

Na prawach rękopisu
Do użytku służbowego

Instytut Inżynierii Lądowej
Politechniki Wrocławskiej

**Wpływ struktury ruchu
na nośność nawierzchni drogowych**

Seria: PRE 2 / 2006

Robert Wardęga

PRACA DOKTORSKA

Słowa kluczowe:
nawierzchnia drogowa,
nośność nawierzchni,
obciążenie osi,
pojazd ciężarowy,
zniszczenie nawierzchni.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło

Wrocław, czerwiec 2006

*Serdeczne podziękowania Panu prof. dr hab. inż. Antoniemu Szydle,
za opiekę naukową oraz cenne uwagi udzielone w trakcie pisania pracy.*

Spis treści	str.
1. WPROWADZENIE.....	5
2. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY	7
3. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA NAWIERZCHNI DROGOWYCH.....	9
3.1. Wprowadzenie.....	9
3.2. Obciążenie ruchem w projektowaniu konstrukcji nawierzchni	10
3.3. Oś obliczeniowa	12
3.4. Kryteria wymiarowania nawierzchni drogowych.....	18
4. KLASYFIKACJA POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	24
4.1. Wprowadzenie.....	24
4.2. Sylwetki pojazdów	24
4.3. Proponowane sylwetki pojazdów	28
4.4. Konfiguracja osi	30
4.5. Ogumienie	31
4.5.1. Rodzaje i wymiary opon	31
4.5.2. Powierzchnia styku opon z nawierzchnią.....	35
5. DOPUSZCZALNE MASY I NACISKI OSI POJAZDÓW	40
5.1. Wprowadzenie.....	40
5.2. Dopuszczalne naciski osi i masy całkowite pojazdów w Polsce	40
5.3. Dopuszczalne naciski osi i masy całkowite pojazdów w Europie.....	46
6. IDENTYFIKACJA NACISKÓW OSI POJAZDÓW NA SIECI DRÓG W POLSCE ...	48
6.1. Wprowadzenie.....	48
6.2. Pomiar nacisków osi i mas pojazdów.....	48
6.3. Struktura rodzajowa i masy całkowite pojazdów na sieci dróg w Polsce.....	53
6.4. Naciski osi pojazdów na sieci dróg w Polsce	56
6.5. Podsumowanie	74
7. MODELE OBLICZENIOWE NAWIERZCHNI DROGOWYCH.....	76
7.1. Wprowadzenie.....	76
7.2. Opis modelu	76
7.3. Obciążenie modelu	79
7.4. Model dyskretny MES.....	82
7.5. Dokładność obliczeń	90
8. WPLYW POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH NA NOŚNOŚĆ NAWIERZCHNI DROGOWYCH.....	92
8.1. Wprowadzenie.....	92
8.2. Założenia obliczeniowe.....	92
8.3. Wpływ osi pojedynczych	95

8.3.1.	Wpływ osi pojedynczych na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych	95
8.3.2.	Współczynniki agresywności osi pojedynczych.....	108
8.3.3.	Podsumowanie.....	121
8.4.	Wpływ osi wielokrotnych	121
8.4.1.	Wpływ osi wielokrotnych na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych	121
8.4.2.	Współczynniki agresywności osi wielokrotnych.....	136
8.4.3.	Podsumowanie.....	145
8.5.	Wpływ sylwetek pojazdów.....	146
8.5.1.	Wpływ pojazdów ciężarowych osi na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych	146
8.5.2.	Współczynniki agresywności sylwetek pojazdów	151
8.6.	Podsumowanie	161
9.	WYKORZYSTANIE WIDM OBCIĄŻEŃ OSI W OCENIE NOŚNOŚCI NAWIERZCHNI DROGOWYCH	163
9.1.	Wprowadzenie.....	163
9.2.	Widma obciążeń osi	163
9.3.	Wykorzystanie widm obciążeń osi w ocenie nośności nawierzchni drogowych.....	165
9.4.	Widma obciążeń osi w projektowaniu.....	168
9.4.1.	Postać dyskretna widm	169
9.4.2.	Postać ciągła widm	171
9.5.	Podsumowanie	174
10.	WPLYW STANU TECHNICZNEGO NAWIERZCHNI NA WIELKOŚĆ ODDZIAŁYWANIA POJAZDÓW.....	175
10.1.	Wprowadzenie.....	175
10.2.	Wskaźnik równości podłużnej nawierzchni IRI.....	175
10.3.	Oddziaływanie dynamiczne pojazdu, a wskaźnik IRI.....	177
10.4.	Oddziaływanie dynamiczne pojazdu w projektowaniu	185
10.5.	Podsumowanie	187
11.	PODSUMOWANIE.....	188
12.	WNIOSKI KOŃCOWE	191
	LITERATURA	193

1. WPROWADZENIE

Obserwowany na przestrzeni ostatnich lat intensywny wzrost natężenia ruchu oraz obciążeń osi pojazdów ciężarowych jest podstawową przyczyną postępującej degradacji nawierzchni drogowych. Taka jest powszechnie panująca opinia wśród projektantów i użytkowników dróg. Projektant, opracowując projekt konstrukcji nawierzchni, dąży przede wszystkim do zapewnienia wymaganej nośności nawierzchni, przez którą należy rozumieć zdolność do przenoszenia obciążeń od przejeżdżających pojazdów.

Z nośnością nawierzchni ściśle jest związane pojęcie trwałości zmęczeniowej, która oznacza liczbę przejazdów osi obliczeniowych, jaką nawierzchnia może przenieść aż do osiągnięcia stanu granicznego nośności, a więc przez cały swój obliczeniowy okres eksploatacji. Z kolei liczba osi obliczeniowych, która jest wyznaczana dla projektowanej nawierzchni, jest uzależniona od struktury rodzajowej prognozowanego natężenia ruchu i od współczynników przeliczeniowych (agresywności) sylwetek pojazdów na osie obliczeniowe. Obowiązujące obecnie w Polsce współczynniki przeliczeniowe [93, 94, 95] wyznaczone były już prawie 10 lat temu dla znacznie mniejszych obciążeń osi oraz dla innych sylwetek pojazdów poruszających się po drogach. Nie bez znaczenia pozostaje również fakt wstąpienia Polski do Unii Europejskiej. Podczas negocjacji o członkostwo Polski w UE, ustalono okres przejściowy do dnia 31 grudnia 2010 r. [200], na wprowadzenie wymagań dotyczących maksymalnych dopuszczalnych wymiarów, maksymalnych dopuszczalnych wag i nacisków osi pojazdów w ruchu międzynarodowym zawartych w dyrektywie 96/53 [187]. Krokiem w stronę przyjęcia norm unijnych było wprowadzenie rozporządzenia Ministra Infrastruktury [193] z dnia 30 kwietnia 2004 r. zwiększające dopuszczalny nacisk pojedynczej osi napędowej pojazdu do 112,8 kN.

Należy tutaj również wspomnieć o zmianach zachodzących w konstrukcji pojazdów ciężkich i ich strukturze rodzajowej. Obecnie w transporcie dalekobieżnym dominują ciągniki siodłowe pięcioosiowe, w których w naczepach stosowane są potrójne osie o kołach pojedynczych typu „Super Single”, a opony typu „Super Single Drive” stosowane są coraz częściej w zastępstwie opon bliźniaczych osi napędowych. Jest oczywiste, że wszystkie te opony, w różnym stopniu oddziałują na nawierzchnię drogową i przyczyniają się do jej zniszczenia. Zatem wymaga odpowiedzi pytanie: który pojazd jest bardziej szkodliwy i w jaki sposób oddziałuje on na nawierzchnię ?

Istnieją więc przesłanki świadczące o tym, że aktualnie obowiązujące współczynniki przeliczeniowe, stosowane do wymiarowania konstrukcji nawierzchni, nie oddają rze-

czywistego oddziaływania pojazdów oraz pośrednio przyczyniają się do błędnego oszacowania trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Niniejsza praca jest próbą ukazania innego spojrzenia na to zagadnienie oraz opracowania nowej metody pozwalającej na uwzględnianie na etapie projektowania rzeczywistego obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów.

W pracy wprowadzono następujące pojęcia:

- **oś obliczeniowa** – zastępcza oś pojedyncza o kołach pojedynczych i zadanim obciążeniu (np. 100 kN) wywołująca określoną szkodę zmęczeniową w nawierzchni,
- **sylwetka pojazdu** – pojedynczy pojazd ciężarowy, pojazd ciężarowy wraz z przyczepą lub ciągnik siodłowy charakteryzujący się określoną konfiguracją osi,
- **współczynnik przeliczeniowy (agresywności)** – współczynnik określający stosunek wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej lub wielokrotnej (bądź też sylwetki pojazdu) w stosunku do wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni przejściem jednej osi obliczeniowej,
- **agresywność** - niszczące działanie osi pojazdu, bądź też całej sylwetki pojazdu względem nawierzchni drogowych, wyrażone za pomocą współczynnika przeliczeniowego (agresywności),
- **szkoda zmęczeniowa** – utrata trwałości zmęczeniowej wywołana przejściem jednej osi pojedynczej lub wielokrotnej (bądź też sylwetki pojazdu),
- **widmo obciążeń osi** – statystyczny rozkład nacisków osi występujący w danym przekroju drogi.

2. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest określenie wpływu pojazdów ciężarowych na nośność nawierzchni oraz opracowanie metody pozwalającej na uwzględnienie tego wpływu przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych. Dla zrealizowania w/w celu, sformułowano dwie tezy pracy.

- 1. Stosowane aktualnie w Polsce, w wymiarowaniu nawierzchni drogowych, współczynniki przeliczeniowe (agresywności) pojazdów rzeczywistych na osie obliczeniowe, nie odzwierciedlają istniejącej struktury rodzajowej pojazdów i ich oddziaływania na nawierzchnie drogowe.**
- 2. Widma obciążeń osi, których kształt i podstawowe statystyki opisowe zależne są od struktury rodzajowej pojazdów, pozwalają na określenie rzeczywistego oddziaływania pojazdów na nawierzchnie drogowe.**

Dla udowodnienia powyższych tez, w pracy przedstawiono:

- identyfikację nacisków osi pojazdów na sieci dróg w Polsce,
- modele obliczeniowe nawierzchni drogowych obciążonych rzeczywistymi sylwetkami i osiami pojazdów,
- analizę oddziaływania sylwetek pojazdów na nawierzchnie drogowe w oparciu o zbudowane modele obliczeniowe nawierzchni,
- algorytm oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych z wykorzystaniem widm obciążeń osi.

Praca składa się z 12 rozdziałów oraz spisu literatury. Rozdział pierwszy stanowi krótkie wprowadzenie do omawianego zagadnienia. W rozdziale drugim, bieżącym, przedstawiono cel pracy, sformułowano tezy pracy i jej zakres. Kolejny rozdział, jest przeglądem literatury, odnoszącej się do trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych i ich konstrukcji, a dotyczącej konkretnie takich zagadnień jak obciążenie ruchem i sposób jego uwzględniania w projektowaniu nawierzchni, oś obliczeniowa i jej zastosowanie oraz stosowane w wymiarowaniu kryteria zmęczeniowe.

W rozdziale czwartym przedstawiono autorską klasyfikację najczęściej występujących pojazdów ciężarowych. Klasyfikacja ta, w przeciwieństwie do już opisanych w literaturze, odnosi się do sposobu i wielkości oddziaływania pojazdów na nawierzchnię z uwzględnieniem liczby i konfiguracji ich osi, została zatem przyjęta jako podstawa do dalszych analiz i rozważań zawartych w pracy. W rozdziale tym przedstawiono również charakterystykę ogumienia stosowanego obecnie w pojazdach ciężarowych. Rozdział piąty

stanowi przegląd przepisów obowiązujących w Polsce i Unii Europejskiej, odnoszących się do dopuszczalnych mas pojazdów i nacisków ich osi zarówno w ruchu krajowym, jak i ponadgranicznym. Dla sylwetek pojazdów sklasyfikowanych w rozdziale 4, przedstawiono również przykładowe dopuszczalne naciski osi. W kolejnym rozdziale, szóstym, dokonano identyfikacji występujących nacisków osi i mas pojazdów na sieci dróg w Polsce. Identyfikację przeprowadzono na podstawie pomiarów wykonywanych na wybranych drogach krajowych w Polsce: droga nr 11, nr 3, nr 8, nr 35, nr 46 i A-4. Pomiary na drodze krajowej nr 11 w miejscowości Buczyna wykonywane w latach 2000-2001 i 2005 posłużyły również do analizy zmian w strukturze rodzajowej pojazdów ciężarowych.

W siódmym rozdziale zawarto opis przyjętych modeli obliczeniowych sześciu typowych nawierzchni podatnych, jednej nawierzchni półsztywnej i jednej sztywnej. Modele nawierzchni obciążano w sposób charakterystyczny dla rzeczywistych osi pojazdów (osi pojedynczych, podwójnych o kołach pojedynczych i bliźniaczych oraz osi potrójnych o kołach typu „Super Single”), pozwalający na określenie maksymalnych odkształceń i naprężeń wywoływanych w nawierzchniach przejściem poszczególnych osi pojazdów. W rozdziale tym sprecyzowano również sposób dyskretyzacji tych modeli, w celu prowadzenia dalszej analizy opartej na MES.

Kolejny rozdział, ósmy, poświęcony jest wpływowi sylwetek pojazdów ciężarowych na nośność nawierzchni drogowych. Ocenę oddziaływania pojazdów na nawierzchnię oparto o analizę numeryczną opracowanych w rozdziale siódmym modeli nawierzchni, obciążonych osiami pojazdów oraz na kryteriach wymiarowania. W rozdziale tym, w pierwszej kolejności określono wpływ osi (pojedynczych oraz wielokrotnych) na trwałość zmęczeniową nawierzchni drogowych oraz wyznaczono współczynniki agresywności poszczególnych osi. Analizą objęto osie pojedyncze o kołach pojedynczych i bliźniaczych oraz osie wielokrotne: podwójne o kołach pojedynczych i bliźniaczych oraz potrójne o kołach typu „Super Single”, przy różnych rozstawach osi składowych (1,00 m i 1,35 m). Następnie, mając scharakteryzowany szkodliwy wpływ na nawierzchnie drogowe poszczególnych osi składowych pojazdów, wykorzystując zasadę superpozycji, wyznaczono dla sylwetek pojazdów sklasyfikowanych w rozdziale czwartym współczynniki agresywności, które pozwoliły z kolei na weryfikację obowiązujących w Polsce współczynników przeliczeniowych na osie 100 kN.

W rozdziale dziewiątym omówiono widma obciążeń osi i ich wykorzystanie w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych. Z uwagi na różnice w sposobie oddziaływania osi pojedynczych i wielokrotnych opracowano widma osi: pojedynczych,

podwójnych i potrójnych w postaci dyskretnej i ciągłej, które posłużyły następnie do oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych. W rozdziale tym przedstawiono również praktyczne wykorzystanie w wymiarowaniu nawierzchni drogowych opracowanych widm oraz odpowiadających im szkód zmęczeniowych.

Rozdział dziesiąty zawiera opis wpływu stanu technicznego nawierzchni (a dokładnie nierówności podłużnych) na wartości wyznaczone w rozdziale ósmym szkód zmęczeniowych oraz współczynników agresywności. Podsumowanie prowadzonych badań przedstawiono w rozdziale jedenastym, a wnioski końcowe zamieszczono w rozdziale dwunastym.

3. TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA NAWIERZCHNI DROGOWYCH

3.1. Wprowadzenie

Każda nawierzchnia drogowa powinna spełniać określone wymagania dotyczące jej nośności, równości podłużnej i poprzecznej, szorstkości oraz jej stanu powierzchni [95, 156, 189]. Wymagania te, powinny być spełnione w całym okresie eksploatacji nawierzchni, jednak nieustannie oddziałujące na nawierzchnię czynniki zewnętrzne (głównie obciążenia od poruszających się pojazdów, temperatura otoczenia oraz woda powierzchniowa i gruntowa) przyczyniają się do pogorszenia jej stanu technicznego oraz do utraty nośności. Wpływ przejeżdżających pojazdów na nawierzchnie drogowe oraz sposób pracy i zniszczenia konstrukcji nawierzchni jest już od wielu lat przedmiotem szeroko zakrojonych badań [1, 5, 9, 10, 13, 23, 48, 56, 60, 65, 67, 71, 78, 81, 92, 98, 106, 111, 124, 141, 152, 170, 185]. Obecnie przyjmuje się, że utrata nośności przez nawierzchnie drogowe następuje w momencie osiągnięcia przez nawierzchnię stanu granicznego nośności [7, 37, 45, 68, 75, 86, 117], który objawia się powstawaniem uszkodzeń strukturalnych nawierzchni lub spękań zmęczeniowych. Do uszkodzeń nawierzchni asfaltowych wywołanych ruchem pojazdów zaliczyć można:

- a) uszkodzenia strukturalne, wśród których wyróżnia się następujące deformacje trwałe:
 - lepkoplastyczne – podlegają nim warstwy asfaltowe, do nich zaliczyć można koleiny i tarki,
 - strukturalne – odkształcenia podłoża pod konstrukcją nawierzchni;oraz spękania zmęczeniowe;
- b) uszkodzenia powierzchniowe (np. ubytki w warstwie ścieralnej, ubytki ziaren kruszywa).

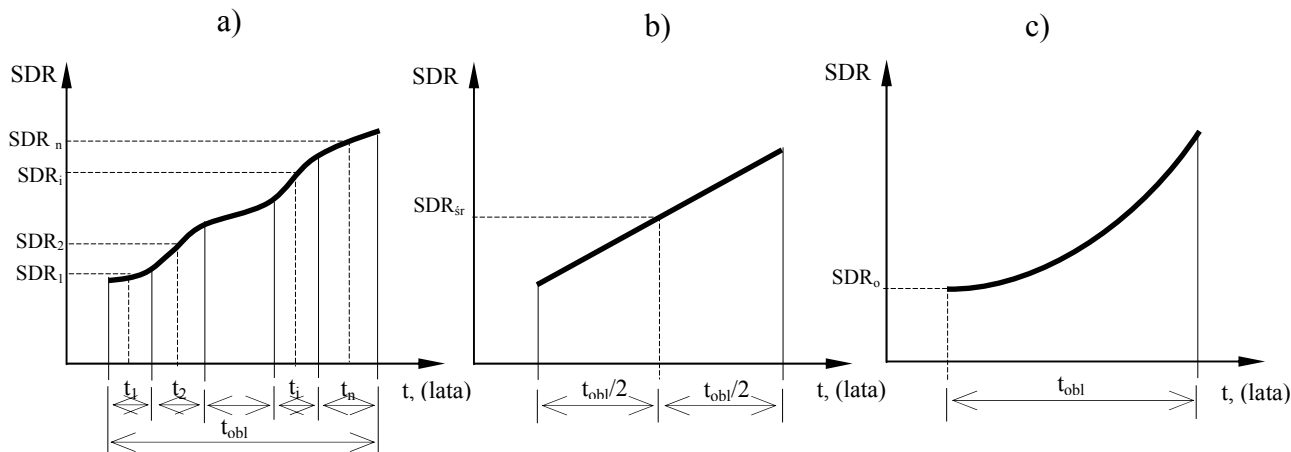
Wśród uszkodzeń nawierzchni betonowych wyróżnia się [147]:

- a) uszkodzenia strukturalne:
 - pęknięcia płyt, odłamania narożników (lub krawędzi),
 - uszkodzenia przy szczelinach oraz klawiszowanie płyt.
- b) uszkodzenia powierzchniowe (np. lejki, jamki i złuszczenia nawierzchni).

3.2. Obciążenie ruchem w projektowaniu konstrukcji nawierzchni

W wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni drogowych brane jest pod uwagę sumaryczne prognozowane natężenie ruchu pojazdów ciężarowych [128], a okres, na jaki wykonywana jest prognoza natężenia ruchu pojazdów, jest uzależniony od zakładanego okresu eksploatacji nawierzchni i wynosi 20 lat dla nawierzchni podatnych i półsztywnych [93, 189] lub 30 lat dla nawierzchni sztywnych [94, 189]. W celu określenia całkowitego obciążenia ruchem stosowane są trzy metody (rys. 3.1).

Pierwsza z nich, (rys. 3.1 a) pozwala na obliczenie ruchu całkowitego przy dowolnym przebiegu wzrostu ruchu w okresie obliczeniowym, druga może być stosowana przy założeniu równomiernego wzrostu ruchu (rys. 3.1 b), a trzecia w przypadku założenia stałego wzrostu geometrycznego (rys. 3.1 c).



Rys. 3.1. Obliczanie ruchu całkowitego w okresie obliczeniowym eksploatacji nawierzchni: a) – metoda 1, b) – metoda 2, c) – metoda 3 [95]

Pierwsza metoda (rys. 3.1.a), określa ruch całkowity zależnością:

$$N_{calc} = 365 \cdot f_1 \cdot \sum_{i=1}^n SDR_i \cdot t_i \quad (3.1)$$

gdzie: SDR_i – Średni Dobowy Ruch w i-tym okresie,
 f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu,

n – liczba okresów dla których wyznaczono SDR w okresie obliczeniowym,

t_i – liczba lat w i -tym okresie.

Druga z metod (rys. 3.1.b), ruch całkowity opisuje równaniem:

$$N_{calc} = 365 \cdot f_1 \cdot SDR_{\dot{s}r} \cdot t_{obl} \quad (3.2)$$

gdzie: $SDR_{\dot{s}r}$ – Średni Dobowy Ruch w połowie okresu obliczeniowego,

t_{obl} – długość okresu obliczeniowego wyrażona w latach,

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

Trzecia metoda (rys. 3.1.c) wykorzystuje zależność:

$$N_{calc} = 365 \cdot f_1 \cdot SDR_o \cdot C \quad (3.3)$$

$$C = \frac{(1+p)^{t_{obl}} - 1}{p} \quad (3.4)$$

gdzie: SDR_o – Średni Dobowy Ruch na początku okresu obliczeniowego,

C – współczynnik akumulacji ruchu w okresie obliczeniowym,

p – względny przyrost ruchu w jednym roku, średnio w okresie obliczeniowym,

t_{obl} – długość okresu obliczeniowego wyrażona w latach,

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

Wyznaczając ruch całkowity, można wykorzystać również zależność [170]:

$$N_{calc} = 365 \cdot f_1 \cdot SDR_o \cdot \int_0^T (1+\tau)^T dT \quad (3.5)$$

gdzie: SDR_o – Średni Dobowy Ruch na początku okresu obliczeniowego,

τ – procentowy wzrost ruchu w ciągu roku,

T – ostatni rok prognozy ($T=20$ w przypadku nawierzchni podatnych i półsztywnych, lub $T=30$ dla na nawierzchni sztywnych),

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

a uproszczenie zależności (3.5) umożliwia obliczenie ruchu całkowitego przy założeniu równomiernego wzrostu ruchu [170]:

$$N_{calc} = 365 \cdot f_1 \cdot (SDR_o + SDR_T) \cdot T \quad (3.6)$$

gdzie: SDR_o – Średni Dobowy Ruch na początku okresu obliczeniowego,

SDR_T – Średni Dobowy Ruch na końcu okresu obliczeniowego,

T – ostatni rok prognozy ($T=20$ w przypadku nawierzchni podatnych i półsztywnych, lub $T=30$ dla na nawierzchni sztywnych),

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

Kolejnym zagadnieniem wynikającym bezpośrednio z obciążenia ruchem pojazdów, jest rozkład obciążeń w przekroju poprzecznym drogi. Zależy on głównie od przekroju poprzecznego drogi (rozkład obciążeń w przekroju drogi jednojezdniowej dwupasowej różni się od rozkładu obciążeń jaki można zaobserwować w przypadku drogi dwujezdniowej lub jednojezdniowej czteropasowej) oraz od jej geometrii (odcinki krzywoliniowe w planie wywołują zmiany w trajektoriach jadących pojazdów, co jest przyczyną mniejszej w stosunku do odcinków prostoliniowych, koncentracji występujących obciążeń). Praktycznie w przekroju poprzecznym drogi nie występuje punkt, którego obciążenie jest równe całkowitej liczbie pojawiających się obciążeń. W praktyce projektowej, za rozkład obciążenia w przekroju poprzecznym drogi odpowiadają współczynniki obliczeniowego pasa ruchu.

3.3. Oś obliczeniowa

Geneza powstania pojęcia osi obliczeniowej sięga końca lat pięćdziesiątych i początku lat sześćdziesiątych dwudziestego wieku, kiedy to w latach 1958 – 1960 w Ottawie (Illinois) American Association of State Highway Officials (AASHO) zapoczątkowało badania nawierzchni drogowych w wielkiej skali. Specjalnie dla potrzeb zainicjowanego programu badawczego wybudowano 6 torów badawczych o różnych konstrukcjach nawierzchni podatnych oraz sztywnych. Po torach tych poruszało się z prędkością 35 mph 200 pojazdów należących do US Army Transportation Corps. Po analizie wyników badań AASHO Shook i Finn [91, 165] podali sposób przeliczania pojazdów o obciążeniu osi L_1 na pojazdy o innym obciążeniu osi wynoszącym L :

$$F_{L_1} = \frac{W_L}{W_{L_1}} = 10^{0,2666(L_1-L)} \quad (3.7)$$

gdzie: F_{L_1} – współczynnik przeliczeniowy pojazdów o obciążeniu osi L_1 na pojazdy o obciążeniu osi L ,
 W_L – liczba osi o obciążeniu L ,
 W_{L_1} – liczba osi o obciążeniu L_1 .

Teoretycznie, w celu określenia obciążenia ekwiwalentnego, można posłużyć się krzywą zmęczenia Wöhlera (rys. 3.2) przedstawiającą zależność poziomu naprężeń σ od liczby cykli N (im niższy poziom naprężeń, tym większa liczba cykli) oraz równaniem reprezentującym tzw. metodę zastępczej liczby cykli obciążeń [166, 168]:

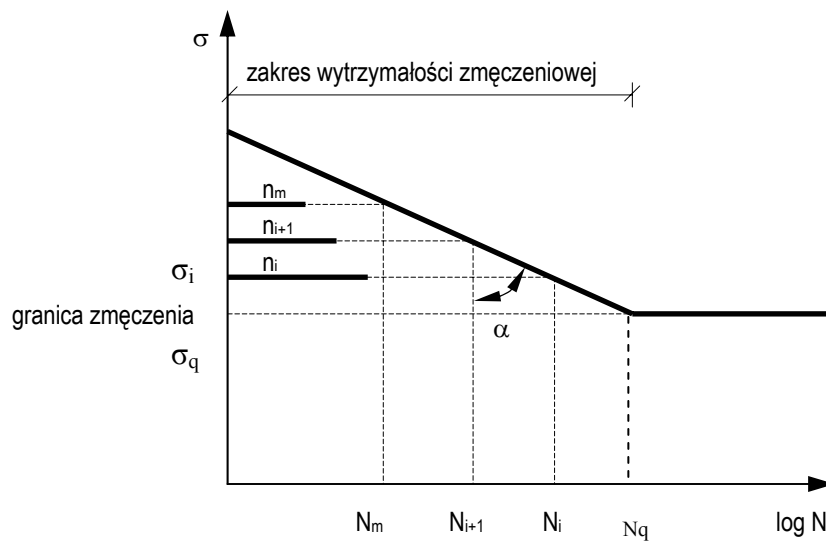
$$N_i \cdot \sigma_i^m = N_q \cdot \sigma_q^m = const \quad (3.8)$$

$$N_i = N_q \cdot \left(\frac{\sigma_q}{\sigma_i} \right)^m \quad (3.9)$$

gdzie: N_i – dopuszczalna liczba obciążeń jaką może przejść materiał przy obciążeniu σ_i ,

N_q – dopuszczalna liczba obciążeń jaką może przejść materiał przy obciążeniu σ_q .

m – tangens nachylenia krzywej zmęczeniowej.



Rys. 3.2. Krzywa zmęczeniowa Wöhlera.

Do oceny sumarycznego wpływu ruchu pojazdów, wykorzystywana jest powszechnie hipoteza zmęczeniowa Minera. Zgodnie z tą hipotezą, konstrukcja poddana działaniu naprężeń $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_m$ i odpowiadającej im cykli obciążeń $n_1, n_2, n_3, \dots, n_m$ ulega zniszczeniu [19, 53, 165, 170], gdy:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \geq 1 \quad (3.10)$$

gdzie: n_i – liczba obciążeń wywołująca σ ,

N_i – dopuszczalna liczba obciążeń jaką może przejść materiał przy obciążeniu σ_i .

Scharakteryzowane krótko powyżej badania i przedstawione zależności, wykorzystywane są powszechnie do przeliczania sylwetek pojazdów na osie, a tym samym do oceny agresywności ruchu [96]. W Polsce, obciążenie ruchem w odniesieniu do liczby osi

obliczeniowych, oblicza się w oparciu o współczynniki przeliczeniowe trzech grup pojazdów, [93, 94, 95, 171] (samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe z przyczepami oraz autobusy) na osie obliczeniowe 100 lub 115 kN:

$$L = f_1 \cdot (N_1 \cdot r_1 + N_2 \cdot r_2 + N_3 \cdot r_3) \quad \text{osi/pas/dobę} \quad (3.11)$$

gdzie: L – liczba osi obliczeniowych 100 lub 115 kN na dobę na pas obliczeniowy,
 f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu,
 N_1 – średni dobowy ruch samochodów ciężarowych bez przyczep w przekroju drogi,
 N_2 – średni dobowy ruch samochodów ciężarowych z przyczepami w przekroju drogi,
 N_3 – średni dobowy ruch autobusów w przekroju drogi,
 r_1, r_2, r_3 – współczynniki przeliczeniowe na osie obliczeniowe 100 lub 115 kN grup pojazdów: samochodów ciężarowych bez przyczep, samochodów ciężarowych z przyczepami i autobusów, które określa się z zależności [94]:

$$r_i = \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^m \quad (3.12)$$

gdzie: P_i – obciążenie równoważne pojazdów:

$P_1 = 65$ kN – dla samochodów ciężarowych bez przyczep,

$P_2 = 105 \div 118$ kN dla samochodów ciężarowych z przyczepami,

$P_3 = 90$ kN dla autobusów,

P_o – obciążenie osi obliczeniowej (100 lub 115 kN),

m – wykładnik potęgowy, przyjmujący wartość 4 dla nawierzchni podatnych i półsztywnych oraz 8 dla nawierzchni sztywnych.

A w przypadku, gdy dysponuje się wynikami ważenia osi pojedynczych w postaci widma obciążeń osi, równoważną liczbę obciążeń osi można wyznaczyć z zależności [94]:

$$L = \sum_{i=1}^k N_i \cdot r_i \quad (3.13)$$




gdzie: k – liczba osi o naciskach większych od 20 kN,

N_i – liczba osi,

r_i – współczynnik przeliczeniowy osi wyznaczany z zależności 3.12.

Współczynniki przeliczeniowe r_i grup pojazdów na osi obliczeniowe, przyjmują w Polsce wartości podane w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Współczynniki przeliczeniowe grup pojazdów na osie obliczeniowe 100 i 115 kN [93, 94, 95].

Opis	Sylwetka pojazdu	Nawierzchnie podatne	Nawierzchnie sztywne	
		Oś obliczeniowa [kN]		
		100 kN	100 kN	115 kN
Samochody ciężarowe bez przyczep		$r_1=0,109$	$r_1=0,032$	$r_1=0,01$
Samochody ciężarowe z przyczepami		$r_2=1,245^{1)}$ $r_2=1,95^{2)}$	$r_2=1,477^{3)}$ $r_2=3,76^{4)}$	$r_2=0,483^{3)}$ $r_2=1,229^{4)}$
Autobusy		$r_3=0,594$	$r_3=0,43$	$r_3=0,141$

- 1) – gdy udział pojazdów o obciążeniu 115 kN w grupie pojazdów ciężarowych z przyczepami nie przekracza 8%,
- 2) – gdy udział pojazdów o obciążeniu 115 kN w grupie pojazdów ciężarowych z przyczepami wynosi od 8% do 20%,
- 3) – samochody 4-osiowe,
- 4) – samochody 5-osiowe.

W Wielkiej Brytanii funkcjonuje natomiast pojęcie VWF (Vehicle Wear Factor) [35, 51] pozwalające na wyznaczenie dla dowolnej sylwetki pojazdu równoważnej jej liczby osi standardowych – obliczeniowych:

$$VWF = \sum_{i=1}^{N_a} \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^4 \quad (3.14)$$

gdzie: P_i – obciążenie osi i ,

P_o – obciążenie osi standardowej – obliczeniowej (w Wielkiej Brytanii

$P_o = 80$ kN),

N_a – liczba osi w pojeździe.

Przeciętną wartość VWF stosowaną w Wielkiej Brytanii dla siedmiu typowych kategorii pojazdów zamieszczono tabeli 3.2 [20].

Tab. 3.2. Przeciętne wartości VWF stosowane w Wielkiej Brytanii [20].

Kategoria pojazdu	VWF	
Autobusy i autokary	1,3	0,6
Samochody ciężarowe 2 osiowe	0,34	
Samochody ciężarowe 3 osiowe	1,7	
Ciągniki siodłowe i zespoły pojazdów 3 osiowe	0,65	3,0
Samochody ciężarowe 4 osiowe	3,0	
Ciągniki siodłowe i zespoły pojazdów 4 osiowe	2,6	
Ciągniki siodłowe i zespoły pojazdów 5 osiowe	3,5	

Zależność (3.15) pozwala na wyznaczenie całkowitego obciążenia ruchem przyjmowanego następnie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni [51] (w zależności od msa , które może przyjmować wartości od 0 do 125 dobiera się zalecaną konstrukcję nawierzchni):

$$msa = 365 \cdot F \cdot Y \cdot G \cdot VWF \cdot P \cdot 10^{-6} \quad (3.15)$$

gdzie: msa – Milion Standard Axles - projektowane obciążenie ruchem na milion osi standardowych – obliczeniowych,

F – liczba pojazdów ciężarowych na dobę w roku początkowym – bazowym,

Y – obliczeniowy okres eksploatacji (zwykle 20 lat),

G – wskaźnik wzrostu ruchu,

P – udział pojazdów ciężarowych na obliczeniowym, skrajnym pasie ruchu (lewym! – Wielka Brytania).

We Francji z kolei, do oceny obciążenia konstrukcji nawierzchni liczbą osi obliczeniowych – standardowych, wykorzystuje się pojęcie agresywności ruchu. **Agresywność ruchu** określa szkodę zmęczeniową wywołaną przejściem dowolnej osi pojazdu lub sylwetki pojazdu w stosunku do szkody zmęczeniowej wywołanej przejściem osi obliczeniowej – standardowej, a więc charakteryzuje stopień szkodliwego oddziaływania osi pojazdów lub ich sylwetek w stosunku do osi pojedynczej o określonym nacisku. Tak rozumianą agresywność pojazdów [41, 107] można wyznaczyć na dwa sposoby.

- 1) Sposób 1 – gdy znane są szczegółowe dane dotyczące liczby osi oraz ich obciążeń:

$$A = K \cdot \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^\alpha \quad (3.16)$$

gdzie: A – jest współczynnikiem agresywności wyrażającym szkodę zmęczeniową jednego przejścia osi o obciążeniu P_i w stosunku do szkody zmęczeniowej wywołanej jednym przejściem osi obliczeniowej P_o ,

P_i – obciążenie rzeczywiste osi,

P_o – obciążenie osi obliczeniowej (we Francji $P_o = 130 \text{ kN}$),

α – wykładnik potęgowy przyjmujący wartość 5 dla nawierzchni podatnych i 12 dla nawierzchni półsztywnych i sztywnych,

K – współczynnik zależny od typu osi:

- dla nawierzchni podatnych:

$K=1$ – oś pojedyncza,

$K=0,75$ – oś podwójna,

$K=1,1$ – oś potrójna,

- dla nawierzchni półsztywnych i sztywnych (nawierzchnie betonowe płytowe):

$K=1$ – oś pojedyncza,

$K=12$ – oś podwójna,

$K=113$ – oś potrójna.

A agresywność dowolnej sylwetki pojazdu, jest w takim przypadku równa sumie agresywności poszczególnych jej osi.

2) Sposób 2 – gdy znane jest całkowite natężenie ruchu pojazdów ciężkich w okresie eksploatacji:

$$CAM = \frac{1}{NPL} \cdot \left[\sum_i \sum_{j=1}^2 K_j n_{ij} \cdot \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^\alpha \right] \quad (3.17)$$

gdzie: CAM – współczynnik agresywności struktury ruchu,

K_j – współczynnik zależny od typu osi ($j=1$ dla osi pojedynczych, $j=2$ dla osi podwójnych i $j=3$ dla osi potrójnych),

P_i – obciążenie rzeczywiste osi,

P_o – obciążenie osi obliczeniowej (we Francji $P_o=130$ kN),

α – wykładnik potęgowy przyjmujący wartość 5 dla nawierzchni podatnych i 12 dla nawierzchni półsztywnych i sztywnych,

NPL – liczba pojazdów ciężkich w obliczeniowym okresie eksploatacji.

Współczynnik agresywności ruchu można również przyjmować na poziomie:

$CAM = 0,8$ – nawierzchnia asfaltowa na autostradach i drogach ekspresowych,

$CAM = 1,3$ – nawierzchnia sztywna i półsztywna na autostradach i drogach ekspresowych,

$CAM = 0,5$ – nawierzchnia asfaltowa na pozostałych drogach,

$CAM = 0,8$ – nawierzchnia sztywna i półsztywna na pozostałych drogach.

Istotne różnice pomiędzy poszczególnymi krajami, zarysowują się jak widać, już w momencie ustalania wielkości obciążenia osi obliczeniowej, które przyjmowane jest w granicach od 80 kN do 130 kN [40]. W Polsce, obciążenie osi obliczeniowej wynosi 100 kN [189], chociaż w przypadku autostrad, obciążenie ruchem pojazdów można sprowadzać również do osi obliczeniowej o nacisku 115 kN [94]. Znacznie większe obciążenia osi obliczeniowych niż w Polsce przyjmuje się natomiast we Francji (130 kN, [41]), oraz np. w Belgii (130 kN, [33]). W Wielkiej Brytanii obciążenie osi obliczeniowej ustalono na poziomie (80 kN, [35, 51]). Podobnie jak w Wielkiej Brytanii, w USA obciążenie osi obliczeniowej przyjmowane jest na poziomie 18 Kip [1, 21] co odpowiada 80 kN (1 Kip = 1000 lbf = 4,448222 kN). Należy jeszcze tutaj zaznaczyć, że zauważalna jest tendencja ustalania obciążenia osi obliczeniowej na poziomie dopuszczalnego nacisku osi w danym kraju (tab. 5.3), co może być przyczyną wzrostu obciążenia obliczeniowego w niektórych krajach.

3.4. Kryteria wymiarowania nawierzchni drogowych

Nawierzchnia drogowa traci swoją nośność w momencie wyczerpania się jej trwałości zmęczeniowej. Na trwałość zmęczeniową ma wpływ przede wszystkim powtarzalność obciążenia, zależna od natężenia ruchu, jego struktury rodzajowej i prędkości pojazdów oraz wielkość występujących obciążeń [2, 7, 21, 26, 34, 36, 37, 39, 65, 68, 73, 98, 108, 117, 125, 140, 146]. Sposobem pracy i zachowania nawierzchni drogowych pod obciążeniem od przejeżdżających pojazdów zajmowano się już m.in. w pracach [11, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 58, 79, 80, 82, 84, 99, 101, 102, 105, 112, 120, 130, 146, 150, 151, 167, 169, 176, 177]. Jednak nadal najdoskonalszymi i najbardziej wiarygodnymi „narzędziami” służącymi do oceny trwałości zmęczeniowej podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych są kryteria zmęczeniowe. Przyczyną tego jest fakt prowadzenia wieloletnich badań przez głównie ośrodki badawcze na świecie i stałe ich udoskonalanie. Dla konstrukcji podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych opracowano kryteria [17, 18, 50, 85, 87, 88, 89], które można usystematyzować w trzy główne grupy:

- spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych,
- deformacji strukturalnych nawierzchni,
- spękań zmęczeniowych podbudów związanych cementem.

W przypadku konstrukcji nawierzchni sztywnych (płyt betonowych ze szczelinami dyblowanymi, płyt betonowych zbrojonych siatką z prętów stalowych i szczelinami dy-

blowanymi oraz płyt betonowych o ciągłym zbrojeniu), wymiarowanie polega głównie na analizie maksymalnych naprężeń rozciągających w płytach betonowych wywołanych ruchem pojazdów i obciążeniami termicznymi.

Do kryteriów spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych, najdokładniej zbadanych i zweryfikowanych, zaliczają się kryteria: Instytutu Asfaltowego i Shella. Kryterium Instytutu Asfaltowego [123, 131, 142] wykorzystuje zależność:

$$N = 18,4 \cdot C \cdot \left(6,167 \cdot 10^{-5} \cdot \varepsilon_x^{-3,291} \cdot |E^*|^{-0,854} \right) \quad (3.18)$$

gdzie: ε_x – odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych,

N – liczba przyłożonych osi do zniszczenia,

$|E^*|$ - moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej [MPa],

C – funkcja objętości wolnych przestrzeni i objętości asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej,

$$C = 10^M \quad (3.19)$$

$$M = 4,84 \cdot \left[\left(\frac{V_B}{V_B + V_A} \right) - 0,69 \right] \quad (3.20)$$

gdzie: V_A – zawartość objętościowa asfaltu [%],

V_B – objętość wolnych przestrzeni [%]

Kryterium to odpowiada sytuacji, w której występują spękania zmęczeniowe na 20% powierzchni nawierzchni jezdni. To kryterium było podstawą do wyznaczenia obliczeniowych okresów eksploatacji nawierzchni w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [93].

Z kolei w kryterium Shell-a [88, 89, 178], odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych można wyznaczyć w oparciu o zależność:

$$\varepsilon_x = (0,856 \cdot V_s + 1,08) \cdot (S_{mix})^{-0,36} \cdot N^{-0,2} \quad (3.21)$$

a zatem maksymalna liczba przyłożonych osi do zniszczenia jest równa:

$$N = \frac{\left[(0,856 \cdot V_s + 1,08) \cdot (S_{mix})^{-0,36} \right]^5}{\varepsilon_x^5} \quad (3.22)$$

gdzie: ε_x – odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych,

V_s – zawartość objętościowa asfaltu,

S_{mix} – moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej [N/m²],

N – liczba przyłożonych obciążeń do zniszczenia.

Oprócz powyższych kryteriów spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych, w wymiarowaniu wykorzystuje się kryteria deformacji strukturalnych nawierzchni, nazywane często kryteriami odkształceń podłoża gruntowego [88, 89, 145, 174]. Kryteria te, w przeciwieństwie do kryteriów omówionych powyżej funkcjonują od wielu lat w praktycznie niezmienionej postaci, a jest to spowodowane głównie koncentracją badań nad kryteriami asfaltowymi. Praktycznie we wszystkich stosowanych metodach obliczeń, kryterium to ma postać [89, 145]:

$$\varepsilon_y = k \cdot \left(\frac{I}{N} \right)^m \quad (3.23)$$

gdzie: N – liczba dopuszczalnych obciążeń porównawczych osi zastępczych,

ε_y – pionowe odkształcenie ściskające wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego,

k, m – współczynniki empiryczne zależne od przyjętego kryterium

Różnice występują dopiero na poziomie współczynników empirycznych. Dla kryterium Shell-a, wartości k wynoszą odpowiednio $1,8 \times 10^{-2}$ (na poziomie ufności 95%), $2,1 \times 10^{-2}$ (na poziomie ufności 55%) i $2,8 \times 10^{-2}$ (na poziomie ufności 50%), natomiast wartość m przyjęto równą 0,25 [88, 145]. W kryterium Instytutu Asfaltowego współczynnik k wynosi $1,05 \times 10^{-2}$, a m jest równy 0,223 [88, 174].

Stan krytyczny nawierzchni w kryterium Shell-a zdefiniowany jest za pomocą wskaźnika przydatności nawierzchni PSI (Present Serviceability Index) i ustalony jest na poziomie 2,5, co odpowiada nawierzchni w stanie dostatecznym [88, 145]. W kryterium Instytutu Asfaltowego stan krytyczny odpowiada powstaniu koleiny o głębokości 12,5 mm mierzonej łąką 1,2 mm [88, 174].

Wśród kryteriów odnoszących się do nawierzchni z podbudowami związanymi spoiwami hydraulicznymi, na uwagę zasługują głównie trzy kryteria [50, 87, 88], dające dobrą zbieżność uzyskiwanych wyników:

- Uniwersytetu w Illinois (Kryterium Dempsey'a),
- Narodowego Instytutu Badawczego Dróg i Transportu (CSIR) z Afryki Południowej,
- Centrum Badań Drogowych w Belgii.

Jednak z uwagi na duży wpływ na charakterystyki wytrzymałościowe warstw konstrukcyjnych nawierzchni związanymi spoiwami hydraulicznymi, właściwości materiałów zależ-

nych w dużej mierze od kraju pochodzenia (np. kruszywo), kryteria te wymagają dużej ostrożności przy ich stosowaniu.

Kryterium Dempsey'a wykorzystuje zależność:

$$\log N_f = 11,784 - 12,121 \cdot \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_{crit}} \right) \quad (3.24)$$

gdzie: N_f – liczba obciążeń do zniszczenia,

σ_x – naprężenia rozciągające w podbudowie wywołane przez obciążenie ruchem drogowym,

σ_{crit} – wytrzymałość na zginanie materiału podbudowy.

W przeciwieństwie do kryterium Dempsey'a, kryterium Narodowego Instytutu Badawczego Dróg i Transportu z Afryki Południowej wykorzystuje w analizie zmęczeniowej odkształcenia wywoływane w warstwach nawierzchni:

$$N_f = \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{crit}} \right)^{-12,66} = (1 - 0,11 \cdot \log N_f)^{-12,66} \quad (3.25)$$

gdzie: N_f – liczba obciążeń do zniszczenia,

ε_x – odkształcenia rozciągające w podbudowie,

ε_{crit} – odkształcenie graniczne przy zniszczeniu.

Podobnie jak powyższe kryterium, kryterium opracowane w Centrum Badań Drogowych w Belgii, oparte jest o analizę odkształceń rozciągających występujących w nawierzchniach:

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{crit}} = 1 - a \cdot \log N_f \quad (3.26)$$

gdzie: N_f – liczba obciążeń do zniszczenia,

ε_x – odkształcenia rozciągające w podbudowie,

ε_{crit} – odkształcenie graniczne przy zniszczeniu,

a – współczynnik wyznaczany doświadczalnie.

W wymiarowaniu nawierzchni sztywnych (betonowych z płyt dyblowanych i nie-dyblowanych na podbudowie z chudego betonu lub kruszywa stabilizowanego cementem, płyt betonowych o zbrojeniu ciągłym i podbudowie z chudego betonu lub betonu asfaltowego oraz płyty betonowej na warstwie kruszywa stabilizowanego cementem), podobnie jak nawierzchni podatnych wykorzystuje się kryteria zmęczeniowe – w metodzie francuskiej [170], wymiarowanie oparte jest o zależność:

$$\sigma_x^{dop} \leq \sigma_6 \cdot \left(\frac{\sum P_o}{10^6} \right)^b \cdot k_r \cdot k_d \cdot k_c \quad (3.27)$$

gdzie: σ_x^{dop} – maksymalne naprężenia rozciągające w modelu obliczeniowym,

σ_6 – naprężenia niszczące przy liczbie obciążeń 10^6 ,

$\sum P_o$ – sumaryczna liczba osi obliczeniowych w założonym okresie eksploatacji nawierzchni,

b – współczynnik zależny od nachylenia krzywej zmęczeniowej warstwy betonowej,

k_r – współczynnik zależny od rozrzutu wyników badań zmęczeniowych,

k_d – współczynnik zależny od występowania szczelin ($k_d=0,59$ dla płyt nie-dyblowanych i zbrojonych, $k_d=0,68$ dla płyt dyblowanych i o ciągłym zbrojeniu),

k_c – współczynnik uwzględniający rozbieżności pomiędzy modelem obliczeniowym a warunkami rzeczywistymi.

W metodzie tej, naprężenia rozciągające wyznaczone są w płycie betonowej i w podbudowie, gdy warstwa ta związana jest cementem.

W polskim katalogu nawierzchni sztywnych [94] wykorzystano natomiast metodę opartą na modelu płyty o skończonych wymiarach w planie położonej na wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, obciążanej na środku, krawędzi i narożu kołem samochodowym o zadanym obciążeniu. W analizie wykorzystano sprężystą fazę pracy betonu o liniowej zależności naprężeń i odkształceń [170]:

$$f_f \cdot m_l \cdot \frac{I}{\gamma_m} \geq \gamma_p \cdot (n_l \cdot \sigma_x) + \gamma_t \cdot (n_l \cdot \sigma_t) \quad (3.28)$$

gdzie: f_f – wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu (wartość charakterystyczna; $f_f=5,5$ MPa dla kategorii ruchu KR3 i KR6 oraz $f_f=4,5$ MPa dla kategorii ruchu KR1 i KR2),

m_l – współczynnik uwzględniający powtarzalność obciążeń w obliczeniowym okresie eksploatacji ($m_l=1-0,078 \cdot \log N$; N – liczba powtarzalnych obciążeń),

σ_x – maks. naprężenia rozciągające w płycie betonowej wywołane obciążeniem pojazdem,

σ_t – maks. naprężenia rozciągające w płycie betonowej wywołane obciążeniem termicznym,

n_1 – współczynnik współpracy płyt (0,90 – szczeliny skurczowe i technologiczne; 0,65 – szczeliny dyblowane),

γ_m – współczynnik materiałowy ($\gamma_m=1,3$),

γ_p – współczynnik bezpieczeństwa od obciążenia kołem ($\gamma_p=1,2$),

γ_t – współczynnik bezpieczeństwa od obciążeń termicznych ($\gamma_t=1,2$).

4. KLASYFIKACJA POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH

4.1. Wprowadzenie

W rozdziale zawarto przegląd aktualnie funkcjonujących, zarówno w Polsce jak i na świecie, klasyfikacji pojazdów samochodowych, bazujących jednak głównie na cechach użytkowych pojazdów lub ich masie całkowitej. Jako klasyfikację alternatywną, opartą głównie o liczbę osi i ich konfigurację, autor zaproponował klasyfikację, która powstała w wyniku prowadzonych pomiarów nacisków osi i mas pojazdów na wybranych drogach krajowych w Polsce (patrz rozdział 6) i obejmuje 15 najczęściej spotykanych na drogach sylwetek pojazdów ciężarowych. Zaproponowana klasyfikacja stała się podstawą dalszych rozważań zamieszczonych w niniejszej pracy. W rozdziale tym zamieszczono również krótkie omówienie problematyki związanej z ogumieniem używanym obecnie w pojazdach ciężarowych, wskazano na istotne różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami opon oraz przyjęto typowe ogumienie stosowane najczęściej w rozpoznanych uprzednio sylwetkach pojazdów.

4.2. Sylwetki pojazdów

W okresie ciągłego wzrostu natężenia ruchu, na naszych drogach a także na drogach państw Unii Europejskiej, można zaobserwować aż kilkanaście różnych sylwetek pojazdów ciężarowych, które w różnym stopniu oddziałują na nawierzchnie drogowe. Różnorodność występujących pojazdów ciężkich, głównie jest spowodowana zmianami w konstrukcjach pojazdów ciężkich [127] oraz zmieniającymi się wobec nich wymaganiami i oczekiwaniami.

Już w 1970 roku ukazała się dyrektywa Rady 70/156/EWG [186] w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnosząca się do homologacji pojazdów silnikowych i ich przyczep. Była ona wielokrotnie nowelizowana, by przyjąć ostatecznie postać opublikowaną w grudniu 2001 roku w dyrektywie 2001/116/WE [188]. W dyrektywie tej, rozróżnia się następujące podstawowe kategorie pojazdów:

I. Kategoria M: Pojazdy silnikowe mające co najmniej cztery koła oraz zaprojektowane i zbudowane do przewozu pasażerów:

I.1. Kat. M1: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu pasażerów, mające nie więcej niż osiem siedzeń oprócz siedzenia kierowcy.

- I.2. Kat. M2: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu pasażerów, mające więcej niż osiem siedzeń oprócz siedzenia kierowcy, i których maksymalna masa nie przekracza 5 ton.
- I.3. Kat. M3: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu pasażerów, mające więcej niż osiem siedzeń oprócz siedzenia kierowcy i których maksymalna masa wynosi ponad 5 ton.
- II. Kategoria N: Pojazdy silnikowe mające przynajmniej cztery koła, zaprojektowane i zbudowane do przewozu towarów.
 - II.1. Kat. N1: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu towarów, których maksymalna masa nie przekracza 3,5 tony.
 - II.2. Kat. N2: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu towarów, których maksymalna masa wynosi ponad 3,5 tony, ale jest mniejsza niż 12 t.
 - II.3. Kat. N3: Pojazdy zaprojektowane i zbudowane do przewozu towarów, których maksymalna masa wynosi ponad 12 ton.
- III. Kategoria O: Przyczepy (w tym naczepy).
 - III.1. Kat. O1: Przyczepy o masie maksymalnej nieprzekraczającej 0,75 tony
 - III.2. Kat. O2: Przyczepy o masie maksymalnej wynoszącej ponad 0,75 tony, ale nieprzekraczającej 3,5 tony.
 - III.3. Kat. O3: Przyczepy o masie maksymalnej wynoszącej ponad 3,5 tony, ale nieprzekraczającej 10 ton.
 - III.4. Kat. O4: Przyczepy o masie maksymalnej ponad 10 ton.

Klasyfikacja pojazdów podana w PN [195, 196, 197, 198, 199] obejmuje następujące kategorie pojazdów:

- I. Kategoria L: Pojazdy jednośladowe i trójkołowe:
- II. Kategoria M: pojazdy samochodowe przeznaczone do przewozu osób (samochody osobowe, mikrobusy i autobusy); autobusy dzielą się z kolei na:
 - II.1. Kat. M2: autobusy o całkowitej masie maks. nieprzekraczającej 5 ton:
 - II.1.1. M2(0) – mikrobusy,
 - II.1.2. M2(I) – autobusy miejskie,
 - II.1.3. M2(II) – autobusy międzymiastowe,
 - II.1.4. M2(III) – autobusy turystyczne.
 - II.2. Kat. M3: autobusy o całkowitej masie maks. powyżej 5 ton:
 - II.2.1. M3(I) – autobusy miejskie,

II.2.2. M3(II) – autobusy międzymiastowe,

II.2.3. M3(III) – autobusy turystyczne.

III. Kategoria N: pojazdy samochodowe ciężarowe, zespoły pojazdów i ciągniki siodłowe, które dzielą się z kolei na:








III.1. Kat. N1: pojazdy ciężarowe o całkowitej masie maks. nieprzekraczającej 3,5 tony,

III.2. Kat. N1: pojazdy ciężarowe o całkowitej masie maks. większej niż 3,5 tony, ale nie przekraczającej 12 ton,

III.3. Kat. N3: pojazdy ciężarowe o całkowitej masie maks. większej niż 12 ton.












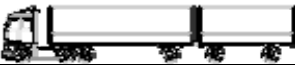

Z kolei europejska specyfikacja dotycząca pomiarów pojazdów w ruchu (COST 323, [44]), podaje klasyfikację pojazdów obejmującą 8 kategorii, wśród których można wyróżnić 5 kategorii pojazdów ciężarowych i jedną autobusów (patrz tab. 4.1).

Tab. 4.1. Klasyfikacja pojazdów zgodna z COST 323 [44].

Kategoria	Sylwetka pojazdu	Opis
1		samochody osobowe, sam. osobowe z lekkimi przyczepami i samochody dostawcze o masie <3,5 t
2		samochody ciężarowe 2-osiowe
3		samochody ciężarowe 3-osiowe samochody ciężarowe 4-osiowe
4		ciągniki siodłowe 2 i 3-osiowe z naczepami 1 i 2-osiowymi
5		ciągniki siodłowe z naczepami 3-osiowymi
6		samochody ciężarowe z przyczepami
7		autobusy
8		inne pojazdy

Innym przykładem klasyfikacji pojazdów może być klasyfikacja zgodna z zaleceniami FHWA (Federal Highway Administration) przedstawiona w tabeli 4.2. W klasyfikacji tej rozróżnia się pojazdy ciężarowe o różnej liczbie osi i konfiguracji kół, lecz obejmuje również pojazdy nie spotykane na drogach w Polsce i Europie (klasa 11-13), z uwagi na brak możliwości uzyskania ich homologacji [188].

Tab. 4.2. Klasyfikacja pojazdów zgodna z FHWA [226].

Klasa	Sylwetka	Opis
1		Motocykle
2		Samochody osobowe, samochody osobowe z przyczepami
3		Pozostałe samochody osobowe i dostawcze, dwuosiove z kołami pojedynczymi
4		Autobusy
5		Samochody ciężarowe 2-osiowe z osią o kołach bliźniaczych
6		Samochody ciężarowe 3-osiowe
7		Samochody ciężarowe 4-osiowe, lub o większej liczbie osi
8		Pojazdy członowe 3 i 4-osiowe
9		Pojazdy członowe 5-osiowe
10		Pojazdy członowe 6-osiowe, lub o większej liczbie osi
11		Pojazdy członowe o 3 lub większej liczbie jednostek, 4 lub 5-osiowe
12		Pojazdy członowe o 3 lub większej liczbie jednostek, 6-osiowe
13		Pojazdy członowe o 3 lub większej liczbie jednostek, 7-osiowe lub o większej liczbie osi




Klasyfikacja pojazdów stosowana w Polsce przy pomiarach ruchu obejmuje siedem kategorii [104]:

- motocykle,
- samochody osobowe,
- lekkie samochody ciężarowe (samochody dostawcze),

- samochody ciężarowe bez przyczep,
- samochody ciężarowe z przyczepami,
- autobusy,
- ciągniki rolnicze.

Przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni, z tej klasyfikacji uwzględnia się tylko trzy kategorie pojazdów [93, 94, 95]: samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe z przyczepami, autobusy (tab. 4.3).

Tab. 4.3. Klasyfikacja pojazdów zgodna z obowiązującymi w Polsce Katalogami [93, 94, 95].

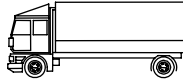
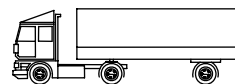
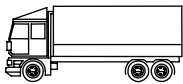
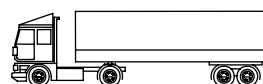
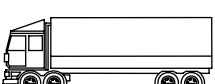

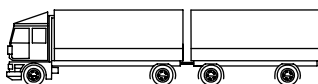
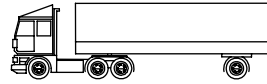


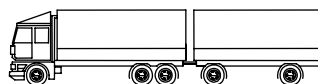
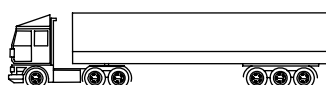
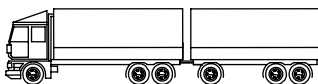
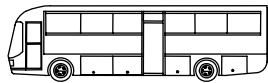
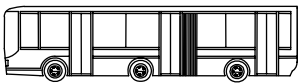
Opis	Sylwetka pojazdu
Samochody ciężarowe bez przyczep	
Samochody ciężarowe z przyczepami	
Autobusy	

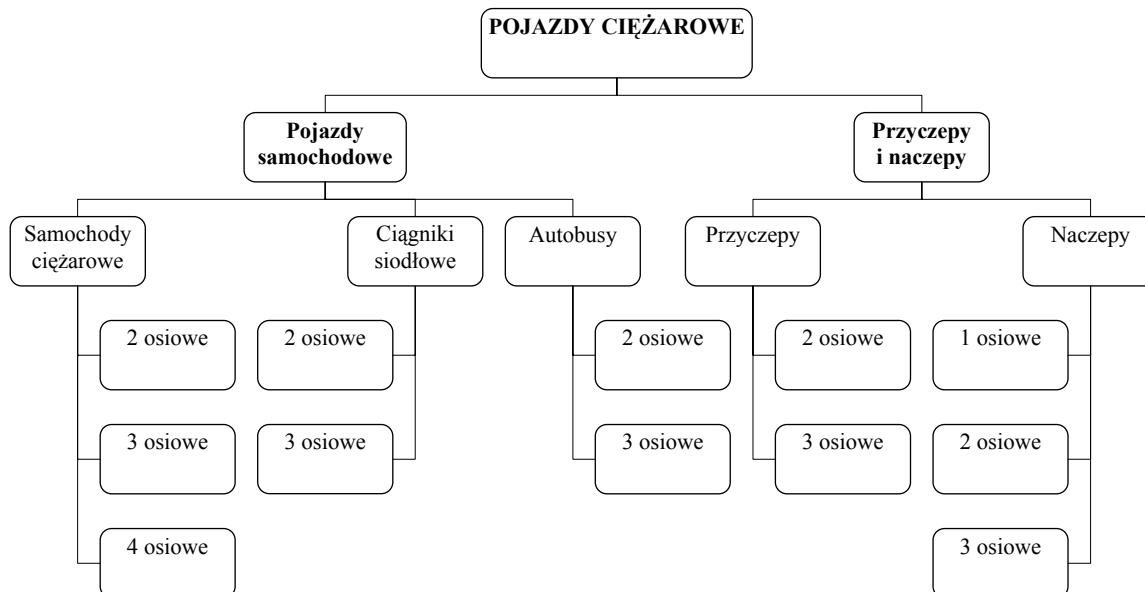
4.3. Proponowane sylwetki pojazdów

Podane w punkcie 4.2. klasyfikacje pojazdów oparte są głównie na cechach użytkowych pojazdów lub masie całkowitej, które to cechy nie są jednak decydujące przy ocenie oddziaływania pojazdów na nawierzchnie. O agresywności oddziaływania pojazdu, decyduje głównie konfiguracja osi w pojeździe oraz wielkość i rozkład występujących nacisków osi, dlatego też, w oparciu o najliczniej występujące sylwetki pojazdów ciężarowych występujących na drogach w Polsce, autor dla celów niniejszej pracy, opracował klasyfikację, w której podstawą podziału pojazdów na kategorię była liczba osi w pojeździe i ich konfiguracja, a więc cechy decydujące o wielkości oddziaływań pojazdów na nawierzchnię.

Klasyfikację tą przedstawiono w tabeli 4.4. (podział na poszczególne sylwetki pojazdów) oraz na rysunku 4.1. (klasyfikacja ogólna). Jest ona podstawą dalszych rozważań i obejmuje praktycznie wszystkie typowe sylwetki pojazdów ciężkich (w klasyfikacji tej nie ujęto pojazdów specjalnych, lecz ich udział w ruchu jest marginalny). Klasyfikacja ta została opracowana przez autora niniejszej pracy, w oparciu o czynione obserwacje struktury rodzajowej pojazdów zarejestrowanych na sieci dróg w Polsce.

Tab. 4.4. Sylwetki pojazdów ciężarowych wg autora.

Rodzaj pojazdu	Symbol	Sylwetka	Rodzaj pojazdu	Symbol	Sylwetka	
Pojazdy pojedyncze	2P		Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	2C+1N		
	3P			2C+2N		
	4P			2C+3N		
Zespoły pojazdów (pojazd silnikowy + przyczepa)	2P+2P			3C+1N		
	2P+3P			3C+2N		
	3P+2P			3C+3N		
	3P+3P					
Autobusy	2A			Autobusy	3A	



Rys. 4.1. Klasyfikacja pojazdów ciężarowych wg autora.

4.4. Konfiguracja osi

Podobnie jak klasyfikacja pojazdów, duże znaczenie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni ma układ, czyli tzw. konfiguracja osi w pojazdach ciężarowych. Wśród osi występujących w pojazdach ciężarowych można rozróżnić [193]:

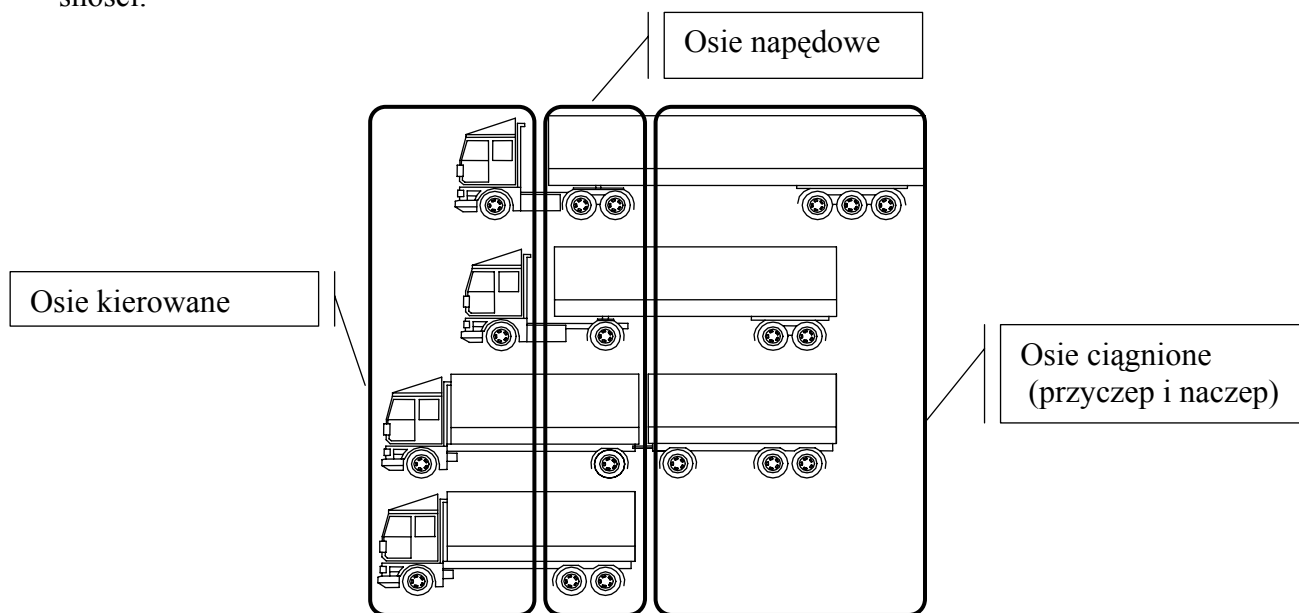
- **oś pojedynczą** - oś oddaloną od osi sąsiedniej o więcej niż 1,80 m,
- **oś wielokrotną** - zespół osi złożonych z dwu lub trzech osi zwanych „osiąmi składowymi”, których rozstaw nie przekracza 1,80 m,
- **oś składową** - oś wchodzącą w skład osi wielokrotnej, oddaloną od sąsiedniej osi o mniej niż 1,80 m.

W układzie jezdny pojazdu ciężarowego, przeważnie występuje większa liczba osi od dwóch. Powodowane jest to koniecznością zapewnienia odpowiedniej nośności podwozia pojazdu. Można praktycznie rozróżnić trzy główne grupy osi w pojazdach ciężkich:

- oś kierowana o kołach pojedynczych,
- osie napędowe:
 - pojedyncze o kołach pojedynczych,
 - pojedyncze o kołach pojedynczych Super Single Drive,
 - pojedyncze o kołach podwójnych,
 - podwójne o kołach bliźniaczych,
- osie ciągnione (osie przyczep i naczep):
 - pojedyncze o kołach pojedynczych,
 - pojedyncze o kołach bliźniaczych,
 - podwójne o kołach pojedynczych,
 - podwójne o kołach bliźniaczych,
 - potrójne o kołach pojedynczych Super Single.

Praktycznie każdą sylwetkę pojazdu wymienioną w pkt. 4.3 można opisać poprzez podanie odpowiedniej konfiguracji osi. Oś kierowana o kołach pojedynczych występuje w prawie każdym pojeździe. Oś napędowa jest osią pojedynczą lub też podwójną zlokalizowaną w pojeździe samochodowym lub ciągniku siodłowym jako oś druga i trzecia pojazdu (wynika to z konstrukcji pojazdów i lokalizacji mostu napędowego). Bardzo rzadko w pojazdach ciężkich występują dodatkowe osie napędowe – ich obecność jest pożądana tylko w przypadku pojazdów przeznaczonych do jazdy w ciężkich warunkach terenowych. Osie w przyczepach i naczepach są osiami ciągniętymi pojedynczymi, podwójnymi lub

też potrójnymi, a ich liczba jest uzależniona od konstrukcji pojazdu i jego wymaganej nośności.



Rys. 4.2. Układ osi w przykładowych pojazdach ciężarowych.

4.5. Ogumienie

4.5.1. Rodzaje i wymiary opon

Producenci opon odstąpili praktycznie od unifikacji ogumienia przeznaczonego do pojazdów ciężkich – nie ma już „opon do wszystkiego”. Obecnie stosuje się kilka rodzajów opon do samochodów ciężarowych i autobusów. Są inne opony do transportu dalekobieżnego, inne do transportu regionalnego, a jeszcze inne do transportu miejskiego. Różnią się także:

- opony na oś napędową,
- opony na oś prowadząca (kierowaną),
- opony do naczep i przyczep,
- opony do autobusów (przede wszystkim komunikacji miejskiej),
- opony przeznaczenia ogólnego – uniwersalne (coraz rzadziej spotykane).

Wszystkie stosowane obecnie typy opon charakteryzują się takimi cechami jak: niskie opory toczenia (a co za tym idzie również mniejsze zużycie paliwa), dobra przyczepność do nawierzchni, niski poziom hałasu, odpowiednia wytrzymałość, no i muszą być bezpieczne oraz zapewniać odpowiedni komfort jazdy.

Dodatkowo, opony w zależności od swojego przeznaczenia, odznaczają się także indywidualnymi właściwościami zwiększającymi ich walory użytkowe. I tak np. opony na osie napędowe powinny przede wszystkim zapewniać przenoszenie znacznych momentów napędowych oraz jak najlepszą przyczepność do suchych i mokrych nawierzchni, opony przeznaczone na oś prowadzącą powinny z kolei zapewniać jak najlepszą kierowność pojazdu. W przyczepach i naczepach, z uwagi na ich główne zastosowanie w transporcie dalekobieżnym, stosuje się przede wszystkim opony o bardzo korzystnych parametrach eksploatacyjnych (m.in. o minimalnych oporach toczenia). Opony przeznaczone do autobusów muszą charakteryzować się szczególną trwałością i odpornością na trudne warunki eksploatacji w miastach (manewrowanie, częste ruszania i zatrzymywanie, otarcia o krawężniki, zły stan nawierzchni)

Opony typu „Super Single” (można również stosować polskie określenie – opona pojedyncza szeroka) są coraz częściej stosowane, gdyż zapewniają mniejsze opory toczenia i mniejszą wagę, a co za tym idzie mniejsze zużycie paliwa. Niestety, jak wskazują badania, mniejsze opory toczenia wywołane mniejszą powierzchnią styku z nawierzchnią (typowa szerokość takiej opony wynosi 385mm, ale są też opony o szerokości 455mm), są przyczyną bardziej szkodliwego oddziaływania takich opon na nawierzchnie [46, 139, 153].



Rys. 4.3. Opona typu „Super Single” i dwie opony bliźniacze (materiały firmy Michelin).

Na rysunku 4.3. przedstawiono oponę pojedynczą szeroką o rozmiarze 455/45 R 22,5 i dwie równoważne opony bliźniacze o wymiarach 275/70 R 22,5 każda. Masa opony „Super Single” wynosi 280 kg, a dwóch opon bliźniaczych 368 kg. Daje to oszczędności na masie wynoszące 88 kg tylko na jednym zestawie opon.

Ostatnio, oprócz opon typu „Super Single” stosowanych przede wszystkim w naczepach ciągników siodłowych, producenci wprowadzają w transporcie dalekobieżnym opony typu „Super Single Drive” przeznaczone na oś napędową o szerokości 495mm (rys. 4.4).

Rys. 4.4. Opony na oś napędową – opona tradycyjna „bliźniacza” i opona typu „super single drive” (materiały firmy Goodyear).



Stowarzyszenia producentów opon (w Europie m.in. E.T.R.T.O. – The European Tyre and Rim Technical Organisation) dążą do typizacji wymiarów i tolerancji opon, ich nośności i ciśnień roboczych. Na każdej oponie podane są informacje opisujące jej podstawowe cechy takie jak szerokość profilu, stosunek wysokości profilu do jego szerokości wyrażony w procentach (H/B w %), rodzaj zastosowanej osnowy i sposób jej ułożenia oraz średnicę osadzenia (w calach) [83]. Przykładowe oznaczenie opony przedstawia się następująco:

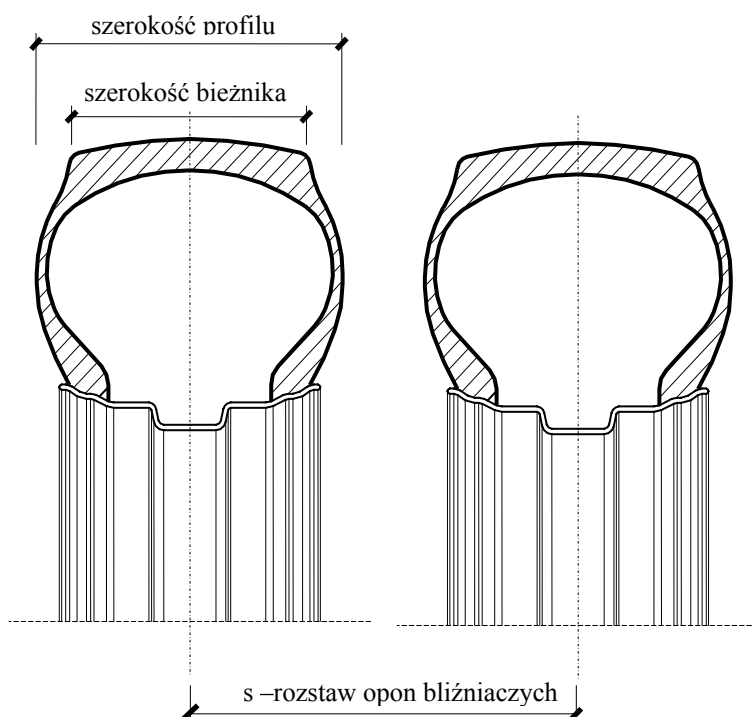
275 / 70 – R 22,5

275 - szerokość profilu [mm],

70 - stosunek wysokości profilu do jego szerokości (H/B w %),

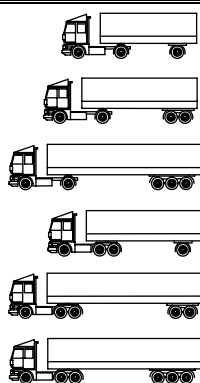
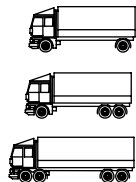
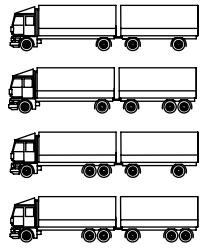
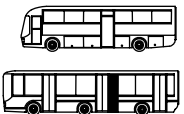
R - opona radialna (w tym miejscu może pojawić się symbol D-diagonalna)

22,5 - średnica osadzenia [cal].



Rys. 4.5. Podstawowe wymiary przekroju poprzecznego opony bliźniaczej.

Tab. 4.5. Typowe szerokości ogumienia.

		Transport dalekobieżny	Transport regionalny	Transport mieszany	Transport miejski	
Sylwetka pojazdu						
Oznaczenie pojazdu		2C+1N 2C+2N 2C+3N 3C+1N 3C+2N 3C+3N	2P 3P 4P	2P+2P 2P+3P 3P+2P 3P+3P	2A 3A	
Rodzaj osi		Typowe szerokości ogumienia i rozstawy opon [mm]				
Oś kierowana		305m	305	305	305	
Oś napędowa	Pojedyncza	Koła poj.	305	305	305	—
		Koła podw.	2x305 s=335	2x305 s=335	2x305 s=335	2x275mm s=305
	Podwójna	Koła poj.	305	305	305	—
		Koła podw.	2x305 s=335	2x305 S=335	2x305 s=335	—
Super single drive		495	—	—	—	
Oś – naczepa/przyczepa	Pojedyncza	Koła poj.	435	—	435	—
		Koła podw.	2x245 s=270	—	2x245 s=270	—
	Podwójna	Koła poj.	435	—	435	—
		Koła podw.	2x245 s=270	—	2x245 s=270	—
	Potrójna - super single		385	—	—	—

- oznaczenia według rysunku 4.5.

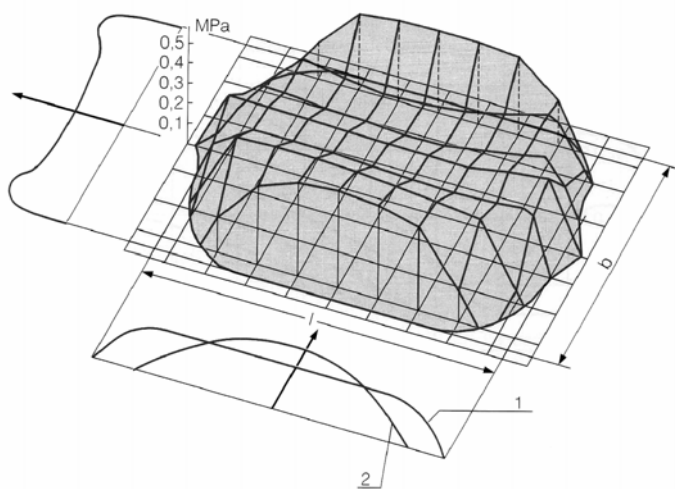
Typowe ogumienie pojazdów ciężkich przyjęte do dalszej analizy przedstawia tab. 4.5. Z uwagi na dużą liczbę producentów opon oraz występujących różnic w konstrukcjach poszczególnych opon (nawet w obrębie opon jednego typu i o jednym przeznaczeniu), dużego zakresu szerokości profili zależnych od średnicy i nośności ogumienia, do dalszej analizy przyjęto ogumienie charakterystyczne dla danej kategorii. W tabeli 4.5 podano także rozstaw opon bliźniaczych. Jest on zależny głównie od średnicy opon i od wskaźnika profilu, tj. stosunku wysokości do szerokości opony.

4.5.2. Powierzchnia styku opon z nawierzchnią

Wielkość obciążenia przekazywana na nawierzchnię drogową poprzez koło pojazdu, jest uzależniona głównie od liczby osi oraz ich konfiguracji. W miejscu styku koła z nawierzchnią powstaje powierzchnia stykowa, na którą działa ciśnienie stykowe, które jest uzależnione od [165, 170]:

- wielkości obciążenia przypadającego na koło,
- ciśnienia powietrza w oponie,
- konstrukcji opony i jej charakterystyk,
- szybkości jazdy,
- temperatury (powietrza i gumy opony).

Naciski normalne generowane na miejscu styku opony z nawierzchnią układają się w kształt siodła [116, 170] (rys. 4.6) i zależą one przede wszystkim od ciśnienia w oponie i prędkości jazdy pojazdu. Wraz ze wzrostem ciśnienia w oponie głębokość siodła zmniejsza się, a w przenoszeniu obciążeń większy udział bierze środek bieżnika.



Rys. 4.6. Rozkład ciśnienia nacisków normalnych na powierzchni styku koła z nawierzchnią [170].

Zależność ciśnienia stykowego od ciśnienia powietrza w oponie, określa równanie 4.1. [170], lub nomogramy podane w literaturze [116, 170].

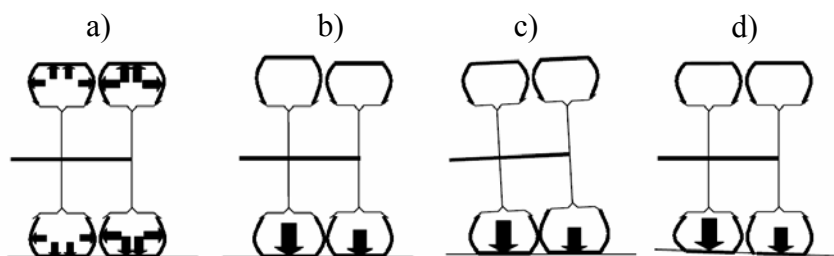
$$p_s = m \cdot p_a \quad (4.1)$$

gdzie: p_s – ciśnienie stykowe [MPa],

p_a – ciśnienie w oponie [MPa],

m – współczynnik przyjmujący wartości od 0,65 do 1,15.

Oczywiście należy mieć na uwadze, że stosowanie opon bliźniaczych może być przyczyną różnych rozkładów ciśnienia powietrza w tych oponach, a tym samym różnych ciśnień stykowych (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Przyczyny nierównomiernego rozkładu ciśnienia w oponach kół bliźniaczych [46]:

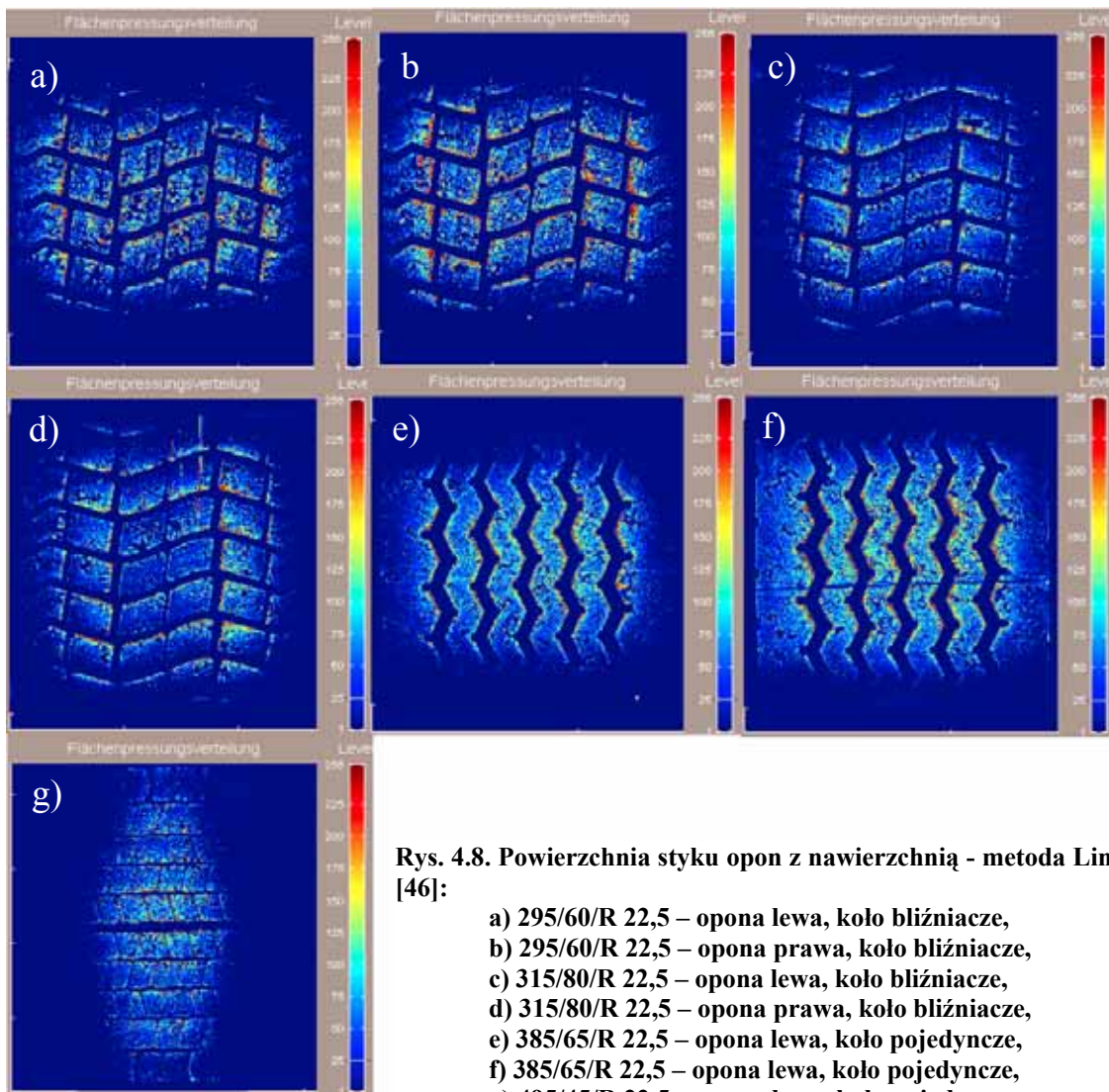
- a) różne ciśnienie powietrza w oponach,
- b) różna średnica opon,
- c) skrzywiona oś pojazdu,
- d) pochylenie poprzeczne nawierzchni.

Wyznaczeniem śladu powierzchni styku opony z nawierzchnią zajmują się głównie koncerny oponiarskie, dokładnie analizując nawet rozkłady nacisków poszczególnych „klocków” bieżnika. Służy do tego celu m.in. urządzenie CCD (Charge Coupled Device) stanowiące pewnego rodzaju skaner wyposażony w aparat fotograficzny. Przyrząd ten pozwala na rejestrację śladu powierzchni styku bieżnika opony z nawierzchnią wraz z wywieranymi przez oponę naciskami.

Realizowanych było również wiele programów badawczych (które nadal są kontynuowane) dotyczących pomiarów powierzchni styku koła z nawierzchnią oraz ciśnienia stykowego. Wśród najważniejszych można tutaj wymienić metody Lintrack [46, 49], Fuji – Foil [46] oraz Tekscan [46]. Pierwsze dwie z nich umożliwiają statyczny pomiar powierzchni oraz ciśnienia stykowego, natomiast metoda Tekscan pozwala na wykonywanie pomiarów zarówno w sposób statyczny, jak i dynamiczny – przy przejeździe pojazdu z prędkością 80 km/h.

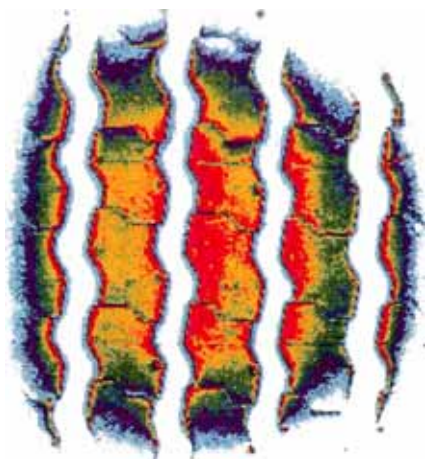
Na rysunku 4.8 pokazano siedem przykładowych powierzchni styku opon z nawierzchnią pomierzonych w metodzie Lintrack [46]. Można z niego wywnioskować, że opony bliźniacze o wymiarach 295/60/R 22,5 (rys. a i b), przy takim samym obciążeniu koła (57,5 kN przypadające na koło bliźniacze, a zatem 28,75 kN przypadające na każde

z kół) i ciśnieniu w oponie zalecanym przez producenta (ciśnienie 9,5 bar-a, czyli ok. 0,95 MPa), dają krótszą powierzchnię styku z nawierzchnią i większy obszar o wyższym ciśnieniu stykowym niż szersze opony o mniejszej średnicy 315/80/R 22,5 (rys. c i d, ciśnienie 7,5 bar-a, czyli ok. 0,75 MPa). Widać również, że przy takim samym obciążeniu 57,5 kN przypadającym na koło pojedyncze szerokie 385/65/R 22,5 (rys. f, ciśnienie 9,5 bar-a, czyli ok. 0,95 MPa), jak na koło bliźniacze o oponach 315/80/R 22,5 (rys. c i d, ciśnienie 7,5 bar-a, czyli ok. 0,75 MPa), w kole pojedynczym można zaobserwować większy obszar powierzchni styku z nawierzchnią o wyższym ciśnieniu stykowym. Warto jeszcze zwrócić uwagę na rys. e i f, na którym pokazano powierzchnie stykowe dwóch takich samych opon 385/65/R22,5, o takim samym ciśnieniu w oponie wynoszącym 9,5 bar-a (czyli ok. 0,95 MPa), ale o różnym obciążeniu. Opona o mniejszym obciążeniu (rys. e, obciążenie 45 kN) daje krótszy ślad o mniejszych wartościach ciśnień niż opona o obciążeniu większym (rys. f, obciążenie 57,5 kN).



Rys. 4.8. Powierzchnia styku opon z nawierzchnią - metoda Lintrack [46]:

- a) 295/60/R 22,5 – opona lewa, koło bliźniacze,
- b) 295/60/R 22,5 – opona prawa, koło bliźniacze,
- c) 315/80/R 22,5 – opona lewa, koło bliźniacze,
- d) 315/80/R 22,5 – opona prawa, koło bliźniacze,
- e) 385/65/R 22,5 – opona lewa, koło pojedyncze,
- f) 385/65/R 22,5 – opona lewa, koło pojedyncze,
- g) 495/45/R 22,5 – opona lewa, koło pojedyncze.



Rys. 4.9. Skan powierzchni styku opony z nawierzchnią wykonany w metodzie Fuji-Foil opony 315/80/R 22,5 o obciążeniu 25 kN o ciśnieniu 8,3 bar-a (0,83 MPa) [46].

Badania prowadzone były również w dużo mniejszej skali, odnoszącej się do analizy rozkładu naprężeń na powierzchni kontaktu poszczególnych „klocków” opony z nawierzchnią. Przykładem mogą być tutaj badania prowadzone przez De Beer-a [49].

Obecnie w projektowaniu konstrukcji nawierzchni, praktycznie nie uwzględnia się tego, iż każdy z wyżej wymienionych rodzajów opon w innym stopniu oddziałuje na nawierzchnie drogowe. Wprowadzono uproszczenie polegające na założeniu, że powierzchnia styku opony z nawierzchnią ma ślad koła o pewnym promieniu. Takie podejście jest bardzo wygodne z punktu widzenia projektanta, ale prowadzi do pominięcia dużych różnic w sposobach przekazywania obciążeń na nawierzchnie drogowe.

Na potrzeby tej pracy, założono, że powierzchnia styku koła z nawierzchnią ma kształt prostokątny (tab. 4.6., pole zmniejszono o 10% z uwagi na zaokrąglenie naroży) [116, 165]:

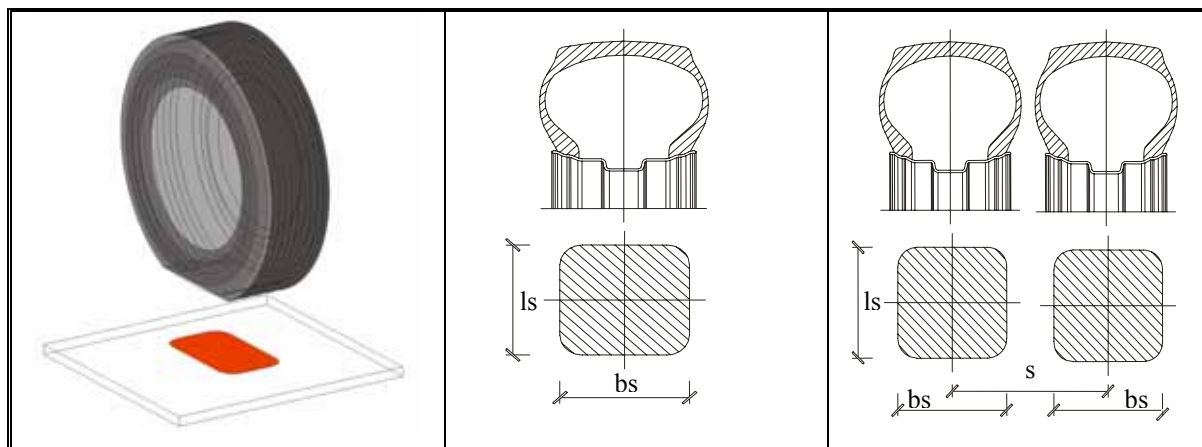
$$F_s = 0,9 \cdot l_s \cdot b_s \quad (4.2)$$

gdzie: F_s - pow. styku opony z nawierzchnią [cm^2 , m^2],

l_s - długość powierzchni styku z oponą [cm, m],

b_s - szerokość pow. styku z oponą [cm, m],

Tab. 4.6. Powierzchnie styku opon z nawierzchnią



Przyjęto również, że szerokość b_s jest równa szerokości bieżnika opony [116], a długość śladu dla obciążenia koła równego obciążeniu nominalnemu zalecanemu przez producenta wynosi od 23 do 26 cm [116]. Na powierzchni styku opony z nawierzchnią rozkłada się ciśnienie stykowe, którego wartość wynosi:

$$p_s = \frac{P}{F_s} \quad (4.3)$$

gdzie: F_s - pow. styku opony z nawierzchnią [m²],
 P - obciążenie koła [kN].

Do dalszej analizy przyjęto sześć typowych opon stosowanych powszechnie w samochodach ciężarowych, o następujących szerokościach profilu [mm]: 245, 275, 305, 385, 435 i 495 (tab. 4.5.). Opony te, w zależności od konfiguracji kół i osi analizowanej sylwetki stosowane były jako pojedyncze lub bliźniacze. W tym drugim przypadku, przyjmowano rozstawy opon zalecane przez producentów ogumienia.

5. DOPUSZCZALNE MASY I NACISKI OSI POJAZDÓW

5.1. Wprowadzenie

W rozdziale omówiono aktualnie obowiązujące w Polsce i w Unii Europejskiej (zarówno w krajach członkowskich, jak i w ruchu ponadgranicznym) przepisy dotyczące dopuszczalnych nacisków osi i mas całkowitych. Dla sylwetek pojazdów sklasyfikowanych w rozdziale 4 niniejszej pracy, przedstawiono przykładowe naciski osi uwzględniające aktualnie obowiązujące przepisy odnoszące się do dopuszczalnych mas całkowitych (czyli maksymalnej masy pojazdu wraz z ładunkiem) i nacisków osi.

5.2. Dopuszczalne naciski osi i masy całkowite pojazdów w Polsce

Aktualnie obowiązujące w Polsce rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych pojazdów [193] (wraz z późniejszymi zmianami) wdraża postanowienia dyrektywy Unii Europejskiej [186] dotyczące maksymalnych wymiarów poszczególnych pojazdów kołowych w ruchu krajowym i ponadgranicznym na obszarze Wspólnoty oraz maksymalnych ciężarów w ruchu ponadgranicznym.

W rozporządzeniu tym masa pojazdu pojedynczego dwuosiowego określona jest na poziomie 18t, pojazdu trójosiowego 25 t (26 t w przypadku, gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i zawieszeniu pneumatycznym lub równoważnym, lub w przypadku, gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i nacisk każdej z tych osi nie przekracza 93,2 kN), a pojazdu czterosiowego z dwoma osiami kierowanymi 32 t (gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i zawieszeniu pneumatycznym lub równoważnym, lub w przypadku gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i nacisk każdej z tych osi nie przekracza 93,2 kN).

W przypadku zespołów pojazdów wprowadzono wymagania dotyczące masy całkowitej takiego zespołu oraz przyczepy będącej pojazdem składowym tego zespołu. Dopuszczalna masa całkowita zespołu pojazdów mającego cztery osie (dwuosiowy pojazd i dwuosiowa przyczepa) nie może przekraczać 36 t. Jednocześnie masa całkowita przyczepy dwuosiowej nie może być większa niż 18 t. Zespół pojazdów o pięciu lub sześciu osiach (dwuosiowy pojazd i trójosiowa przyczepa, trójosiowy pojazd i dwuosiowa przyczepa i trójosiowy pojazd z trójosiową przyczepą) nie może przekraczać masy 40 t, przy jednoczesnym ograniczeniu masy przyczepy dwuosiowej do 18t, lub trójosiowej do 24 t.

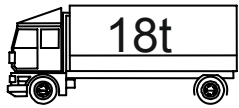
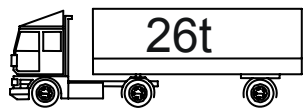
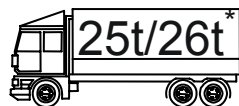

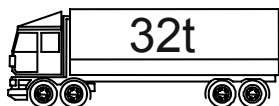
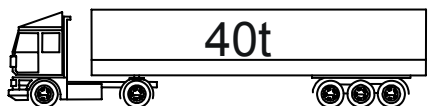
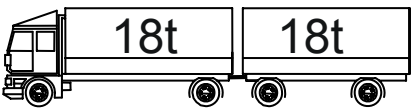


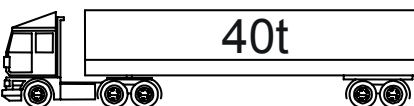
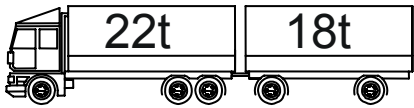
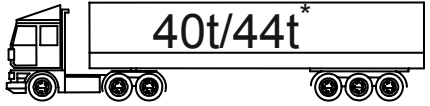
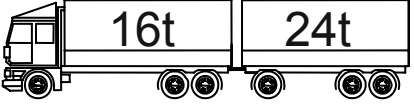

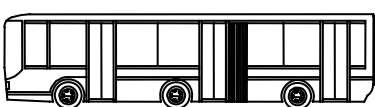
Odrębne określenie dopuszczalnej masy przyczepy powoduje zmniejszenie dopuszczalnej masy pojazdu samochodowego w zespole nawet do 16 t i to przy trzech osiach pojazdu.

W stosunku do pojazdów członowych (ciągnik siodłowy wraz z naczepą), ustanowiono odrębne wymagania, w których masę pojazdu członowego czteroosiowego określono na poziomie 36 t (38 t w przypadku, gdy odległość pomiędzy osiami naczepy przekracza 1,8m i gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i zawieszeniu pneumatycznym lub równoważnym). Dla pojazdów członowych pięcio i sześćoosiowych dopuszczalną masę całkowitą ustanowiono na poziomie 40 t (za wyjątkiem pojazdów przewożących 40-stopowy kontener ISO w transporcie kombinowanym, gdzie masa nie może przekraczać – 44 t). W rozporządzeniu tym nie określono wymagań względem zespołów pojazdów trzy lub czteroosiowych o jednoosiowej naczepie. Jednak masa ich nie powinna być większa jak analogicznych zespołów pojazdów, czyli 26 t oraz 36 t.

Dopuszczalną masę całkowitą trzyosiowych autobusów przegubowych ustalono na poziomie 28 t, a autobusów dwuosiowych (np. autobusy dalekobieżne – turystyczne) na poziomie 18 t.

Przy tak określonych dopuszczalnych masach całkowitych, po uwzględnieniu klasyfikacji pojazdów zaproponowanej w rozdziale 4 niniejszej pracy, dopuszczalna masa całkowita rozpoznanych sylwetek pojazdów nie może przekraczać wartości podanych tabeli 5.1.

Tab. 5.1 Maksymalne masy pojazdów ciężarowych, rozpoznanych i sklasyfikowanych przez autora..

Pojazdy pojedyncze	2P	 18t	Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	2C+1N	 26t
	3P	 25t/26t*		2C+2N	 36t/38t*
	4P	 32t		2C+3N	 40t
Zespoły pojazdów (pojazd silnikowy + przyczepa)	2P+2P	 18t 18t <u>36t</u>	3C+1N	 36t	
	2P+3P	 16t 24t <u>40t</u>	3C+2N	 40t	
	3P+2P	 22t 18t <u>40t</u>	3C+3N	 40t/44t*	
	3P+3P	 16t 24t <u>40t</u>			
Autobusy	2A	 18t	Autobusy	3A	 28t

*) wartość dopuszczalna w sytuacji, gdy oś napędowa wyposażona jest w koła bliźniacze o zawieszeniu pneumatycznym lub równoważnym,

**) wartość dopuszczalna dla pojazdów przewożących 40-stopowy kontener ISO w transporcie kombinowanym,

Ten sam akt prawny [193] reguluje dopuszczalne naciski osi pojazdów. W rozporządzeniu tym, naciski osi podano w tonach, dlatego też zostały one przeliczone na kN. Nacisk osi pojedynczej, a więc osi oddalonej od osi sąsiedniej o więcej niż 1,8 m lub dwóch osi sąsiednich oddalonych o mniej niż 1 m, nie może przekraczać 98,1 kN w przypadku osi nienapędowej, lub 112,8 kN dla osi napędowych.

Nacisk osi podwójnej napędowej przy odległości pomiędzy osiami składowymi mniejszej od 1m nie może być większy od 112,8 kN – taka oś jest traktowana jako oś pojedyncza. W przypadku rozstawu osi składowych wynoszącego od 1 m do 1,3 m dopuszczalny nacisk osi podwójnej może wynosić 157,0 kN, a dla rozstawu z zakresu od 1,3 m do 1,8m dopuszczalny nacisk osi podwójnej napędowej wzrasta do 176,6 kN lub 186,4 kN w przypadku osi napędowej wyposażonej w koła bliźniacze i zawieszeniu pneumatycznym lub równoważnym, lub w przypadku gdy oś napędowa jest osią o kołach bliźniaczych i nacisk każdej z tych osi nie przekracza 93,2 kN.

Dopuszczalny nacisk osi podwójnej nienapędowej (oś występująca w naczepach i przyczepach) uzależniono także od rozstawu pomiędzy osiami składowymi. I tak dla rozstawu mniejszego od 1 m nacisk nie może przekraczać 107,9 kN, dla rozstawu z przedziału od 1 m do 1,3 m nacisk nie może być większy od 156,7 kN, dla rozstawu większego od 1,3 m a mniejszego od 1,8 m nie może przekraczać 176,6 kN, a w przypadku rozstawu większego od 1.8 m sumaryczny nacisk nie może być większy od 196,2 kN.

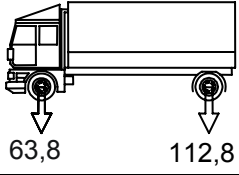
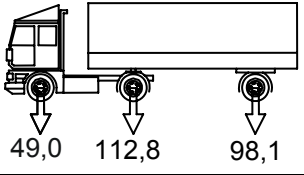
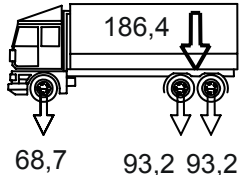
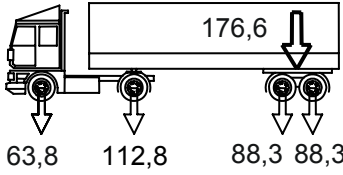
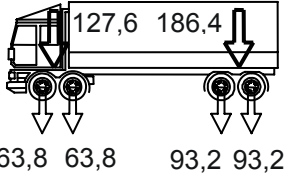
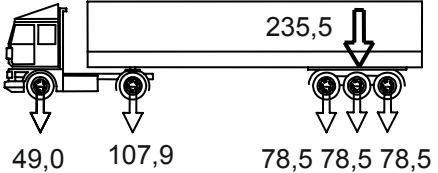
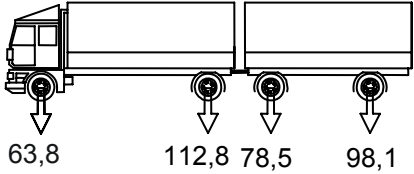
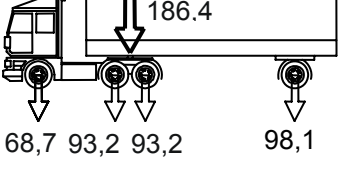
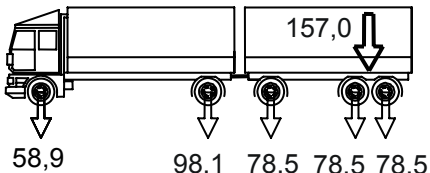
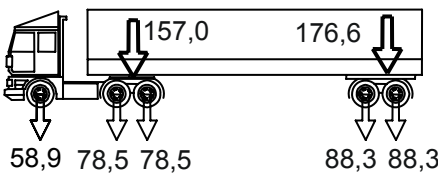
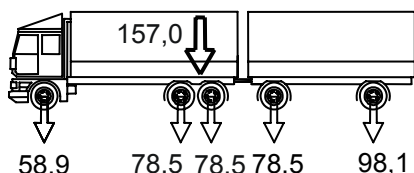
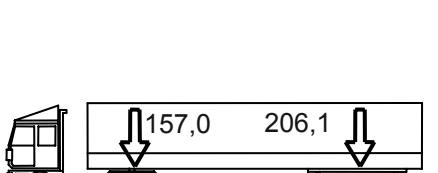
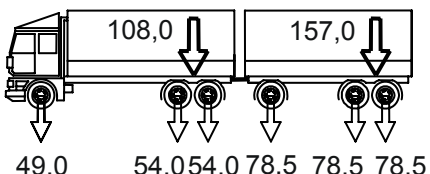
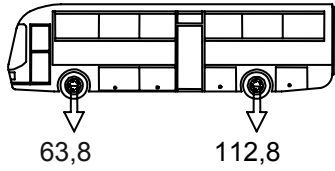
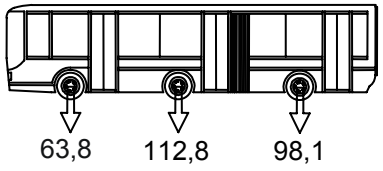
Nacisk osi potrójnej nienapędowej nie może przekraczać z kolei 206 kN dla rozstawu pomiędzy osiami mniejszego lub równego 1,3 m, lub też 235,4 kN rozstaw wynoszący od 1,3 m do 1,4 m.

Jako przykładowe rozkłady nacisków osi sklasyfikowanych w rozdziale 4 sylwetek pojazdów, przedstawiono naciski w tabeli 5.2. W tabeli tej przedstawiono rozkład nacisków osi wyznaczony przy założeniach, że sumaryczny nacisk poszczególnych osi w sylwetce nie może przekraczać dopuszczalnej masy całkowitej takiego pojazdu oraz że nacisk żadnej z osi nie przekracza wartości dopuszczalnej. A zatem odpowiadają one pojazdom obciążonym w sposób normatywny. Warto tutaj zwrócić uwagę, na przykład na sylwetki 2P+3P i 3P+3P. W obu tych sylwetkach masa samochodu ciężarowego nie może przekraczać 16 t, a masa przyczepy 24 t. Prowadzi to do sytuacji, w której w przyczepach może wystąpić identyczny rozkład nacisków osi, gdzie każda z osi generuje nacisk o wartości 78,5 kN (równomierne rozłożenie masy w pojeździe), a w samochodach ciężarowych, z uwagi na ograniczenie ich masy do 16 t, naciski na poszczególne osie składowe nie mają praktycznie możliwości osiągnięcia wartości maksymalnej dopuszczalnej. Jest to widoczne

zwłaszcza w przypadku drugiego z wymienionych pojazdów (3P+3P), w którym występuje oś podwójna dla której dopuszczalny nacisk nie może przekraczać wartości 186,4 kN, co już samo w sobie przekracza dopuszczalną masę samochodu ciężarowego, wynoszącą w tym przypadku 16 t. Jest to skutek niezależnego ograniczenia dopuszczalnej masy całkowitej zarówno samochodu ciężarowego jak i przyczepy, co należy uznać za duży plus, gdyż sytuacja w której określona by była tylko dopuszczalna masa całkowita całego zespołu pojazdów, mogłaby prowadzić do nierównomiernego rozłożenia masy oraz do znacznych przekroczeń nacisków osi.

Oczywiście, podany w tabeli 5.2 rozkład jest tylko jedną z możliwych kombinacji rozkładu obciążeń i nie jest on obciążeniem „typowym” takiego pojazdu ciężarowego. Na przykład w pojeździe członowym 2C+3N pokazano sytuację w której oś potrójna obciążona jest w sposób dopuszczalny (generuje nacisk 235,5 kN), oś napędowa wywiera nacisk rzędu 107,9 kN, a oś kierowana 49,0 kN (nacisk osi kierowanej o tej wartości jest praktycznie minimalnym naciskiem takiego pojazdu wynikającym z warunków konstrukcyjnych). Jednak łatwo wyobrazić sobie sytuację, w której nacisk osi napędowej wynosi 112,8 kN, co przy nie zmienionym nacisku na oś kierowaną (49,0 kN) prowadziłoby do sytuacji, w której na oś potrójną przypada „jedynie” 230,6 kN, co przy założeniu równomiernego nacisku na osie składowe daje 76,9 kN na każdą z osi. Dodatkowo, z uwagi na to, że rozkład masy zależy jest m.in. jeszcze od takich czynników jak rodzaju przewożonego ładunku oraz sposób jego lokalizacji w strefie ładunkowej (równomierny rozkład będzie występował praktycznie tylko w przypadku pojazdów przystosowanych do przewozów ładunków płynnych i sypkich – np. cysterny), to trudno jednoznacznie określić, jak wygląda rozkład nacisków osi pojazdów obciążonych w sposób normowy, o nie przekroczonych naciskach osi.

Tab. 5.2 Naciski osi pojazdów ciężarowych, rozpoznanych i sklasyfikowanych przez autora – naciski osi przy dopuszczalnej masie całkowitej, w sylwetce pojazdu występuje oś o maksymalnym dopuszczalnym nacisku.

Pojazdy pojedyncze	2P		Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	2C+1N	
	3P			2C+2N	
	4P			2C+3N	
Zespoły pojazdów (pojazd silnikowy + przyczepa)	2P+2P		Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	3C+1N	
	2P+3P			3C+2N	
	3P+2P			3C+3N	
	3P+3P				
Autobusy	2A		Autobusy	3A	

5.3. Dopuszczalne naciski osi i masy całkowite pojazdów w Europie

Podobnie jak w Polsce, praktycznie w każdym kraju europejskim, obowiązują ograniczenia w dopuszczalnej masie całkowitej pojazdów i ich naciskach osi (tab. 5.3, [90]) i są regulowane odpowiednimi przepisami lokalnymi. Jak widać w większości krajów, wartości te są bardzo zbliżone do obowiązujących w Polsce. Wyjątek stanowi tutaj praktycznie Francja, gdzie dopuszczalny nacisk osi pojedynczej, zarówno swobodnej jak i napędowej wynosi 127,5 kN, Włochy, gdzie nacisk ten ustalono na poziomie 117,7 kN oraz Belgia, Luxemburg i Portugalia, w których dopuszczalne naciski osi pojedynczych napędowych wynoszą 117,7 kN. Podobnie ma się sytuacja z masami całkowitymi pojazdów, gdyż tylko kilka krajów europejskich dopuszcza większe masy całkowite pojazdów niż Polska (m.in. Finlandia, Holandia i Macedonia). Należy zwrócić szczególną uwagę na Finlandię, gdyż dopuszczalna masa całkowita pojazdów poruszających się po drogach Finlandii jest uzależniona od całkowitej liczby osi pojazdu. I tak, masa całkowita zespołu pojazdów 5-osioвого nie może przekraczać 44 t., 6-osiowego 53 t., 7-osiowego 60 t., pojazdu członowego 5-osiowego 42 t., a 6-osiowego 48 t.. Są to jednak wartości obowiązujące tylko w ruchu wewnętrznym, a nie dotyczą one ruchu ponadgranicznego w Unii Europejskiej.

Państwa będące członkami UE, zobowiązane są na mocy traktatu akcesyjnego do dostosowania swoich dróg leżących w ciągu dróg międzynarodowych i wybranych dróg krajowych do wymagań sprecyzowanych w Dyrektywie Rady UE nr 96/53/EC [187]. Wymagania tej dyrektywy pokrywają się praktycznie z przepisami Polskimi, gdyż obowiązujące w Polsce Rozporządzenie [193, 194] zostało wprowadzone z uwagi na konieczność dostosowania polskiego prawa do wymagań UE (poprzednio dopuszczalne były znacznie mniejsze naciski osi – pierwotnie 80 kN, a następnie 100 kN, ale większe masy całkowite pojazdów wieloosiowych wynoszące 42 t [190, 191, 192]). Jedyna różnica dotyczy pojazdów przewożących 40-stopowy kontener ISO w transporcie kombinowanym. W Polsce, taki ładunek może przewozić tylko pojazd członowy sześciosiowy, a jego masa całkowita nie może przekraczać 44 t. W Unii Europejskiej kontenery ISO w transporcie kombinowanym mogą być przewożone zarówno przez pojazdy sześciosiowe, jak i pięciosiowe. Jednak przy pięciu osiach (np. dwuosiowy pojazd silnikowy i trzyosiowa naczepa) i przy masie rzędu 44 t., taka konfiguracja może prowadzić do przeciążenia osi pojazdu i niekorzystnego rozkładu obciążeń na poszczególne osie.

Tab. 5.3. Dopuszczalne masy i naciski osi pojazdów ciężkich w krajach Europy [210], [201]- [225].

Kraj	Nacisk osi pojedynczej nienapędzanej	Nacisk osi pojedynczej napędzanej	Masa samochodu ciężarowego 2-osiowego	Masa samochodu ciężarowego 3-osiowego	Masa zespołu pojazdów 4-osiowego	Masa zespołu pojazdów 4-osiowego (lub o większej liczbie osi)	Masa pojazdu członowego 5-osiowego (lub o większej liczbie osi)
	[kN]	[kN]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]
Albania	98,1	-	18	25	40	44	38
Austria	98,1	112,8	18	26	38 ⁽¹⁾	38 ⁽¹⁾	38 ⁽¹⁾
Azerbejdżan	98,1	-	18	25	37	37	37
Białoruś	98,1	-	16	23	36	38	38
Belgia	98,1	117,7	19	26	39	44	44
Bośnia-Hercegowina	98,1	-	18	26	40	40	40
Bułgaria	98,1	112,8	16	26	36	40	40
Chorwacja	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Czechy	98,1	112,8	18	26	36	42	42/48
Dania	98,1	112,8	18	26	38	42/48	42/48
Estonia	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Finlandia ⁽²⁾	98,1	112,8	18	26	36	44	42/48
Francja	127,5	127,5	19	26	38	40	40
Grecja	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Gruzja	98,1	-	18	38	-	-	-
Holandia	98,1	112,8	21,5	33	40	50	50
Hiszpania ⁽⁴⁾	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Irlandia	98,1	103,0	17	25	35	40	40
Islandia	98,1	112,8	18	26	37	40	44
Łotwa	98,1	112,8	18	26	40	40	40
Liechtenstein	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Litwa	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Luxemburg	98,1	117,7	19	26	-	44	44
Macedonia	98,1	112,8	21,5	33	36	40	40
Malta	105,9	112,8	18	25	36	40	40
Mołdawia	98,1	98,1	18	24	36	40	40
Niemcy	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Norwegia	98,1	112,8	19,5	26	-	50	47
Polska	98,1	112,8	18	26	36	40	40/44
Portugalia	98,1	117,7	19	26	37	40 ⁽³⁾	40 ⁽³⁾
Rumunia	98,1	112,8	18	26	36	40	40
Rosja	98,1	-	18	25	36	38	38
Serbia	98,1	-	18	24	36	40	40
Słowacja	98,1	112,8	18	26	40	40	40
Słowenia	98,1	112,8	18	25	-	40	40
Szwecja	98,1	112,8	18	26	-	60	60
Szwajcaria	98,1	112,8	18	26	34	34	34
Turcja	98,1	112,8	18	25	36	40	40
Ukraina	98,1	-	-	-	-	38	38
Węgry	98,1	107,9	20	24	36	40	40
Wielka Brytania	98,1	112,8	18	26	36	40	40/44
Włochy	117,7	117,7	18	26	40	44	44

UWAGA! Naciski zostały przeliczone z [t] na [kN] przy założeniu: 1 t = 9,81 kN.

(1) Generalnie dla transportu drogowego: 38 t. Jednak z uwagi na 5 % tolerancję dopuszczalnych obciążeń, limit wynosi 40 t

(2) Zespół pojazdów: 5-osiowy = 44 t; 6-osiowy = 53 t; 7-osiowy = 60 t; pojazd członowy: 5-osiowy = 42 t; 6-osiowy = 48 t

(3) Zespół pojazdów 5-osiowy i pojazd członowy 5-osiowy przewożący 40-sto stopowy kontener ISO = 44 t

(4) 3 osiowa naczepa z 40-sto stopowym kontenerem ISO = 44 t

6. IDENTYFIKACJA NACISKÓW OSI POJAZDÓW NA SIECI DRÓG W POLSCE

6.1. Wprowadzenie

W rozdziale tym przedstawiono wyniki pomiarów nacisków osi i mas całkowitych pojazdów z lat 1997 ÷ 2005, wśród których można wyróżnić:

- pomiary restrykcyjne w latach 1997 ÷ 2001, wykonywane przy pomocy wag przenośnych, na grupie pojazdów przeciążonych,
- pomiary z lat 2000 ÷ 2001 obejmujące wyniki ciągłej rejestracji nacisków osi i mas przejeżdżających pojazdów, przy pomocy wag selekcyjnych zainstalowanych na drodze nr 11, w miejscowości Byczyna,
- pomiary nacisków osi i mas pojazdów wykonywane od 2005 roku w sposób ciągły, w pełnym zakresie występowania nacisków osi, na drodze nr 11, w miejscowości Byczyna.

Pomiary z lat 1997 ÷ 2001, mające na celu dyscyplinowanie kierowców i przewoźników, wykonywane na wybranych drogach krajowych (nr 11, nr 3, nr 8, nr 35 i nr 46), za pomocą wag przenośnych, w miejscach stale zmieniających się (różne miejscowości i punkty pomiarowe), pozwoliły na ocenę występujących nacisków osi w grupie pojazdów przeciążonych. Dopiero wyniki z pomiarów ciągłych wykonywanych przy pomocy wag selekcyjnych zlokalizowanych w miejscowości Byczyna oraz wyniki uzyskane po modernizacji tych wag selekcyjnych do wag umożliwiających pomiar rzeczywistych nacisków osi w pełnym zakresie występujących obciążeń (wagi DAW 100 firmy PAT), pozwoliły na uzyskanie pełnego obrazu występujących nacisków osi i mas całkowitych oraz na weryfikację wyników wcześniej prowadzonych pomiarów.

W oparciu o tak zestawione wyniki pomiarów przeprowadzono identyfikację występujących na drogach w Polsce nacisków osi i mas pojazdów z uwzględnieniem zaproponowanej w rozdziale 4 klasyfikacji pojazdów. W rozdziale tym zamieszczono również rozpoznanie występującej struktury rodzajowej pojazdów ciężarowych na drodze nr 11 oraz zmian w niej zachodzących na przestrzeni ostatnich lat.

6.2. Pomiary nacisków osi i mas pojazdów

W Polsce, przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni, uwzględnia się obecnie tylko trzy grupy pojazdów – samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe

z przyczepami oraz autobusy. Jako wyjściowe, przyjmuje się obciążenie ruchem uzyskane na podstawie generalnego pomiaru ruchu, przeprowadzonego przez GDDP (aktualnie podstawą są pomiary przeprowadzane w 2005 r.) na drogach krajowych w Polsce [104]. W pomiarze tym rejestrowano pojazdy biorące udział w ruchu na drogach publicznych w podziale na 7 kategorii (motocykle, samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe – dostawcze, samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe z przyczepami, autobusy i ciągniki rolnicze).

Jednak taki sposób klasyfikacji pojazdów jest niewystarczający przy wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni. Takie podejście daje tylko przybliżony obraz występujących rzeczywistych obciążeń w danym przekroju drogi, gdyż sylwetki pojazdów sklasyfikowane w jednej grupie charakteryzują się różnymi konfiguracjami osi (w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami znajdują się razem samochody ciężarowe 2-osiove z przyczepą 2-osiową oraz ciągniki siodłowe 3-osiove z naczepą 3-osiową o kołach Super-Single) i różnymi występującymi rozkładami obciążeń przypadającymi na osie. Podejście takie, nie pozwala na określenie rzeczywistych wielkości występujących obciążeń i może prowadzić częstokroć do skrócenia okresu eksploatacji nawierzchni na wskutek występowania większych obciążeń niż zakładano na etapie projektowania.

W celu prawidłowej identyfikacji występujących obciążeń, niezbędny jest ciągły pomiar występujących obciążeń za pomocą systemów WIM (Weigh In Motion). Pod pojęciem ważenia pojazdów w ruchu należy rozumieć rejestrację wagi całego pojazdu oraz obciążeń składowych przypadających na jego osie podczas jego przejazdu z dowolną prędkością w danym przekroju drogi [43, 44, 179, 180, 181, 182].

Wśród systemów przeznaczonych do ważenia pojazdów w ruchu można wyróżnić systemy HS-WIM (High Speed WIM) przeznaczone do pomiarów pojazdów w pełnym zakresie prędkości aż do 130 km/h oraz systemy LS-WIM (Low Speed WIM), w których pomiar jest możliwy z prędkościami z przedziału 5-15 km/h [44]. Wykorzystanie LS-WIM jest możliwe tylko na specjalnie do tego celu przeznaczone punkty kontrolne znajdujące się poza przekrojem drogowym po uprzednim zatrzymaniu pojazdu, dlatego też systemu tego nie można wykorzystać do monitorowania istniejących natężeń i pojawiających się obciążeń na danej drodze, a znajduje on zastosowanie jedynie do celów restrykcyjnych.

Jednak polskie doświadczenia na polu tego typu badań są bardzo skromne, gdyż praktycznie nie są prowadzone żadne pomiary ciągłe pojazdów w ruchu, a wagi systemów HS-WIM są wykorzystywane jedynie do celów wstępnej selekcji pojazdów w pomiarze dwustopniowym stosowanym w celach restrykcyjnych. Dlatego też, rzeczywiste wartości

nacisków osi, mas pojazdów i zespołów pojazdów na sieci dróg w Polsce, autor ustalił w oparciu o zebrane wyniki pomiarów restrykcyjnych, wykonywanych w latach 1997-2001 za pomocą wag przenośnych, na następujących drogach krajowych:

- droga nr 11, miejscowość: *Byczyna*,
- droga nr 3, miejscowości: *Kłobuczyn, Kochlice, Paszowice*,
- droga nr 8, miejscowości: *Smardzów, Cieszyce, Jordanów*,
- droga nr 35, miejscowość: *Tworzyjanów*,
- droga nr 46, miejscowości: *Kłodzko, Złoty Stok*,
- A-4, miejscowości: *Nowa Wieś Legnicka, Kąty Wrocławskie, Bielany Wrocławskie*.

Pomiary te, wykonywane były podczas kontroli dopuszczalnych mas i nacisków osi samochodów ciężarowych wykonywanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Policję, a późniejszym okresie przez ITD (Inspekcję Transportu Drogowego). Dużym minusem zebranych wyników jest to, że nie były one prowadzone systematycznie i w ustalonych okresach czasu, a więc ich wykorzystanie do celów statystycznych może być bardzo ograniczone. Dodatkowo, zebrane wyniki ograniczają się do pojazdów przeciążonych zatrzymanych do kontroli a nie zawierają nacisków osi i mas pojazdów obciążonych w sposób normatywny i uczestniczących w ruchu. Ogółem zebrano 1159 wyników pomiarów w postaci protokołów pomiarowych, z których wyselekcjonowano następujące parametry:

- naciski poszczególnych osi pojazdów,
- masy całkowite pojazdów,
- rozstawy pomiędzy osiami.

Z lat 2000-2001 pochodzą również naciski osi i masy pojazdów zarejestrowane na wagach selekcyjnych (wagi DAW 50) usytuowanych w drodze nr 11 w miejscowości Byczyna. Jednak ich przydatność też jest ograniczona, gdyż rejestracja nacisków osi pojazdów odbywała się tylko w zakresie do 137 kN bez względu na rodzaj osi (pojedyncza, podwójna, czy też potrójna). O ile w przypadku osi pojedynczych zakres taki jest wystarczający, gdyż większość nacisków tych osi mieści się w tym zakresie, to w przypadku osi podwójnych i potrójnych jest on zbyt mały (dopuszczalny nacisk osi potrójnej wynosi 240 kN). Poza tym, waga selekcyjna nie rejestrowała rzeczywistych wartości nacisków osi i mas pojazdów, a jedynie stwierdzała fakt przejazdu pojazdu o określonej masie i naciskach osi mieszczących się w danym przedziale obciążenia lub masy. Wyniki rejestracji prowadzonej na wagach selekcyjnych posłużyły do wyznaczenia:

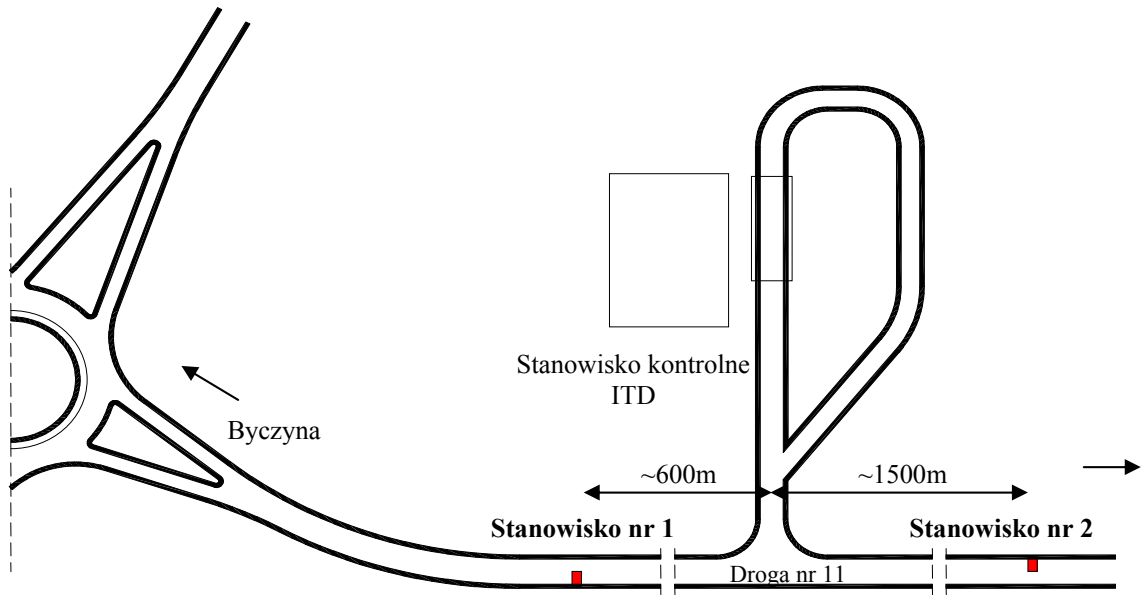
- statystycznych rozkładów nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych oraz ich przeładowań,
- rozkładów mas całkowitych pojazdów,
- struktury rodzajowej pojazdów.

Dopiero w ostatnim okresie (IV kwartał 2005 r) pojawiła się możliwość wykonania pomiarów nacisków osi i mas pojazdów w ruchu, w ramach pomiarów prowadzonych przez Zakład Dróg i Lotnisk Politechniki Wrocławskiej na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, w celu sprawdzenia możliwości ważenia pojazdów w ruchu przy użyciu wag firmy PAT zainstalowanych na drodze nr 11 w miejscowości Byczyna.

Wagi DAW 100 zlokalizowano na dwóch stanowiskach pomiarowych [172] (rys. 6.1):

1. stanowisko nr 1 – usytuowane na drodze nr 11 ok. 600m od punktu kontrolnego ITD w kierunku miejscowości Byczyna (obszar zabudowany, rys. 6.2),
2. stanowisko nr 2 – usytuowane na drodze nr 11 ok. 1500m od punktu kontrolnego ITD w kierunku miejscowości Kępno (obszar niezabudowany, rys. 6.2).

Stanowisko pomiarowe składa się z dwóch wag o wymiarach 175 cm x 50,8 cm ułożonych prostopadle do kierunku jazdy na jednym pasie ruchu [172]. Dwie płyty pomiarowe, umożliwiają rejestrację obciążeń pochodzących od lewej i prawej strony pojazdu, a nacisk osi wyznaczany jest jako suma nacisku koła lewego i prawego.



Rys. 6.1. Lokalizacja stanowisk pomiarowych – droga nr 11, miejscowość Byczyna.

a)



b)



c)



Rys. 6.2. System ważenia pojazdów w ruchu w m. Byczyna droga nr 11:

- a) – stanowisko nr 1,
- b) – stanowisko nr 2,
- c) – waga referencyjna.

Skalibrowane wagi dokonują ciągłej rejestracji takich parametrów przejeżdżających pojazdów jak: ich prędkości oraz kategorie, naciski osi pojedynczych, naciski osi składowych osi wielokrotnych, masy całkowite pojazdów, rozstawy osi oraz odległości pomiędzy poszczególnymi pojazdami. Sylwetki pojazdów rozpoznawane i klasyfikowane przez systemy WIM obejmują praktycznie wszystkie z pojazdy poruszające się po drogach w Polsce, dzięki czemu możliwe jest dokładne rozpoznanie i zidentyfikowanie występujących obciążeń od przejeżdżających pojazdów.

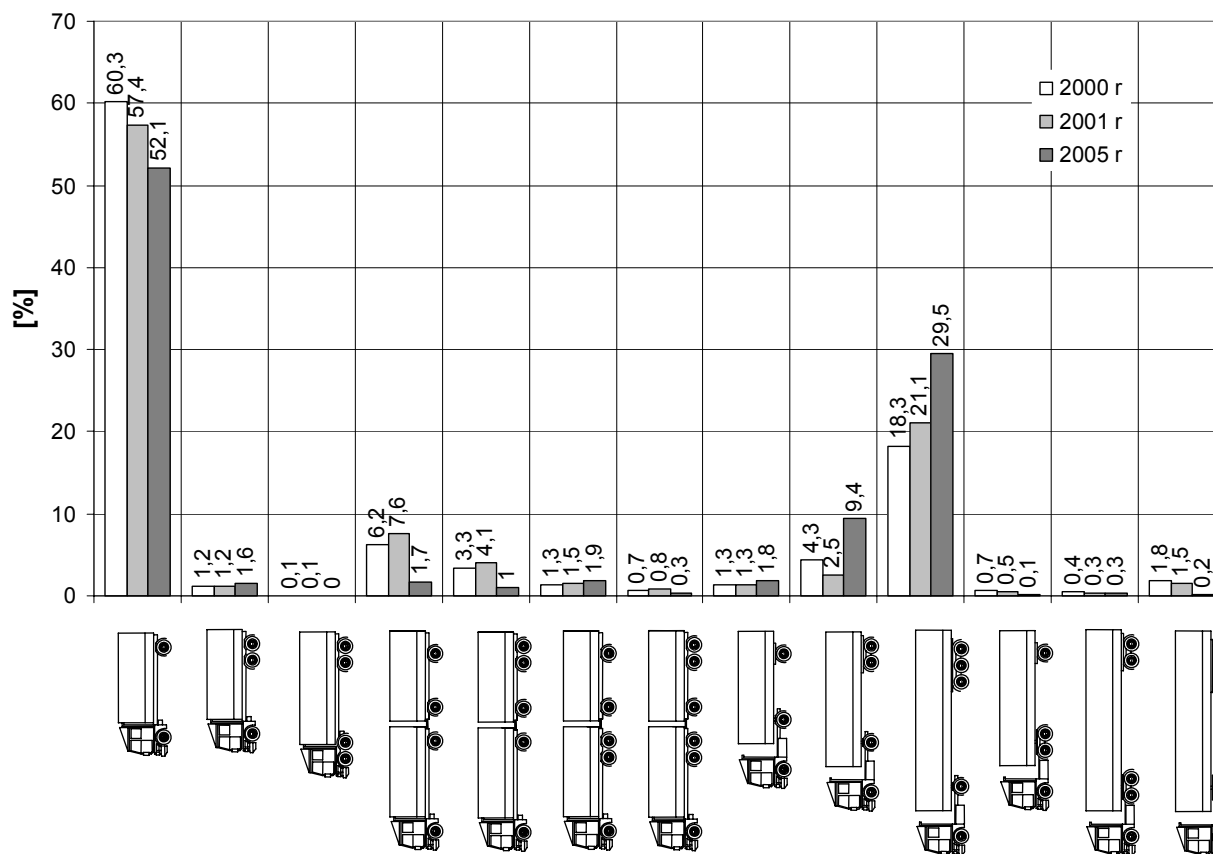
6.3. Struktura rodzajowa i masy całkowite pojazdów na sieci dróg w Polsce

Pomiary mas pojazdów prowadzone na drogach krajowych w Polsce za pomocą wag przenośnych (droga nr 11, 3, 8, 35, 46 i A4) wykonywane były w grupie pojazdów przeciążonych, zatrzymywanych do kontroli w sposób wyrywkowy, przez upoważnione do tego służby. W związku z tym, nie były one podstawą oceny struktury rodzajowej pojazdów ciężarowych występujących na drogach w Polsce. Do tego celu wykorzystano rejestrację pojazdów za pomocą wag selekcyjnych zainstalowanych na drodze nr 11 (miejscowość Byczyna) oraz pomiary prowadzone w tym samym przekroju drogi w 2005 roku przy użyciu wag firmy PAT pracujących w systemie HS-WIM.

W latach 2000 i 2001 w grupie samochodów ciężarowych bez przyczep dominowały samochody ciężarowe dwuosiowe (sylwetka 2P), które stanowiły od 60,3 % (2000 r.) do 57,4 % (2001 r.) ogólnej liczby pojazdów przejeżdżających przez dany przekrój drogi (rys. 6.3). Sumaryczny udział pojazdów trójosiowych (3P) i czteroosiowych (4P) w latach 2000 i 2001 wynosił 1,2 %.

W grupie samochodów ciężarowych z przyczepami rysuje się przewaga samochodów dwuosiowych z przyczepami dwuosiowymi (2P+2P). W 2000 r. stanowiły one 6,2 % pojazdów poruszających się po drodze nr 11 (m. Byczyna), a w 2001 r. już 7,6 %. Pozostałe sylwetki w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami stanowiły od 0,7 % (3P+3P w 2000 r.), aż do 4,1 % (2P+3P w 2001 r.) (rys. 6.3).

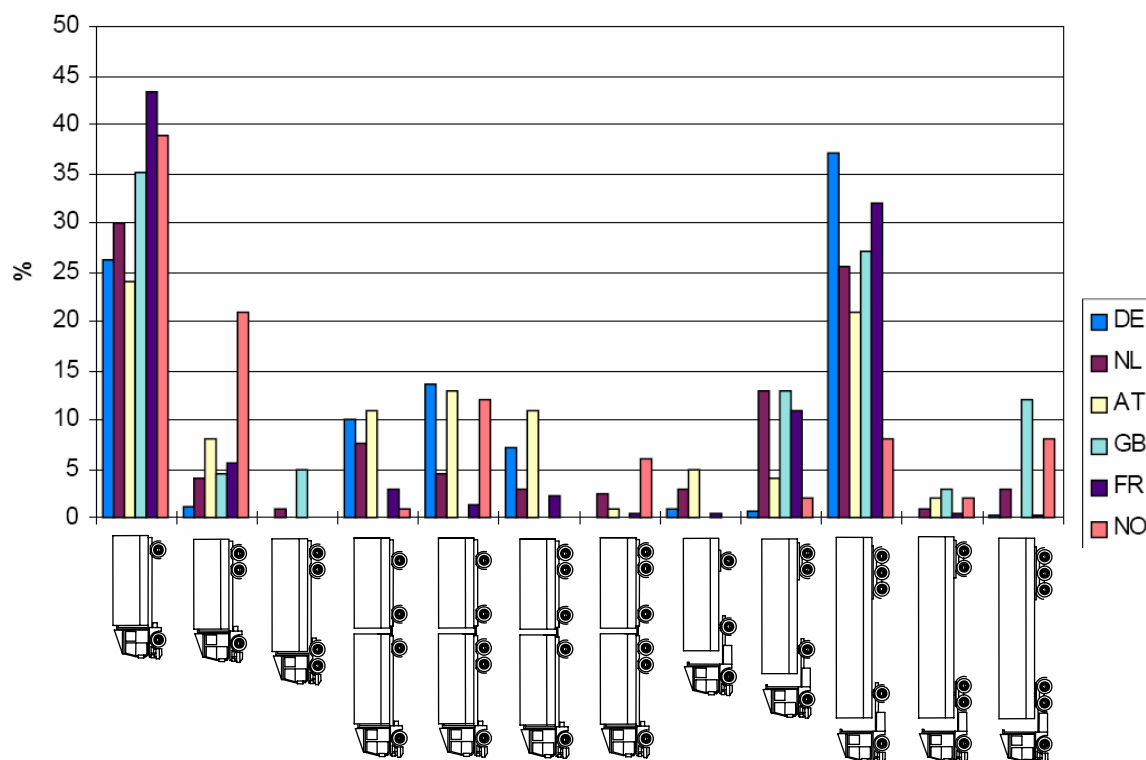
W trzeciej grupie pojazdów (pojazdy członowe), dominują ciągniki siodłowe dwuosiowe z trójosiową naczepą (2C+3N). W 2000 r. ich udział w ruchu wynosił 18,3 %, a w 2001 r. już 21,1 %. Udział ciągników siodłowych dwuosiowych z dwuosiową naczepą (2C+2N) w 2000 r. wynosił 4,3%, a w 2001 r. zmniejszył się do 2,5 % (rys. 6.3).



Rys. 6.3. Struktura rodzajowa pojazdów ciężkich – m. Byczyna, lata 2000 i 2001 oraz grudzień 2005 r.

Bardzo podobnie przedstawiają się rezultaty uzyskane przy pomocy wag pracujących w systemie HS-WIM (rys. 6.3). W grudniu 2005 roku, w strumieniu pojazdów ciężkich dominowały przede wszystkim dwie sylwetki: pojazdy dwuosiowe (udział w wysokości 52,1 %) i pięciosiose pojazdy członowe (dwuosiowy ciągnik siodłowy z trzyosową naczepą, udział w wysokości aż 29,5 %). Trzecią znaczącą grupą pojazdów są również pojazdy członowe, ale czterosiose (dwuosiowy ciągnik siodłowy z dwuosową naczepą). Stanowią one ponad 91,2% pojazdów ciężkich występujących na drodze krajowej nr 11. Z klasyfikacji wykluczono pojazdy osobowe i dostawcze o masie mniejszej niż 2t, z uwagi na ich znikomy wpływ na konstrukcję nawierzchni.

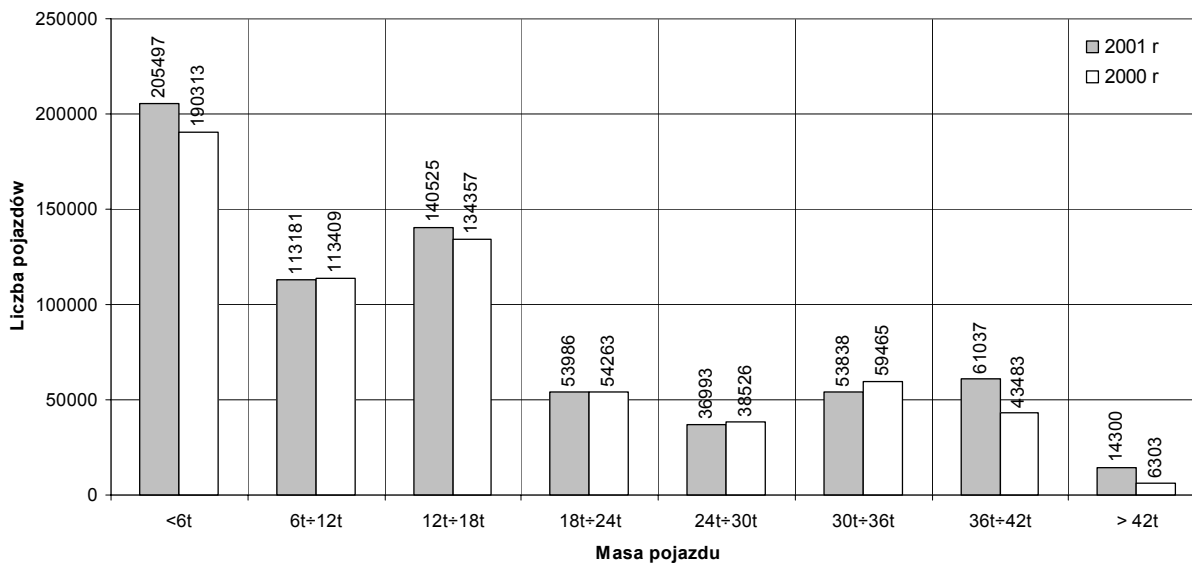
Prawie identyczną strukturę rodzajową pojazdów ciężarowych obserwuje się w innych krajach europejskich ([46], rys. 6.4). W strumieniu ruchu przeważają również sylwetki 2P, 2P+2P, 2P+3P, 3P+2P, 2C+2N i 2C+3N. Największe różnice w strukturze rodzajowej widoczne są w Norwegii, gdzie obserwuje się ponad 20 % udział samochodów trójosiowych (3P), a stosunkowo nieliczna jest reprezentacja ciągników siodłowych pięciosioowych (2C+3N), gdyż udział tych pojazdów w strumieniu ruchu wynosi jedynie ok. 7,5%. Bardzo dobrze strukturę rodzajową pojazdów w Polsce odzwierciedla struktura rodzajowa pojazdów występująca we Francji.



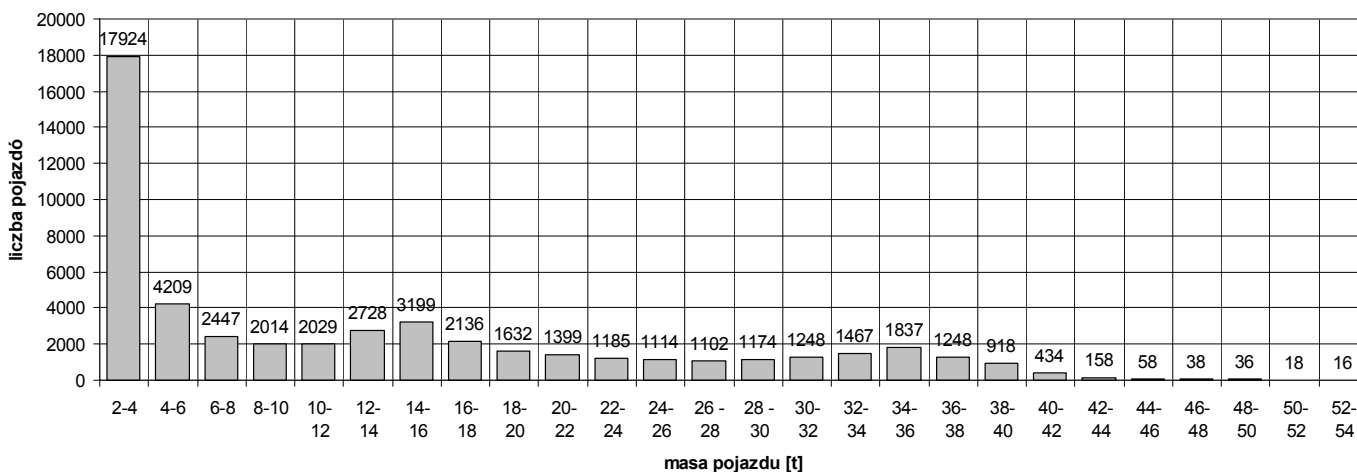
Rys. 6.4. Występowanie pojazdów wg typów w różnych krajach europejskich [46]:
DE – Niemcy, NL – Holandia, AT – Austria, GB – Wielka Brytania, FR – Francja, NO - Norwegia.

Podobnie jak w przypadku struktury rodzajowej, przy ocenie masy całkowitej pojazdów ciężarowych, pomiary prowadzone przy użyciu wag przenośnych znalazły znikome zastosowanie (z tych samych przyczyn – uzyskane wyniki nie są reprezentatywne dla wszystkich pojazdów poruszających się po drogach w Polsce, gdyż odnoszą się tylko do pojazdów przeciążonych).

Podstawą oceny, stały się ponownie wyniki z drogi nr 11 (m. Buczyna) uzyskane za pomocą wag selekcyjnych (lata 2000 i 2001, rys. 6.5) oraz wag HS-WIM (2005 r., rys. 6.6). W 2000 i 2001 roku dopuszczalna masa całkowita pojazdów ciężarowych wynosiła 42 t [190], a udział pojazdów przeciążonych, o masie większej niż 42t wynosił wtedy 1,0 % w 2000 r. i 2,1 % w 2001 r. Obecnie, masa całkowita nie może przekraczać 40 t [193], a udział pojazdów o masie większej, w grudniu 2005 roku wynosił 1,5 %. Może to świadczyć o tym, że pomimo zmniejszenia dopuszczalnej masy całkowitej, nie nastąpił wzrost liczby pojazdów o obciążeniu ponadnormatywnym.



Rys. 6.5. Masy całkowite pojazdów – m. Byczyna, lata 2000-2001 r.



Rys. 6.6. Masy całkowite pojazdów – m. Byczyna, 12 2005 r.

6.4. Naciski osi pojazdów na sieci dróg w Polsce

W celu przeprowadzenia poprawnej identyfikacji występujących nacisków osi i mas pojazdów na sieci dróg w Polsce, w pierwszej kolejności przeprowadzono analizę poszczególnych nacisków osi pojazdów przeciążonych zarejestrowanych na sieci dróg w Polsce w latach 1997 – 2001 r (tab. 6.1, 6.2). Jak widać, średnie naciski poszczególnych osi w grupie pojazdów przeciążonych są do siebie zbliżone, a występujące różnice nie przekraczają 10 %.

W tabeli 6.3. zestawiono natomiast maksymalne naciski osi pojazdów ciężarowych zarejestrowane w latach 1997 i 2001 w trakcie pomiarów restrykcyjnych na wybranych drogach krajowych w Polsce (droga nr 11, 3, 8, 35, 46, A-4) oraz w miesiącu grudniu 2005 roku na drodze nr 11 w miejscowości Byczyna (należy tutaj zaznaczyć, że zestawionych w tabeli 6.3 maksymalnych nacisków osi pojazdów ciężarowych nie należy sumować

w celu określenia maksymalnej zarejestrowanej masy pojazdu ciężarowego, gdyż występowały one w różnych sylwetkach pojazdów).

W przypadku pojazdów pojedynczych, maksymalny zarejestrowany nacisk osi pojedynczej pojazdu wyniósł w miesiącu grudniu 2005 roku 145 kN (dopuszczalny nacisk 100 kN), a osi składowej osi podwójnej 123 kN (dopuszczalny nacisk wynosi 80 kN). Naciski osi zarejestrowane w latach 1997 – 2001 na innych drogach krajowych niewiele przekraczają wartości uzyskane w grudniu 2005 roku (np. na osi pojedynczej pojazdu 2P maksymalny rozpoznany nacisk wyniósł 153 kN). Są to nadal jednak przekroczenia o ponad 40%.

Jeszcze większe przekroczenia zaobserwowano w miesiącu grudniu 2005 r. W przypadku zespołów pojazdów, gdzie maksymalny zarejestrowany nacisk osi pojedynczej wynosił 185 kN (przekroczenie o 85%), a składowej osi podwójnej 146 kN (przekroczenie o ponad 80%). W przypadku tego typu pojazdów, w latach 1997 – 2001 największe naciski osi pojedynczych zarejestrowano w sylwetce 2P+3P (164 kN), osi składowej osi podwójnej w sylwetce 3P+2P (155 kN).

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -

Tab. 6.1. Średnie naciski osi i odchylenia standardowe pojazdów pojedynczych i zespołów pojazdów w latach 1997 – 2001 r oraz 2005 r.

Droga	Parametr	Sylwetka pojazdu																												
		2P		3P			4P				2P+2P				2P+3P					3P+2P					3P+3P					
		Oś 1	Oś 2	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 6
Naciski osi pojazdów w przekroju drogi [kN] – 2005 r.																														
11	μ	33,4	41,2	50,0	61,0	41,0	44,0	45,0	47,0	39,0	44,6	64,10	37,4	36,9	51,0	65,0	42,0	38,0	39,0	55,0	73,0	50,0	55,0	55,0	48,0	61,0	45,0	43,0	33,0	33,0
	σ	10,78	19,57	14,15	21,71	17,31	30,49	21,07	25,76	17,17	11,20	20,93	15,25	14,67	10,79	23,20	18,98	18,29	18,78	11,22	20,69	17,01	20,11	20,82	14,40	20,65	17,83	19,00	19,21	19,85
Naciski osi pojazdów przeciążonych [kN] – lata 1997 – 2001																														
11	μ	62,7	117,5	68,5	105,30	70,0	-	-	-	-	60,2	114,3	70,0	68,9	61,2	113,0	67,5	67,5	69,3	61,5	103,8	77,2	82,0	81,7	63,8	105,4	61,6	71,7	62,0	65,4
	σ	8,18	14,18	18,91	15,45	28,46	-	-	-	-	9,66	13,83	17,81	17,98	7,93	13,64	17,73	14,89	14,71	9,55	19,83	20,78	18,09	19,43	12,95	18,09	20,28	17,24	11,83	15,96
A4	μ	-	-	-	-	-	64,6	70,3	108,2	104,3	61,1	118,5	77,4	73,5	47,5	103,1	78,9	86,1	87,6	59,9	95,5	84,2	76,4	77,9	72,2	113,8	68,3	68,3	60,0	58,5
	σ	-	-	-	-	-	4,43	7,31	8,17	10,69	5,22	13,44	15,53	15,81	21,78	17,97	9,85	22,54	27,33	5,26	10,18	9,45	11,49	23,29	8,78	25,55	12,58	15,64	6,89	7,16
35	μ	-	-	-	-	-	76,6	81,0	118,6	115,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66,7	88,0	82,5	68,9	73,8	69,4	109,4	110,3	93,1	72,8	83,5
	σ	-	-	-	-	-	1,73	2,64	2,91	4,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,48	25,75	30,64	17,70	24,46	17,00	18,94	22,89	32,88	21,09	47,17
46	μ	58,5	127,5	-	-	-	-	-	-	-	60,5	117,8	74,4	72,3	64,5	118,9	73,9	68,9	65,8	67,5	102,6	80,4	87,8	67,7	68,7	98,2	87,9	75,3	74,3	74,1
	σ	9,35	17,08	-	-	-	-	-	-	-	8,13	9,31	10,82	10,70	8,41	12,61	5,69	7,15	7,20	17,76	9,16	18,04	10,41	4,16	9,49	22,22	5,73	12,47	10,72	19,67
3	μ	-	-	47,3	102,0	86,8	71,9	61,3	102,1	98,4	62,2	113,5	67,5	68,2	-	-	-	-	-	62,3	121,5	108,3	81,1	85,0	-	-	-	-	-	-
	σ	-	-	6,38	2,77	20,19	2,96	8,54	13,42	9,98	9,07	9,77	20,21	19,80	-	-	-	-	-	16,70	23,95	9,57	14,30	12,62	-	-	-	-	-	-
8	μ	64,5	114,1	52,3	94,3	82,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62,0	97,9	77,4	77,4	82,4	59,9	95,1	67,5	72,5	64,8	66,2
	σ	10,18	4,64	5,89	6,81	18,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,66	7,07	24,52	18,87	21,20	8,51	2,80	28,84	5,72	5,95	4,05

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -

Tab. 6.2. Średnie naciski osi i odchylenia standardowe pojazdów członowych w latach 1997 – 2001 r oraz 2005 r.

Droga	Parametr	Sylwetka pojazdu																										
		2C+1N			2C+2N				2C+3N					3C+1N				3C+2N					3C+3N					
		Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 1	Oś 2	Oś 3	Oś 4	Oś 5	Oś 6
Naciski osi pojazdów w przekroju drogi [kN] – 2005 r.																												
11	μ	21,0	24,0	19,0	47,1	47,5	32,6	32,9	54,0	71,9	51,2	51,9	51,8	42,0	46,0	41,0	19,0	54,0	69,0	46,0	48,0	49,0	51,0	60,0	45,0	46,0	46,0	37,0
	σ	14,68	19,00	18,53	9,95	16,89	12,26	12,39	10,66	23,77	18,62	18,87	19,05	15,35	16,96	12,96	15,21	8,42	19,17	14,07	16,24	15,77	7,00	17,75	16,37	13,54	14,65	18,17
Naciski osi pojazdów przeciążonych [kN] – lata 1997 – 2001																												
11	μ	51,1	68,5	78,4	59,4	110,4	89,9	92,1	63,8	119,1	69,7	70,9	74,8	-	-	-	-	53,1	92,4	69,3	93,3	96,0	56,0	93,5	65,3	73,8	79,8	83,1
	σ	14,18	48,65	43,63	5,97	13,29	14,41	15,94	5,57	12,38	14,05	12,17	14,00	-	-	-	-	13,81	21,91	27,52	13,98	18,50	11,83	26,04	34,84	13,19	16,99	17,37
A4	μ	-	-	-	61,2	112,1	78,7	79,1	64,5	106,8	78,5	78,5	76,1	-	-	-	-	61,4	100,1	78,5	95,8	88,5	-	-	-	-	-	-
	σ	-	-	-	8,08	15,13	18,03	19,68	5,02	14,51	14,19	11,42	13,18	-	-	-	-	20,28	13,01	10,45	22,75	17,74	-	-	-	-	-	-
35	μ	-	-	-	-	-	-	-	63,6	114,0	73,3	72,9	70,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	σ	-	-	-	-	-	-	-	4,70	9,27	12,22	11,64	12,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	μ	-	-	-	61,8	106,4	88,3	106,4	64,3	109,1	90,1	83,8	75,2	-	-	-	-	61,6	102,4	89,8	95,3	85,0	-	-	-	-	-	-
	σ	-	-	-	5,55	0,69	20,12	9,02	4,14	14,78	12,07	8,11	9,58	-	-	-	-	9,26	5,75	34,51	11,40	12,83	-	-	-	-	-	-
3	μ	-	-	-	-	-	-	-	62,7	116,3	75,8	72,0	69,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	σ	-	-	-	-	-	-	-	8,52	13,54	14,40	10,62	9,48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	μ	-	-	-	62,1	115,5	78,4	81,2	63,7	114,0	66,4	67,5	67,1	-	-	-	-	59,4	100,7	80,9	86,3	86,4	51,9	75,3	63,8	81,8	76,0	72,0
	σ	-	-	-	6,59	6,88	15,65	20,59	5,09	10,61	15,30	14,38	13,40	-	-	-	-	9,78	13,54	14,95	6,34	8,10	10,17	11,52	10,16	18,50	9,94	8,34

Tab. 6.3. Maksymalne naciski składowych osi pojazdów ciężarowych zarejestrowane na wybranych drogach krajowych w Polsce.

Pojazdy pojedyncze	2P		Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	2C+1N	
	3P			2C+2N	
	4P			2C+3N	
Zespoły pojazdów (pojazd silnikowy + przyczepa)	2P+2P			3C+1N	
	2P+3P			3C+2N	
	3P+2P			3C+3N	
	3P+3P				

1) – Grudzień 2005 r.:

2) – 1997 ÷ 2001 r.:

droga nr 11, miejscowość Byczyna,

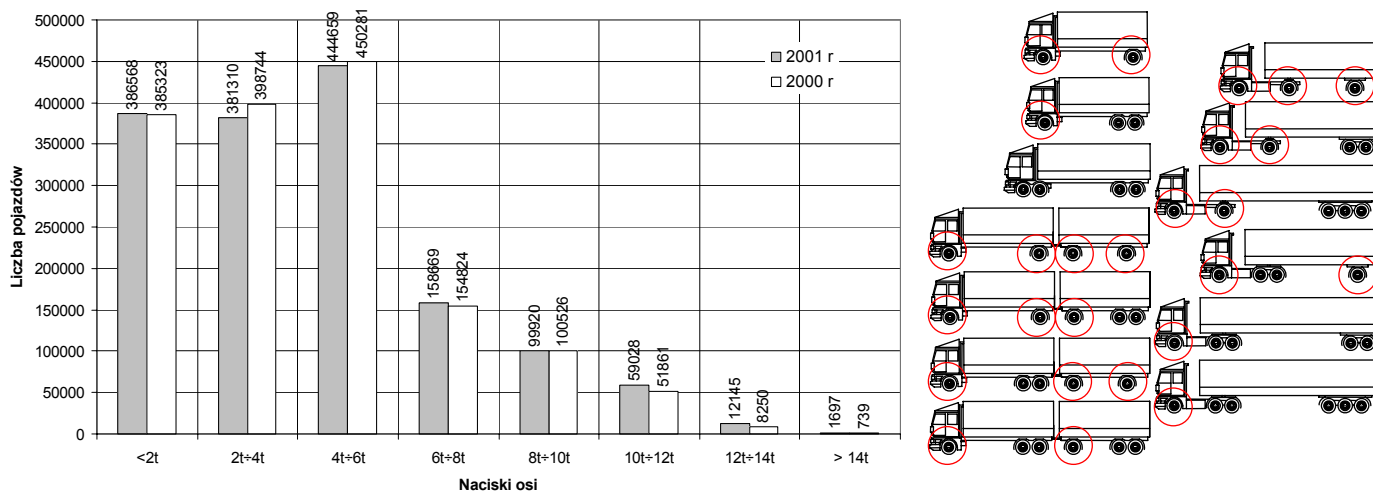
droga nr 11, miejscowość: Byczyna;

droga nr 3, miejscowości: Kłobuczyn, Kochlice, Paszowice; droga nr 8, miejscowości: Smardzów, Cieszce, Jordanów; droga nr 35, miejscowość: Tworzyjanów;

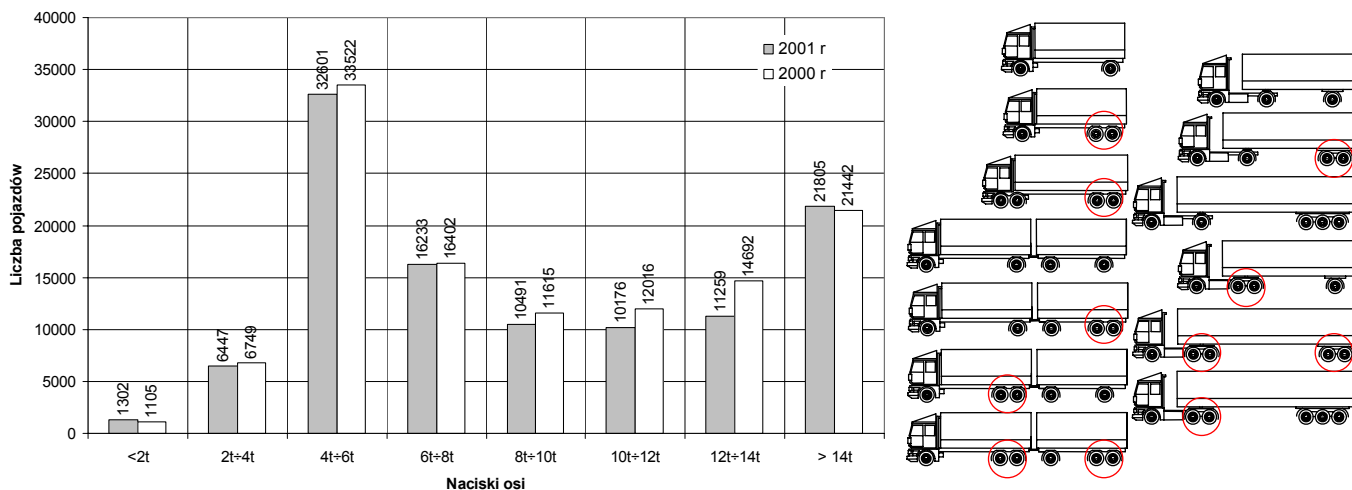
droga nr 46, miejscowości: Kłodzko, Złoty Stok.

Jednak największe przekroczenia dopuszczalnych nacisków występują dopiero w pojazdach członowych. Jest to wynikiem tego, iż są to pojazdy wykorzystywane głównie w transporcie dalekobieżnym, a przewoźnicy dążąc do maksymalizacji swoich zysków nadmiernie obciążają takie pojazdy. W tej grupie pojazdów, w grudniu 2005 r., nacisk na oś pojedynczą wyniósł aż 197 kN (przekroczenie o prawie 100%), składowej osi podwójnej 138 kN (przekroczenie o ponad 70%), a składowej osi potrójnej 128 kN. W latach 1997 – 2001 sytuacja kształtowała się podobnie, w ciągniku siodłowym pięcioosiowym (2C+3N) maksymalny zarejestrowany nacisk na pojedynczą oś napędową wyniósł 180 kN, a na oś składową w osi potrójnej 135 kN.

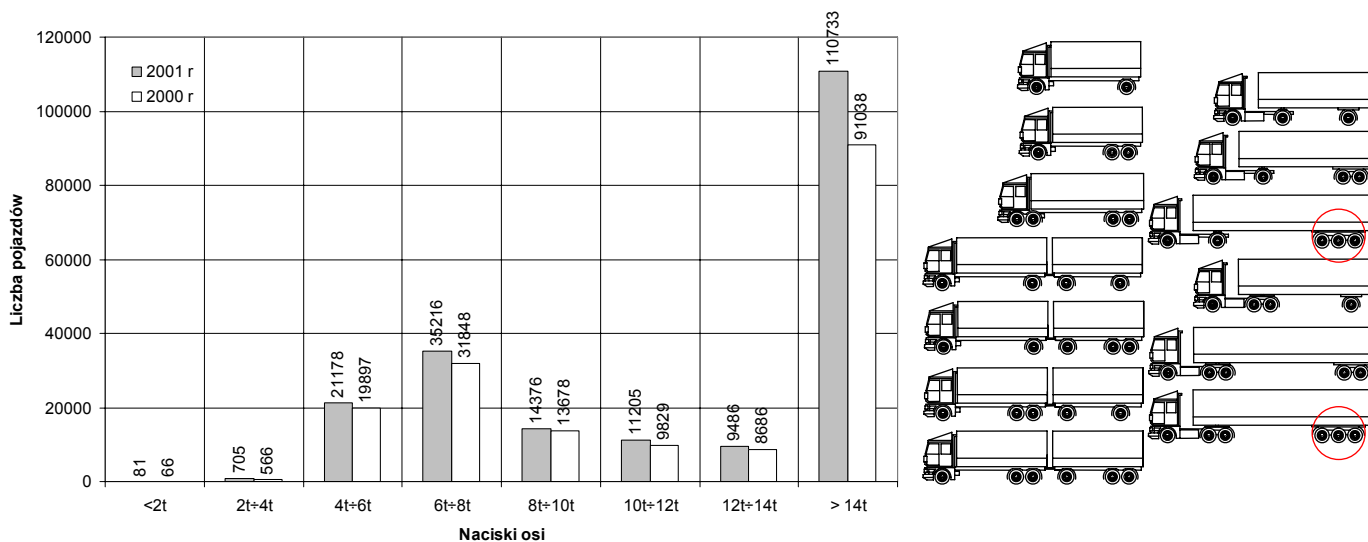
Z tego okresu (lata 1997 – 2001 r.), wynikiem pomiarów pojazdów prowadzonych w ramach kontroli pojazdów za pomocą wag przenośnych, można przeciwstawić jedynie ciągłą rejestrację pojazdów prowadzoną za pomocą wag selekcyjnych w miejscowości Buczyna. Jednak z uwagi na niską czułość funkcjonującego wtedy systemu pomiarowego, uzyskane wyniki dają niepełny obraz występujących obciążeń, bowiem naciski osi pojedynczych i wielokrotnych były rejestrowane tylko do 137 kN (w przedziałach co 20 kN), a pozostałe naciski przekraczające tę wartość, zaliczane były do obciążenia większego od 137 kN. Rozkłady nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. 6.7, rys. 6.8, rys. 6.9).



Rys. 6.7. Naciski osi pojedynczych – m. Buczyna, lata 2000-2001 r.



Rys. 6.8. Naciski osi podwójnych – m. Buczyna, lata 2000-2001 r.



Rys. 6.9. Naciski osi potrójnych – m. Buczyna, lata 2000-2001 r.

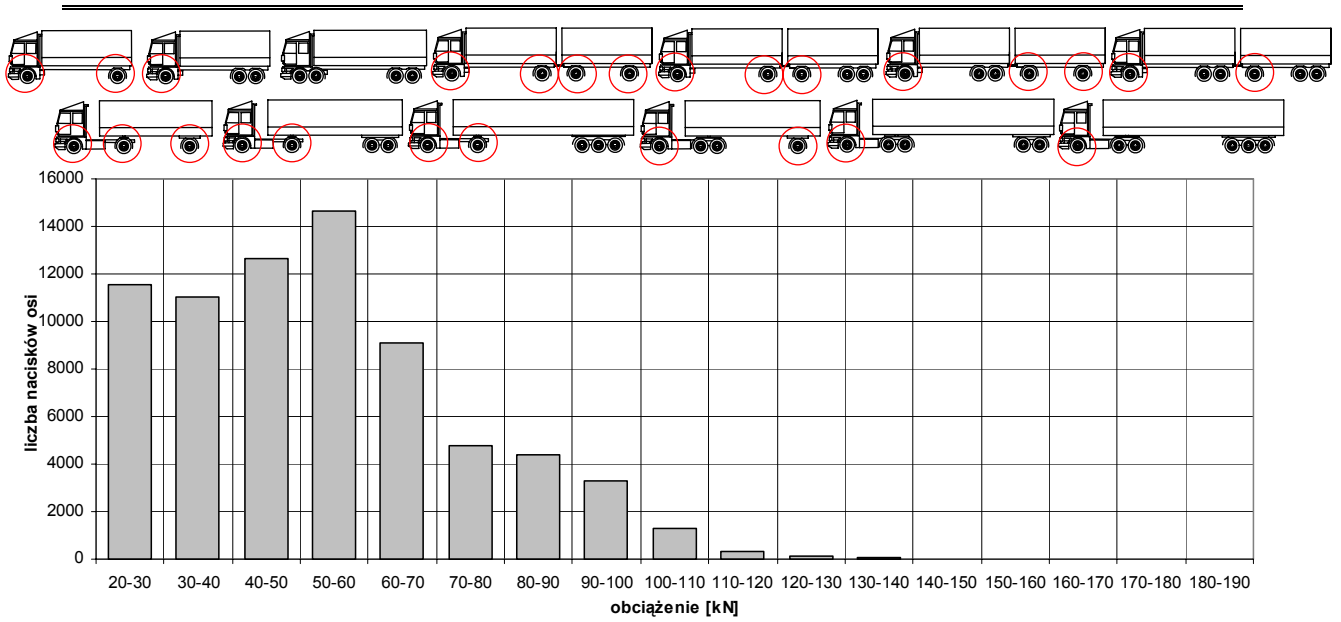
W celu sprawdzenia, czy pomiędzy pomierzonymi naciskami osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych oraz mas całkowitych pojazdów, zachodzą związki korelacyjne wykonano macierz korelacji (tab. 6.4). W tabeli tej, zaznaczono współczynniki korelacji istotne z $p < 0,05$. Analizą objęto pomiary z grudnia 2000, 2001 i 2005 roku. Jak widać, związki korelacyjne zachodzą jedynie pomiędzy takimi parametrami jak masa całkowita pojazdów i osie pojedyncze, a silna korelacja występuje praktycznie tylko w obrębie mierzonych tych samych parametrów (masa całkowita – masa całkowita, naciski osi pojedynczych – naciski osi pojedynczych, naciski osi podwójnych – naciski osi podwójnych, naciski osi potrójnych – naciski osi potrójnych).

Tab. 6.4. Masy całkowite i naciski osi pojazdów pomierzone w miejscowości Byczyna – macierz korelacji.

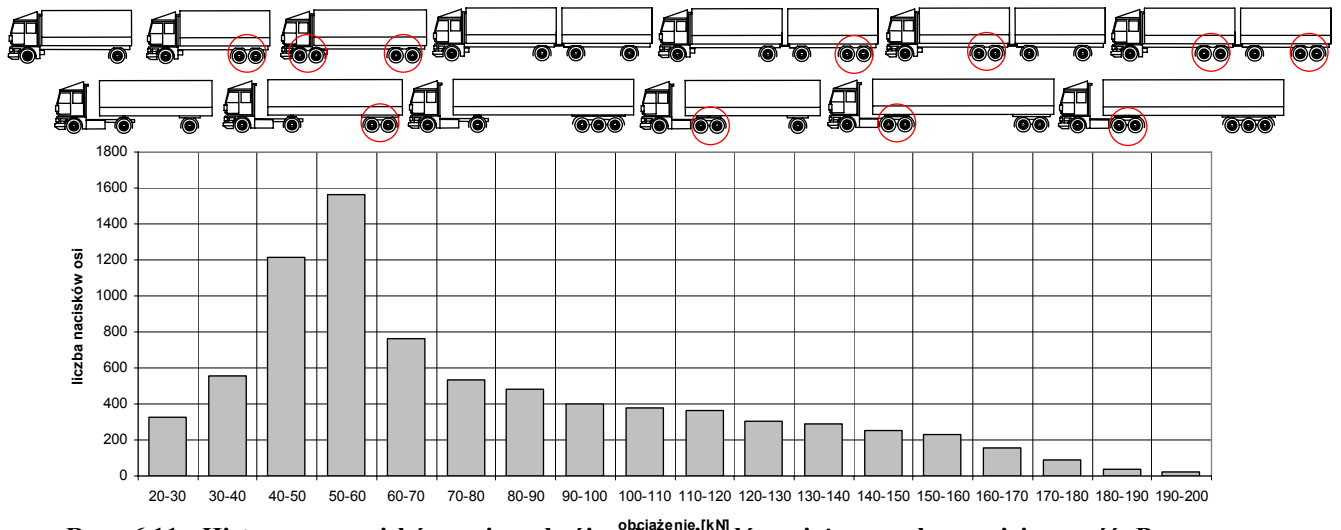
		Masa całkowita pojazdów			Osie pojedyncze			Osie podwójne			Osie potrójne		
		grudzień 2000 r.	grudzień 2001 r.	grudzień 2005 r.	grudzień 2000 r.	grudzień 2001 r.	grudzień 2005 r.	grudzień 2000 r.	grudzień 2001 r.	grudzień 2005 r.	grudzień 2000 r.	grudzień 2001 r.	grudzień 2005 r.
Masa całkowita Pojazdów	grudzień 2000 r.	1,00	0,99	0,68	0,92	0,92	0,89	0,51	0,53	0,67	-0,50	-0,49	-0,64
	grudzień 2001 r.	0,99	1,00	0,67	0,93	0,93	0,90	0,57	0,59	0,71	-0,48	-0,48	-0,64
	grudzień 2005 r.	0,68	0,67	1,00	0,78	0,77	0,65	-0,16	-0,07	0,05	-0,47	-0,47	-0,47
Osie pojedyncze	grudzień 2000 r.	0,92	0,93	0,78	1,00	1,00	0,97	0,46	0,54	0,66	-0,31	-0,32	-0,46
	grudzień 2001 r.	0,92	0,93	0,77	1,00	1,00	0,97	0,47	0,55	0,67	-0,31	-0,31	-0,46
	grudzień 2005 r.	0,89	0,90	0,65	0,97	0,97	1,00	0,53	0,61	0,76	-0,28	-0,29	-0,46
Osie podwójne	grudzień 2000 r.	0,51	0,57	-0,16	0,46	0,47	0,53	1,00	0,98	0,94	0,16	0,15	-0,06
	grudzień 2001 r.	0,53	0,59	-0,07	0,54	0,55	0,61	0,98	1,00	0,96	0,25	0,25	0,03
	grudzień 2005 r.	0,67	0,71	0,05	0,66	0,67	0,76	0,94	0,96	1,00	0,06	0,06	-0,17
Osie potrójne	grudzień 2000 r.	-0,50	-0,48	-0,47	-0,31	-0,31	-0,28	0,16	0,25	0,06	1,00	1,00	0,97
	grudzień 2001 r.	-0,49	-0,48	-0,47	-0,32	-0,31	-0,29	0,15	0,25	0,06	1,00	1,00	0,97
	grudzień 2005 r.	-0,64	-0,64	-0,47	-0,46	-0,46	-0,46	-0,06	0,03	-0,17	0,97	0,97	1,00

Dopiero pomiary przeprowadzane w 2005 r. na drodze krajowej nr 11 pozwalają przeanalizować występujące rozkłady nacisków osi pojedynczych (rys. 6.10), podwójnych (rys. 6.11) i potrójnych (rys. 6.12) w pełnym zakresie występujących obciążeń. Udział osi pojedynczych w strumieniu ruchu wynosi 74,6%, osi podwójnych 8,1%, a osi potrójnych 17,3%. Jak widać, w przypadku osi pojedynczych, dominującą grupę stanowią osie o naciskach 50-60 kN, a udział osi przeciążonych (o nacisku powyżej 100kN) nie przekracza 2,5%. Bardzo podobnie przedstawiają się naciski osi podwójnych, w których przeważają osie o naciskach 50÷60 kN, a udział osi przeciążonych wynosi 3,7%. Osie potrójne, są natomiast obciążone głównie w przedziałach 60 – 70 kN i 190 – 200 kN, a osie przeciążone stanowią 2,7%.

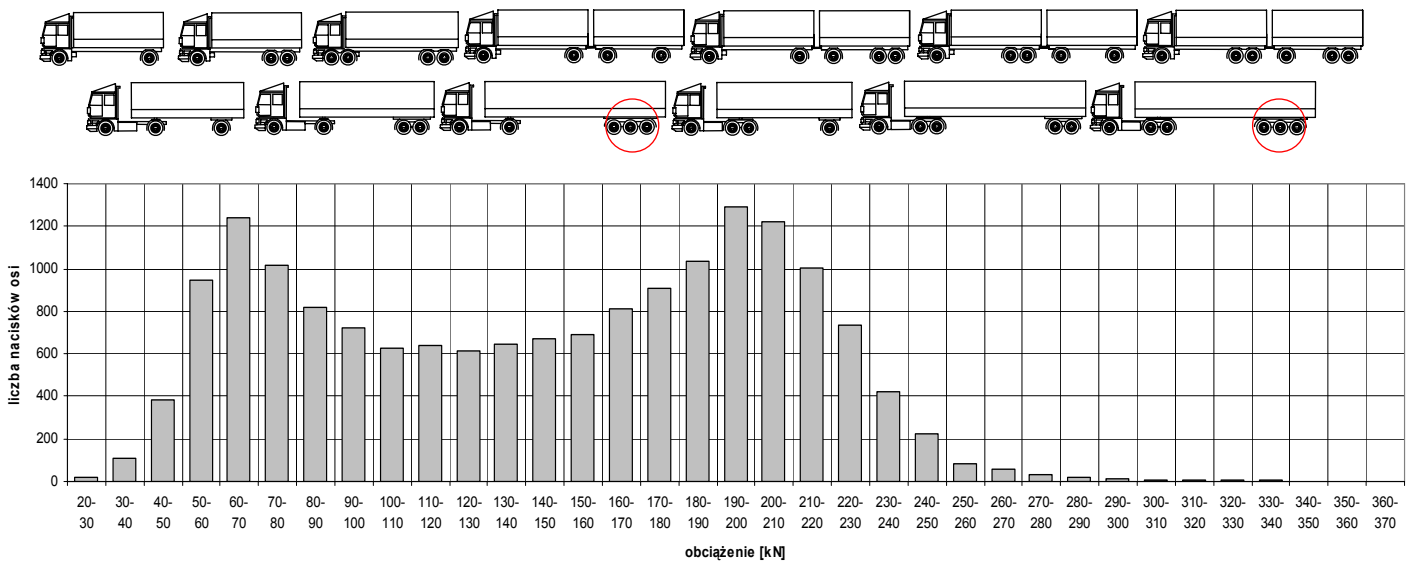
- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -



Rys. 6.10. Histogram nacisków osi pojedynczych pojazdów ciężarowych – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

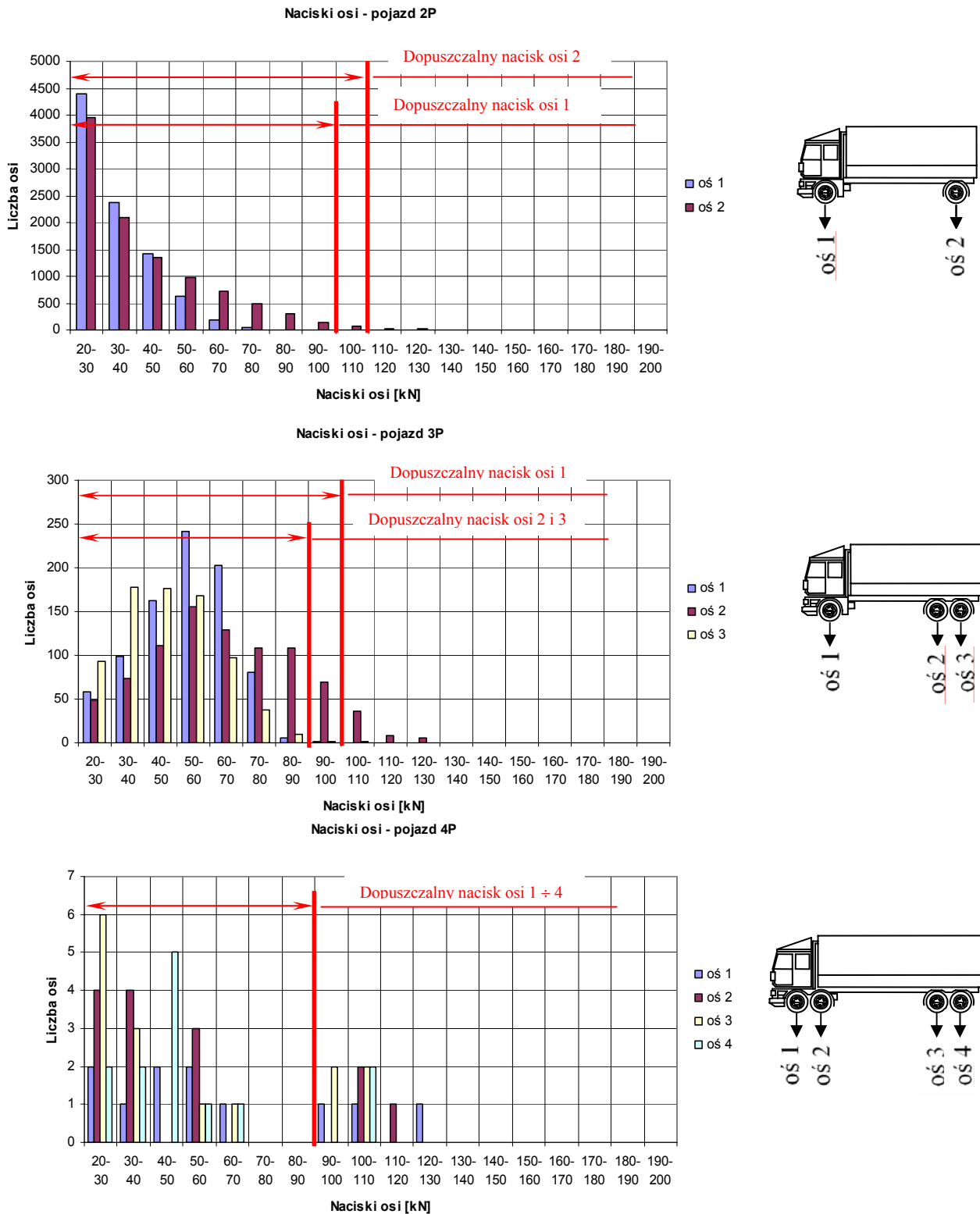


Rys. 6.11. Histogram nacisków osi podwójnych pojazdów ciężarowych – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.



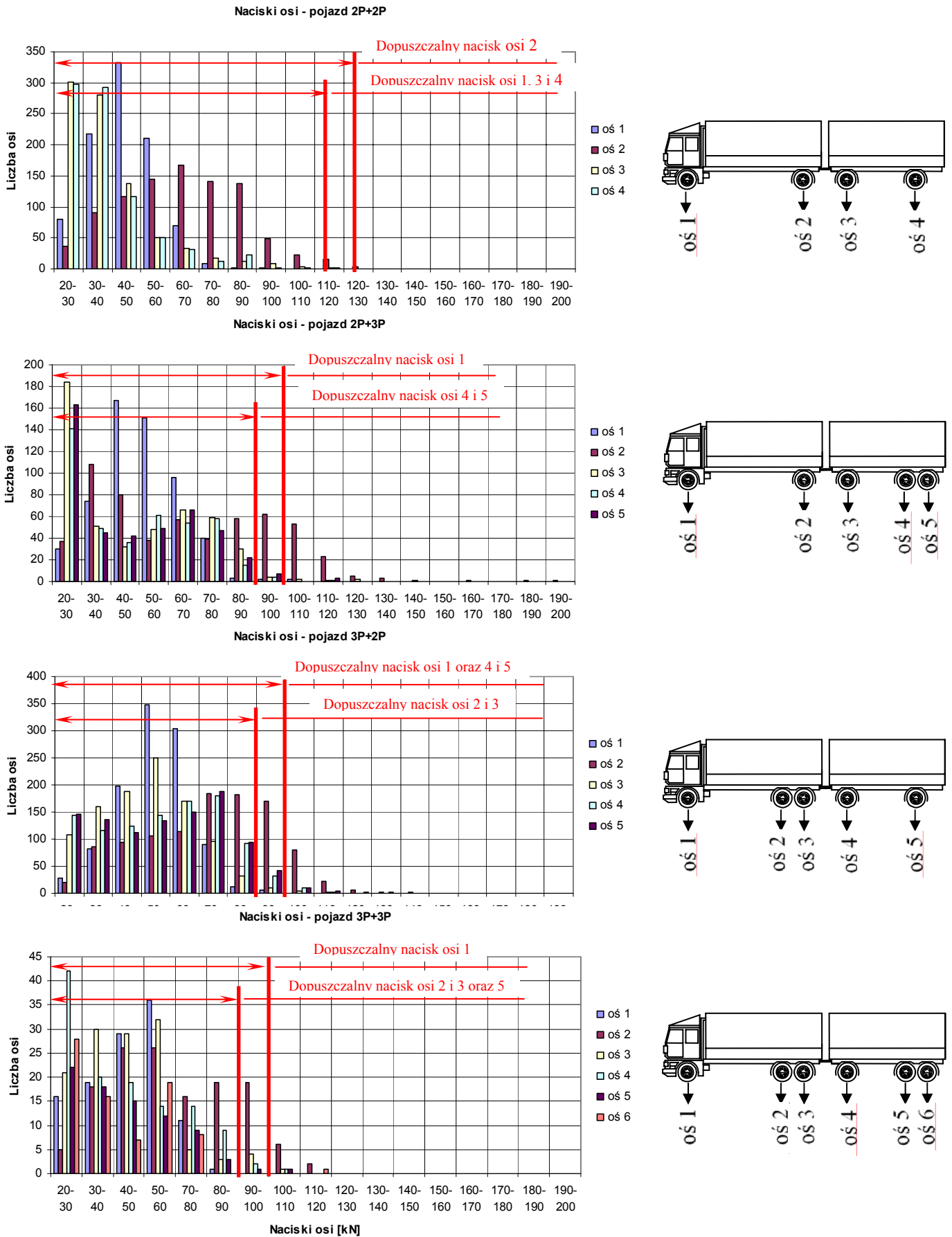
Rys. 6.12. Histogram nacisków osi potrójnych pojazdów ciężarowych – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

W celu dokładnego przeanalizowania występujących obciążeń z uwzględnieniem sklasyfikowanych w rozdziale 4 sylwetek pojazdów, wykonano rozkłady poszczególnych nacisków osi (rys. 6.13, rys. 6.14, rys. 6.15, rys. 6.16).

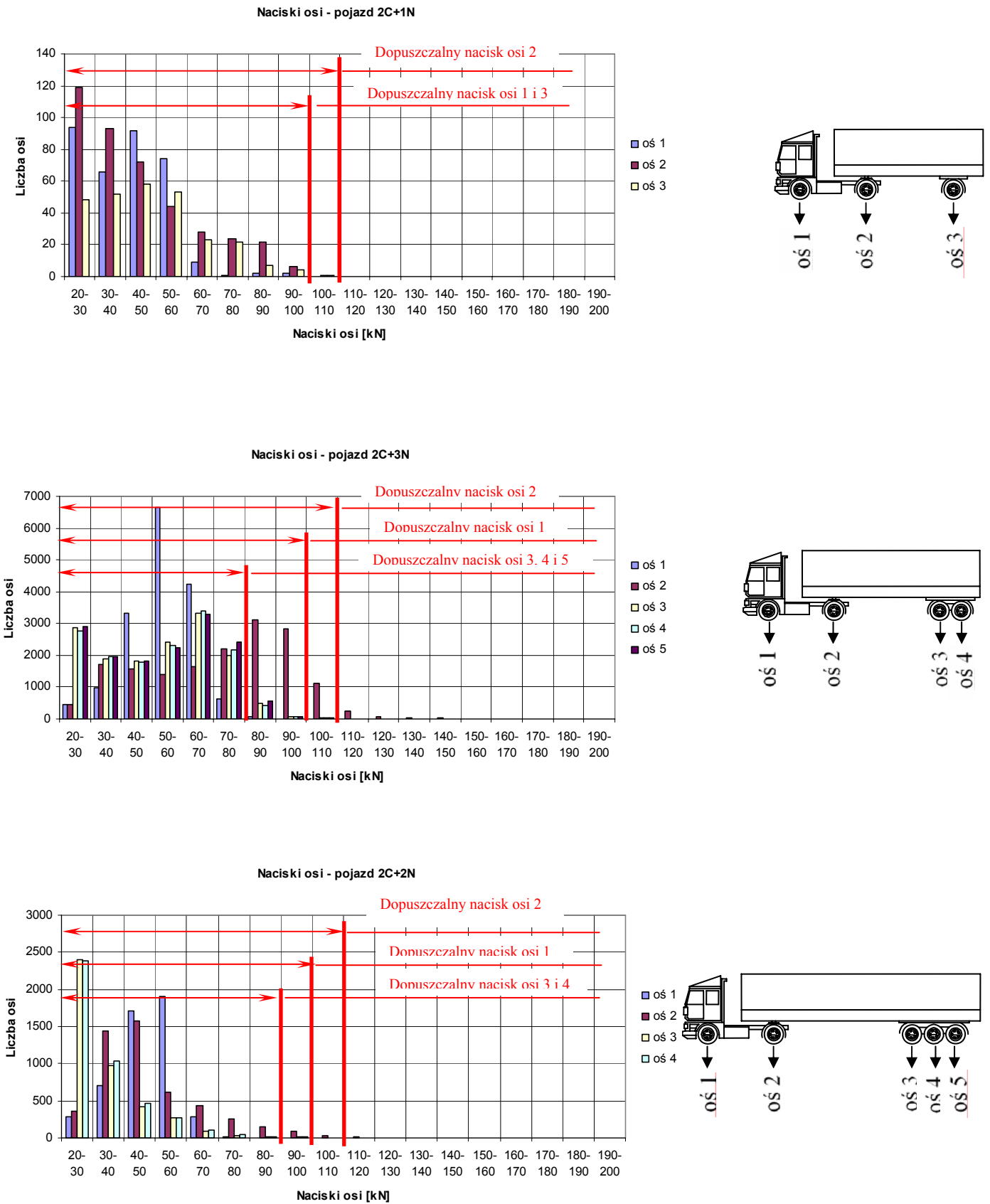


Rys. 6.13. Histogramy nacisków osi składowych pojazdów pojedynczych – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -

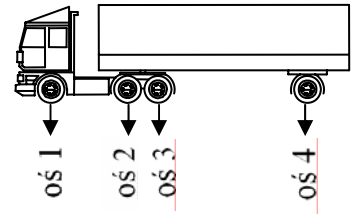
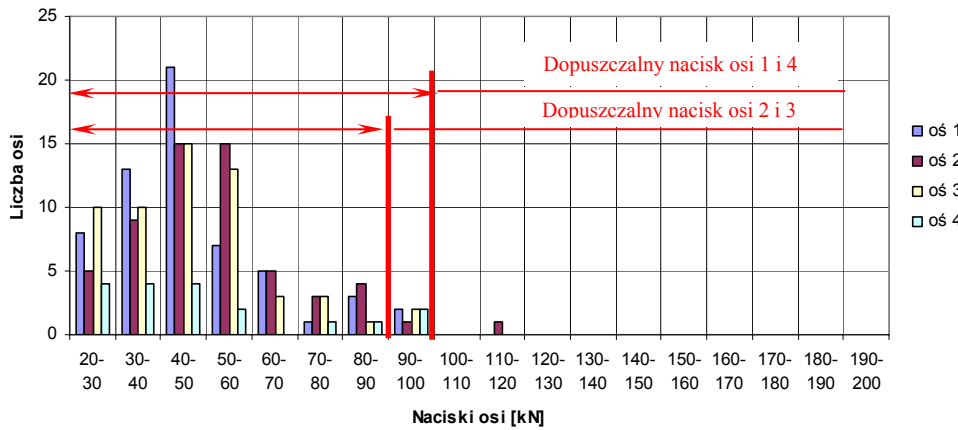


Rys. 6.14. Histogramy nacisków osi składowych zespołów pojazdów – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

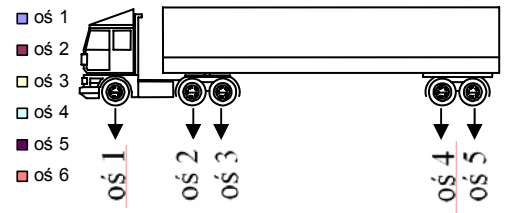
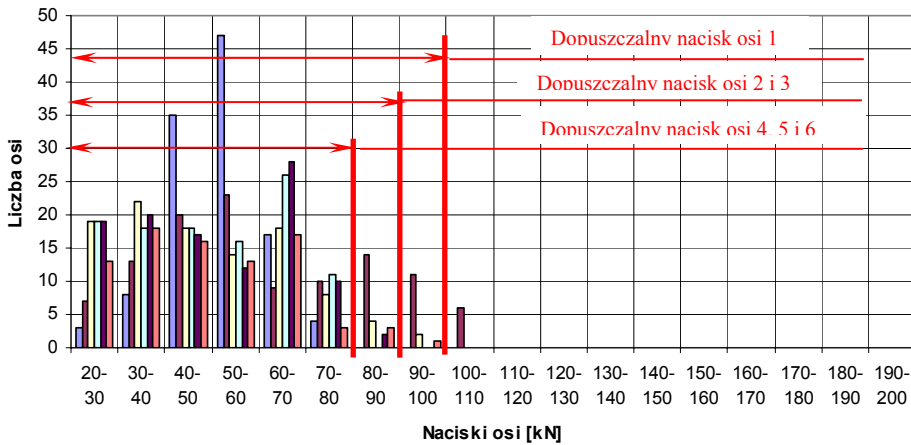


Rys. 6.15. Histogramy nacisków osi składowych pojazdów członowych (ciągniki dwuosiove z naczepami) – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

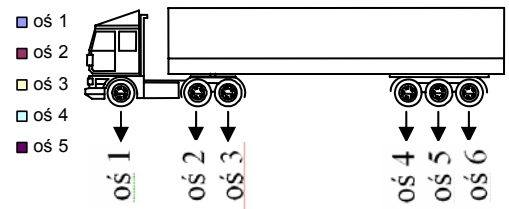
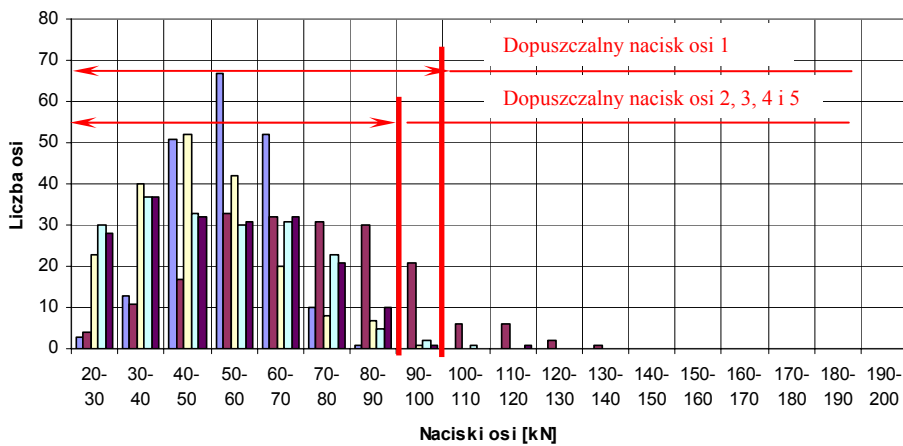
Naciski osi - pojazd 3C+1N



Naciski osi - pojazd 3C+3N



Naciski osi - pojazd 3C+2N



Rys. 6.16. Histogramy nacisków osi składowych pojazdów członowych (ciągniki trójosiowe z naczepami) – miejscowość Byczyna, grudzień 2005 r.

Na wykresach tych, naniesiono również dopuszczalne naciski osi pojedynczych i osi składowych [193], wyznaczone przy założeniu równomiernego rozkładu nacisku na poszczególne osie składowe w osi wielokrotnej. Nacisk osi pojedynczej nienapędowej nie może przekraczać 98,1 kN, napędowej 112,8 kN, osi składowej osi podwójnej 88,3 kN, a osi składowej osi potrójnej 78,5 kN.

Obserwacja powyższych wyników pozwala sformułować hipotezę, o występowaniu trzech typów krzywych opisujących naciski osi pojazdów: krzywej typu normalnego, wykładniczego i gamma.

- Funkcja gęstości rozkładu normalnego jest opisana wzorem:

$$f(P) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.1)$$

gdzie: P – obciążenie osi pojazdu.

μ – wartość średnia,

σ^2 - wariancja.

- Funkcja gęstości rozkładu wykładniczego określona jest wzorem:

$$f(P) = \lambda e^{-\lambda P} \text{ dla } P > 0 \quad (6.2)$$

gdzie: P – obciążenie osi pojazdu.

a wartość średnią i wariancję można zapisać jako:

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (6.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (6.4)$$

gdzie: μ – wartość średnia,

σ^2 - wariancja.

- Funkcja gęstości rozkładu gamma jest opisana wzorem:

$$f(P) = \frac{1}{\Gamma(\alpha) \cdot \beta^\alpha} P^{\alpha-1} \cdot e^{-P/\beta} \text{ dla } P > 0 \quad (6.5)$$

gdzie: P – obciążenie osi pojazdu.

, a wartość średnią i wariancję rozkładu gamma określają wzory:

$$\mu = \alpha \cdot \beta \quad (6.6)$$

$$\sigma^2 = \alpha \cdot \beta^2 \quad (6.7)$$

gdzie: α – parametr kształtu,

β - parametr skali.

Dla dominujących sylwetek pojazdów w strumieniu ruchu odpowiadających za wielkość oddziaływań samochodów ciężarowych bez przyczep (2P), samochodów ciężarowych z przyczepami i pojazdów członowych (2P+2P, 2C+2N i 2C+3N), funkcje gęstości prawdopodobieństwa przyjmują postać (wartości średnie i wariancje zamieszczono w tab. 6.1 i 6.2):

- 2P – oś 1: $f(P_{2P-os1}) = 0,030e^{-0,030P}$ (6.8)

- oś 2: $f(P_{2P-os2}) = 0,024e^{-0,024P}$ (6.9)

- 2P+2P – oś 1: $f(P_{2P+2P-os1}) = \frac{1}{11,20 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-44,59)^2}{2 \cdot 125,38}}$ (6.10)

- oś 2: $f(P_{2P+2P-os2}) = \frac{1}{20,93 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-64,11)^2}{2 \cdot 437,95}}$ (6.11)

- oś 3: $f(P_{2P+2P-os3}) = \frac{1}{\Gamma(5,1311) \cdot 6,8212^{5,1311}} P^{4,1311} \cdot e^{-P/6,8212}$ (6.12)

- oś 4: $f(P_{2P+2P-os4}) = \frac{1}{\Gamma(5,1169) \cdot 6,6447^{5,1169}} P^{4,1169} \cdot e^{-P/6,6447}$ (6.13)

- 2C+2N – oś 1: $f(P_{2C+2N-os1}) = \frac{1}{9,95 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-47,05)^2}{2 \cdot 99,09}}$ (6.14)

- oś 2: $f(P_{2C+2N-os2}) = \frac{1}{\Gamma(7,2830) \cdot 6,3161^{7,2830}} P^{6,2830} \cdot e^{-P/6,3161}$ (6.15)

- oś 3: $f(P_{2C+2N-os3}) = 0,031e^{-0,031P}$ (6.16)

- oś 4: $f(P_{2C+2N-os4}) = 0,030e^{-0,030P}$ (6.17)

- 2C+3N – oś 1: $f(P_{2C+3N-os1}) = \frac{1}{10,66 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-53,97)^2}{2 \cdot 113,72}}$ (6.18)

- oś 2: $f(P_{2C+3N-os2}) = \frac{1}{23,77 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-71,92)^2}{2 \cdot 565,10}}$ (6.19)

- oś 3: $f(P_{2C+3N-os3}) = \frac{1}{18,62 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-51,19)^2}{2 \cdot 346,76}}$ (6.20)

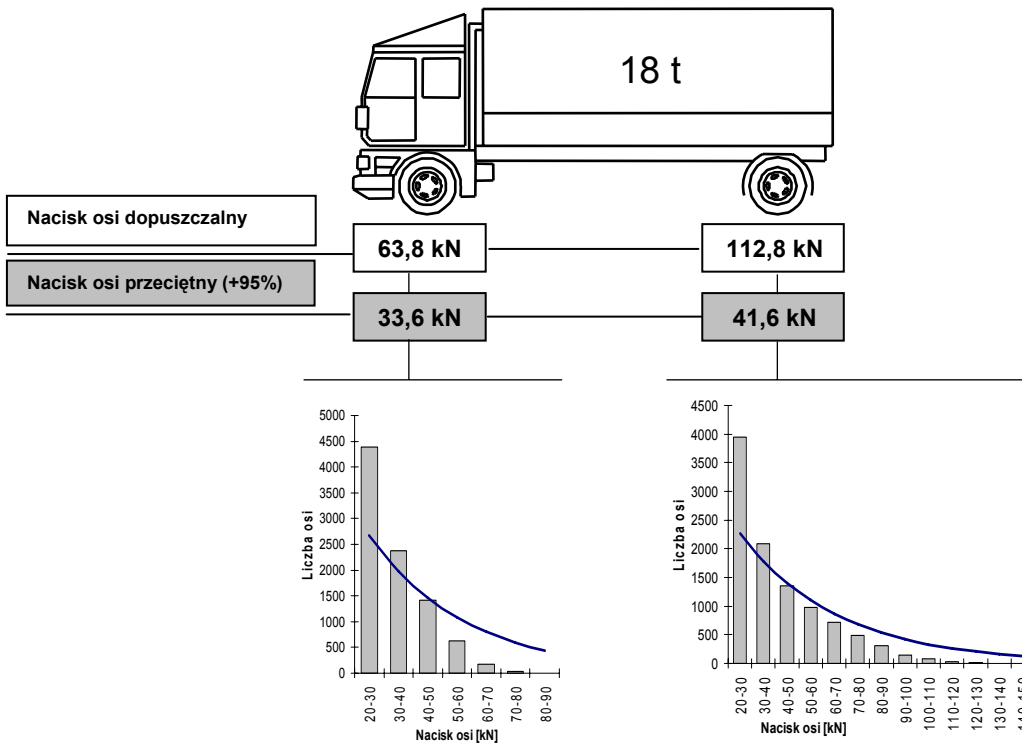
- oś 4: $f(P_{2C+3N-os4}) = \frac{1}{18,87 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-51,85)^2}{2 \cdot 356,15}}$ (6.21)

- oś 5: $f(P_{2C+3N-os5}) = \frac{1}{19,05 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-51,82)^2}{2 \cdot 362,96}}$ (6.22)

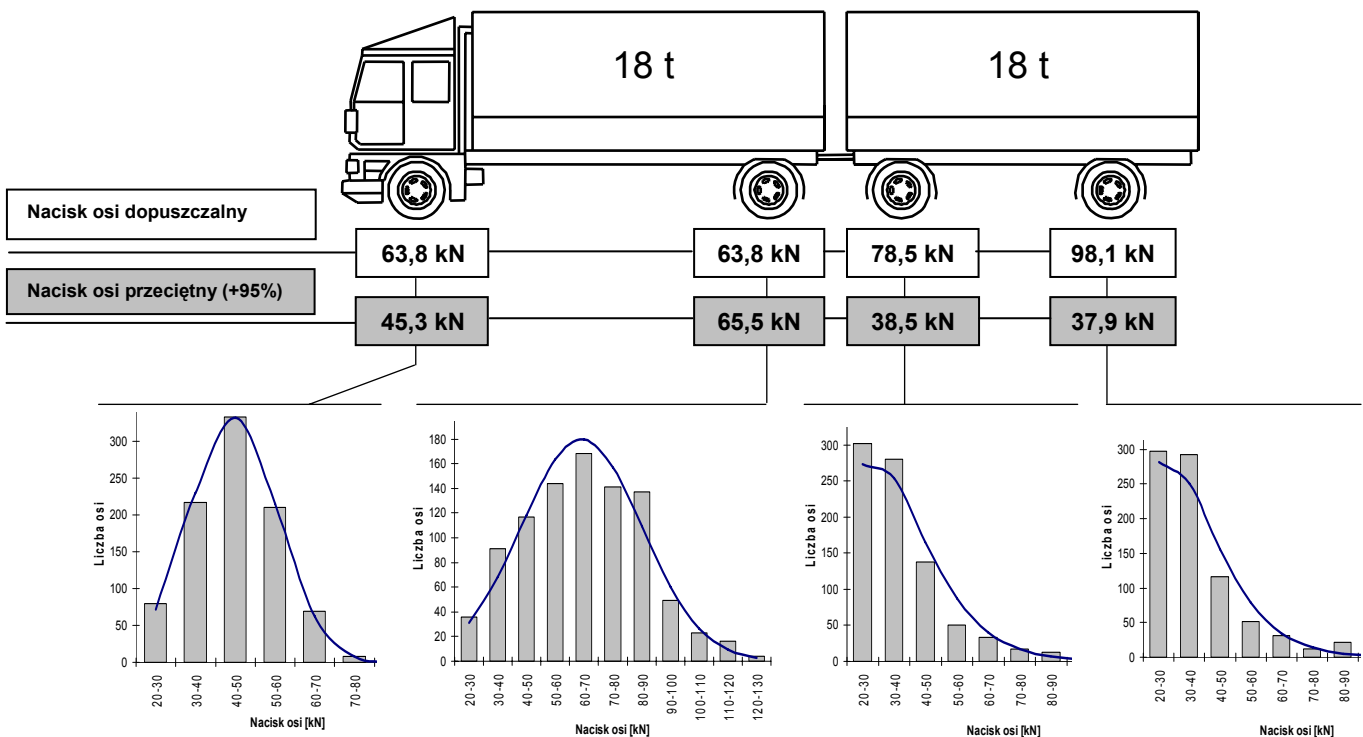
Zgodność empirycznych wyników pomiarów z rozkładami teoretycznymi sprawdzano za pomocą testu zgodności χ -Pearsona. Wykresy powyższych rozkładów teoretycznych (wzór 6.8 ÷ 6.22) dla lepszego zobrazowania przedstawiono na rysunkach 6.17 ÷ 6.20. Jak widać, rozkład nacisków osi samochodu ciężarowego dwuosiowego (2P) dobrze

przybliża rozkład wykładniczy, co jest wynikiem zaliczania do tej grupy pojazdów samochodów dostawczych o masie przekraczającej 2,5 t (dopuszczalna masa całkowita tego typu pojazdów wynosi ok. 6,5 t) i o naciskach osi z reguły nie przekraczających 35 kN. W przeciwieństwie do samochodów ciężarowych dwuosioowych (2P), naciski osi kierowniczej i napędowej samochodów ciężarowych wchodzących w skład zespołów pojazdów opisane są już rozkładami normalnymi, a spowodowane jest to dominacją w tej grupie pojazdów samochodów ciężarowych, w których naciski osi od masy własnej pojazdu przekraczają już 20 ÷ 30 kN. Rozkłady nacisków osi przyczep zgodne są natomiast z rozkładami gamma. Rozkłady nacisków osi ciągników siodłowych charakteryzują najlepiej rozkłady normalne (za wyjątkiem osi napędowej ciągnika siodłowego dwuosioowego z dwuosiową naczepą, która zgodna jest z rozkładem gamma), a osi naczep rozkłady wykładnicze (pojazd członowy czterosioowy 2C+2N), lub normalne (pojazd członowy pięciosioowy 2C+3N). W tym ostatnim przypadku, przeciętny nacisk osi wynosi ok. 52,0 kN, co odpowiada wartości przeciętnej nacisków osi występujących na drogach w Niemczech (53,0 kN) [46].

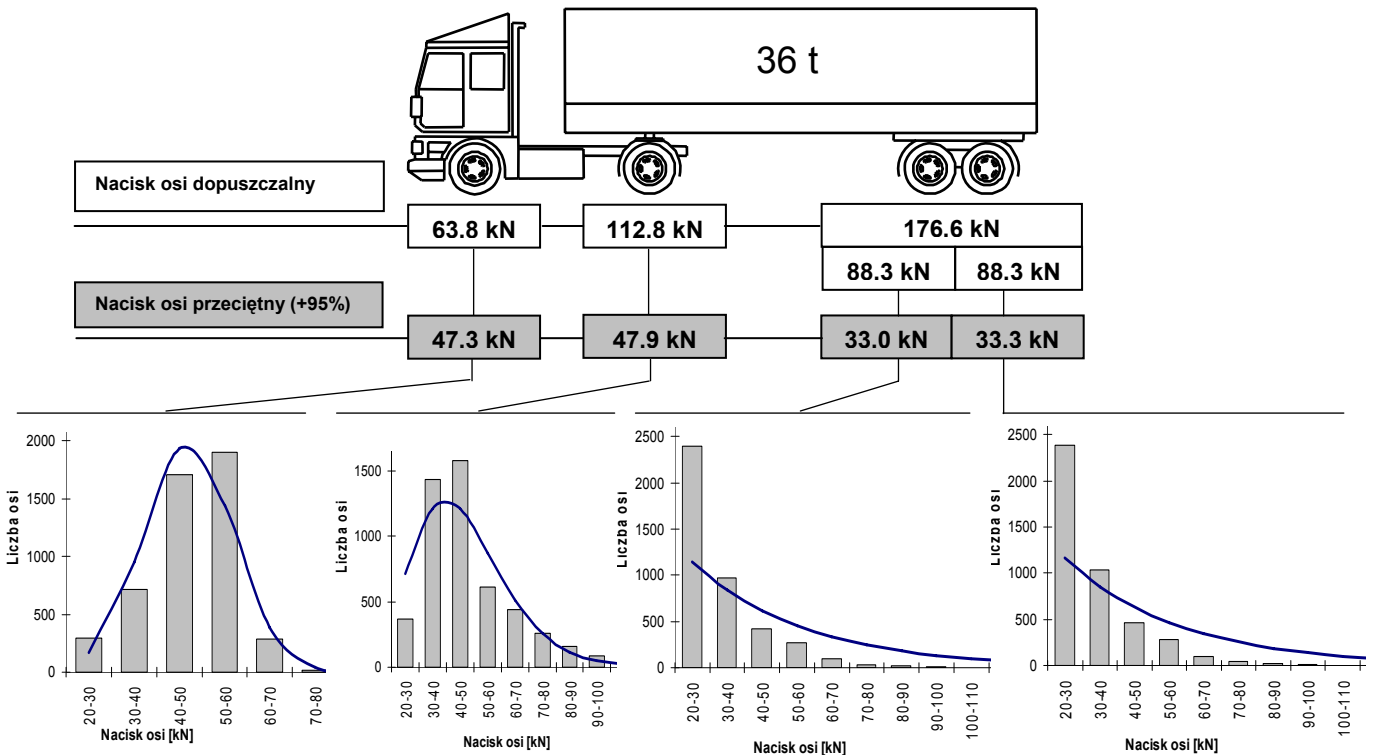
Z rysunków 6.17 – 6.20 wynika, że dla górnej granicy przedziału ufności średniej na poziomie 95% oddziaływanie samochodu ciężarowego 2P jest równe 75,2 kN (33,6 kN – oś 1 i 41,6 kN – oś 2), samochodu ciężarowego z przyczepą 2P+2P jest równe 187,2 kN (45,3 kN – oś 1, 65,5 kN – oś 2, 38,5 kN – oś 3 i 37,9 kN – oś 4), dwuosioowego ciągnika siodłowego z dwuosiową przyczepą 2C+2N 161,5 kN (47,3 kN – oś 1, 47,9 kN – oś 2, 33,0 kN – oś 3 i 33,3 kN – oś 4), a dwuosioowego ciągnika siodłowego z trójosiową naczepą 2C+3N 282,2 kN (54,1 kN – oś 1, 72,3 kN – oś 2, 51,5 kN – oś 3, 52,2 kN – oś 4 i 52,1 kN – oś 5). Obecnie w Polsce przyjmuje się, że oddziaływanie samochodów ciężarowych bez przyczep jest równoważne 65 kN, a samochodów ciężarowym z przyczepami od 105 do 118 kN [94]. Jak widać są to wartości znacznie mniejsze od wyznaczonych wartości przeciętnych dla poszczególnych sylwetek pojazdów.



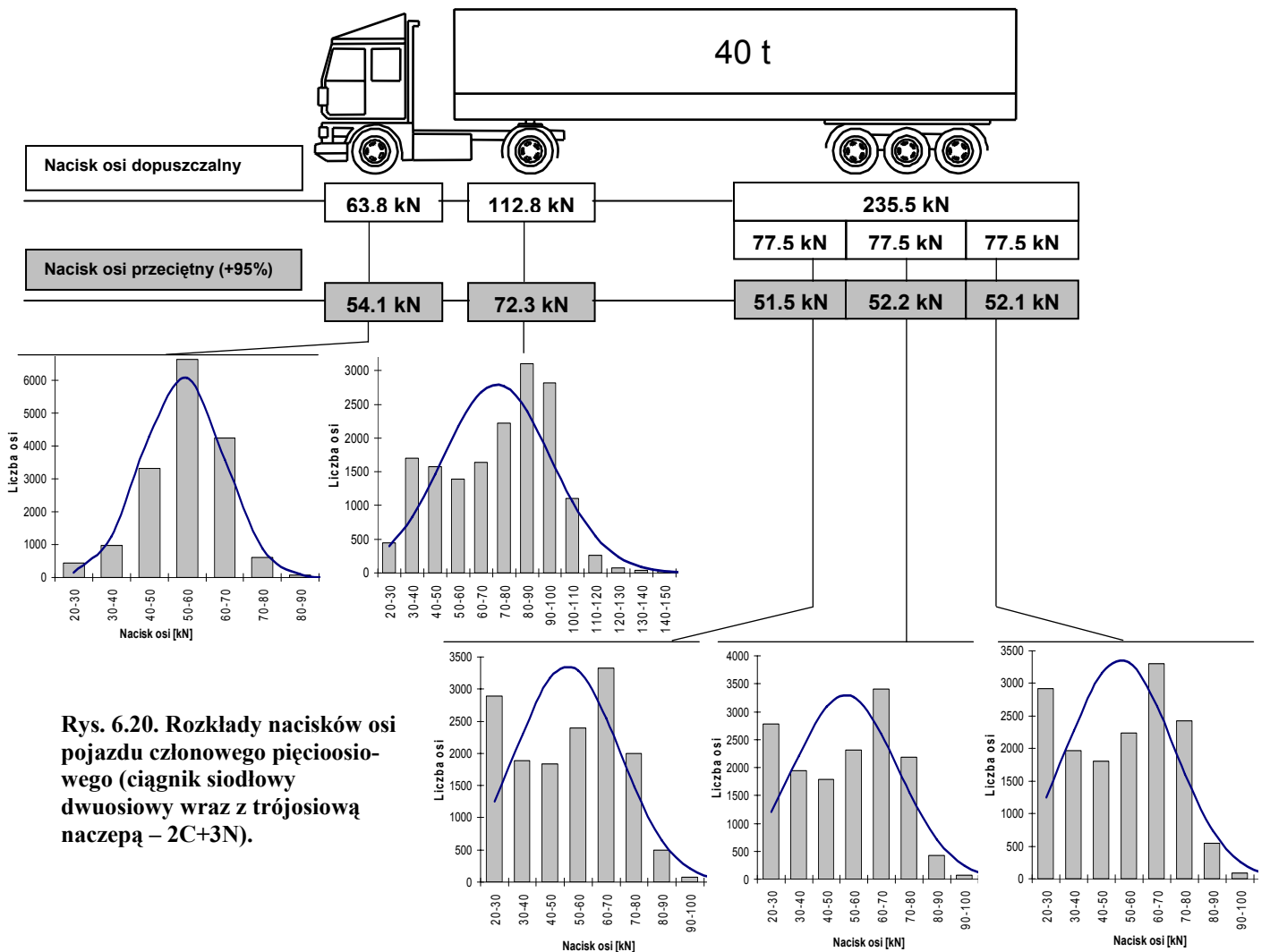
Rys. 6.17. Rozkłady nacisków osi samochodu ciężarowego dwuosiowego (2P).



Rys. 6.18. Rozkłady nacisków osi zespołu pojazdów (samochód ciężarowy dwuosiowy wraz z przyczepą dwuosiową – 2P+2P).



Rys. 6.19. Rozkłady nacisków osi pojazdu członowego czteroosiowego (ciągnik siodłowy dwuosiowy wraz z dwuosiową naczepą – 2C+2N).



Rys. 6.20. Rozkłady nacisków osi pojazdu członowego pięcioosiowego (ciągnik siodłowy dwuosiowy wraz z trójosiową naczepą – 2C+3N).

6.5. Podsumowanie

W oparciu o przeprowadzone pomiary, można stwierdzić, że w strukturze rodzajowej pojazdów ciężarowych, na przestrzeni ostatnich kilku lat zaszły istotne zmiany. Przede wszystkim zauważalny jest systematyczne zmniejszanie się liczby samochodów ciężarowych dwuosioowych (sylwetka 2P) oraz zdecydowany wzrost liczby ciągników siodłowych dwuosioowych z dwu- i trzyosiową naczepą (sylwetki 2C+2N i 2C+3N). Obecnie udział ciągników siodłowych pięcioosiowych (2C+3N) sięga już 30 %.

Dla przyjętej w rozdziale 4 klasyfikacji pojazdów, zaobserwowano występowanie czterech typowych sylwetek pojazdów ciężarowych:

- samochody ciężarowe dwuosioowe (2P),
- samochody ciężarowe dwuosioowe z dwuosiową przyczepą (2P+2P),
- ciągniki siodłowe dwuosioowe z dwuosiową naczepą (2P+2C),
- ciągniki siodłowe dwuosioowe z trzyosiową naczepą (2P+3C),

których naciski poszczególnych osi składowych opisano przy pomocy rozkładów statystycznych. W przypadku sylwetki 2P, na osi kierowanej i napędowej stwierdzono występowanie rozkładów wykładniczych nacisków osi. W sylwetce 2P+2P naciski osi kierowanej i napędowej pojazdu odpowiadają rozkładowi normalnemu, a rozkłady osi ciągnionych przyczepy – rozkładowi gamma. W przypadku sylwetki 2C+2N naciski osi kierowanej dobrze opisuje rozkład normalny, napędowej – gamma, ciągnionych osi naczepy - rozkłady wykładnicze. W sylwetce 2C+3N oś kierowaną można opisać za pomocą rozkładu normalnego, a empiryczne rozkłady pozostałych nacisków osi w tej sylwetce (osi napędowej i potrójnej osi ciągnionej) są rozkładami typu dwumodalnego, co jest wynikiem rejestracji również nieobciążonych przejazdów tych sylwetek. Należy tutaj zaznaczyć, że podobny charakter nacisków osi w sylwetkach tego typu, obserwowany jest również w innych krajach europejskich (m.in. w Niemczech). Można zatem uznać, że rozkłady nacisków dwuwierzchołkowe (typu dwumodalnego) są charakterystyczne dla ciągników siodłowych pięcioosiowych.

Wyznaczone w niniejszej pracy rozkłady nacisków osi typowych sylwetek pojazdów ciężarowych zawierają pełną charakterystykę obciążeń wywieranych przez daną sylwetkę pojazdu, co umożliwia ich wykorzystanie m.in. w takich zagadnieniach jak:

- projektowanie nowych i wzmocnianie istniejących konstrukcji nawierzchni drogowych,

- analizy wielkości obciążenia ruchem drogi stanowiące podstawę decyzji o modernizacji nawierzchni,
- programowanie prac utrzymaniowych,
- prognozowanie obciążenia ruchem tras drogowych,
- ocena nośności użytkowej istniejących obiektów mostowych.

7. MODELE OBLICZENIOWE NAWIERZCHNI DROGOWYCH

7.1. Wprowadzenie

W rozdziale przedstawiono sposób, w jaki autor zamodelował wybrane konstrukcje nawierzchni drogowych obciążone osiami rzeczywistych sylwetek pojazdów ciężarowych. Sylwetki pojazdów, które posłużyły do budowy modeli obliczeniowych, zostały zidentyfikowane i sklasyfikowane w rozdziale czwartym niniejszej pracy.

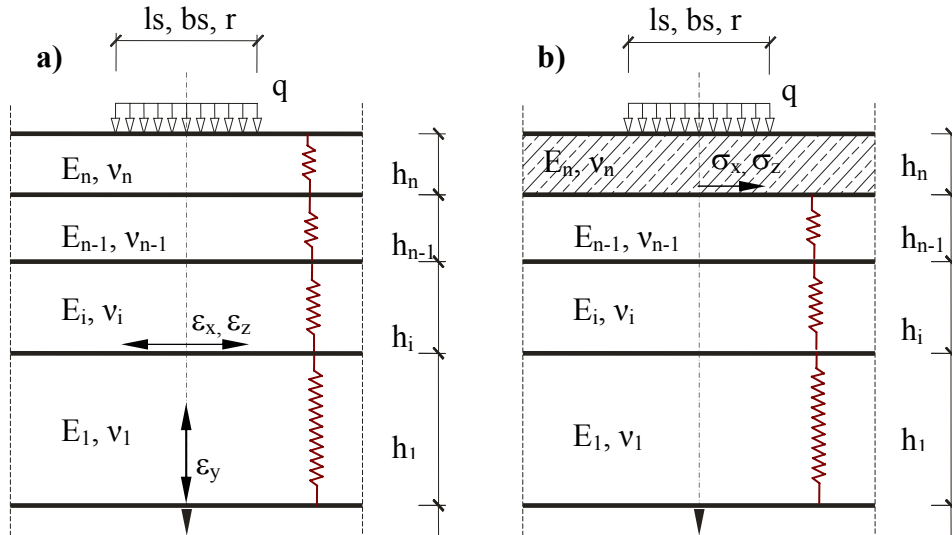
W celu wyznaczenia wpływu sylwetek pojazdów na nośność nawierzchni drogowych, zbudowano modele obliczeniowe nawierzchni oparte o teorię sprężystości, pozwalające na określenie wywoływanych w nich przez poszczególne osie pojazdów maksymalnych odkształceń i naprężeń oraz miejsc ich występowania. Sześć konstrukcji nawierzchni asfaltowych, jedną konstrukcję nawierzchni asfaltową z podbudową związaną cementem oraz jedną konstrukcję z warstwą nawierzchni z betonu cementowego zamodelowano w systemie CosmosM wykorzystującym MES oraz obciążano w sposób charakterystyczny dla poszczególnych osi pojazdów (kierowanych, napędowych oraz ciągnionych) i odpowiadającego im ogumienia (koła pojedyncze i bliźniacze o szerokościach z zakresu 245 mm ÷ 495 mm).

Postępowanie takie umożliwiło wykazanie różnic w wielkościach szkodliwego oddziaływania na nawierzchnie drogowe poszczególnych osi i całych sylwetek pojazdów oraz odpowiadających im współczynników przeliczeniowych na osie obliczeniowe.

7.2. Opis modelu

Do opisu właściwości materiałowych poszczególnych warstw modelu konstrukcji nawierzchni drogowych wykorzystano modele oparte na teorii sprężystości, gdyż przy krótkotrwałych czasach działania obciążeń, modele sprężyste nawierzchni drogowych najlepiej oddają sposób zachowania się wbudowanych mieszanek mineralno-asfaltowych pod obciążeniem [37, 59, 106, 121] (w sytuacji długotrwałego obciążenia oraz w wysokich temperaturach, mieszanki mineralno-asfaltowe wykazują lepkosprężyste oraz termoplastyczne własności [70, 74, 76, 109, 122]).

Pierwszy z opracowanych modeli składa się z warstw sprężystych położonych na półprzestrzeni sprężystej (rys. 7.1.a), natomiast drugi z płyty sztywnej usytuowanej na warstwach sprężystych i półprzestrzeni sprężystej (rys. 7.1.b) [4, 121]. Warstwy scharakteryzowano poprzez moduły sprężystości i współczynniki Poissona.



Rys. 7.1 Modele konstrukcji nawierzchni:

a) układ warstw sprężystych na półprzestrzeni sprężystej,

b) płyta sztywna na sprężystych warstwach i półprzestrzeni sprężystej;

gdzie: q – obciążenie [Pa, kPa, MPa],

l_s, b_s, r – wymiary (długość i szerokość lub promień) powierzchni styku koła z nawierzchnią [mm, cm, m]

Ze względu na konieczność przeanalizowania wpływu różnych sylwetek pojazdów ciężkich na nawierzchni drogowe o różnych grubościach warstw, a co za tym idzie przeznaczone do przenoszenia obciążeń o różnych wielkościach i intensywnościach, opracowano modele sześciu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych (tab. 7.1), jednej konstrukcji półsztywnej i jednej konstrukcji sztywnej, z płytą z betonu cementowego o ciągłym zbrojeniu (tab. 7.2).

Grubości warstw konstrukcji nawierzchni podatnych zamieszczono w tabeli 7.1, podobnie jak wartości parametrów je opisujących (moduły sprężystości i współczynniki Poissona). Charakterystykę warstw konstrukcji półsztywnych i sztywnych przedstawiono w tabeli 7.2. Analizowano trzy możliwe okresy eksploatacji [15]: zimowy, wiosenno-jesienny oraz letni i dwie fazy pracy nawierzchni półsztywnej (faza I – przed spękaniami warstwy podbudowy z chudego betonu i faza II – po spękanii chudego betonu).

Tab. 7.1. Parametry obliczeniowe podatnych konstrukcji nawierzchni jezdni [93].

Grubość warstw asfaltowych	Układ warstw	Zima		Wiosna, jesień		Lato	
		E [MPa]	v	E [MPa]	v	E [MPa]	v
8 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 4 cm war. wiążąca z bet. asf. – 4 cm podbudowa z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		400	0,30	400	0,30	400	0,30
12 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 7 cm podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
		400	0,30	400	0,30	400	0,30
Podłoże bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni		100	0,30	100	0,30	100	0,30
18 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 6 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 7 cm podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
23 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 8 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 10 cm podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
27 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 8 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 14 cm podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
31 cm	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 8 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 18 cm podbudowa pomocnicza z kruszywa łamanego stab. mech. lub tłucznia kamiennego – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
Podłoże bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni		120	0,30	120	0,30	120	0,30

Tab. 7.2. Parametry obliczeniowe półsztywnych i sztywnych konstrukcji nawierzchni jezdni [94, 95].

Fazy pracy	Układ warstw	Zima		Wiosna, jesień		Lato	
		E [MPa]	v	E [MPa]	v	E [MPa]	v
Faza I – przed spękaniami	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 8 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 10 cm podbudowa pomocnicza z chudego betonu – 20cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
		12900	0,20	12900	0,20	12900	0,20
Faza II – po spękaniu	<ul style="list-style-type: none"> war. ścieralna z bet. asf. – 5 cm war. wiążąca z bet. asf. – 8 cm podbudowa zasadnicza z bet. asf. – 10 cm podbudowa pomocnicza z chudego betonu (spękana) – 20 cm 	19300	0,25	10300	0,30	2800	0,40
		18800	0,25	10100	0,30	3000	0,40
		18100	0,25	9600	0,30	3000	0,40
		400	0,30	400	0,30	400	0,30
Podłoże bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni		120	0,30	120	0,30	120	0,30

Grubość warstwy z betonu cementowego	Układ warstw	Zima		Wiosna, jesień		Lato	
		E [MPa]	ν	E [MPa]	ν	E [MPa]	ν
23 cm	• beton cementowy – 2 3cm	35000	0,20	35000	0,20	35000	0,20
	• beton asfaltowy – 5 cm	18100	0,30	9600	0,30	3000	0,40
	• kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie – 15 cm	400	0,30	400	0,30	400	0,30
	• warstwa mrozochronna – 20 cm	120	0,30	120	0,30	120	0,30
Podłoże bezpośrednio pod konstrukcją nawierzchni		120	0,30	120	0,30	120	0,30

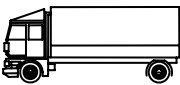
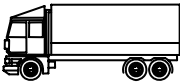
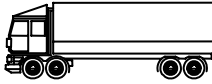


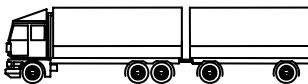

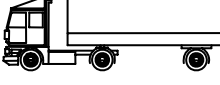
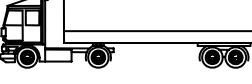
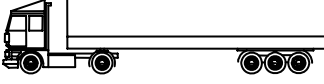
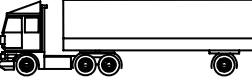
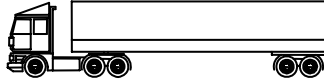
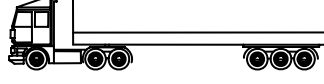
Jak łatwo zauważyć, we wszystkich przyjętych konstrukcjach nawierzchni podatnych występuje warstwa podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie o grubości 20 cm, zatem nawierzchnie podatne w dalszej części pracy charakteryzowane będą poprzez łączną grubość warstw asfaltowych odpowiedzialnych za zachowanie konstrukcji nawierzchni pod obciążeniem, a nawierzchnia sztywna grubością warstwy nawierzchni z betonu cementowego.

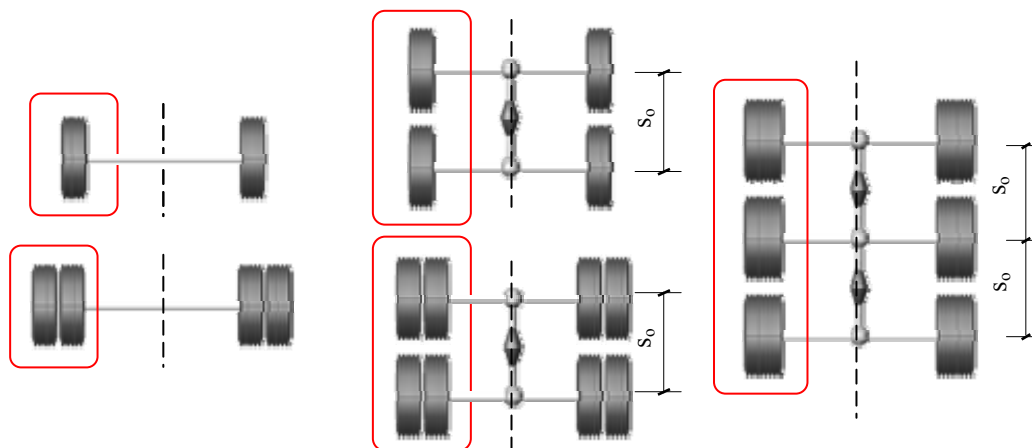
7.3. Obciążenie modelu

W celu określenia rzeczywistego oddziaływania różnych sylwetek pojazdów na nawierzchnie drogowe, konieczne jest zbudowanie modeli obliczeniowych nawierzchni drogowych obciążonych w sposób najdokładniej odzwierciedlający konfigurację osi i wymiary ogumienia poszczególnych sylwetek. Można jednak poczynić pewne założenia, pozwalające na uproszczenia, nie mające wpływu na uzyskiwane wyniki obliczeń.

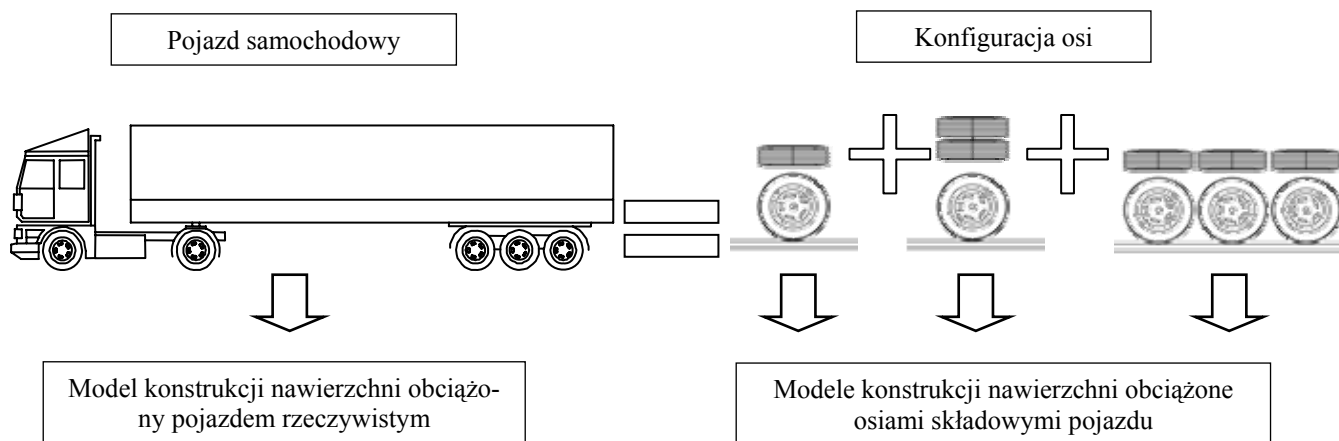
Na osi kierowanej, napędowej oraz ciągnionej każdej analizowanej sylwetki pojazdu, występuje charakterystyczne dla niej ogumienie, które zostało zestawione w tabeli 7.3. Dodatkowo, w pojazdach występuje symetria osiowa, która z uwagi na rozstaw kół wynoszący ok. 1,80 m pozwala na sprowadzenie każdej osi do odpowiadającego jej układu kół (rys. 7.2). Mając jeszcze na uwadze to, iż analizowany przekrój drogi obciążany jest kolejno pojawiającymi się osiami składowymi przejeżdżającej sylwetki pojazdu, to dowolną sylwetkę pojazdu można przedstawić w postaci odpowiadającej jej konfiguracji kół. A zatem w celu określenia rzeczywistego oddziaływania pojazdów na nawierzchnię wystarczy zbudować modele nawierzchni obciążone poszczególnymi kołami składowymi, by ostatecznie przez zasadę superpozycji otrzymać sylwetkę wyjściową (rys. 7.3).

Tab. 7.3. Typowe ogumienie w rozpoznanych sylwetkach pojazdów ciężarowych.

Sylwetka pojazdu			Osie pojazdu		
			Kierowana	napędowa	ciagnione
Pojazdy pojedyncze	2P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	-
	3P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	-
	4P		oś podwójna, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	-
Zespoły pojazdów (pojazd silnikowy + przyczepa)	2P+2P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	2 osie pojedyncze, opony pojedyncze o szerokości 305 mm
	2P+3P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza i oś podwójna, opony pojedyncze o szerokości 305 mm
	3P+2P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	2 osie pojedyncze, opony pojedyncze o szerokości 305 mm
	3P+3P		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 245 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza i oś podwójna, opony pojedyncze o szerokości 305 mm
Pojazdy członowe (ciągniki siodłowe)	2C+1N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm
	2C+2N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm
	2C+3N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś potrójna, opony typu „SuperSingle” o szerokości 385 mm
	3C+1N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś pojedyncza, opony bliźniacze o szerokości 305 mm
	3C+2N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm
	3C+3N		oś pojedyncza, opony pojedyncze o szerokości 305 mm	oś podwójna, opony bliźniacze o szerokości 305 mm	oś potrójna, opony typu „SuperSingle” o szerokości 385 mm



Rys. 7.2. Osie symetrii pojedynczych i wielokrotnych osi pojazdów
 s_0 - rozstaw osi składowych w osiach wielokrotnych.



Rys. 7.3. Założenie obliczeniowe: sylwetka pojazdu jako suma konfiguracji osi.

Z uwagi na konieczność przeanalizowania wpływu na nawierzchnię różnego rodzaju ogumienia stosowanego obecnie w eksploatacji lub też wprowadzanego aktualnie do użytku, opracowano 9 modeli osi pojedynczych, w tym 6 modeli o kołach pojedynczych i 3 modele o kołach bliźniaczych:

- **kIr160** – oś obliczeniowa – oś pojedyncza o $r=160$ mm,
- **kI245** – oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=245$ mm,
- **kI305** – oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=305$ mm,
- **kI385** – oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=385$ mm,
- **kI435** – oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=435$ mm,
- **kI495** – oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=495$ mm,
- **kII245** – oś pojedyncza o kole bliźniaczym i oponach o szer. $B=245$ mm,
- **kII275** – oś pojedyncza o kole bliźniaczym i oponach o szer. $B=275$ mm,
- **kII305** – oś pojedyncza o kole bliźniaczym i oponach o szer. $B=305$ mm,

oraz 6 modeli osi wielokrotnych:

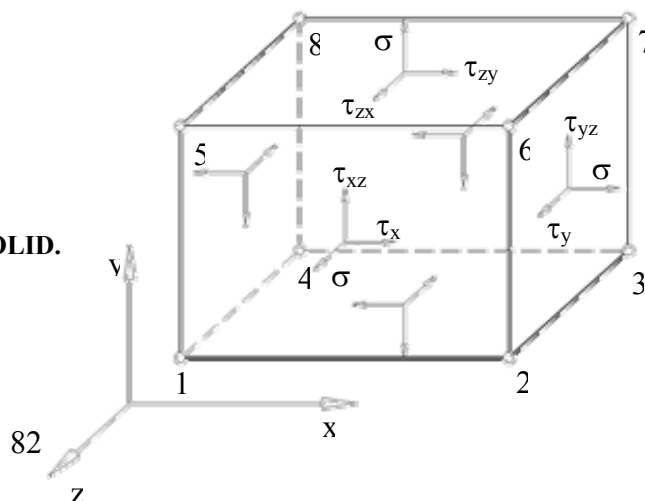
- **oII305 s100** – oś podwójna o kołach pojedynczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s_0=100$ cm,
- **oII305 s135** – oś podwójna o kołach pojedynczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s_0=135$ cm,
- **oIII385 s100** – oś potrójna o kołach pojedynczych i oponach typu „Super Single” o szerokości $B=385$ mm; rozstaw kół $s_0=100$ cm,
- **oIII385 s100** – oś potrójna o kołach pojedynczych i oponach typu „Super Single” o szerokości $B=385$ mm; rozstaw kół $s_0=135$ cm,
- **oIII305 s100** – oś podwójna o kołach bliźniaczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s_0=100$ cm,
- **oIII305 s135** – oś podwójna o kołach bliźniaczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s_0=135$ cm.

7.4. Model dyskretny MES

Konstrukcje nawierzchni jezdni oraz obciążenie od pojazdów zostały zamodelowane w programie COSMOS/M [42], który w przeciwieństwie do oprogramowania wspomagającego projektowanie nawierzchni drogowych [14, 17, 24, 47, 77, 155] pozwala na analizę naprężeń i odkształceń nawierzchni w dowolnym miejscu konstrukcji, pod dowolnie przyłożonym obciążeniem.

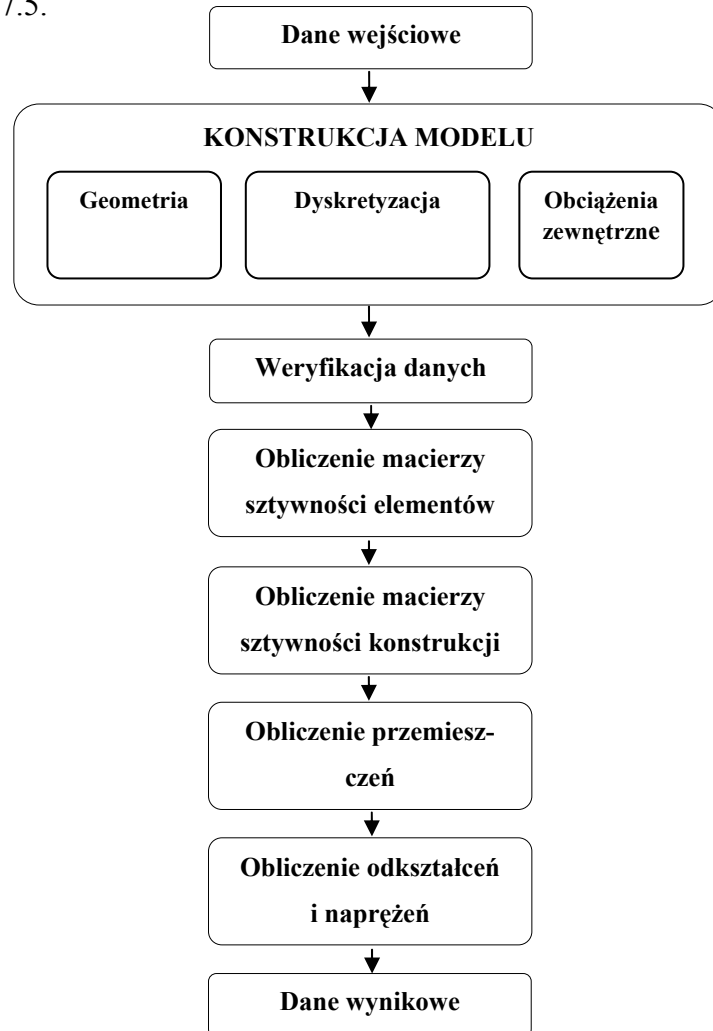
CosmosM oparty jest na metodzie elementów skończonych [6, 52, 72, 103, 133]. Metoda ta znajduje coraz częściej zastosowanie w drogownictwie [3, 8, 25, 54, 69, 100, 110, 118, 144, 148], z uwagi na swoją wszechstronność pozwalająca na analizę szeregu zagadnień sprężystych, sprężystoplastycznych oraz lepkosprężystych. Do dyskretyzacji przyjęto izoparametryczne elementy bryłowe „SOLID” o 8 węzłach (rys. 7.4). Każdy węzeł takiego elementu ma trzy stopnie swobody, co w sumie daje 24 stopnie swobody dla jednego elementu skończonego.

Rys. 7.4. Element bryłowy SOLID.



Założono, że w każdej warstwie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych są jednolite, a każda warstwa ma inny moduł sprężystości E (tab. 7.1, tab. 7.2). Założono pełne związanie warstw.

Kolejność postępowania przy wykonywaniu obliczeń w systemie *COSMOS/M* przedstawia rys. 7.5.



Rys. 7.5. MES – kolejność postępowania

Podstawowe równanie elementu w metodzie MES opisane jest następująco:

$$[K] \mathbf{q} = \mathbf{R} \quad (7.1)$$

gdzie: \mathbf{R} – macierz sił węzłowych,
 \mathbf{q} – macierz parametrów węzłowych,
 $[K]$ – macierz sztywności układu.

Macierz sztywności ma postać:

$$[K] = [B]^T [D] [B] V_{ijkl} \quad (7.2)$$

gdzie: V_{ijkl} –objętość elementu,
 $[B]$ –macierz geometryczna,
 $[D]$ –macierz sprężystości.

a macierz sprężystości (w przypadku materiału izotropowego):

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Rozwiązanie podstawowego równania MES (7.1) pozwala na określenie wektora parametrów węzłowych oraz wartości przemieszczeń (u), odkształceń (ε) i naprężeń (σ) w poszczególnych węzłach elementu:

$$\mathbf{u} = [N] \mathbf{q} \quad (7.4)$$

gdzie: $[N]$ – macierz funkcji bazowych elementu. (kształtu),

Korzystając ze związków geometrycznych składowe pola odkształceń można przedstawić w postaci:

$$\varepsilon = [B] \mathbf{q} \quad (7.5)$$

gdzie: $[B]$ – jest to macierz geometryczna.

a naprężenia można określić na podstawie związków konstytutywnych:

$$\sigma = [D] \varepsilon \quad (7.6)$$

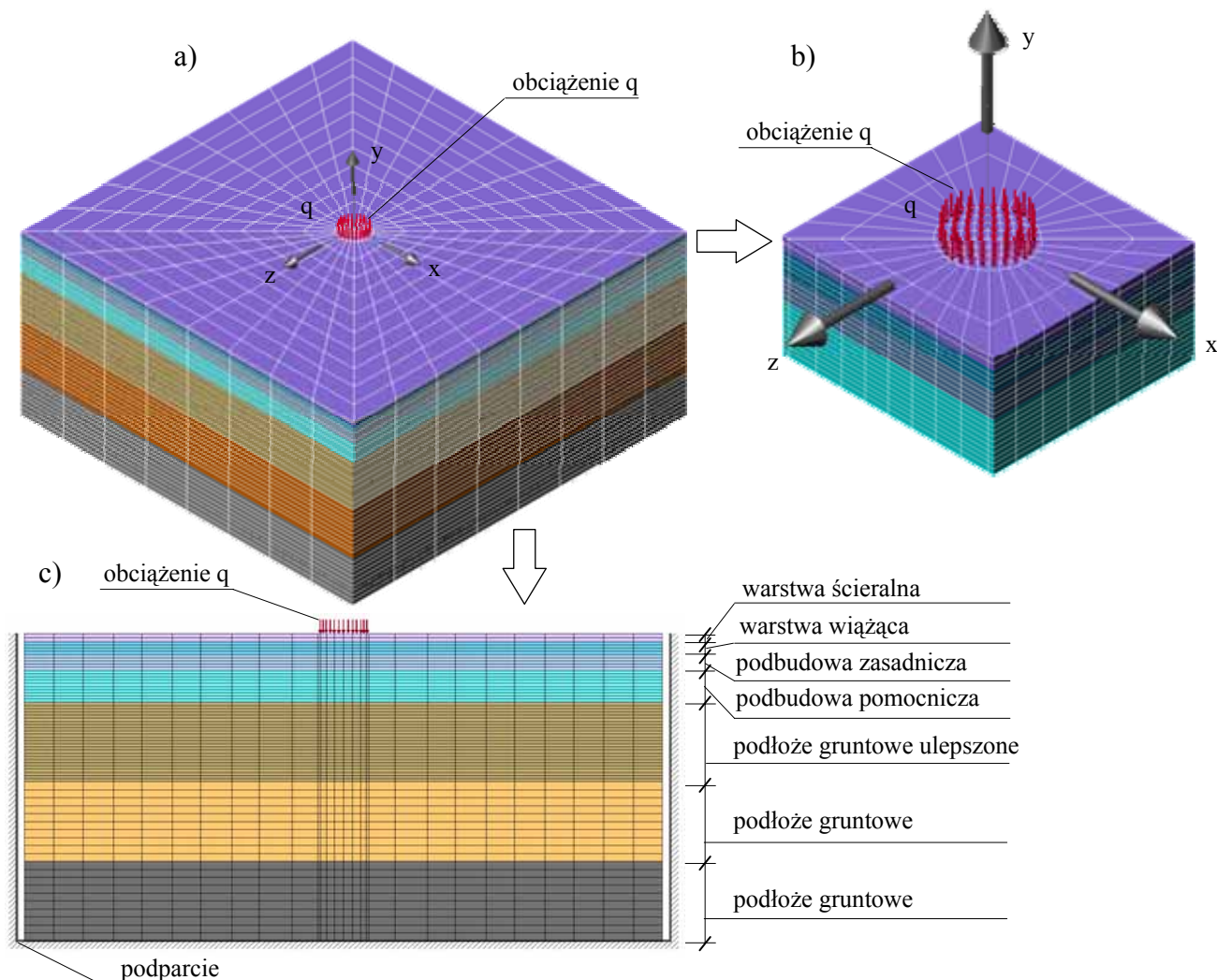
gdzie: $[D]$ – jest to macierz sprężystości.

Modele opracowano w układzie kartezjańskim, a sposób zamocowania i obciążenia zgodny jest z rysunkiem 7.6. Wymiary zewnętrzne modeli obliczeniowych (tab. 7.5, tab. 7.6, tab. 7.7) ustalono w sposób doświadczalny na takim poziomie, że sposób podparcia ścian bocznych modeli obliczeniowych nie ma wpływu na wielkości identyfikowanych maksymalnych odkształceń i naprężeń wywołanych przyłożonym obciążeniem. Zamodelowano pełne podparcie podstawy (odebrano wszystkie stopnie swobody) oraz podparcia ścian bocznych typu łożwa.

Obciążenie przykładano na powierzchni styku koła z nawierzchnią (tab. 7.4), a jego wartość wynosiła od 30 do 150 kN (skok co 10 kN) w przypadku osi pojedynczych i od 60 do 300 kN (skok co 20 kN) w przypadku osi wielokrotnych (założono równomierny sposób rozkładu obciążenia na poszczególne osi składowe).

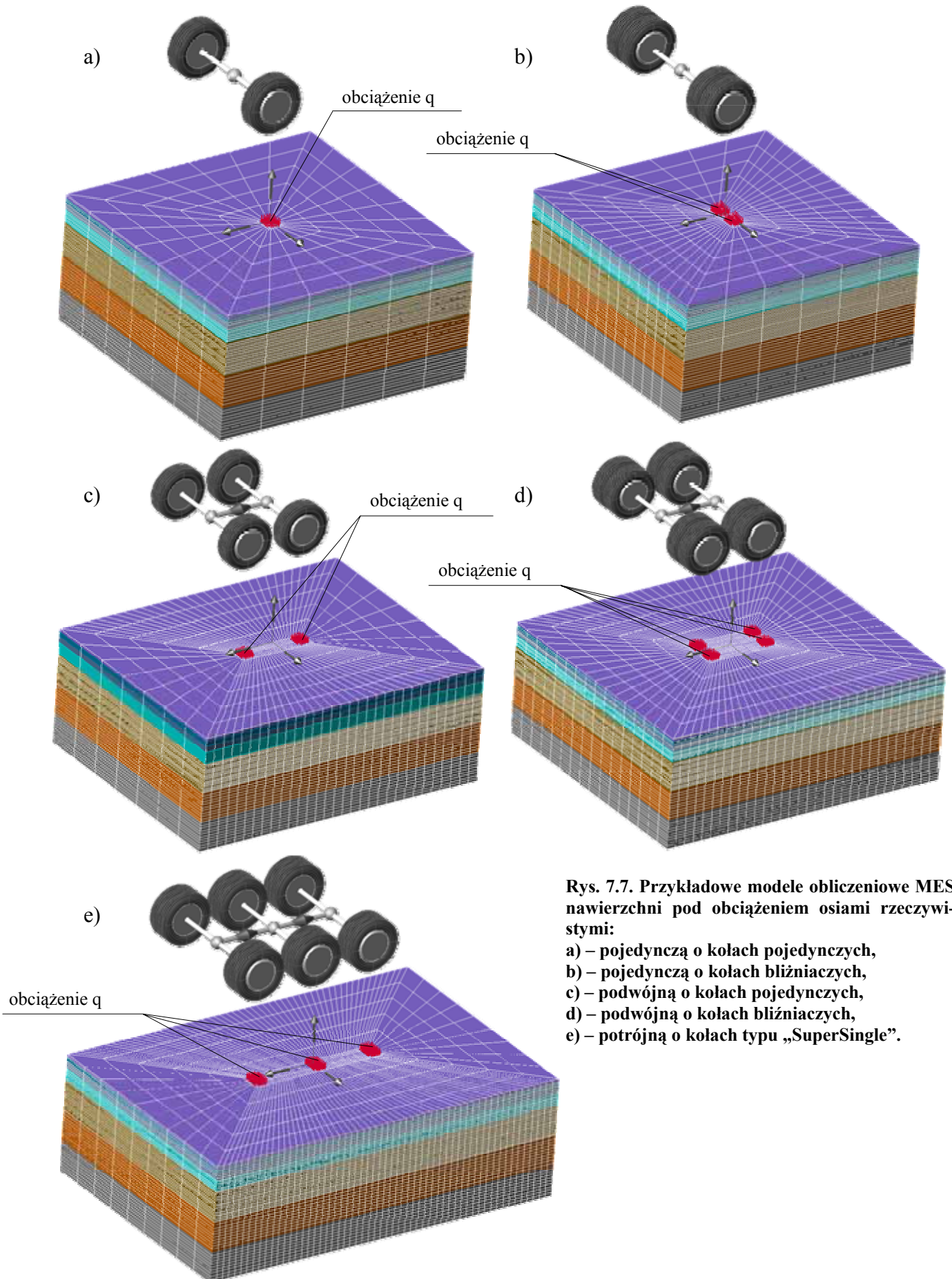
Tab. 7.4. Powierzchnia styku opony z nawierzchnią w zależności od przyjętego modelu obliczeniowego

Model	Powierzchnia styku [m ²]	Model	Powierzchnia styku [m ²]
oś pojedyncza o kołach pojedynczych		oś podwójna o kołach pojedynczych	
kIr160	0,0804	oII305s100	0,1216
kI245	0,0381	oII305s135	0,1216
kI305	0,0608	oś potrójna o kołach pojedynczych „SuperSingle”	
kI385	0,0756		
kI435	0,0896		
kI495	0,0992	oIII385s100	0,2432
oś pojedyncza o kołach bliźniaczych		oś podwójna o kołach bliźniaczych	
kII245	0,0800	oIII305s100	0,226(6)
kII275	0,0987	oIII305s135	0,226(6)
kII305	0,1178		



Rys. 7.6. Model obliczeniowy nawierzchni pod obciążeniem osią obliczeniową – porównawczą (kIr160):

- a) widok ogólny,
- b) obciążenie powierzchni styku koła z nawierzchnią,
- c) przekrój poprzeczny i sposób zamocowania.



Rys. 7.7. Przykładowe modele obliczeniowe MES nawierzchni pod obciążeniem osiami rzeczywistymi:

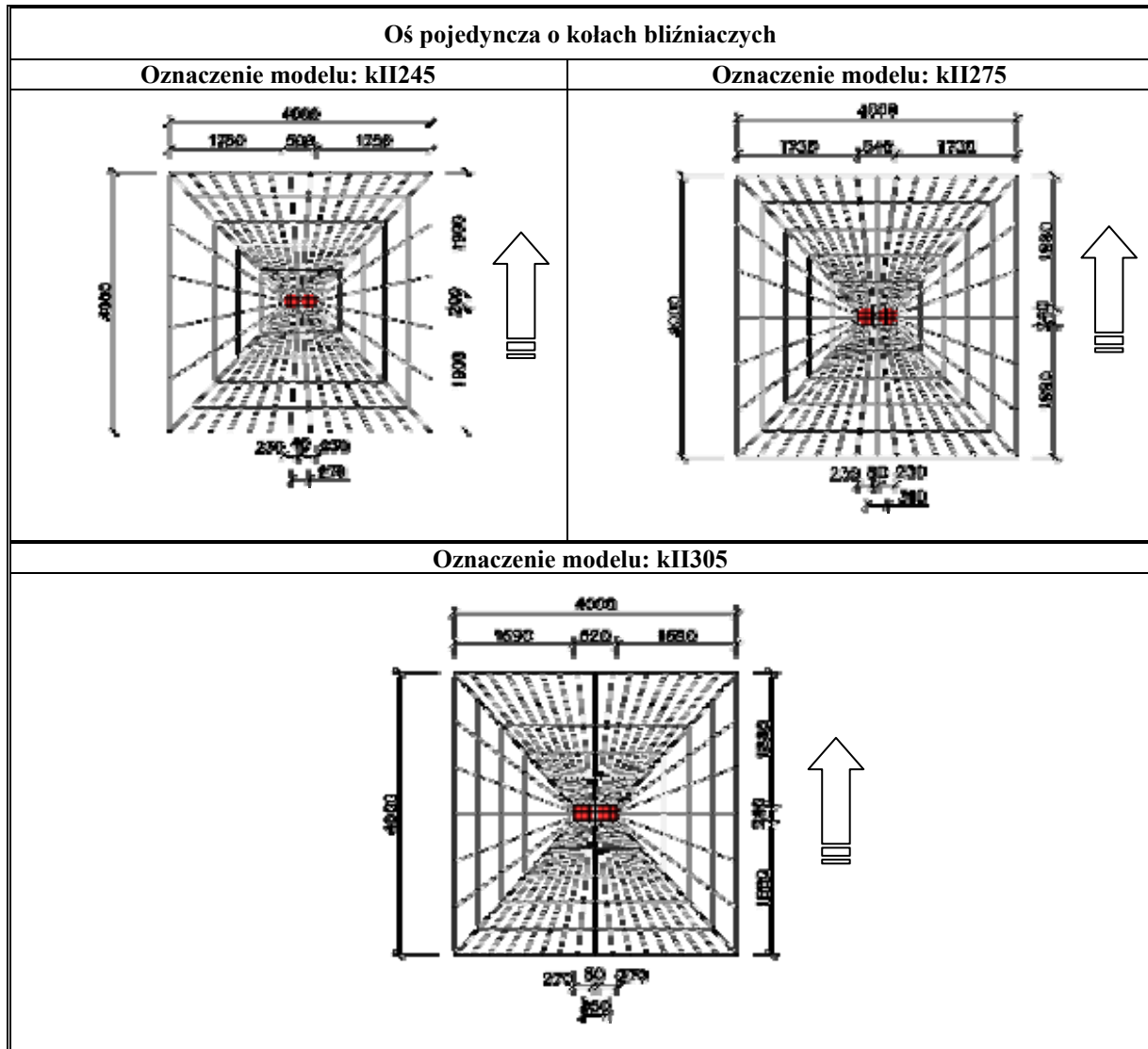
- a) – pojedynczą o kołach pojedynczych,
- b) – pojedynczą o kołach bliźniaczych,
- c) – podwójną o kołach pojedynczych,
- d) – podwójną o kołach bliźniaczych,
- e) – potrójną o kołach typu „SuperSingle”.

Dokładne wymiary geometryczne poszczególnych modeli przedstawiono w tab. 7.5, 7.6 i 7.7.

Tab. 7.5. Wymiary geometryczne modeli osi pojedynczych o kołach pojedynczych [mm].

Oś pojedyncza o kołach pojedynczych	
<p>Oznaczenie modelu: kIr160</p>	<p>Oznaczenie modelu: kI245</p>
<p>Oznaczenie modelu: kI305</p>	<p>Oznaczenie modelu: kI385</p>
<p>Oznaczenie modelu: kI435</p>	<p>Oznaczenie modelu: kI495</p>

Tab. 7.6. Wymiary geometryczne modeli osi pojedynczych o kołach bliźniaczych [mm].

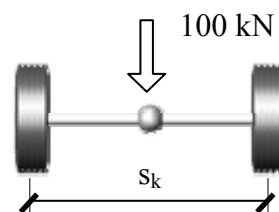
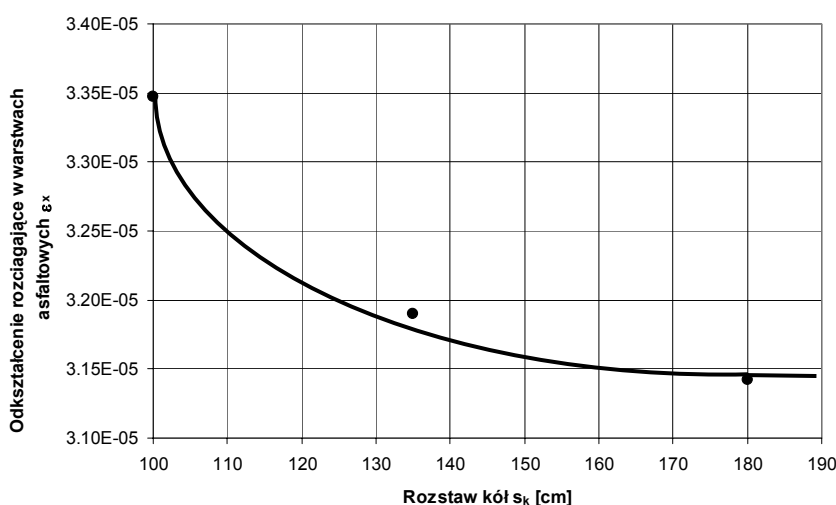


Tab. 7.7. Wymiary geometryczne modeli osi wielokrotnych [mm].

Oś podwójna o kołach pojedynczych	
<p>Rozstaw kół: 100cm Oznaczenie modelu: oII305s100</p>	<p>Rozstaw kół: 135cm Oznaczenie modelu: oII305s135</p>
Oś potrójna o kołach pojedynczych „SuperSingle”	
<p>Rozstaw kół: 100cm Oznaczenie modelu: oIII385s100</p>	<p>Rozstaw kół: 135cm Oznaczenie modelu: oIII385s135</p>
Oś podwójna o kołach bliźniaczych	
<p>Rozstaw kół: 100cm Oznaczenie modelu: oIII305s100</p>	<p>Rozstaw kół: 135cm Oznaczenie modelu: oIII305s135</p>

7.5. Dokładność obliczeń

Jak już wcześniej wspomniano, z uwagi na symetrię osiową pojazdów, w pracy analizowano modele nawierzchni obciążone kołami pojazdów, a więc połową osi. Zasadność takiego postępowania zweryfikowano poprzez analizę modeli obliczeniowych nawierzchni obciążonych osią pojedynczą o kołach pojedynczych o szerokości opon 305 mm, osią podwójną o kołach bliźniaczych o szerokości opon 305 mm oraz osią potrójną o kołach pojedynczych typu "Super Single" i szerokości opon 385 mm. Sprawdzono rozstawy kół s_k : 1,00 m, 1,35 m i 1,80 m. Postępowanie takie pozwoliło na określenie zależności pomiędzy odkształceniami w warstwach asfaltowych pod kołem, a położeniem drugiego koła w analizowanej osi (rys. 7.8).



$$s_k=1,00\text{m} \rightarrow \epsilon_x=3,347 \cdot 10^{-5}$$
$$s_k=1,35\text{m} \rightarrow \epsilon_x=3,190 \cdot 10^{-5}$$
$$s_k=1,80\text{m} \rightarrow \epsilon_x=3,142 \cdot 10^{-5}$$

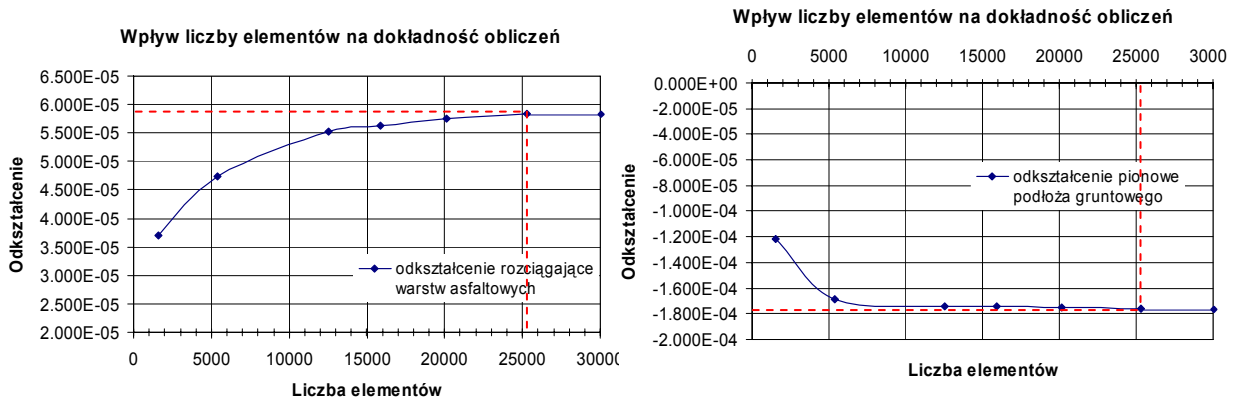
Rys. 7.8. Wpływ rozstawu kół na wartość odkształceń w warstwach asfaltowych, w konstrukcji nawierzchni o grubości warstw asfaltowych 23 cm w okresie średniorocznym, pod obciążeniem osią 100 kN o oponie o szerokości 305 mm.

Dla przykładu, w przypadku typowego rozstawu kół wynoszącego w pojazdach ciężarowych 1,80 m, wartość odkształceń ϵ_x wywołanych pod obciążeniem osią pojedynczą (rys. 7.8) w warstwach asfaltowych wyniosła $3,142 \cdot 10^{-5}$. Jest to wartość praktycznie identyczna z analizowanym modelem obliczeniowym nawierzchni, obciążonym kołem pojedynczym o szerokości 305 mm o nacisku 50 kN ($3,144 \cdot 10^{-5}$). Można zatem uznać uproszczenie wykorzystujące osiową symetrię pojazdów za poprawne.

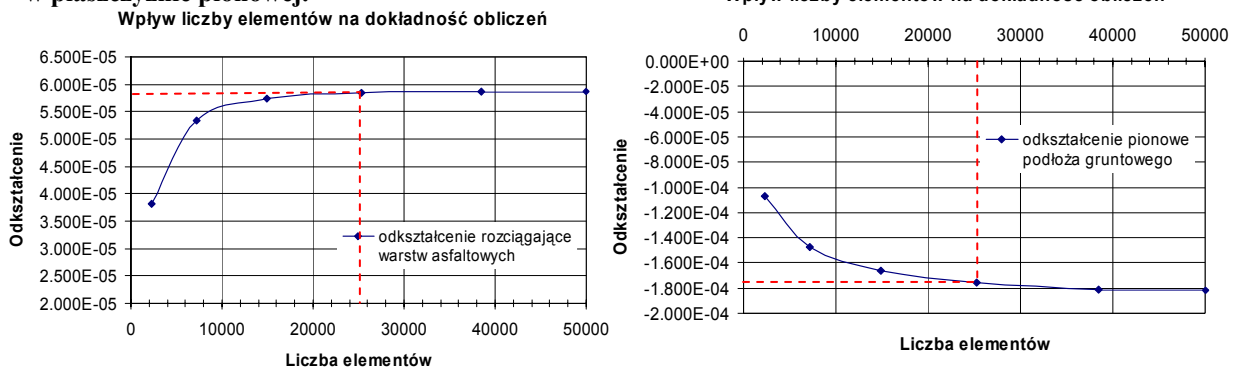
W pracy sprawdzono również wpływ podparcia ścian bocznych modeli obliczeniowych na wartość uzyskiwanych odkształceń w warstwach asfaltowych. Wymiary zewnętrzne modeli obliczeniowych (tab. 7.5, 7.6, 7.7) zostały ustalone na takim poziomie, że sposób podparcia ścian bocznych (w każdym przypadku zakładano pełne podparcie podstawy – odebranie wszystkich stopni swobody) nie wpływa na wartość odkształceń pod obciążającym kołem. Przeanalizowano trzy sposoby podparcia ścian bocznych: pełne

(odebranie wszystkich 6 stopni swobody), łyżwa (odebranie przemieszczeń w płaszczyźnie poziomej) oraz brak podparcia. W przypadku modelu obliczeniowego nawierzchni o grubości warstw asfaltowych wynoszącej 23 cm obciążonego osią obliczeniową – referencyjną o obciążeniu 100 kN, w przypadku pełnego podparcia, maksymalne odkształcenie wywołane w warstwach asfaltowych pod kołem wyniosło $5,762 \cdot 10^{-5}$, a w przypadku braku podparcia $5,725 \cdot 10^{-5}$. Ostatecznie przyjęto podparcie ścian bocznych typu łyżwa.

W celu uzyskania wymaganej dokładności obliczeń, sprawdzono również stopień dyskretyzacji modeli, tj. stopień podziału modeli na elementy skończone. Do kalibracji przyjęto model opisujący oś obliczeniową o kołach pojedynczych i powierzchni styku opony z nawierzchnią zobrazowaną za pomocą powierzchni okrągłej o promieniu 160 mm (model kIr160). Z uwagi na to, iż w pracy wykorzystywane będą odkształcenia rozciągające warstw asfaltowych i odkształcenia pionowe podłoża gruntowego, sprawdzono wpływ podziału modelu na elementy w dwu płaszczyznach: poziomej i pionowej. Jak widać, wyniki o zadowalającej dokładności i praktycznie stałej wartości uzyskiwanych odkształceń zarówno rozciągających jak i pionowych (różnice w uzyskiwanych wynikach wynoszą ok. 1%), uzyskiwane są przy liczbie ok. 25000 elementów. Liczba ta odpowiada podziałowi na elementy prostokątne o grubości 1 cm i bokach 4 cm.



Rys. 7.9 Zbieżność uzyskiwanych wartości odkształceń w zależności od stopnia dyskretyzacji w płaszczyźnie pionowej.



Rys. 7.10 Zbieżność uzyskiwanych wartości odkształceń w zależności od stopnia dyskretyzacji w płaszczyźnie poziomej.

8. WPLYW POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH NA NOŚNOŚĆ NAWIERZCHNI DROGOWYCH

8.1. Wprowadzenie

W rozdziale przedstawiono sposób oceny wpływu sylwetek pojazdów ciężarowych na nośność nawierzchni drogowych, oparty o analizę numeryczną opracowanych w rozdziale 6 modeli nawierzchni, obciążonych osiami pojazdów rzeczywistych. W ocenie nośności wykorzystano również kryteria wymiarowania nawierzchni drogowych pozwalające na ocenę trwałości zmęczeniowych analizowanych modeli.

Ze względu na sposób budowy modeli obliczeniowych nawierzchni obejmujący obciążenie osiami pojedynczymi i wielokrotnymi pojazdów, w rozdziale tym, w pierwszej kolejności określono szkody zmęczeniowe i współczynniki agresywności osi pojedynczych oraz wielokrotnych (przy dwóch rozstawach osi składowych: 1,00m i 1,35 m), by następnie wykorzystując zasadę superpozycji uzyskać wartości szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności (przeliczeniowe) trzynastu rozpoznanych i sklasyfikowanych sylwetek pojazdów ciężarowych.

Postępowanie takie pozwoliło precyzyjnie określić różnice w wartościach szkodliwego oddziaływania na nawierzchnie różnych sylwetek pojazdów, przeanalizować trzy okresy eksploatacji (zimowy, wiosenno – jesienny i letni) oraz wykazać istotne różnice w wartościach oddziaływania osi pojedynczych i wielokrotnych.

8.2. Założenia obliczeniowe

W celu wyznaczenia współczynników agresywności poszczególnych osi pojazdów (a w konsekwencji całej sylwetki pojazdu ciężarowego), w pracy posłużono się kryteriami wymiarowania nawierzchni. W przypadku analizowanych konstrukcji nawierzchni podanych, wykorzystano kryteria najdokładniej zbadane i zweryfikowane, a zatem kryteria spełkań zmęczeniowych Instytutu Asfaltowego i Shella (zależności 3.18 i 3.22). Przyjęto następujące założenia:

- zawartość objętościowa asfaltu V_A [%]:
 - warstwa ściernalna z betonu asfaltowego: 14,2
 - warstwa wiążąca z betonu asfaltowego: 11,5
 - podbudowa z betonu asfaltowego: 10,0
- objętość wolnych przestrzeni V_B [%]:

$$d_{100}^{klr160} = \frac{I}{L_{100}^{klr160}} \quad (8.1)$$

gdzie: L_{100}^{klr160} - referencyjna – porównawcza liczba osi o obciążeniu 100kN powodująca zniszczenie nawierzchni (model kI160),

d_{100}^{klr160} - szkoda zmęczeniowa wywołana przejściem jednej osi referencyjnej – porównawczej o obciążeniu 100 kN (model kI160).

a szkoda zmęczeniowa wywołana przejściem jednej dowolnej osi pojedynczej:

$$d_i^j = \frac{I}{L_i^j} \quad (8.2)$$

gdzie: L_i^j - liczba rzeczywistych osi „j” (modele: kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275, kII305) o obciążeniu „i”, wywołująca zniszczenie nawierzchni,

d_i^j - szkoda zmęczeniowa wywołana przejściem jednej rzeczywistej osi „j” (modele: kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275, kII305), o obciążeniu „i”.

Zatem agresywność dowolnej rzeczywistej osi „j” (modele: kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275, kII305) o obciążeniu „i”, będzie się równać stosunkowi szkody zmęczeniowej wywołanej przejściem takiej osi rzeczywistej, i szkody zmęczeniowej wywołanej przejściem jednej osi referencyjnej - porównawczej:

$$r_i^j = \frac{d_i^j}{d_{100}^{klr160}} \quad (8.3)$$

$$r_i^j = \frac{\frac{I}{L_i^j}}{\frac{I}{L_{100}^{klr160}}} \rightarrow r_i^j = \frac{L_{100}^{klr160}}{L_i^j} \quad (8.4)$$

gdzie: r_i^j – współczynnik agresywności dowolnej rzeczywistej osi „j” (kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275, kII305) o obciążeniu „i”.

Agresywność osi wielokrotnych jest oczywiście równa sumie agresywności poszczególnych osi składowych wyznaczonych w równaniu (8.4). Również tutaj znajduje zastosowanie zasada superpozycji, ale odnosząca się nie do generowanych odkształceń i naprężeń, a do wywoływanych przez nie szkód zmęczeniowych. Agresywność całej sylwetki można określić z zależności:

$$r^s = \sum_{j=1}^6 r_i^j \quad (8.5)$$

gdzie: r^s – współczynniki agresywności sylwetki pojazdu,

$\sum_{j=1}^6 r_i^j$ - współczynniki agresywności kolejnych osi „j” sylwetki pojazdu przy obciążeniu „i”; liczba osi „j” jest zależna od sylwetki pojazdu i wynosi od 2 (sylwetka 2P) do 6 (sylwetka 3P+3P, 3C+3N).

Biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy na temat kryteriów zmęczeniowych i wieloletnie doświadczenia w ich stosowaniu, można stwierdzić, że zaproponowany sposób postępowania przy wyznaczaniu współczynników agresywności pojazdów, jest metodą o wystarczającej dokładności

8.3. Wpływ osi pojedynczych

8.3.1. Wpływ osi pojedynczych na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych

Dla określenia rzeczywistego oddziaływania osi pojedynczych, a więc osi o różnej konfiguracji kół opracowano 9 modeli osi pojedynczych, w tym 6 modeli o kołach pojedynczych i 3 modele o kołach bliźniaczych. Analizowano opony o szerokościach od 245mm do 495mm (te ostatnie są dopiero wprowadzane do eksploatacji przez koncerny oponiarskie i są przeznaczone na oś napędową – są to opony typu „Super Single Drive”) oraz sześć konstrukcji nawierzchni podatnych (tab. 7.1) i cztery konstrukcje nawierzchni półsztywnych i sztywnych (tab. 7.2).

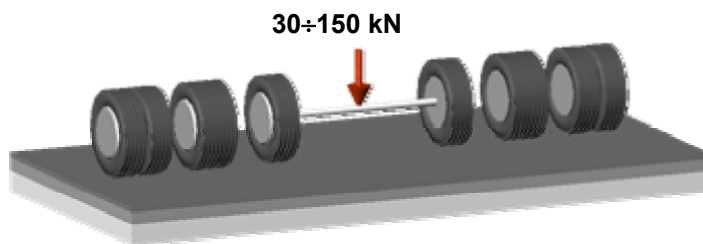
Zgodnie z kryteriami zmęczeniowymi, za zniszczenie nawierzchni drogowych odpowiedzialne są maksymalne naprężenia rozciągające występujące na spodzie warstw asfaltowych oraz maksymalne naprężenia rozciągające w warstwach betonowych lub podbudowach związanych cementem. Dlatego też, w pracy poszukiwano:

- największych odkształceń występujących w warstwach asfaltowych,
- największych naprężeń w warstwach betonowych i podbudowach związanych cementem.

O ile w przypadku osi pojedynczych o kołach pojedynczych maksymalne odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych występują w osi powierzchni styku koła z nawierzchnią, to w przypadku opon bliźniaczych, maksymalne odkształcenia rozciągają-

ce na spodzie warstw asfaltowych były identyfikowane pomiędzy oponami bliźniaczymi [3].

Na poszczególne modele obliczeniowe (kIr160, kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275 i kII305), których warstwy zostały opisane za pomocą modułów sprężystości podłużnej i współczynników Poissona odpowiadających rozważanym okresom eksploatacji nawierzchni (okres zimowy, wiosenno-jesienny i letni), przykładano ciśnienie równomiernie rozłożone (o wartościach podanych w tabeli 8.1) odpowiadające naciskowi wywieranemu przez oś pojedynczą o wartości od 30 kN do 150 kN (rys. 8.2).

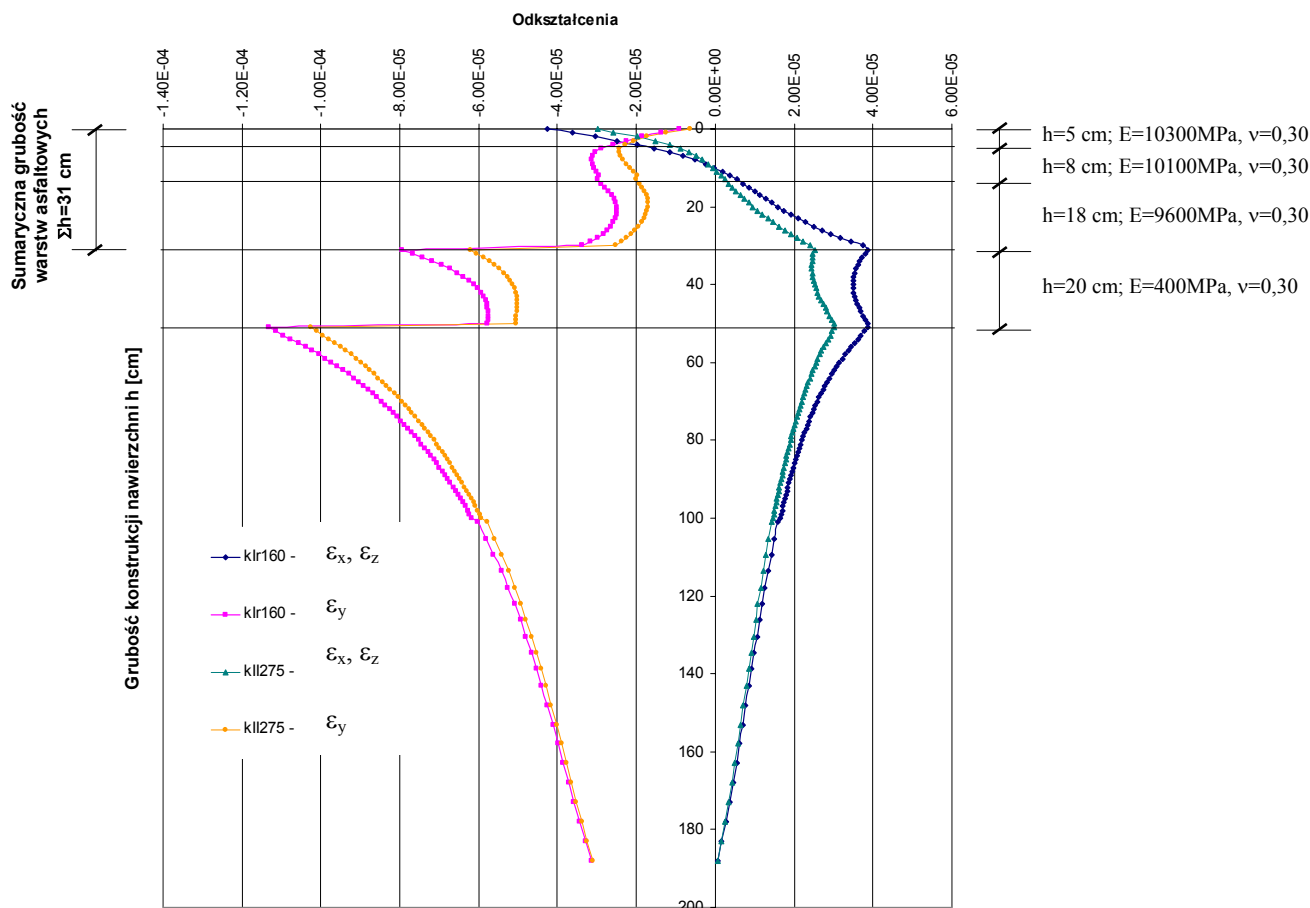


Rys. 8.2. Zakres analizowanych nacisków osi pojedynczych (osi o różnej konfiguracji kół).

Tab. 8.1. Powierzchnia styku koła z nawierzchnią i odpowiadające jej ciśnienie stykowe [Pa].

Obciążenie osi P [kN]	Model								
	kIr160	kI245	kI305	kI385	kI435	kI495	kII245	kII275	kII305
	Powierzchnia styku koła z nawierzchnią [m ²]								
	0,0804	0,0381	0,0608	0,0756	0,0896	0,0992	0,0800	0,0987	0,1178
30	186570	393710	246720	198420	167420	151210	187500	151980	127340
40	248760	524940	328950	264560	223220	201620	250000	202640	169780
50	310950	656170	411190	330690	279020	252020	312500	253300	212230
60	373140	787410	493430	396830	334830	302420	375000	303960	254670
70	435330	918640	575660	462970	390630	352830	437500	354610	297120
80	497520	1049870	657900	529110	446430	403230	500000	405270	339560
90	559710	1181110	740140	595240	502240	453630	562500	455930	382010
100	621900	1312340	822370	661380	558040	504040	625000	506590	424450
110	684080	1443570	904610	727520	613840	554440	687500	557250	466900
120	746270	1574810	986850	793660	669650	604840	750000	607910	509340
130	808460	1706040	1069080	859790	725450	655250	812500	658570	551790
140	870650	1837280	1151320	925930	781250	705650	875000	709220	594230
150	932840	1968510	1233560	992070	837060	756050	937500	759880	636680

Przykładowe odkształcenia wyznaczone w konstrukcji nawierzchni podatnej o łącznej grubości warstw asfaltowych równej 31cm, w okresie wiosenno-jesiennym i pod obciążeniem (100 kN) wywieranym poprzez oś obliczeniową – kIr160 i koło bliźniacze kII275 przedstawiono na rysunku 8.3.



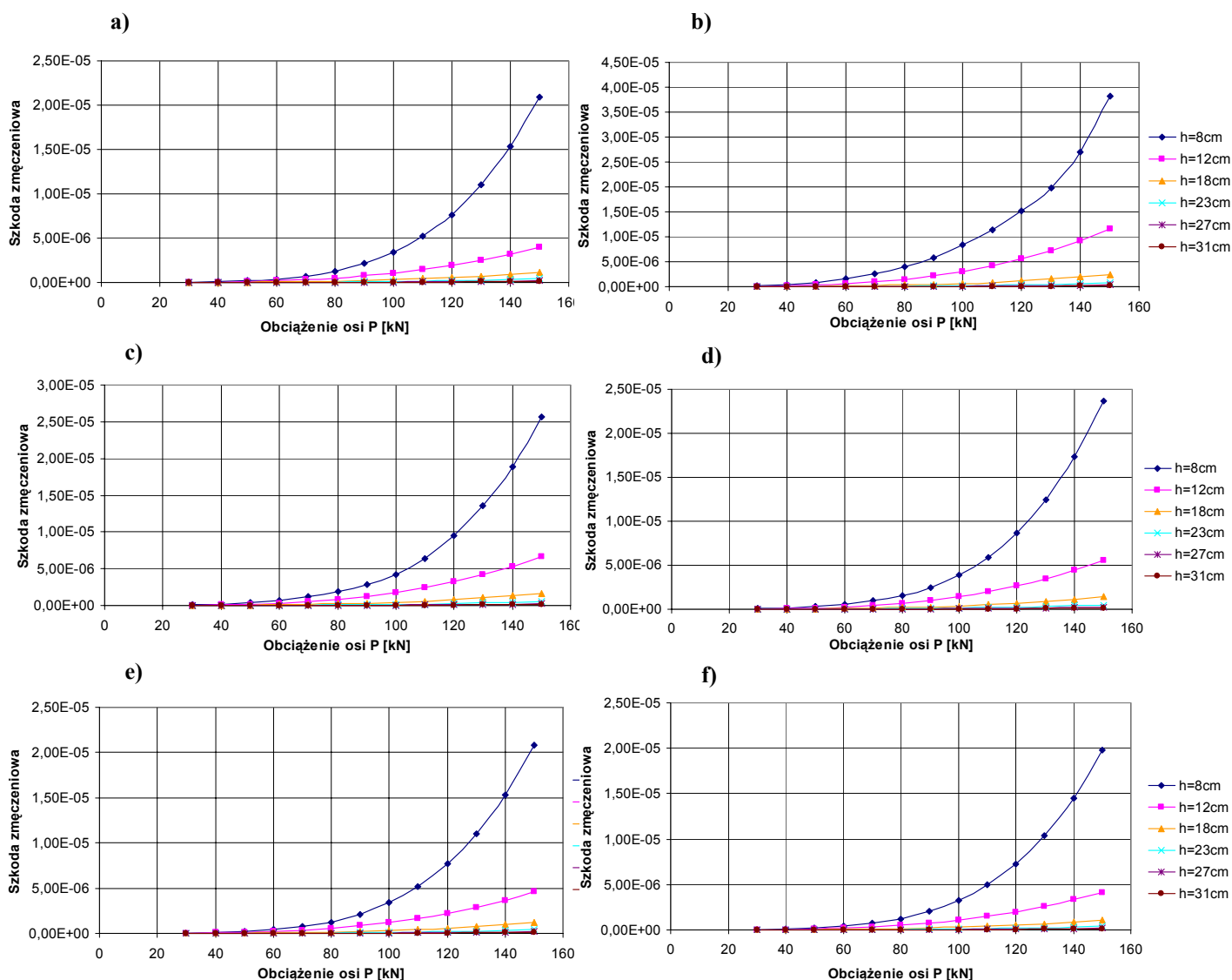
Rys. 8.3. Przykładowy wykres odkształceń ϵ_x , ϵ_z oraz ϵ_y dla dwóch modeli:
 - kIr160 (model osi obliczeniowej),
 - kII275 (model koła bliźniaczego o szerokości opony 275mm).

W celu sprawdzenia wpływu konfiguracji kół (a więc osi pojedynczych o kołach pojedynczych i bliźniaczych) na trwałość zmęczeniową nawierzchni wykorzystano zależność (8.1) i (8.2), które pozwoliły na wyznaczenie szkód zmęczeniowych wywołanych w nawierzchni przejściem osi obliczeniowej (model kIr160) i osi rzeczywistych (kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275 i kII305) w wybranych konstrukcjach nawierzchni podatnych (rys. 8.4 i rys. 8.5) oraz półsztywnej i sztywnej (rys. 8.7 i rys. 8.8).

Na rysunkach 8.4 i 8.5 przedstawiono szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchniach o grubościach warstw asfaltowych wynoszących od 8 do 31 cm, w średniorocznym okresie eksploatacji nawierzchni (jako okres średnioroczny przyjęto okres wiosenno-jesienny eksploatacji nawierzchni), przejściem jednej osi o obciążeniu P wynoszącym od 30 do 150 kN (grubości poszczególnych warstw oraz ich moduły sprężystości i współczynniki Poissona zamieszczono w tab. 7.1 i 7.2).

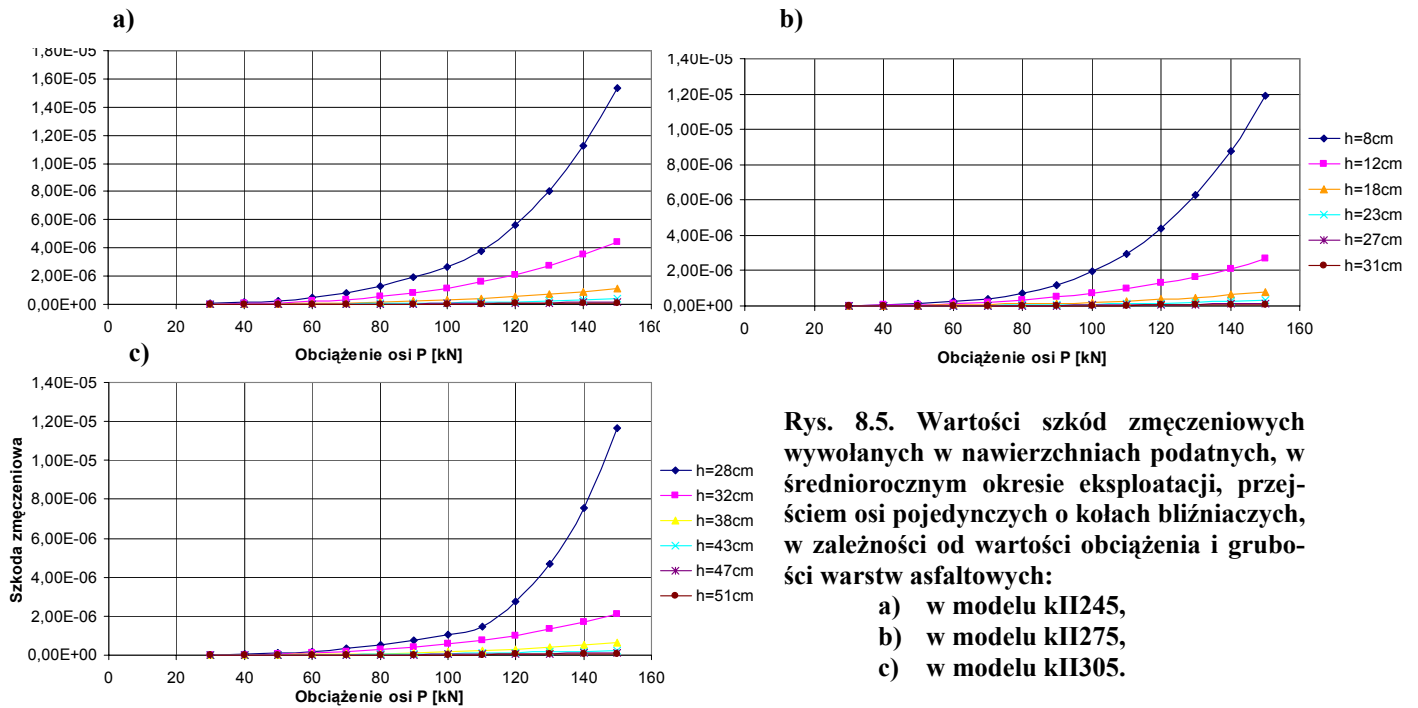
Widoczne jest, że szkoda zmęczeniowa wywoływana w analizowanych nawierzchniach drogowych przejściem jednej osi obliczeniowej odpowiada szkodzie, jaką ponie-

nawierzchnia przejściem jednej osi o ogumieniu typu „Super Single” (szerokość 385 mm i 435 mm) lub „Super Single Drive” (szerokość 495 mm). Jest to wynikiem zbliżonych powierzchni styku ogumienia tych osi z nawierzchnią. Oznacza to, że osie kierowane pojazdów na których stosowane jest ogumienie o szerokościach od 245 mm do 305 mm, pomimo mniejszych nacisków przez nie wywieranych, charakteryzują się stosunkowo dużym, niekorzystnym wpływem na nawierzchnie drogowe.

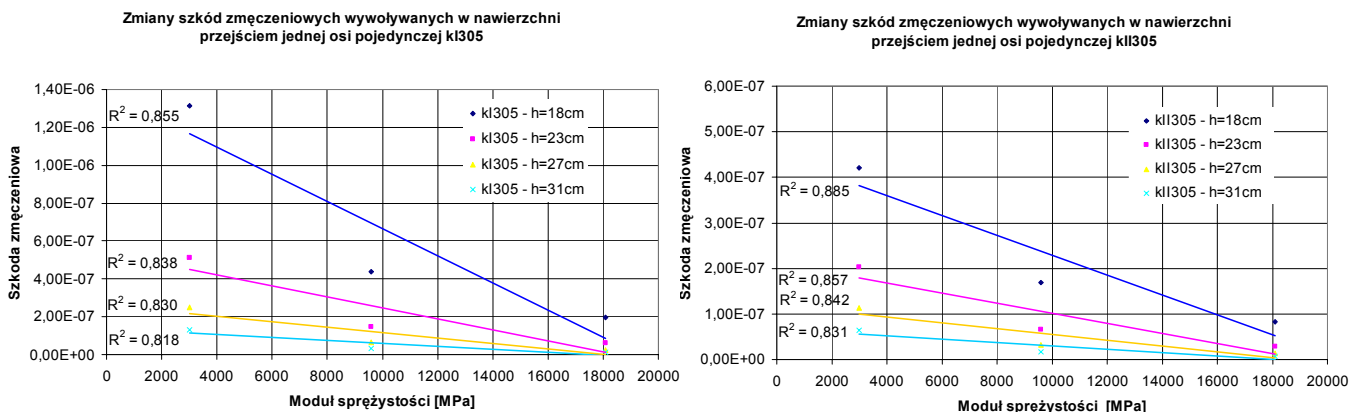


Rys. 8.4. Wartości szkód zmęczeniowych wywołanych w nawierzchniach podatnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, przejściem osi pojedynczych o kołach pojedynczych w zależności od wartości obciążenia i grubości warstw asfaltowych:

- a) w modelu k1r160 – oś obliczeniowa,
- b) w modelu k1245,
- c) w modelu k1305,
- d) w modelu k1385.
- e) w modelu k1435,
- f) w modelu k1495.



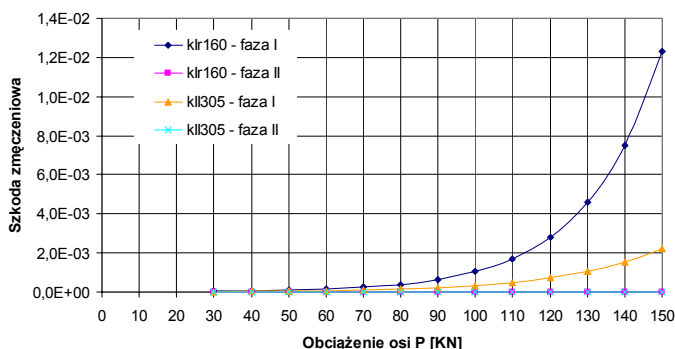
W przypadku nawierzchni podatnych stwierdzono również wzrost szkód zmęczeniowych wraz ze zmniejszaniem się modułów sprężystości (tzn. w okresie letnim, w nawierzchniach jest wywoływana większa szkoda zmęczeniowa niż w okresie wiosenno – jesiennym, a w okresie wiosenno – jesiennym większa niż w okresie zimowym. Dla zobrażenia zachodzących zmian, na rysunku 8.6 przedstawiono zmiany szkód zmęczeniowych wywołanych w nawierzchniach o grubości od 18 do 31 cm, naciskiem osi pojedynczej o obciążeniu 100 kN. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości warstw asfaltowych, zmniejsza się różnica w wartościach wywołanych szkód, co prowadzi do wniosku, że nawierzchnie o największych nośnościach, czyli o największych grubościach warstw asfaltowych (a co za tym idzie i całej konstrukcji nawierzchni) są mniej podatne na zmiany modułów sprężystości wywołane różnymi okresami eksploatacji.



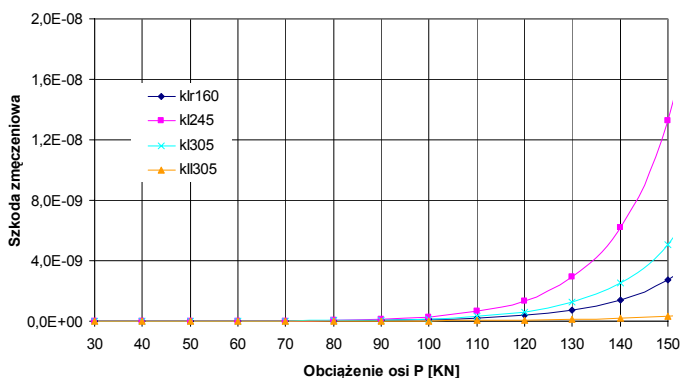
Rys. 8.6. Zmiany szkód zmęczeniowych wywołane zmianą modułu sprężystości warstw asfaltowych pod osią pojedynczą o kołach pojedynczych (kI305) i bliźniaczych (kII305).

Na rysunku 8.7 przedstawiono szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni półsztywnej w dwóch fazach pracy: w fazie w której podbudowa z chudego betonu jeszcze nie uległa spękaniu (faza I) oraz w fazie, w której podbudowa ta jest spękana, a nawierzchnia ma cechy nawierzchni podatnej (faza II). Na rysunku tym przedstawiono szkody wywołane przez dwa typy osi: obliczeniową (kIr160) i rzeczywistą o ogumieniu bliźniaczym o szerokości 305 mm (kII305). W każdym przypadku, szkoda zmęczeniowa powstająca w nawierzchni w fazie I jest wielokrotnie większa niż w fazie II. Jest to oznaką szybkiego przejścia nawierzchni z podbudową z chudego betonu w II fazę pracy nawierzchni – podatną. Z uwagi na takie zachowanie nawierzchni półsztywnych (tzn. nawierzchni z podbudową związaną spoiwem hydraulicznym), w dalszych analizach odnoszących się do sylwetek pojazdów nawierzchnie półsztywne nie będą rozpatrywane.

W pracy przeanalizowano również wpływ wybranych osi pojedynczych (osi obliczeniowej – kIr60, osi o kołach pojedynczych i szerokości ogumienia 245 mm – kI245 i 305 mm – kI305 oraz osi o kołach bliźniaczych i szerokości ogumienia 305 mm – kII305) na trwałość zmęczeniową nawierzchni sztywnych (rys. 8.8). Jak widać, wielkość szkodliwego oddziaływania osi obliczeniowej jest mniejsza niż analizowanych osi o kołach pojedynczych, ale jednocześnie mniejsza niż osi o ogumieniu bliźniaczym.



Rys. 8.7. Wartości szkód zmęczeniowych nawierzchni półsztywnych wywołanych przejściem osi pojedynczych, w zależności od wartości obciążenia oraz fazy pracy (faza I – podbudowa z chudego betonu nie spękana, faza II – podbudowa z chudego betonu spękana).



Rys. 8.8. Wartości szkód zmęczeniowych nawierzchni sztywnej wywołanych przejściem osi pojedynczych, w zależności od wartości obciążenia.

Przebieg zmian szkód zmęczeniowych wywołanych w średniorocznym okresie eksploatacji (tzn. wiosenno – jesiennym) jest potęgowy, a równania je opisujące przedstawiono w tab. 8.2 ÷ 8.3 (nawierzchnie podatne) oraz 8.4 i 8.5 (nawierzchnia półsztywna i sztywna).

Dla danej grubości nawierzchni, zależności opisujące szkody zmęczeniowe mają postać:

$$d = c \cdot P^\alpha \quad (8.6)$$

gdzie: d – szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej o ogumieniu pojedynczym lub bliźniaczym,
 P – obciążenie osi pojedynczej [kN],
 c – współczynnik wyznaczony doświadczalnie, zależny od grubości warstw asfaltowych i powierzchni styku koła z nawierzchnią,
 α – wykładnik potęgowy zależny od parametrów wytrzymałościowych przyjętych do opisu warstw konstrukcji nawierzchni (moduł sprężystości, współczynnik Poissona).

Jednak z uwagi na to, że wartości szkód zmęczeniowych przy takim samym obciążeniu ulegają zmianie wraz ze zmianą grubością nawierzchni, to zależność (8.6) można zapisać w przypadku nawierzchni podatnych w postaci:

$$d = c_1 \cdot h^{\delta_1} \cdot P^{\gamma_1} \quad (8.7)$$

gdzie: d – szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej o ogumieniu pojedynczym lub bliźniaczym,
 P – obciążenie osi pojedynczej [kN],
 h – grubość warstw asfaltowych [cm],
 c_1, δ_1, γ_1 – współczynniki wyznaczony doświadczalnie, zależne od sposobu obciążenia nawierzchni.

Jak widać, wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach, są zależne od wartości obciążenia osi P oraz grubości nawierzchni (w przypadku nawierzchni podatnych od grubości warstw asfaltowych), co dobrze obrazują rysunki 8.9 ÷ 8.17 oraz odpowiadające im zależności (8.8 ÷ 8.16).

Tab. 8.2. Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchniach podatnych przejściem osi obliczeniowej, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji nawierzchni (P – obciążenie osi).

Model	Grubość warstw asfaltowych	Szkody zmęczeniowe
kIr160	h = 8 cm	$d = (2,92809 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{4,03902}$
	h = 12 cm	$d = (2,76090 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,28922}$
	h = 18 cm	$d = (1,29617 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,18275}$
	h = 23 cm	$d = (3,02961 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29071}$
	h = 27 cm	$d = (1,33368 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29174}$
	h = 31 cm	$d = (7,04502 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29190}$

Tab. 8.3. Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchniach podatnych przejściem osi pojedynczych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji nawierzchni (P – obciążenie osi).

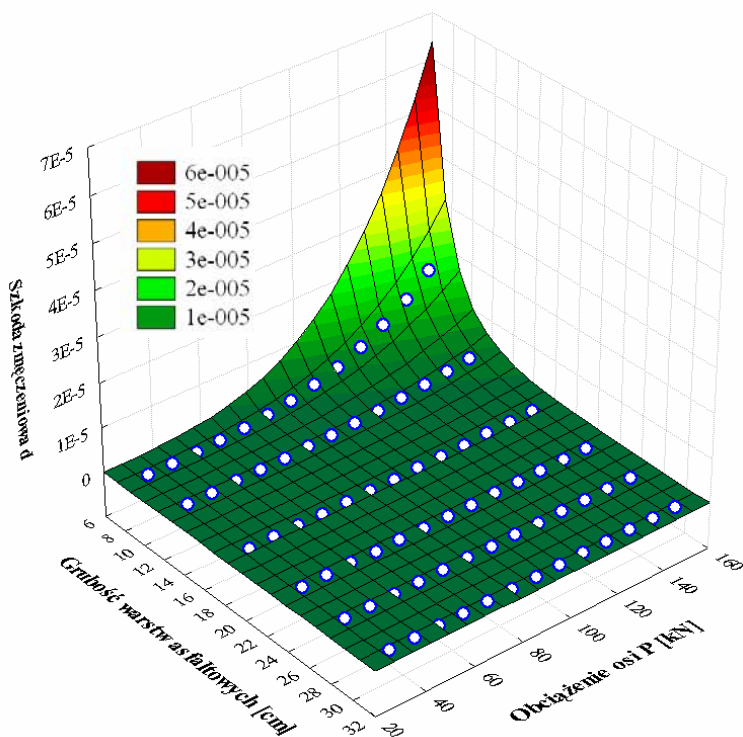
Model	Grubość warstw asfaltowych	Szkody zmęczeniowe	Model	Grubość warstw asfaltowych	Szkody zmęczeniowe
kI245	h = 8 cm	$d = (1,78516 \cdot 10^{-12}) \cdot P^{3,34145}$	kI495	h = 8 cm	$d = (7,29474 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,83776}$
	h = 12 cm	$d = (8,04184 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29057}$		h = 12 cm	$d = (2,87187 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29012}$
	h = 18 cm	$d = (1,66910 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29203}$		h = 18 cm	$d = (7,83698 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,28882}$
	h = 23 cm	$d = (5,12908 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29322}$		h = 23 cm	$d = (2,79700 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29070}$
	h = 27 cm	$d = (2,27590 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29068}$		h = 27 cm	$d = (1,30323 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29063}$
	h = 31 cm	$d = (1,35906 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,23762}$		h = 31 cm	$d = (6,33362 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29147}$
kI305	h = 8 cm	$d = (3,34433 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,58202}$	kII245	h = 8 cm	$d = (3,22258 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,48888}$
	h = 12 cm	$d = (4,63469 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,28973}$		h = 12 cm	$d = (3,05566 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29014}$
	h = 18 cm	$d = (1,14884 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29003}$		h = 18 cm	$d = (7,61104 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29362}$
	h = 23 cm	$d = (3,86887 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$		h = 23 cm	$d = (2,68950 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29130}$
	h = 27 cm	$d = (1,74148 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29066}$		h = 27 cm	$d = (1,24186 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (8,29148 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29057}$		h = 31 cm	$d = (6,04936 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
kI385	h = 8 cm	$d = (1,65155 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,70723}$	kII275	h = 8 cm	$d = (4,25768 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,84434}$
	h = 12 cm	$d = (3,80314 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29073}$		h = 12 cm	$d = (1,83289 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29134}$
	h = 18 cm	$d = (9,74101 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29222}$		h = 18 cm	$d = (5,45026 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,28930}$
	h = 23 cm	$d = (3,39589 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29072}$		h = 23 cm	$d = (2,06774 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (1,54128 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$		h = 27 cm	$d = (1,00126 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (7,39857 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29055}$		h = 31 cm	$d = (5,05368 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29050}$
kI435	h = 8 cm	$d = (1,01554 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,78104}$	kII305	h = 8 cm	$d = (3,54978 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,80878}$
	h = 12 cm	$d = (3,13592 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29384}$		h = 12 cm	$d = (1,46801 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,28938}$
	h = 18 cm	$d = (8,51445 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,28952}$		h = 18 cm	$d = (4,43022 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29126}$
	h = 23 cm	$d = (2,99652 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29129}$		h = 23 cm	$d = (1,74212 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29134}$
	h = 27 cm	$d = (1,38496 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$		h = 27 cm	$d = (8,60421 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29142}$
	h = 31 cm	$d = (6,68057 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29192}$		h = 31 cm	$d = (4,41740 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$

Tab. 8.4. Szkody zmęczeniowe osi pojedynczych, dla nawierzchni półsztywnej (P – obciążenie osi), w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji.

Model	Szkody zmęczeniowe
kIr160 – faza I	$d = (5,00861 \cdot 10^{-11}) \cdot P^{3,72328}$
kIr160 – faza II	$d = (8,00582 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29100}$
kII305 – faza I	$d = (7,94030 \cdot 10^{-10}) \cdot P^{2,86108}$
kII305 – faza II	$d = (1,74212 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29134}$

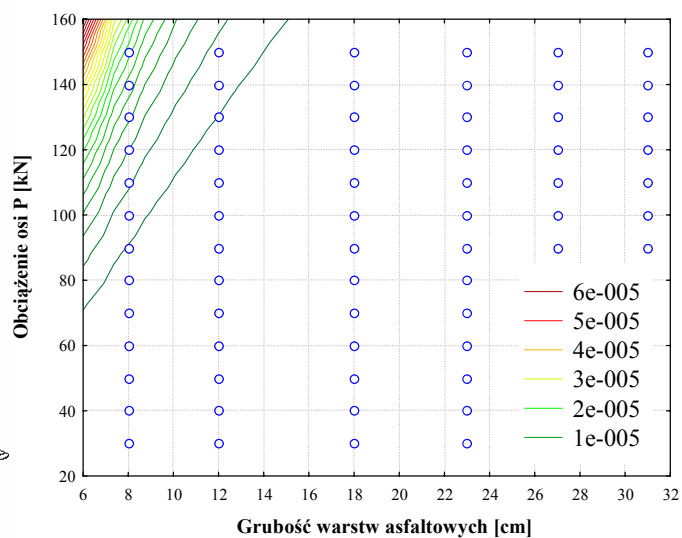
Tab. 8.5. Szkody zmęczeniowe osi pojedynczych, dla nawierzchni sztywnej (P – obciążenie osi), w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji.

Model	Szkody zmęczeniowe
kIr160	$d = (8,05542 \cdot 10^{-21}) \cdot P^{5,16682}$
kI245	$d = (5,48321 \cdot 10^{-22}) \cdot P^{5,99586}$
kI305	$d = (2,84532 \cdot 10^{-21}) \cdot P^{5,48788}$
kII305	$d = (5,48321 \cdot 10^{-22}) \cdot P^{5,99586}$



$$d^{kIr160} = 5,694 \cdot 10^{-11} \cdot h^{-3,53230} \cdot P^{3,99197} \quad (8.8)$$

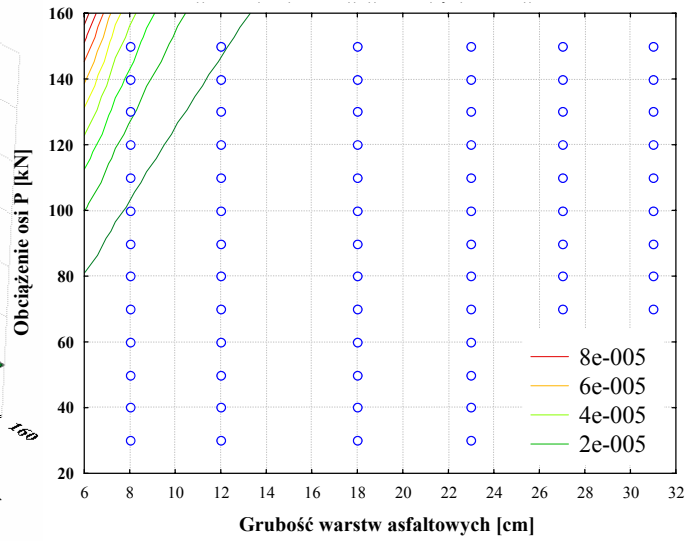
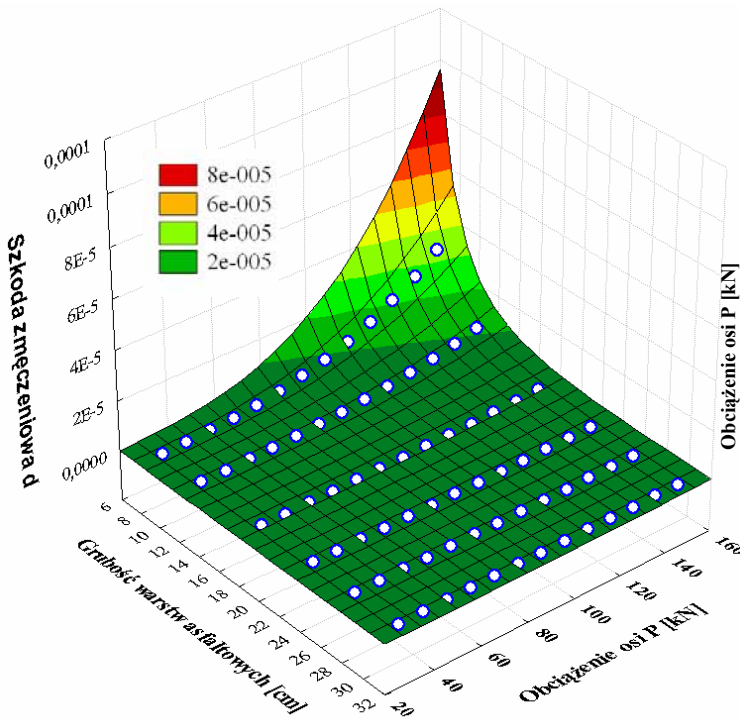
$$R = 1,000$$



Rysunek 8.9. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi obliczeniowej (model kIr160) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kI245} = 7,290 \cdot 10^{-10} \cdot h^{-2,86590} \cdot P^{3,33603} \quad (8.9)$$

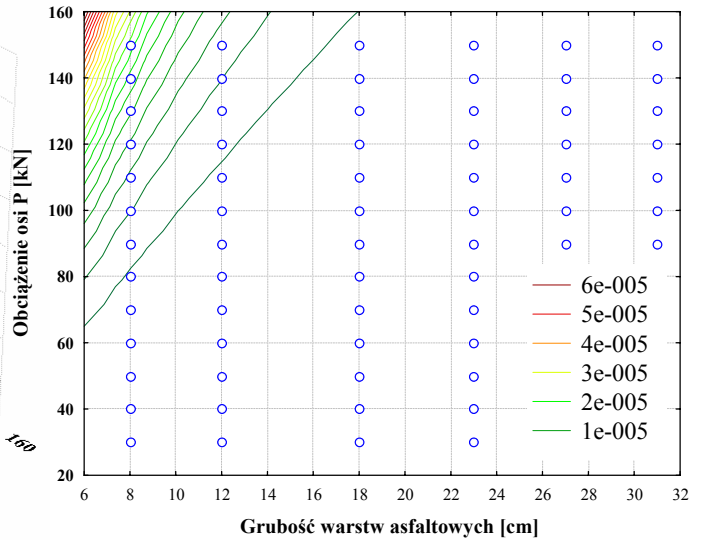
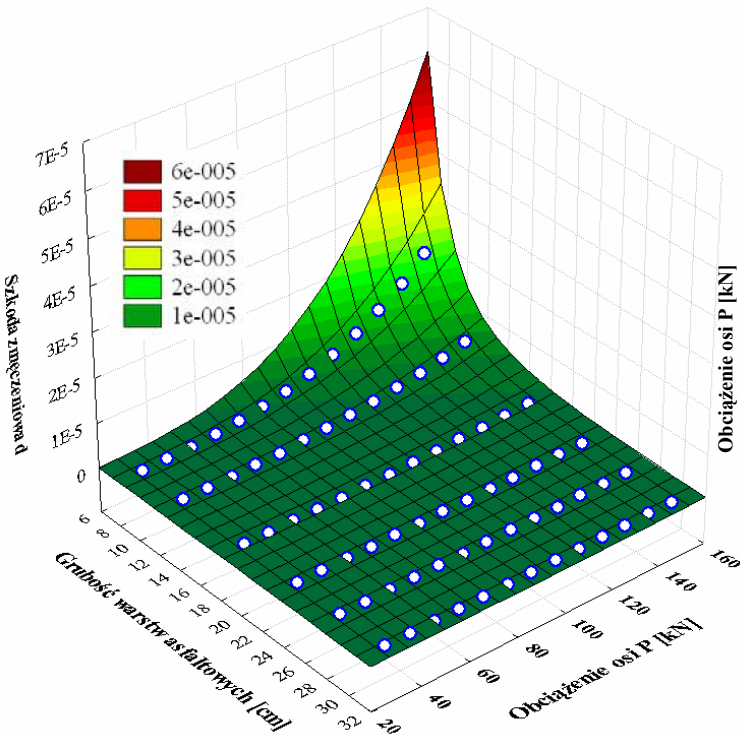
$$R = 0,998$$



Rysunek 8.10. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 245 mm (model kI245) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kI305} = 1,690 \cdot 10^{-10} \cdot h^{-2,91970} \cdot P^{3,55200} \quad (8.10)$$

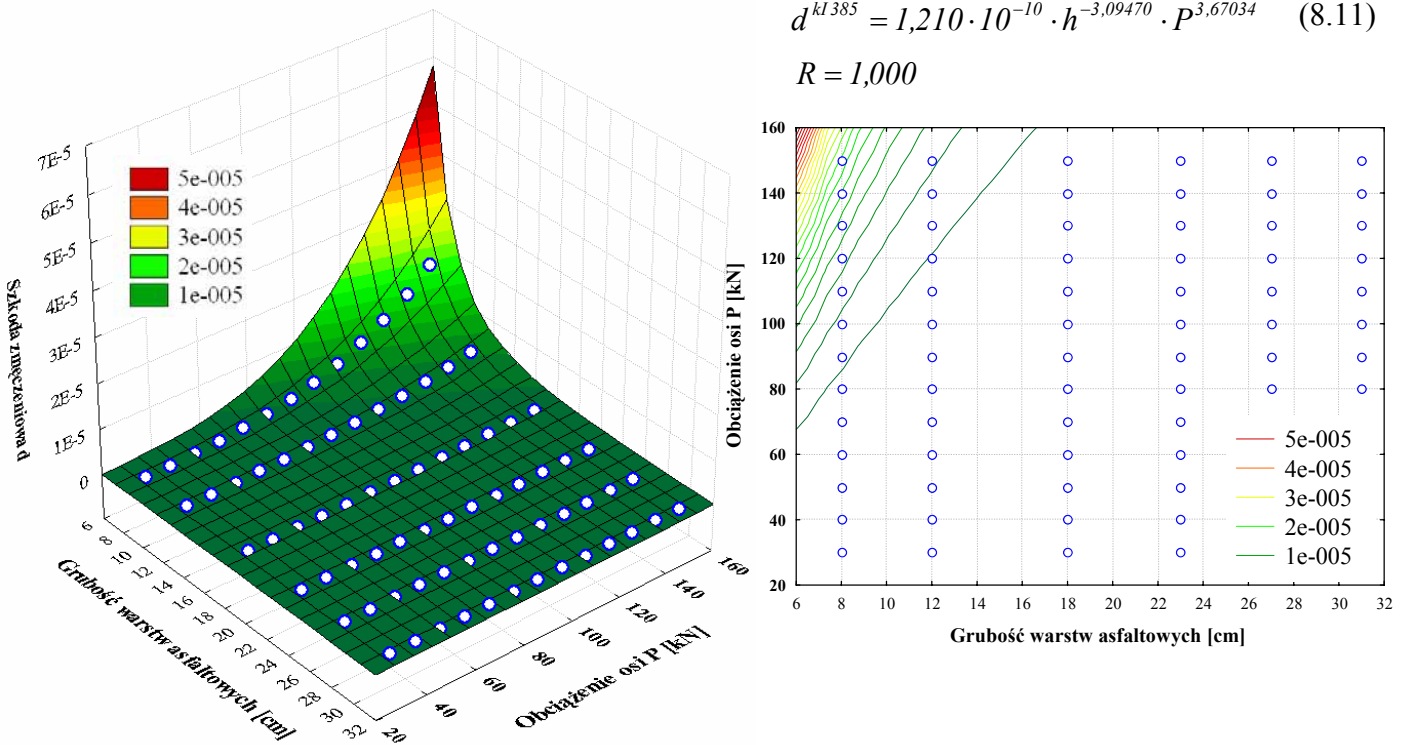
$$R = 0,999$$



Rysunek 8.11. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 305 mm (model kI305) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kl385} = 1,210 \cdot 10^{-10} \cdot h^{-3,09470} \cdot P^{3,67034} \quad (8.11)$$

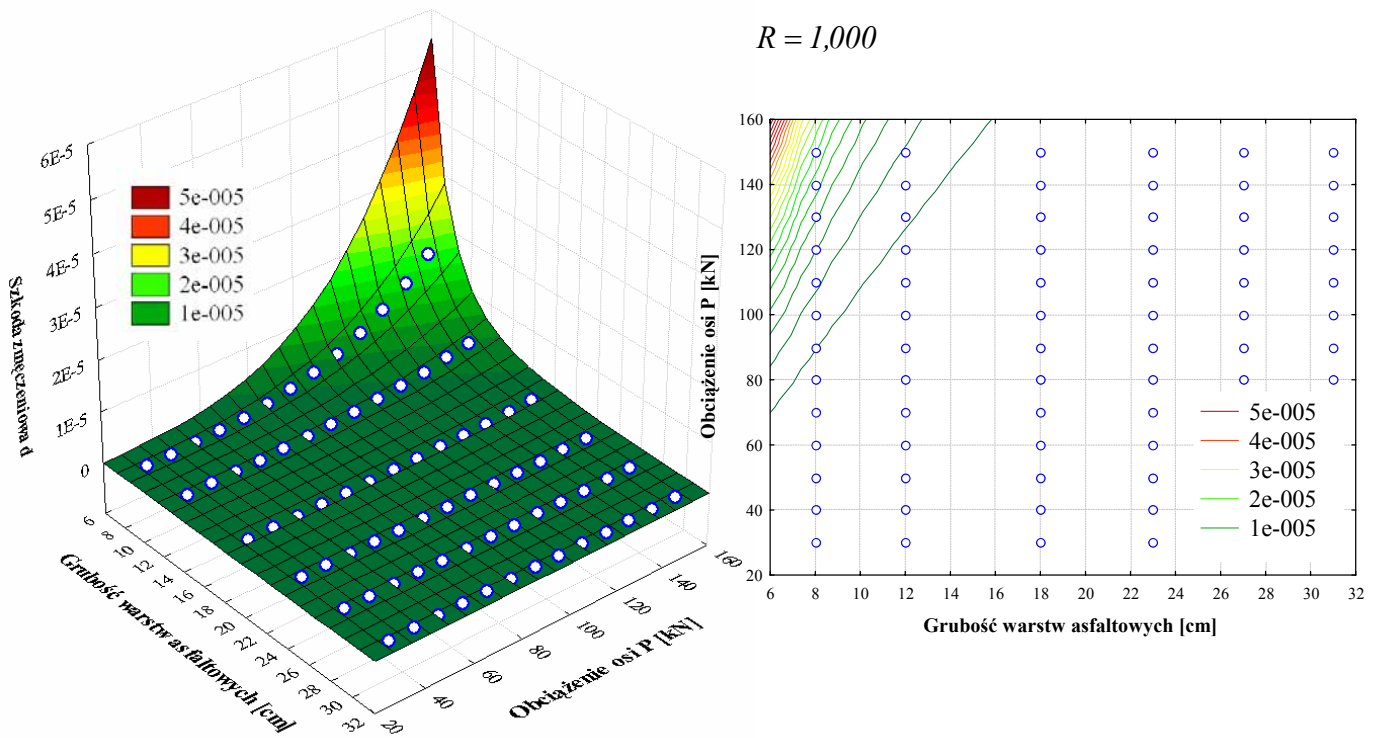
$$R = 1,000$$



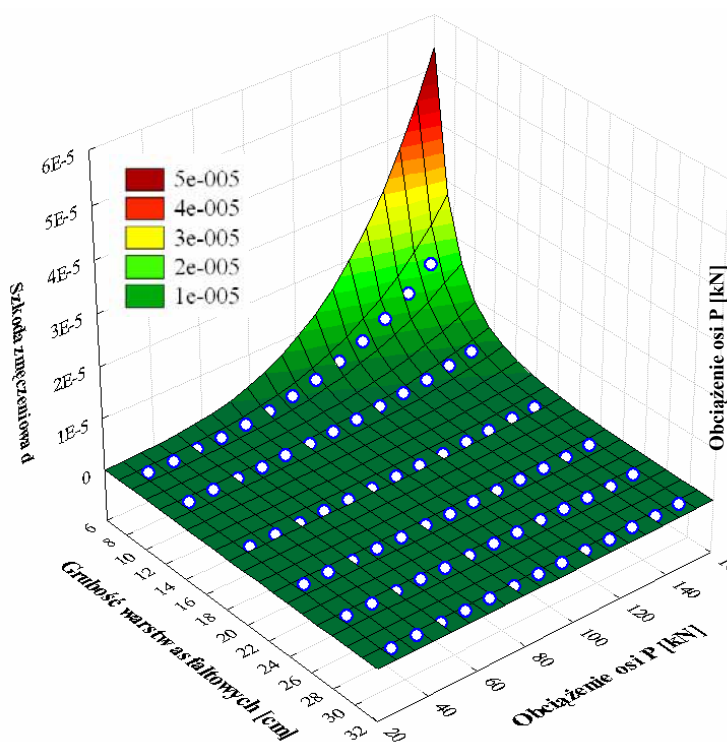
Rysunek 8.12. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 385 mm (model kI385) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kl435} = 9,409 \cdot 10^{-11} \cdot h^{-3,18820} \cdot P^{3,74109} \quad (8.12)$$

$$R = 1,000$$

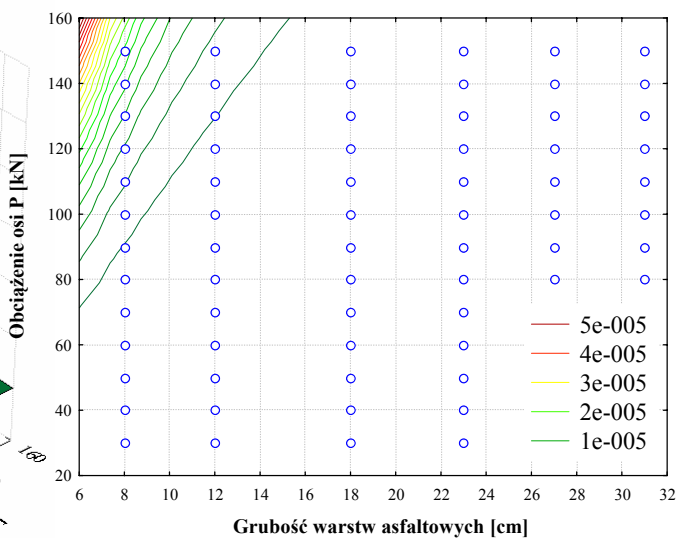


Rysunek 8.13. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 435 mm (model kI435) i grubości warstw asfaltowych.

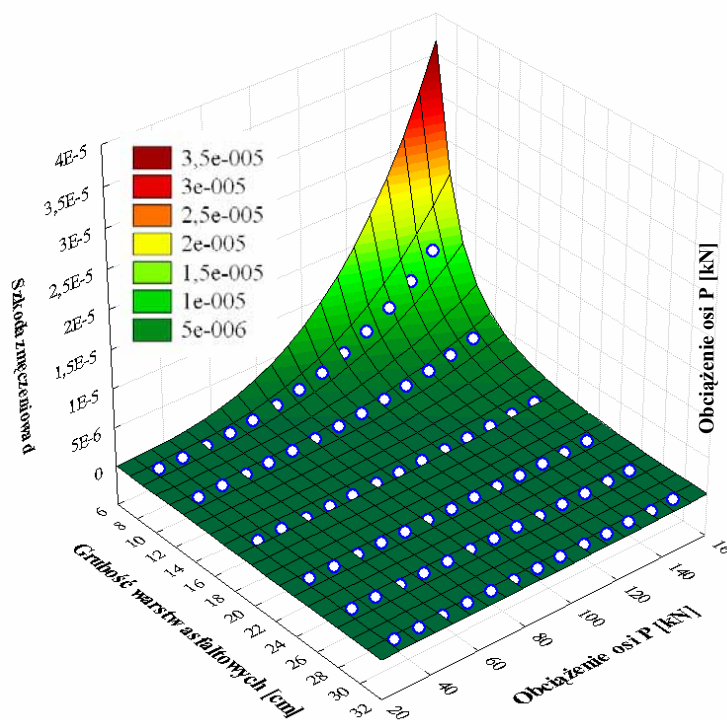


$$d^{kI435} = 8,370 \cdot 10^{-11} \cdot h^{-3,28920} \cdot P^{3,79650} \quad (8.13)$$

$$R = 1,000$$

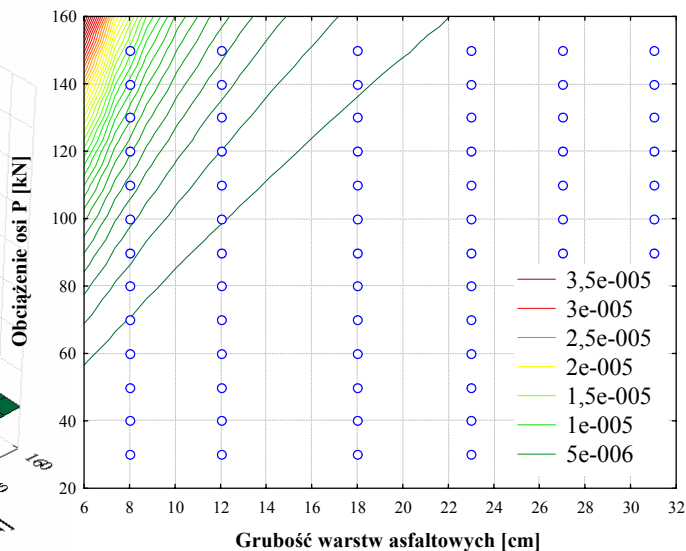


Rysunek 8.14. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 495 mm (model kI495) i grubości warstw asfaltowych.



$$d^{kII245} = 1,210 \cdot 10^{-10} \cdot h^{-2,77140} \cdot P^{3,46583} \quad (8.14)$$

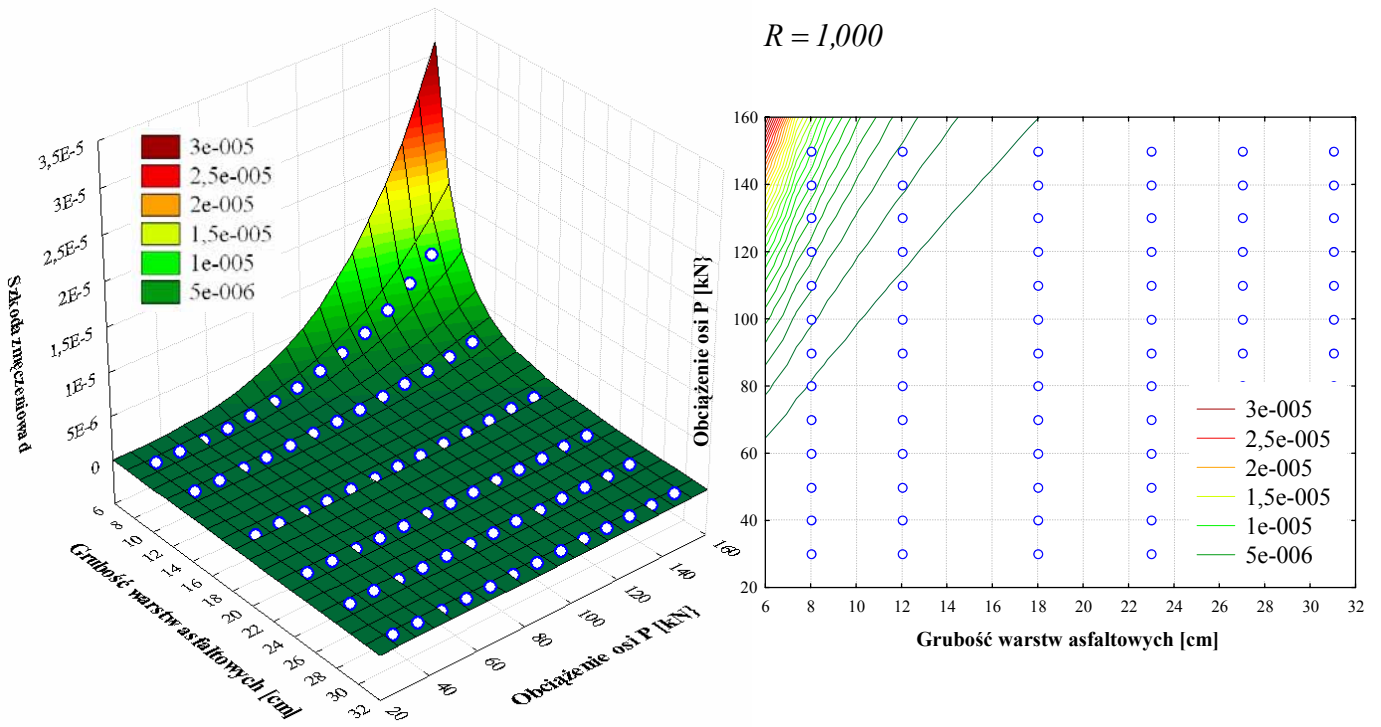
$$R = 0,999$$



Rysunek 8.15. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 245 mm (model kII245) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kII275} = 3,660 \cdot 10^{-11} \cdot h^{-3,12980} \cdot P^{3,79681} \quad (8.15)$$

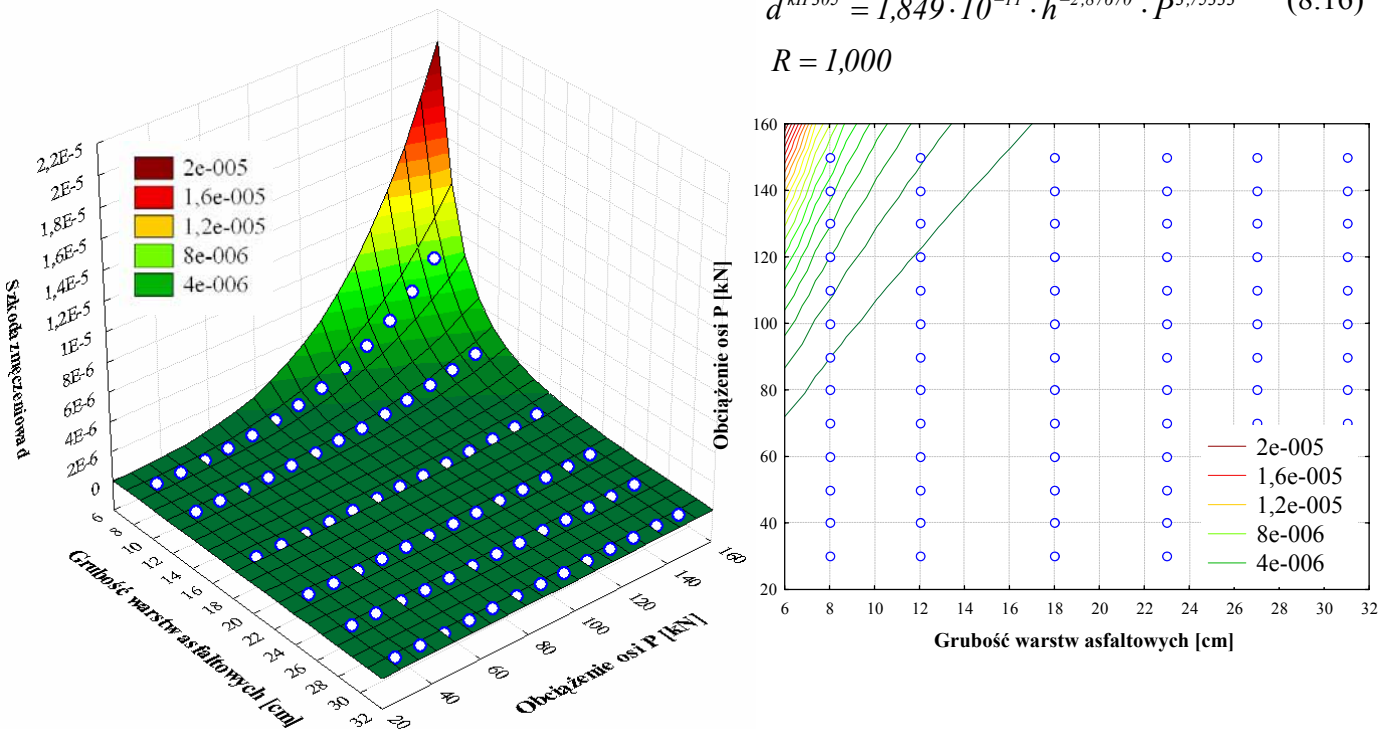
$$R = 1,000$$



Rysunek 8.16. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 275 mm (model kII275) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{kII305} = 1,849 \cdot 10^{-11} \cdot h^{-2,87670} \cdot P^{3,75333} \quad (8.16)$$

$$R = 1,000$$



Rysunek 8.17. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 305 mm (model kII305) i grubości warstw asfaltowych.

8.3.2. Współczynniki agresywności osi pojedynczych

Na rysunkach 8.18 i 8.19 przedstawiono wykresy zmian współczynników agresywności (przeliczeniowych) osi pojedynczych o kołach pojedynczych i kołach bliźniaczych wyznaczone dla nawierzchni podatnych, a na rysunkach 8.20 i 8.21 wykresy zmian współczynników agresywności wybranych osi pojedynczych wyznaczone dla nawierzchni półsztywnej (dwie fazy pracy) i sztywnej.

Współczynniki agresywności poszczególnych osi zostały wyznaczone w zależności od ich obciążenia i grubości warstw asfaltowych. Przyjęte modele obliczeniowe opisujące rzeczywiste osie pojazdów obciążano naciskiem od 30 kN do 150 kN, a następnie wyznaczano dla nich liczbę osi potrzebną do wyczerpania trwałości zmęczeniowej danej nawierzchni, a więc do jej zniszczenia (w oparciu o kryteria spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych). Tak wyznaczona liczba osi była następnie przyrównywana do liczby osi potrzebnych do zniszczenia nawierzchni w modelu osi obliczeniowej (kIr160) pod obciążeniem 100 kN, przyjętym jako obciążenie porównawcze – referencyjne (zależność 8.4). Stosunek tych wartości daje współczynnik agresywności osi (przeliczeniowy danej osi na oś obliczeniową).

Podobnie jak w przypadku zależności opisujących wartości szkód zmęczeniowych, przy danej grubości nawierzchni, wartości współczynników agresywności mają charakter potęgowy:

$$r = b \cdot P^\alpha \quad (8.17)$$

gdzie: r – współczynnik agresywności (przeliczeniowy na oś obliczeniową) danej osi rzeczywistej (kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275 i kII305), wyznaczony w odniesieniu do osi porównawczej – obliczeniowej (kIr160),

P – obciążenie osi pojedynczej [kN],

b – współczynnik wyznaczony doświadczalnie,

α – wykładnik potęgowy zależny od parametrów wytrzymałościowych przyjętych do opisu warstw konstrukcji nawierzchni (moduł sprężystości, współczynnik Poissona).

Na rysunku 8.18.a. przedstawiono zmiany współczynnika agresywności osi porównawczej – obliczeniowej. Z uwagi na to, iż jest to oś stanowiąca punkt odniesienia, przebieg jej nie zależy od grubości warstw asfaltowych, a jedynie od wartości obciążenia przypadającego na nią (P). Przy obciążeniu 100 kN, które to obciążenie zostało przyjęte za obciążenie obliczeniowe, wartość współczynnika agresywności tej osi wynosi 1.00. Pozostałym krzywym przedstawionym na 8.18 ÷ 8.21, odpowiadają równania zamieszczone w tabelach 8.6 ÷ 8.9.

Z uwagi na różnice w wartościach współczynników agresywności wywołane zmianami grubości warstw nawierzchni, wartości współczynników agresywności można w przypadku nawierzchni podatnych zapisać również w postaci zależności:

$$r = c_2 \cdot h^{\delta_2} \cdot P^{\gamma_2} \quad (8.18)$$

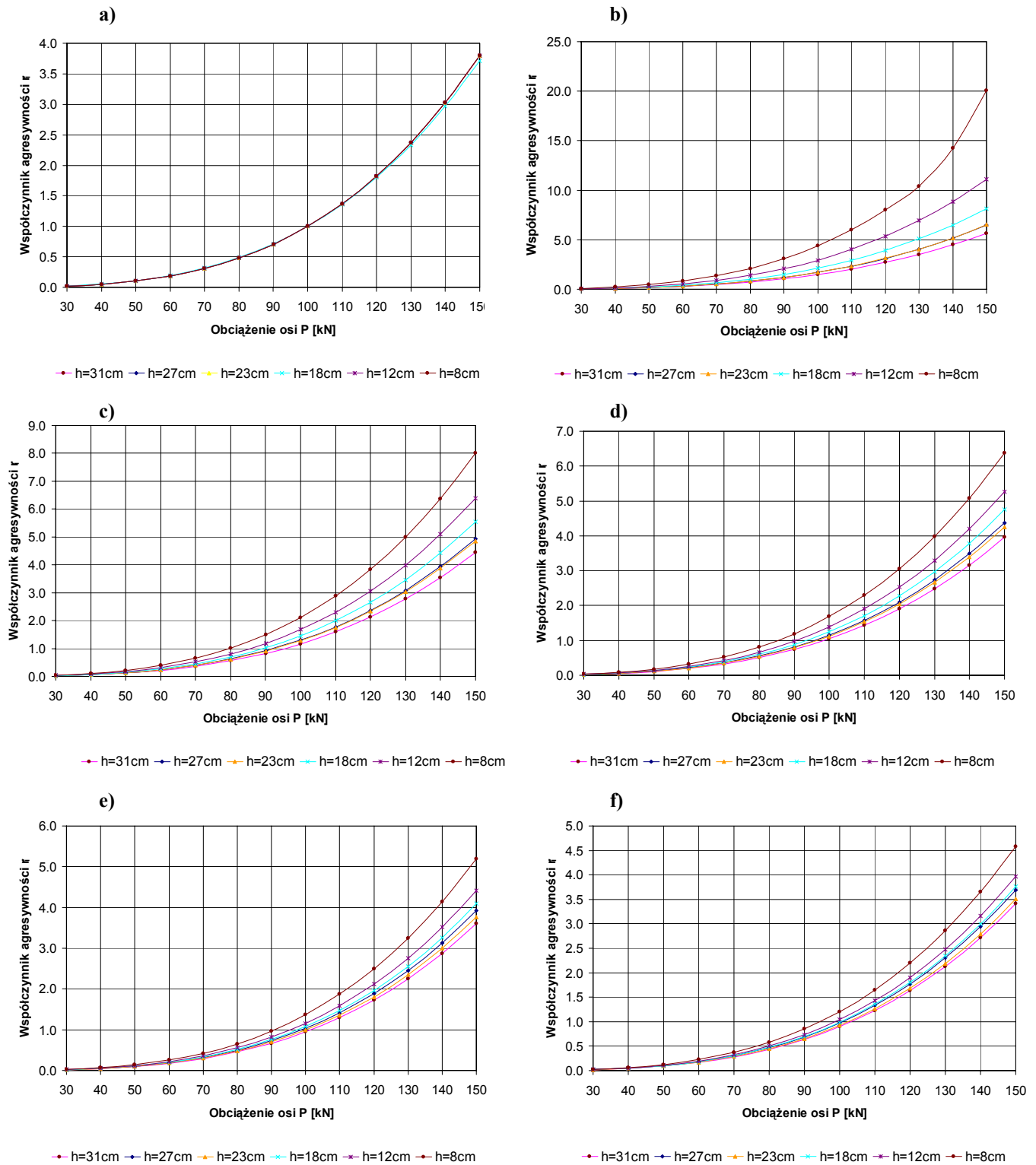
gdzie: r – współczynnik agresywności (przeliczeniowy na oś obliczeniową) danej osi rzeczywistej (kI245, kI305, kI385, kI435, kI495, kII245, kII275 i kII305), wyznaczony w odniesieniu do osi porównawczej – obliczeniowej (kIr160),

P – obciążenie osi pojedynczej [kN],

h – grubość warstw asfaltowych [cm],

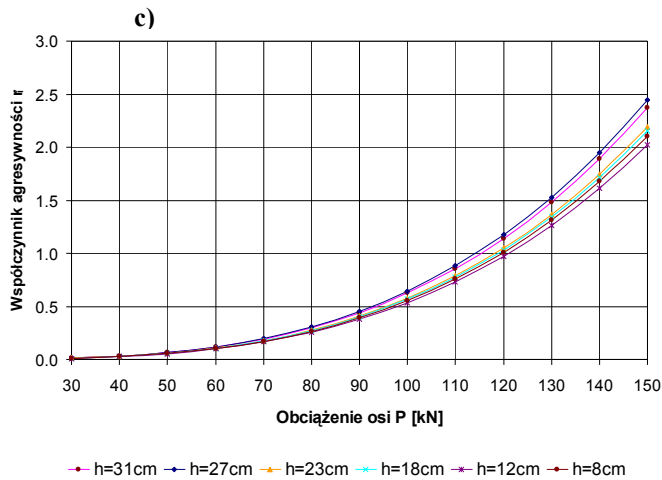
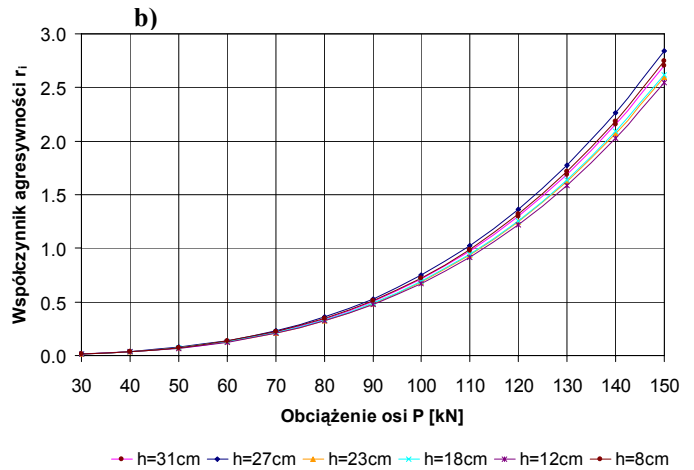
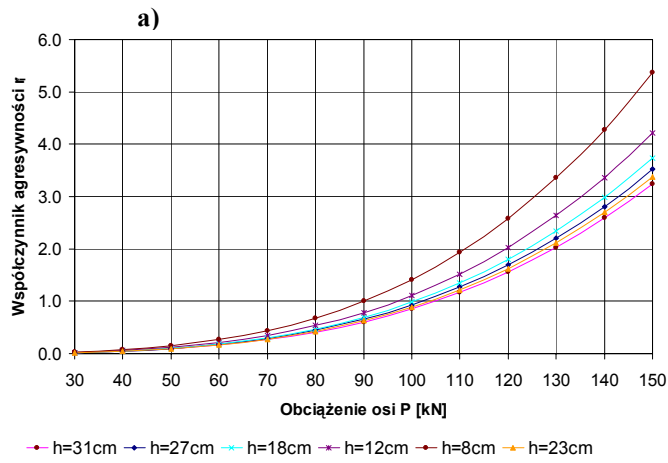
c_2, δ_2, γ_2 – współczynniki wyznaczone doświadczalnie, zależne od sposobu obciążenia nawierzchni.

Zależność wartości współczynników agresywności od obciążenia osi P oraz grubości nawierzchni (w przypadku nawierzchni podatnych od grubości warstw asfaltowych), obrazują rysunki 8.26 ÷ 8.34 oraz odpowiadające im zależności (8.18 ÷ 8.26).



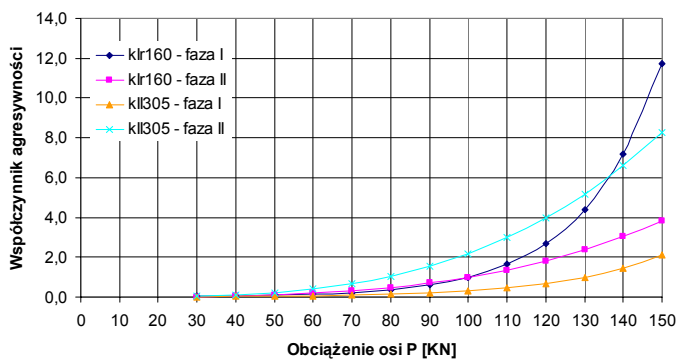
Rys. 8.18. Zmiana współczynnika agresywności osi pojedynczych o kołach pojedynczych i bliźniaczych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi P i grubości warstw asfaltowych:

- a) w modelu Ir160 – oś obliczeniowa,
- b) w modelu kI245,
- c) w modelu kI305,
- d) w modelu kI385,
- e) w modelu kI435,
- f) w modelu kI495.

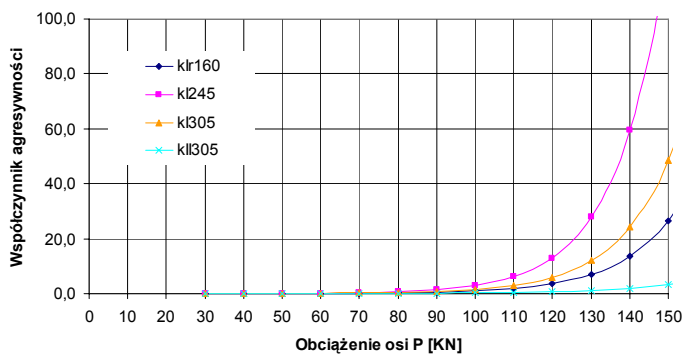


Rys. 8.19. Zmiana współczynnika agresywności osi pojedynczych o kołach bliźniaczych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi P i grubości warstw asfaltowych:

- a) w modelu kII245,
- b) w modelu kII275,
- c) w modelu kII305.



Rys. 8.20. Zmiana współczynnika agresywności osi pojedynczych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi P oraz fazy pracy (faza I – podbudowa z chudego betonu nie spękana, faza II – podbudowa z chudego betonu spękana), dla nawierzchni półsztywnych.



Rys. 8.21. Zmiana współczynnika agresywności osi pojedynczych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi P, dla nawierzchni sztywnej.

Tab. 8.6. Współczynnik agresywności osi obliczeniowej dla nawierzchni podatnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji nawierzchni (P – obciążenie osi).

Model	Grubość warstw asfaltowych	Współczynnik agresywności osi
kIr160	h = 8 cm	$r = (2,60722 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29190}$
	h = 12 cm	
	h = 18 cm	
	h = 23 cm	
	h = 27 cm	
	h = 31 cm	

Tab. 8.7. Współczynniki agresywności osi pojedynczych, dla nawierzchni podatnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

Model	Grubość warstw asfaltowych	Współczynnik agresywności osi	Model	Grubość warstw asfaltowych	Współczynnik agresywności osi
kI245	h = 8 cm	$r = (9,38487 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,34145}$	kI495	h = 8 cm	$r = (3,15711 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29123}$
	h = 12 cm	$r = (7,68960 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29057}$		h = 12 cm	$r = (2,74609 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29012}$
	h = 18 cm	$r = (5,57918 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29203}$		h = 18 cm	$r = (2,61961 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,28882}$
	h = 23 cm	$r = (4,43852 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29322}$		h = 23 cm	$r = (2,42043 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29070}$
	h = 27 cm	$r = (4,45243 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29068}$		h = 27 cm	$r = (2,54956 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29063}$
	h = 31 cm	$r = (5,02959 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,23762}$		h = 31 cm	$r = (2,34394 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29147}$
kI305	h = 8 cm	$r = (5,52567 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29061}$	kII245	h = 8 cm	$r = (3,70823 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29078}$
	h = 12 cm	$r = (4,43169 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,28973}$		h = 12 cm	$r = (2,92182 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29014}$
	h = 18 cm	$r = (3,84013 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29003}$		h = 18 cm	$r = (2,54408 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29362}$
	h = 23 cm	$r = (3,34798 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$		h = 23 cm	$r = (2,32740 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29130}$
	h = 27 cm	$r = (3,40693 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29066}$		h = 27 cm	$r = (2,42951 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (3,06851 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29057}$		h = 31 cm	$r = (2,23874 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
kI385	h = 8 cm	$r = (4,37944 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29185}$	kII275	h = 8 cm	$r = (1,87811 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29264}$
	h = 12 cm	$r = (3,63656 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29073}$		h = 12 cm	$r = (1,75261 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29134}$
	h = 18 cm	$r = (3,25606 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29222}$		h = 18 cm	$r = (1,82182 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,28930}$
	h = 23 cm	$r = (2,93868 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29072}$		h = 23 cm	$r = (1,78935 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (3,01527 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$		h = 27 cm	$r = (1,95881 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (2,73806 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29055}$		h = 31 cm	$r = (1,87026 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29050}$
kI435	h = 8 cm	$r = (3,52915 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29370}$	kII305	h = 8 cm	$r = (1,43918 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29278}$
	h = 12 cm	$r = (2,99857 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29384}$		h = 12 cm	$r = (1,40371 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,28938}$
	h = 18 cm	$r = (2,84606 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,28952}$		h = 18 cm	$r = (1,48086 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29126}$
	h = 23 cm	$r = (2,59308 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29129}$		h = 23 cm	$r = (1,50756 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29134}$
	h = 27 cm	$r = (2,70945 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$		h = 27 cm	$r = (1,68328 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29142}$
	h = 31 cm	$r = (2,47234 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29192}$		h = 31 cm	$r = (1,63479 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$

Tab. 8.8 Współczynniki agresywności osi pojedynczych, dla nawierzchni półsztywnej, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

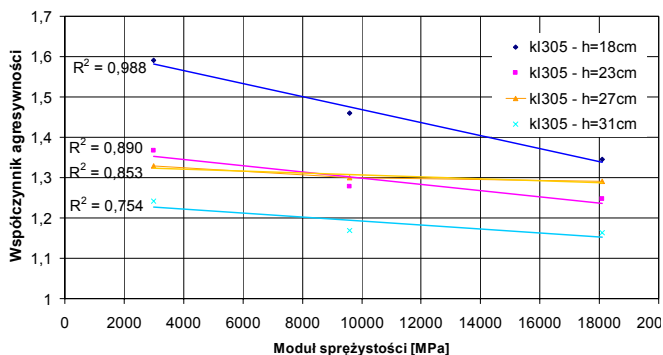
Model	Agresywność osi
kIr160 – faza I	$r = (4,77359 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,72328}$
kIr160 – faza II	$r = (2,61818 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
kII305 – faza I	$r = (7,56772 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{2,86108}$
kII305 – faza II	$r = (5,69732 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29134}$

Tab. 8.9. Agresywności osi pojedynczych, dla nawierzchni sztywnej, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

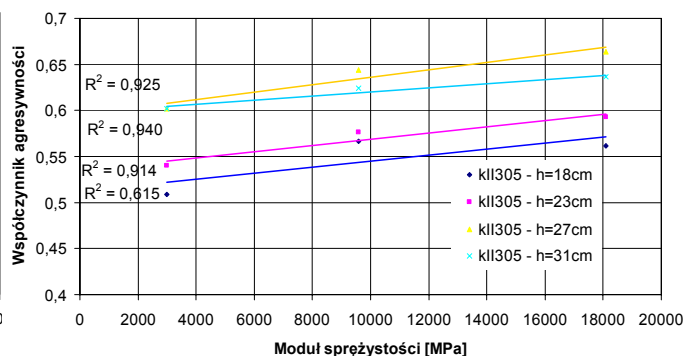
Model	Agresywność osi
kIr160	$r = (7,69430 \cdot 10^{-11}) \cdot P^{5,16682}$
kI245	$r = (5,23741 \cdot 10^{-12}) \cdot P^{5,99586}$
kI305	$r = (2,71777 \cdot 10^{-11}) \cdot P^{5,48788}$
kII305	$r = (2,92294 \cdot 10^{-09}) \cdot P^{4,04468}$

Wyniki analizy wykazały, że współczynnik potęgowy w równaniu 8.17, w przypadku nawierzchni podatnych wynosi $\approx 3,3$, a w przypadku nawierzchni sztywnych jego wartość dochodzi do 6,0. Jest to istotna różnica w stosunku do wykładnika potęgowe- go przyjmowanego obecnie w Polsce w wymiarowaniu nawierzchni [93, 94, 95], którego wartość przyjmowana jest na poziomie 4 (nawierzchnie podatne i półsztywne) lub 8 (na- wierzchnie sztywne). Można się zatem pokusić o stwierdzenie, że zmiana tylko wykładni- ka potęgowego, doprowadziłaby do zmiany współczynników przeliczeniowych (agresyw- ności) wykorzystywanych w polskim drogownictwie. Dla przykładu, dla osi o obciążeniu 65 kN, wartość współczynnika agresywności przy wykładniku potęgowym równym 4 wy- nosi $r = (65/100)^4 = 0,179$, a przy wykładniku potęgowym równym 3,3 wynosi $r = (65/100)^{3,3} = 0,241$.

Zmiany współczynników agresywności wywołanych w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej kI305



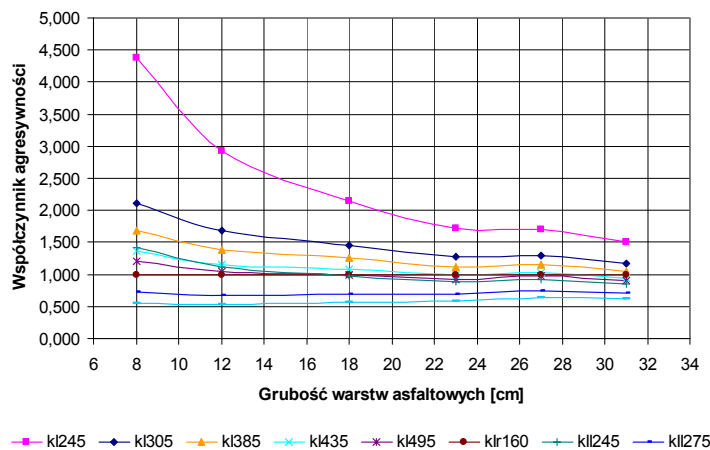
Zmiany współczynników agresywności wywołanych w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej kII305



Rys. 8.22. Zmiany współczynników agresywności osi pojedynczej o kołach pojedynczych (kI305) i bliźniaczych (kII305) wywołane zmianą modułu sprężystości warstw asfaltowych, przy obciążeniu osi 100 kN.

Warto zwrócić także uwagę na zmiany zachodzące we współczynniku agresywności, wynikające z eksploatacji nawierzchni w różnych okresach roku, w których ulegają zmianie parametry charakteryzujące nawierzchnię drogową (moduł sprężystości E , współczynnik Poissona). Na rysunku 8.22 przedstawiono zmiany wartości współczynników agresywności dla konstrukcji nawierzchni o różnych grubościach warstw asfaltowych (od 18 cm do 31 cm), pod obciążeniem osią pojedynczą 100 kN o kołach pojedynczych (kI305) i bliźniaczych (kII305), w zależności od wartości modułów sprężystości warstw asfaltowych. W przypadku osi pojedynczej i ogumienia pojedynczego (kI305), wzrost modułu sprężystości przyczynia się do zmniejszenia jej agresywności, natomiast w przypadku osi pojedynczej o ogumieniu bliźniaczym, wzrost modułu wywołuje zwiększenie współczynnika agresywności takiej osi.

Rysunek 8.23 obrazuje natomiast zmiany współczynników agresywności osi pojedynczych, w zależności od grubości warstw asfaltowych i konfiguracji osi pojedynczej. Największą agresywnością charakteryzuje się oś o oponach o szerokości 245 mm, a najmniejszą oś o kołach bliźniaczych i szerokości ogumienia 305 mm. Przyczyną są oczywiście różnice w wielkości powierzchni styku opon z nawierzchnią. Warto jednak zwrócić uwagę na to, że agresywność opon typu „Super Single Drive” o szerokości 495 mm, wprowadzanych obecnie w zastępstwie opon bliźniaczych o szerokościach 305 mm stosowanych na oś napędową, jest porównywalna jedynie z agresywnością ogumienia bliźniaczego o szerokości 245 mm, a większa o około 30 % niż opon bliźniaczych o szerokości 305 mm.

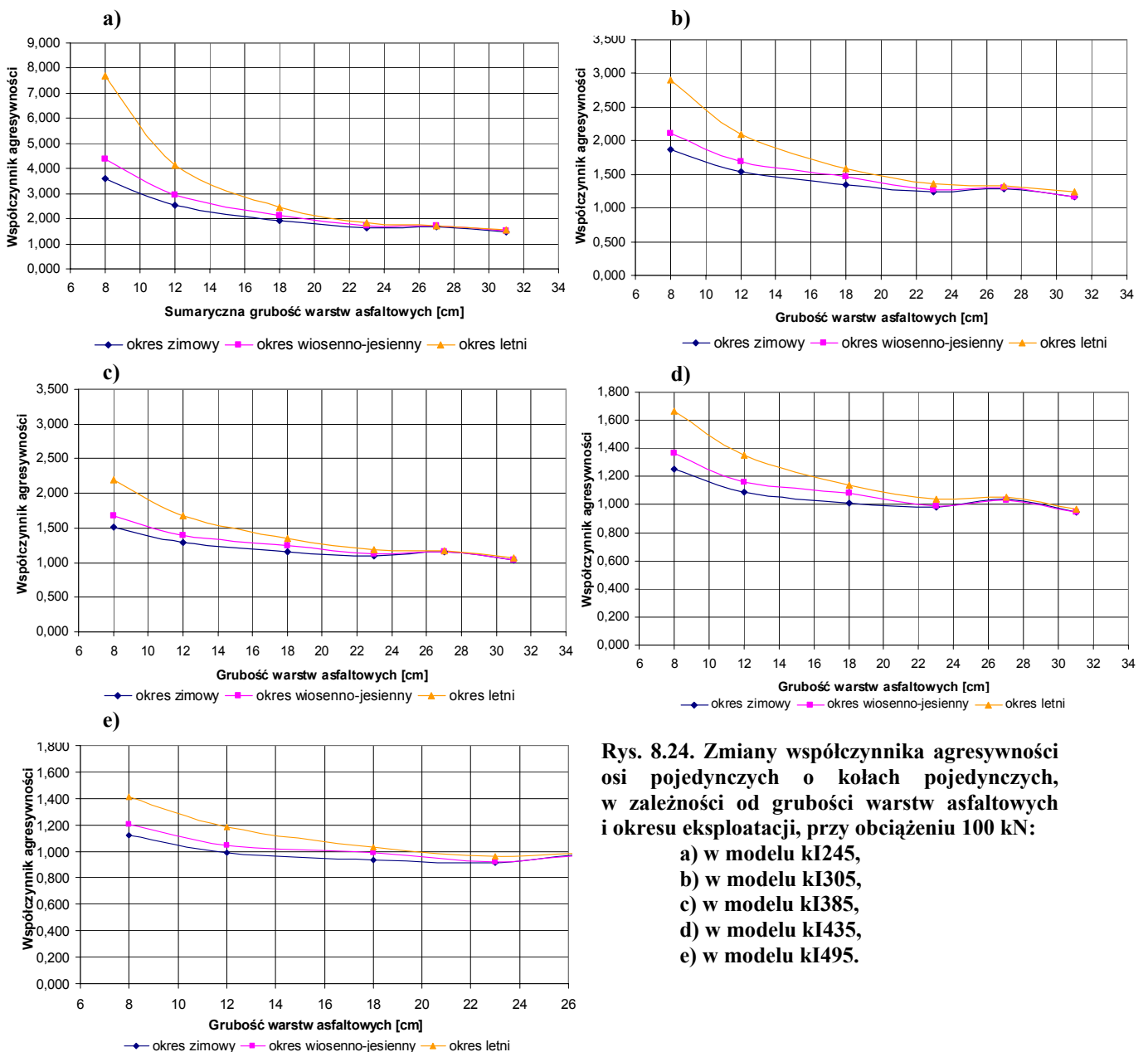


Rys. 8.23. Zmiany współczynnika agresywności osi pojedynczych w zależności od grubości warstw asfaltowych, w średniorocznym okresie eksploatacji, przy obciążeniu osi 100 kN.

Na kolejnych rysunkach (8.24 i 8.25) przedstawiono natomiast zmiany współczynników agresywności osi pojedynczych, w zależności od grubości warstw asfaltowych i okresu ich eksploatacji, przy stałym obciążeniu osi 100 kN. W nawierzchniach o grubo-

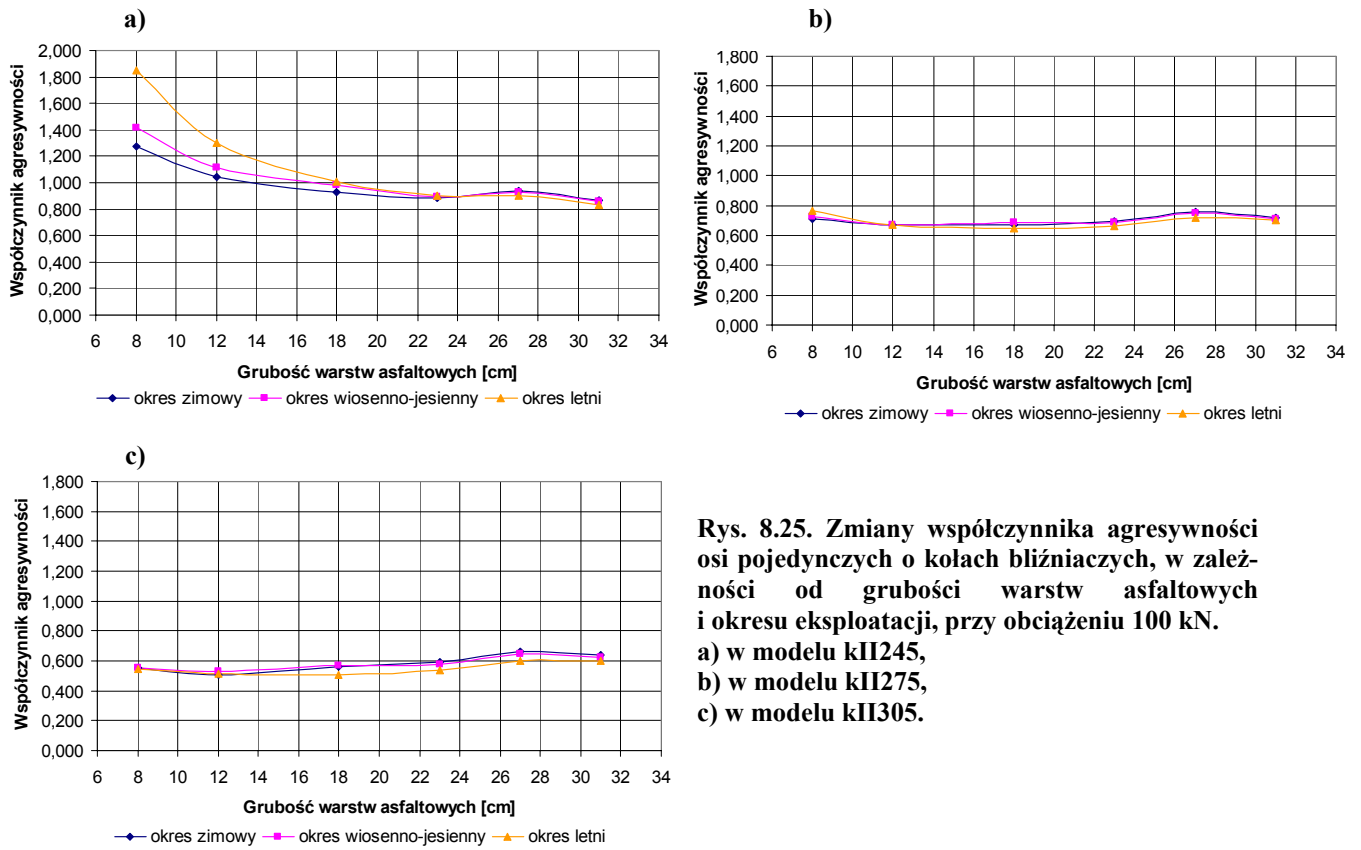
ściach warstw asfaltowych od 8 cm do około 20 cm widoczne są duże różnice w wartościach współczynników agresywności wynikające z różnych okresów eksploatacji. Największe agresywności osi występują w okresie letnim, a najmniejsze w okresie zimowym, a więc w okresie występowania największych modułów sprężystości warstw asfaltowych.

Na rysunkach 8.26 ÷ 8.34, przedstawiono zależności pomiędzy współczynnikami agresywności osi pojedynczych wyznaczonymi dla nawierzchni podatnych, a wielkościami obciążenia osi oraz grubością warstw asfaltowych. Praktycznie tylko w przypadku osi porównawczej – obliczeniowej (rys. 8.26) nie występuje zależność wartości współczynnika agresywności od grubości nawierzchni. Sytuacja taka jednak ma miejsce tylko w przypadku osi obliczeniowej.



Rys. 8.24. Zmiany współczynnika agresywności osi pojedynczych o kołach pojedynczych, w zależności od grubości warstw asfaltowych i okresu eksploatacji, przy obciążeniu 100 kN:

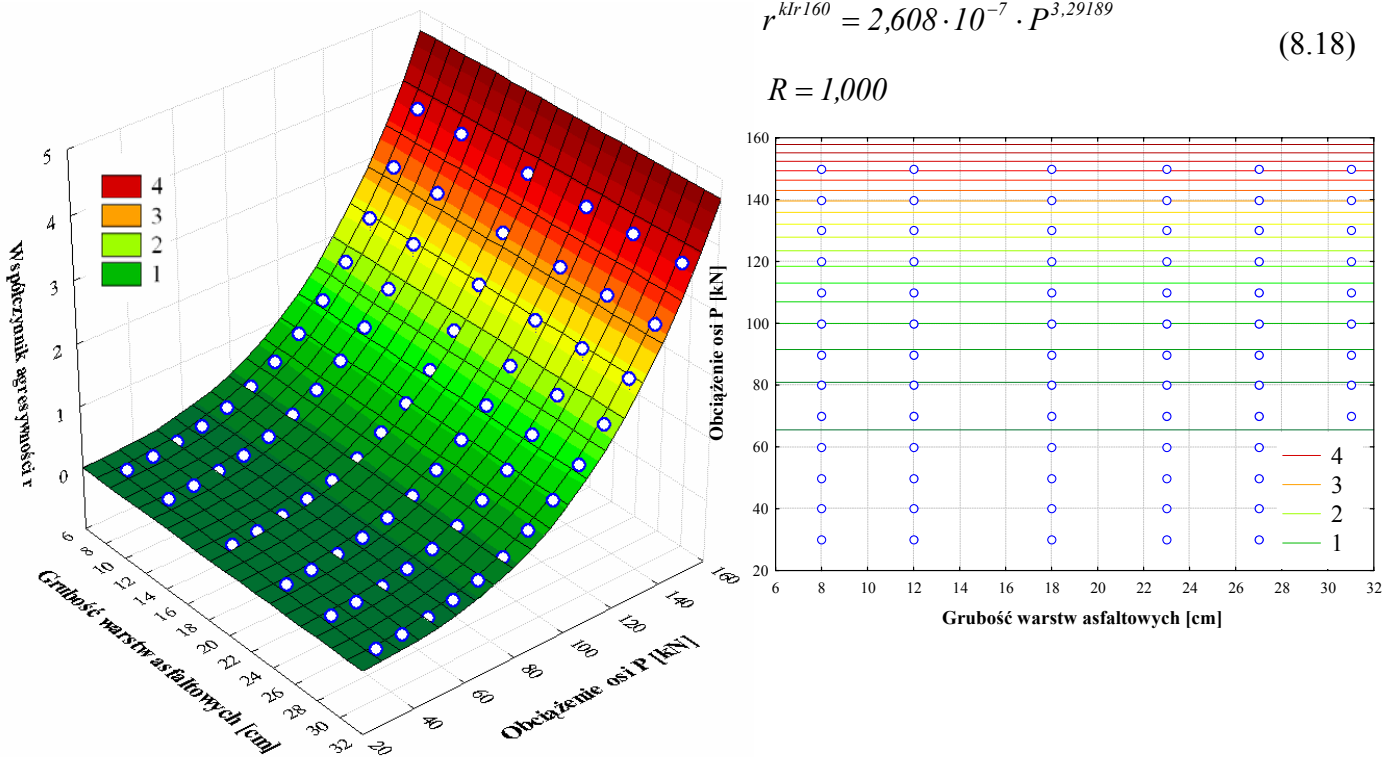
- a) w modelu k1245,
- b) w modelu k1305,
- c) w modelu k1385,
- d) w modelu k1435,
- e) w modelu k1495.



Rys. 8.25. Zmiany współczynnika agresywności osi pojedynczych o kołach bliźniaczych, w zależności od grubości warstw asfaltowych i okresu eksploatacji, przy obciążeniu 100 kN.
 a) w modelu kII245,
 b) w modelu kII275,
 c) w modelu kII305.

$$r^{klr160} = 2,608 \cdot 10^{-7} \cdot P^{3,29189} \quad (8.18)$$

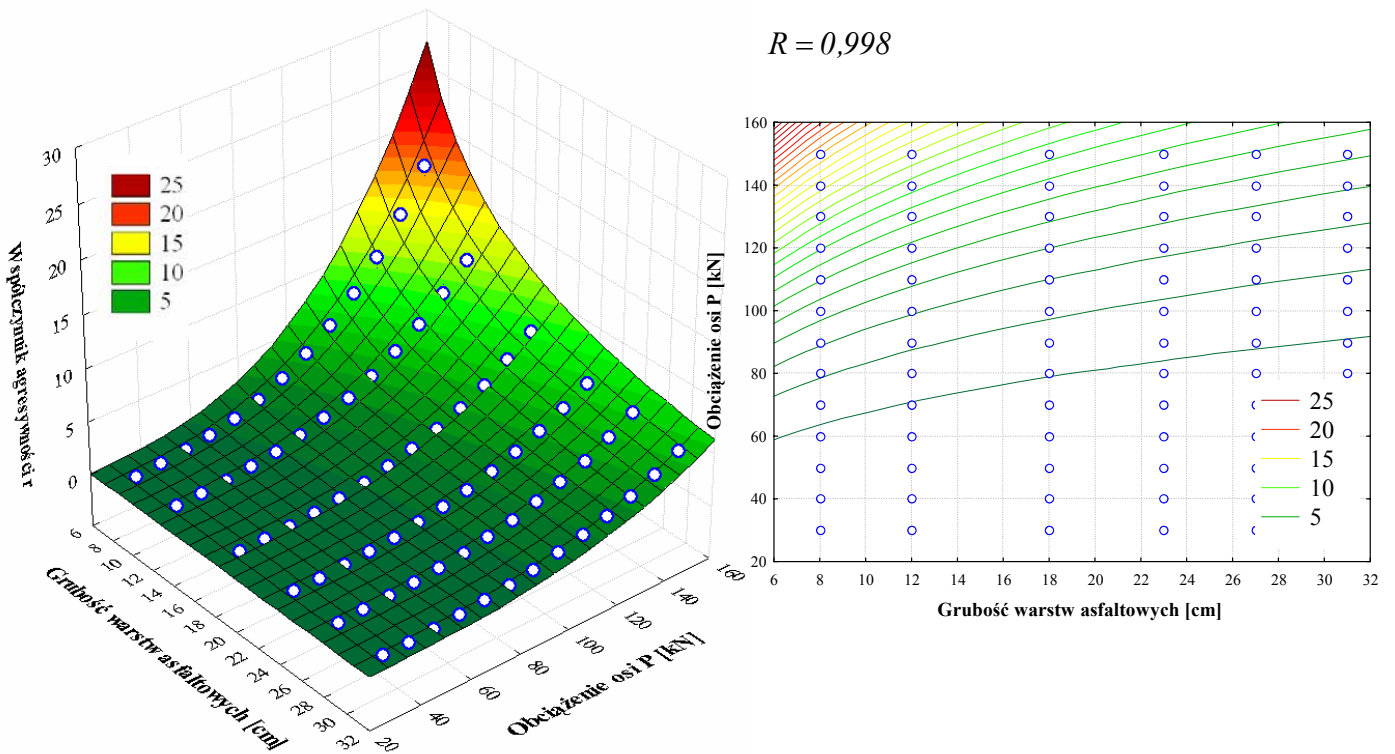
$$R = 1,000$$



Rysunek 8.26. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi obliczeniowej (model klr160) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl245} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P^{3,31308} \quad (8.19)$$

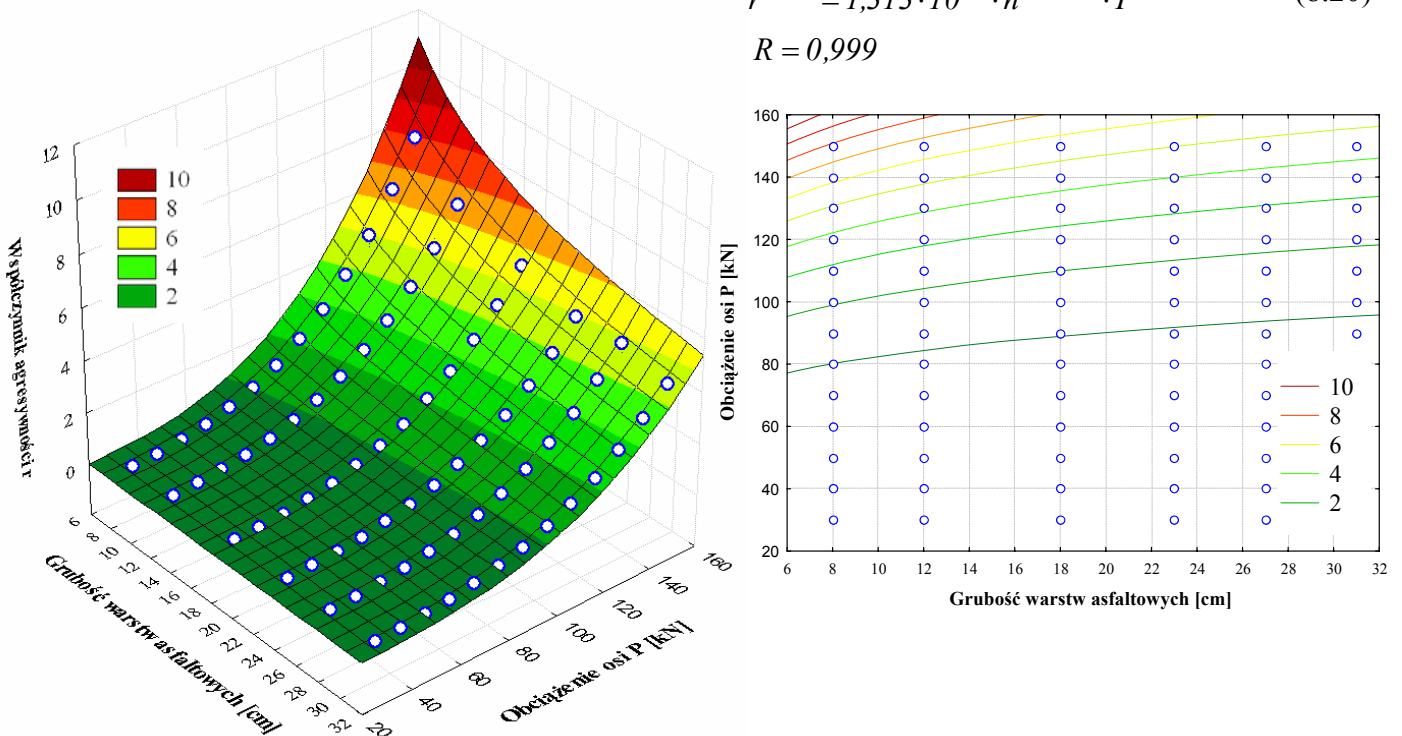
$$R = 0,998$$



Rysunek 8.27. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 245 mm (model kl245) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl305} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P^{3,29038} \quad (8.20)$$

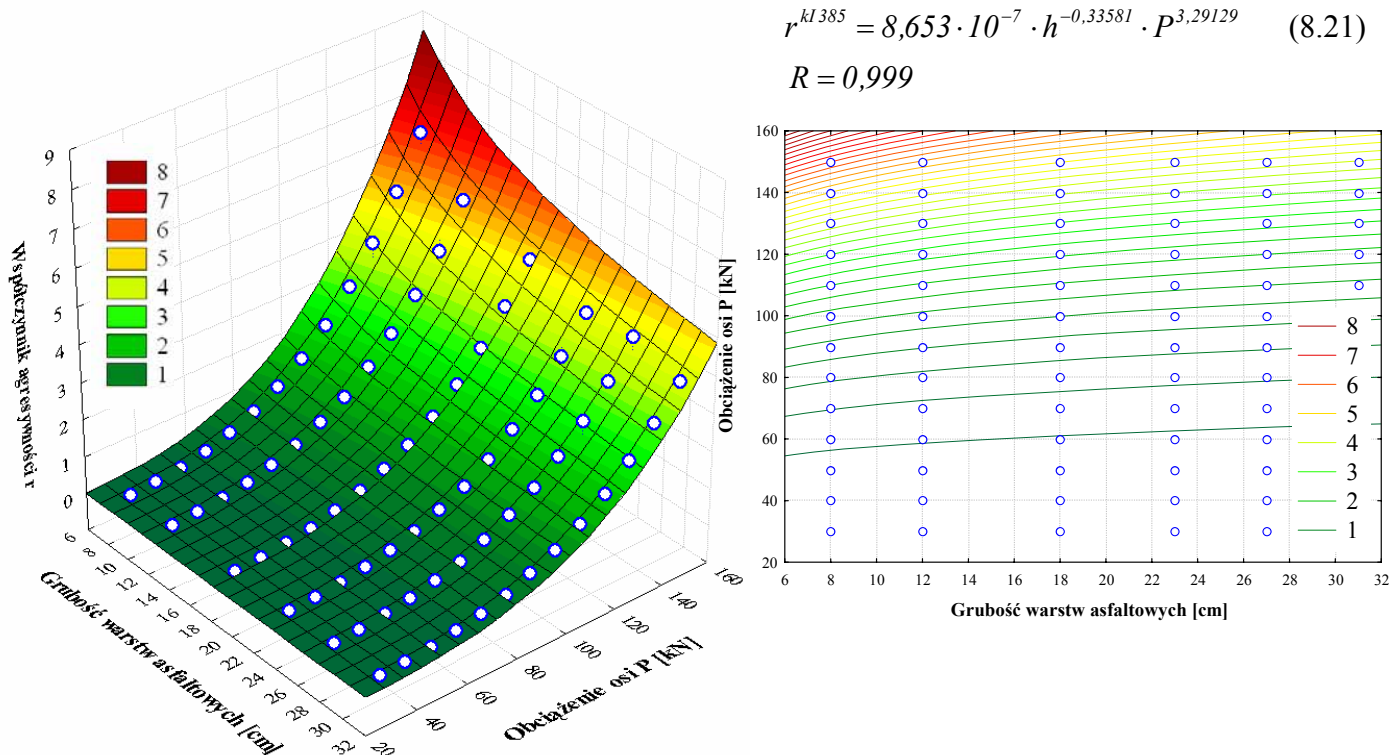
$$R = 0,999$$



Rysunek 8.28. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 305 mm (model kl305) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl385} = 8,653 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,33581} \cdot P^{3,29129} \quad (8.21)$$

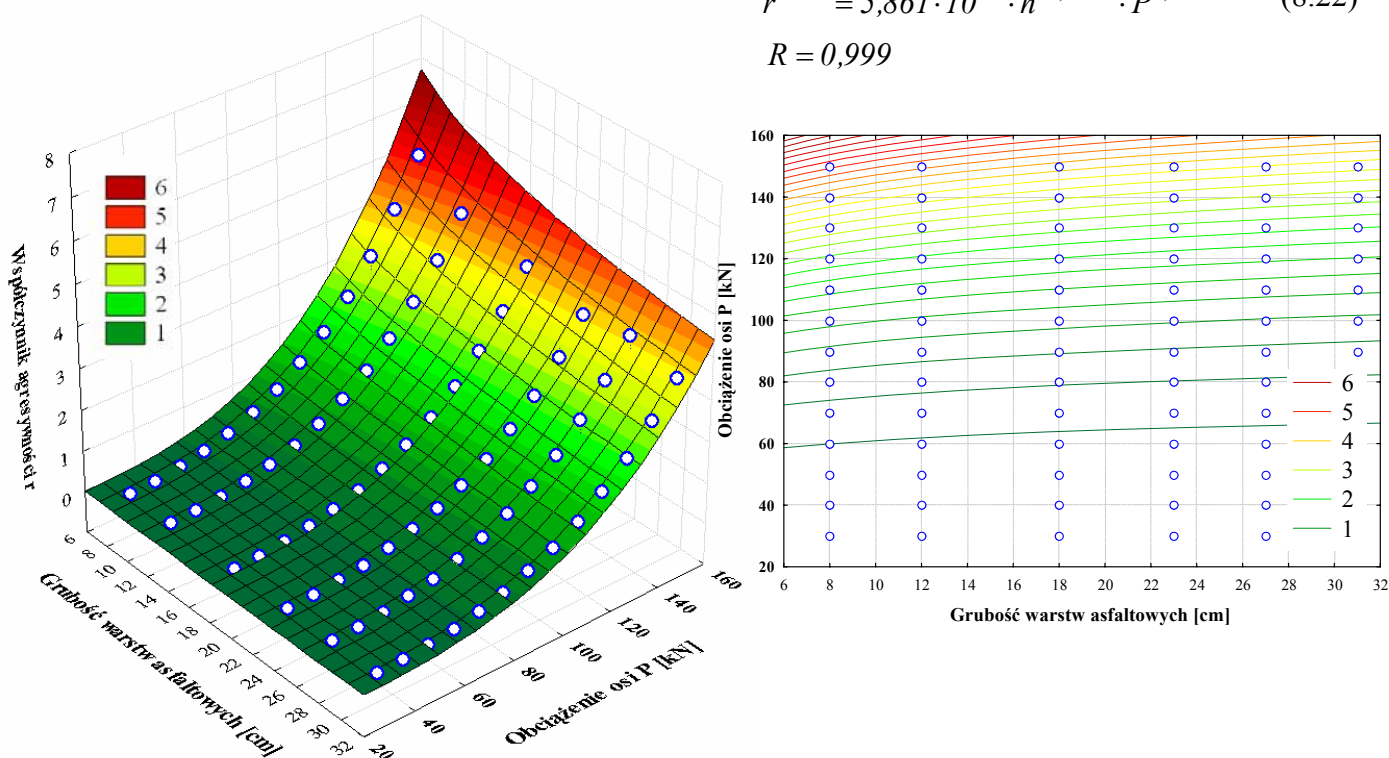
$$R = 0,999$$



Rysunek 8.29. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 385 mm (model kl385) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl435} = 5,861 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,25171} \cdot P^{3,29212} \quad (8.22)$$

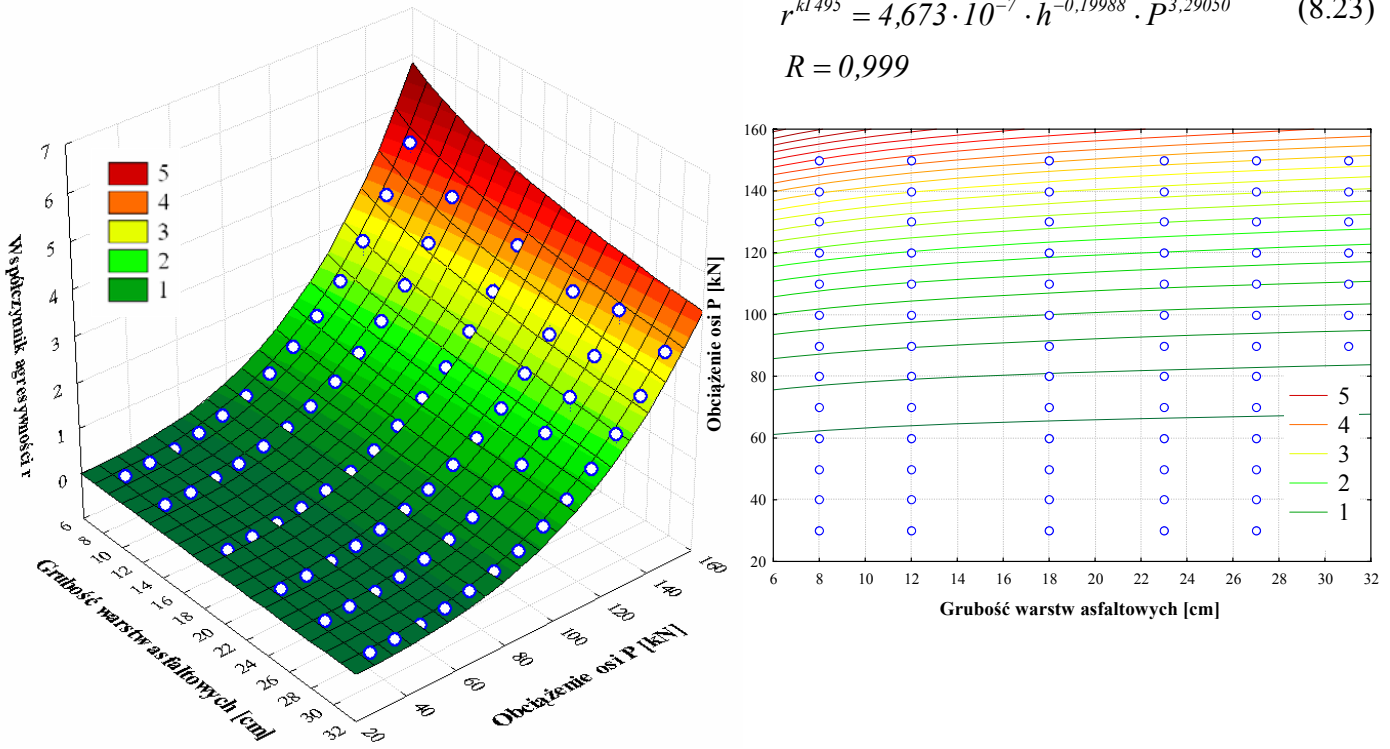
$$R = 0,999$$



Rysunek 8.30. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 435 mm (model kl435) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl495} = 4,673 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,19988} \cdot P^{3,29050} \quad (8.23)$$

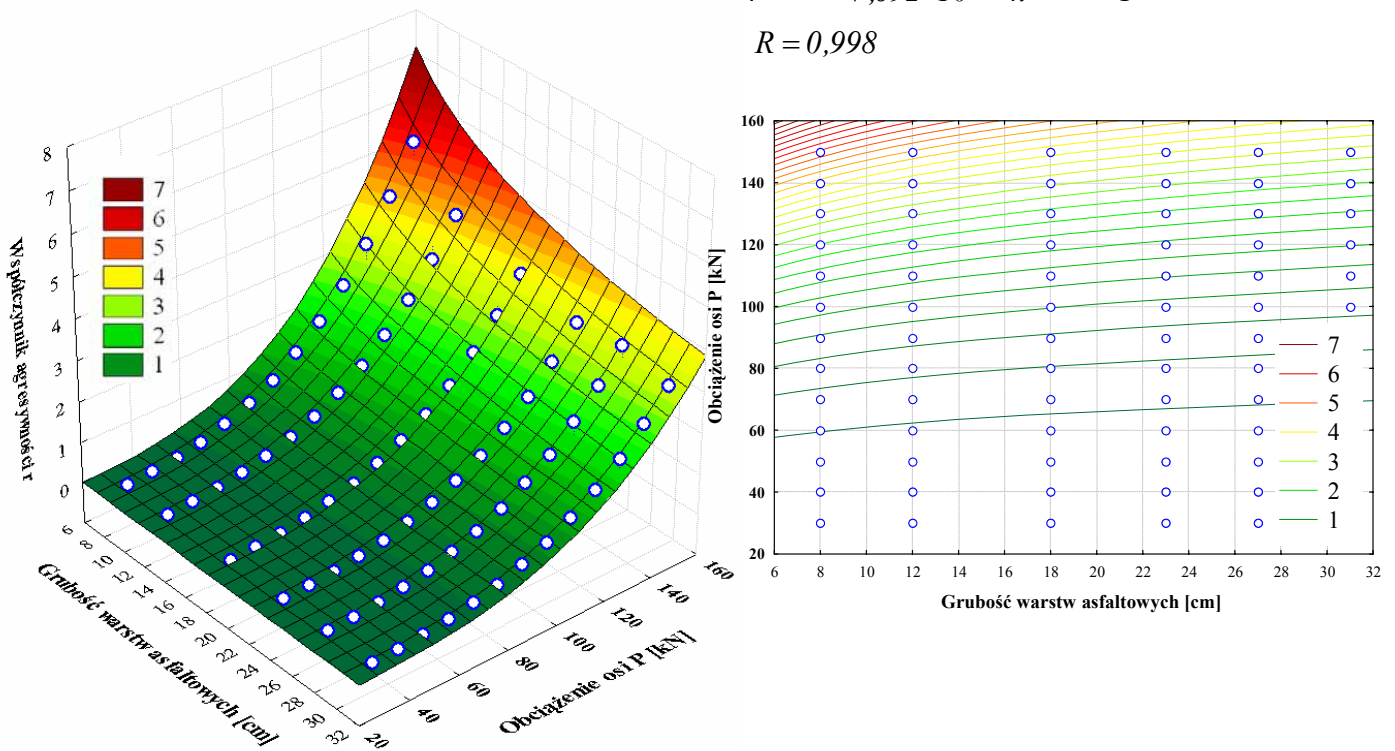
$$R = 0,999$$



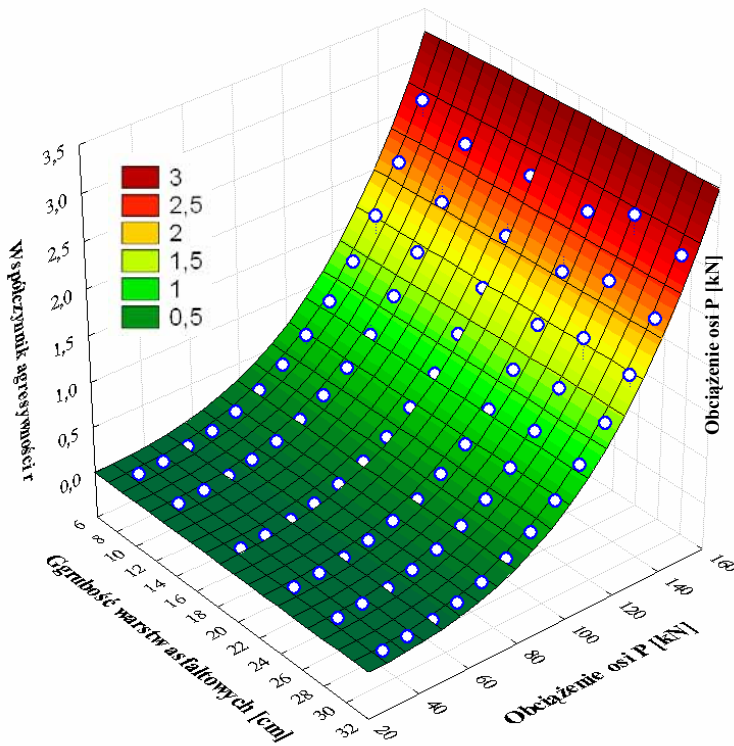
Rysunek 8.31. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach pojedynczych i szerokości opon 495 mm (model KI495) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{kl245} = 7,692 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,36861} \cdot P^{3,29120} \quad (8.24)$$

$$R = 0,998$$

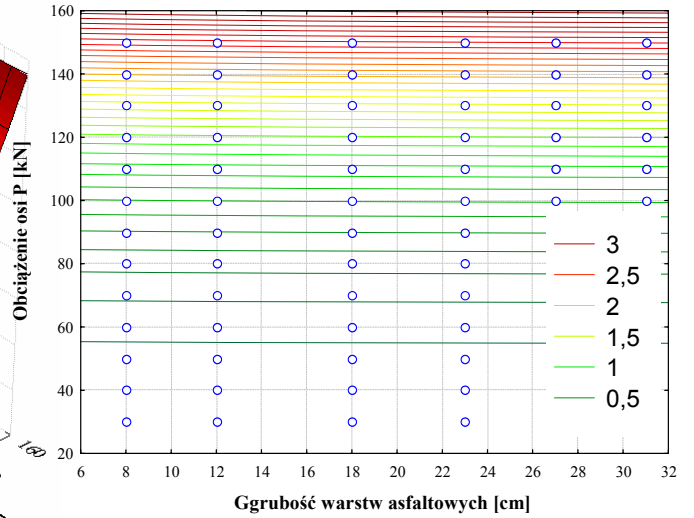


Rysunek 8.32. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 245 mm (model KI245) i grubości warstw asfaltowych.

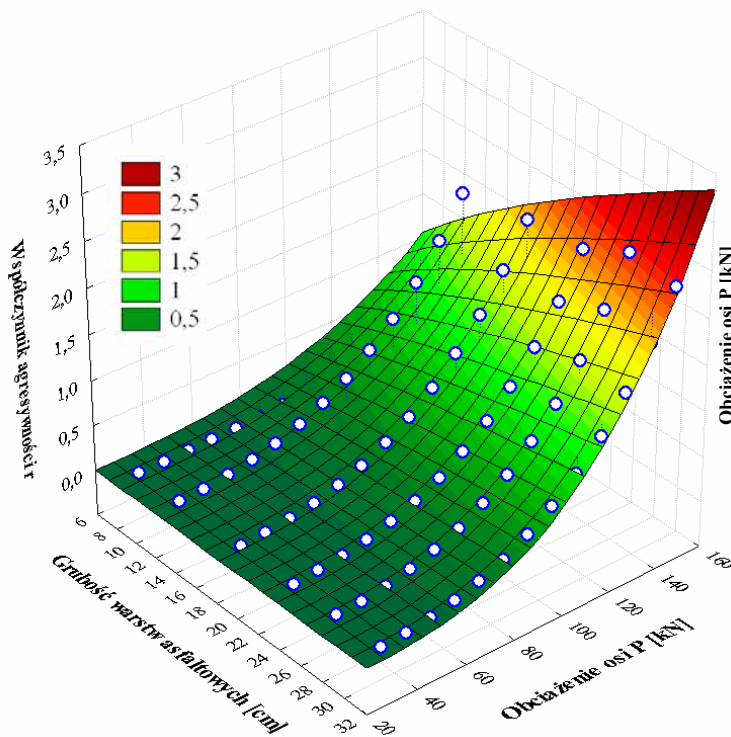


$$r^{kII275} = 1,761 \cdot 10^{-7} \cdot h^{0,01687} \cdot P^{3,29096} \quad (8.25)$$

$$R = 0,999$$

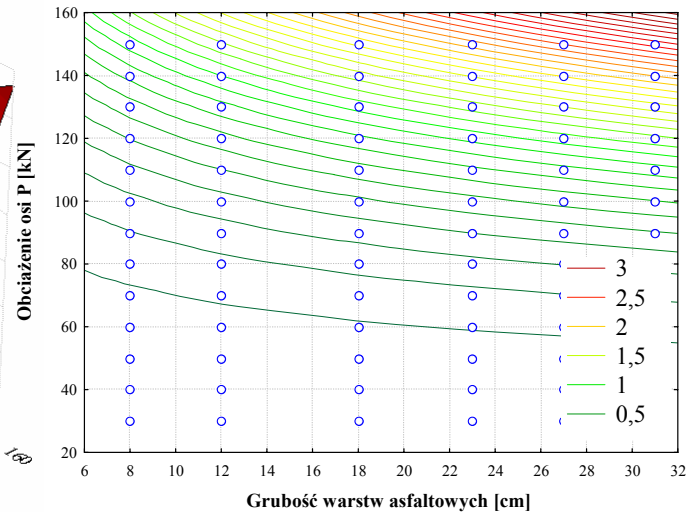


Rysunek 8.33. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 275 mm (model kII275) i grubości warstw asfaltowych.



$$r^{kII305} = 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P^{3,29103} \quad (8.26)$$

$$R = 0,954$$



Rysunek 8.34. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi pojedynczej o kołach bliźniaczych i szerokości opon 305 mm (model kII305) i grubości warstw asfaltowych.

8.3.3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza osi pojedynczych obejmująca osie o ogumieniu pojedynczym i bliźniaczym, o szerokościach od 245 mm do 495 mm, wykazała różnice w wartościach ich szkodliwego oddziaływania na nawierzchnie drogowe. W pierwszej kolejności wyznaczono wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach o grubości warstw asfaltowych od 8 do 31 cm przejściem pojedynczych osi, a w następnej kolejności określono agresywności tych osi w odniesieniu do osi porównawczej – obliczeniowej scharakteryzowanej za pomocą kołowej powierzchni styku koła z nawierzchnią o promieniu $r=160$ mm.

Można również stwierdzić, że wśród osi pojedynczych największą agresywnością charakteryzują się osie o ogumieniu o szerokości 245 mm (stosowane najczęściej na osiach kierowanych pojazdów), a najmniejszą osie o szerokości ogumienia 495 mm (osie typu „Super Single Drive” stosowane na osie napędowe pojazdów). Jest to oczywiście wynikiem różnic w wielkości powierzchni styku kół z nawierzchnią. Należy tutaj jednak zaznaczyć, że opony o szerokości ogumienia 495 mm stosowane są w zastępstwie opon bliźniaczych o szerokości 305 mm, które charakteryzują się znacznie mniejszą agresywnością.

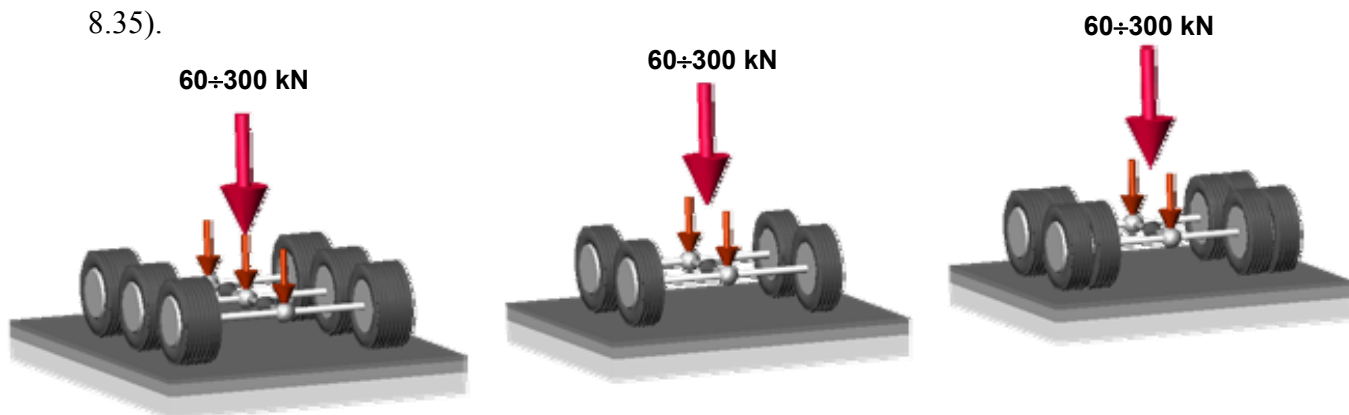
Wartości szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności osi opisano poprzez równania uzależnione jedynie od wartości obciążenia osi P , co pozwala w łatwy sposób określić szkodliwe oddziaływanie takich osi przy dowolnym ich obciążeniu.

8.4. Wpływ osi wielokrotnych

8.4.1. Wpływ osi wielokrotnych na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych

Analogicznie jak w przypadku osi pojedynczych, w celu oceny wpływu konfiguracji osi wielokrotnych na trwałość zmęczeniową nawierzchni, opracowano 6 modeli osi wielokrotnych, w tym dwa modele osi podwójnej o kołach pojedynczych i rozstawach osi 100 cm i 135 cm, dwa modele osi potrójnej o kołach pojedynczych typu „Super Single” i rozstawach 100 cm i 135 cm oraz dwa modele osi podwójnej o kołach bliźniaczych i rozstawach 100 cm i 135 cm. Poszczególne modele obliczeniowe (oII305s100, oII305s135, oIII385s100, oIII385s135, oIII305s100 i oIII305s135), których warstwy zostały opisane za pomocą modułów sprężystości podłużnej i współczynników Poissona, obciążano ciśnieniem równomiernie rozłożonym (o wartościach podanych w tab. 8.10) odpowiadają-

cemu naciskowi wywieranemu przez oś wielokrotną o wartości od 60 kN do 300 kN (rys. 8.35).



Rys. 8.35. Zakres analizowanych nacisków przypadających na osie wielokrotne.

Z uwagi na to, iż jako wyjściowe przyjęto naciski na oś wielokrotną, to należy pamiętać, że przy tym samym nacisku na oś wielokrotną (np. 240 kN), inny nacisk występuje na osi składowej osi potrójnej (80 kN), a inny na osi podwójnej (120 kN).

Tab. 8.10. Powierzchnia styku koła z nawierzchnią i odpowiadające jej ciśnienie stykowe [Pa], w osiach wielokrotnych.

Obciążenie osi wielokrotnej P [kN]	Model					
	oII305s100	oII305s135	oIII385s100	oIII385s135	oIII305s100	oIII305s135
	Powierzchnia styku kół z nawierzchnią [m ²]					
	0,1216	0,1216	0,2267	0,2267	0,2432	0,2432
60	246720	246720	132340	132340	123360	123360
80	328950	328950	176450	176450	164480	164480
100	411190	411190	220560	220560	205600	205600
120	493430	493430	264670	264670	246720	246720
140	575660	575660	308780	308780	287830	287830
160	657900	657900	352890	352890	328950	328950
180	740140	740140	397010	397010	370070	370070
200	822370	822370	441120	441120	411190	411190
220	904610	904610	485230	485230	452310	452310
240	986850	986850	529340	529340	493430	493430
260	1069080	1069080	573450	573450	534540	534540
280	1151320	1151320	617560	617560	575660	575660
300	1233560	1233560	661670	661670	616780	616780

Ponieważ w strukturze ruchu pojazdów ciężarowych, oprócz samochodów dwuosiowych dominują ciągniki siodłowe pięcioosiowe (stanowią one aż 29,5% pojazdów ciężarowych), a w pojazdach tego typu występuje najbardziej charakterystyczna oś wielokrotna (wprowadzona stosunkowo niedawno do powszechnego użytku) – oś potrójna naczepy z kołami typu „Super Single”, to w pierwszej kolejności w pracy sprawdzono, czy oś tego typu w projektowaniu konstrukcji nawierzchni może być traktowana jako suma trzech

osi składowych, czy też należy ją rozpatrywać jako oś wielokrotną (sposób oddziaływania tego typu osi nie został jeszcze w literaturze jednoznacznie ustalony [55, 132]).

W tym celu, przeprowadzono analizę zmian odkształceń i naprężeń w rozpatrywanych konstrukcjach nawierzchni (podatna, półsztywna i sztywna), w zależności od sposobu jej obciążenia osią potrójną o kołach „Super Single” szerokości 385mm, (model oIII385s100, rozstaw kół 100cm). Oś wielokrotną obciążono naciskiem 100 kN rozłożonym równomiernie na każdą z osi składowych (na każdą z osi przypada nacisk 33.3kN) i wyznaczono naprężenia oraz odkształcenia w konstrukcjach nawierzchni:

- podatnej, o grubości warstw asfaltowych równej 23 cm (tab. 7.1),
- półsztywnej, w I fazie pracy (przed spękaniem warstwy podbudowy z chudego betonu, (tab. 7.2),
- sztywnej, o grubości warstwy nawierzchni z betonu cementowego równej 23 cm (tab. 7.2).

W pierwszej kolejności, każdą konstrukcję nawierzchni obciążono tylko jedną osią składową o obciążeniu 33,3 kN (na każde koło przypada 16,65 kN). Powierzchnia styku osi potrójnej w modelu oIII385s100 wynosi 0,2432 m² (tab. 7.4), a zatem powierzchnia styku jednej osi składowej wynosi:

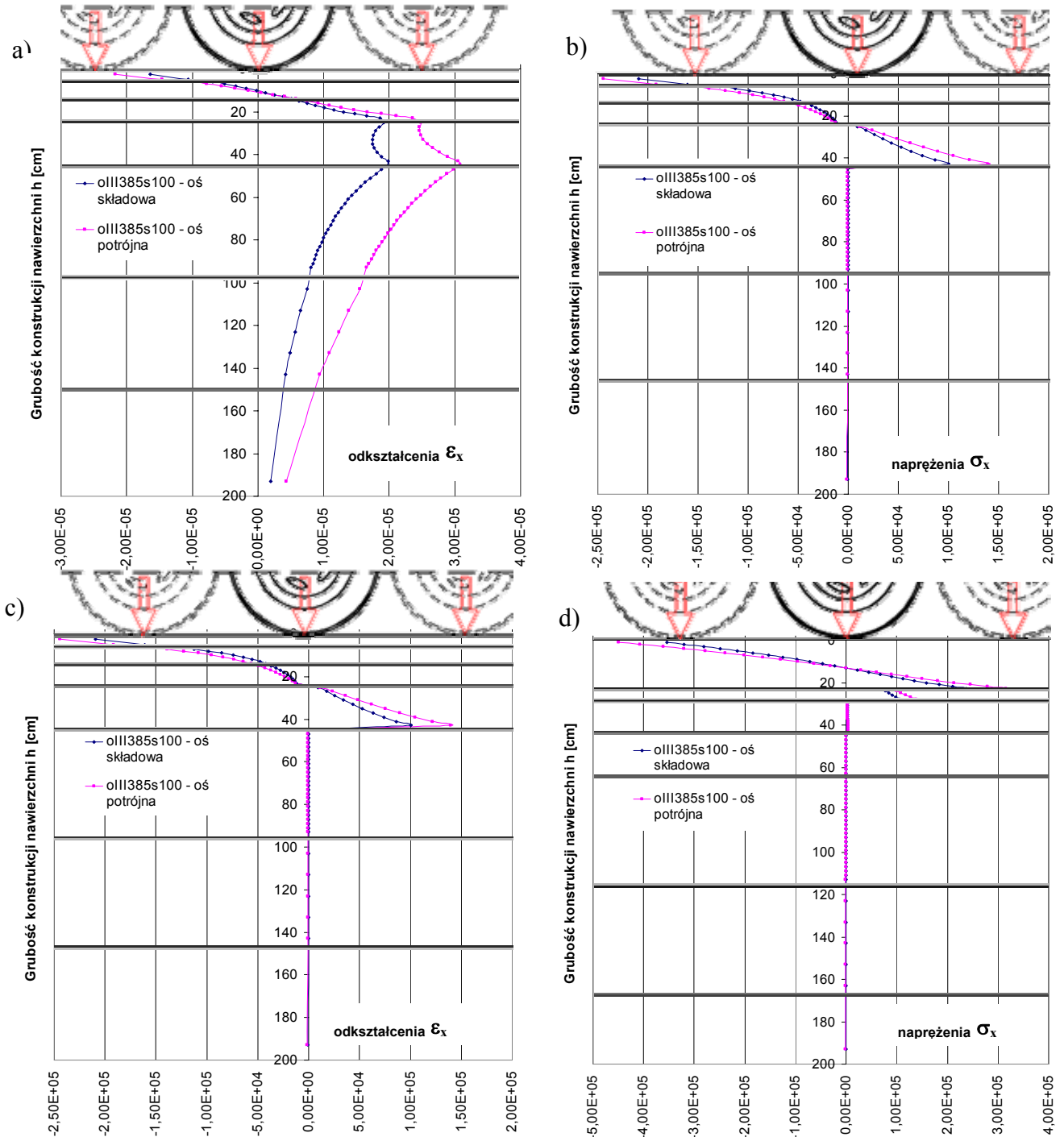
$$\frac{1}{3} \cdot 0,2432 = 0,0811 \text{ m}^2$$

Dla takiej powierzchni styku oraz obciążenia koła wynoszącego 16,65 kN, wyznaczono odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych nawierzchni podatnej oraz poziome naprężenia rozciągające w podbudowie z chudego betonu (nawierzchnia półsztywna) i warstwie z betonu cementowego (nawierzchnia sztywna). Sumaryczne oddziaływanie osi potrójnej w takim przypadku, jest równe sumie oddziaływania trzech osi składowych. Następnie, konstrukcje te obciążono osią potrójną (powierzchnia styku wynosi 0,2432 m²) o nacisku 100 kN i rozpoznano odkształcenia i naprężenia występujące w poszczególnych warstwach.

Na rysunku 8.36 przedstawiono zaobserwowane pod kołem środkowym osi potrójnej naprężenia i odkształcenia, które jednoznacznie wskazują na wzrost niekorzystnego oddziaływania, w przypadku gdy rozpatrywana jest oś potrójna, w której występuje obciążenie wszystkich trzech osi składowych jednocześnie.

Dla lepszego zobrazowania problemu, w tab. 8.11, 8.12 i 8.13 porównano naprężenia oraz odkształcenia w charakterystycznych miejscach poszczególnych nawierzchni. W przypadku nawierzchni podatnych, różnica w odkształceniach rozciągających na spo-

dzie warstw asfaltowych wyniosła 27,3 %. W przypadku nawierzchni półsztywnych, maksymalne naprężenia w warstwie chudego betonu wzrosły o 25,6% gdy obciążono jednocześnie wszystkie trzy osie. Największe różnice zaobserwowano w przypadku nawierzchni sztywnej. W warstwie z betonu cementowego naprężenia wzrosły aż o 32,8%.



Rys. 8.36. Odształcenia i naprężenia w konstrukcjach nawierzchni wywołane przejściem osi potrójnej (w postaci osi składowej i wielokrotnej):

- a) – odształcenia ϵ_x w nawierzchni podatnej,
- b) – naprężenia σ_x w nawierzchni półsztywnej,
- c) – odształcenia ϵ_x w nawierzchni półsztywnej,
- d) – naprężenia σ_x w nawierzchni sztywnej.

Tab. 8.11. Zmiany odkształceń pod kołem środkowym osi potrójnej wywołanych w nawierzchni podatnej przejściem osi potrójnej w postaci osi składowej i osi wielokrotnej.

Warstwa konstrukcyjna nawierzchni		Nawierzchnia podatna		
		Oś składowa	Oś potrójna	Przyrost odkształceń
		ϵ_x [-]	ϵ_x [-]	Δ_{ϵ_x} [%]
Beton asfaltowy, warstwa ścieralna, h = 5 cm	górze	$-1,64500 \cdot 10^{-5}$	$-2,17000 \cdot 10^{-5}$	31,9
	dół	$-1,06000 \cdot 10^{-5}$	$-1,46100 \cdot 10^{-5}$	37,8
Beton asfaltowy, warstwa wiążąca, h = 8 cm	górze	$-6,94600 \cdot 10^{-6}$	$-1,01000 \cdot 10^{-5}$	45,4
	dół	$3,82300 \cdot 10^{-6}$	$4,04800 \cdot 10^{-6}$	5,9
Beton asfaltowy, podbudowa zasadnicza, h = 10 cm	górze	$5,07300 \cdot 10^{-6}$	$5,77900 \cdot 10^{-6}$	13,9
	dół	$1,85500 \cdot 10^{-5}$	$2,36100 \cdot 10^{-5}$	27,3
Kruszywo łamane stab. mech. lub tłuczeń kamienny, podbudowa pomocnicza, h = 20 cm	górze	$1,92100 \cdot 10^{-5}$	$2,47900 \cdot 10^{-5}$	29,0

ϵ_x – odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych

Tab. 8.12. Zmiany naprężeń pod kołem środkowym osi potrójnej wywołanych w nawierzchni półsztywnej przejściem osi potrójnej w postaci osi składowej i osi wielokrotnej.

Warstwa konstrukcyjna nawierzchni		Nawierzchnia półsztywna		
		Oś składowa	Oś potrójna	Przyrost naprężeń
		σ_x [Pa]	σ_x [Pa]	Δ_{σ_x} [%]
Beton asfaltowy, warstwa ścieralna, h = 5 cm	górze	$-2,09100 \cdot 10^{+5}$	$-2,44100 \cdot 10^{+5}$	16,7
	dół	$-1,60800 \cdot 10^{+5}$	$-1,91600 \cdot 10^{+5}$	19,2
Beton asfaltowy, warstwa wiążąca, h = 8 cm	górze	$-1,28100 \cdot 10^{+5}$	$-1,55400 \cdot 10^{+5}$	21,3
	dół	$-4,77000 \cdot 10^{+4}$	$-6,39500 \cdot 10^{+4}$	34,1
Beton asfaltowy, podbudowa zasadnicza, h = 10 cm	górze	$-4,21100 \cdot 10^{+4}$	$-5,60500 \cdot 10^{+4}$	33,1
	dół	$-1,19400 \cdot 10^{+4}$	$-1,27750 \cdot 10^{+4}$	7,0
Chudy beton, podbudowa pomocnicza, h = 20 cm	górze	$9,10200 \cdot 10^{+3}$	$1,14300 \cdot 10^{+4}$	25,6

σ_x – naprężenia rozciągające w warstwie betonu

Tab. 8.13. Zmiany naprężeń pod kołem środkowym osi potrójnej wywołanych w nawierzchni sztywnej przejściem osi potrójnej w postaci osi składowej i osi wielokrotnej.

Warstwa konstrukcyjna nawierzchni		Nawierzchnia sztywna		
		Oś składowa	Oś potrójna	Przyrost naprężeń
		σ_x [Pa]	σ_x [Pa]	Δ_{σ_x} [%]
Beton cementowy h = 23 cm	górze	$-3,54100 \cdot 10^{+5}$	$-4,49650 \cdot 10^{+5}$	27,0
	dół	$2,37400 \cdot 10^{+5}$	$3,15350 \cdot 10^{+5}$	32,8
Beton asfaltowy h = 5 cm	górze	$7,73600 \cdot 10^{+4}$	$9,99000 \cdot 10^{+4}$	29,1
	dół	$1,07200 \cdot 10^{+5}$	$1,38300 \cdot 10^{+5}$	29,0
Kruszywo łamane stab. mech. lub tłuczeń kamienny h = 15 cm	górze	$2,18900 \cdot 10^{+3}$	$2,41600 \cdot 10^{+3}$	10,4
Warstwa mrozoochronna h = 20 cm	dół	$3,33000 \cdot 10^{+3}$	$4,39000 \cdot 10^{+3}$	31,8

Dla sprawdzenia wpływu różnego podejścia do zagadnienia osi potrójnej na wartość obliczanych szkód zmęczeniowych, można wykorzystać np. kryterium spękań zmęczeniowych Instytutu Asfaltowego (patrz pkt. 3.4). W przypadku, gdy oś potrójna jest traktowana jak suma trzech osi składowych, z których każda wywołuje maksymalne odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych równe $1.855 \cdot 10^{-5}$, liczba osi potrzebnych do zniszczenia wynosi:

$$\varepsilon_x = 1,855 \cdot 10^{-5} \rightarrow 3 \cdot N = 3 \cdot 3,760 \cdot 10^8$$

gdzie: ε_x – odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych pod kołem osi składowej.

a zatem całkowita szkoda zmęczeniowa wywołana przejściem trzech osi składowych:

$$3 \cdot d = 3 \cdot \frac{l}{3,760 \cdot 10^8} = 3 \cdot 2,660 \cdot 10^{-9} = 7,980 \cdot 10^{-9}$$

A w sytuacji, gdy rozpatruje się oś potrójną jako oś wielokrotną, to do zniszczenia będzie potrzebna następująca liczba osi:

$$\varepsilon_{x1} = 2,127 \cdot 10^{-5} \rightarrow N = 2,397 \cdot 10^8$$

$$\varepsilon_{x2} = 2,361 \cdot 10^{-5} \rightarrow N = 1,700 \cdot 10^8$$

$$\varepsilon_{x3} = 2,127 \cdot 10^{-5} \rightarrow N = 2,397 \cdot 10^8$$

gdzie: ε_{x1} , ε_{x2} , ε_{x3} – odkształcenia rozciągające w warstwach asfaltowych pod pierwszym (ε_{x1}), drugim (ε_{x2}) i trzecim (ε_{x3}) kołem osi potrójnej.

a całkowita szkoda zmęczeniowa wywołana przejściem osi potrójnej:

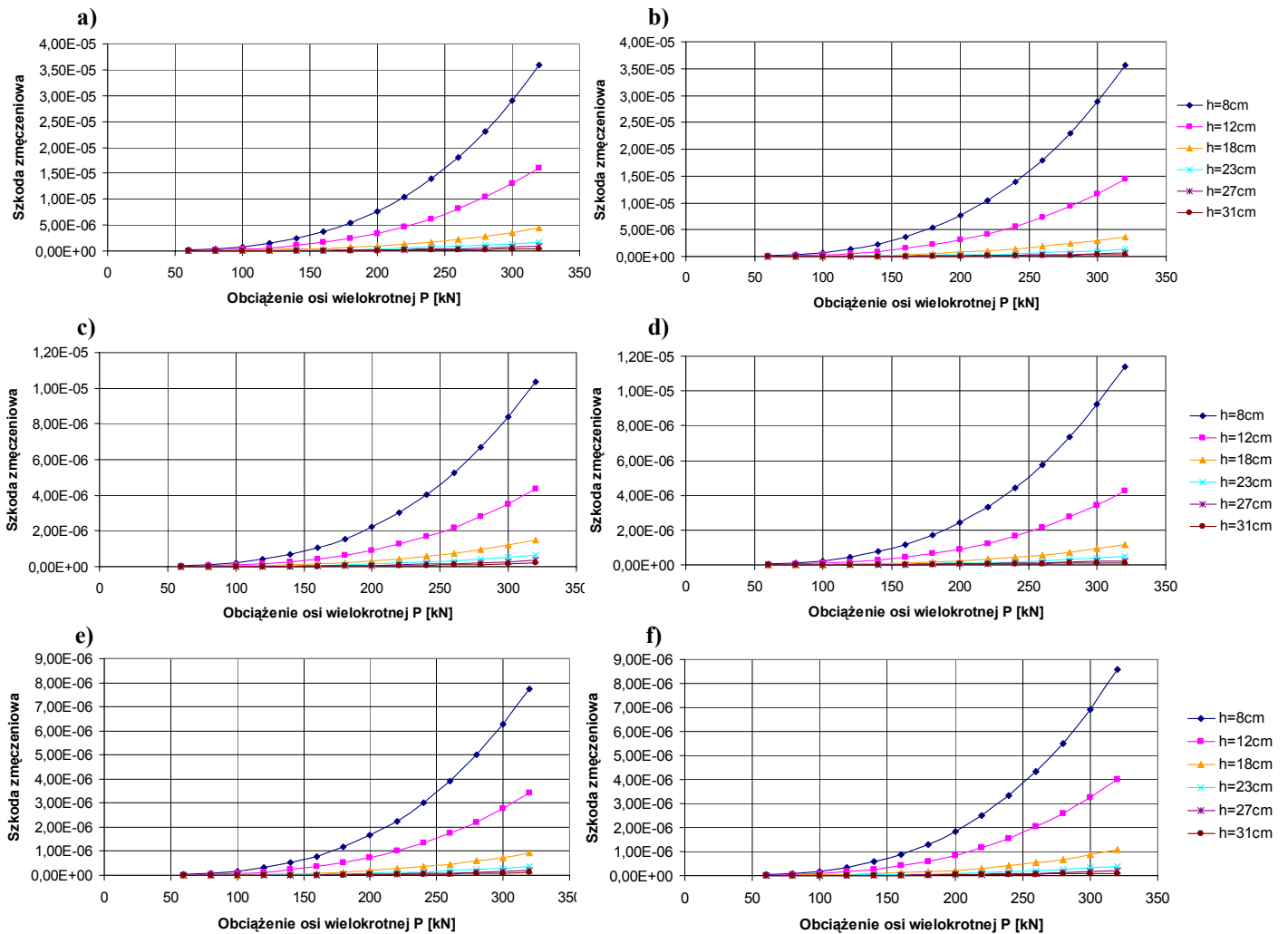
$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \frac{l}{2,397 \cdot 10^8} = 4,172 \cdot 10^{-9} \\ d_2 &= \frac{l}{1,700 \cdot 10^8} = 5,882 \cdot 10^{-9} \\ d_3 &= \frac{l}{2,397 \cdot 10^8} = 4,172 \cdot 10^{-9} \end{aligned} \right\} \sum d = 1,423 \cdot 10^{-8}$$

Jak widać, w drugim przypadku szkodliwy wpływ osi potrójnej jest o 78% większy. Jednoznacznie świadczy to o tym, że osie potrójne (również osie podwójne) nie powinny być traktowane w rozbiu na osie składowe.

Mając ustalony sposób obciążania nawierzchni, poszukiwano miejsc występowania ekstremalnych odkształceń (w warstwach asfaltowych) i naprężeń (w warstwach betonowych i podbudowach związanych cementem) pod każdą z osi składowych (w osi powierzchni styku koła z nawierzchnią w przypadku ogumienia pojedynczego, lub pomiędzy

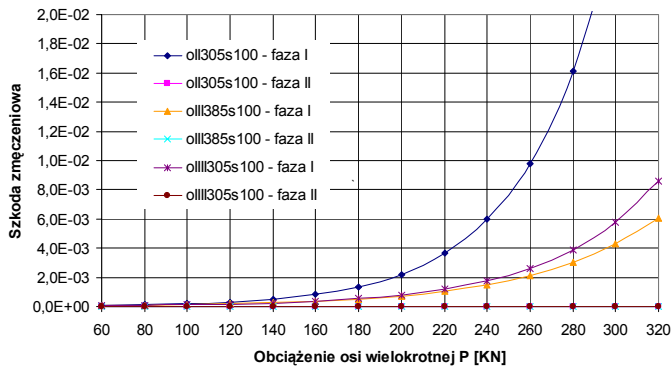
oponami w przypadku ogumienia bliźniaczego), które następnie posłużyły do wyznaczenia, w oparciu o kryteria wymiarowania, liczby osi składowych niezbędnych do zniszczenia nawierzchni. Dla tak wyznaczonej liczby osi, w oparciu o zależność (8.1) obliczono szkody zmęczeniowe wywoływane w nawierzchniach podatnych, półsztywnych oraz sztywnych (grubości poszczególnych warstw i wartości parametrów je opisujących podano w tab. 7.1 i 7.2), przejściem osi podwójnych o kołach pojedynczych i szerokości opon 305 mm (oII305s100 i oII305s135), potrójnych o kołach typu „Super Single” i szerokości opon 385 mm (oIII385s100 i oIII385s135) oraz podwójnych o kołach bliźniaczych i szerokości opon 305 mm (oIII305s100 i oIII305s135). Wpływ osi wielokrotnych na nawierzchnię był sprawdzany przy dwóch rozstawach osi s_0 : 100 i 135 cm.

Na rysunku 8.37 przedstawiono wykresy szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach podatnych przejściem osi wielokrotnych w zależności od wartości obciążenia przypadającego na oś (grubości warstw asfaltowych i parametry je opisujące podano w tab. 7.1 i 7.2), na rysunku 8.38 przedstawiono szkody zmęczeniowe powstające w nawierzchniach półsztywnych (fazy pracy analogiczne jak w przypadku analizy wykonywanej dla osi pojedynczych), a na rysunku 8.39 szkody w nawierzchniach sztywnych.

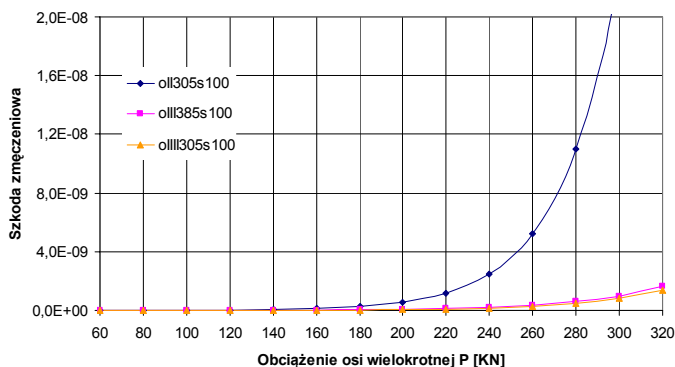


Rys. 8.37. Wartości szkód zmęczeniowych wywołanych przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej i grubości warstw asfaltowych:

- a) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 100cm,
- b) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 135cm
- c) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 100cm,
- d) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 135cm,
- e) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 100cm.
- f) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 135cm.



Rys. 8.38. Wartości szkód zmęczeniowych nawierzchni półsztywnych wywołanych przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej oraz fazy pracy (faza I – podbudowa z chudego betonu nie spękana, faza II – podbudowa z chudego betonu spękana).

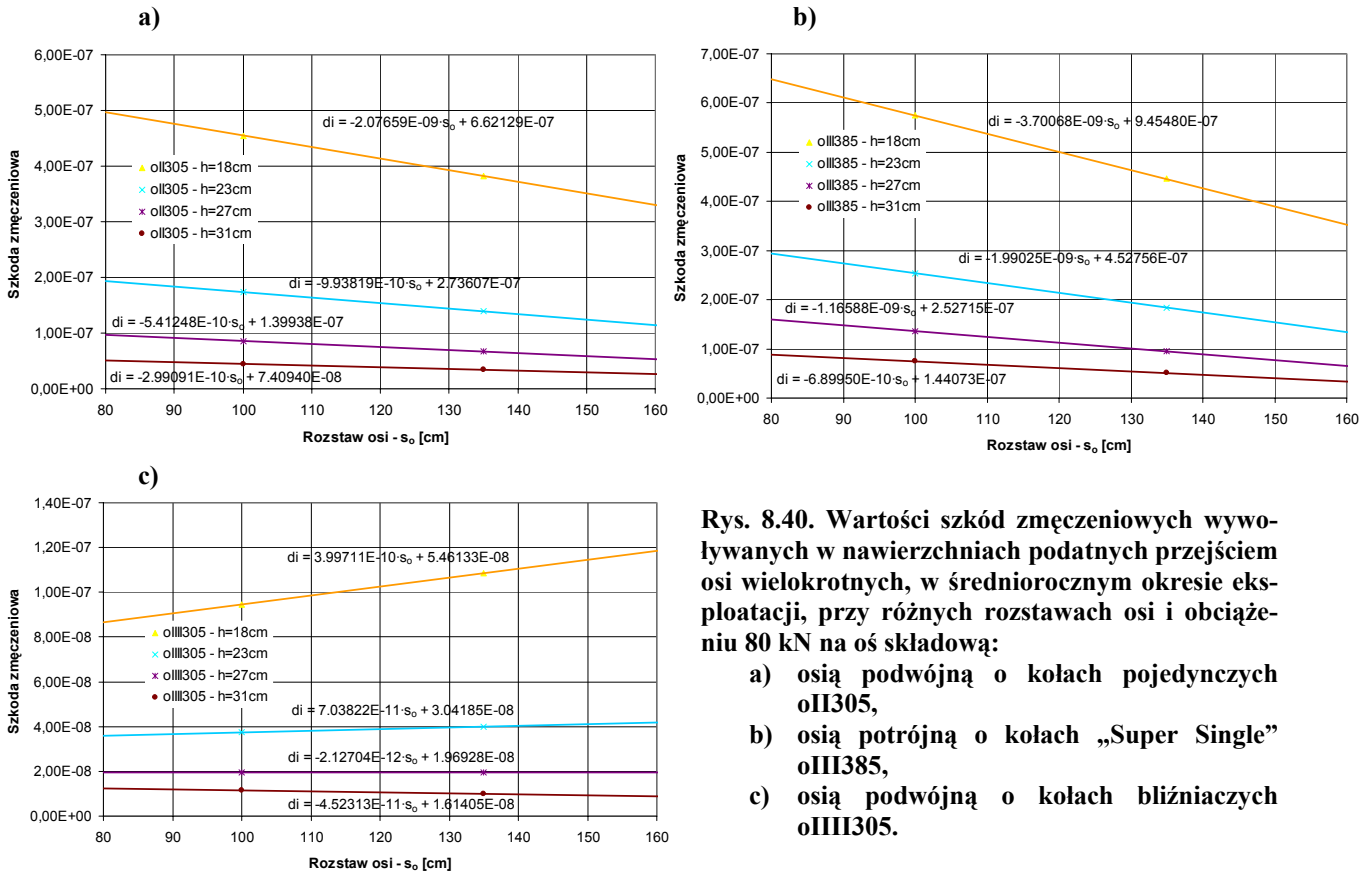


Rys. 8.39. Wartości szkód zmęczeniowych nawierzchni sztywnej wywołanych przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej.

Można również stwierdzić, że wzrost rozstawu osi jest generalnie przyczyną zmniejszania się szkód zmęczeniowych wywołanych przejściem osi wielokrotnej w nawierzchniach. Przy rozstawie osi składowych wynoszącym ok. 1,80m, osie składowe (rys. 8.40) są przyczyną powstawania szkód równoważnych szkodom wywołanym przejściem osi pojedynczych. Dzieje się tak w przypadku osi podwójnych o kołach pojedynczych i osi potrójnych o ogumieniu typu „Super Single”. W przypadku osi podwójnych o ogumieniu bliźniaczym wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych przejściem osi wielokrotnej o różnym rozstawie osi składowych jest uzależniona również od grubości warstw asfaltowych. W nawierzchniach o grubości warstw asfaltowych mniejszych od 27 cm, wzrost rozstawu tego typu osi przyczynia się do wzrostu szkód zmęczeniowych, w nawierzchniach o grubości warstw asfaltowych równej 27 cm zmiana rozstawu osi nie wpływa na trwałość zmęczeniową nawierzchni, a w nawierzchniach o grubości warstw asfaltowych przekraczających 27 cm, wzrost rozstawu osi podobnie jak w przypadku osi podwójnych o ogumieniu pojedynczym i osi potrójnym o ogumieniu typu „Super Single”, przyczynia się do zmniejszania wywoływanych szkód zmęczeniowych w nawierzchniach.

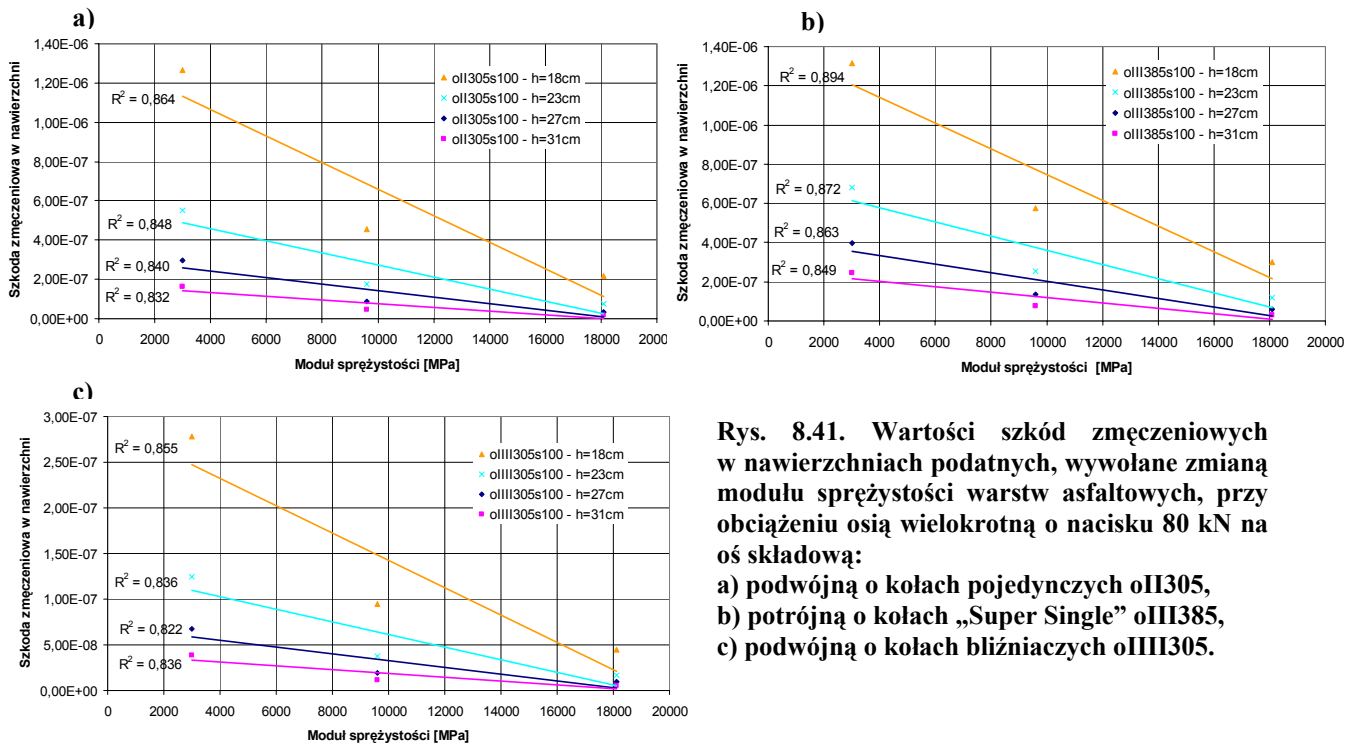
W pracy analizowano również wpływ okresu eksploatacji nawierzchni (a więc zmiany parametrów opisujących poszczególne warstwy), na wartość wywoływanych przejściem osi wielokrotnych szkód zmęczeniowych (rys. 8.41). Tak jak w przypadku osi pojedynczych, wzrost modułu sprężystości był przyczyną zmniejszenia się wywoływanych szkód zmęczeniowych, a największe różnice w ich wartościach, podobnie jak w przypadku osi pojedynczych są widoczne w nawierzchniach asfaltowych o najmniejszych grubościach warstw asfaltowych (a więc mniejszych bądź równych 18 cm). Można również zauważyć, że w przypadku nawierzchni, w których warstwy asfaltowe wykazują małe moduły sprężystości (a więc w letnim okresie eksploatacji nawierzchni), szczególnie mocno zarysowują

się różnice w wielkości szkodliwego oddziaływania na nawierzchnie drogowe pomiędzy osiami wielokrotnymi różnego typu.



Rys. 8.40. Wartości szkód zmęczeniowych wywołanych w nawierzchniach podatnych przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, przy różnych rozstawach osi i obciążeniu 80 kN na oś składową:

- osią podwójną o kołach pojedynczych oII305,
- osią potrójną o kołach „Super Single” oIII385,
- osią podwójną o kołach bliźniaczych oIII305.



Rys. 8.41. Wartości szkód zmęczeniowych w nawierzchniach podatnych, wywołane zmianą modułu sprężystości warstw asfaltowych, przy obciążeniu osi wielokrotną o nacisku 80 kN na oś składową:

- podwójną o kołach pojedynczych oII305,
- potrójną o kołach „Super Single” oIII385,
- podwójną o kołach bliźniaczych oIII305.

Przebieg zmian szkód zmęczeniowych wywołanych w nawierzchniach przejściem osi wielokrotnych jest potęgowy, a równania je opisujące przedstawiono w tabeli 8.14 (nawierzchnie podatne) oraz 8.15 i 8.16 (nawierzchnia półsztywna i sztywna). Zależności opisujące szkody zmęczeniowe mają postać zgodną z zależnością (8.7).

Tab. 8.14. Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchniach podatnych przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji, (P – obciążenie osi).

Model	Grubość warstw asfaltowych	Szkody zmęczeniowe
oII305s100	h = 8 cm	$d = (2,04164 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (9,13812 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (2,53365 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (9,71294 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (4,78407 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (2,46329 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
oII305s135	h = 8 cm	$d = (2,02973 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (8,25982 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (2,12845 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (7,77377 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (3,72797 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (1,87969 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s100	h = 8 cm	$d = (5,90757 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (2,46505 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (8,44702 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (3,72476 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (1,99833 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (1,10214 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s135	h = 8 cm	$d = (6,48622 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (2,42687 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (6,54562 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (2,70217 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (1,39930 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (7,47643 \cdot 10^{-16}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s100	h = 8 cm	$d = (4,41408 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (1,95861 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (5,27303 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (2,08819 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (1,08601 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (6,47665 \cdot 10^{-16}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s135	h = 8 cm	$d = (4,87955 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$d = (2,28222 \cdot 10^{-14}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$d = (6,05296 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$d = (2,22553 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$d = (1,08186 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$d = (5,59408 \cdot 10^{-16}) \cdot P^{3,29100}$

Tab. 8.15. Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni półsztywnej przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji, (P – obciążenie osi).

Model	Szkody zmęczeniowe
oII305s100 – faza I	$d = (2,93825 \cdot 10^{-12}) \cdot P^{3,92991}$
oII305s100 – faza II	$d = (9,71294 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s100 – faza I	$d = (4,30042 \cdot 10^{-10}) \cdot P^{2,76138}$
oIII385s100 – faza II	$d = (9,71294 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s100 – faza I	$d = (6,90606 \cdot 10^{-11}) \cdot P^{3,12749}$
oIII305s100 – faza II	$d = (2,08819 \cdot 10^{-15}) \cdot P^{3,29100}$

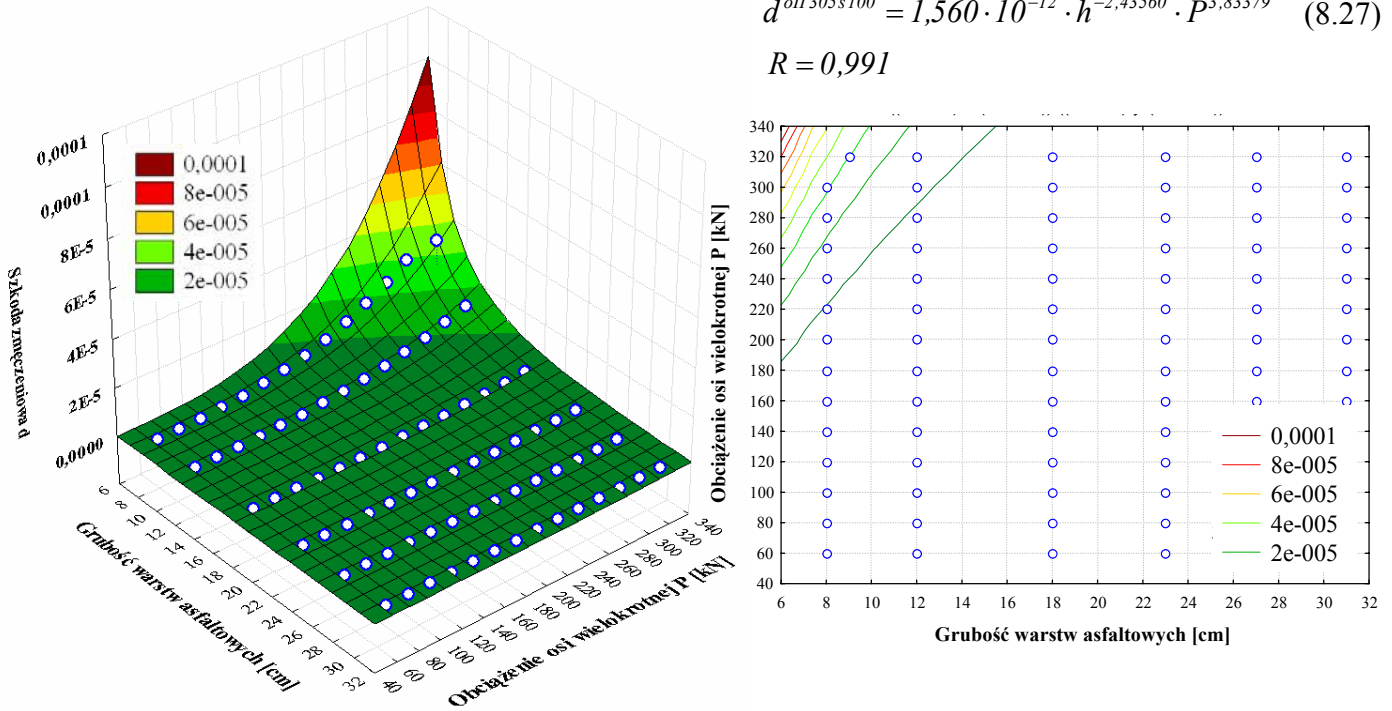
Tab. 8.16. Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni sztywnej przejściem osi wielokrotnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji, (P – obciążenie osi).

Model	Szkody zmęczeniowe
oII305s100	$d = (2,26753 \cdot 10^{-23}) \cdot P^{5,92539}$
oIII385s100	$d = (5,06755 \cdot 10^{-20}) \cdot P^{4,06076}$
oIII305s100	$d = (2,42633 \cdot 10^{-20}) \cdot P^{4,15251}$

Analogicznie jak w przypadku osi pojedynczych, wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach, są zależne od obciążenia osi wielokrotnej P oraz grubości nawierzchni (w przypadku nawierzchni podatnych od grubości warstw asfaltowych), i są zgodne z zależnością (8.7). Przebieg zmian szkód zmęczeniowych obrazują rysunki 8.42 ÷ 8.47 oraz odpowiadające im równania (8.27 ÷ 8.32).

$$d^{oII305s100} = 1,560 \cdot 10^{-12} \cdot h^{-2,43560} \cdot P^{3,83379} \quad (8.27)$$

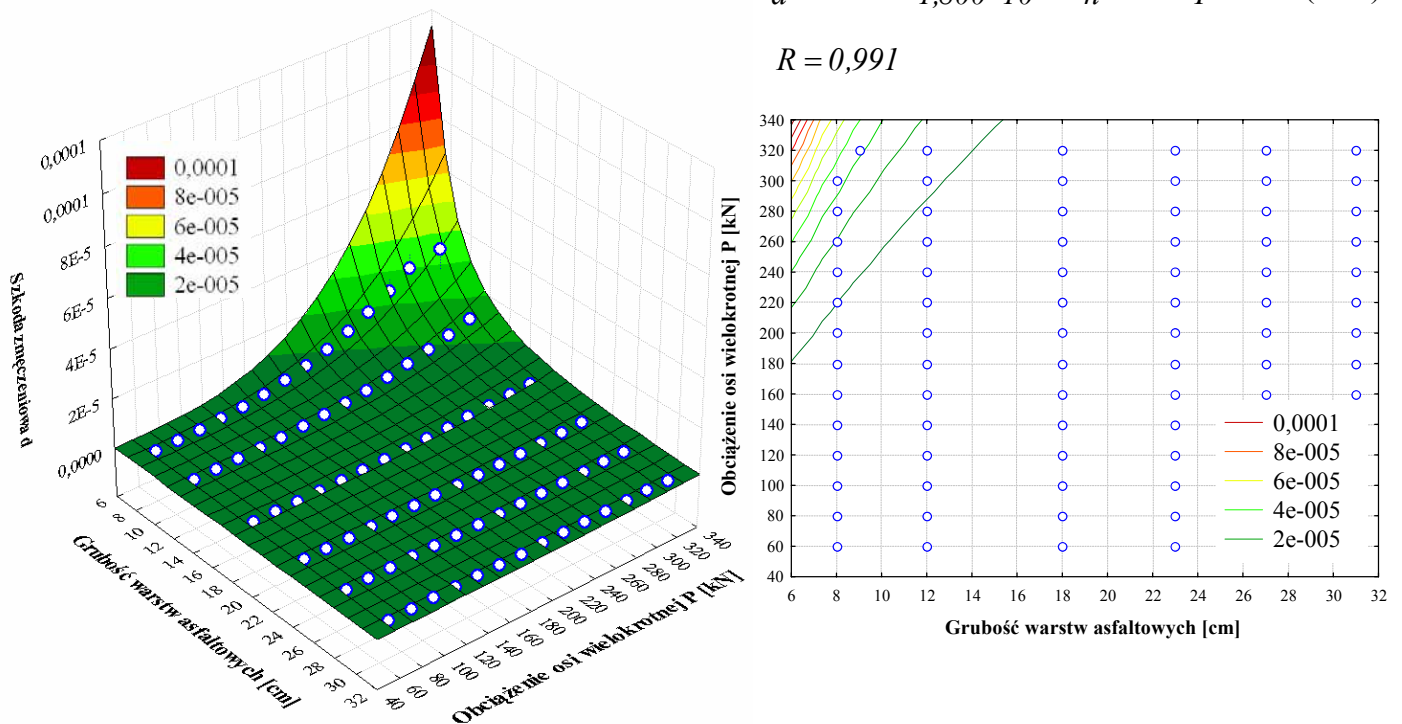
$$R = 0,991$$



Rysunek 8.42. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach pojedynczych (rozstaw 100 cm) i szerokości opon 305 mm (model oII305s100) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{oII305s135} = 1,800 \cdot 10^{-12} \cdot h^{-2,59480} \cdot P^{3,88000} \quad (8.28)$$

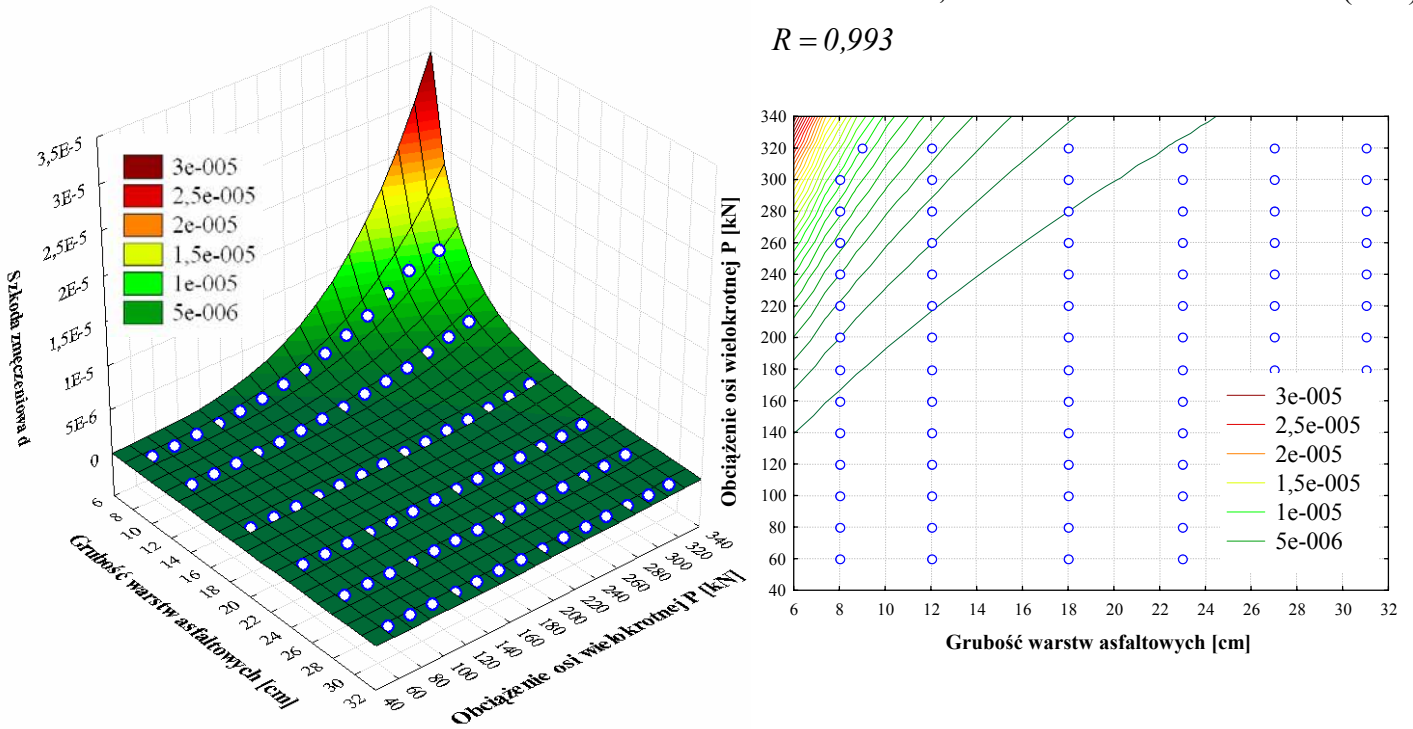
$$R = 0,991$$



Rysunek 8.43. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach pojedynczych (rozstaw 135 cm) i szerokości opon 305 mm (model oII305s135) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{oIII385s100} = 4,800 \cdot 10^{-13} \cdot h^{-2,42370} \cdot P^{3,82504} \quad (8.29)$$

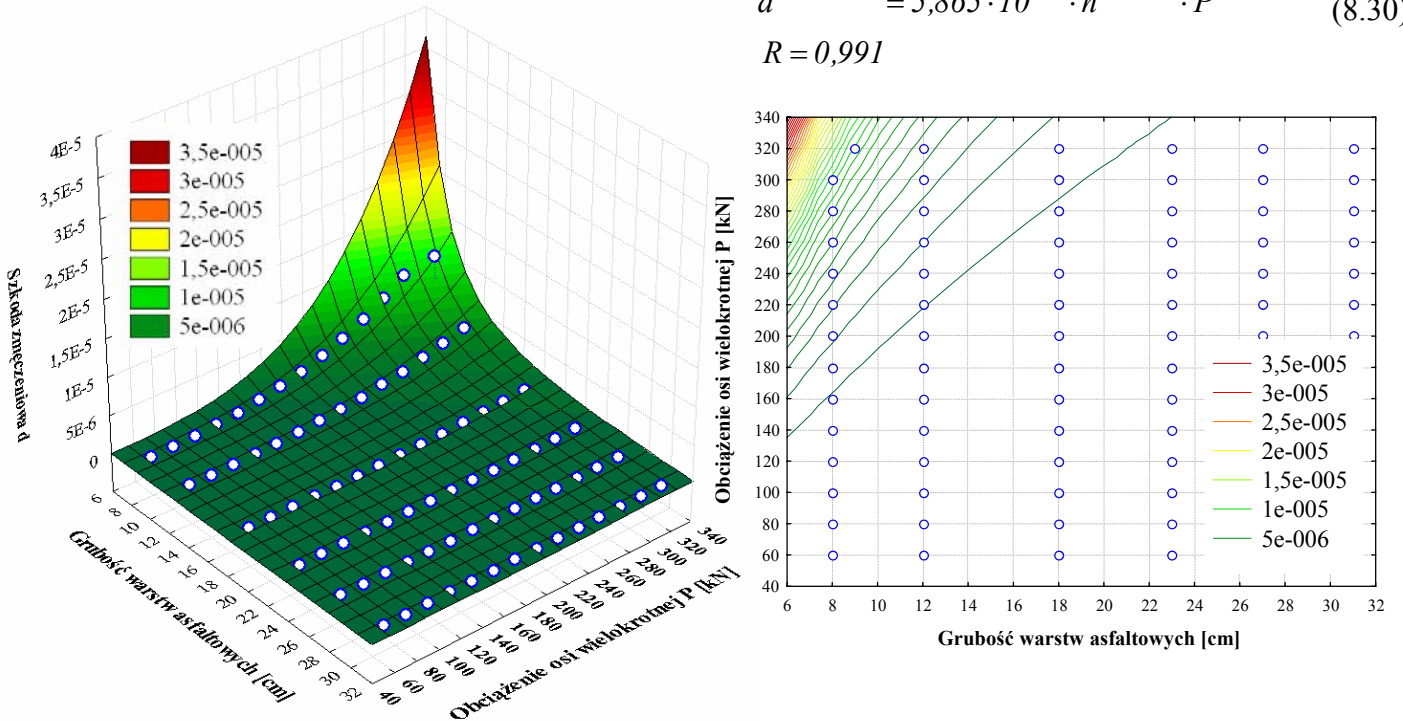
$$R = 0,993$$



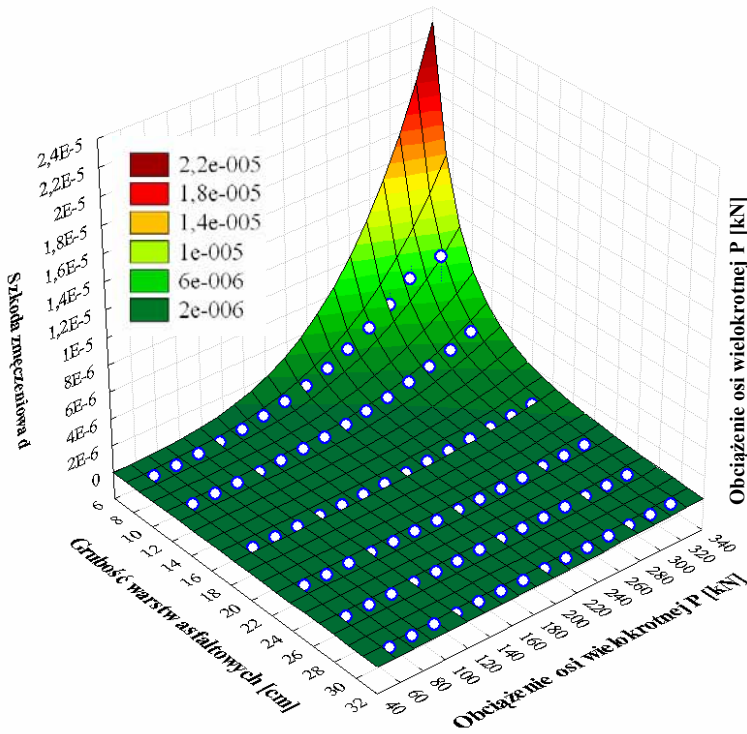
Rysunek 8.44. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi potrójnej o kołach pojedynczych typu „Super Single”(rozstaw 100 cm) i szerokości opon 385 mm (model oIII385s100) i grubości warstw asfaltowych.

$$d^{oIII385s135} = 5,865 \cdot 10^{-13} \cdot h^{-2,68310} \cdot P^{3,90348} \quad (8.30)$$

$$R = 0,991$$

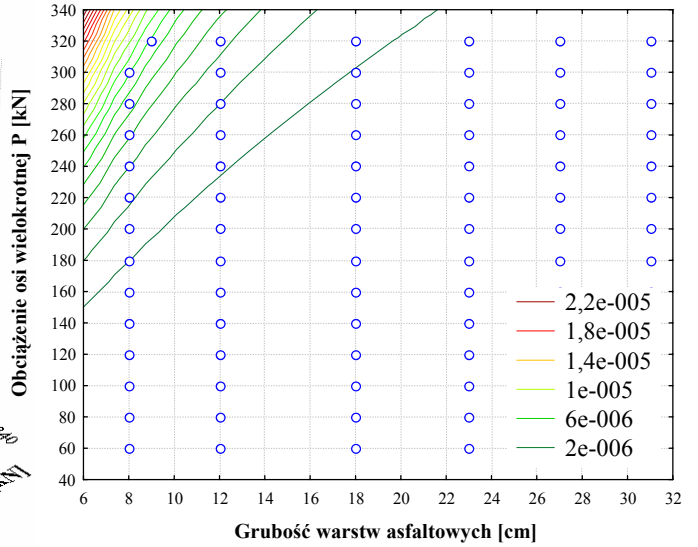


Rysunek 8.45. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi potrójnej o kołach pojedynczych typu „Super Single”(rozstaw 135 cm) i szerokości opon 385 mm (model oIII385s135) i grubości warstw asfaltowych.

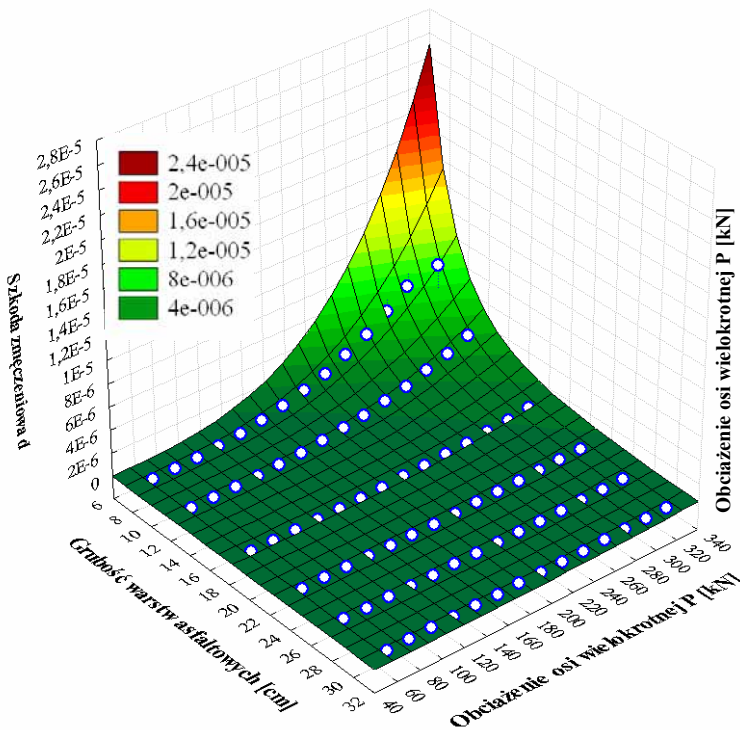


$$d^{oIII305s100} = 3,569 \cdot 10^{-13} \cdot h^{-2,44990} \cdot P^{3,83783} \quad (8.31)$$

$$R = 0,991$$

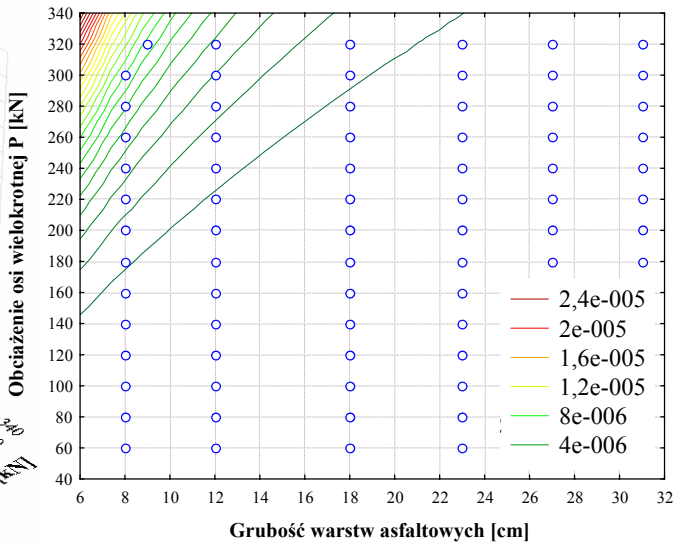


Rysunek 8.46. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach bliźniaczych (rozstaw 100 cm) i szerokości opon 305 mm (model oIII305s100) i grubości warstw asfaltowych.



$$d^{oIII305s135} = 3,850 \cdot 10^{-13} \cdot h^{-2,39770} \cdot P^{3,82435} \quad (8.32)$$

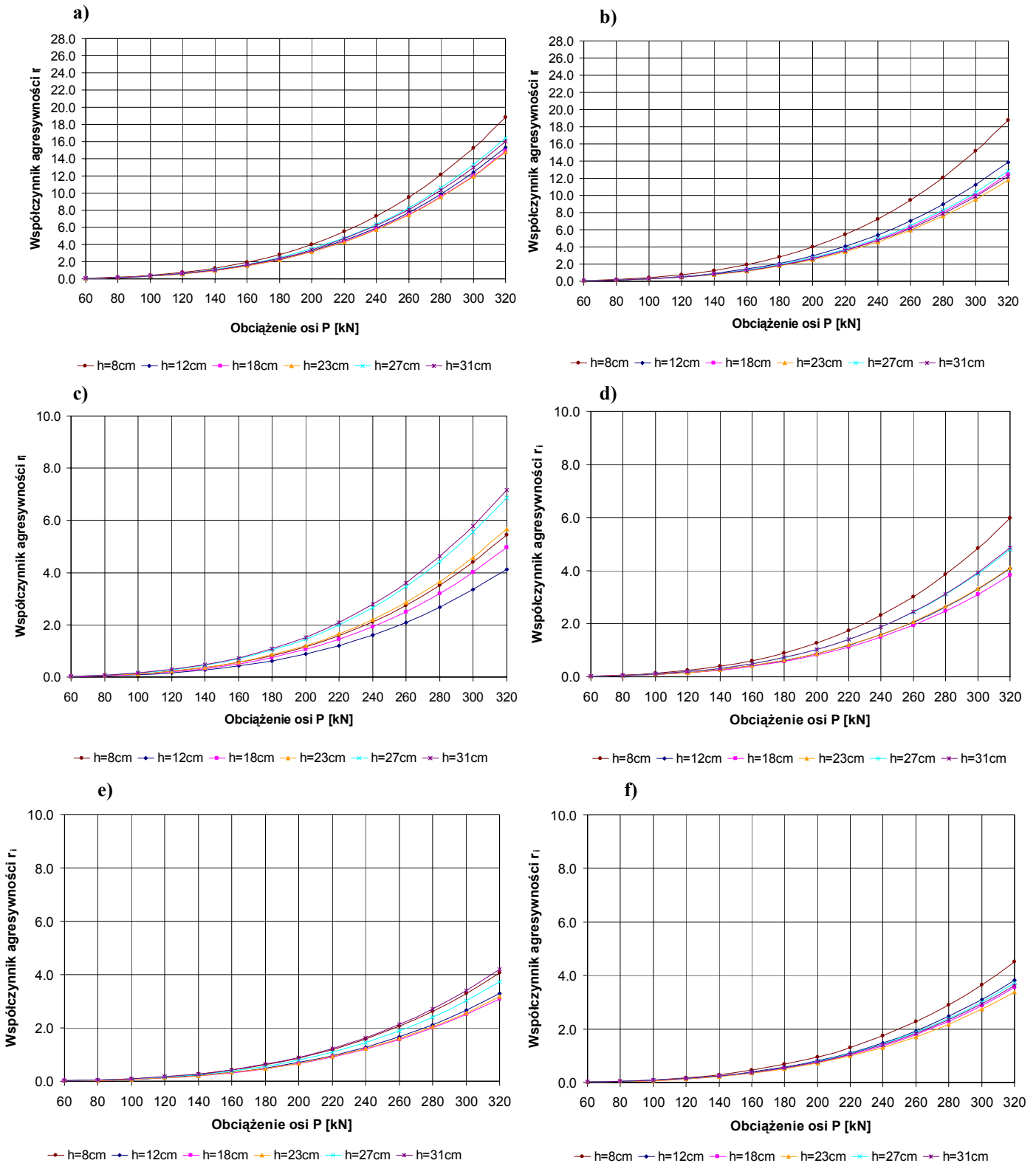
$$R = 0,990$$



Rysunek 8.47. Zależność wartości szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni podatnej od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach bliźniaczych (rozstaw 135 cm) i szerokości opon 305 mm (model oIII305s135) i grubości warstw asfaltowych.

8.4.2. Współczynniki agresywności osi wielokrotnych

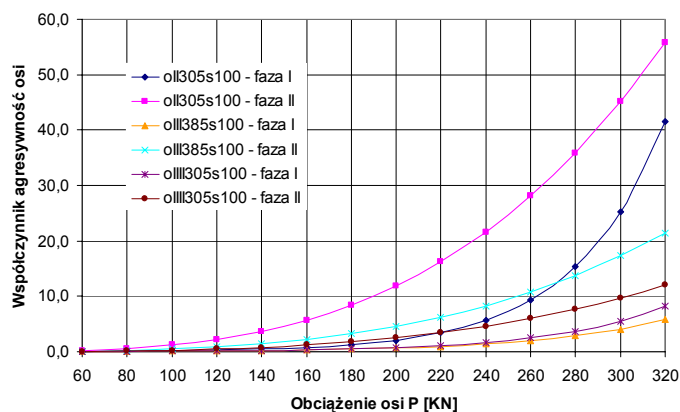
Oprócz analizy szkód zmęczeniowych, wywołanych przejściem osi wielokrotnych pod różnym obciążeniem po wybranych konstrukcjach nawierzchni, wyznaczono również ich współczynniki agresywności, a więc odniesiono ich oddziaływanie do oddziaływania osi obliczeniowej (kIr160). W pierwszej kolejności wyznaczono współczynniki agresywności poszczególnych osi składowych wykorzystując zależność (8.4), a następnie w celu określenia agresywności osi wielokrotnych zsumowano je (zasada superpozycji), uzyskując agresywność osi wielokrotnych. Zatem współczynnik agresywności takiej osi jest sumą współczynników agresywności poszczególnych osi składowych obliczonych w stosunku do modelu osi obliczeniowej kIr160. Na rysunku 8.48 przedstawiono zmiany współczynników agresywności osi względem nawierzchni podatnych, w zależności od obciążenia osi. Tak jak w przypadku osi pojedynczych, mają one przebieg potęgowy, w którym wykładnik potęgowy jest równy $\approx 3,3$ (3,291). Potwierdziły się spostrzeżenia poczynione na etapie analizy agresywności osi pojedynczych, a odnoszące się do wykładnika potęgowego stosowanego w wymiarowaniu nawierzchni podatnych w Polsce (dla przypomnienia: wykładnik potęgowy stosowany obecnie w wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni podatnych równy jest 4).



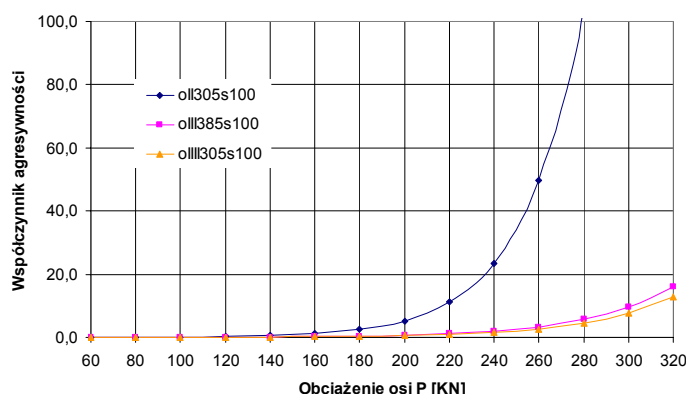
Rys. 8.48. Zmiana współczynnika agresywności osi wielokrotnych, w średniorocznym okresie eksploatacji, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej i grubości warstw asfaltowych:

- a) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 100 cm,
- b) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 135 cm
- c) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 100 cm,
- d) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 135 cm,
- e) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 100 cm.
- f) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 135cm.

Rysunki 8.49 i 8.50 przedstawiają z kolei zmiany współczynnika agresywności osi wielokrotnych o rozstawie osi składowych wynoszącym 100 cm, względem nawierzchni półsztywnej (rys. 8.49) o grubości warstw asfaltowych wynoszącej 23 cm, z uwzględnieniem dwóch faz pracy (faza I odnosi się do sytuacji, w której podbudowa z chudego betonu nie jest spękana, a faza II do sytuacji w której nastąpiło już spękanie chudego betonu, a konstrukcja nawierzchni ma cechy konstrukcji podatnej) oraz nawierzchni sztywnej (rys. 8.50).



Rys. 8.49. Zmiana współczynnika agresywności osi wielokrotnych, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej, okresu eksploatacji oraz fazy pracy (faza I – podbudowa z chudego betonu nie spękana, faza II – podbudowa z chudego betonu spękana), dla nawierzchni półsztywnej.



Rys. 8.50. Zmiana współczynnika agresywności osi wielokrotnych, w zależności od obciążenia osi wielokrotnej i okresu eksploatacji, dla nawierzchni sztywnej.

Równania agresywności osi wielokrotnych względem nawierzchni podatnych, wyznaczone dla krzywych potęgowych przedstawionych na rysunku 8.48 zamieszczono w tabeli 8.17, a w tabelach 8.18 i 8.19 zamieszczono równania agresywności osi wielokrotnych względem nawierzchni półsztywnej i sztywnej.

Tab. 8.17. Współczynniki agresywności osi wielokrotnych, dla nawierzchni podatnych, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

Model	Grubość warstw asfaltowych	Współczynnik agresywności osi
oII305s100	h = 8 cm	$r = (1,07332 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (8,73787 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (8,46903 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (8,40523 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (9,35928 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (9,11611 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
oII305s135	h = 8 cm	$r = (1,06706 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (7,89804 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (7,11462 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (6,72714 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (7,29319 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (6,95634 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s100	h = 8 cm	$r = (3,10570 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (2,35708 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (2,82352 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (3,22327 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (3,90941 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (4,07879 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s135	h = 8 cm	$r = (3,40991 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (2,32057 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (2,18796 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (2,33836 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (2,73750 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (2,76688 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s100	h = 8 cm	$r = (2,32055 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (1,87284 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (1,76258 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (1,80705 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (2,12460 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (2,39688 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s135	h = 8 cm	$r = (2,56526 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 12 cm	$r = (2,18226 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 18 cm	$r = (2,02328 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 23 cm	$r = (1,92589 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 27 cm	$r = (2,11648 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$
	h = 31 cm	$r = (2,07025 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$

Tab. 8.18. Współczynniki agresywności osi wielokrotnych, dla nawierzchni półsztywnej, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

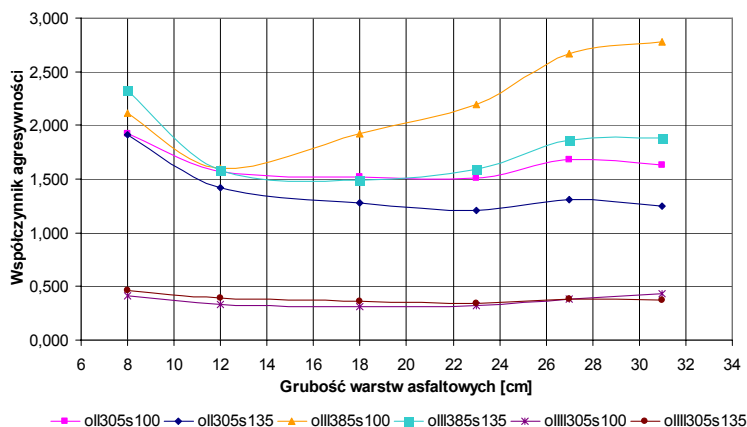
Model	Agresywność osi
oII305s100 – faza I	$r = (2,80038 \cdot 10^{-9}) \cdot P^{3,92991}$
oII305s100 – faza II	$r = (3,17647 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
oIII385s100 – faza I	$r = (4,09863 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{2,76138}$
oIII385s100 – faza II	$r = (1,21813 \cdot 10^{-7}) \cdot P^{3,29100}$
oIII305s100 – faza I	$r = (6,58201 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,12749}$
oIII305s100 – faza II	$r = (6,82912 \cdot 10^{-8}) \cdot P^{3,29100}$

Tab. 8.19. Współczynniki agresywności osi wielokrotnych, dla nawierzchni sztywnej, w średniorocznym (wiosenno - jesiennym) okresie eksploatacji (P – obciążenie osi).

Model	Agresywność osi
oII305s100	$r = (2,16588 \cdot 10^{-13}) \cdot P^{5,92539}$
oIII385s100	$r = (4,84038 \cdot 10^{-10}) \cdot P^{4,06076}$
oIII305s100	$r = (2,31756 \cdot 10^{-10}) \cdot P^{4,15251}$

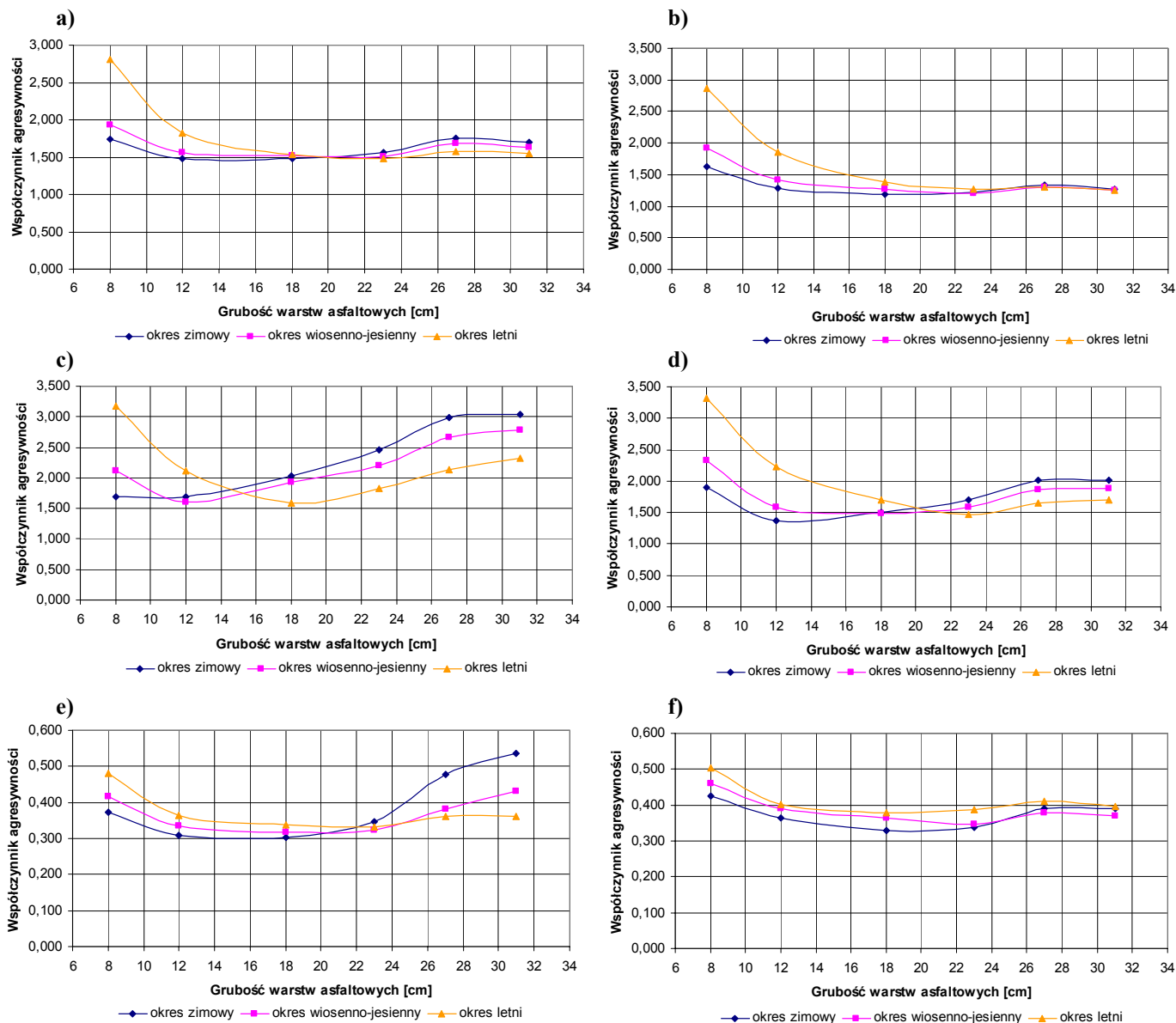
Wśród analizowanych osi największą agresywnością odznacza się oś potrójna, która jak już wcześniej wykazano jest przyczyną powstawania największych szkód zmęczeniowych w nawierzchni i to tym większym im mniejszy jest rozstaw osi składowych, nieco mniejszą agresywnością cechuje się oś podwójna o kołach pojedynczych, a najmniejszą oś podwójna o kołach bliźniaczych. Trzeba tutaj nadmienić, że oś podwójna o kołach bliźniaczych jest przede wszystkim stosowana jako oś napędowa w pojazdach ciężarowych (a więc zarówno w samochodach ciężarowych jak i ciągnikach siodłowych), a oś podwójna o kołach pojedynczych znajduje zastosowanie przede wszystkim jako oś ciągniona w przyczepach, w zespołach pojazdów pięcio- i sześcioposiowych.

Analogicznie jak w przypadku osi pojedynczych, przeprowadzono również analizę zmian współczynników agresywności, w zależności od grubości warstw asfaltowych wbudowanych w konstrukcję nawierzchni, przy stałym obciążeniu osi składowej wynoszącym 80 kN (rys. 8.51 i 8.52). Jednak w przeciwieństwie do osi pojedynczych, w większości przypadków współczynnik agresywności osi wielokrotnych nie zmienia się w sposób liniowy wraz ze zmianą grubości warstw asfaltowych. Wykresy przyjmują kształt „siodła”, co oznacza, że analizowane osi wielokrotne wykazują większe niekorzystne oddziaływania w stosunku do osi obliczeniowej (porównawczej-referencyjnej) w przypadku nawierzchni o grubościach warstw asfaltowych mniejszych od 12 cm oraz nawierzchni o grubościach przekraczających 27 cm. Osie tego typu nie powinny być zatem opisywane za pomocą osi porównawczej, gdyż niszczący wpływ osi wielokrotnych, ulega znacznym wahaniom wywołanym zmianą grubości warstw asfaltowych.



Rys. 8.51. Zmiany współczynnika agresywności osi wielokrotnych w zależności od grubości warstw asfaltowych, przy obciążeniu 80 kN na oś składową.

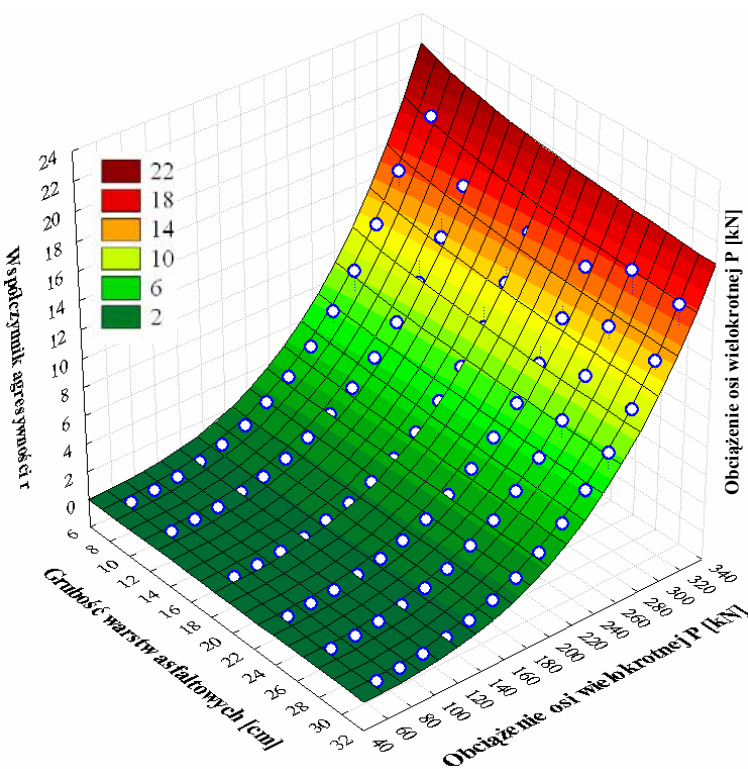
Rysunek 8.51 wskazuje również na to, że największe różnice w agresywności osi wielokrotnych widoczne są w przypadku osi potrójnej, o rozstawie osi 100 cm. Generalnie oś tego typu wykazuje wzrost agresywności wraz ze wzrostem grubości warstw asfaltowych. Najmniejsze różnice w agresywności osi wielokrotnych są widoczne w przypadku osi podwójnej o kołach bliźniaczych.



Rys. 8.52. Zmiany współczynnika agresywności osi wielokrotnych w zależności od grubości warstw asfaltowych i okresu eksploatacji, przy obciążeniu 80 kN przypadającym na oś składową:

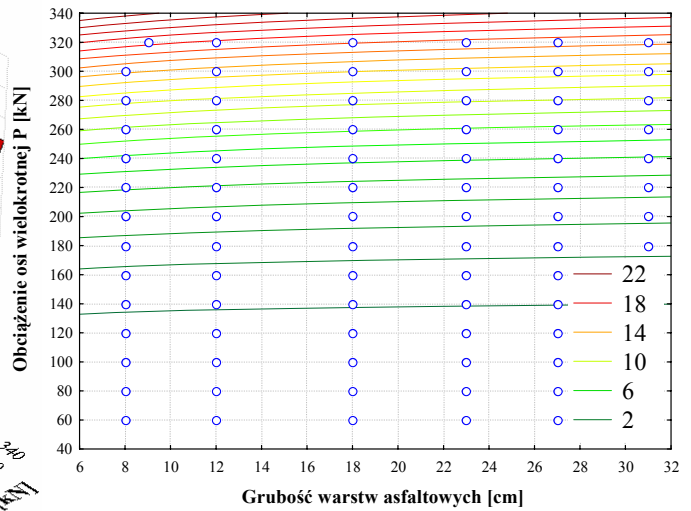
- a) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 100 cm,
- b) osi podwójnej o kołach pojedynczych oIII305 i rozstawie osi 135 cm
- c) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 100 cm,
- d) osi potrójnej o kołach „Super Single” oIII385 i rozstawie osi 135 cm,
- e) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 100 cm.
- f) osi podwójnej o kołach bliźniaczych oIII305 i rozstawie osi 135 cm.

Z rysunków 8.51 i 8.52 wynika, że wartości współczynników agresywności osi wielokrotnych przy takim samym obciążeniu ulegają zmianie wraz ze zmianą grubością nawierzchni. A zatem, wartości współczynników agresywności, są podobnie jak szkody zmęczeniowe, zależne od obciążenia osi wielokrotnej P oraz grubości nawierzchni (w przypadku nawierzchni podatnych od grubości warstw asfaltowych). Zależność tę obrazują rysunki 8.53 ÷ 8.58 oraz odpowiadające im równania (8.33 ÷ 8.38).



$$r^{oII305s100} = 1,202 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,10386} \cdot P^{3,29595} \quad (8.33)$$

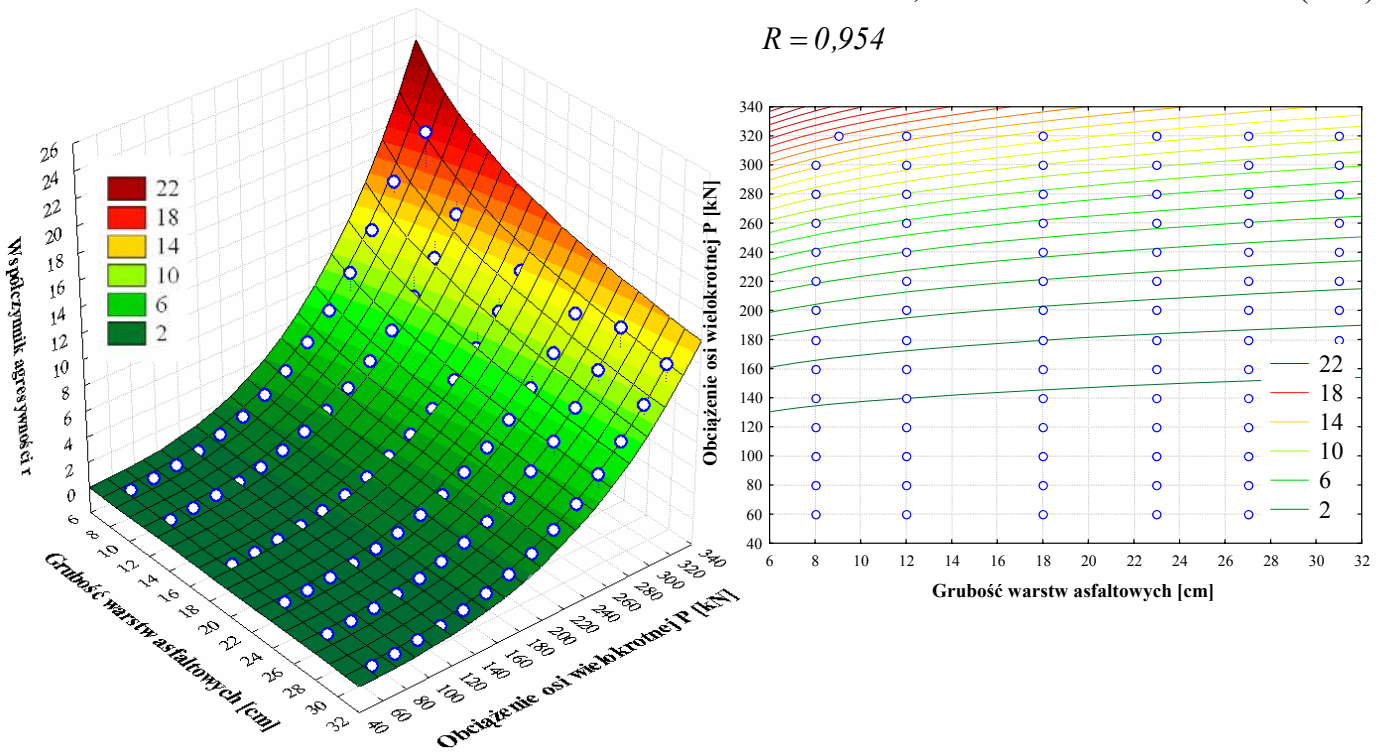
$$R = 0,955$$



Rysunek 8.53. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach pojedynczych (rozstaw 100 cm) i szerokości opon 305 mm (model oII305s100) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{oII305s135} = 1,757 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,32729} \cdot P^{3,31212} \quad (8.34)$$

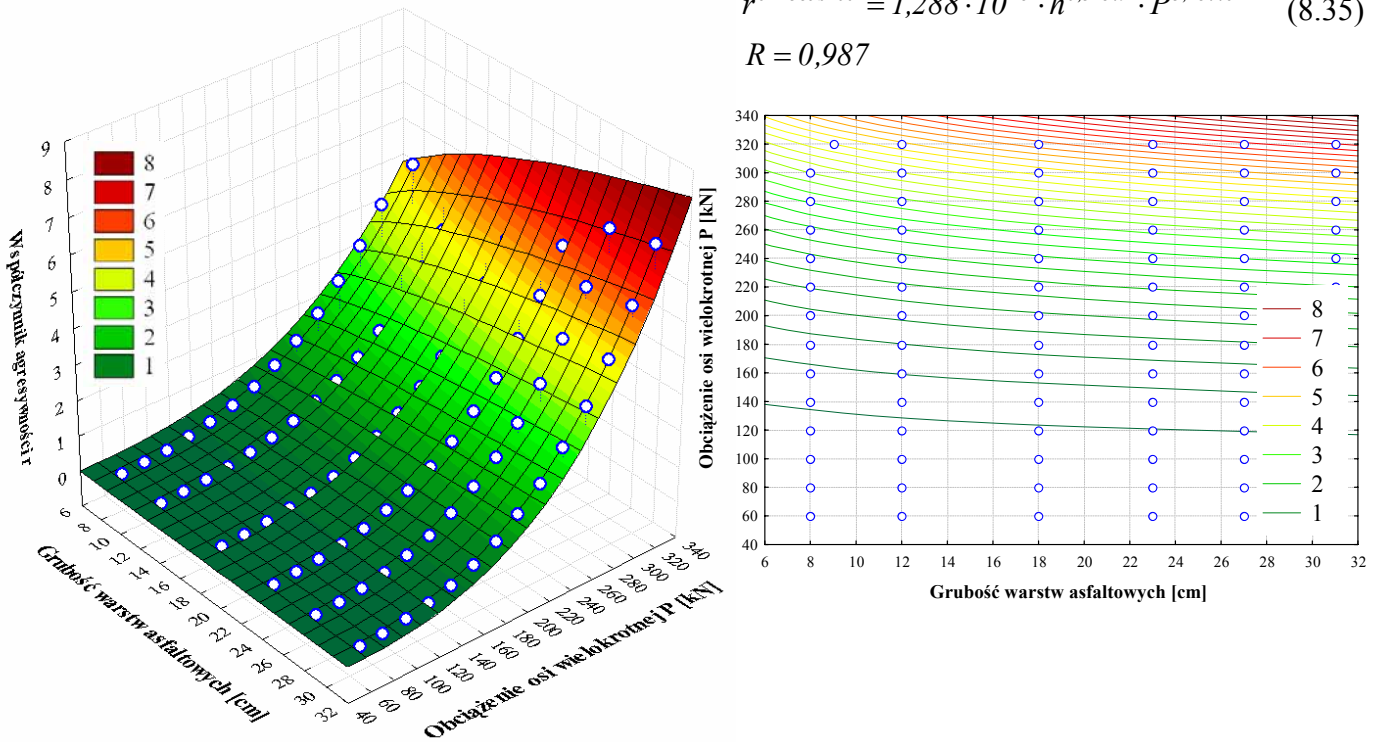
$$R = 0,954$$



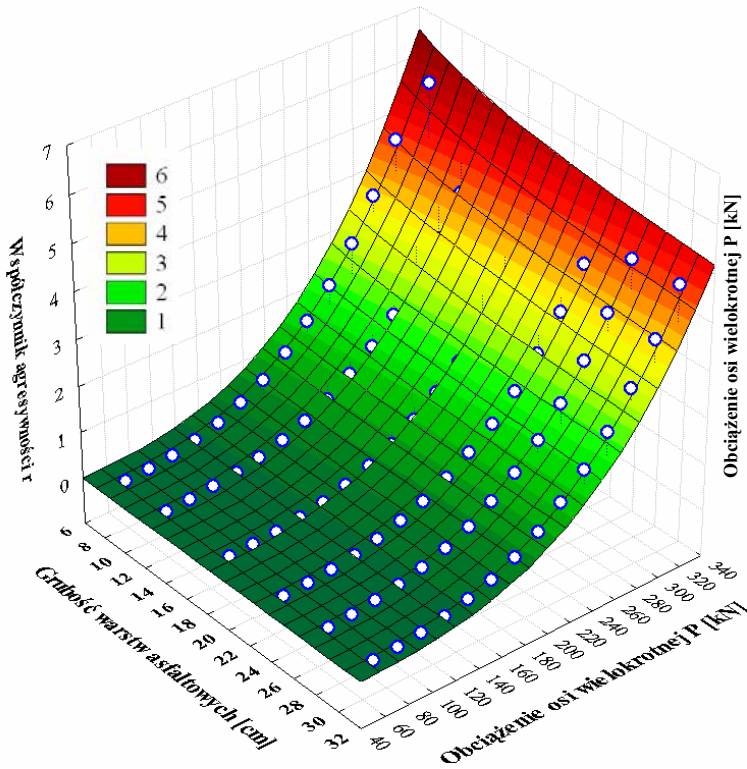
Rysunek 8.54. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach pojedynczych (rozstaw 135 cm) i szerokości opon 305 mm (model oII305s135) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{oIII385s100} = 1,288 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,32849} \cdot P^{3,28446} \quad (8.35)$$

$$R = 0,987$$

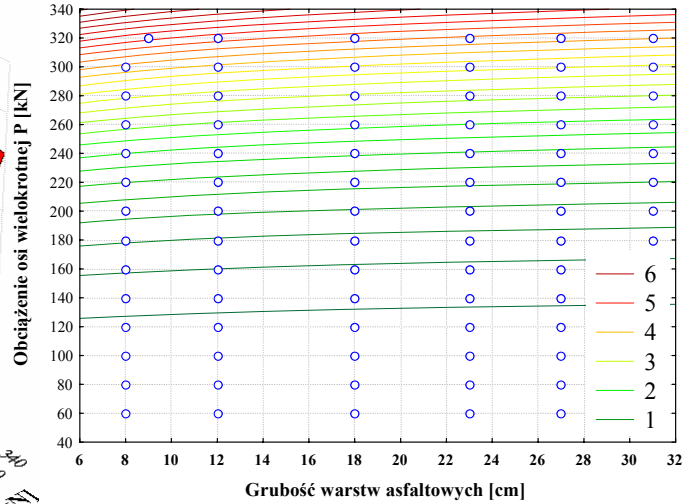


Rysunek 8.55. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi potrójnej o kołach pojedynczych typu „Super Single”(rozstaw 100 cm) i szerokości opon 385 mm (model oIII385s100) i grubości warstw asfaltowych

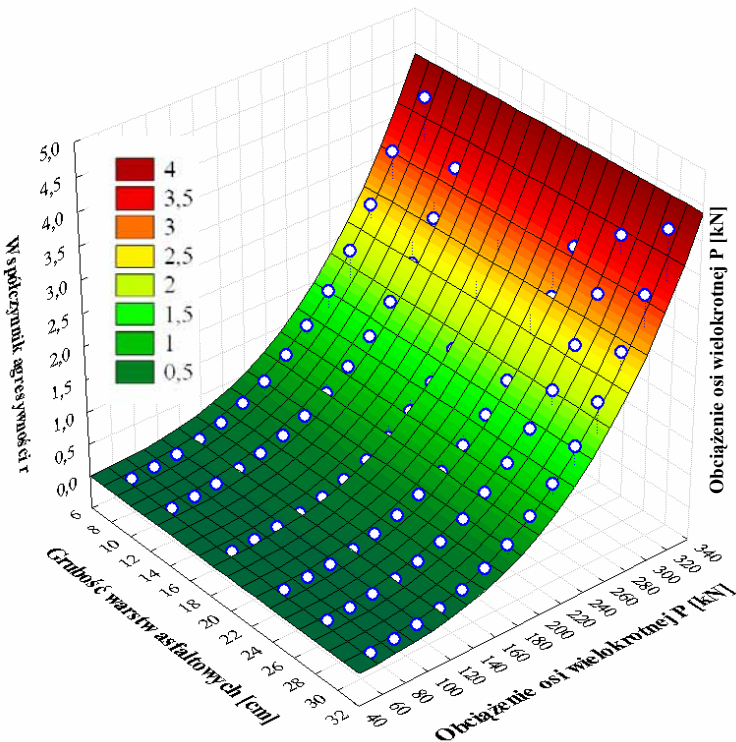


$$r^{oIII385s135} = 3,780 \cdot 10^{-8} \cdot h^{-0,13974} \cdot P^{3,29737} \quad (8.36)$$

$$R = 0,981$$

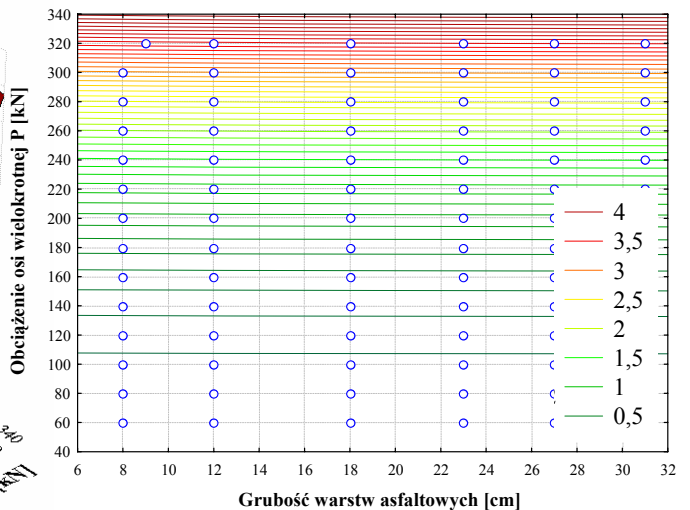


Rysunek 8.56. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi potrójnej o kołach pojedynczych typu „Super Single”(rozstaw 135 cm) i szerokości opon 385 mm (model oIII385s135) i grubości warstw asfaltowych



$$r^{oIII305s100} = 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P^{3,29061} \quad (8.37)$$

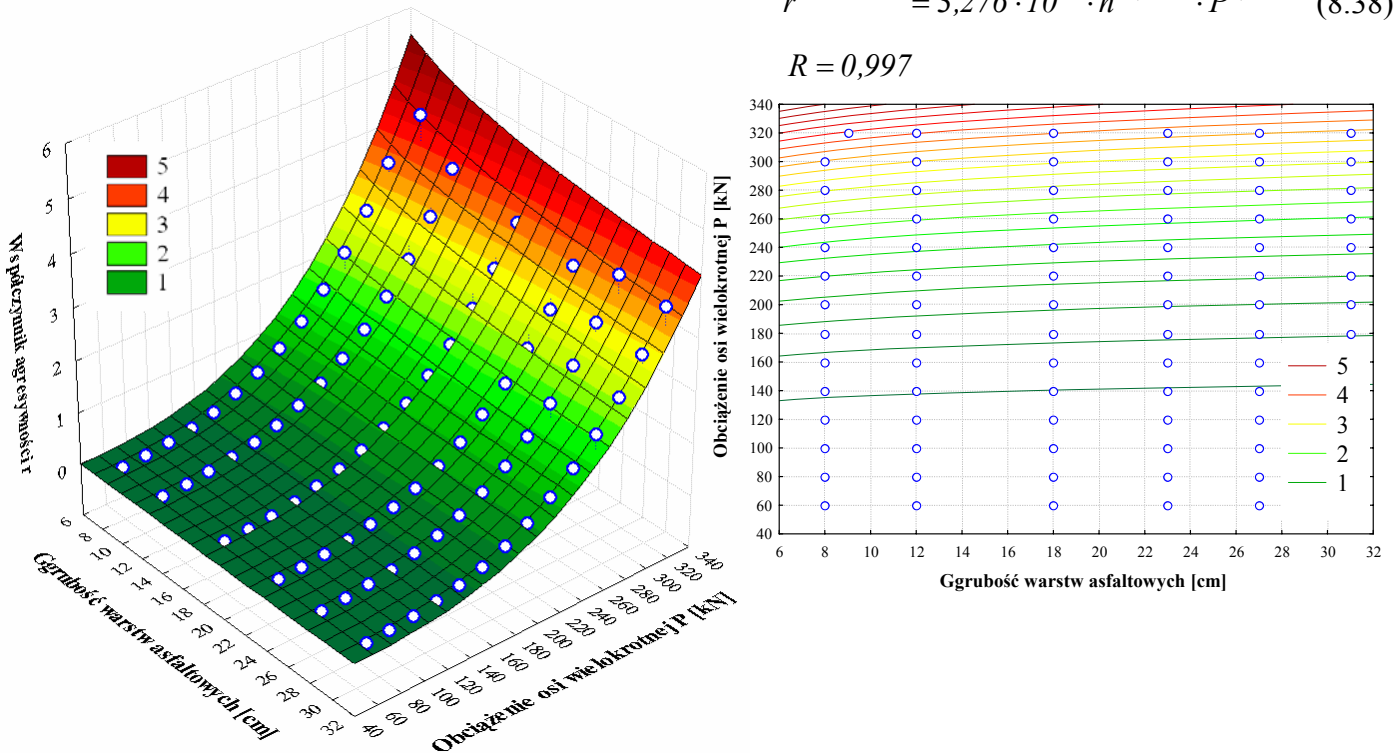
$$R = 0,986$$



Rysunek 8.57. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach bliźniaczych (rozstaw 100 cm) i szerokości opon 305 mm (model oIII305s100) i grubości warstw asfaltowych.

$$r^{oIII305s135} = 3,276 \cdot 10^{-8} \cdot h^{-0,16535} \cdot P^{3,29988} \quad (8.38)$$

$$R = 0,997$$



Rysunek 8.58. Zależność wartości współczynnika agresywności od obciążenia P [kN] osi podwójnej o kołach bliźniaczych (rozstaw 135 cm) i szerokości opon 305 mm (model oIII305s135) i grubości warstw asfaltowych.

8.4.3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała różnice w wartościach oddziaływania różnych osi wielokrotnych (osie podwójne o kołach pojedynczych, osie podwójne o kołach bliźniaczych i osie potrójne o kołach pojedynczych szerokich typu „Super Single”) na nawierzchnie drogowe oraz wskazała na dużą agresywność osi potrójnej stosowanej w naczepach ciągników siodłowych. Stwierdzono również, że osie wielokrotne pojazdów nie powinny być rozkładane na poszczególne osie składowe z uwagi na wielkości wywoływanych przez nie odkształceń i naprężeń w nawierzchniach drogowych, a zatem wielkość szkodliwego oddziaływania pojazdów nie zależy tylko od liczby osi i ich nacisku, ale również od ich konfiguracji.

Ze względu na niewielkie różnice w wielkościach nacisków osi składowych osi wielokrotnych i statystyk je opisujących (wartość oczekiwana, odchylenie standardowe, itp.), analizę prowadzono przy założeniu równomiernego rozkładu na poszczególne osie składowe obciążenia przypadającego na oś wielokrotną,

W efekcie prowadzonych analiz, wartości szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności (a więc oddziaływań osi odniesionych do osi porównawczej – referencyjnej),

tak jak w przypadku osi pojedynczych, określono poprzez podanie równań zależnych jedynie od obciążenia danej osi wielokrotnej, co pozwala na łatwe wyznaczenie wartości szkody zmęczeniowej i agresywności danej osi wielokrotnej przy dowolnym jej obciążeniu.

8.5. Wpływ sylwetek pojazdów

8.5.1. Wpływ pojazdów ciężarowych osi na wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach drogowych

W Polsce, wpływ pojazdów na nawierzchnię drogowe określają współczynniki przeliczeniowe (agresywności) grup pojazdów na osi obliczeniowe 100 lub 115 kN, które informują o wielkości szkodliwego oddziaływania danej grupy pojazdów w stosunku do szkodliwego oddziaływania osi obliczeniowej (przez szkodliwe oddziaływanie należy rozumieć wartość wywoływanej szkody zmęczeniowej w nawierzchni przejściem jednego pojazdu bądź jednej osi o obciążeniu 100 lub 115 kN). Współczynniki przeliczeniowe grup pojazdów na osie 100 kN przedstawiono w tabeli 3.1.

Grupy pojazdów stanowią dosyć duże przybliżenie występującej struktury rodzajowej pojazdów ciężkich, gdyż w samej tylko grupie samochodów ciężarowych z przyczepami mieszczą się zespoły pojazdów (4 typowe sylwetki) oraz pojazdy członowe (6 sylwetek), które w różnym stopniu oddziałują na nawierzchnie drogowe. Nie pozwalają one zatem (współczynniki przeliczeniowe), na jednoznacznie określenie, jaki niszczący wpływ na nawierzchnię wywiera np. ciągnik siodłowy czteroosiowy, i czy agresywność takiego pojazdu jest np. większa od samochodu ciężarowego dwuosioowego z przyczepą dwuosioową oraz jaka jest jego wielkość oddziaływań w stosunku do osi obliczeniowej. Aby móc odpowiedzieć na te pytania, należy dla rozpoznanych sylwetek pojazdów ciężarowych określić wartość szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach oraz ich agresywności w stosunku do osi porównawczej-obliczeniowej (model kIr160).

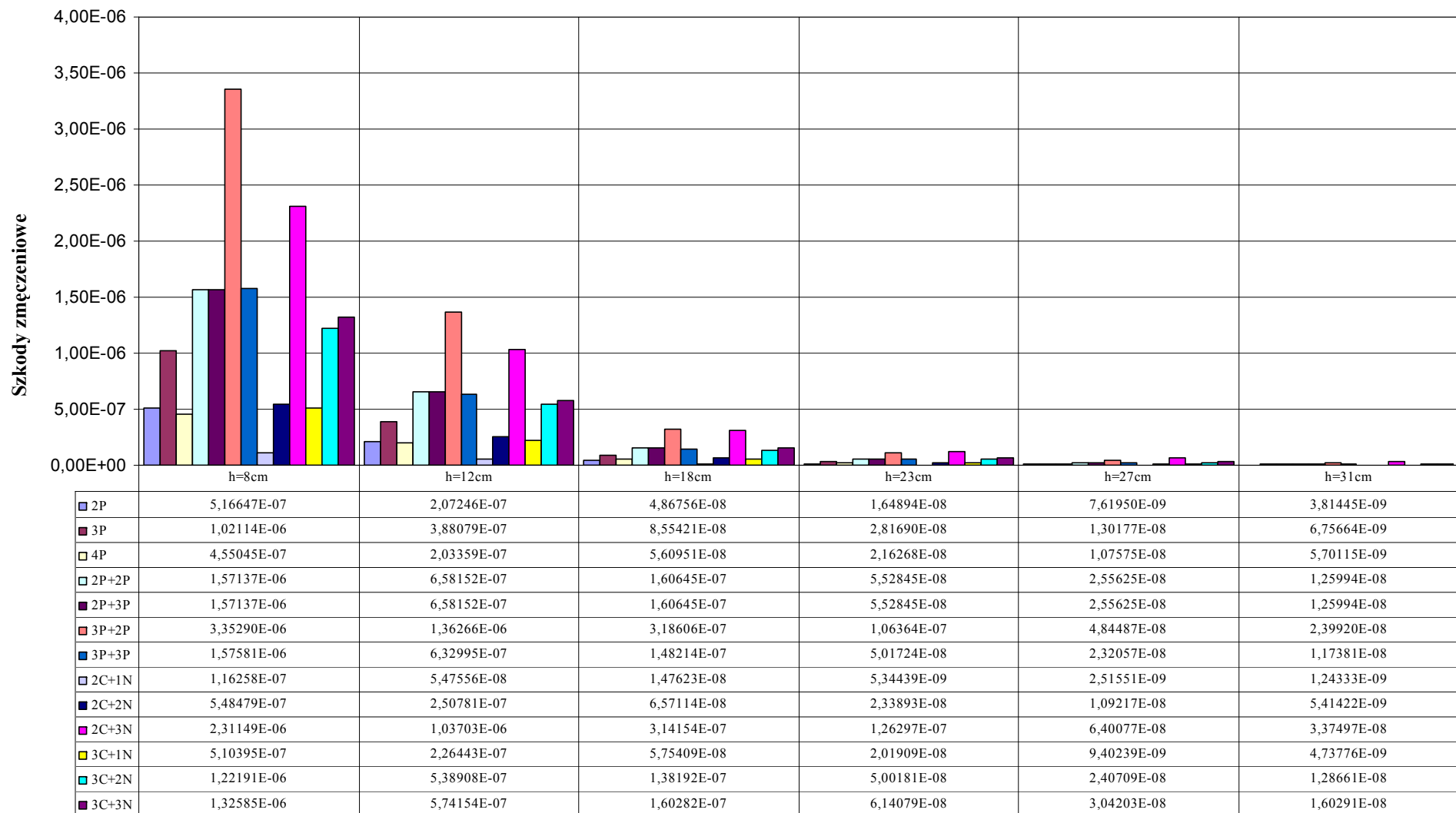
Mając wyznaczone szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchniach drogowych przejściem osi pojedynczych i wielokrotnych, wykorzystując zasadę superpozycji, wyznaczono w pracy wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach przejściem poszczególnych sylwetek pojazdów. Wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach przejściem trzynastu rozpoznanych i sklasyfikowanych sylwetek pojazdów ciężarowych wyznaczono wykorzystując następujące modele obliczeniowe osi składowych pojazdów:

- 2P - kI245 + kII305
- 3P - kI245 + oIII305
- 4P - oII305 + oIII305
- 2P+2P - kI245 + kII305 + kI305 + kI305
- 2P+3P - kI245 + kII305 + kI305 + oII305
- 3P+2P - kI245 + oIII305 + kI305 + kI305
- 3P+3P - kI245 + oIII305 + kI305 + oII305
- 2C+1N - kI305 + kII305 + kII305
- 2C+2N - kI305 + kII305 + oIII305
- 2C+3N - kI305 + kII305 + oIII385
- 3C+1N - kI305 + oIII305 + kII305
- 3C+2N - kI305 + oIII305 + oIII305
- 3C+3N - kI305 + oIII305 + oIII385

Na rysunkach 8.59 ÷ 8.61 przedstawiono szkody zmęczeniowe wyznaczone dla nawierzchni podatnych, wywołane przejściem poszczególnych sylwetek pojazdów, o naciskach osi średnich, dopuszczalnych i maksymalnych. Pomimo tego, że w punkcie 8.4 analizowano osie wielokrotne przy różnych rozstawach osi składowych (100 cm i 135 cm), to wielkość szkodliwego oddziaływania całych sylwetek pojazdów wyznaczono dla rozstawu osi, w którym wywoływana jest większa szkoda zmęczeniowa, a więc dla rozstawu osi 100cm.

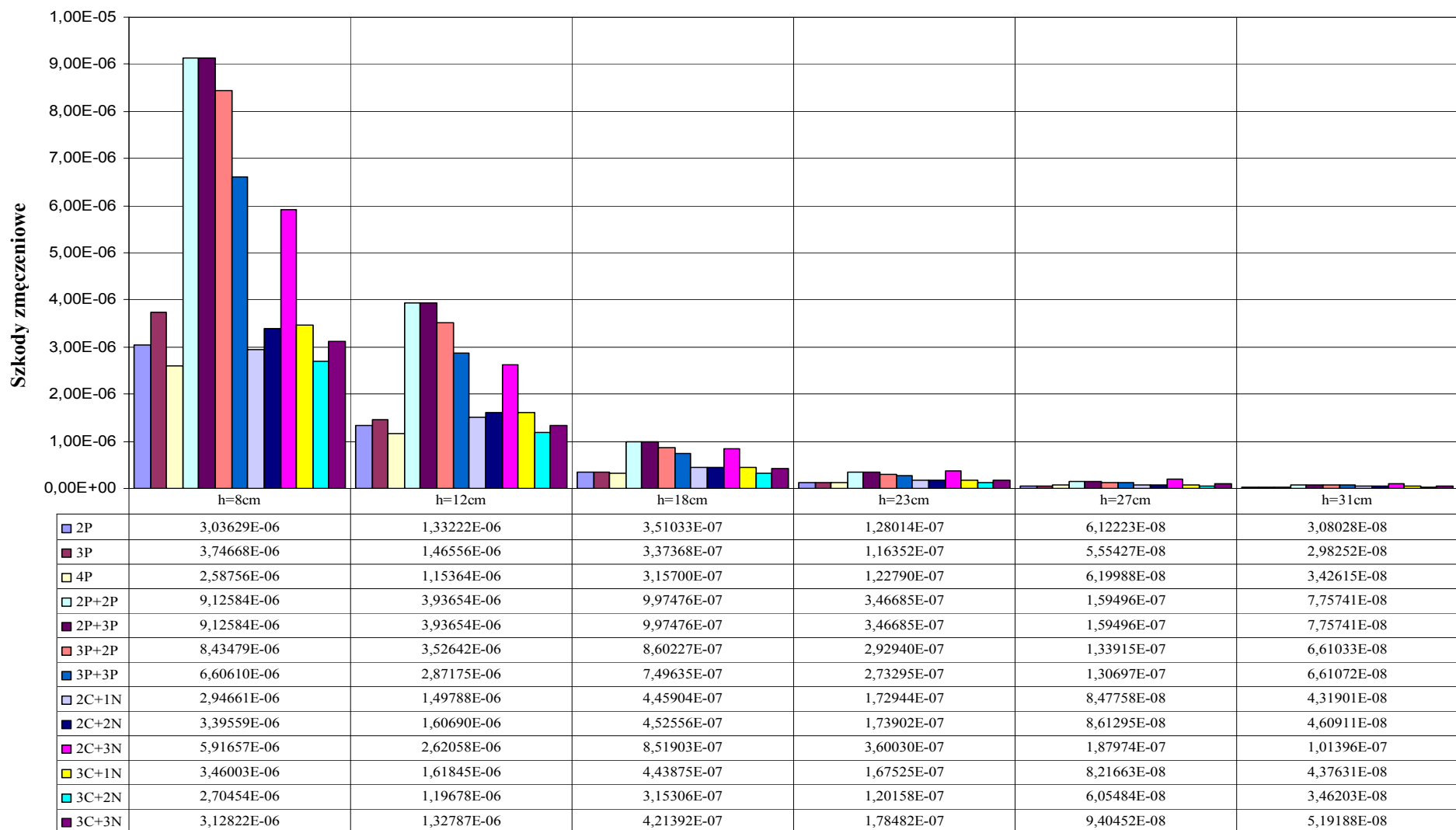
Przy obciążeniach osi średnich, wyróżnia się kilka sylwetek pojazdów będących przyczyną powstawania szczególnie dużych szkód zmęczeniowych, a m.in. pojazd 3P (samochód ciężarowy trzyosiowy, grupa pojazdów bez przyczep), pojazd 3P+2P (zespół pojazdów pięcioosiowy: trójosiowy samochód i dwuosiowa przyczepa, grupa zespołów pojazdów) oraz 2C+3N (ciągnik siodłowy pięcioosiowy, grupa pojazdów członowych). Sylwetki 3P+2P i 2C+3N również w przypadku obciążeń dopuszczalnych również dominują w swoich grupach, jednak w grupie zespołów pojazdów (samochody ciężarowe z przyczepami) największymi wywołanymizkodami zmęczeniowymi w nawierzchniach odznaczają się już zespoły pojazdów czteroosiowych (2P+2P). Różnica pomiędzy nimi, a sylwetkami 3P+2P jest niewielka i nie przekracza 5%.

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -



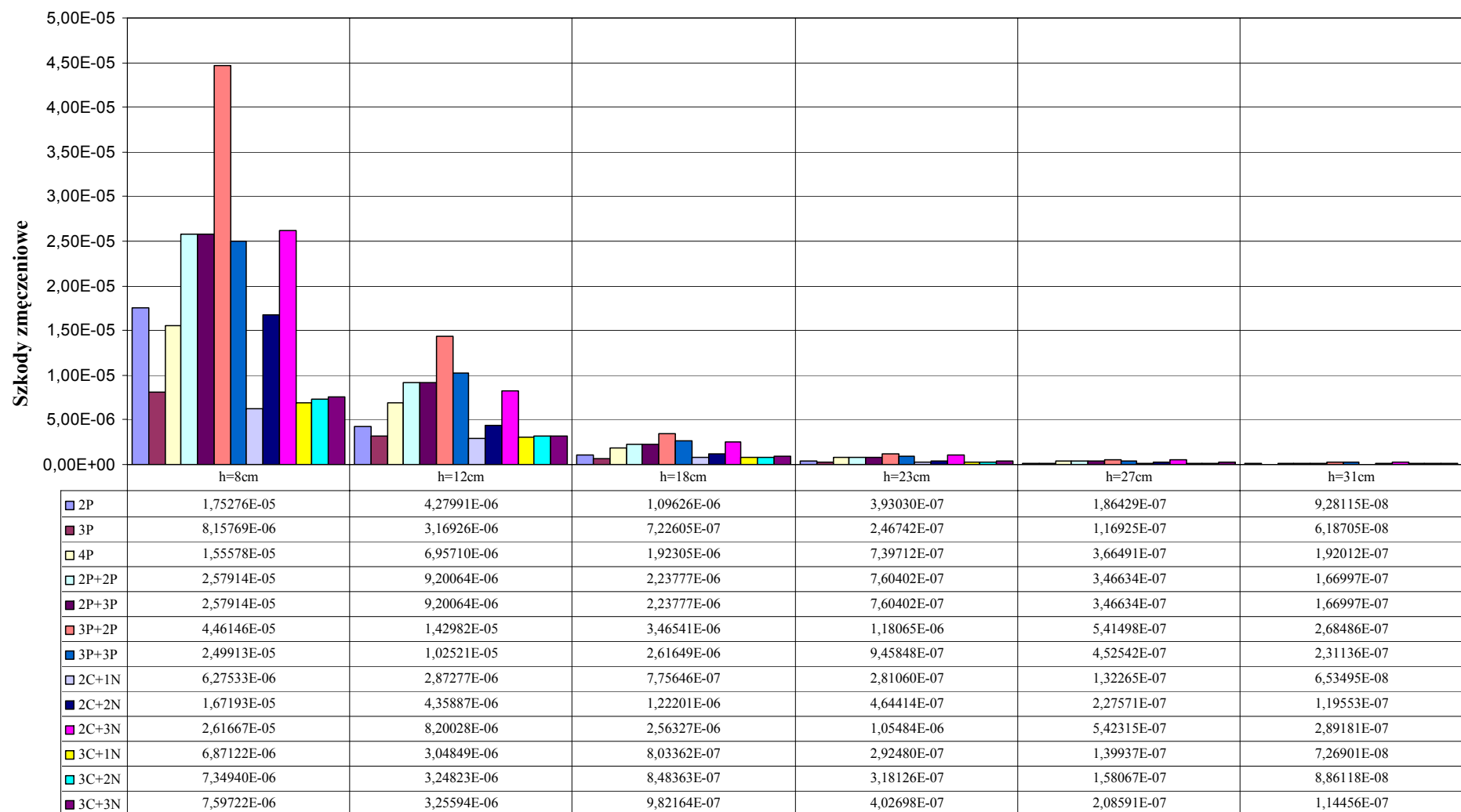
Rys. 8.59. Szkody zmęczeniowe w nawierzchniach drogowych o różnych grubościach warstw asfaltowych wywołane przejściem sylwetek pojazdów o średnich naciskach osi i rozstawie kół w osiach wielokrotnych s=100cm.

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -



Rys. 8.60. Szkody zmęczeniowe w nawierzchniach drogowych o różnych grubościach warstw asfaltowych wywołane przejściem sylwetek pojazdów o dopuszczalnej masie całkowitej i rozstawie kół w osiach wielokrotnych $s=100\text{cm}$.

- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -



Rys. 8.61. Szkody zmęczeniowe w nawierzchniach drogowych o różnych grubościach warstw asfaltowych wywołane przejściem sylwetek pojazdów o największych zarejestrowanych naciskach osi i rozstawie kół w osiach wielokrotnych s=100cm.

Generalnie wśród pojazdów ciężarowych, w zakresie obciążeń dopuszczalnych, największym szkodliwym oddziaływaniem na nawierzchnie podatne charakteryzują się zespoły pojazdów i pojazdy członowe pięcioosiowe o dopuszczalnej masie całkowitej wynoszącej 40 t oraz zespoły pojazdów czteroosiowe o dopuszczalnej masie 36 ton. Należy tutaj zaznaczyć, że wzrost liczby osi do sześciu w pojeździe (np. sylwetki 3P+3P, 3C+3N), nie powoduje wzrostu generowanych szkód zmęczeniowych. W pojeździe pięcioosiowym, ta sama masa pojazdu rozkłada się na pięć osi, co daje w efekcie większy nacisk osi składowy.

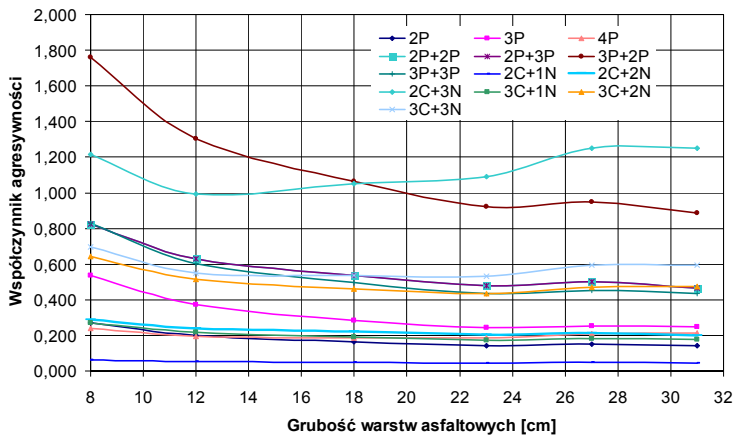
8.5.2. Współczynniki agresywności sylwetek pojazdów

Podobnie jak w przypadku szkód zmęczeniowych wyznaczonych w pkt. 8.5.1, obliczono również współczynniki agresywności poszczególnych sylwetek pojazdów (a więc ich szkodliwy wpływ w odniesieniu do osi obliczeniowej o nacisku 100 kN – model kIr160).

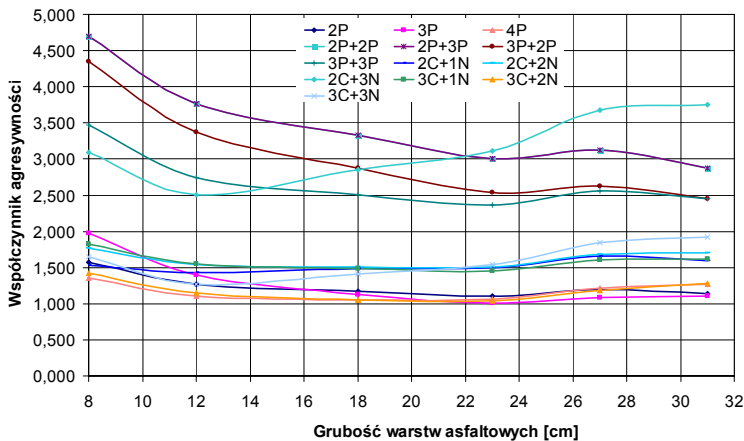
Na rysunkach 8.62 ÷ 8.64 przedstawiono współczynniki agresywności pojazdów przy naciskach osi średnich, dopuszczalnych i maksymalnych, przy rozstawie osi składowych 100 cm. Jak widać, współczynniki agresywności poszczególnych sylwetek pojazdów przy naciskach osi średnich (poza nawierzchniami o najmniejszej grubości) nie przekraczają generalnie jedności, co świadczy o tym, że wpływ takiej sylwetki na nawierzchnie nie jest większy niż wpływ jednego przejścia osi obliczeniowej o nacisku 100 kN. Jednak i tutaj można zauważyć że największą agresywnością odznaczają się sylwetki 3P+2P oraz 2C+3N.

W przypadku, gdy naciski osi poszczególnych sylwetek i ich masy całkowite wzrosną do wartości dopuszczalnych (rys. 8.63), to agresywności pojazdów ciężarowych (2P, 3P i 4P) zbliżają się do 2 (co oznacza, że ich wpływ na nawierzchnię jest prawie dwukrotnie większy od wpływu, jaki wywiera przejście jednej osi obliczeniowej o nacisku 100 kN), agresywności zespołów pojazdów przekraczają 4 (szczególnie odnosi się to do pojazdów cztero i pięcioosiowych: 2P+2P, 3P+2P i 2P+3P), podobnie jak agresywności pojazdów członowych (przede wszystkim 2C+3N). Wzrost obciążeń do największych zarejestrowanych wartości owocuje uzyskaniem współczynników agresywności sięgających 18 (sylwetka 3P+2P) w grupie zespołów pojazdów oraz przekraczających 10 (sylwetka 2C+3N) w grupie pojazdów członowych, co oznacza, że przejście jednego takiego pojazdu z takim przekroczeniem nacisków osi, (a zatem i ich masy całkowitej) jest osiemnastokrot-

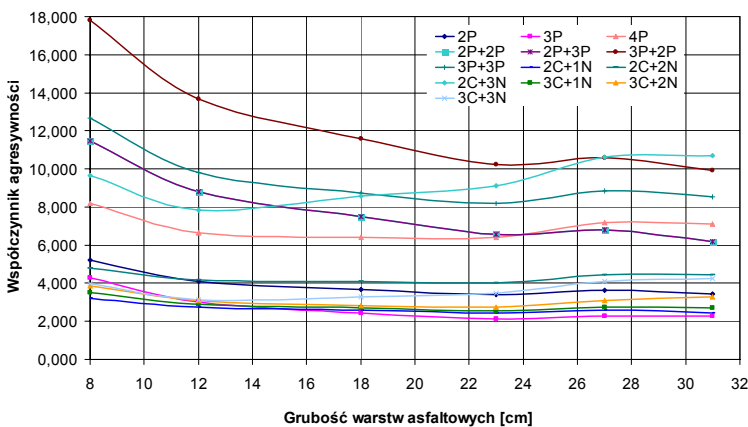
nie (sylwetka 3P+2P) oraz ponad dziesięciokrotnie (sylwetka 2C+3N) bardziej szkodliwe względem nawierzchni, niż przejście jednej osi obliczeniowej o nacisku 100 kN.



Rys. 8.62. Zmiany współczynnika agresywności sylwetek pojazdów o średnich naciskach osi, w zależności od grubości warstw asfaltowych, przy rozstawie osi 100cm.



Rys. 8.63. Zmiany współczynnika agresywności sylwetek pojazdów o dopuszczalnych naciskach osi, w zależności od grubości warstw asfaltowych, przy rozstawie osi 100cm.



Rys. 8.64. Zmiany współczynnika agresywności sylwetek pojazdów o największych zarejestrowanych naciskach osi, w zależności od grubości warstw asfaltowych, przy rozstawie osi 100cm.

Na rysunkach 8.62 ÷ 8.64 wyraźnie zaznacza się wpływ grubości warstw asfaltowych na wartość współczynników agresywności poszczególnych sylwetek pojazdów. W nawierzchniach o grubościach warstw asfaltowych przekraczających 12 cm, obserwuje się wzrost współczynników agresywności sylwetek pojazdów w których występuje oś wielokrotna (szczególnie oś potrójna w ciągnikach siodłowych z naczepami trójosiowymi

2C+3N), wraz ze wzrostem grubości warstw asfaltowych. Takie zachowanie agresywności pojazdów jest spowodowane wzrostem wywoływanych odkształceń w warstwach asfaltowych wraz ze wzrostem ich grubości przy obciążeniu osią wielokrotną.

W oparciu o zależności opisujące wartości współczynników agresywności wyznaczone w pkt.8.3.2 dla osi pojedynczych oraz w pkt 8.4.2 dla osi wielokrotnych, współczynniki agresywności sylwetek pojazdów można zapisać również w postaci:

$$- 2P: r^{2P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} \quad (8.39)$$

$$- 3P: r^{3P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} \quad (8.40)$$

$$- 4P: r^{4P} = 1,202 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,10386} \cdot P_{o\acute{s}1i2}^{3,29595} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}3i4}^{3,29061} \quad (8.41)$$

$$- 2P+2P: r^{2P+2P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}3}^{3,29038} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}4}^{3,29038} \quad (8.42)$$

$$- 2P+3P: r^{2P+3P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}3}^{3,29038} + 1,202 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,10386} \cdot P_{o\acute{s}4i5}^{3,29595} \quad (8.43)$$

$$- 3P+2P: r^{3P+2P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}4}^{3,29038} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}5}^{3,29038} \quad (8.44)$$

$$- 3P+3P: r^{3P+3P} = 6,491 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,8751} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,31308} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}4}^{3,29038} + 1,202 \cdot 10^{-7} \cdot h^{-0,10386} \cdot P_{o\acute{s}5i6}^{3,29595} \quad (8.45)$$

$$- 2C+1N: r^{2C+1N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}3}^{3,29103} \quad (8.46)$$

$$- 2C+2N: r^{2C+2N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}3i4}^{3,29061} \quad (8.47)$$

$$- 2C+3N: r^{2C+3N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}2}^{3,29103} + 1,288 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,32849} \cdot P_{o\acute{s}3,4i5}^{3,28446} \quad (8.48)$$

$$- 3C+1N: r^{3C+1N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} + 1,730 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,68544} \cdot P_{o\acute{s}4}^{3,29103} \quad (8.49)$$

$$- 3C+2N: r^{3C+2N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}4i5}^{3,29061} \quad (8.50)$$

$$- 3C+3N: r^{3C+3N} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot P_{o\acute{s}1}^{3,29038} + 1,987 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,01006} \cdot P_{o\acute{s}2i3}^{3,29061} + 1,288 \cdot 10^{-8} \cdot h^{0,32849} \cdot P_{o\acute{s}4,5i6}^{3,28446} \quad (8.51)$$

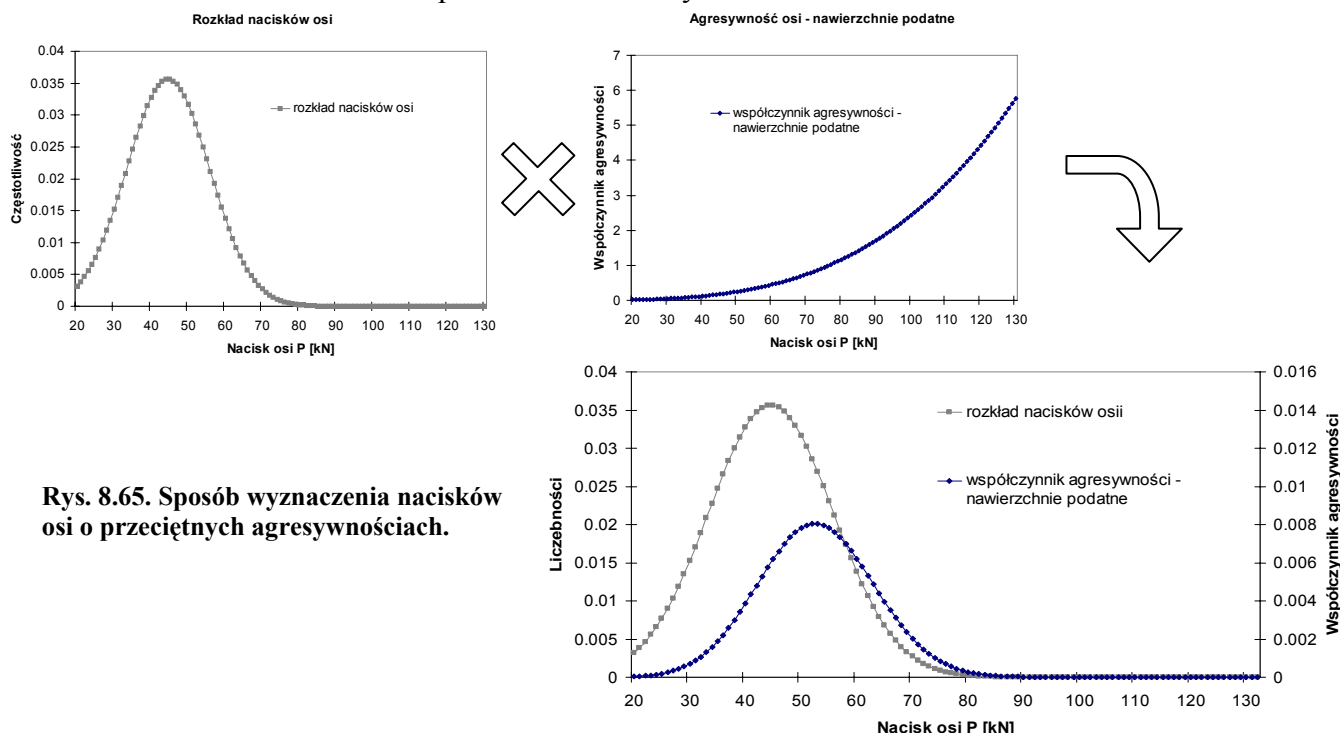
Pomimo tego, że współczynniki agresywności (przeliczeniowe) są zależne od grubości warstw nawierzchni drogowych, to można pokusić się również o próbę weryfikacji obowiązujących współczynników agresywności (przeliczeniowych na osie 100 kN, [94]). W tym celu konieczna jest znajomość:

- struktury rodzajowej pojazdów ciężarowych (czyli procentowego udziału poszczególnych sylwetek pojazdów w całkowitej liczbie pojazdów ciężarowych),
- wartości szkodliwego oddziaływania (szkody zmęczeniowej) i/lub współczynników agresywności rozpatrywanych sylwetek pojazdów.

Struktura rodzajowa pojazdów ciężarowych została już ustalona w punkcie 6.3, zatem na jej podstawie można przyjąć wagi dla poszczególnych sylwetek. Wagi te zostały przyjęte w celu określenia współczynników przeliczeniowych dla grup pojazdów, stanowiących średnią ważoną z poszczególnych sylwetek pojazdów, i wynoszą odpowiednio:

- samochody ciężarowe bez przyczep: sylwetka 2P=1,00
- samochody ciężarowe z przyczepami: sylwetka 2P+2P=0,11
sylwetka 2C+2N=0,24
sylwetka 2C+3N=0,65

W sytuacji, w której za wielkość szkodliwego oddziaływania dowolnego pojazdu odpowiedzialny jest nie tylko rozkład nacisków jego osi, ale również ich agresywność, konieczne jest jeszcze znalezienie takich nacisków osi, którym odpowiada przeciętna (a więc uwzględniająca liczebności) agresywność osi. Kolejność postępowania przy wyznaczaniu takich nacisków osi przedstawiono na rysunku 8.65.

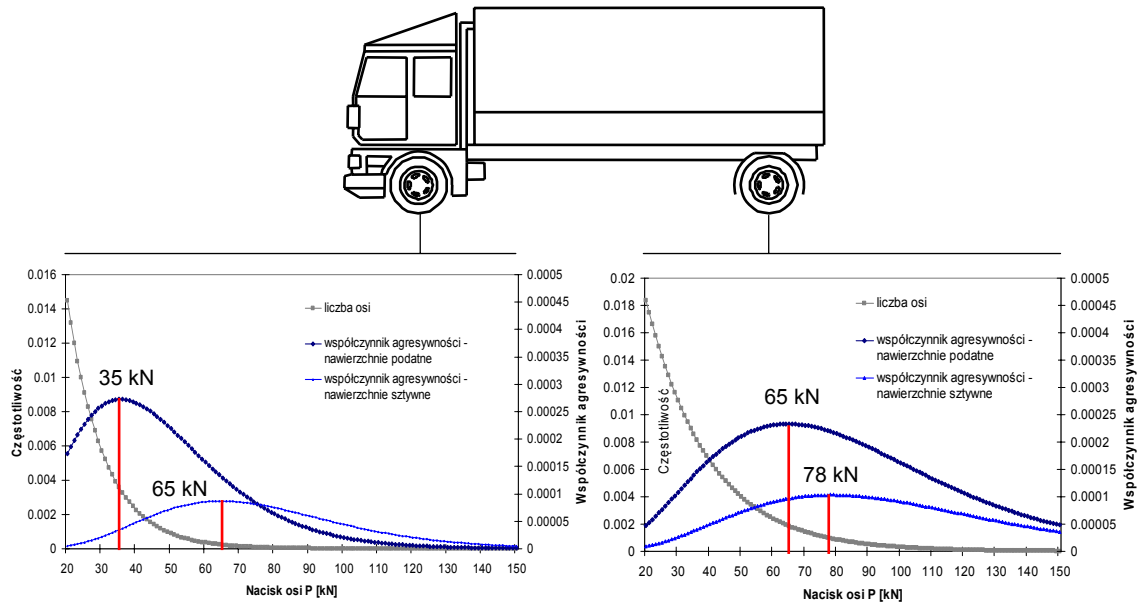


Rys. 8.65. Sposób wyznaczenia nacisków osi o przeciętnej agresywności.

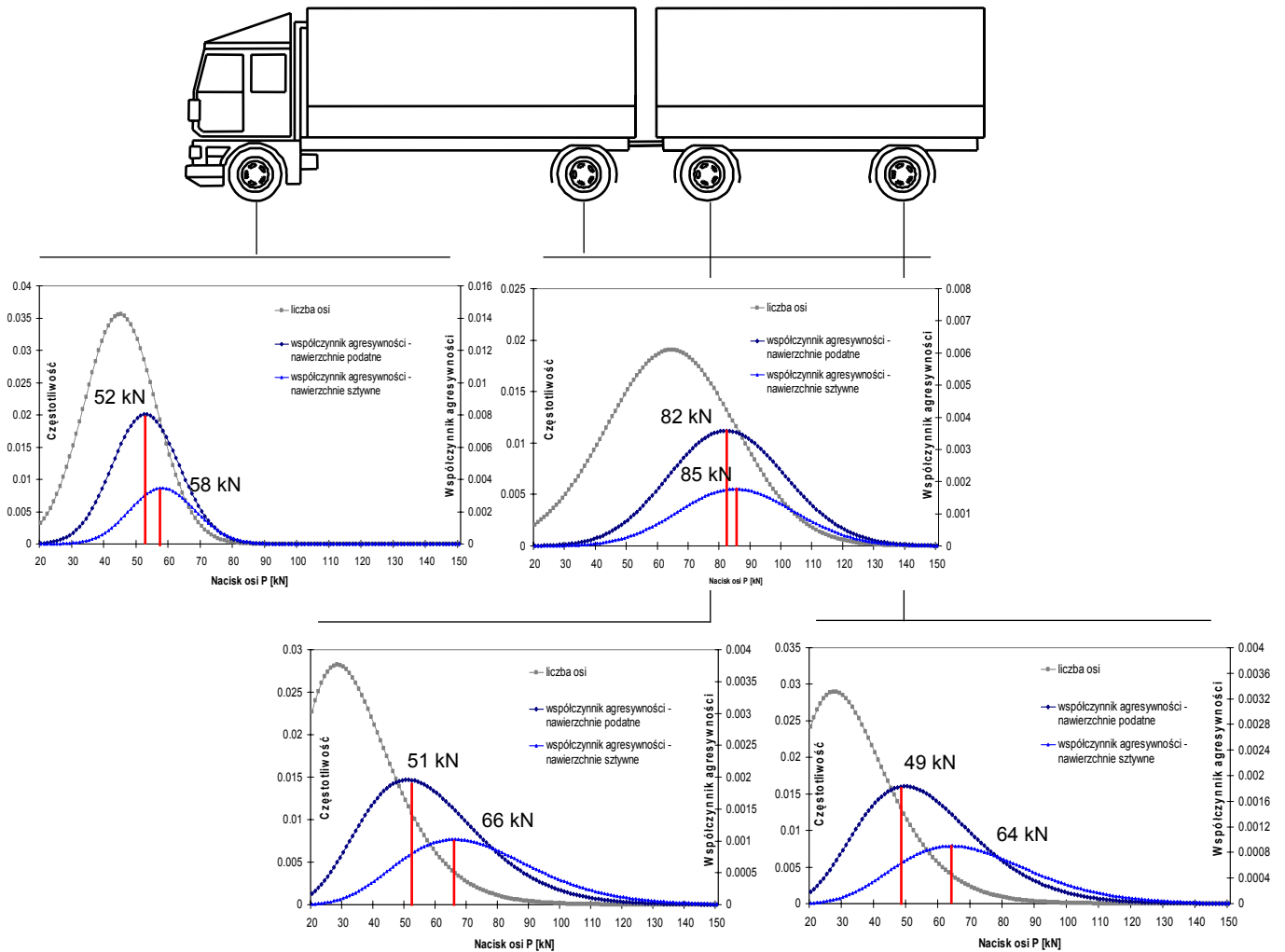
Tab. 8.20. Równania agresywności osi pojazdów –wartości średnioroczne.

Model	Konstrukcja nawierzchni (grubość warstw asfaltowych / grubość płyty betonowej) [cm]		r_i
kI245	Nawierzchnia podatna	h = 8 cm	$r_{kI245} = (9,38487 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,34145}$
		h = 12 cm	$r_{kI245} = (7,68960 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29057}$
		h = 18 cm	$r_{kI245} = (5,57918 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29203}$
		h = 23 cm	$r_{kI245} = (4,43852 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29322}$
		h = 27 cm	$r_{kI245} = (4,45243 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29068}$
		h = 31 cm	$r_{kI245} = (5,02959 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,23762}$
	Nawierzchnia sztywna	h = 23 cm	$r_{kI245} = 5,237 \cdot 10^{-12} \cdot p^{6,0}$
kI305	Nawierzchnia podatna	h = 8 cm	$r_{kI305} = (5,52567 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29061}$
		h = 12 cm	$r_{kI305} = (4,43169 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,28973}$
		h = 18 cm	$r_{kI305} = (3,84013 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29003}$
		h = 23 cm	$r_{kI305} = (3,34798 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,291000}$
		h = 27 cm	$r_{kI305} = (3,40693 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29066}$
		h = 31 cm	$r_{kI305} = (3,06851 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29057}$
	Nawierzchnia sztywna	h = 23 cm	$r_{kI305} = 2,718 \cdot 10^{-11} \cdot p^{5,5}$
kII305	Nawierzchnia podatna	h = 8 cm	$r_{kII305} = (1,43918 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29278}$
		h = 12 cm	$r_{kII305} = (1,40371 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,28938}$
		h = 18 cm	$r_{kII305} = (1,48086 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29126}$
		h = 23 cm	$r_{kII305} = (1,50756 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29134}$
		h = 27 cm	$r_{kII305} = (1,68328 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29142}$
		h = 31 cm	$r_{kII305} = (1,63479 \cdot 10^{-7}) \cdot p^{3,29100}$
	Nawierzchnia sztywna	h = 23 cm	$r_{kII305} = 2,923 \cdot 10^{-09} \cdot p^{4,0}$
oIII385s100	Nawierzchnia podatna	h = 8 cm	$r_{oIII385} = (3,10570 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 12 cm	$r_{oIII385} = (2,35708 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 18 cm	$r_{oIII385} = (2,82352 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 23 cm	$r_{oIII385} = (3,22327 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 27 cm	$r_{oIII385} = (3,90941 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 31 cm	$r_{oIII385} = (4,07879 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
	Nawierzchnia sztywna	h = 23 cm	$r_{oIII385} = 4,840 \cdot 10^{-10} \cdot p^{4,1}$
oIII305s100	Nawierzchnia podatna	h = 8 cm	$r_{oIII305} = (2,32055 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 12 cm	$r_{oIII305} = (1,87282 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 18 cm	$r_{oIII305} = (1,76258 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 23 cm	$r_{oIII305} = (1,80705 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 27 cm	$r_{oIII305} = (2,12460 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
		h = 31 cm	$r_{oIII305} = (2,39688 \cdot 10^{-8}) \cdot p^{3,29100}$
	Nawierzchnia sztywna	h = 23 cm	$r_{oIII305} = 2,318 \cdot 10^{-10} \cdot p^{4,2}$

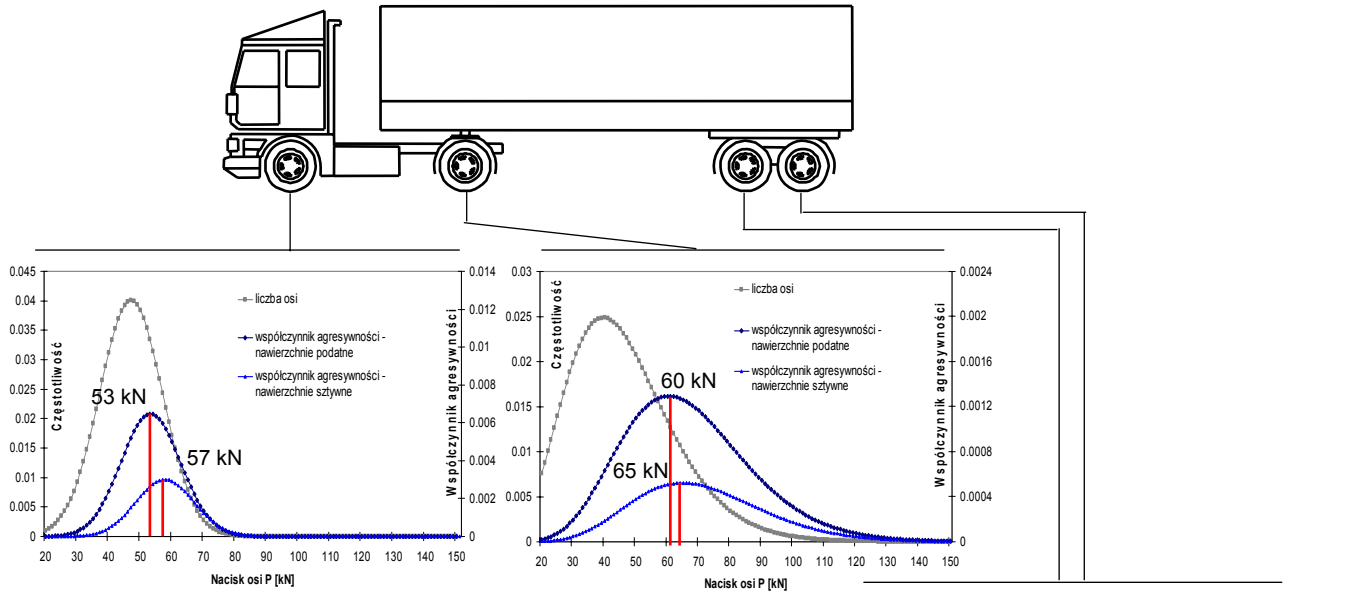
Na rysunkach 8.66 ÷ 8.69 przedstawiono naciski osi o przeciętnych agresywnościach wyznaczone dla czterech typowych sylwetek pojazdów.



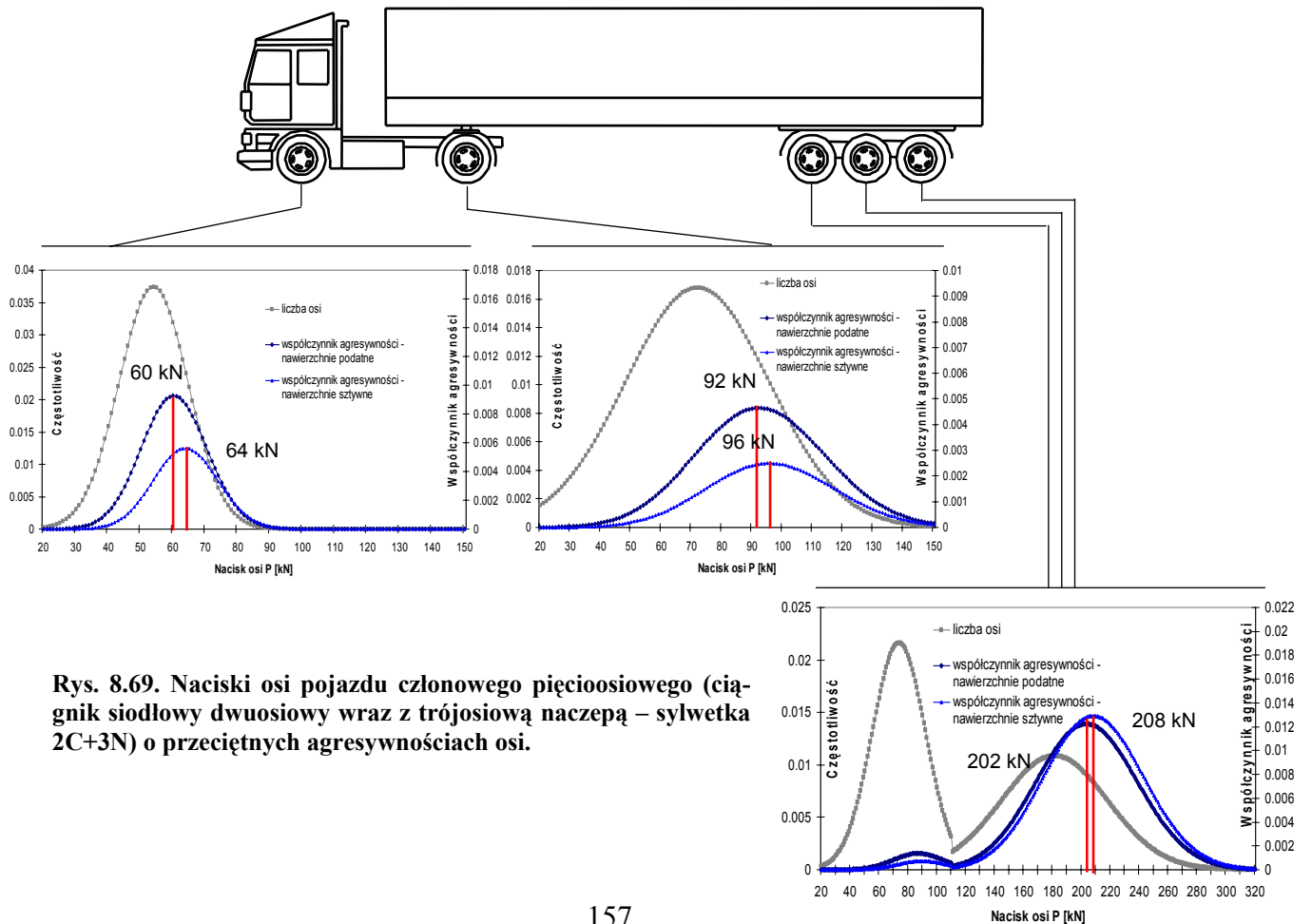
Rys. 8.66. Naciski osi samochodu dwuosioowego (sylwetka 2P) o przeciętnych agresywnościach osi.



Rys. 8.67. Naciski osi zespołu pojazdów czterosioowego (samochód dwuosioowy wraz z dwuosiową przyczepą – sylwetka 2P+2P) o przeciętnych agresywnościach osi.



Rys. 8.68. Naciski osi pojazdu członowego czteroosiowego (ciągnik siodłowy dwuosiowy wraz z dwuosiową naczepą – sylwetka 2C+2N) o przeciętnych agresywnościach osi.



Rys. 8.69. Naciski osi pojazdu członowego pięcioosiowego (ciągnik siodłowy dwuosiowy wraz z trójosiową naczepą – sylwetka 2C+3N) o przeciętnych agresywnościach osi.

Na potrzeby przeprowadzenia weryfikacji współczynników przeliczeniowych (agresywności) grup pojazdów, współczynniki czterech typowych sylwetek pojazdów (2P, 2P+2P, 2C+2N i 2C+3N) wyznaczono dla nacisków osi o przeciętnych agresywnościach (patrz rys. 8.66 ÷ rys. 8.69), dla nacisków osi o wartościach średnich (patrz tab. 6.1, tab. 6.2), dopuszczalnych (tab. 5.2) i maksymalnych (tab. 6.3) oraz zestawiono w tabeli 8.21.

Tab. 8.21. Zestawienie współczynników agresywności czterech typowych sylwetek pojazdów – nawierzchnie podatne.

		Nawierzchnie podatne						Nawierzchnie sztywne
		Grubość warstw asfaltowych - h [cm]						h=23 cm
		6	12	18	23	27	31	
2P	Naciski osi przy przeciętnej agresywności osi	0,149	0,222	0,205	0,194	0,21	0,201	0,503
	Średnie naciski osi	0,119	0,108	0,089	0,077	0,081	0,077	0,015
	Dopuszczalne naciski osi	1,090	1,459	1,329	1,247	1,345	1,279	0,836
	Maksymalne naciski osi	3,138	3,731	3,329	3,083	3,303	3,114	3,724
2P+2P	Naciski osi przy przeciętnej agresywności osi	0,969	0,963	0,842	0,761	0,799	0,75	0,862
	Średnie naciski osi	0,479	0,458	0,393	0,352	0,368	0,346	0,115
	Dopuszczalne naciski osi	2,989	2,977	2,646	2,400	2,516	2,357	2,323
	Maksymalne naciski osi	9,313	8,032	6,899	6,101	6,298	5,833	13,142
2C+2N	Naciski osi przy przeciętnej agresywności osi	0,392	0,405	0,378	0,36	0,392	0,389	0,415
	Średnie naciski osi	0,204	0,205	0,188	0,174	0,185	0,177	0,068
	Dopuszczalne naciski osi	1,139	1,639	1,612	1,597	1,781	1,795	1,400
	Maksymalne naciski osi	2,458	4,262	4,256	4,231	4,710	4,692	4,278
2C+3N	Naciski osi przy przeciętnej agresywności osi	1,654	1,643	1,811	1,942	2,266	2,298	2,027
	Średnie naciski osi	0,797	0,781	0,839	0,883	1,019	1,026	0,633
	Dopuszczalne naciski osi	2,260	2,353	2,674	2,926	3,454	3,527	3,044
	Maksymalne naciski osi	11,812	13,594	15,16	16,329	19,077	19,324	24,535

Dla tak zestawionych współczynników agresywności typowych sylwetek pojazdów, wartości skorygowane współczynników agresywności (przeliczeniowych na osie 100 kN) dla dwóch grup pojazdów ciężarowych (po uwzględnieniu wag będących wynikających ze struktury rodzajowej pojazdów) – samochodów ciężarowych bez przyczep i samochodów ciężarowych z przyczepami przedstawiono w tabeli 8.22.

Tab. 8.22. Obowiązujące i skorygowane współczynniki agresywności (przeliczeniowe na osie 100 kN) pojazdów na osie obliczeniowe 100 kN.

Nawierzchnie podatne								
Grupa pojazdów	Współczynniki przeliczeniowe na osie 100 kN							
	Wartość obowiązująca	Wartość skorygowana						
		Grubość warstw asfaltowych [cm]						
		8	12	18	23	27	31	
2 grupy pojazdów	Samochody ciężarowe bez przyczep	$r_1=0,109$	0,149 ¹⁾	0,222 ¹⁾	0,205 ¹⁾	0,194 ¹⁾	0,210 ¹⁾	0,201 ¹⁾
			0,119 ²⁾	0,108 ²⁾	0,089 ²⁾	0,077 ²⁾	0,081 ²⁾	0,077 ²⁾
			1,090 ³⁾	1,459 ³⁾	1,329 ³⁾	1,247 ³⁾	1,345 ³⁾	1,279 ³⁾
			3,138 ⁴⁾	3,731 ⁴⁾	3,329 ⁴⁾	3,083 ⁴⁾	3,303 ⁴⁾	3,114 ⁴⁾
	Samochody ciężarowe z przyczepami	$r_2=1,245^5)$ $r_2=1,950^6)$	1,276 ¹⁾	1,271 ¹⁾	1,360 ¹⁾	1,432 ¹⁾	1,655 ¹⁾	1,670 ¹⁾
			0,620 ²⁾	0,607 ²⁾	0,634 ²⁾	0,654 ²⁾	0,747 ²⁾	0,747 ²⁾
			2,071 ³⁾	2,250 ³⁾	2,416 ³⁾	2,549 ³⁾	2,949 ³⁾	2,983 ³⁾
			9,292 ⁴⁾	10,743 ⁴⁾	11,634 ⁴⁾	12,300 ⁴⁾	14,223 ⁴⁾	14,328 ⁴⁾
Nawierzchnie sztywne								
Grupa pojazdów	Współczynniki przeliczeniowe na osie 100 kN							
	Wartość obowiązująca	Wartość skorygowana						
		Grubość warstwy nawierzchni z betonu [cm]: 23						
2 grupy pojazdów	Samochody ciężarowe bez przyczep	$r_1=0,032$	0,503 ¹⁾					
			0,015 ²⁾					
			0,836 ³⁾					
			3,724 ⁴⁾					
	Samochody ciężarowe z przyczepami	$r_2=1,477^7)$ $r_2=3,760^8)$	1,512 ¹⁾					
			0,440 ²⁾					
			2,570 ³⁾					
			18,420 ⁴⁾					

¹⁾ – współczynniki dla nacisków o przeciętnych agresywnościach,

²⁾ – współczynniki dla średnich nacisków osi,

³⁾ – współczynniki dla dopuszczalnych nacisków osi,

⁴⁾ – współczynniki dla maksymalnych nacisków osi,

⁵⁾ – gdy udział pojazdów o obciążeniu osi 115 kN w grupie pojazdów ciężarowych z przyczepami nie przekracza 8%,

⁶⁾ – gdy udział pojazdów o obciążeniu osi 115 kN w grupie pojazdów ciężarowych z przyczepami przekracza 8%,

⁷⁾ – samochody czteroosiowe,

⁸⁾ – samochody pięcioosiowe.

Wyznaczone współczynniki agresywności (przeliczeniowe na osie 100 kN) różnią się znacznie od wartości aktualnie obowiązujących [93, 94, 95], przyjmowanych w polskim drogownictwie w wymiarowaniu nawierzchni.

W tabeli 8.22 zestawiono współczynniki wyznaczone dla nacisków osi o przeciętnych agresywnościach, współczynniki dla nacisków osi średnich, dopuszczalnych i maksymalnych. Współczynniki przy naciskach osi średnich, dopuszczalnych i maksymalnych posłużyły głównie do celów porównawczych, gdyż współczynniki powinny być wyznaczone przy naciskach osi o przeciętnych agresywnościach. Jednak praktycznie w każdym przypadku (poza naciskami średnimi osi) wyznaczone wartości współczynników dla na-

wierzchni podatnych przekraczają wartości aktualnie obowiązujące. Należy tu jeszcze wspomnieć, że w polskim drogownictwie, w nawierzchniach podatnych stosuje się dwa współczynniki: mniejszy o wartości 1,245 stosowany gdy udział pojazdów o obciążeniu osi 115 kN w grupie pojazdów ciężkich z przyczepami nie przekracza 8% oraz większy, o wartości 1,950, stosowany gdy udział takich pojazdów jest większy od 8 %, a mniejszy od 20%. Z uwagi na to, że naciski osi o przeciętnych agresywnościach wyznaczono na podstawie rozkładów nacisków osi wyznaczonych w oparciu o pomiary wykonywane na drodze nr 11, gdzie udział pojazdów o naciskach osi przekraczających, bądź równych 115 kN nie przekracza 8 % (analiza wyników pomiarów przeprowadzona przez autora), to współczynnik obowiązujący jest równy wartości 1.245.

Znaczne przekroczenia współczynników występują zarówno w grupie samochodów ciężarowych bez przyczep, jak i w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami. W pierwszej z tych grup, różnice przy naciskach osi o przeciętnych agresywnościach przekraczają 100 % (przy grubościach warstw asfaltowych równych 12 cm), a w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami są już znacznie mniejsze i wynoszą maksymalnie 34 %. Należy jeszcze pamiętać, że różnice takie obserwuje się już przy naciskach osi o wartościach przeciętnych agresywności, a więc przy naciskach znacznie mniejszych od wartości dopuszczalnych. W przypadku wystąpienia w sylwetkach osi o dopuszczalnym nacisku (nawet przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnej masy całkowitej), to różnice są już wielokrotnie większe i przekraczają 1000 % (!) w grupie samochodów ciężarowych bez przyczep oraz 140 % w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami.

Warto jeszcze zwrócić uwagę na to, współczynniki agresywności (przeliczeniowe) wyznaczone dla sylwetki samochodu ciężarowego dwuosioowego (sylwetka 2P) oraz samochodu ciężarowego dwuosioowego z przyczepą dwuosioową (sylwetka 2P+2P), w których nie występują osie wielokrotne (a więc osie wykazujące największe wahania agresywności wraz ze zmianą grubości warstw asfaltowych) charakteryzują się najmniejszymi zmiennościami.

Inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku nawierzchni sztywnych. Wyznaczone współczynniki agresywności (przeliczeniowe na osie obliczeniowe 100 kN) dla grupy samochodów ciężarowych bez przyczep są wielokrotnie większe od wartości podanych w katalogach obowiązujących w Polsce (przy naciskach osi o przeciętnych agresywnościach przekraczają 1400 %, a przy naciskach osi dopuszczalnych – 2500 %). Dodatkowo, w obu tych przypadkach wyznaczone współczynniki agresywności dla nawierzchni sztywnych przyjmują wartości większe od wyznaczonych współczynników dla nawierzchni po-

datnych (w polskim drogownictwie jest dokładnie na odwrót). Natomiast współczynniki agresywności wyznaczone dla grupy samochodów ciężarowych z przyczepami wskazują na znacznie mniejszy niekorzystny wpływ tej grupy pojazdów na nawierzchnie sztywne – betonowe niż jest obecnie przyjmowane w wymiarowaniu (współczynnik 1,477 dla samochodów czteroosiowych oraz 3,760 dla samochodów pięcioosiowych).

Jednak biorąc pod uwagę to, że udział w strumieniu ruchu pojazdów dwuosiowych, stanowiących o wartości współczynnika agresywności dla grupy samochodów ciężarowych bez przyczep, przekracza 50 %, to wykazane różnice pomiędzy wartościami obliczonymi współczynników, a obecnie obowiązującymi, są bardzo istotne.

8.6. Podsumowanie

Analiza oddziaływania osi pojedynczych o kołach pojedynczych i bliźniaczych wykazała, że wśród osi rzeczywistych przyjętych do analizy, najdokładniej wielkości oddziaływania osi porównawczej – referencyjnej (kIr160) odpowiada oś o szerokości opony 435 mm (model kI435), co wynika z praktycznie równych powierzchni styku tych opon z nawierzchnią ($kIr160=0,0804 \text{ m}^2$, $kI435=0,0896 \text{ m}^2$), a tym samym jednakowego sposobu i wielkości obciążenia. Oddziaływanie opon bliźniaczych stanowi około 60% oddziaływania osi obliczeniowej przy ogumieniu o szerokości 305 mm (model kII305), 70% oddziaływania przy oponach o szerokości 275 mm (model kII275) i około 90% przy oponach bliźniaczych opisanych modelem kII245 (szerokość pojedynczej opony 245 mm).

Przeprowadzając porównanie osi wielokrotnych skoncentrowano się na najczęściej spotykanych osiach wielokrotnych w pojazdach ciężarowych: oś podwójna o kołach pojedynczych, rozstawie osi składowych wynoszących 100 i 135 cm i ogumieniu 305 mm (modele oII305s100 i oII305s135), oś podwójna o kołach bliźniaczych, rozstawie osi składowych 100 i 135 cm i oponach o szerokości 305 mm oraz oś potrójna o kołach pojedynczych typu „Super Single” (szerokość opon 385 mm), również o rozstawie osi składowych wynoszącym 100 i 135 cm. Wykazano, że oś potrójna o kołach pojedynczych występująca w naczepach ciągników siodłowych pięcio i sześćoosiowych jest osią o największej agresywności, która nie powinna być rozpatrywana inaczej niż oś wielokrotna i w osi tego typu duże znaczenie z punktu widzenia agresywności ma rozstaw poszczególnych osi składowych,

Oddziaływania osi pojazdów analizowane były w trzech okresach eksploatacji nawierzchni podatnych (zimowy, wiosenno-jesienny i letni) oraz w II fazach pracy w przy-

padku nawierzchni z podbudową z chudego betonu (I faza – podbudowa niespękana, II faza – podbudowa spękana), co pozwoliło ustalić wpływ zmian parametrów charakteryzujących poszczególne warstwy (moduł sprężystości E i współczynnik Poissona ν) na wartość wywoływanych naprężeń i odkształceń. W analizie szkodliwego oddziaływania całych sylwetek pojazdów uwzględniono średnioroczny okres eksploatacji nawierzchni (okres wiosenno-jesienny).

Współczynniki agresywności wyznaczone dla poszczególnych sylwetek pojazdów, zależą głównie od konfiguracji osi pojazdów i występujących nacisków osi. Wskazuje to na znaczące różnice w agresywności ruchu wynikające z jego charakteru – na drogach na których dominuje ruch dalekobieżny, gdzie przeważają sylwetki ciągników siodłowych pięcioosiowych (2C+3N), w największym stopniu przyczyniające się do degradacji nawierzchni, współczynnik agresywności powinien mieć znacznie większą wartość niż np. na drogach lokalnych, gdzie pojazdy tego typu pojawiają się sporadycznie, a przeważają samochody ciężarowe dwu lub trzyosiowe bez przyczep. Można również zauważyć, że pojazdy sześćoosiowe nie cechują się większą agresywnością niż pojazdy pięcioosiowe (które jak się okazało są pojazdami o największej agresywności, a więc większym szkodliwym wpływie na nawierzchnie), gdyż zwiększenie liczby osi przy takiej samej dopuszczalnej masie całkowitej powoduje zmniejszenie nacisku poszczególnych osi, a tym samym zmniejszenie ich agresywności. Dodatkowo wykazano również zależność współczynników agresywności od grubości warstw asfaltowych nawierzchni.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych analiz oraz różnice pomiędzy uzyskanymi wartościami współczynników agresywności wyznaczonymi dla dwóch grup pojazdów, a współczynnikami aktualnie obowiązującymi, tezę mówiącą o tym, że stosowane w wymiarowaniu współczynniki przeliczeniowe (agresywności) pojazdów rzeczywistych na osie obliczeniowe nie odzwierciedlają istniejącej struktury rodzajowej pojazdów i ich oddziaływania na nawierzchnie drogowe można uznać za udowodnioną.

9. WYKORZYSTANIE WIDM OBCIĄŻEŃ OSI W OCENIE NOŚNOŚCI NAWIERZCHNI DROGOWYCH

9.1. Wprowadzenie

Do tej pory, w projektowaniu funkcjonuje opinia, że o nośności nawierzchni decyduje liczba przejść osi standardowych – obliczeniowych powodujących określoną reakcję (np. odkształcenie lub ugięcie) tejże nawierzchni, a marginalizuje się wręcz przejścia osi o obciążeniach mniejszych. Takie podejście jest wygodne z punktu widzenia projektanta, jednak powoduje pomijanie w obliczeniach osi o obciążeniach mniejszych i większych od przyjętego obciążenia osi obliczeniowej. Rozwiązaniem tego problemu, są tzw. widma obciążeń osi, a właściwie statystyczny rozkład nacisków osi występujących w danym przekroju drogi.

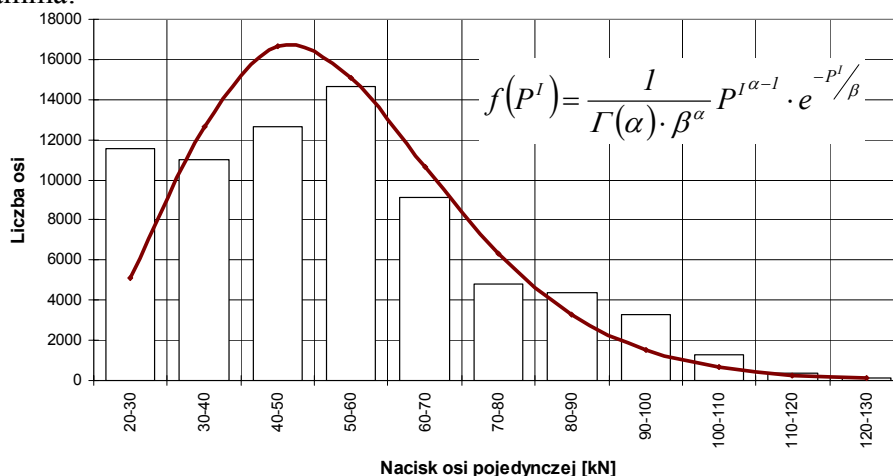
W związku z tym, w rozdziale omówiono wykorzystanie widm obciążeń osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych. Dla osi stanowiących analizowane widma określono wartości wywoływanych w nawierzchniach szkód zmęczeniowych, które w powiązaniu z widmami obciążeń osi w postaci dyskretnej i ciągłej pozwoliły na precyzyjne określenie trwałości zmęczeniowych analizowanych konstrukcji nawierzchni. Przedstawiono również przykład obliczeniowy, w którym przy pomocy opracowanych widm obciążeń osi obliczono trwałość zmęczeniową nawierzchni drogowej.

9.2. Widma obciążeń osi

Aby móc wykorzystać w obliczeniach widma obciążeń osi, w pierwszej kolejności należy ustalić, jak kształtują się statystyczne rozkłady nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych samochodów ciężarowych na sieci dróg w Polsce. Z uwagi na to, iż obecnie prowadzone są pomiary ciągłe strumienia ruchu jedynie na drodze nr 11 (miejscowość Byczyna), będą one stanowiły podstawę dalszej analizy.

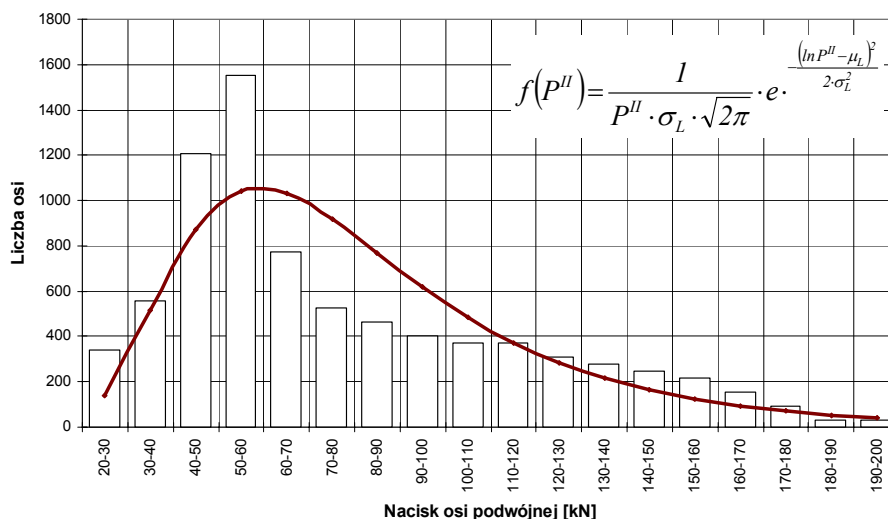
Do roku 2005, wagi selekcyjne zainstalowane na drodze nr 11 umożliwiały jedynie rejestrację nacisków osi w ograniczonym zakresie (rys. 6.7, 6.8 i 6.9), a dopiero w 2005 roku zostały one zmodernizowane, i umożliwiają rejestrację nacisków osi w pełnym zakresie występowania obciążeń. Na rysunkach 6.10, 6.11 i 6.12 przedstawiono rozkłady nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych opracowane w oparciu o wyniki pomiarów z miesiąca grudnia 2005 r. prowadzonych na drodze nr 11.

Rozkład nacisków osi pojedynczych pojazdów można przybliżyć za pomocą rozkładu gamma:



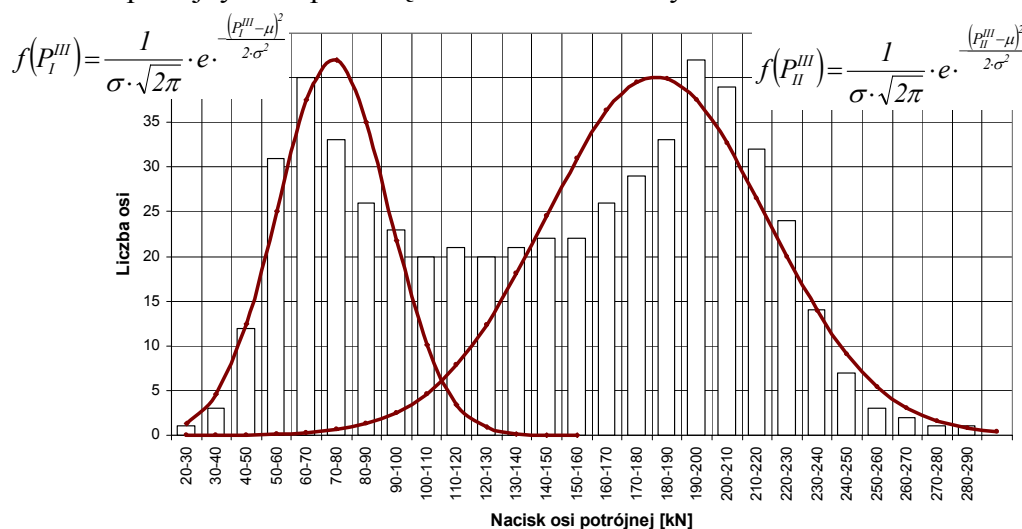
Rys. 9.1. Rozkład nacisków osi pojedynczych.

za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego naciski osi podwójnych:



Rys. 9.2. Rozkład nacisków osi podwójnych.

a naciski osi potrójnych za pomocą rozkładów normalnych:



Rys. 9.3. Rozkład nacisków osi potrójnych.

Z uwagi na to, iż rozkład nacisków osi potrójnych jest rozkładem typu dwumodalnego (dwuwierchołkowym), do jego opisu można wykorzystać dwa rozkłady normalne. Taki rozkład nacisków osi wynika z rejestracji również przejazdów pojazdów nieobciążonych (wartość przeciętna nacisków osi potrójnych wynosi wtedy ok. $60 \div 70$ kN), których przejazdy (z uwagi na wywoływanie znikomych szkód zmęczeniowych w nawierzchniach) są praktycznie bez znaczenia z punktu widzenia utraty nośności przez nawierzchnię.

Rozkłady przedstawione na rysunkach 9.1 ÷ 9.3 można zapisać:

- osie pojedyncze:
$$f(P^I) = \frac{1}{\Gamma(8.414) \cdot 6.3^{8.414}} P^{7.414} \cdot e^{-P/6.3} \quad (9.1)$$

- osie podwójne:
$$f(P^{II}) = \frac{1}{P \cdot 0.492 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln P - 4.233)^2}{2 \cdot 0.242}} \quad (9.2)$$

- osie potrójne:

dla $PX(20 \text{ kN}, 110 \text{ kN})$
$$f(P_I^{III}) = \frac{1}{18.45 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-73.78)^2}{2 \cdot 340.40}} \quad (9.3)$$

dla $PX(110 \text{ kN}, 360 \text{ kN})$
$$f(P_{II}^{III}) = \frac{1}{36.77 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-181.46)^2}{2 \cdot 1352.03}} \quad (9.4)$$

gdzie: P^I, P^{II}, P^{III} – nacisk osi (kN) pojedynczych, podwójnych i potrójnych.

Podobnie jak w przypadku rozkładów nacisków osi poszczególnych sylwetek pojazdów, zgodność empirycznych wyników pomiarów z rozkładami teoretycznymi sprawdzano za pomocą testu zgodności χ -Pearsona.

9.3. Wykorzystanie widm obciążeń osi w ocenie nośności nawierzchni drogowych

Mając wyznaczone rozkłady nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych, konieczne jest określenie szkody zmęczeniowej wywoływanej w nawierzchni przejściem jednej osi pojedynczej, podwójnej lub potrójnej o zmiennym obciążeniu. Jako typową oś pojedynczą przyjęto oś opisaną modelem KI305 (oś pojedyncza o kole pojedynczym i oponie o szer. $B=305$ mm), jako oś podwójną – oś opisaną modelami oII305s100 (oś podwójna o kołach pojedynczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s=100$ cm) i oIII305s100 (oś podwójna o kołach bliźniaczych i oponach o szerokości $B=305$ mm; rozstaw kół $s=100$ cm), a oś potrójną – oś opisaną modelem oIII385s100 (oś potrójna o kołach

pojedynczych i oponach typu „Super Single” o szerokości B=385mm; rozstaw kół s=100cm). Szkody zmęczeniowe wywoływane w nawierzchniach o różnych grubościach warstw asfaltowych, przejściem przyjętych typowych osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych, wyznaczone w rozdziale 8, zestawiono w tabeli 9.1.

Tab. 9.1. Równania szkód zmęczeniowych wywołanych przejściem osi danego typu.

Oś	Grubość warstw asfaltowych	Szkoda zmęczeniowa w nawierzchni
Pojedyncza	h=8cm	$d^I = (3,34433 \cdot 10^{-13}) \cdot p^{3,58202}$
	h=12cm	$d^I = (4,63469 \cdot 10^{-13}) \cdot p^{3,28973}$
	h=18cm	$d^I = (1,14884 \cdot 10^{-13}) \cdot p^{3,29003}$
	h=23cm	$d^I = (3,86887 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29100}$
	h=27cm	$d^I = (1,74148 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29066}$
	h=31cm	$d^I = (8,29148 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29057}$
Podwójna	h=8cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(2,04164 \cdot 10^{-13}) \cdot p^{3,29100} + (4,41408 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29100}]$
	h=12cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(9,13812 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29100} + (1,95861 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29100}]$
	h=18cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(2,53365 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,29100} + (5,27303 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}]$
	h=23cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(9,71294 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100} + (2,08819 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}]$
	h=27cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(4,78407 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100} + (1,08601 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}]$
	h=31cm	$d^{II} = 0,5 \cdot [(2,46329 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100} + (6,47665 \cdot 10^{-16}) \cdot p^{3,29100}]$
Potrójna	h=8cm	$d^{III} = (5,90846 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,2910000}$
	h=12cm	$d^{III} = (2,46505 \cdot 10^{-14}) \cdot p^{3,2910000}$
	h=18cm	$d^{III} = (8,44702 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,2910000}$
	h=23cm	$d^{III} = (3,72476 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}$
	h=27cm	$d^{III} = (1,99833 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}$
	h=31cm	$d^{III} = (1,10214 \cdot 10^{-15}) \cdot p^{3,29100}$

Mając wyznaczone widma obciążeń osi oraz wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w danej nawierzchni, można przystąpić do oceny jej trwałości zmęczeniowej oraz okresu eksploatacji. W obliczeniach istnieje możliwość uwzględnienia postaci dyskretnej widma (rys. 9.1, 9.2 lub 9.3) przedstawiającej pomierzone naciski osi, lub postaci ciągłej opisaną za pomocą teoretycznego rozkładu nacisków osi. W pierwszym przypadku, szkodę zmęczeniową w nawierzchni wywołaną przejściem rzeczywistej liczby osi można wyznaczyć ze wzorów (w przypadku, gdy rozkład nacisków osi dotyczy całego przekroju drogi, w obliczeniach należy również uwzględnić rozkład kierunkowy ruchu, poprzez współczynnik f_i):

$$D^I = f_i \cdot \sum_i d_i^I \cdot L_i \tag{9.5}$$

$$D^{II} = f_i \cdot \sum_i d_i^{II} \cdot L_i \tag{9.6}$$

$$D^{III} = f_1 \cdot \sum_i d_i^{III} \cdot L_i^{III} \quad (9.7)$$

gdzie: $d_i^I, d_i^{II}, d_i^{III}$ – szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni przejściem osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych o nacisku „i”,

$L_i^I, L_i^{II}, L_i^{III}$ – liczba osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych o nacisku „i”, średnio w ciągu jednej doby,

f_1 – wsp. obliczeniowego pasa ruchu, którego wartość wynosi:

Tab. 9.2. Wartości współczynnika f_1 [93].

Liczba pasów ruchu w obu kierunkach		f_1
droga jednojezdniowa	droga dwujezdniowa	
2	-	0,50
3	-	0,50
4	4	0,45
-	6	0,35

W drugim przypadku, gdy dysponuje się teoretycznym rozkładem nacisków osi oraz równaniem szkody zmęczeniowej wywołanej w nawierzchni przejściem danego typu osi można się posłużyć zależnościami:

$$D^I = f_1 \cdot \int_{p_1}^{p_2} d(P^I) \cdot f(P^I) \cdot dP^I \quad (9.8)$$

$$D^{II} = f_1 \cdot \int_{p_3}^{p_4} d(P^{II}) \cdot f(P^{II}) \cdot dP^{II} \quad (9.9)$$

$$D^{III} = f_1 \cdot \int_{p_5}^{p_6} d(P_I^{III}) \cdot f(P_I^{III}) \cdot dP_I^{III} + f_1 \cdot \int_{p_6}^{p_7} d(P_{II}^{III}) \cdot f(P_{II}^{III}) \cdot dP_{II}^{III} \quad (9.10)$$

gdzie: $d(P^I), d(P^{II}), d(P_I^{III}), d(P_{II}^{III})$ – funkcje opisujące szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni przejściem osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych,

$f(P^I), f(P^{II}), f(P_I^{III}), f(P_{II}^{III})$ – funkcje rozkładu liczby osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych,

p_1, \dots, p_7 – granice przedziałów całkowania,

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

Całkowita szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni wynosi:

$$D = D^I + D^{II} + D^{III} \quad (9.11)$$

Wyczerpanie się nośności nawierzchni nastąpi w okresie:

$$D \cdot T \leq I \rightarrow T \leq \frac{I}{D} \quad (9.12)$$

gdzie: T – okres eksploatacji nawierzchni (w przypadku, kiedy szkoda zmęczeniowa wyznaczona była dla 1 doby, okres eksploatacji nawierzchni odnosi się do liczby dni).

Jak widać, bez względu na podejście, w każdym przypadku uwzględnia się osie pojedyncze, podwójne i potrójne o danym obciążeniu i odpowiadające im szkody zmęczeniowe, a całkowita szkoda jest wyliczana jako suma szkód wywołanych przejściem określonej liczby osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych. Wyczerpanie się nośności nawierzchni, nastąpi w momencie, gdy suma szkód zmęczeniowych będzie równa, lub przekroczy jedność – zgodnie z hipotezą zmęczeniową Minera.

9.4. Widma obciążeń osi w projektowaniu

Mając wyznaczone w punkcie 9.2 widma obciążeń osi w postaci statystycznych rozkładów nacisków osi oraz sprecyzowane w punkcie 9.3 wartości szkód zmęczeniowych wywoływanych w nawierzchniach przejściem osi stanowiących widma, można przystąpić do oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych.

Wykorzystując widma obciążeń osi, dla obciążenia ruchem jak na drodze nr 11 w miejscowości Buczyna w dniu 7 grudnia 2005 roku, należy sprawdzić, czy założona konstrukcja nawierzchni (asfaltowa – podatna) zapewni 20 letni okres eksploatacji. Przyjęto nawierzchnię o grubości warstw asfaltowych równej 23 cm, Grubości poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni oraz ich parametry zamieszczono w tabeli 7.1. Strukturę rodzajową pojazdów ciężarowych zarejestrowaną w dniu 7 grudnia 2005 roku, na drodze nr 11 w miejscowości Buczyna zamieszczono w tabeli 9.3.

Tab. 9.3. Struktura rodzajowa pojazdów ciężarowych zarejestrowana w dniu 7 grudnia 2005 roku, droga nr 11, miejscowość Buczyna.

Sylwetka pojazdu	2P	3P	4P	2P+2P	2P+3P	3P+2P	3P+3P	2C+1N	2C+2N	2C+3N	3C+1N	3C+2N	3C+3N	Σ
Liczba pojazdów	1068	40	2	28	19	61	6	37	172	756	2	7	1	2199
[%]	48,5	1,8	0,1	1,3	0,9	2,8	0,3	1,7	7,8	34,4	0,1	0,3	0	100

9.4.1. Postać dyskretna widm

Widma obciążeń osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych, wyznaczone dla struktury rodzajowej pojazdów ciężarowych występującej w dniu 7 grudnia 2005 roku, na drodze nr 11, w miejscowości Byczyna wraz z odpowiadającym im szkodom zmęczeniowym przedstawiono na rysunkach 9.4, 9.5 i 9.6.

Przy takim obciążeniu, szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni przejściem osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych wyniesie:

$$D^I = f_l \cdot \sum_i d_i^I \cdot L_i^I \quad (9.13)$$

$$D^{II} = f_l \cdot \sum_i d_i^{II} \cdot L_i^{II} \quad (9.14)$$

$$D^{III} = f_l \cdot \sum_i d_i^{III} \cdot L_i^{III} \quad (9.15)$$

gdzie: $d_i^I, d_i^{II}, d_i^{III}$ – szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni przejściem osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych o nacisku „ i ” (tab. 9.1),

$L_i^I, L_i^{II}, L_i^{III}$ – liczba osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych o nacisku „ i ”, średnio w ciągu jednej doby,

f_l – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

a całkowita szkoda zmęczeniowa:

$$D = D^I + D^{II} + D^{III} \quad (9.16)$$

Wyczerpanie się nośności nawierzchni nastąpiłoby w okresie:

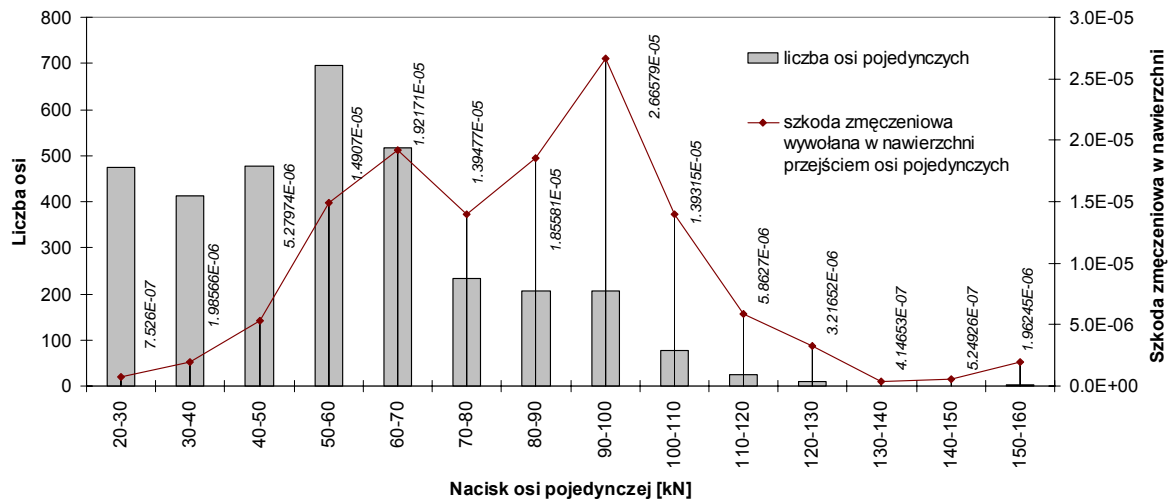
$$D \cdot T \leq 1 \rightarrow T \leq \frac{1}{D} \quad (9.17)$$

A zatem:

$$D^I = 0,50 \cdot \left(\begin{array}{l} 7,25600 \cdot 10^{-7} + 1,98566 \cdot 10^{-6} + 5,27974 \cdot 10^{-6} + 1,49070 \cdot 10^{-5} + \\ + 1,92171 \cdot 10^{-5} + 1,39477 \cdot 10^{-5} + 1,85581 \cdot 10^{-5} + 2,66579 \cdot 10^{-5} + \\ + 1,39315 \cdot 10^{-5} + 5,86270 \cdot 10^{-6} + 3,21652 \cdot 10^{-6} + 4,14653 \cdot 10^{-7} + \\ + 5,24926 \cdot 10^{-7} + 1,9624510^{-6} \end{array} \right)$$

$$D^I = 0,50 \cdot 1,27219 \cdot 10^{-4} = 6,36095 \cdot 10^{-5}$$

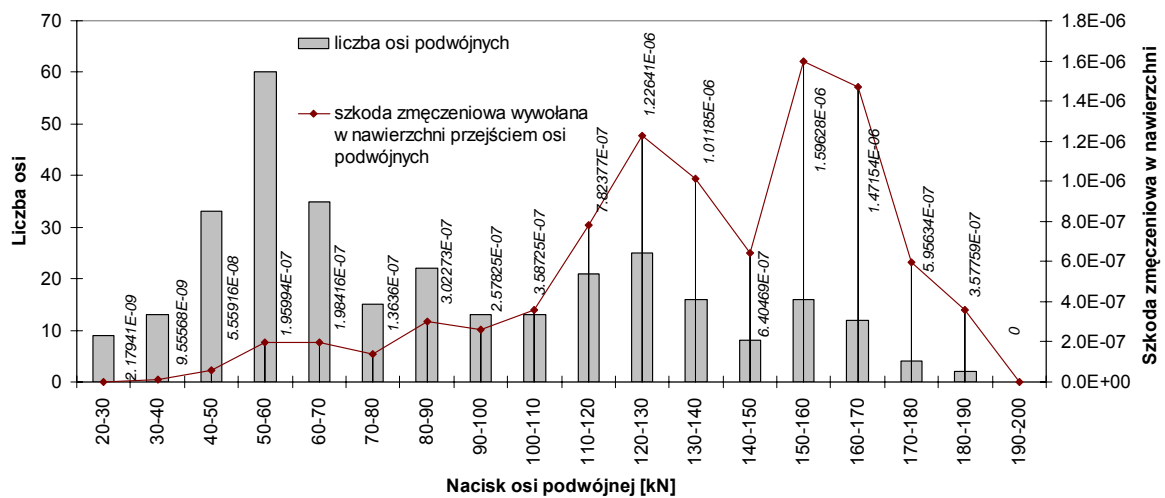
- Wpływ struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych -



Rys. 9.4. Widmo obciążeń osi pojedynczych i odpowiadające mu szkody zmęczeniowe nawierzchni.

$$D^{II} = 0,50 \cdot \left(2,17941 \cdot 10^{-9} + 9,55568 \cdot 10^{-9} + 5,55916 \cdot 10^{-8} + 1,95994 \cdot 10^{-7} + \right. \\ \left. + 1,99416 \cdot 10^{-7} + 1,36360 \cdot 10^{-7} + 3,02273 \cdot 10^{-7} + 2,57825 \cdot 10^{-7} + \right. \\ \left. + 3,58725 \cdot 10^{-7} + 7,82377 \cdot 10^{-7} + 1,22641 \cdot 10^{-6} + 1,01185 \cdot 10^{-6} + \right. \\ \left. + 6,40469 \cdot 10^{-7} + 1,59628 \cdot 10^{-6} + 1,47154 \cdot 10^{-6} + 5,95634 \cdot 10^{-7} + \right. \\ \left. + 3,57759 \cdot 10^{-7} \right)$$

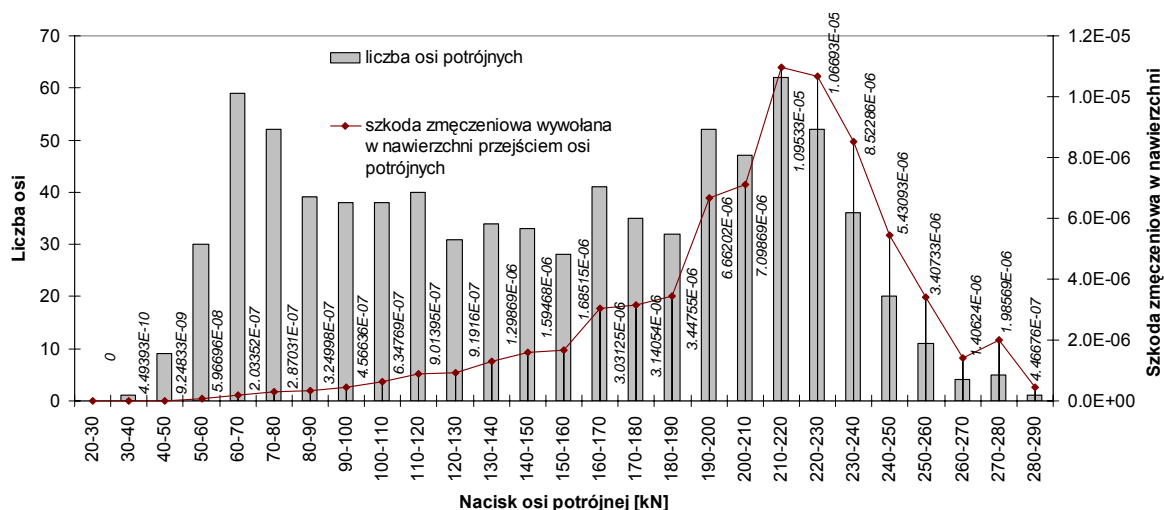
$$D^{II} = 0,50 \cdot 9,19924 \cdot 10^{-6} = 4,59962 \cdot 10^{-6}$$



Rys. 9.5. Widmo obciążeń osi podwójnych i odpowiadające mu szkody zmęczeniowe nawierzchni.

$$D^{III} = 0,50 \cdot \left(4,493393 \cdot 10^{-10} + 9,24833 \cdot 10^{-9} + 5,96696 \cdot 10^{-8} + 2,03352 \cdot 10^{-7} + 2,87031 \cdot 10^{-7} + \right. \\ \left. + 3,24998 \cdot 10^{-7} + 4,56636 \cdot 10^{-7} + 6,34769 \cdot 10^{-7} + 9,01395 \cdot 10^{-7} + 9,19160 \cdot 10^{-7} + \right. \\ \left. + 1,29869 \cdot 10^{-6} + 1,59468 \cdot 10^{-6} + 1,68515 \cdot 10^{-6} + 3,03125 \cdot 10^{-6} + 3,14054 \cdot 10^{-6} + \right. \\ \left. + 3,44755 \cdot 10^{-6} + 6,66202 \cdot 10^{-6} + 7,09869 \cdot 10^{-6} + 1,09533 \cdot 10^{-5} + 1,06693 \cdot 10^{-5} + \right. \\ \left. + 8,52286 \cdot 10^{-6} + 5,43093 \cdot 10^{-6} + 3,40733 \cdot 10^{-6} + 1,40624 \cdot 10^{-6} + 1,98569 \cdot 10^{-6} + \right. \\ \left. + 4,46676 \cdot 10^{-7} \right)$$

$$D^{III} = 0,50 \cdot 7,45776 \cdot 10^{-5} = 3,72888 \cdot 10^{-5}$$



Rys. 9.6. Widmo obciążeń osi potrójnych i odpowiadające mu szkody zmęczeniowe nawierzchni.

Całkowita szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni średnio w ciągu jednej doby, w miesiącu grudniu 2005 roku wynosiła:

$$D = 6,36095 \cdot 10^{-5} + 4,59962 \cdot 10^{-6} + 3,72888 \cdot 10^{-5} = 1,05498 \cdot 10^{-4}$$

Przy takiej szkodzie zmęczeniowej wyczerpanie się nośności nawierzchni nastąpiłoby w okresie:

$$D \cdot T \leq I \rightarrow T \leq \frac{I}{1,05498 \cdot 10^{-5}} = 9479 \text{ dni} \approx 26 \text{ lat}$$

9.4.2. Postać ciągła widm

Sposób wykorzystania widm obciążeń osi przedstawiony w punkcie 9.4.1 może być dosyć uciążliwy z uwagi na swoją czasochłonność. Dlatego też, opisanie widm obciążeń osi i odpowiadających im szkód zmęczeniowych za pomocą funkcji gęstości nacisków osi oraz funkcji wykładniczych szkód zmęczeniowych, przyczyni się znacznie do przyspieszenia obliczeń. Widma obciążeń osi opisane są rozkładami: gamma, logarytmiczno-normalnym i normalnymi:

- dla osi pojedynczych rozkład gamma:

$$f(P^I) = \frac{I}{\Gamma(8,414) \cdot 6,3^{8,414}} P^{I7,414} \cdot e^{-P^I/6,3}$$

- dla osi podwójnych rozkład logarytmiczno-normalny:

$$f(P^{II}) = \frac{I}{P^{II} \cdot 0,492 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln P^{II} - 4,233)^2}{2 \cdot 0,242}}$$

- dla osi potrójnych rozkłady normalne:

$$f(P_I^{III}) = \frac{1}{18,45 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P_I^{III} - 73,78)^2}{2 \cdot 340,40}} \quad \text{- dla } P_X(20 \text{ kN}, 110 \text{ kN}) >$$

$$f(P_{II}^{III}) = \frac{1}{36,77 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P_{II}^{III} - 181,46)^2}{2 \cdot 1352,03}} \quad \text{- dla } P_X(110 \text{ kN}, 360 \text{ kN}) >$$

gdzie: P^I , P^{II} , P^{III} – nacisk osi (kN) pojedynczych, podwójnych i potrójnych.

a odpowiadające im szkody zmęczeniowe (tab. 9.1):

- wywołane przejściem osi pojedynczych:

$$d(P^I) = 3,86887 \cdot 10^{-14} \cdot P^{3,291}$$

- wywołane przejściem osi podwójnych:

$$d(P^{II}) = 0,5 \cdot (9,7129447 \cdot 10^{-15} \cdot P^{3,291} + 2,08819 \cdot 10^{-15} \cdot P^{3,291}) = 5,90057 \cdot 10^{-15} \cdot P^{3,291}$$

- wywołane przejściem osi potrójnych:

$$d(P^{III}) = 3,72476 \cdot 10^{-15} \cdot P^{3,291}$$

Szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni, średnio w ciągu jednej doby w miesiącu grudniu 2005 roku, wyniosą:

$$D^I = f_1 \cdot \int_{p_1}^{p_2} d(P^I) \cdot f(P^I) \cdot dP^I \quad (9.18)$$

$$D^{II} = f_1 \cdot \int_{p_3}^{p_4} d(P^{II}) \cdot f(P^{II}) \cdot dP^{II} \quad (9.19)$$

$$D^{III} = f_1 \cdot \int_{p_5}^{p_6} d(P_I^{III}) \cdot f(P_I^{III}) \cdot dP_I^{III} + f_1 \cdot \int_{p_6}^{p_7} d(P_{II}^{III}) \cdot f(P_{II}^{III}) \cdot dP_{II}^{III} \quad (9.20)$$

gdzie: $d(P^I)$, $d(P^{II})$, $d(P^{III})$ – funkcje opisujące szkody zmęczeniowe wywołane w nawierzchni przejściem osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych,
 $f(P^I)$, $f(P^{II})$, $f(P_I^{III})$, $f(P_{II}^{III})$ – funkcje rozkładu liczby osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych,

p_1, \dots, p_7 – granice przedziałów całkowania,

f_1 – współczynnik obliczeniowego pasa ruchu.

A zatem:

- dla osi pojedynczych:

$$D^I = 0,50 \cdot \frac{3339}{\Gamma(8,414) \cdot 6,3^{8,414}} \cdot 3,86887 \cdot 10^{-14} \cdot \int_{30}^{150} \left(P^{3,291} \cdot P^{7,414} \cdot e^{-\frac{P}{6,3}} \right) \cdot dP$$

$$D^I = 4,54780 \cdot 10^{-5}$$

- dla osi podwójnych:

$$D^{II} = 0,50 \cdot 5,90057 \cdot 10^{-15} \cdot \int_{30}^{200} \left(P^{3,291} \cdot \frac{317}{P \cdot 0,492 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln P - 4,233)^2}{2 \cdot 0,242}} \right) \cdot dP$$

$$D^{II} = 2,75190 \cdot 10^{-6}$$

- dla osi potrójnych

$$D^{III} = 0,50 \cdot \frac{266}{18,45 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot 3,72476 \cdot 10^{-15} \cdot \int_{30}^{110} \left(P^{3,291} \cdot e^{-\frac{(P-73,78)^2}{2 \cdot 340,40}} \right) dP +$$

$$+ 0,50 \cdot \frac{564}{36,77 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot 3,72476 \cdot 10^{-15} \cdot \int_{110}^{360} \left(P^{3,291} \cdot e^{-\frac{(P-181,46)^2}{2 \cdot 1352,03}} \right) dP$$

$$D^{III} = 3,36240 \cdot 10^{-5}$$

, a całkowita szkoda zmęczeniowa w tym okresie:

$$D = 4,54780 \cdot 10^{-5} + 2,75190 \cdot 10^{-6} + 3,36240 \cdot 10^{-5} = 8,18540 \cdot 10^{-5}$$

Przy takiej szkodzie zmęczeniowej wyczerpanie się nośności nawierzchni nastąpiłoby w okresie:

$$D \cdot T \leq 1 \rightarrow T \leq \frac{1}{8,18540 \cdot 10^{-5}} = 12217 \text{ dni} \approx 33 \text{ lata i 6 miesięcy}$$

Należy jeszcze zwrócić uwagę na różnice w obliczonych okresach eksploatacji nawierzchni. Widma obciążeń osi w postaci dyskretnej wykazują okres eksploatacji nawierzchni równy 26 lat, a widma obciążeń osi w postaci ciągłej aż 33 lata i 6 miesięcy. Tak duże różnice są wynikiem tego, iż w przykładzie nie analizowano średniodobowego ruchu rocznego (SDR), a jedynie natężenie ruchu z jednego dowolnie wybranego roboczego dnia miesiąca, który wykazuje odchylenia w zarejestrowanych liczbach osi od ruchu średniodobowego, który jest podstawą w wymiarowaniu nawierzchni drogowych (patrz punkt 3.2). Płynie z tego wniosek, że w przypadku analizowania dobowych wahań ruchu należy wykorzystywać w obliczeniach widma obciążeń osi w postaci dyskretnej, które pozwalają „wychwycenie” chwilowych zmian występujących obciążeń osi. Natomiast widma obciążeń osi w postaci ciągłej, doskonale nadają się oceny trwałości zmęczeniowej nawierzchni opartej na SDR. Trzeba również zaznaczyć, że w omawianym przykładzie bezpośrednio wykorzystano natężenie ruchu z dnia 7 grudnia 2005 roku, a nie prognozowane natężenie ruchu, co przyczyniło się również do wydłużenia obliczonych okresów eksploatacji nawierzchni.

9.5. Podsumowanie

Przy określaniu szkodliwego wpływu przejeżdżających pojazdów na nawierzchnię można odstąpić od „pojęcia” sylwetki pojazdu, a w rozważaniach skoncentrować się na kolejnych osiach pojazdów pojawiających się w przekroju drogi. Z uwagi na duże różnice w wartościach wywoływanych szkód zmęczeniowych, występujące osie pojazdów należy rozpatrywać z podziałem na osie: pojedyncze, podwójne i potrójne, których kolejne przejścia przez przekrój drogi tworzą tzw. widma obciążeń osi. Widma obciążeń osi pojedynczych można przybliżyć rozkładem gamma, osi podwójnych – rozkładem logarytmiczno – normalnym, a osi potrójnych – rozkładami normalnymi. W ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych istnieje również możliwość wykorzystania widm obciążeń osi w postaci dyskretnej.

Wykorzystanie widm obciążeń osi pozwala na precyzyjną ocenę wpływu struktury ruchu na nośność nawierzchni drogowych. Widma obciążeń osi są „odporne” na wahania nacisków osi w poszczególnych sylwetkach pojazdów lub grup pojazdów, a z uwagi na to, że analizą objęty jest cały zakres występowania nacisków osi, to uzyskane wyniki najdokładniej odpowiadają rzeczywistemu oddziaływaniu pojazdów na nawierzchnię. Należy jeszcze zwrócić uwagę na prostotę zaproponowanej metody. Dla wyznaczonych rozkładów nacisków osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych, dysponując praktycznie tylko liczbą osi danego typu, można dokładnie ocenić trwałość nawierzchni pod takim obciążeniem, i to pomimo tego, że nie wykorzystuje się współczynników przeliczeniowych pojazdów na osie obliczeniowe, a operuje się pojęciem szkody zmęczeniowej. Możliwa jest także dokładna ocena szkodliwego wpływu osi przeciążonych i ich udziału w zniszczeniu nawierzchni. Należy jeszcze tutaj wspomnieć, że w dalszym etapie prac, autor przewiduje wykorzystanie w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowych gęstości widmowej (spektralnej) [173] obciążeń o charakterze stochastycznym.

Przedstawione analizy oraz wnioski z nich płynące pozwalają stwierdzić, że druga teza postawiona w pracy, mówiąca o wykorzystaniu widm obciążeń osi w ocenie oddziaływania pojazdów na nawierzchnie drogowe, została udowodniona.

10. WPLYW STANU TECHNICZNEGO NAWIERZCHNI NA WIELKOŚĆ ODDZIAŁYWAŃ POJAZDÓW

10.1. Wprowadzenie

W rozdziale przedstawiono wpływ oddziaływań dynamicznych pojazdów na wartość wywoływanych w nawierzchniach drogowych szkód zmęczeniowych oraz na wartość współczynników agresywności poszczególnych sylwetek pojazdów. Oddziaływania dynamiczne wyznaczono w oparciu o obliczeniowy model pojazdu samochodowego wykorzystywany w ocenie równości podłużnej nawierzchni przy pomocy wskaźnika *IRI*.

10.2. Wskaźnik równości podłużnej nawierzchni *IRI*

Stan techniczny podatnych nawierzchni drogowych opisuje szereg parametrów techniczno-eksploatacyjnych podlegających ocenie, m.in. takich jak:

- nośność,
- równość,
- skoleinowanie,
- stan powierzchni,
- właściwości przeciwpoślizgowe..

Wśród tych parametrów, decydujący wpływ na wielkość oddziaływań pojazdów ma równość. Nierówności drogi są przyczyną powstawania dodatkowych obciążeń dynamicznych w zawieszeniu pojazdów, co przyczynia się do zwiększenia obciążeń przekazywanych na nawierzchnię, a tym samym do szybszego jej zniszczenia. Nierówności nawierzchni mogą być skutkiem zarówno błędów popełnionych na etapie projektowania (niewłaściwie prowadzona niweleta), wykonawstwa, jak i zniszczenia nawierzchni przez pojazdy. Z jednej strony, są one przyczyną potęgowania oddziaływania pojazdów na nawierzchnię (a więc przyczyniają się do szybszego zniszczenia nawierzchni), a z drugiej strony, powodują obniżenie bezpieczeństwa użytkowników i ich komfortu jazdy.

Obecnie, za międzynarodowy miernik oceny równości podłużnej nawierzchni, uznawany jest wskaźnik *IRI* (International Roughness Index, [164]), który charakteryzuje pracę zawieszenia w umownym, dynamicznym modelu pojazdu samochodowego (rys. 10.1) o dwóch stopniach swobody, jadącym z prędkością 80 km/h po zarejestrowanym profilu nierówności drogi. Jest on zatem równy średniej wartości względnego przemieszczenia nadwozia i koła samochodu na odcinku o określonej długości [163]:

$$IRI = \frac{\delta[\dot{q}]}{V} \quad [\text{mm/m}], [\text{m/km}] \quad (10.1)$$

lub:

$$IRI = \frac{\delta[\Delta q]}{\Delta x} \quad [\text{mm/m}], [\text{m/km}] \quad (10.2)$$

$$\Delta q_i = q_i - q_{i-1} \quad [\text{mm}] \quad (10.3)$$

gdzie: $\delta[\dot{q}]$ - odchylenie przeciętne prędkości przemieszczenia zawieszenia w modelu pojazdu [mm/s],

$\delta[\Delta q]$ - odchylenie przeciętne przyrostu rzędnej przemieszczenia zawieszenia w modelu pojazdu, [mm],

Δx - długość kroku próbkowania, [m].

Jak widać, jest to dosyć specyficzna miara, gdyż bezpośrednio nie odnosi się ona do nierówności nawierzchni drogi, a do reakcji zawieszenia modelu pojazdu wywołanego przez te nierówności. W Polsce, aktualnie obowiązują cztery klasy równości podłużnej nawierzchni (A, B, C, D), którym przypisane są określone zakresy wskaźników *IRI* (tab. 10.1). Im wskaźnik osiąga mniejsze wartości, tym nawierzchnia jest w lepszym stanie. W sytuacji, w której nawierzchnia nie wywoła żadnej reakcji w zawieszeniu modelu pojazdu, wskaźnik *IRI* przyjmie wartość równą 0.

Tab. 10.1. Klasyfikacja stanu nawierzchni, z uwagi na jej równość podłużną [164].

Klasa nawierzchni		<i>E</i> [<i>IRI</i>], mm/m	
		A, S, GP	G, Z
A	Stan dobry	<2.0	<3.0
B	Stan zadowalający	2.0÷4.3	3.0÷5.0
C	Stan niezadowalający, planowany zabieg remontowy	4.4÷5.7	5.1÷6.6
D	Stan zły, wymagający natychmiastowej interwencji	>5.7	>6.6

W Polsce, wykonuje się odcinkową ocenę nośności podłużnej *IRI_p* dla zbioru wskaźników *IRI* o liczności *n* ($10 \leq n \leq 29$) wg wzoru [164]:

$$IRI_p = \frac{\sum_{i=1}^n IRI_i}{n} \quad (10.4)$$

której podstawą jest zbiór wskaźników *IRI* wyznaczany w oparciu o profilometryczne urządzenie w prawym śladzie kół na zewnętrznym pasie ruchu pojazdów. Wskaźnik IRI_p wyznaczany jest przeważnie dla odcinka drogi o długości 1 km, a wskaźniki IRI_i dla odcinków drogi o długości 50 m. Dla wyznaczonych m odcinkowych ocen IRI_p można wyznaczyć wartość średnią wskaźnika *IRI* ze wzoru [164]:

$$E[IRI_p] = \frac{\sum_{j=1}^m n_j \cdot IRIp_j}{\sum_{j=1}^m n_j} \quad (10.5)$$

gdzie: n_j – liczba wskaźników *IRI* na j – tym odcinków,

$IRIp_j$ – odcinkowa ocena nośności na j -tym odcinku drogi.

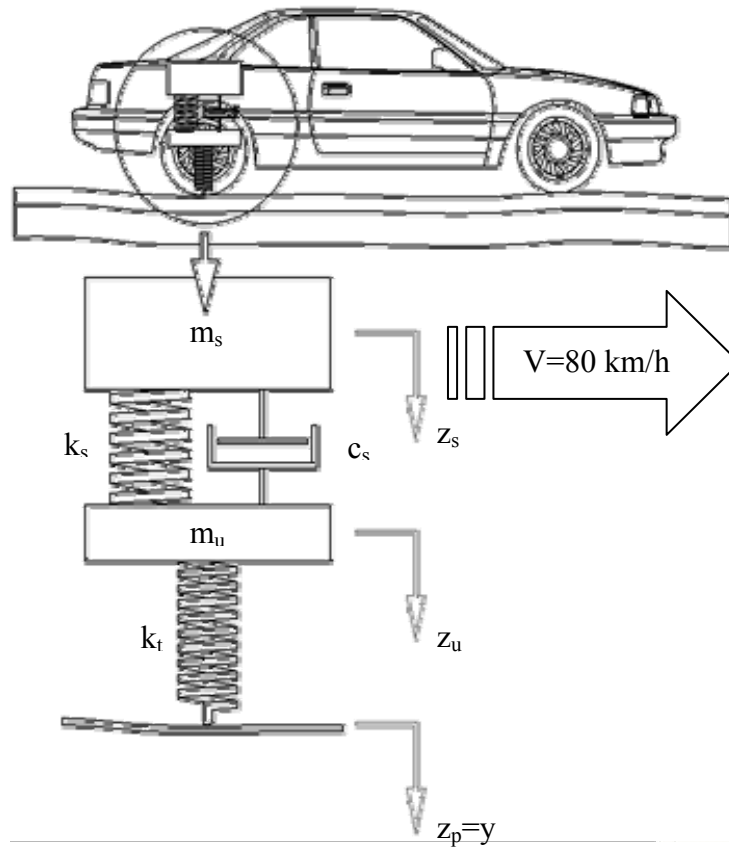
Wyniki obliczeń wskaźników *IRI* zaokrągla się do 0.1mm/m.

Nierówności nawierzchni przyczyniają się do skrócenia okresu eksploatacji nawierzchni, na skutek wzrostu dynamicznego oddziaływania pojazdów na nawierzchnię. Dlatego istotne jest, ustalenie korelacji pomiędzy wskaźnikiem *IRI*, a dynamicznym oddziaływaniem pojazdów na nawierzchnię, co pozwoliłoby na dokładniejszą ocenę trwałości eksploatacyjnej nawierzchni.

10.3. Oddziaływanie dynamiczne pojazdu, a wskaźnik IRI

Zagadnienia interakcji pojazdu i nawierzchni drogowej było już szeroko omawiane i analizowane na przestrzeni wielu lat w literaturze [38, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 97, 113, 126, 134, 135, 136, 137, 138, 149, 175, 184].

W Polsce, wskaźnikiem *IRI* oraz oceną dynamicznego oddziaływania poruszających się pojazdów na nawierzchnię drogową zajęto się m.in. w pracach [157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164]. Wyprowadzono w nich bezwymiarowy współczynnik dynamiczności (współczynnik μ) opisujący ile razy w danym punkcie drogi siła od poruszającego się modelu pojazdu jest większa od wywieranego przez ten pojazd obciążenia statycznego.



Rys. 10.1. Obliczeniowy model pojazdu samochodowego [183].

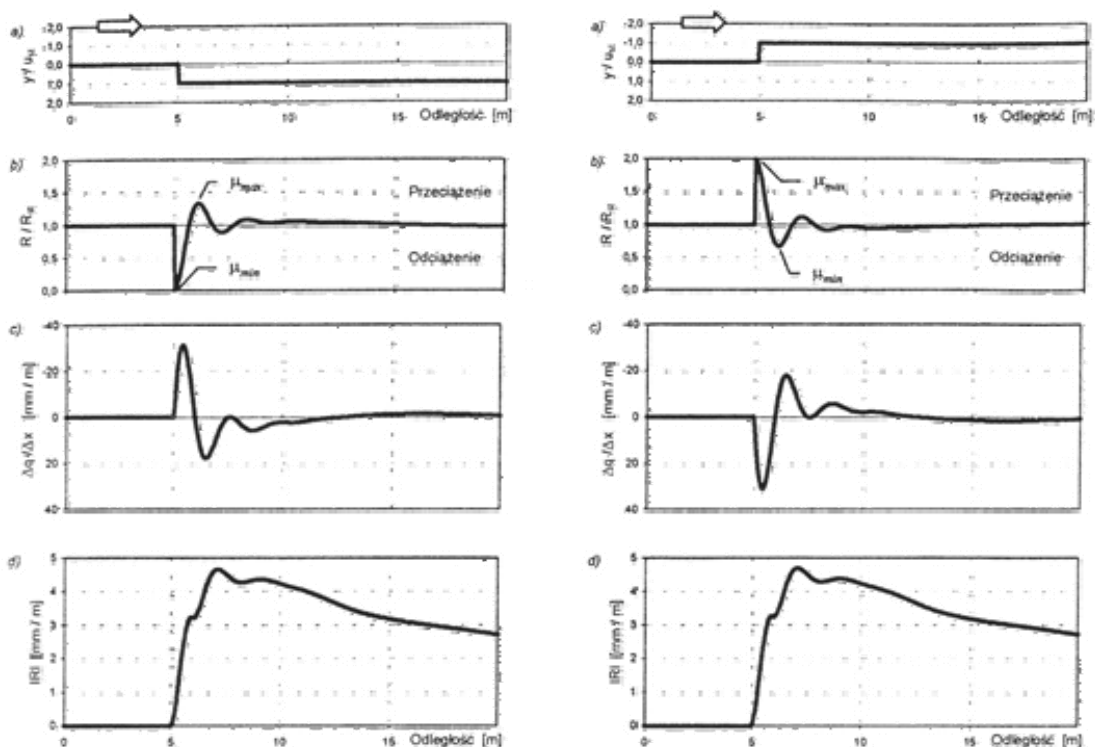
Oszacowano, że istnieje liniowa zależność pomiędzy wskaźnikiem IRI , a współczynnikiem μ [159]:

$$\mu = 1 + \beta \cdot IRI \quad (10.6)$$

Wartość współczynnika β została ustalona doświadczalnie, w oparciu o dane pomiarowe uzyskane z dwóch dróg krajowych: drogi nr 19 (nawierzchnia asfaltowa) i A4 (nawierzchnia betonowa). Jest on zależny od stanu nawierzchni, a jego wartość wynosi:

- przy stanie zadowalającym (naw. asfaltowa):
 $\beta_{max} = 0,133$
 $\beta_{min} = -0,125$
- przy stanie niezadowalającym (naw. asfaltowa):
 $\beta_{max} = 0,152$
 $\beta_{min} = -0,161$
- przy stanie złym (naw. betonowa):
 $\beta_{max} = 0,129$
 $\beta_{min} = -0,436$

Jak widać, w przypadku nawierzchni betonowych w złym stanie, wartość współczynnika β_{min} znacznie różni się od β_{max} i odpowiada sytuacji, w której model obliczeniowy pojazdu zjeżdża z nierówności nawierzchni (rys. 10.2).



Rys. 10.2. Zachowanie się modelu pojazdu samochodowego w trakcie zjazdu i najazdu na nierówność nawierzchni [159]:

- a) – profil nierówności,
- b) – współczynnik μ ,
- c) – jednostkowy przyrost przemieszczenia zawieszenia,
- d) – wskaźnik *IRI*.

W pracy [159] wykazano ponadto, że identyczny wskaźnik *IRI* może opisywać różne zachowanie się modelu pojazdu samochodowego. Na rysunku 10.2 przedstawiono sytuację, w której taki sam wskaźnik *IRI* odpowiada sytuacji zjazdu modelu pojazdu z nierówności nawierzchni na skutek czego dochodzi do oderwania koła pojazdu od nawierzchni ($\mu=0$), a następnie dopiero do zwiększenia oddziaływania w momencie zetknięcia koła z nawierzchnią ($\mu=1,33$), jak i najazdu tego koła na nierówność, gdzie mamy najpierw do czynienia ze zwielokrotnieniem oddziaływania ($\mu=2,00$), a dopiero w następnej kolejności na skutek pracy zawieszenia modelu pojazdu, z jego zmniejszeniem ($\mu=0,67$).

W projektowaniu konstrukcji nawierzchni, istotna jest jednak wielkość dynamicznego obciążenia drogi (wyznaczana np. dla pewnego odcinka jezdni o długości 50m), którą można by było przyjmować w oparciu o znany wskaźnik *IRI* na tym odcinku. Znajomość wartości dynamicznego obciążenia drogi pozwoliłaby na szacowanie, w jakim stopniu nierówności drogi (a więc jej stan techniczny) mogą się przyczynić do szybszej utraty nośności nawierzchni poprzez zwiększenie występujących obciążeń od pojazdów. Jako punkt

wyjścia do rozważań może posłużyć obliczeniowy model pojazdu samochodowego (rys. 10.1). Drgania pionowe elementów modelu obliczeniowego opisać można za pomocą układu dwóch równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu:

$$m_s \ddot{z}_s + k_s (z_s - z_u) + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) = 0 \quad (10.7)$$

$$m_u \ddot{z}_u - k_s (z_s - z_u) - c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) = k_t (z_p - z_u) \quad (10.8)$$

a więc po przekształceniu równania (9.4) otrzymujemy:

$$c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) = -m_s \ddot{z}_s - k_s (z_s - z_u) \quad (10.9)$$

a po podstawieniu do równania (9.5):

$$m_u \ddot{z}_u + m_s \ddot{z}_s = k_t (z_p - z_u) \quad (10.10)$$

a zatem obciążenie dynamiczne nawierzchni jest równe:

$$P_{dyn} = m_u \ddot{z}_u + m_s \ddot{z}_s = k_t (z_p - z_u) \quad (10.11)$$

W przypadku nierówności drogi opisanych za pomocą funkcji harmoniczej (nierówności jezdni mają oczywiście rozkład losowy, jednak z uwagi na konieczność znalezienia jedynie korelacji pomiędzy nierównościami drogi opisanymi poprzez podany wskaźnik *IRI*, a wartością dynamicznego obciążenia wystarczy opisanie nierówności nawierzchni za pomocą funkcji harmoniczej):

$$z_p = A_p \cdot e^{i\omega t} \quad (10.12)$$

prawdą jest, że: $\dot{z}_p = \frac{d}{dt}(z_p) = i \cdot \omega \cdot A_p e^{i\omega t} \quad (10.13)$

czyli: $\dot{z}_p = i \cdot \omega \cdot z_p \quad (10.14)$

Zatem równania 11.7 i 11.8 można zapisać w postaci:

$$-\omega^2 m_s z_s + k_s (z_s - z_u) + i \cdot \omega \cdot c_s (z_s - z_u) = 0 \quad (10.15)$$

$$-\omega^2 m_u z_u - k_s (z_s - z_u) - i \omega c_s (z_s - z_u) = k_t (z_p - z_u) \quad (10.16)$$

Dla modelu obliczeniowego przedstawionego na rysunku 10.1, nierówności drogi wywołają odpowiedzi koła i zawieszenia pojazdu, opisane również funkcjami harmonicznymi (o takiej samej częstotliwości, ale być może z inną amplitudą o fazą) w postaci:

$$z_s = A_s \cdot e^{i\omega t - \phi_s} \text{ (nadwozie)} \quad (10.17)$$

$$z_u = A_u \cdot e^{i\omega t - \phi_u} \text{ (koło)} \quad (10.18)$$

W oparciu o równania 10.15 i 10.16 można wyznaczyć funkcje transferu pozwalające na określenie następujących zależności:

$$H_{Z_p\ddot{Z}_s(i\omega)} = \frac{\ddot{Z}_s}{Z_p}; H_{Z_p\dot{Z}_s(i\omega)} = \frac{\dot{Z}_s}{Z_p}; H_{Z_pZ_s(i\omega)} = \frac{Z_s}{Z_p}$$

oraz:

$$H_{Z_p\ddot{Z}_u(i\omega)} = \frac{\ddot{Z}_u}{Z_p}; H_{Z_p\dot{Z}_u(i\omega)} = \frac{\dot{Z}_u}{Z_p}; H_{Z_pZ_u(i\omega)} = \frac{Z_u}{Z_p}$$

Należy tutaj jeszcze przypomnieć, że pomiar i ocena wskaźnika *IRI* odbywa się ze stałą prędkością:

$$v = const = 80 \frac{km}{h} = 22.2(2) \frac{m}{s} \quad (10.19)$$

co sprawia, że częstość kołowa jest zależna jedynie od długości fali nierówności drogi:

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{v}{L} \quad (10.20)$$

Po przekształceniach zależności (10.15) i (10.16) otrzymujemy funkcje transferu:

$$H_{Z_pZ_s(i\omega)} = \frac{Z_s}{Z_p} = \frac{k_t(k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - ic_s \omega^3 (m_s + m_u) - \omega^2 [k_t m_s + k_s (m_s + m_u)] + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.21)$$

$$H_{Z_p\dot{Z}_s(i\omega)} = \frac{\dot{Z}_s}{Z_p} = \frac{i\omega k_t (k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - ic_s \omega^3 (m_s + m_u) - \omega^2 [k_t m_s + k_s (m_s + m_u)] + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.22)$$

$$H_{Z_p\ddot{Z}_s(i\omega)} = \frac{\ddot{Z}_s}{Z_p} = \frac{-\omega^2 k_t (k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - ic_s \omega^3 (m_s + m_u) - \omega^2 [k_t m_s + k_s (m_s + m_u)] + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.23)$$

oraz:

$$H_{Z_pZ_u(i\omega)} = \frac{Z_u}{Z_p} = \frac{k_t(k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - (i\omega^3 c_s + \omega^2 k_s) \cdot (m_s + m_u) + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.24)$$

$$H_{Z_p\dot{Z}_u(i\omega)} = \frac{\dot{Z}_u}{Z_p} = \frac{i\omega k_t (k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - (i\omega^3 c_s + \omega^2 k_s) \cdot (m_s + m_u) + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.25)$$

$$H_{Z_p\ddot{Z}_u(i\omega)} = \frac{\ddot{Z}_u}{Z_p} = \frac{-\omega^2 k_t (k_s + ic_s\omega)}{\omega^4 m_s m_u - (i\omega^3 c_s + \omega^2 k_s) \cdot (m_s + m_u) + i\omega c_s k_t + k_t k_s} \quad (10.26)$$

Znając zależności pomiędzy poszczególnymi elementami modelu obliczeniowego przedstawionego na rysunku 10.1 [137]:

$$\frac{k_s}{m_s} = 63.3 \frac{1}{s^2} \quad (10.27)$$

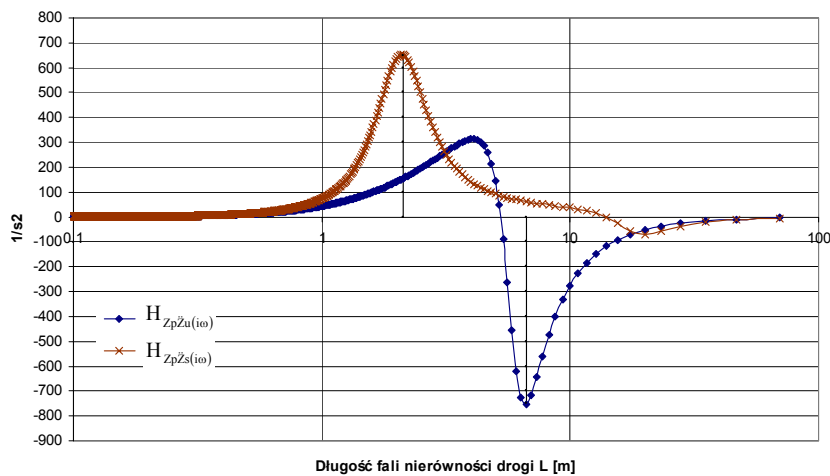
$$\frac{k_t}{m_s} = 653 \frac{1}{s^2} \quad (10.28)$$

$$\frac{c}{m_s} = 6 \frac{1}{s} \quad (10.29)$$

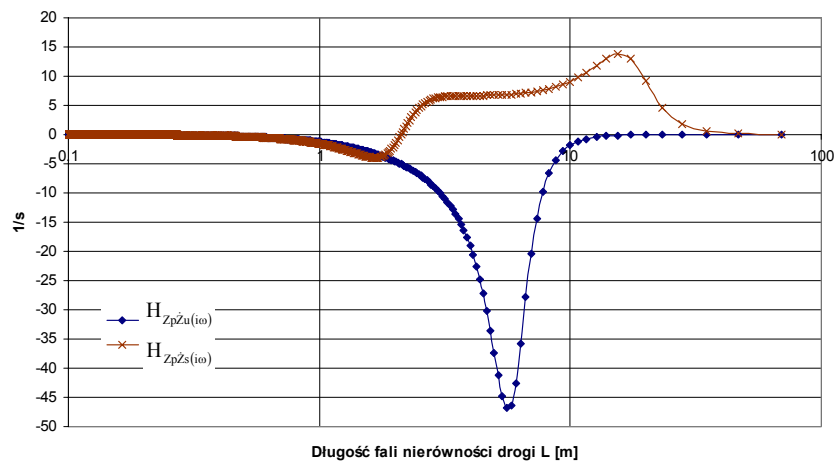
$$\frac{m_u}{m_s} = 0.15 \quad (10.30)$$

można dla dowolnie przyjętej masy nadwozia określić pozostałe parametry. Dla przyjętego modelu obliczeniowego: $m_s = 8900$ kg, $m_u = 1335$ kg.

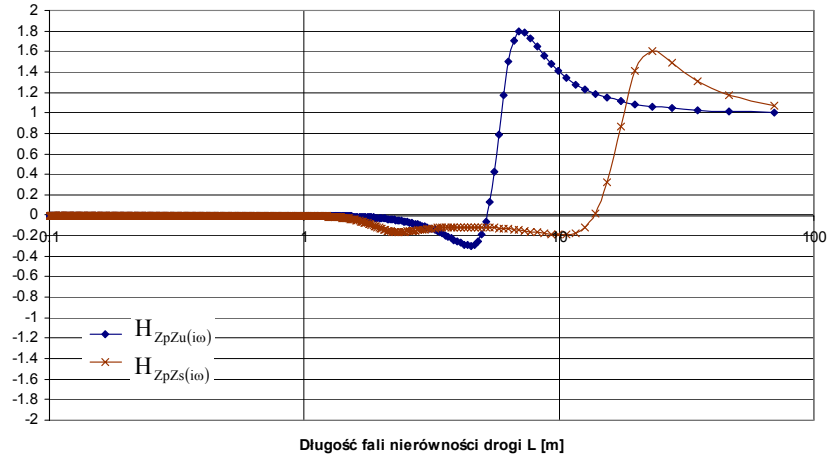
Na podstawie wyznaczonych funkcji transferu (10.21 ÷ 10.26), można określić, jaka długość fali nierówności drogi wywoła największe oddziaływanie dynamiczne pojazdu jadącego ze stałą prędkością 80 km/h oraz jaka jest wielkość odpowiadającej jej częstotliwości kołowej.



Rys. 10.3. Funkcje transferu: nierówności nawierzchni – przyspieszenie nadwozia i koła pojazdu.



Rys. 10.4. Funkcje transferu: nierówności nawierzchni – prędkość przemieszczenia nadwozia i koła pojazdu.



Rys. 10.5. Funkcje transferu: nierówności nawierzchni – przemieszczenie nadwozia i koła pojazdu.

Dla nierówności o długości fali 2.12 m występuje maksymalne oddziaływanie dynamiczne pojazdu na nawierzchnię, a dla nierówności o długości fali 6.65 m oddziaływanie dynamiczne pojazdu są najmniejsze (rys. 10.3). Dla takich nierówności otrzymujemy:

$$\omega_{max} = 2\pi \cdot \frac{22.22}{2.12} = 65.86 \text{ rad/s} \quad (10.31)$$

$$\omega_{min} = 2\pi \cdot \frac{22.22}{6.65} = 21.00 \text{ rad/s} \quad (10.32)$$

Oczywiście wyznaczone długości fali nierówności nawierzchni odnoszą się jedynie do modelu obliczeniowego pojazdu wykorzystywanego przy ocenie wskaźnika *IRI*.

Dla tak zestawionych danych, można już określić ze wzoru 10.11 wartość dynamicznych obciążeń oraz wartość wskaźnika *IRI* (wzór 10.1 i 10.2). Obciążenie nawierzchni jezdni na danym odcinku drogi równe jest [116]:

$$P = P_{stat} + P_{dyn} \quad (10.33)$$

a odchylenie od wartości średniej (wariancja) [116]:

$$\sigma_p^2 = \frac{I}{N} \sum_{k=1}^N (P_{stat} + P_{dyn,k} - \bar{P})^2 \cdot f_k \quad (10.34)$$

gdzie: \bar{P} – wartość średnia obciążeń równa [116]:

$$\bar{P} = P_{stat} \quad (10.35)$$

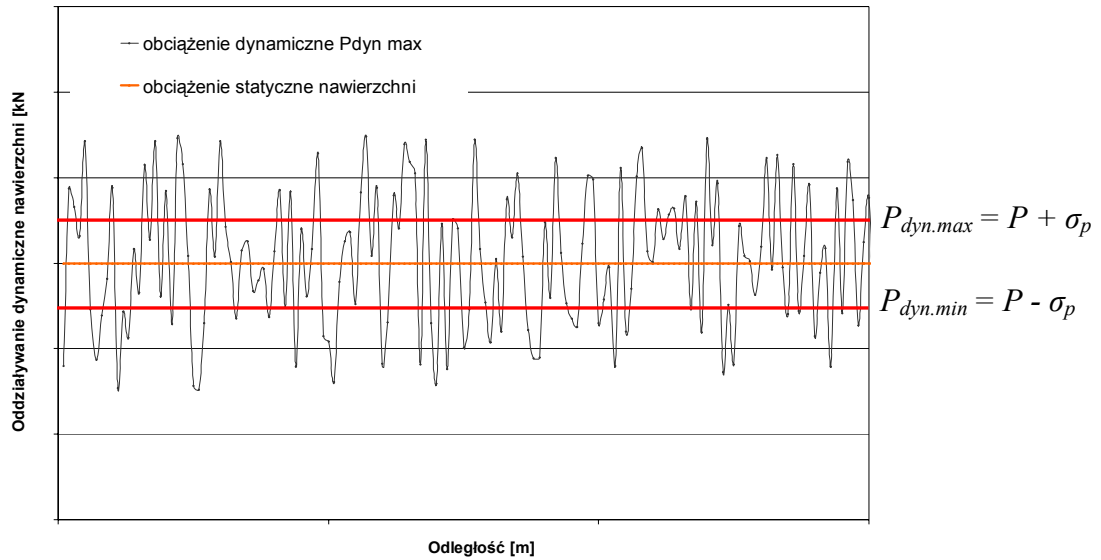
f_k – liczba przekroczeń poziomów wart. średniej.

A zatem [116]:

$$\sigma_p^2 = \frac{I}{N} \sum_{k=1}^N P_{dyn,k}^2 \cdot f_k \quad (10.36)$$

$$\sigma_p^2 = \overline{P}_{dyn}^2 = \frac{I}{N} \sum_{k=1}^N P_{dyn,k}^2 \cdot f_k \quad (10.37)$$

Za miarę dynamicznego obciążenia nawierzchni można zatem uznać odchylenie standardowe wyznaczone w oparciu o zależność (10.37, rys. 10.6).



Rys. 10.6. Obciążenie dynamiczne nawierzchni drogi.

Dla tak zdefiniowanego obciążenia dynamicznego nawierzchni, wartości szkód zmęczeniowych oraz współczynników agresywności opisanych zależnościami (8.6), (8.7), (8.17) i (8.18) można zapisać w postaci:

$$d_d = c \cdot (P + \sigma_p)^\alpha \quad (10.38)$$

$$r_d = b \cdot (P + \sigma_p)^\alpha \quad (10.39)$$

oraz:

$$d_d = c_1 \cdot h^{\delta_1} \cdot (P + \sigma_p)^{\gamma_1} \quad (10.40)$$

$$r_d = c_2 \cdot h^{\delta_2} \cdot (P + \sigma_p)^{\gamma_2} \quad (10.41)$$

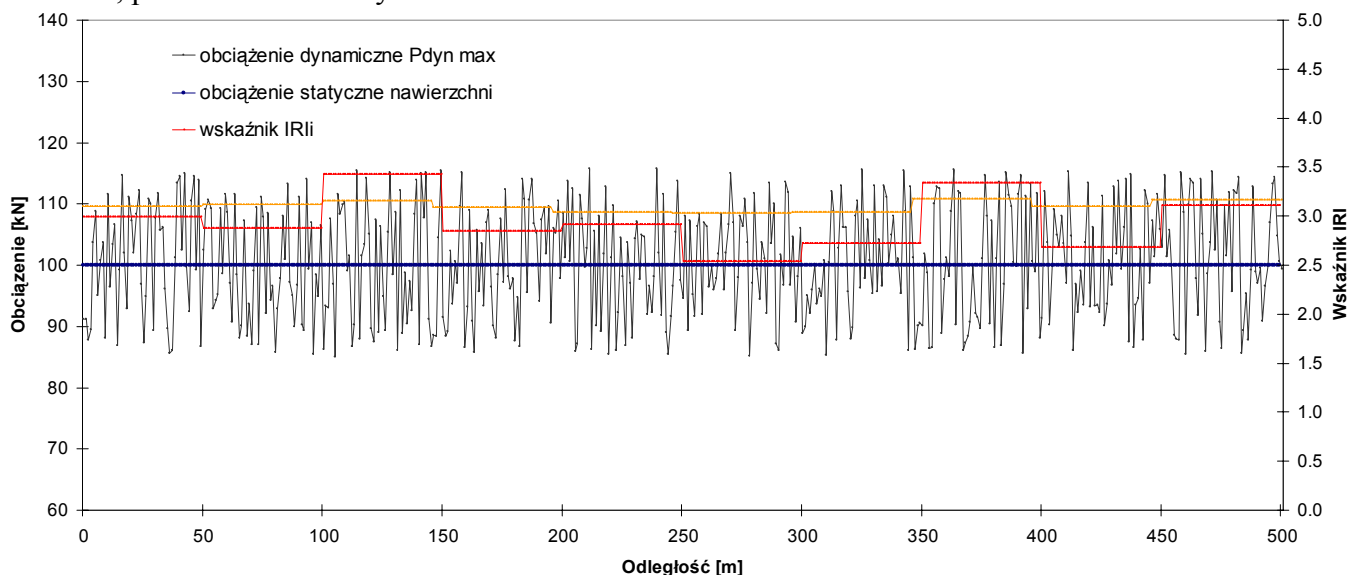
gdzie: d_d – szkoda zmęczeniowa wywołana w nawierzchni, uwzględniająca występowanie obciążeń dynamicznych,

r_d – współczynnik agresywności, uwzględniający występowanie obciążeń dynamicznych,

$(P + \sigma_p)$ – obciążenie osi uwzględniające występowanie obciążeń dynamicznych [kN].

10.4. Oddziaływanie dynamiczne pojazdu w projektowaniu

Dla obciążenia statycznego odpowiadającego przyjętemu modelowi obliczeniowemu na poziomie 100 kN ($m_s = 8900$ kg, $m_u = 1335$ kg), wartości oddziaływania dynamicznego obliczone dla przykładowej nierówności nawierzchni odcinka drogi o długości 500 m, przedstawiono na rysunku 10.7.



Rys. 10.7. Obciążenia dynamiczne odcinka drogi o długości 500.0m.

Tab. 10.2. Zestawienie wskaźników *IRI* oraz odpowiadających im odchyłeń standardowych na analizowanym odcinku drogi o długości 500 m.

Odcinek [m]	IRI_i	σ_p [kN]
0-50	3,0	9,55
50-100	2,9	9,88
100-150	3,4	10,54
150-200	2,8	9,37
200-250	2,9	8,69
250-300	2,5	8,54
300-350	2,7	8,69
350-400	3,3	10,74
400-450	2,7	9,63
450-500	3,1	10,61

Dla przykładowego obciążenia osią pojedynczą 100 kN o kołach pojedynczych (szerokość opon 305 mm), równania 8.10 i 8.20 po uwzględnieniu obciążenia dynamicznego, przyjmą postać:

$$d_d^{kl305} = 1,690 \cdot 10^{-10} \cdot h^{-2,91970} \cdot (P + \sigma_p)^{3,55200} \quad (10.42)$$

$$r_d^{kl305} = 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-0,42459} \cdot (P + \sigma_p)^{3,29038} \quad (10.43)$$

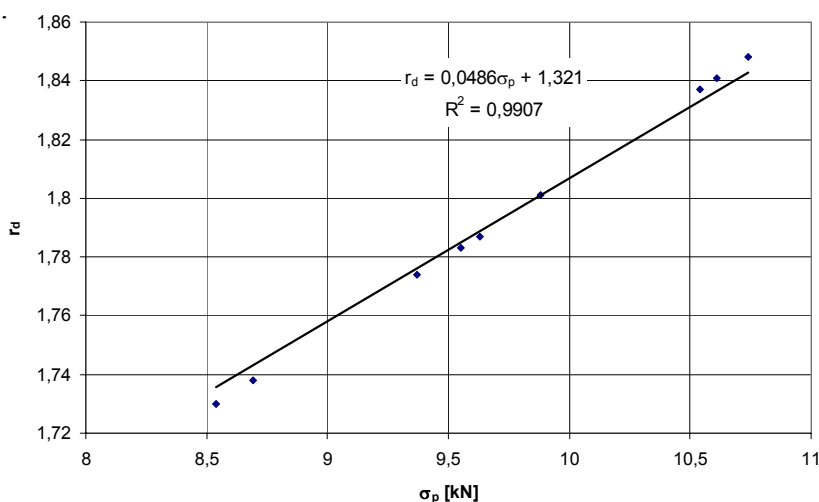
Wartości szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności wyznaczone dla obciążenia statycznego i dynamicznego w oparciu o zależności (10.42) i (10.43), są równe wartościom podanym w tabeli 10.3 (wartości wyznaczone dla nawierzchni o grubości warstw asfaltowych równej 23 cm).

Tab. 10.3. Zestawienie wartości szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności wyznaczonych dla osi pojedynczej o kołach pojedynczych (model KI305) przy obciążeniu statycznym (d , r) oraz po uwzględnieniu oddziaływania dynamicznego (d_d , r_d).

Odcinek [m]	p [kN]	$P+\sigma_p$ [kN]	d	r	d_d	r_d	Δ_d [%]	Δ_r [%]
0-50	100	109,55	$2,270 \cdot 10^{-7}$	1,321	$3,139 \cdot 10^{-7}$	1,783	38,3	35,0
50-100		109,88			$3,172 \cdot 10^{-7}$	1,801	39,7	36,3
100-150		110,54			$3,241 \cdot 10^{-7}$	1,837	42,8	39,1
150-200		109,37			$3,120 \cdot 10^{-7}$	1,774	37,5	34,3
200-250		108,69			$3,052 \cdot 10^{-7}$	1,738	34,4	31,5
250-300		108,54			$3,037 \cdot 10^{-7}$	1,730	33,8	30,9
300-350		108,69			$3,052 \cdot 10^{-7}$	1,738	34,4	31,5
350-400		110,74			$3,262 \cdot 10^{-7}$	1,848	43,7	39,9
400-450		109,63			$3,147 \cdot 10^{-7}$	1,787	38,6	35,3
450-500		110,61			$3,248 \cdot 10^{-7}$	1,841	43,1	39,3

Δ_d , Δ_r – przyrost szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności wywołany obciążeniem dynamicznym [%]

Wyniki zamieszczone w tabeli 10.3 wskazują na to, iż pomimo niewielkich odchyleń standardowych pojawiających się obciążeń dynamicznych, wartości wywoływanych szkód zmęczeniowych oraz odpowiadających im współczynników agresywności rosną w sposób znaczący. Już w przypadku nierówności nawierzchni o odchyleniu standardowym σ_p wynoszącym od 8,54 kN do 10,74 kN, wzrost współczynnika agresywności wynosi od 30,9 % do 39,9 %, a wzrost wywoływanych szkód zmęczeniowych waha się od 33,8 % do 43,1 %.



Rys. 10.8. Zależność współczynnika agresywności r_d od odchylenia standardowego σ_p .

Zależność r_d (współczynnik agresywności, uwzględniający występowanie obciążeń dynamicznych) – σ_p (odchylenie standardowe obciążeń dynamicznych) przedstawiono na rys. 10.8. Jest to zależność wyznaczona dla obciążenia nawierzchni, o grubości warstw asfaltowych równej 23 cm, osią pojedynczą o kołach pojedynczych (szerokość opon 305 mm) i statycznym nacisku 100 kN.

10.5. Podsumowanie

W oparciu o przedstawione rozważania można stwierdzić, że uwzględnianie w projektowaniu występujących nierówności podłużnych nawierzchni drogowych ma istotne znaczenie w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni. Wykazano, że nierówności nawierzchni wpływają bezpośrednio na wartości wywoływanych szkód zmęczeniowych i współczynników agresywności osi. W przypadku nierówności nawierzchni o wskaźniku *IRI* równym 2,5 (co odpowiada np. nawierzchni drogi klasy G w stanie dobrym), wzrost współczynnika agresywności sięga 30,9 %, a wzrost wywoływanych szkód zmęczeniowych 33,8 %. Przy wskaźniku *IRI* równym 3,4 (nawierzchnia drogi klasy G w stanie zadowalającym), wzrost współczynnika agresywności wynosi już 39,9 %, a szkód zmęczeniowych 43,1 %. Można zatem stwierdzić, że znajomość wskaźnika *IRI* pozwala na oszacowanie pojawiających się obciążeń dynamicznych i ich wpływu na wielkość oddziaływań pojazdów.

Oczywiście, należy zdawać sobie sprawę, że rozważania dotyczyły modelu pojazdu poruszającego się z prędkością 80 km/h. Pojazdy rzeczywiste, o różnych konfiguracjach osi i charakterystykach zawieszenia, poruszające się z różnymi prędkościami, mogą wywoływać przeciążenia nawierzchni w różnych punktach, niekoniecznie nakładających się. Jednak do oceny możliwych przeciążeń pojawiających się w przekroju drogi, przedstawione podejście jest wystarczające i umożliwi oszacowanie, w jakim stopniu oddziaływanie dynamiczne pojazdów wywołane złym stanem technicznym jezdni może przyczynić się do skrócenia jej okresu eksploatacji.

11. PODSUMOWANIE

Ocena wpływu struktury rodzajowej pojazdów ciężkich i konfiguracji ich osi na nawierzchnie drogowe jest jednym z głównym kierunków badawczych w budownictwie drogowym. Badania te prowadzone są zarówno w wielkiej skali w warunkach terenowych, jak i w warunkach laboratoryjnych lub symulacjach numerycznych.

W pracy przeprowadzono identyfikację sylwetek pojazdów ciężarowych pojawiających się na wybranych drogach w Polsce oraz zaproponowano ich klasyfikację, której podstawą była liczba i konfiguracja osi w pojazdach ciężarowych, a zatem sposób i wielkość ich oddziaływania na nawierzchnie drogowe. W przeciwieństwie do klasyfikacji już wykorzystywanych w drogownictwie, a bazujących na takich cechach pojazdów jak np. ich przeznaczenie lub masa całkowita, zaproponowany podział pojazdów ciężarowych, może być doskonałym punktem odniesienia w projektowaniu konstrukcji nawierzchni. Dla tak usystematyzowanych pojazdów ciężarowych, w oparciu o pomiary prowadzone na przestrzeni ostatnich kilku lat na drogach krajowych w Polsce, zidentyfikowano występujące naciski osi poszczególnych sylwetek pojazdów. Stwierdzono występowanie charakterystycznych statystycznych rozkładów nacisków składowych osi pojazdów, zależnych od położenia danej osi w sylwetce oraz pełnionej przez nią funkcji. I tak, naciski osi kierowanych pojazdów odpowiadają rozkładowi wykładniczemu w sylwetce 2P oraz rozkładowi normalnym w sylwetkach 2P+2P, 2C+2N i 2C+3N, a naciski osi napędowych rozkładowi wykładniczemu w sylwetce 2P, rozkładowi normalnym w sylwetkach 2P+2P i 2C+3N oraz rozkładowi gamma w sylwetce 2C+2N. W przypadku osi przyczepy (sylwetka 2P+2P) obserwuje się rozkłady gamma, a w przypadku osi naczep rozkłady wykładnicze (osie naczepy w sylwetce 2C+2N) oraz rozkłady normalne (2C+3N).

W celu potwierdzenia postawionej tezy odnoszącej się do stosowanych obecnie w wymiarowaniu współczynników przeliczeniowych (agresywności), opracowano w pracy modele typowych konstrukcji nawierzchni obciążone w sposób charakterystyczny dla poszczególnych osi rozpoznanych i sklasyfikowanych pojazdów. W oparciu o analizę numeryczną zbudowanych modeli obliczeniowych prowadzoną w systemie CosmosM, precyzyjnie określono różnice w wartościach współczynników agresywności rozpoznanych sylwetek pojazdów ciężarowych. Stwierdzono, że niszczące działanie pojazdów ciężarowych jest zależne od liczby i konfiguracji osi w pojeździe, występujących nacisków osi, charakterystyk wytrzymałościowych i odkształceniowych materiałów wbudowanych w nawierzchnię oraz od grubości warstw nawierzchni drogowych. Najbardziej niekorzystnym

wpływem na nawierzchnie drogowe (a więc o największej agresywności) cechują się pięcioosiowe zespoły pojazdów (2P+3P i 3P+2P) oraz pięcioosiowy pojazd członowy (2C+3N) o dopuszczalnej masie całkowitej 40t. Zespoły pojazdów wykazują relatywnie bardziej niekorzystne działanie na nawierzchniach o grubościach warstw asfaltowych nie przekraczających 18cm, niż pojazdy członowe o takiej samej masie, natomiast na nawierzchniach o grubościach warstw asfaltowych większych od 18 cm, sytuacja jest odwrotna: większą agresywnością charakteryzują się pojazdy członowe pięcioosiowe z osią potrójną o kołach typu „Super Single”.

Uzyskane wyniki wykazały, że dla dwóch grup pojazdów ciężarowych stosowanych w wymiarowaniu (samochody ciężarowe bez przyczep i samochody ciężarowe z przyczepami), przyjmowane w Polsce współczynniki agresywności (przeliczeniowe na osie obliczeniowe 100 kN) nie odzwierciedlają istniejącej struktury rodzajowej pojazdów i nie oddają poprawnie wielkości oddziaływań pojazdów na nawierzchnie. Dodatkowo w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami znajduje się aż 10 sylwetek pojazdów ciężarowych, które jak wykazano, w bardzo różnym stopniu oddziałują na nawierzchnię. Różnice w wartościach wyznaczonych współczynników agresywności pojazdów pozwoliły potwierdzić postawioną tezę mówiącą o tym, że obowiązujące współczynniki przeliczeniowe nie odzwierciedlają istniejącej struktury ruchu i rzeczywistego oddziaływania pojazdów na nawierzchnię.

Jako metodę alternatywną, zaproponowano metodę wykorzystującą pojęcie szkody zmęczeniowej i widm obciążeń osi. Widma obciążeń osi wyznaczono dla trzech grup osi: osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych, dla których to określono również wartości szkód zmęczeniowych uzależnionych od wielkości przyłożonego obciążenia. Widma Obciążeń osi przedstawiono w postaci dyskretnej oraz ciągłej. W postaci ciągłej widma Obciążeń odpowiadają rozkładowi gamma (osie pojedyncze), logarytmiczno-normalnemu (osie podwójne) oraz rozkładowi normalnemu (osie potrójne). Zamieszczony przykład obliczeniowy wykazał możliwości zastosowań w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni widm obciążeń osi zarówno w postaci dyskretnej, jak i ciągłej. Postępowanie takie pozwoliło na potwierdzenie drugiej postawionej w pracy tezy mówiącej o wykorzystaniu widm obciążeń osi w ocenie oddziaływania pojazdów na nawierzchnie drogowe. Można zatem stwierdzić, że widma obciążeń osi (uwzględniające grupy osi: pojedynczych, podwójnych potrójnych) pozwalają na określenie rzeczywistego oddziaływania pojazdów na nawierzchnie drogowe.

W pracy przeanalizowano również wpływ oddziaływań dynamicznych pojazdów na wartości wywoływanych w nawierzchniach drogowych szkód zmęczeniowych oraz współczynników agresywności osi zidentyfikowanych i sklasyfikowanych sylwetek pojazdów. Podstawą oceny oddziaływań dynamicznych był obliczeniowy model pojazdu samochodowego wykorzystywany do oceny równości podłużnej nawierzchni przy pomocy wskaźnika *IRI*. Przedstawiono zależności pozwalające na bezpośrednie wyznaczenie wpływu oddziaływań dynamicznych na podane w pracy współczynniki agresywności (przeliczeniowe na osie 100 kN) oraz wywoływane w nawierzchniach drogowych szkody zmęczeniowe.

Dalsze prace autora będą dotyczyć analiz występujących rozkładów obciążeń pochodzących od przejeżdżających pojazdów w zależności od kategorii drogi (drogi międzynarodowe, krajowe, wojewódzkie, powiatowe i gminne) oraz wpływu obciążeń o charakterze stochastycznym na trwałość zmęczeniową nawierzchni drogowych.

12. WNIOSKI KOŃCOWE

W wyniku przeprowadzonych pomiarów i analiz teoretycznych, można sformułować następujące wnioski końcowe potwierdzające postawione w pracy tezy:

1. W strukturze rodzajowej pojazdów dominują cztery typowe sylwetki pojazdów: samochód ciężarowy dwuosiowy (2P), samochód ciężarowy dwuosiowy z przyczepą dwuosiową stanowiący zespół pojazdów (2P+2P) oraz pojazdy członowe: ciągnik siodłowy dwuosiowy z dwuosiową naczepą (2C+2N) i ciągnik siodłowy dwuosiowy z trójosiową naczepą (2C+3N).
2. W pojazdach tych, naciski poszczególnych osi (kierowanych, napędowych i ciągnionych przyczep i naczep) można scharakteryzować za pomocą odpowiadających im ciągłych rozkładów nacisków, których kształt i podstawowe parametry je opisujące (np. wartość oczekiwana) są zależne od sylwetki pojazdu oraz położenia danej osi w tej sylwetce:
 - w samochodzie ciężarowym dwuosiowym (sylwetka 2P), na obu osiach (osi kierowanej i napędowej) pojazdu naciski osi mają charakter rozkładów wykładniczych,
 - w samochodzie ciężarowym dwuosiowym z przyczepą dwuosiową (sylwetka 2P+2P), na obu osiach pojazdu występujące naciski osi mają charakter rozkładów normalnych, natomiast naciski osi ciągnionych przyczepy przybierają postać rozkładów gamma,
 - w ciągniku siodłowym dwuosiowym z dwuosiową naczepą (sylwetka 2C+2N), naciski osi kierowanej mają postać rozkładu normalnego, osi napędowej rozkładu gamma, a osi ciągnionych naczepy rozkładów wykładniczych,
 - w ciągniku siodłowym dwuosiowym z trójosiową naczepą (sylwetka 2C+3N), naciski osi kierowanej mają postać rozkładu normalnego; pozostałe osie w tej sylwetce (oś napędowa i osie ciągnione) mają rozkłady nacisków osi typu dwumodalnego – w ocenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni wystarczające jest jednak przybliżenie tych nacisków w postaci rozkładów normalnych,
 - naciski osi pojedynczych, podwójnych oraz potrójnych pojazdów ciężarowych, można przybliżyć poprzez odpowiadające im ciągle rozkłady, które tworzą tzw. widma obciążeń osi; naciski osi pojedynczych odpowiadają rozkładowi gamma, osi podwójnych rozkładowi logarytmiczno-normalnemu, natomiast osi potrójnych rozkładowi normalnym.

3. W rozpoznanych sylwetkach pojazdów występują trzy grupy osi: osie pojedyncze, osie podwójne i osie potrójne, które w różnym stopniu oddziałują na nawierzchnie drogowe. Osią pojedynczą o najbardziej niekorzystnym oddziaływaniu jest oś o kołach pojedynczych i szerokości opon 245 mm, natomiast osią wielokrotną jest oś potrójna o kołach pojedynczych typu „SuperSingle” i szerokości opon 385 mm.
4. Z uwagi na różnice w niszczącym wpływie na nawierzchnie, osie wielokrotne pojazdów (a przede wszystkim oś potrójna z kołami „Super Single”) nie powinny być przybliżane za pomocą osi składowych i powinny być uwzględniane w obliczeniach niezależnie od osi pojedynczych.
5. Poszczególne osie w sylwetkach pojazdów (kierowane, napędowe i ciągnione) z uwagi na różne typowe ogumienie stosowane w ich eksploatacji, przy identycznym obciążeniu w różnym stopniu szkodliwie oddziałują na nawierzchnie drogowe.
6. Współczynniki agresywności pojazdów są zależne od liczby i konfiguracji osi w pojeździe, występujących nacisków osi, charakterystyk wytrzymałościowych i odkształceniowych materiałów wbudowanych w nawierzchnię oraz od grubości warstw nawierzchni drogowych.
7. Naciski poszczególnych osi w sylwetkach pojazdów decydujące o współczynnikach agresywności nie są równe wartości przeciętnej odpowiadającego im rozkładu nacisków osi, ale wartości przeciętnej rozkładu sumarycznej agresywności osi rozumianego jako iloczyn współczynnika agresywności osi i rozkładu nacisków osi.
8. Z uwagi na to, iż w grupie samochodów ciężarowych bez przyczep zidentyfikowano trzy typowe sylwetki pojazdów, a w grupie samochodów ciężarowych z przyczepami aż dziesięć, które w bardzo różnym stopniu oddziałują na nawierzchnie drogowe, to współczynniki przeliczeniowe na osie obliczeniowe wyznaczone tylko dla tych dwóch grup pojazdów (jak to jest w aktualnie obowiązujących w Polsce Katalogach [93, 94, 95]) nie są w stanie precyzyjnie scharakteryzować istniejącej struktury ruchu oraz uwzględnić różnic występujących w strukturze pojazdów na różnych drogach.
9. Widma obciążeń osi pozwalają na precyzyjną ocenę wpływu struktury pojazdów ciężarowych na trwałość zmęczeniową nawierzchni drogowych. Widma obciążeń osi mogą być zatem wykorzystywane w wymiarowaniu nawierzchni.

LITERATURA

- [1] AASHTO Guide for design of pavement structures. AASHTO, 1993 r.
- [2] Aglan, H.A.; Figueroa, J.L.: „Damage-evolution approach to fatigue cracking in pavements”, *Journal of Engineering Mechanics*, Volume 119, 1993 r.
- [3] Akbulut H., Aslantas K.: „Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism”, *Materials and Design* 26, Elsevier 2005 r.
- [4] Ali H., Tayabji S.: „Evaluation of mechanistic-empirical performance prediction models for flexible pavements”, *Transportation Research Record* No.1629, 1998 r.
- [5] Bańkowski W.: „Metody badań nawierzchni drogowych w wielkiej skali”, *Drogownictwo* 7/2001 r.
- [6] Bąk R., Burczyński T.: „Wytrzymałość materiałów z elementami ujęcia komputerowego”, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa 2001 r.
- [7] Bhattacharya A., Velinsky S.: „Damage mechanics based approach to predicting cyclic pavement response and cumulative damage due to heavy vehicles”, *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 2005 r.
- [8] Bhattacharya A., Velinsky S.: „Finite-Element Implementation of the Microplane Theory for Simulating a Rigid Concrete Pavement-Vehicle Interaction”, *Mechanics Of Structures And Machines* 1998, Vol 26, Iss 4
- [9] Bhatti M. A., Molinas-Vega I., Stoner J. W.: „Nonlinear analysis of jointed concrete pavements”, *Transportation Research Record* No.1629, 1998 r.
- [10] Bhatti M. A., Stoner J. W.: „Nonlinear pavement distress model using dynamic vehicle loads”, *Journal of Infrastructure Systems* v 4 No.2, 1998 r.
- [11] Błażejowski K.: „Asfalty drogowe w nawierzchniach bitumicznych. Drogowa nawierzchnia asfaltowa, sposób pracy i zniszczenia”, *Drogownictwo* 7/1998 r.
- [12] Błażejowski K, Styk S.: „Technologia warstw bitumicznych. Nawierzchnie drogowe”, *WKiŁ*, Warszawa 2000 r.
- [13] Błażejowski K.: „Asfalty drogowe w nawierzchniach bitumicznych. Drogowa nawierzchnia asfaltowa, sposób pracy i zniszczenia”, *Drogownictwo* 7/1998 r.
- [14] Błażejowski K., Nilsson R., Hopman P., Sybilski D.: „Visco-elastic analysis of typical Polish flexible pavements using Veroad”, *Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”*, Kielce, maj 1996 r.
- [15] Błażejowski K., Sybilski D.: „Nawierzchnie bitumiczne w polskim klimacie”, *Drogownictwo* 1/1994 r.
- [16] Boessio M. L., Morsch I. B., Awruch A. M.: „Fatigue lifetime estimation of commercial vehicles”, *Journal of Sound and Vibration* 291, 2006 r.
- [17] Brown S.F., Brunton J.M., „Computer programs for the analytical design of asphalt pavements”, *Highways and Transportation*, 1984 r.
- [18] Brown S.F., Brunton J.M., Pell P.S.: „Developments to the Nottingham analytical method for asphalt pavements”, *Proc. of the 6-th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, Ann Arbor, vol. 1, 1987 r.
- [19] Buch A.: „Zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej”, *Państwowe Wydawnictwo Naukowe Warszawa* 1964 r.
- [20] Caprez M.: „WIM application to pavements”, *Second European Conference on Weigh in Motion of Road Vehicles*, Lisbon, 1998 r.
- [21] Cebon D.: „Handbook of vehicle-road interaction” *Swets&Zeitlinger B.V.*, Lisse, The Netherlands 1999 r.

- [22] Centre De Recherches Routieres, „Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées a revêtement hydrocarbure”, Bruxelles 1983 r.
- [23] Chatti K., Yun K.: „Dynamic analysis of multi-layered pavement systems under moving loads”, International Truck & Bus Meeting & Exposition Winston-Salem, North Carolina, November 1995 r.
- [24] Chatti K., Yun K.: „SAPSI-M: Computer program for analyzing asphalt concrete pavements under moving arbitrary loads”, Transportation Research Record No. 1539, Transportation Research Board (TRB), Washington 1996 r.
- [25] Chatti K. et al.: „Dynamic finite-element analysis of jointed concrete pavements”, Transportation Research Record No. 1449, 1994 r.
- [26] Chen D.: „Pavement distress under accelerated trafficking”, Transportation Research Record 1639, p 120-129, 1998 r.
- [27] Chen J. S. Lin K. Y.: „Effects of Crack Width and Permeability on Moisture-Induced Damage of Pavements”, Journal of Materials in Civil Engineering, 2004 r.
- [28] Cheung C.Y.: „Mechanical behaviour of bitumens and bituminous mixes”, Cambridge University Engineering Department, September 1995 r.
- [29] Cheung C.Y., Cebon D.: „Deformation mechanisms pure bitumen”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, December 1995 r.
- [30] Cheung C.Y., Cebon D.: „Experimental study of pure bitumens in tension, compression and shear”, Journal of Rheology, December 1995 r.
- [31] Cheung C.Y., Cebon D.: „Thin film deformation behaviour of power law creeping materials”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, December 1995 r.
- [32] Cheung C. Y., Cocks A. C. F., Cebon D.: „Isolated contact model of an idealized asphalt mix”, International Journal of Mechanical Sciences 41, Elsevier 1999 r.
- [33] „Code de bonne pratique pour le dimensionnement des chaussées a revêtement hydrocarbure”, Centre De Recherches Routiers, Bruxelles, 1983 r.
- [34] Collop A.C.: „Effects of traffic and temperature on flexible pavement wear”, Department of Engineering University of Cambridge, June 1994 r.
- [35] Collop A.C., Al_Hakim B., Thom N.H., Lloyd W.G.: „The use of WIM data in traffic assessment”, Second European Conference on Weigh in Motion of Road Vehicles, Lisbon, 1998 r.
- [36] Collop A.C, Cebon D. A.: „Model of whole-life flexible pavement performance”, International Journal of Mechanical Science, Vol. 209, 1995 r.
- [37] Collop A.C, Cebon D.: „A theoretical analysis of fatigue cracking of flexible pavements”, Cambridge University Engineering Department Technical Report CUED/C-MECH/TR 56, October 1993 r.
- [38] Collop A.C, Cebon D.: „Effects of ‘road friendly’ suspensions on long-term flexible pavement performance”, International Journal of Mechanical Science, August 1996 r.
- [39] Collop A.C, Cebon D.: „Modelling whole-life pavement performance”, Fourth International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, Ann Arbor, Michigan, 1995 r.
- [40] Collop, A.C.: „Alternative methods of traffic characterization in flexible pavement”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering v 215, p 141-156, 2001 r.
- [41] „Conception et dimensionnement des structures de chaussée”. Guide technique. SETRA, LCPC, Paris, 1994 r.
- [42] COSMOS/M 2.5: Electronic Documentation - Manual. Santa Monica 1993, California
- [43] „COST 323”, Second European Conference on Weigh in Motion of Road Vehicles, Lisbon, 1998 r.
- [44] „COST 323, Weigh in Motion of Road Vehicles. Final Report, Appendix 1 – European WIM Specification”, 1999 r.

- [45] „COST 333, Development of New Bituminous Pavement Design Method, Final Report of the Action”, 1999 r.
- [46] „COST 334, Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres, Final Report of the Action”, 2001 r.
- [47] „COST 347, Analytical Pavement Response Modelling With Multilayer Programs”, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2003 r.
- [48] „COST 347, Improvements in Pavement Research with Accelerated Load Testing”, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2003 r.
- [49] De Beer M., et.al.: „Three dimensional contact stresses under the Lintrack wide base single tyres, measured with the Vehicle-Road Surface Pressure Transducer Array system in South Africa; Report CR-85/056, CSiR Transportek, South Africa 1996 r.
- [50] Dempsey B.J., et.al.: „Development of a preliminary ALRS stabilized materials pavement, (SPAS)”, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Report ESL-TR-83-34, Engineering and Service Center, Tyndall Air Force Base, Florida, 1984 r.
- [51] „Design Manuals for Roads and Bridges”, Volume 7: Pavement Design and Maintenance HD 24/96 Traffic Assessment.
- [52] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłóś Z.: „Wytrzymałość materiałów. Tom I i II” Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999 r.
- [53] Dyląg Z., Orłóś Z.: „Wytrzymałość zmęczeniowa materiałów”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1962 r.
- [54] Fang H., Haddock J. E., White T. D., Hand A. J.: „On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis”, Finite Elements in Analysis and Design 41, Elsevier 2004 r.
- [55] Fekpe E. S.K., El-Gindy M.: „Influence of trailer tandem-axle versus tridem-axle on pavement damage and dynamic performance”, Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division American Society of Mechanical Engineers, DSC v 58, 1996 r.
- [56] Finn F., et.al.: „The use of distress prediction subsystems for design of pavement structures”, Proc. of the 4-th International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements”, University of Michigan, Ann Arbor, vol. 1, 1977 r.
- [57] Firlej S.: „Naprężenia ścinające w konstrukcjach nawierzchni drogowych”, Drogownictwo 1/2000 r.
- [58] Freeman RB, Harr M.E.: „Stress predictions for flexible pavement systems”, Journal Of Transportation Engineering-ASCE, 200 r.
- [59] Gawęł I., Kalabińska M., Piłat J.: „Asfalty drogowe”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001 r.
- [60] Gharaibeh, Nasir G.; Darter, Michael I.: „Probabilistic Analysis of Highway Pavement Life for Illinois”, Transportation Research Record, No. 1823, 2003 r.
- [61] Gillespie T.D., Karamihas S.M., Kohn S.D., Perera W.R.: „Guidelines for longitudinal pavement profile measurement”, Transportation Research Institute, The University of Michigan, 1999 r.
- [62] Gillespie T.D., MacAdam C.C., Hu G.T., Bernard J.E. Winkler C.B.: „Simulation of the effects of increased truck size and weight. Final technical report”, Highway Safety Research Institute The University of Michigan, 1979 r.
- [63] Gillespie T.D.: „Technical considerations in the WorldWide standardization of road roughness measurement. A Report to the World Bank”, Highway Safety Research Institute The University of Michigan, 1981 r.
- [64] Gillespie T.D., Sayers M., Segel L.: „Calibration and correlation of response-type road roughness measuring systems. Final report”. Highway Safety Research Institute The University of Michigan, Ann Arbor 1980 r.

- [65] Gillespie T.D., Karamihas S.M., Debon D., Sayers M.: „Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance. Final report”, Transportation Research Institute, The University of Michigan, 1992 r.
- [66] Gillespie Th.D., et al.: „Effects of heavy vehicle characteristics on pavement response and performance”, Transportation Research Board, NCHRP Report 353, 1999 r.
- [67] Gillespie Th. D., Karamihas S.M.: „Heavy truck properties significant to pavement damage”, ASTM Special Technical Publication No. 1225, 1994 r.
- [68] Govind S., Walton C. M.: „Fatigue model to assess pavement damage”, Transportation Research Record No. 1227, 1989 r.
- [69] Górszczyk J., Zieliński P.: „Modelowanie konstrukcji nawierzchni asfaltowej zbrojonej geosyntetyczną warstwą pośrednią przy zastosowaniu MES”, IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [70] Grabowski W., „Struktura betonu asfaltowego i jej zmiany w nawierzchni drogowej”, Prace Naukowe Politechniki Poznańskiej. Poznań, 1987 r.
- [71] Graczyk M., Rafa J.: „Model konstrukcji nawierzchni uwzględniający zjawiska falowe w ujęciu quasidynamicznym”, Drogi i Mosty 1/2002 r.
- [72] Grądzki R.: „Wprowadzenie do Metody Elementów Skończonych”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002 r.
- [73] Greek M. F., Cebon D.: „Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges”, Computers & Structures Vol. 62, Elsevier 1997 r.
- [74] Grzebska Z.: „Odkształcenia betonu asfaltowego w podwyższonej temperaturze. Archiwum Inżynierii Lądowej, Tom XXXV Z. 3-4, 1989 r.
- [75] Grzebska Z.: „Stan graniczny betonu asfaltowego”, Raport serii PRE nr 6/86, Wrocław, 1986 r.
- [76] Grzybowska W.: „Wpływ wybranych parametrów materiałowych na wielkość deformacji trwałych w nawierzchniach bitumicznych”, IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [77] Guan L., Ruth B. E., Roque R.: „Computerized mechanistic system for evaluation and rehabilitation of flexible pavements”, Asphalt Paving Technology: Proceedings - Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions v 60, 1991 r.
- [78] Hajek J.: „General axle load equivalency factors”, Transportation Research Record No. 1482, 1995 r.
- [79] Hartman A.M., Nolan D.B., Gilchrist M.D.: „Experimental facility for simulating the initiation and propagation of fatigue damage in bituminous road paving materials”, Key Engineering Materials v 167, 1999 r.
- [80] Hiller J. E., Roesler J. R.: „Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines”, Journal of Transportation Engineering, 2005 r.
- [81] Ilipolov S.K., Seleznew M.G., Uglova E.V., Kadomtsev M.I.: „Distribution of the energy of fluctuations in elements flexible pavements constructions at transport travel”, IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [82] Ioannides A. M., Karanth R. K., Sanjeevirao K.: „Mechanistic-empirical approach to assessing relative pavement damage”, Transportation Research Record No.1639, 1998 r.
- [83] Jaworski J.: „Ogumienie pojazdów samochodowych”, WKiŁ, Warszawa 1987 r.
- [84] Judycki J.: „Non-linear viscoelastic behaviour of conventional and modified asphaltic concrete under creep”, Materials and Structures, 1992 r.
- [85] Judycki J.: „Comparison of fatigue criteria for flexible and semi-grid pavements”, Proc. of the Eight International Conference of Asphalt Pavements, University of Washington, Seattle, vol. 2, 1997 r.

- [86] Judycki J.: „Zasady wymiarowania konstrukcji nawierzchni”, Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, maj 1995 r.
- [87] Judycki J.: „Mechanistyczne metody projektowania podatnych i półsztywnych konstrukcji nawierzchni drogowych”, Drogownictwo 6/1996 r.
- [88] Judycki J.: „Porównanie kryteriów zmęzeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni drogowych w aspekcie nowego polskiego katalogu typowych konstrukcji”, część I, Drogownictwo 1/1999 r.
- [89] Judycki J.: „Zastosowanie kryteriów zmęzeniowych do projektowania podatnych i półsztywnych nawierzchni”, część II, Drogownictwo 2/1999 r.
- [90] Judycki J.: „Przepisy dotyczące dopuszczalnych wymiarów i ciężarów samochodów ciężarowych w Unii Europejskiej i w Polsce”, Drogownictwo 6/2003 r.
- [91] Jueffroy G.: „Conception et construction des chaussees”, Dunod, Paris, 1967 r.
- [92] Karamihas S.M., Gillespie, T.D.: „Characterizing trucks for dynamic load prediction”, Heavy Vehicle Systems v 1, 1993 r.
- [93] „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych”. GDDP, Warszawa 1997 r.
- [94] „Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych”. GDDP, Warszawa 2001 r.
- [95] "Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych". GDDP, IBDiM, Warszawa 2001 r.
- [96] Kawa I.: „Evaluation and extension of the AASHTO LEFs for changing traffic characteristics”, The University Of Texas At Austin, 2000r, Pub No: 3004303
- [97] Kenis W. J., Hammouda J.: „Implementation of road profiles for vehicle dynamic simulation”, Road Transport Technology Proceedings of the International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions 1995. Int Forum Road Transp. Technol., Ontario, Canada.
- [98] Kilareski W. P.: „Heavy vehicle evaluation for overload permits”, Transportation Research Record No. 1227, 1989 r.
- [99] Kirkner D.J., et al.: „Numerical simulation of permanent deformation in flexible pavement systems subjected to moving loads”, 11-th Conf. Eng. Mech., Fort Lauderdale, FL, ASCE, 1996 r.
- [100] Kirkner D.J., et al.: „Three-dimensional, finite-element simulation of permanent deformations in flexible pavement systems”, Transportation Research Record No. 1448, 1994 r.
- [101] Koba H.: „Wpływ sztywności podbudowy na rozkład naprężeń w konstrukcji jezdni drogowej”, Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, maj 1999 r.
- [102] Koba H., Wolek Cz.: „Stan naprężeń nawierzchni drogowych z podbudową stabilizowaną cementem”, Drogownictwo 7-8/1991 r.
- [103] Konderla P., Kasprzak T.: „Komputerowe metody w Teorii Sprężystości. Część I. Metoda elementów skończonych”, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 1997 r.
- [104] Kowalski K. J., Więch P., Opoczyński K.: „Wyniki generalnego pomiaru ruchu na drogach krajowych w 2000r.”, Drogownictwo 5/2001 r.
- [105] Kulakowski B. T., Husted D. C., Streit D. A., Kenis W. J.: „Models of dynamic load coefficient for a two-axle truck obtained from road simulator data”, Heavy Vehicle Systems v 3, 1996 r.
- [106] Lay M.G.: „Modeling pavement behaviour”, Road and Transport Research v 2, 1993 r.
- [107] LCPC. „Conception et dimensionnement des structures de chaussee. Guide technique”, SETRA, 1994
- [108] Lozano A., Romero J.A, Jauregui J.C.: „Heavy vehicle suspension dynamic response and its relation to potential damage to roads”, Heavy Vehicle Systems v 6, 1999 r.

- [109] Lu Y., Wright P.J.: „Numerical Approach of visco-elastoplastic properties of asphalt mixtures”, *Computers & Structures* 63, 1998 r.
- [110] Mackiewicz P.: „Wpływ właściwości reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje nawierzchni drogowych”. Praca doktorska. Raport serii PRE nr 1/2001. Wrocław 2001 r.
- [111] Markow M. J., Hedrick J. K., Brademeyer B. D., Abbo E.: „Analyzing the interactions between dynamic vehicle loads and highway pavements”, *Transportation Research Record* No. 1196, 1988 r.
- [112] Matua V.P., Baranowa E.M.: „Construction of Road pavement with regard for accumulation of residua deformations in this elements”, IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [113] McCullough B. F., Seong-Min K.: „Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude”, *Engineering Structures* 25, Elsevier 2003 r.
- [114] Mieczkowski P.: „Sfalowania poprzeczne w nawierzchniach asfaltowych – model teoretyczno-doświadczalny ich oceny”, *Drogownictwo* 9/2000 r.
- [115] Misztal Z.: „Niszczenie nawierzchni przez pojazdy ponadnormatywne oraz opłaty drogowe za przekraczanie obciążeń”, *Drogownictwo* 2/2002 r.
- [116] Mitschke M.: „Dynamika samochodu”, WKiŁ, Warszawa 1977 r.
- [117] Mun S.: „Flexible Pavements - Fatigue Cracking Mechanisms in Asphalt Pavements with Viscoelastic Continuum Damage Finite-Element Program”, *Transportation Research Record*, 2004 r.
- [118] Oeser M.: „3D Constitutive Model for Asphalt Pavements”, *International Journal of Pavement Engineering*, 2004 r.
- [119] Otte E.: „Factor affecting the behaviour of cement – treated layers in pavements”, *The 9-th Australian Road Research Board Conference, University of Queensland, Brisbane, vol. 9m* 1978 r.
- [120] Otte E., Savage P.F., Monismith C.L.: „Structural design of cemented pavement layers”, *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 1982 r.
- [121] Pilujski R., Szydło A.: „Teoria układów warstwowych do wymiarowania konstrukcji jezdni drogowych”, *Drogownictwo* 11 1985 r.
- [122] Piłat J., Radziszewski P.: „Zmiana właściwości reologicznych drogowych lepiszczy asfaltowych w wyniku starzenia eksploatacyjnego PAV”, IX Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2003 r.
- [123] Piłat J., Radziszewski P.: „Nawierzchnie asfaltowe”, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa 2004 r.
- [124] Pister K., Westman R.: „Analysis of viscoelastic pavements subjected to moving loads”, *Proc. International Conference Structures Des Asphalt Pavements* 1962 r.
- [125] Pooh P. S. H., Sha'at A. A., Ferguson J. D.: „Analysis of the fatigue life of pavement/road structures using NDT methods”, *British Journal of Non-Destructive Testing* v 34, 1992 r.
- [126] Post. T., Bernard J.E.: „Response of vehicles to pavement undulations”. *Highway Safety Research Institute The University of Michigan, Ann Arbor*, 1976 r.
- [127] Prochowski L., Żuchowski A.: „Samochody ciężarowe i autobusy”, WKiŁ, Warszawa 2004 r.
- [128] „Prognoza ruchu na zamiejskiej sieci dróg krajowych do roku 2020” *Transprojekt-Warszawa*, Warszawa 2002 r.
- [129] Ramsamoo D. V., Lin G. S., Ramadan J.: „Stresses at joints and cracks in highway and airport pavements”, *Engineering Fracture Mechanics* Vol. 60, Elsevier 1998 r.
- [130] Razouki S., Radeef H.: „Increased damage to uphill flexible pavements from trucks”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 2005 r.

- [131] „Research and Development of The Asphalt Institute’s thickness design manual (MS-1)” Ninth edition, The Asphalt Institute, Research Report No. 82-2, 1982 r.
- [132] Rolla S.: „Stronnicze porównania nawierzchni betonowych i asfaltowych”, Drogownictwo 1/2000 r.
- [133] Rusiński E.: „Metoda elementów skończonych. System COSMOS/M”, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1994 r
- [134] Sayers M., Gillespie T.D., Queiroz C.A.V.: „The international road roughness experiment. establishing correlation and a calibration standard for measurements”, World Bank Technical Paper Number 45, Washington, D.C., 1986 r.
- [135] Sayers M., Gillespie T.D., Paterson D.O.: „Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements”, World Bank Technical Paper Number 46, Washington, D.C., 1986 r.
- [136] Sayers M., Karamihas S.M.: „Interpretation of road roughness profile data. final report”, Transportation Research Institute, The University of Michigan, 1996 r.
- [137] Sayers M., Karamihas S.M.: „The little book of profiling. basic information about measuring and interpreting road profiles”. The Regent of The University of Michigan. 1998 r.
- [138] Sayers M.: „Dynamic terrain inputs to predict structural integrity of ground vehicles”, Transportation Research Institute, The University of Michigan, 1988 r.
- [139] Sebaaly P. E., Tabatabaee N.: „Effect of tire parameters on pavement damage and load-equivalency factors”, Journal of Transportation Engineering v 118, 1992 r.
- [140] Sebaaly P. E.: „Pavement damage as related to tires, pressures, axle loads, and configurations”, ASTM Special Technical Publication No. 1164, 1992 r.
- [141] Seong-Wan P.: „Evaluation of accelerated rut development in unbound pavement foundations and load limits on load-zoned pavements”, The University Of Texas At Austin, 2000r, Pub No: 9968981
- [142] Shook J., et. al.: „Thickness design of asphalt pavements – The Asphalt Institute method”, Fifth International Conference of Structural Design of Pavements Design, Delft, 1982 r.
- [143] Siłka W.: „Teoria ruchu samochodu”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002 r.
- [144] Simons, J.W., Seaman, L.: „Finite-element analysis of fatigue lifetime in pavements”, Transportation Research Record, No. 1709, 2000 r.
- [145] “SPDM – PC user Manual. Shell pavement design method for use on a personal computer”, Shell, 1994 r.
- [146] Stypułkowski B., Skoropada K.: „Działanie obciążeń cyklicznych”, Drogownictwo 4-5/1985 r.
- [147] Stypułkowski B., praca zbiorowa: „Zagadnienia utrzymania i modernizacji dróg i ulic”, WKiŁ, Warszawa, 1995 r.
- [148] Subei N., Saxena S. K., Mohammadi, J.: „BEM-FEM approach for analysis of distresses in pavements”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics v 15, 1991 r.
- [149] Sun L.: Optimum design of „road-friendly” vehicle suspension systems subjected to rough pavement surfaces”, Applied Mathematical Modeling 26, Elsevier 2002 r.
- [150] Sun L., Hudson W. R.: „Probabilistic Approaches for Pavement Fatigue Cracking Prediction based on Cumulative Damage Using Miner 's Law”, Journal of Engineering Mechanics, 2005 r.
- [151] Sun L., Hudson W. R., Zhang Z.: „Empirical-Mechanistic Method Based Stochastic Modeling of Fatigue Damage to Predict Flexible Pavement Cracking for Transportation Infrastructure Management”, Journal of Transportation Engineering, 2003 r.

- [152] Sybilski D., Szrajber J., Mechowski T., Giergowicz A.: „Ocena skutków ruchu pojazdów o masie, naciskach osi lub wymiarach przekraczających dopuszczalne wielkości parametrów określone w przepisach o ruchu drogowym”, IBDiM, Warszawa, styczeń 2000 r.
- [153] Sybilski D.: „Jeszcze o nawierzchniach asfaltowych i betonowych, czyli wyjaśnienie zamieszania i mistyfikacji”, *Drogownictwo* 1/2000 r.
- [154] Sybilski D.: „Długowieczne nawierzchnie asfaltowe w świecie i w Polsce”, *Drogownictwo*, 3/2004 r.
- [155] Sybilski D.: „Mechanistyczne projektowanie konstrukcji nawierzchni z użyciem programu NOAH 2.0”, *Drogownictwo* 1/2006 r.
- [156] „System oceny stanu nawierzchni „SOSN”. Wytyczne stosowania”, GDDP, Warszawa 2002 r.
- [157] Szpinek S.: „Niepewność współczynnika agresywności”, *Drogownictwo* 2005 r.
- [158] Szpinek S.: „O wyniku konfrontacji wskaźnika IRI z parametrem, jaki by można obliczyć stosując do danych z planografu odpowiednio poprawiony, tzw. poprawny algorytm”, VIII Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2000 r.
- [159] Szpinek S.: „Współczynnik dynamiczności obciążenia dla nierównej nawierzchni jezdni od poruszającego się po niej modelu pojazdu samochodu”, VIII Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2000 r.
- [160] Szpinek S.: „Opis statystyczny rozkładu ocen stanu równości podłużnej nawierzchni”. VI Międzynarodowa Konferencja pt. Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe, Kielce, maj 2000 r.
- [161] Szpinek S.: „Ocena równości podłużnej nawierzchni dróg krajowych pomiarami jedno- i wielotorowymi”. *Drogownictwo* 1/2000 r.
- [162] Szpinek S.: „Widmo amplitudowe nierówności podłużnych nawierzchni drogowych”, *Drogownictwo* 9/2001 r.
- [163] Szpinek S.: „O tym, dlaczego wykres prześwitów z planografu nie nadaje się do obliczeń wskaźnika IRI”, *Drogownictwo* 3/2002 r.
- [164] „System oceny stanu nawierzchni SOSN. Wytyczne stosowania”. GDDP, Warszawa 2002 r.
- [165] Szydło A., Kamiński L.: „Drogi – projektowanie i budowa”, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1981 r.
- [166] Szydło A.: „Statyczna identyfikacja parametrów modeli nawierzchni lotniskowych”, *Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej*. Wrocław 1995r.
- [167] Szydło A.: „Analiza naprężeń i przemieszczeń w wybranych typowych konstrukcjach jezdni drogowych”, *Drogownictwo* 7-8/1981 r.
- [168] Szydło A.: „Identyfikacja modelu obliczeniowego jezdni dróg i lotnisk”, *Archiwum Inżynierii Lądowej* Tom XXXVI Z. 41, 1990 r.
- [169] Szydło A., Mackiewicz P.: „Wpływ poziomych obciążeń na stan naprężeń wybranych typowych konstrukcji nawierzchni drogowych” Międzynarodowe Seminarium „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, maj 1998 r.
- [170] Szydło A.: „Nawierzchnie drogowe z betonu cementowego” *Polski Cement*, Kraków, 2004 r.
- [171] Szydło A., Wardęga R.: „Porównanie współczynników agresywności pojazdów w Polsce i Unii Europejskiej”, *Drogownictwo* 5/2003r.
- [172] Szydło A., Mackiewicz P., Wardęga R.: „Sprawdzenie możliwości ważenia pojazdów w ruchu przy użyciu pracujących na sieci wag firmy PAT”, *Raport serii SPR 113/05*. Politechnika Wroclawska. 2005 r.
- [173] Śniady P.: „Podstawy stochastycznej dynamiki konstrukcji”, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2000 r.

- [174] „Thickness design – asphalt pavements for highways and streets”, The Asphalt Institut, Manual Series, No. 1 (MS-1), 1981 r.
- [175] Todd K. B., Kulakowski B. T.: „Simple computer models for predicting ride quality and pavement loading for heavy trucks”, Transportation Research Record No. 1215, 1989 r.
- [176] Ullidtz, P.: „Pavement Strength And Deformation Characteristics – Simple Model for Pavement Damage”, Transportation Research Record, 2005 r.
- [177] Ullidtz P.: „Simple model for pavement damage”, Transportation Research Record, 2005 r.
- [178] Valkering C.P., Stapel F.D.R., Lijzenga J.: „The Shell pavement design metod on a personal computers”, 7th International Conference on Asphalt Pavements, Nottingham, 1992 r.
- [179] Wardega R.: „Pomiar obciążenia nawierzchni pojazdami w ruchu”, Drogownictwo 10/2005 r.
- [180] „Weigh in Motion of Axles and Vehicles for Europe (Wave). General Report”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2001 r.
- [181] „Weigh in Motion of Axles and Vehicles for Europe (Wave). Report of Work Package 1.1. Multiple sensor WIM”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2001 r.
- [182] „Weigh in Motion of Axles and Vehicles for Europe (Wave). Report of Work Package 3.2. Calibration of WIM systems”, Technical Research Centre of Finland. Communities and Infrastructure, 2000 r.
- [183] Winkler C.B., MacAdam C.C., Fancher P.S.: „Parametric analysis of heavy duty truck dynamic stability. Technical report”, Transportation Research Institute, The University of Michigan, 1983 r.
- [184] Yi K. Hedrick K.: „Use of semi-active suspensions to reduce pavement damage”, ASTM Special Technical Publication No. 1164, 1992 r.
- [185] Zaghoul S. M., White Th. D., Kuczek Th.: „Evaluation of heavy load damage effect on concrete pavements using three-dimensional, nonlinear dynamic analysis”, Transportation Research Record No. 1449, 1994 r.

Akty prawne i normy

- [186] Dyrektywa Rady 70/156/EWG z dnia 6 lutego 1970 r. W sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich w odniesieniu do homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep.
- [187] Dyrektywa Rady UE nr 96/53/EC W sprawie określenia maksymalnych wymiarów poszczególnych pojazdów kołowych w ruchu krajowym i ponadgranicznym na obszarze Wspólnoty oraz określenia maksymalnych ciężarów w ruchu ponadgranicznym.
- [188] Dyrektywa Komisji 2001/116/WE z dnia 20 grudnia 2001 r. Dostosowująca do postępu technicznego dyrektywę Rady 70/156/EWG w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do homologacji typu pojazdów silnikowych i ich przyczep.
- [189] Dz.U. RP. Nr 43, poz. 430, z dnia 14 maja 1999 r. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.
- [190] Dz.U. RP. Nr 44, poz. 432, z dnia 15 maja 1999 r. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 1 kwietnia 1999 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [191] Dz.U. RP. Nr 32, poz.262, z dnia 26 lutego 2003 r. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 31 grudnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.

- [192] Dz.U. RP. Nr 34, poz. 300, z dnia 4 marca 2004 r. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 11 lutego 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [193] Dz.U. RP Nr 103, poz. 1085, z dnia 1 maja 2004 r. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 30 kwietnia 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [194] Dz.U. RP. Nr 169, poz. 1773, z dnia 30 lipca 2004 r. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 26 lipca 2004 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych pojazdów oraz zakresu ich niezbędnego wyposażenia.
- [195] PN-89/S-02006 Pojazdy samochodowe, Przyczepy i naczepy. Kategorie, symbole i określenia.
- [196] PN-89/S-02007 Pojazdy samochodowe, Przyczepy, naczepy i zespoły pojazdów. Klasyfikacja i terminologia.
- [197] PN-93/S-02011 Pojazdy samochodowe i przyczepy. Wymiary. Terminy i definicje.
- [198] PN-94/S-02014 Pojazdy samochodowe i przyczepy. Masy i obciążenia. Nazwy, określenia i oznaczenia kodowe.
- [199] PN-S-47010:1999 Pojazdy drogowe. Autobusy. Wymagania podstawowe.
- [200] Raport na temat rezultatów negocjacji o członkostwo RP w UE przyjęty przez Radę Ministrów w dniu 17 grudnia 2002r. <http://www2.ukie.gov.pl/uk.nsf/dokumenty>

Strony WWW

- [201] Albania, Rada Ministrów Departament Informacji: <http://mininf.gov.al/english/Default.htm>
- [202] Austria, Ministerstwo Transportu: <http://www.bmv.gv.at/vke/3transport.htm>
- [203] Belgia, Ministerstwo Transportu: <http://vici.fgov.be/>
- [204] Białoruś, Centrum Rządowe: <http://www.bnr.org/>
- [205] Bośnia i Hercegowina, Centrum Rządowe: <http://www.bosnia.org.uk/>
- [206] Bułgaria, Centrum Rządowe: <http://www.government.bg/>
- [207] Chorwacja, Centrum Rządowe: <http://www.vlada.hr/>
- [208] Czechy, Centrum Rządowe: <http://www.czech.cz/>
- [209] Dania, Ministerstwo Transportu: <http://www.trm.dk/>
- [210] European Conference of Minister of Transport: <http://www.cemt.org/topics/road>
- [211] Estonia, Ministerstwo Transportu: <http://www.tsm.ee/>
- [212] Finlandia, Ministerstwo Transportu: <http://www.mintc.fi/www/sivut/english/default.html>
- [213] Francja, Ministerstwo Transportu: <http://www.equipement.gouv.fr/>
- [214] Grecja, Centrum Rządowe: <http://www.hellas.org/hnews.html>
- [215] Hiszpania, Ministerstwo Administracji Publicznej: <http://www.map.es/>
- [216] Holandia, Ministerstwo Transportu: <http://www.minvenw.nl/>
- [217] Irlandia, Centrum Rządowe: <http://www.irlgov.ie/>
- [218] Litwa, Centrum Rządowe: <http://www.mk.gov.lv/>
- [219] Macedonia, Ministerstwo Rozwoju: <http://www.mia.com.mk/MoD.htm>
- [220] Międzynarodowa Federacja Drogowa: <http://www.irfnet.org/>
- [221] Niemcy, Ministerstwo Transportu: <http://www.bmvbw.de/>
- [222] Norwegia, Centrum Rządowe: <http://www.vegvesen.no/>
- [223] Pierwszy Serwis Międzynarodowy Transportu i Spedycji: <http://www.psm.pl/>
- [224] Szwajcaria, Centrum Rządowe: <http://www.gvf.admin.ch/>
- [225] Wielka Brytania, The Information Service for the Transport Industry: <http://www.transportweb.com/>
- [226] <http://www.fhwa.dot.gov/index.html>