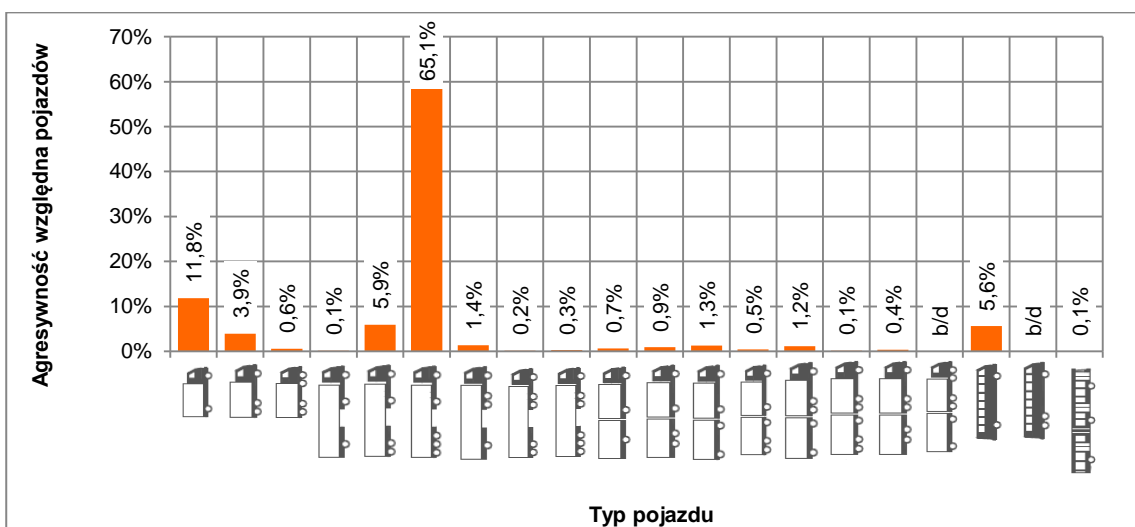
Rysunek A.30. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK46



Rysunek A.31. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK75



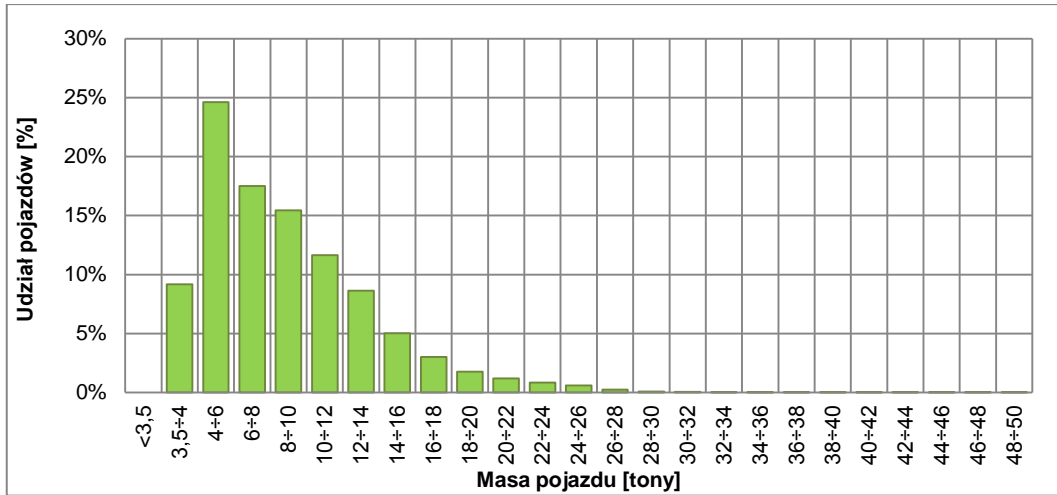
Rysunek A.32. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK79



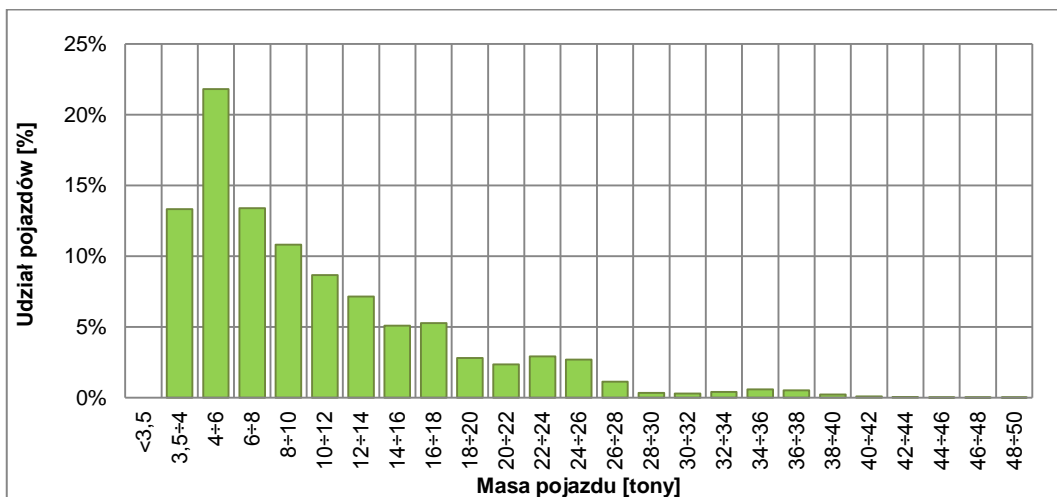
Rysunek A.33. Agresywność względna pojazdów ciężkich na stacji DK94

A.4. Rozkłady dyskretne masy całkowitej pojazdów

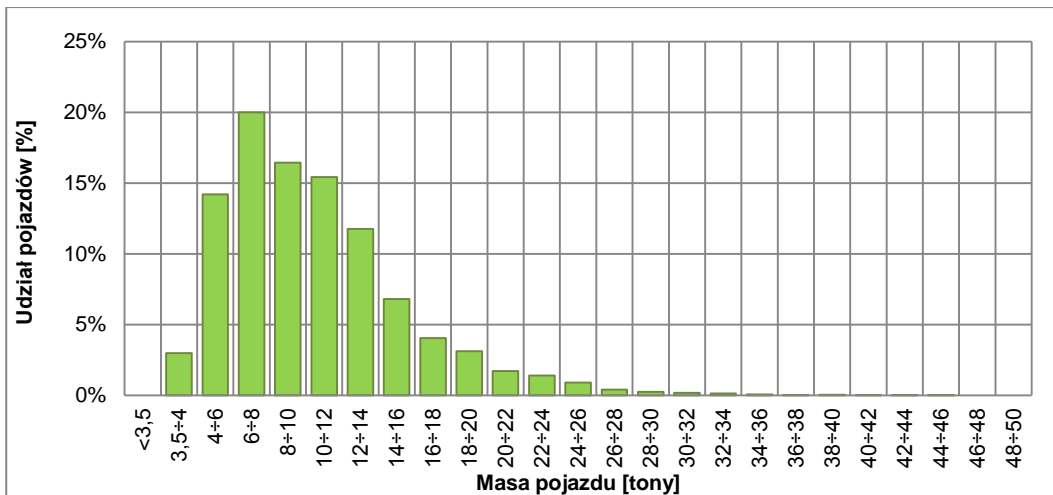
A.4.1. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C – samochody ciężarowe bez przyczep



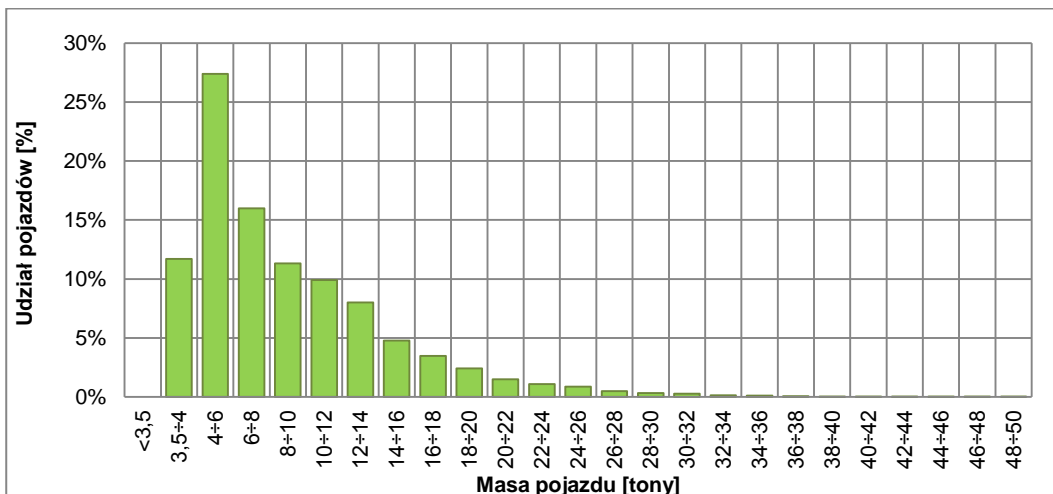
Rysunek A.34. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji A2



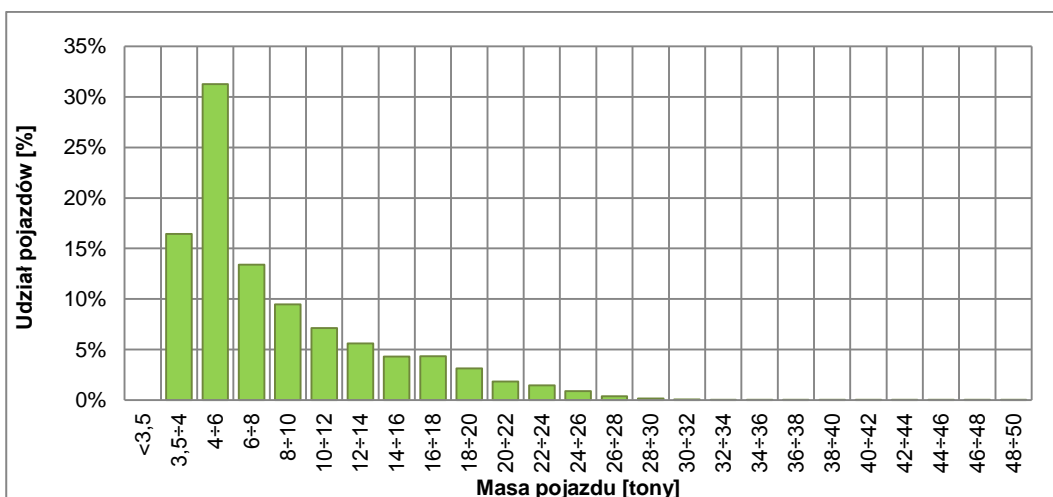
Rysunek A.35. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji S7



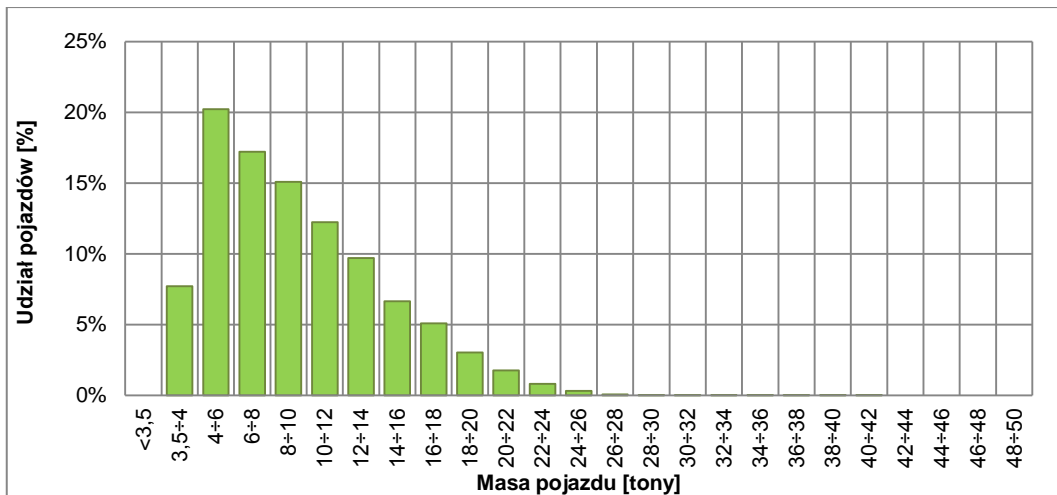
Rysunek A.36. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK1



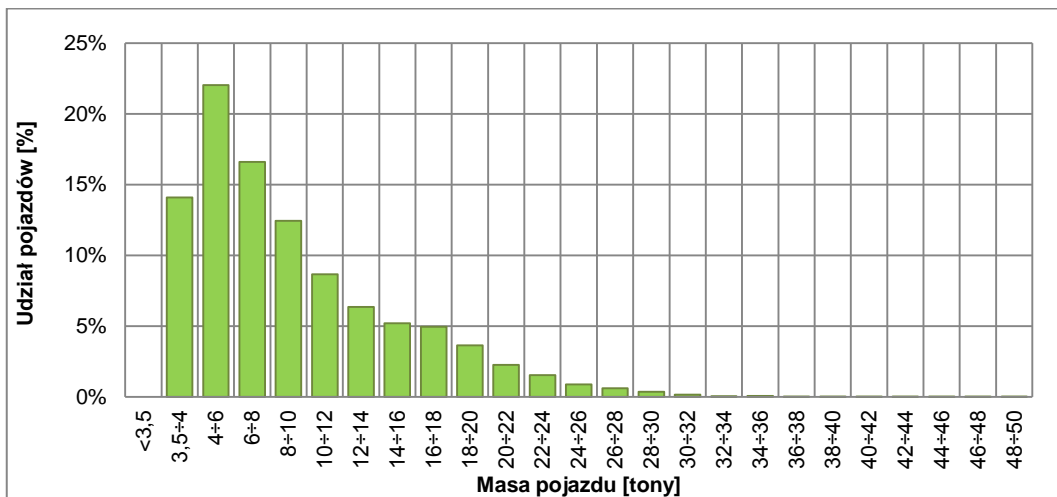
Rysunek A.37. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK4



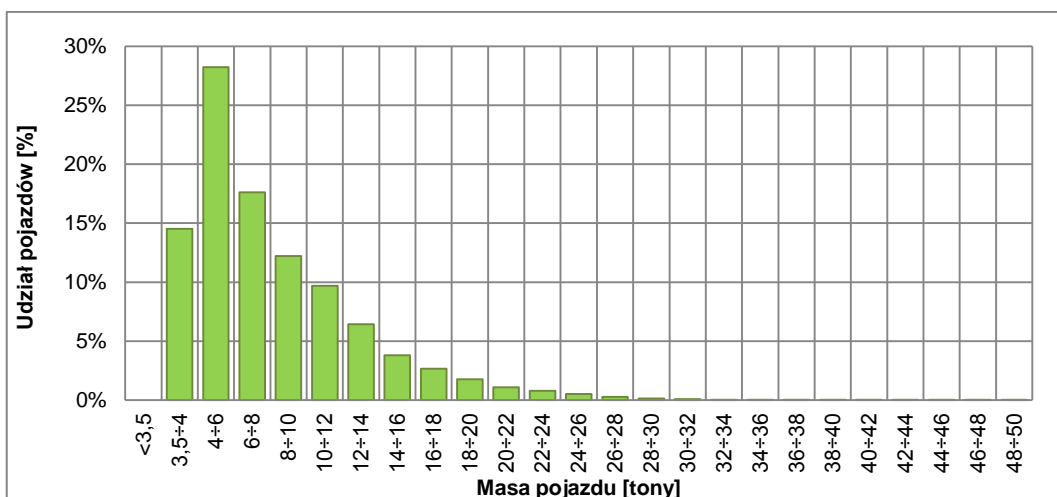
Rysunek A.38. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK7



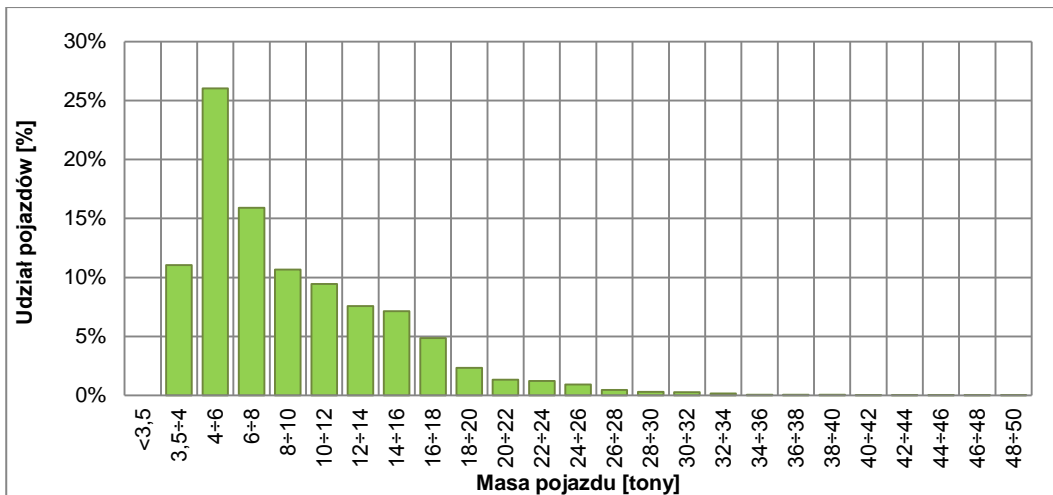
Rysunek A.39. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK11



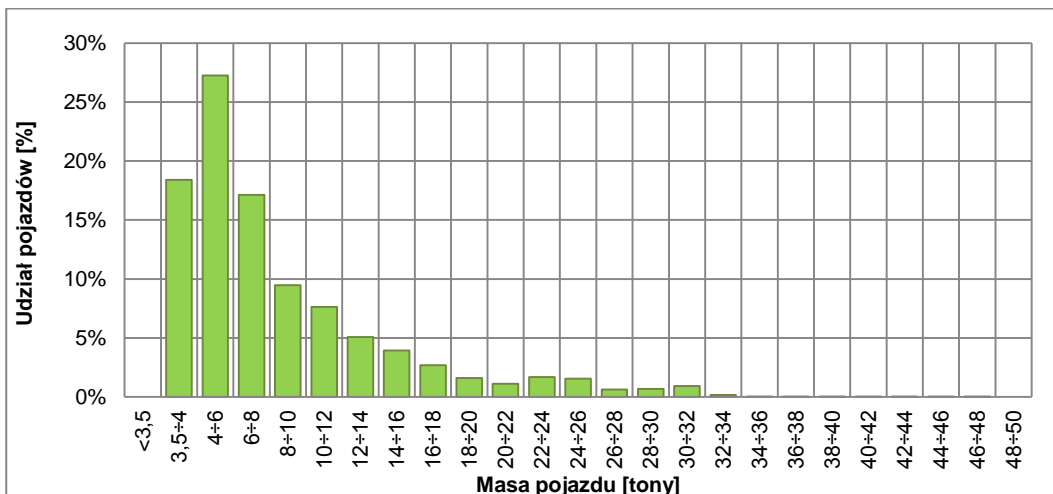
Rysunek A.40. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK22



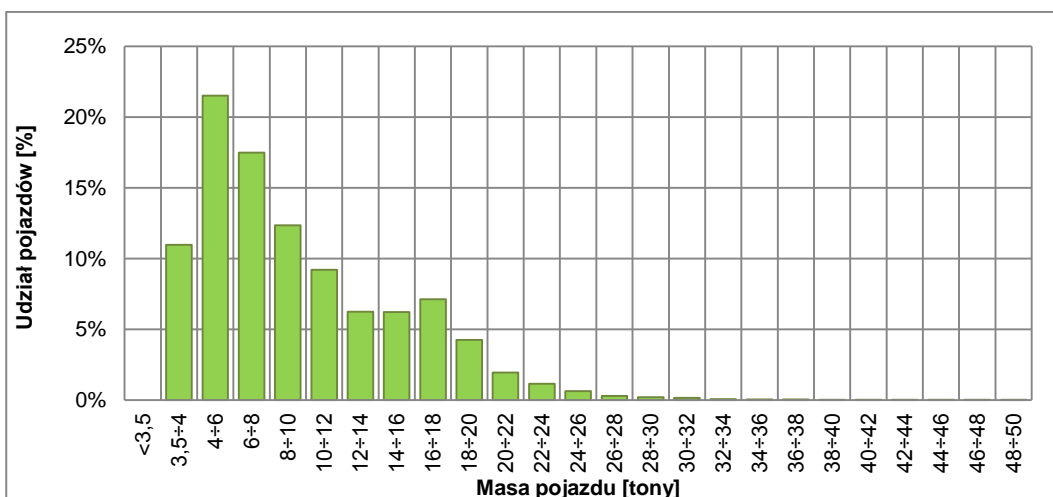
Rysunek A.41. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK46



Rysunek A.42. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK75

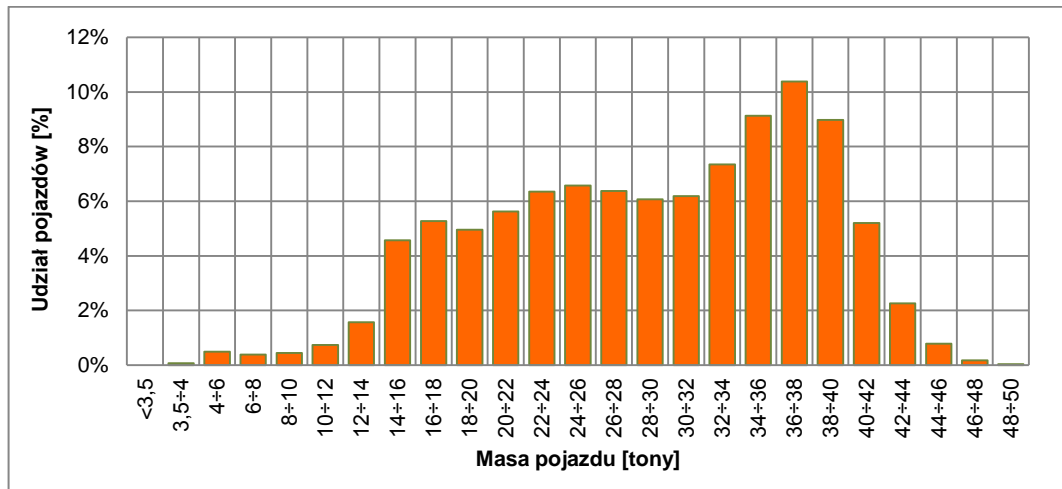


Rysunek A.43. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK79

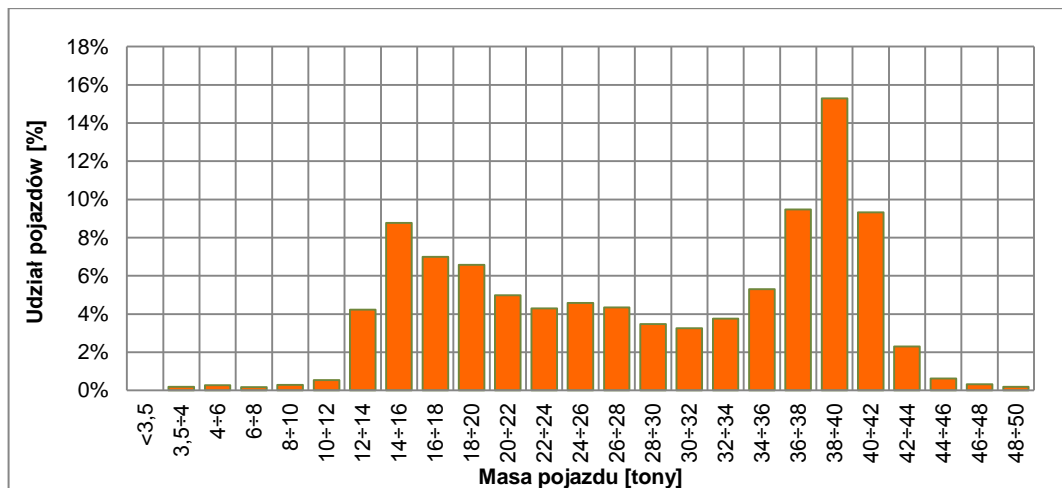


Rysunek A.44. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C na stacji DK94

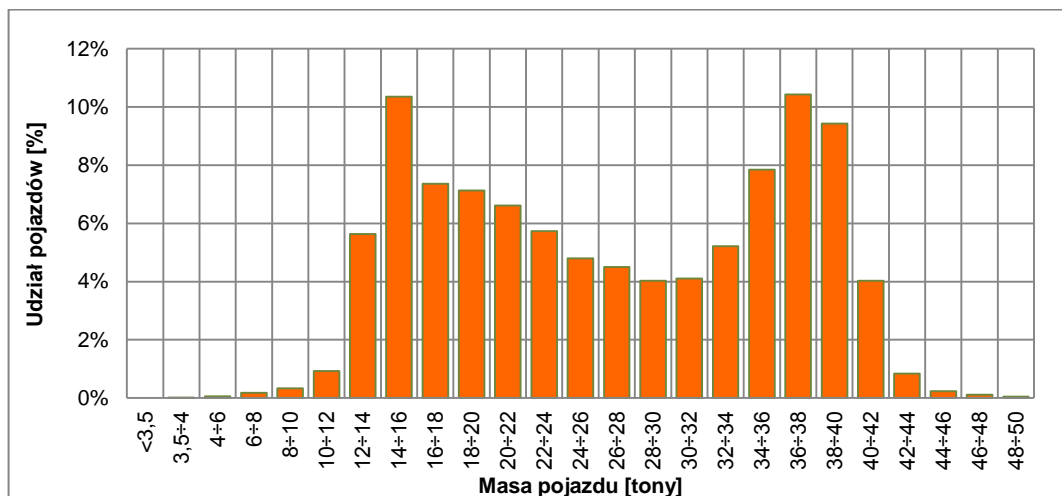
A.4.2. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P – samochody ciężarowe z przyczepą i ciągniki siodłowe z naczepą



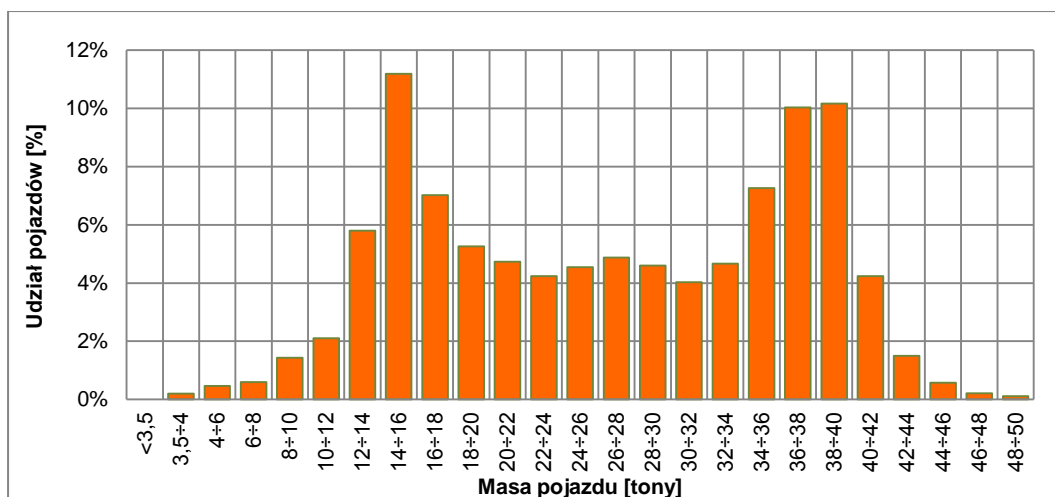
Rysunek A.45. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji A2



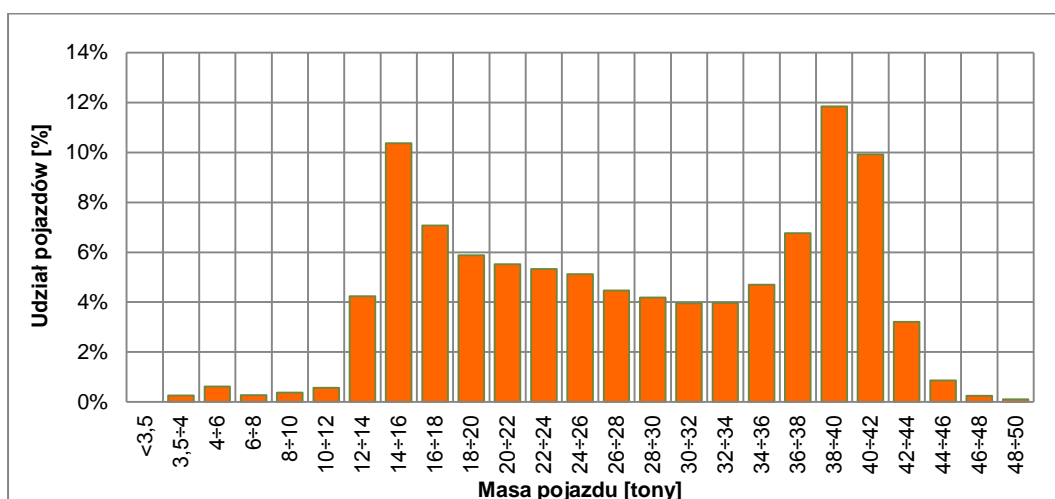
Rysunek A.46. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji S7



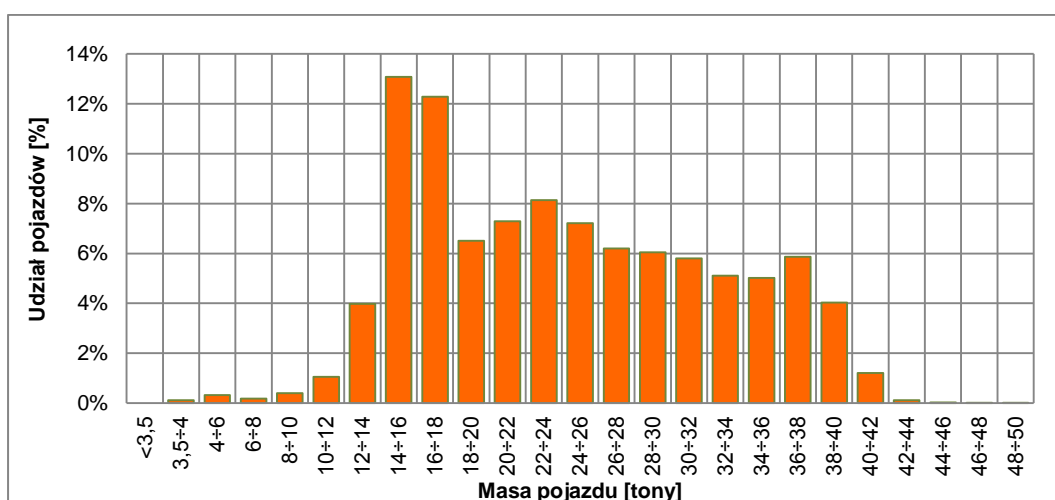
Rysunek A.47. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK1



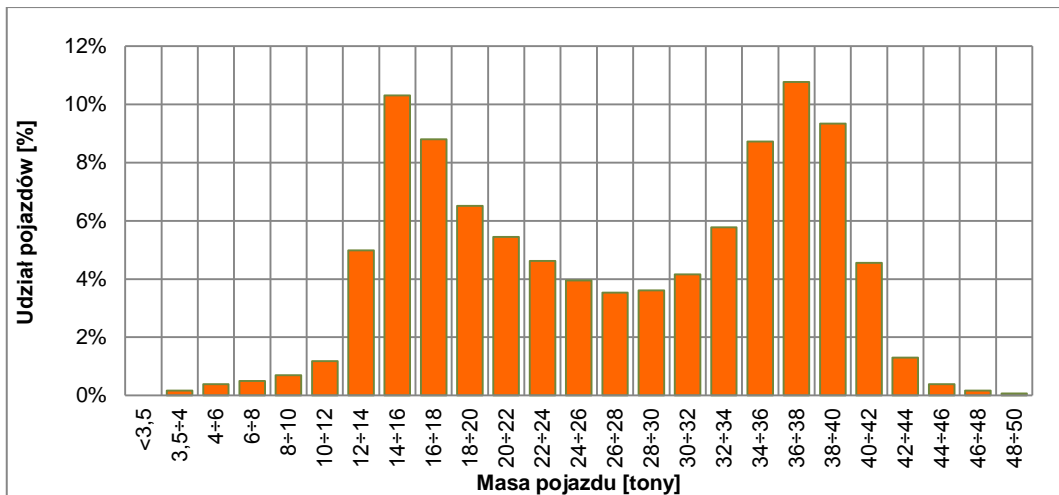
Rysunek A.48. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK4



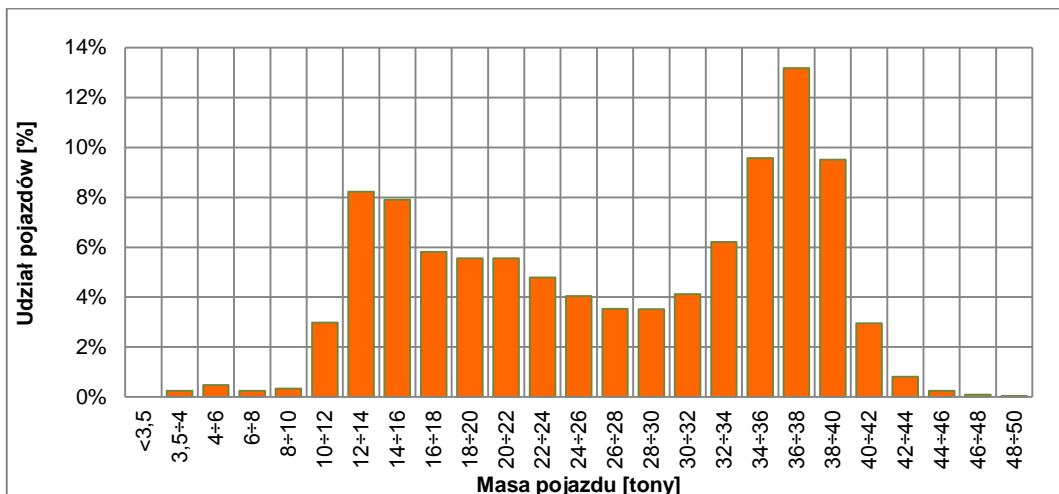
Rysunek A.49. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK7



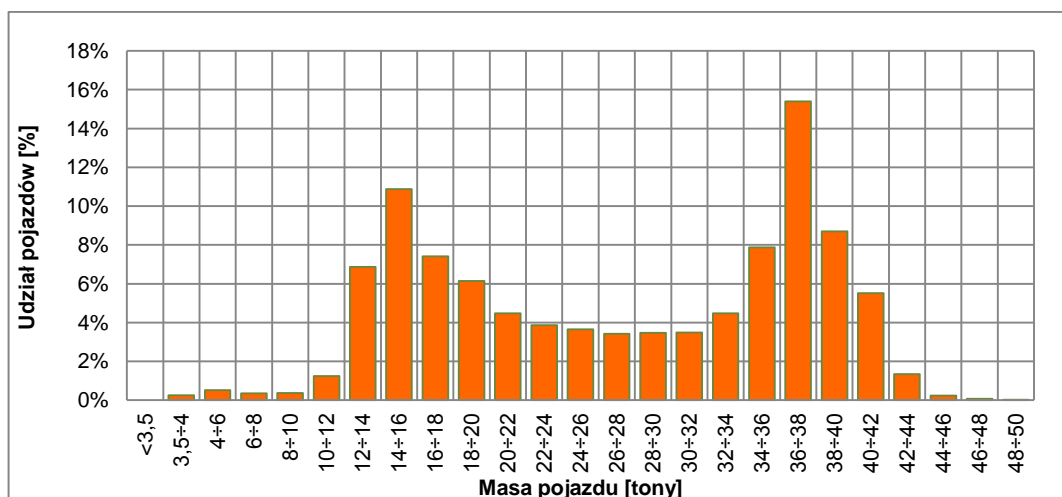
Rysunek A.50. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK11



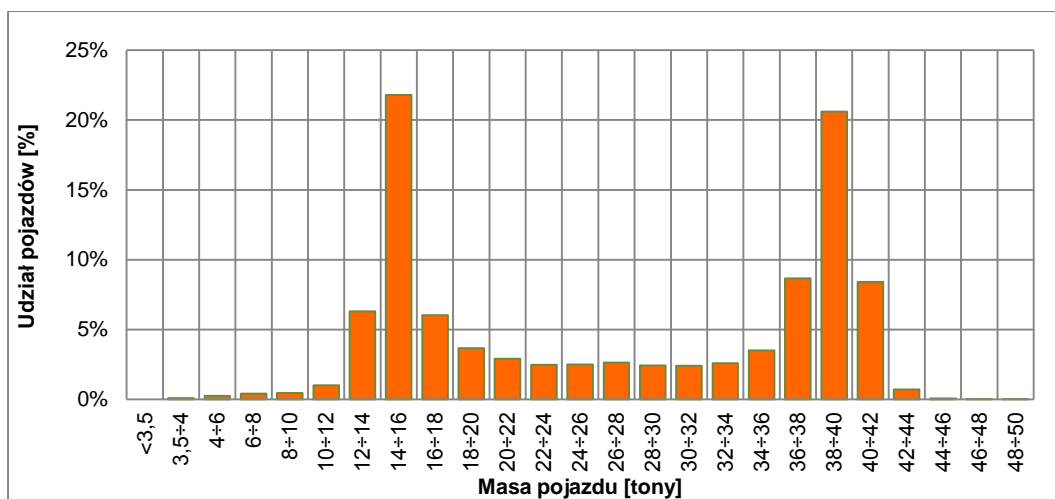
Rysunek A.51. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK22



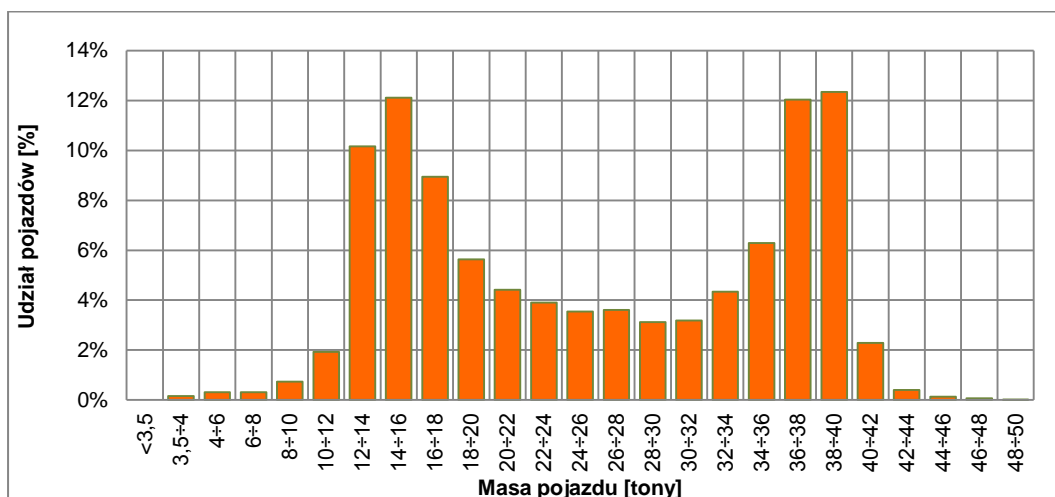
Rysunek A.52. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK46



Rysunek A.53. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK75

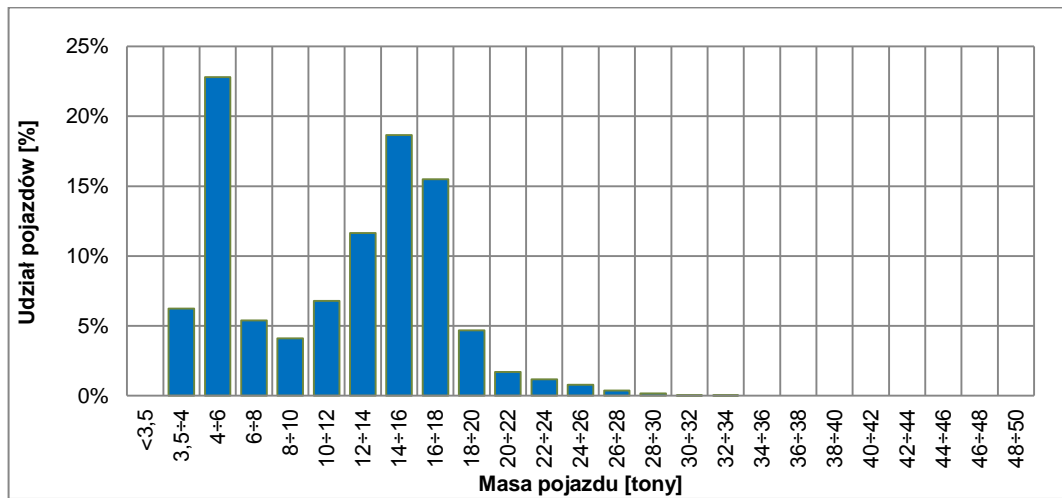


Rysunek A.54. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK79

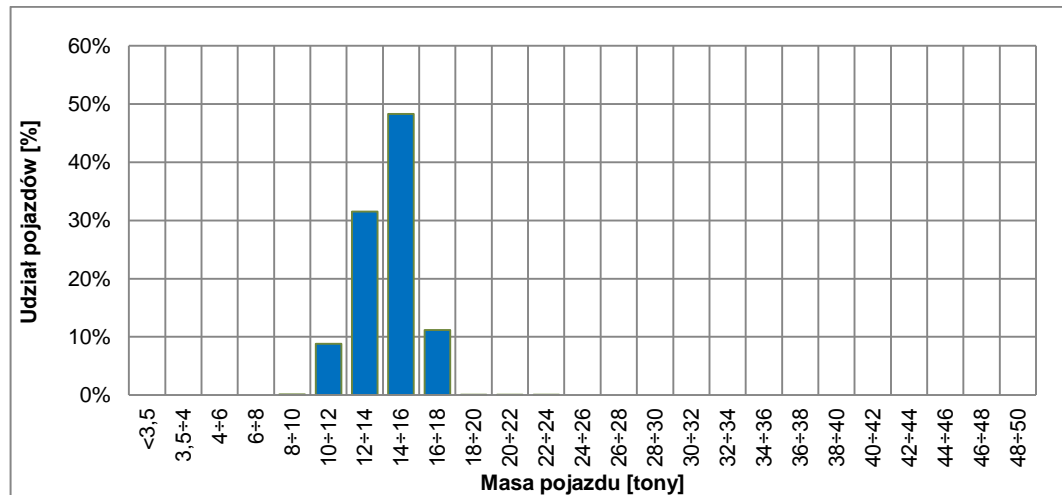


Rysunek A.55. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii C+P na stacji DK94

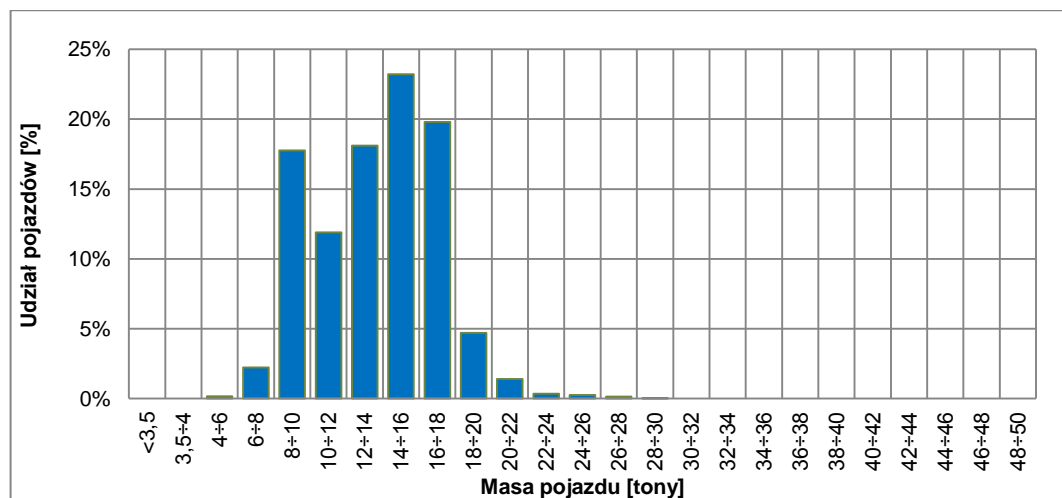
A.4.3. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A – autobusy



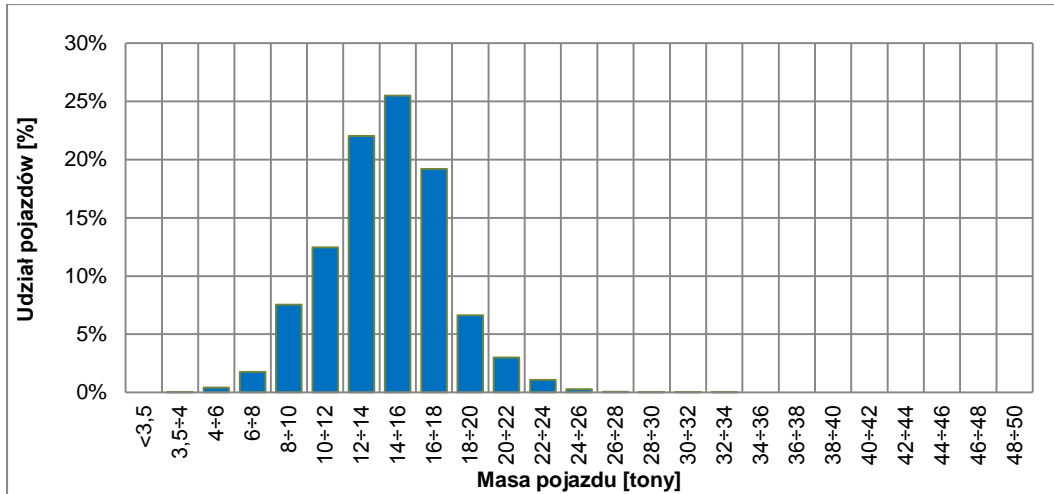
Rysunek A.56. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji A2



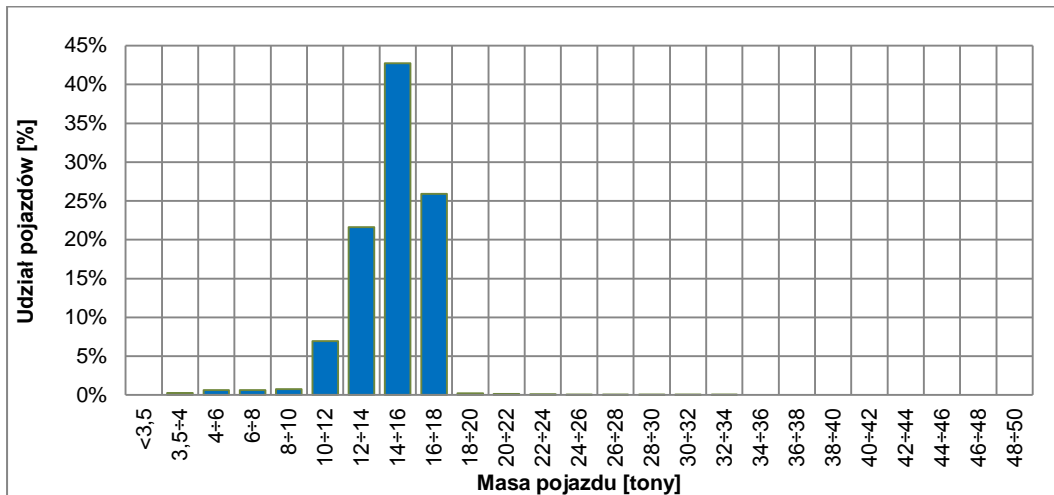
Rysunek A.57. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji S7



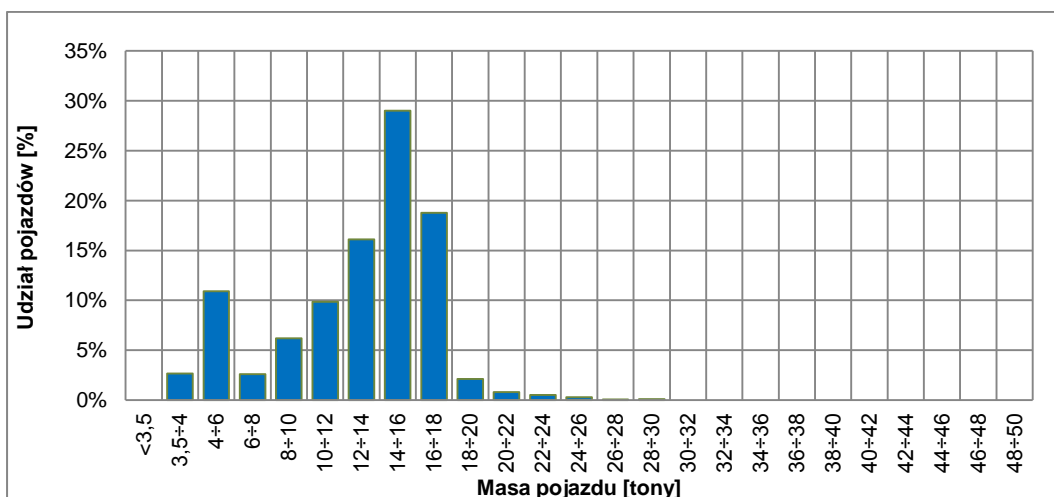
Rysunek A.58. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK1



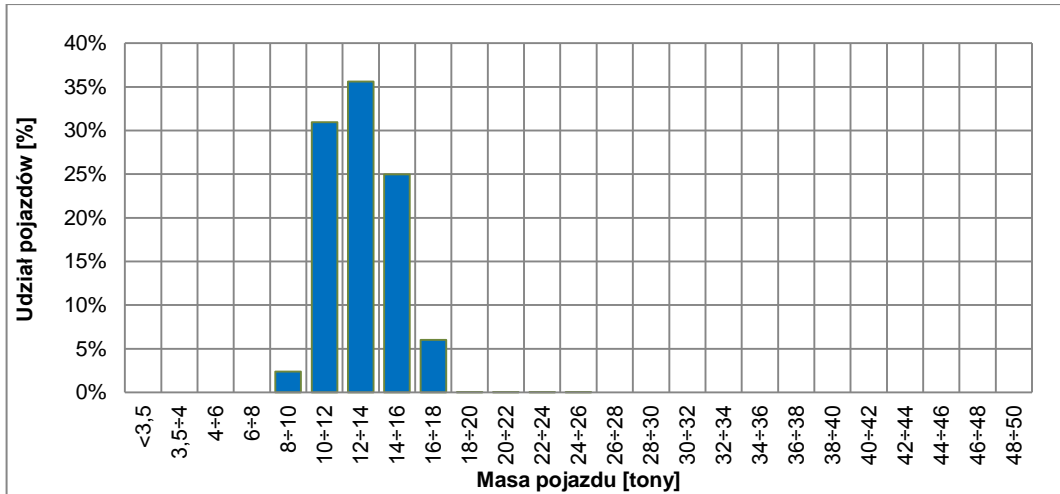
Rysunek A.59. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK4



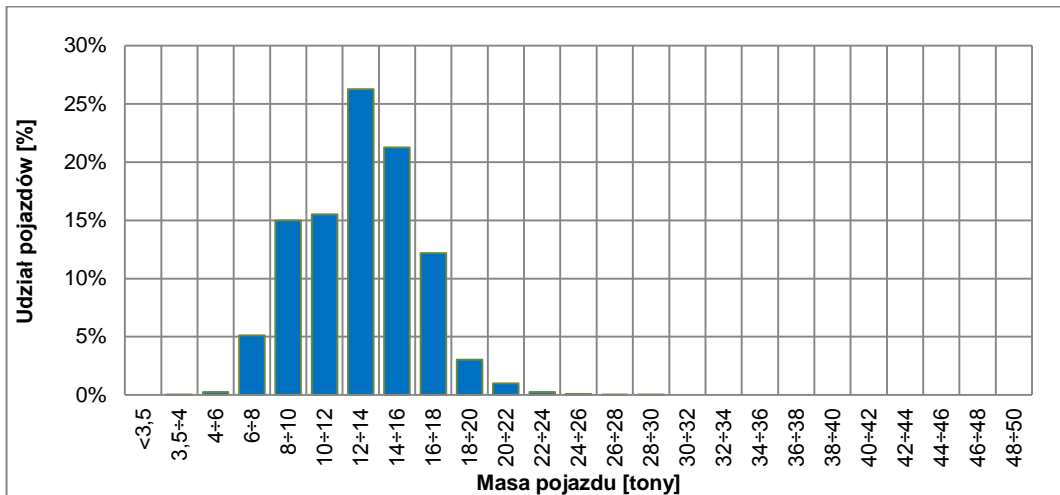
Rysunek A.60. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK7



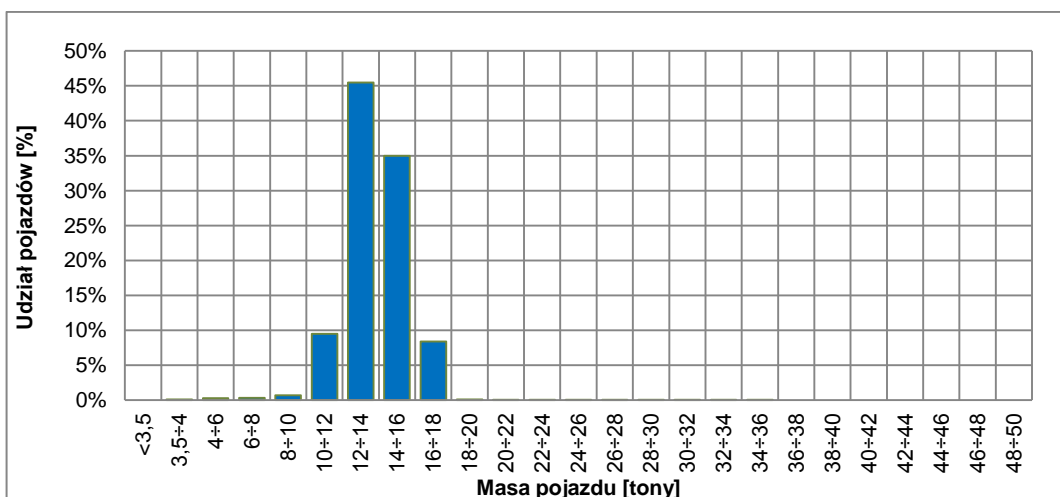
Rysunek A.61. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK11



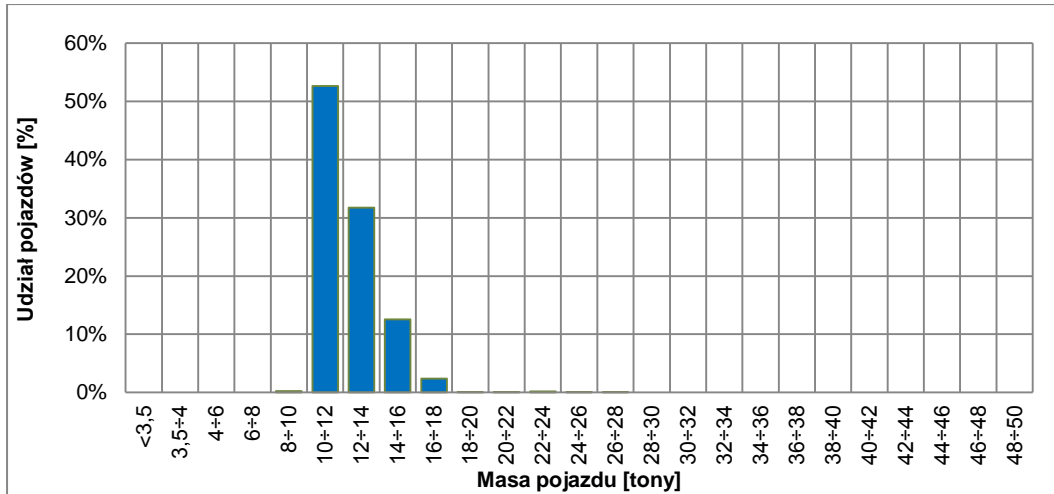
Rysunek A.62. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK22



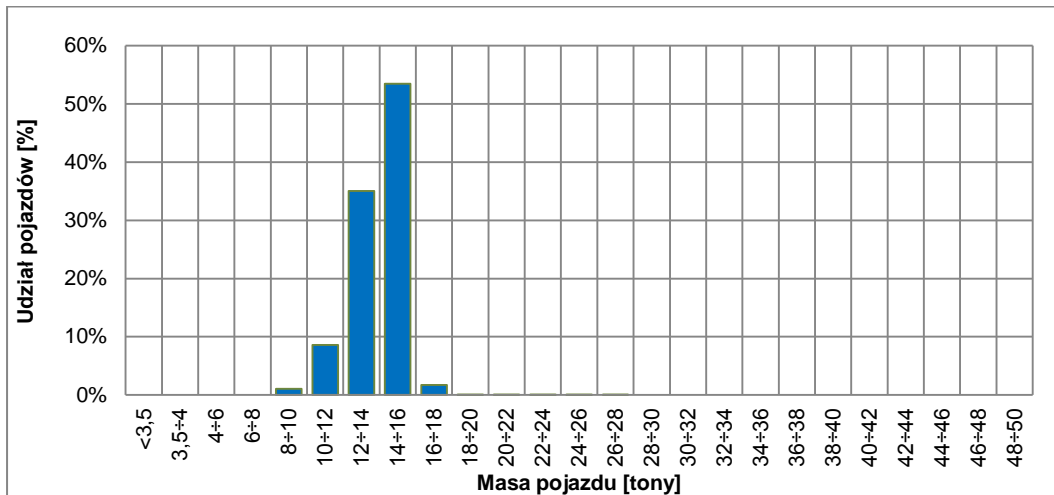
Rysunek A.63. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK46



Rysunek A.64. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK75



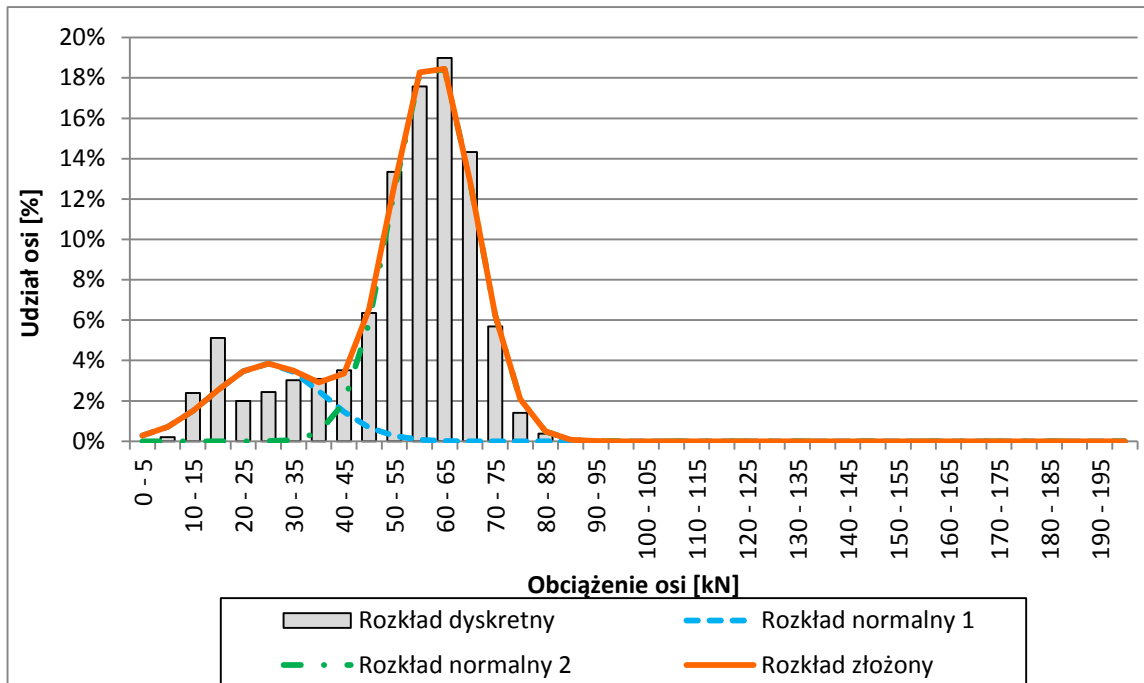
Rysunek A.65. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK79



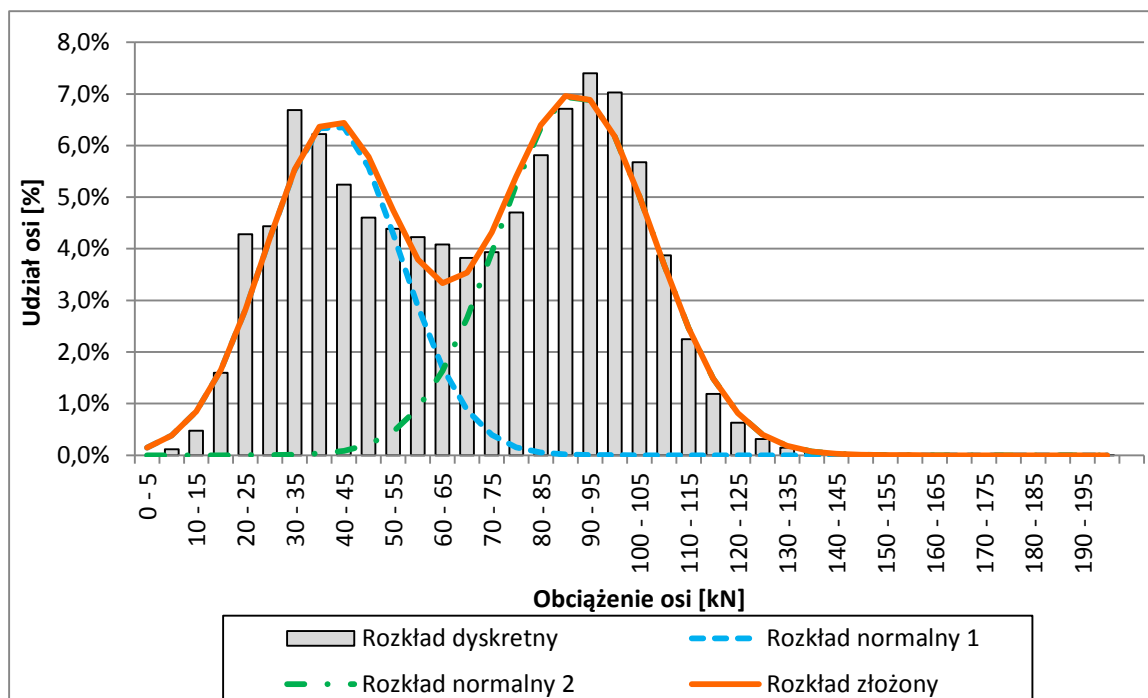
Rysunek A.66. Rozkłady masy całkowitej pojazdów kategorii A na stacji DK94

A.5. Rozkłady dyskretne i modele obciążenia osi pojazdów

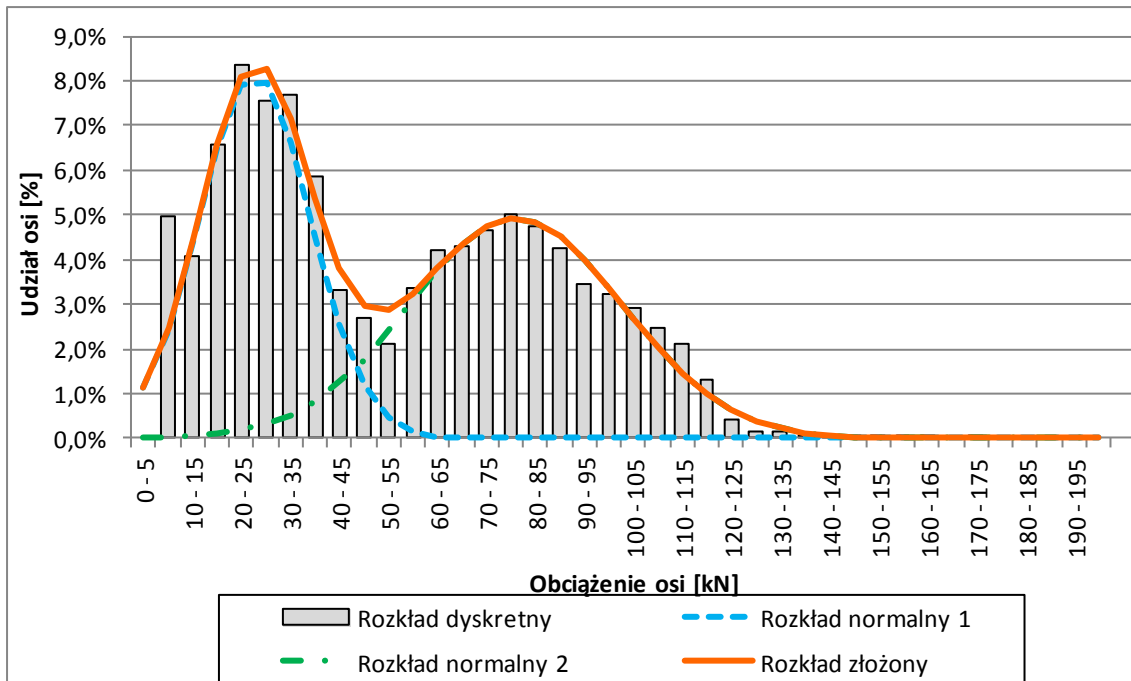
A.5.1. Wykresy rozkładów obciążenia osi na przykładzie stacji DK46 Grodziec



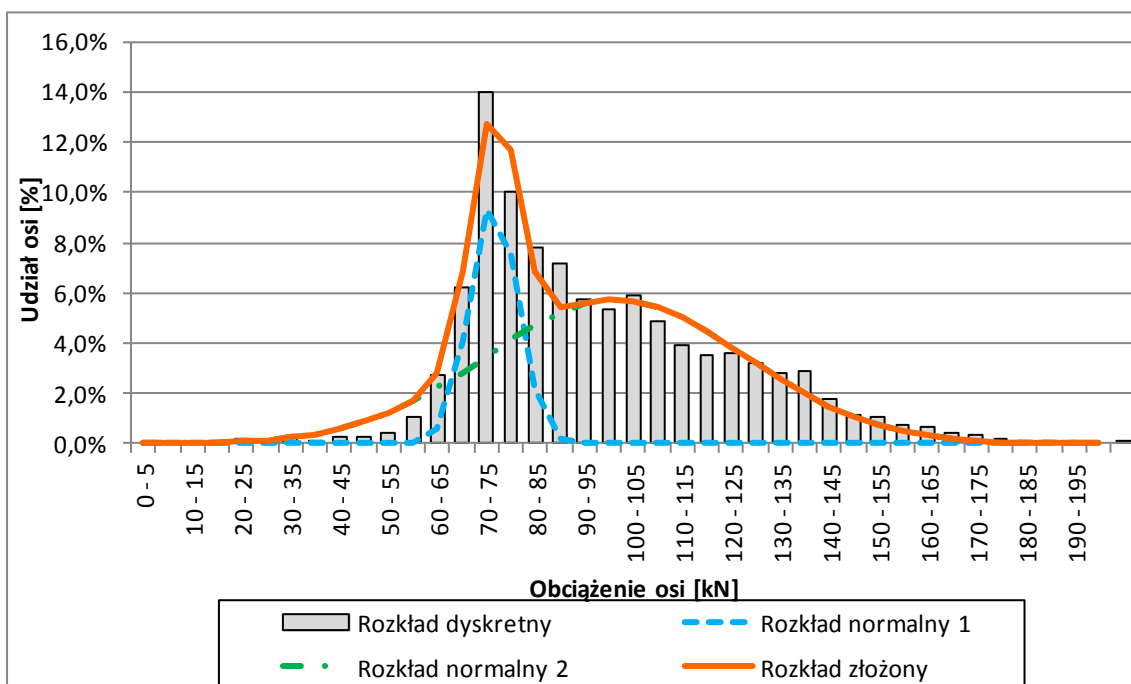
Rysunek A.67. Rozkład obciążenia osi pojedynczych sterownych, stacja DK46 Grodziec



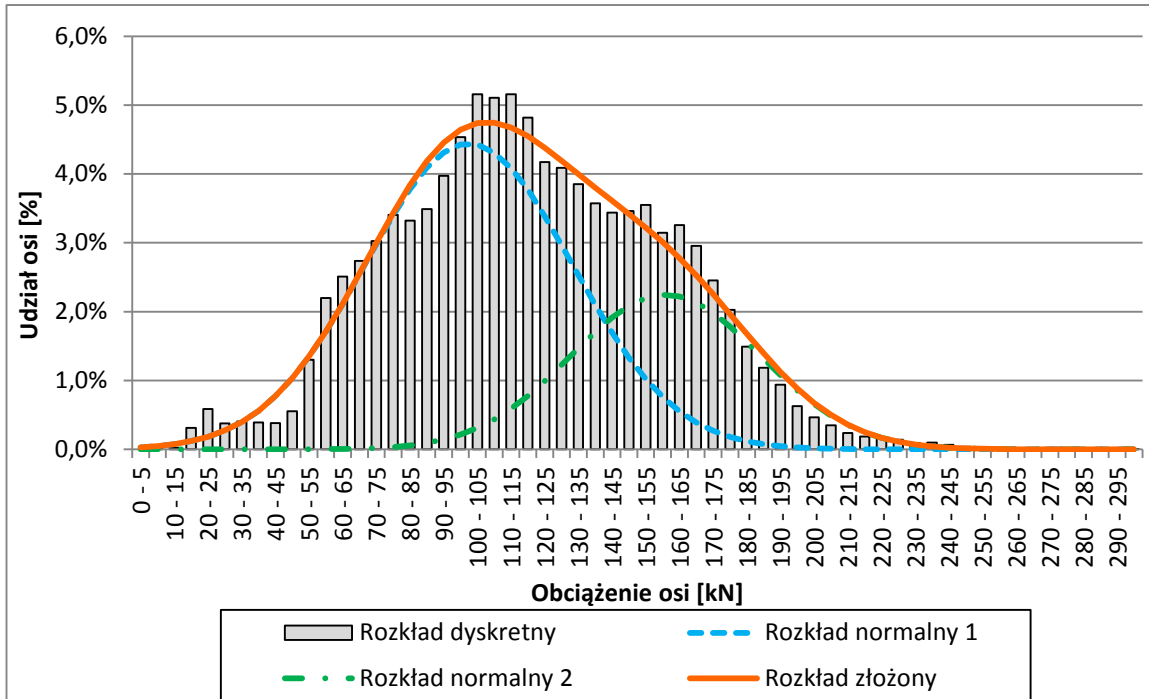
Rysunek A.68. Rozkład obciążenia osi pojedynczych napędowych, stacja DK46 Grodziec



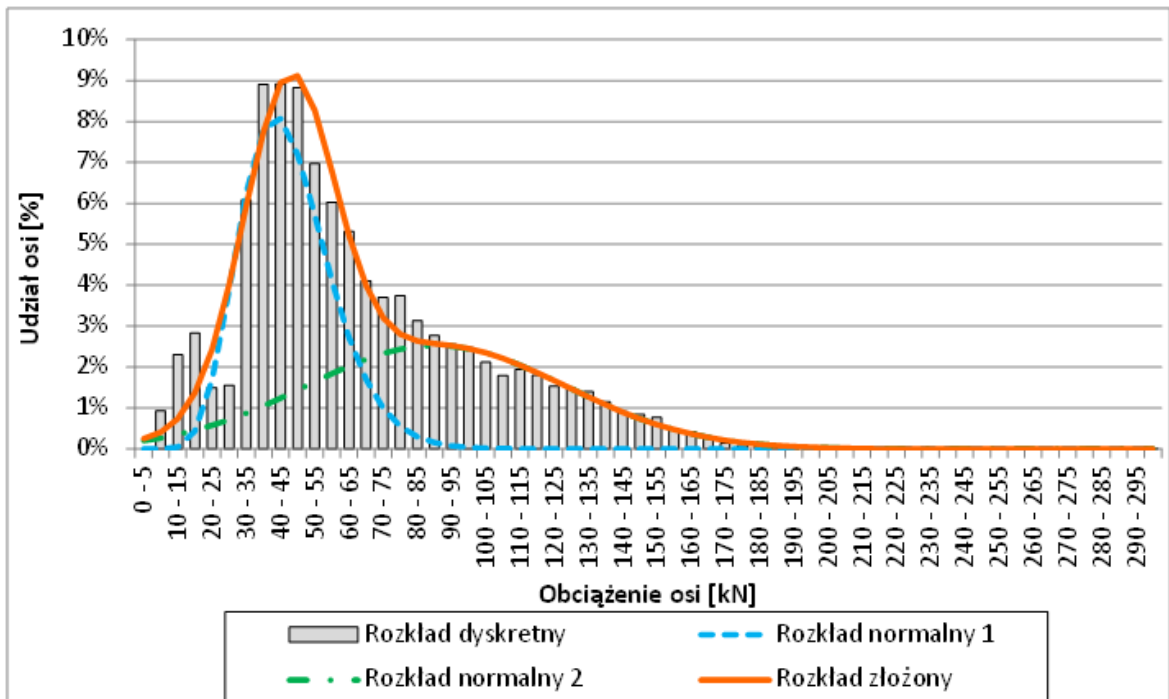
Rysunek A.69. Rozkład obciążenia osi pojedynczych w przyczepach i naczepach, stacja DK46 Grodziec



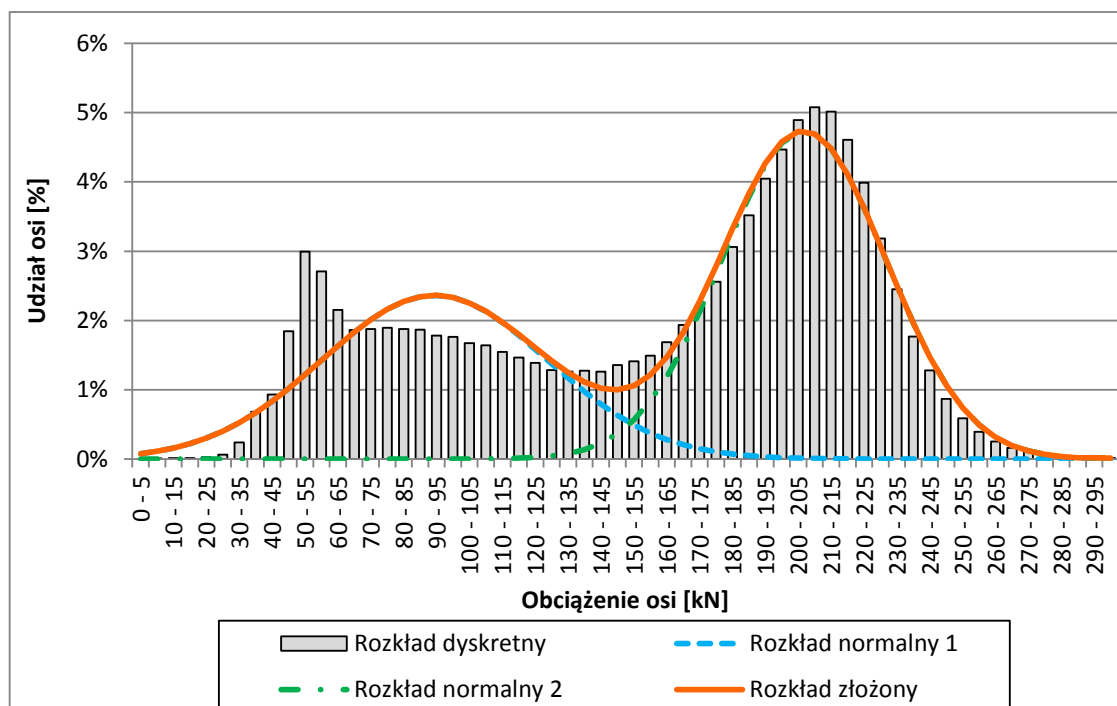
Rysunek A.70. Rozkład obciążenia osi podwójnych sterownych, stacja DK46 Grodziec



Rysunek A.71. Rozkład obciążenia osi podwójnych napędowych, stacja DK46 Grodziec



Rysunek A.72. Rozkład obciążenia osi podwójnych w przyczepach i naczepach, stacja DK46 Grodziec



Rysunek A.73. Rozkład obciążenia osi potrójnych w naczepach, stacja DK46 Grodziec

A.5.2. Zestawienie parametrów modeli rozkładów obciążenia osi

Tablica A.1. Zestawienie parametrów rozkładów obciążenia osi określonych na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu WIM

Stacja WIM	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu						R ²
		μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2	
A2	pojedyncze sterowne	36,56	14,27	0,19	63,78	7,06	0,81	0,995
	pojedyncze napędowe	52,08	17,42	0,40	92,86	16,38	0,60	0,996
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	20,60	9,80	0,71	55,59	23,67	0,29	0,818
	podwójne sterowne	85,49	16,35	0,83	145,04	19,19	0,17	0,964
	podwójne napędowe	107,79	30,61	0,30	132,68	34,10	0,70	0,994
	podwójne w przyczepach / naczepach	57,75	9,50	0,22	95,72	36,20	0,78	0,990
	potrójne w przyczepach / naczepach	109,28	36,84	0,49	204,35	25,59	0,51	0,943
DK11	pojedyncze sterowne	32,63	11,48	0,21	60,00	6,87	0,79	0,990
	pojedyncze napędowe	47,43	13,63	0,55	90,34	14,03	0,45	0,965
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	31,06	11,92	0,41	72,18	10,17	0,59	0,967
	podwójne sterowne	84,87	7,56	0,70	98,14	23,10	0,30	0,990
	podwójne napędowe	107,79	34,40	0,88	132,68	9,61	0,12	0,960
	podwójne w przyczepach / naczepach	52,25	7,20	0,49	84,50	33,82	0,51	0,984
	potrójne w przyczepach / naczepach	104,50	36,41	0,71	201,79	19,99	0,29	0,766

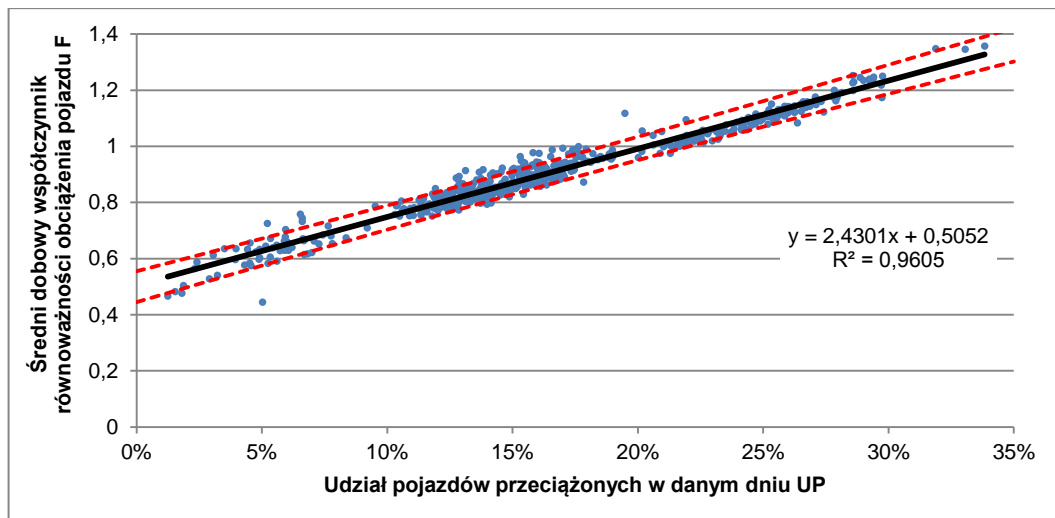
Stacja WIM	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu						R ²
		μ_1	σ_1	ρ_1	μ_2	σ_2	ρ_2	
DK46	pojedyncze sterowne	27,38	10,83	0,21	60,17	8,23	0,79	0,984
	pojedyncze napędowe	40,11	13,70	0,44	89,57	15,87	0,56	0,971
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	25,18	11,38	0,46	78,50	21,75	0,54	0,967
	podwójne sterowne	74,00	4,91	0,24	99,00	26,51	0,76	0,970
	podwójne napędowe	99,94	30,68	0,68	158,45	28,13	0,32	0,980
	podwójne w przyczepach / naczepach	44,85	13,19	0,52	87,87	38,02	0,48	0,949
	potrójne w przyczepach / naczepach	91,91	34,22	0,41	204,21	25,08	0,59	0,965
DK7	pojedyncze sterowne	18,04	2,98	0,28	59,00	11,14	0,72	0,930
	pojedyncze napędowe	33,77	12,35	0,47	90,40	24,16	0,53	0,879
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	27,03	12,48	0,61	107,28	19,50	0,39	0,810
	podwójne sterowne	88,60	14,32	0,82	163,98	49,40	0,18	0,592
	podwójne napędowe	76,83	20,55	0,13	143,87	39,90	0,87	0,983
	podwójne w przyczepach / naczepach	48,44	11,90	0,57	92,48	39,65	0,43	0,934
	potrójne w przyczepach / naczepach	100,61	40,21	0,53	222,61	23,61	0,47	0,752
DK75	pojedyncze sterowne	17,93	3,71	0,22	55,70	12,70	0,78	0,953
	pojedyncze napędowe	35,99	11,69	0,51	88,48	17,92	0,49	0,934
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	25,00	3,95	0,63	61,33	37,88	0,38	0,844
	podwójne sterowne	82,28	9,47	0,68	126,36	19,94	0,32	0,991
	podwójne napędowe	74,31	10,21	0,29	140,47	43,91	0,71	0,877
	podwójne w przyczepach / naczepach	48,96	12,86	0,77	122,19	50,31	0,23	0,882
	potrójne w przyczepach / naczepach	83,84	30,67	0,38	212,91	23,88	0,62	0,820
DK4	pojedyncze sterowne	30,02	12,07	0,30	59,74	8,24	0,70	0,975
	pojedyncze napędowe	38,03	11,56	0,41	88,62	19,66	0,59	0,973
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	26,80	12,06	0,60	103,89	33,64	0,40	0,934
	podwójne sterowne	76,07	9,09	0,41	106,58	33,66	0,59	0,967
	podwójne napędowe	74,75	15,21	0,20	134,37	42,51	0,80	0,971
	podwójne w przyczepach / naczepach	48,49	15,24	0,62	89,43	42,50	0,38	0,958
	potrójne w przyczepach / naczepach	88,16	36,08	0,45	203,61	28,98	0,55	0,731
DK94	pojedyncze sterowne	26,15	9,27	0,26	58,97	8,99	0,74	0,973
	pojedyncze napędowe	38,44	12,07	0,53	89,95	15,35	0,47	0,954
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	30,00	9,33	0,71	68,40	27,86	0,29	0,945
	podwójne sterowne	80,80	7,12	0,66	124,10	28,11	0,34	0,891
	podwójne napędowe	93,42	26,27	0,53	165,87	27,85	0,47	0,953
	podwójne w przyczepach / naczepach	47,00	11,87	0,65	88,61	39,18	0,35	0,950
	potrójne w przyczepach / naczepach	82,38	32,27	0,47	208,32	21,10	0,53	0,721

Stacja WIM	Rodzaj osi	Parametry modelu rozkładu						R ²
		μ_1	σ_1	p_1	μ_2	σ_2	p_2	
DK79	pojedyncze sterowne	25,82	10,37	0,35	61,53	7,91	0,65	0,944
	pojedyncze napędowe	37,54	11,43	0,59	90,02	15,28	0,41	0,93
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	22,81	7,65	0,59	59,46	21,23	0,41	0,957
	podwójne sterowne	78,54	5,47	0,44	122,14	12,95	0,56	0,978
	podwójne napędowe	86,58	31,62	0,66	167,84	19,37	0,34	0,768
	podwójne w przyczepach / naczepach	46,50	5,95	0,83	93,40	46,11	0,17	0,968
	potrójne w przyczepach / naczepach	99,28	43,00	0,40	225,24	15,45	0,60	0,875
S7	pojedyncze sterowne	26,19	10,05	0,21	61,88	8,00	0,79	0,972
	pojedyncze napędowe	43,83	15,39	0,50	95,32	16,31	0,50	0,954
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	26,56	9,36	0,68	93,27	19,14	0,32	0,881
	podwójne sterowne	91,00	8,12	0,12	138,21	12,05	0,88	0,963
	podwójne napędowe	91,17	26,09	0,26	165,93	34,83	0,74	0,965
	podwójne w przyczepach / naczepach	56,23	16,91	0,64	106,41	37,37	0,36	0,839
	potrójne w przyczepach / naczepach	105,91	39,37	0,45	222,00	19,14	0,55	0,851
DK22	pojedyncze sterowne	26,83	9,97	0,25	62,04	8,84	0,75	0,958
	pojedyncze napędowe	40,41	14,41	0,50	90,09	17,12	0,50	0,964
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	28,55	12,13	0,55	65,88	25,52	0,45	0,93
	podwójne sterowne	81,91	8,12	0,55	129,33	22,94	0,45	0,97
	podwójne napędowe	107,47	40,20	0,72	174,02	25,64	0,28	0,953
	podwójne w przyczepach / naczepach	52,89	23,25	0,78	107,35	33,57	0,22	0,843
	potrójne w przyczepach / naczepach	88,01	31,69	0,41	204,88	25,04	0,59	0,843
DK1*	pojedyncze sterowne	33,50	9,67	0,17	61,19	8,56	0,83	0,997
	pojedyncze napędowe	49,55	14,99	0,53	93,75	15,10	0,47	0,978
	pojedyncze w przyczepach / naczepach	28,26	8,65	0,61	64,61	21,36	0,39	0,990
	podwójne sterowne	80,54	12,28	0,67	121,73	9,41	0,33	0,911
	podwójne napędowe	88,63	21,59	0,36	135,49	36,71	0,64	0,980
	podwójne w przyczepach / naczepach	52,02	13,43	0,59	92,81	31,16	0,41	0,950
	potrójne w przyczepach / naczepach	94,77	34,48	0,51	205,70	22,33	0,49	0,843

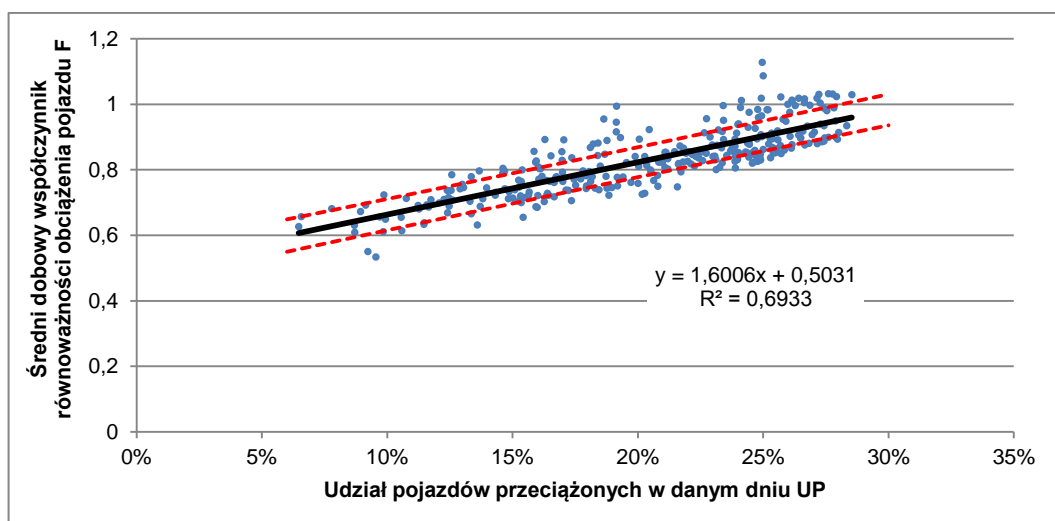
* rozkłady ze stacji DK1 sporządzono dla dostępnych danych z kilku miesięcy w roku 2011 i nie reprezentują rozkładów rocznych, jak na pozostałych stacjach

B. Załącznik do rozdziału 5

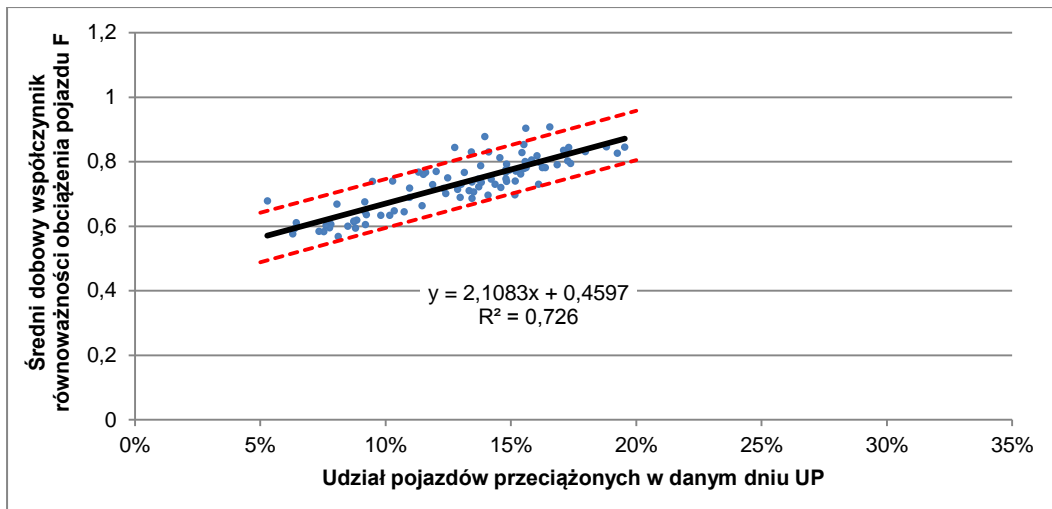
B.1. Zależności pomiędzy średnim dobowym współczynnikiem równoważności obciążenia pojazdu a udziałem pojazdów przeciążonych



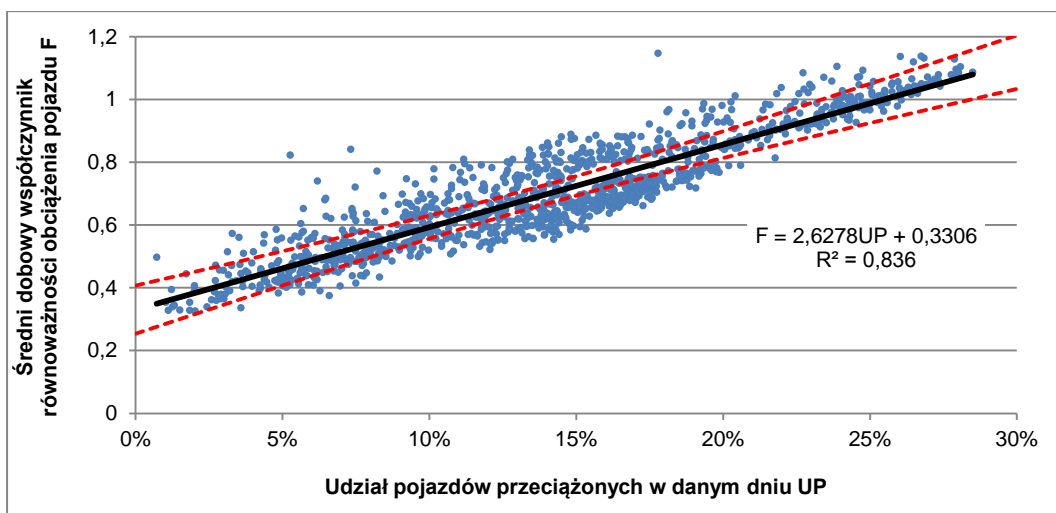
Rysunek B.1. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji A2



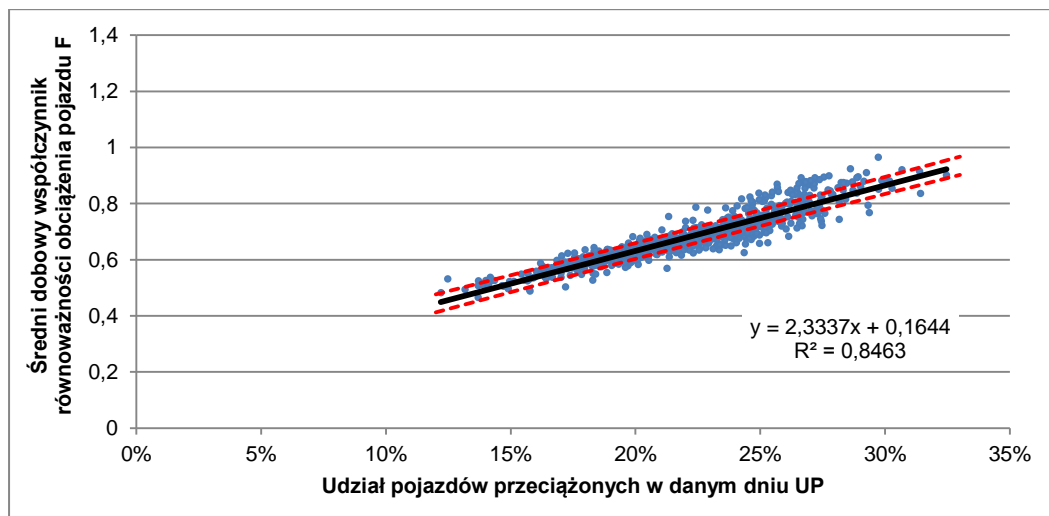
Rysunek B.2. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji S7



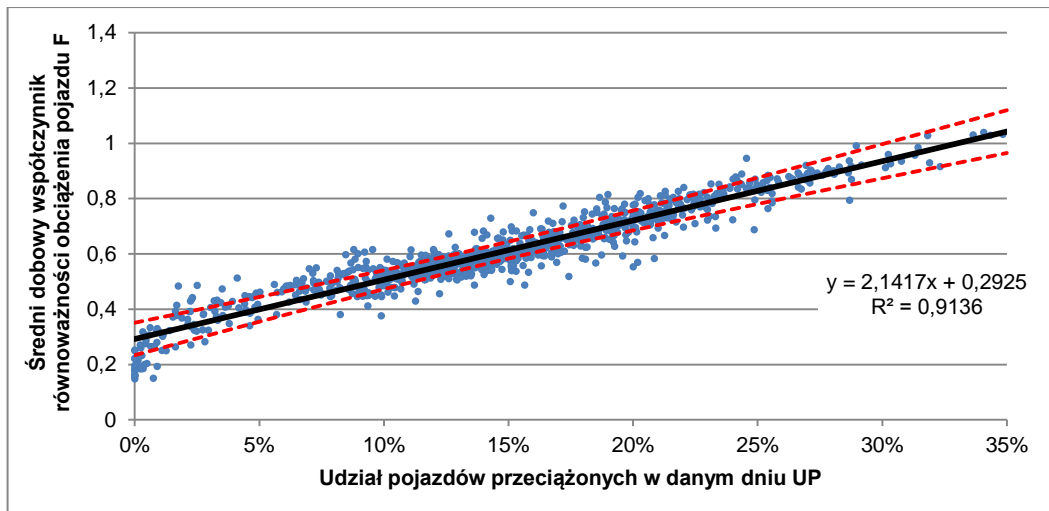
Rysunek B.3. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK1



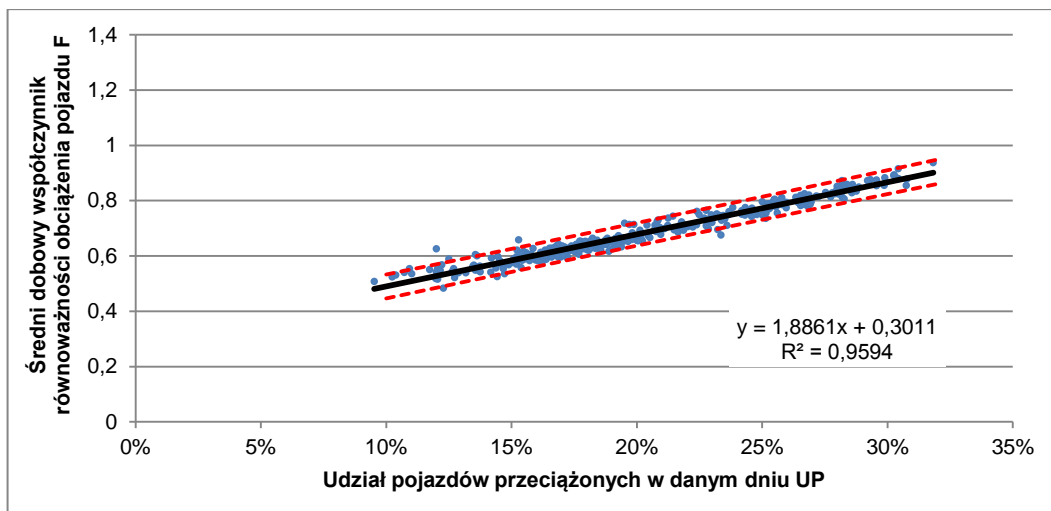
Rysunek B.4. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK4



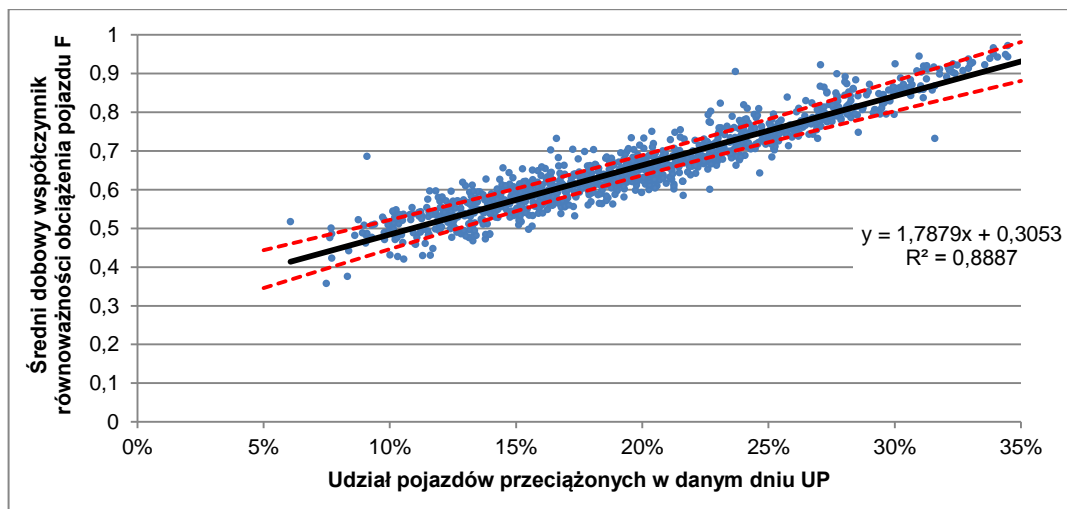
Rysunek B.5. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK7



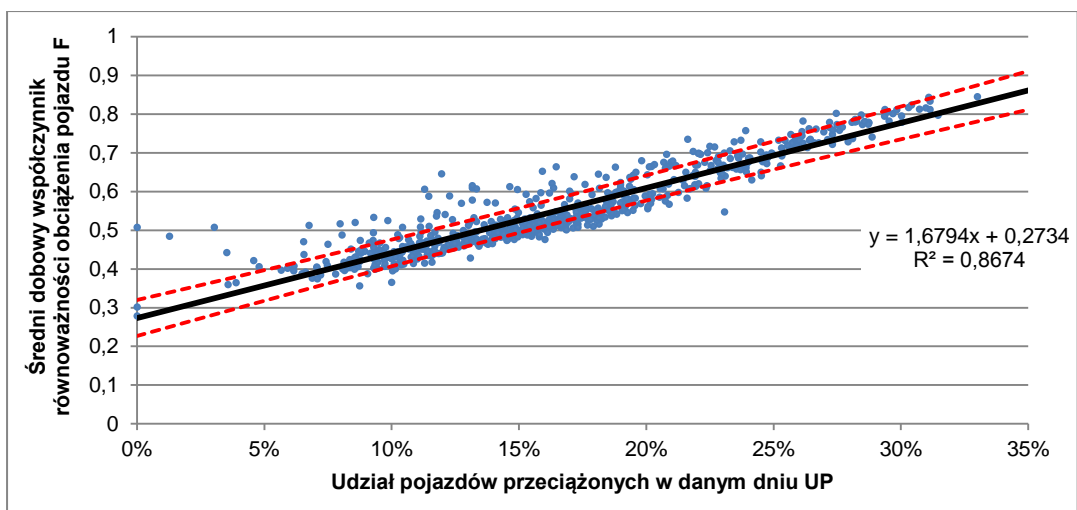
Rysunek B.6. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK11



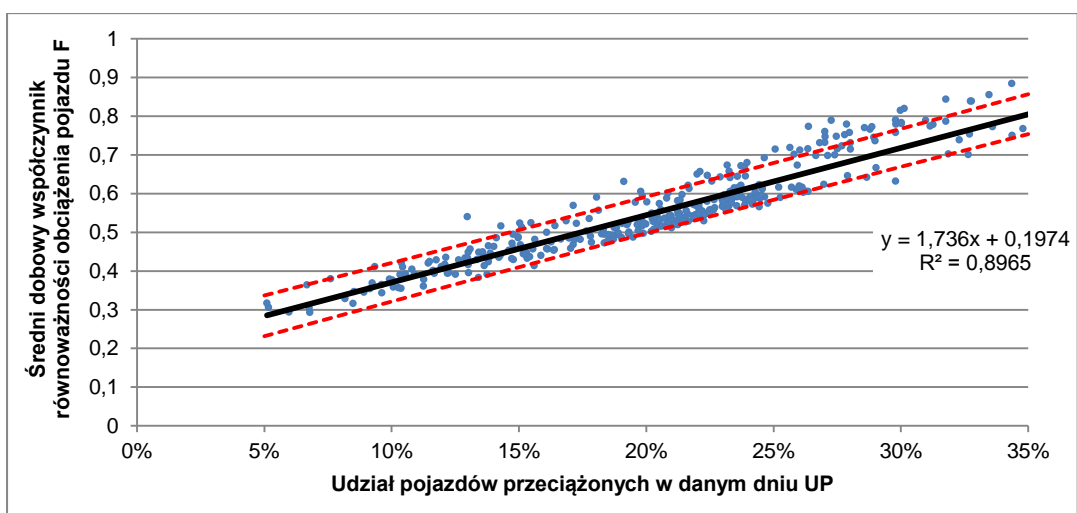
Rysunek B.7. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK22



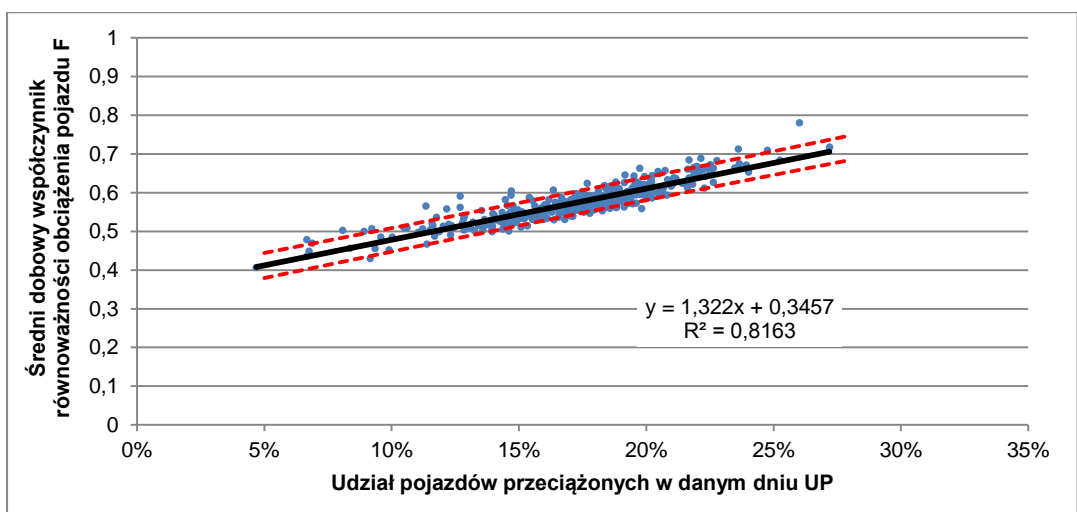
Rysunek B.8. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK46



Rysunek B.9. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK75



Rysunek B.10. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK79



Rysunek B.11. Zależność średniego dobowego współczynnika równoważności obciążenia pojazdu od udziału pojazdów przeciążonych na stacji DK94