



MACIEJ SANDECKI
Transprojekt-Warszawa
Sp. z o.o.
macsandecki@wp.pl

Kształtowanie ramp na drogach dwujezdniowych

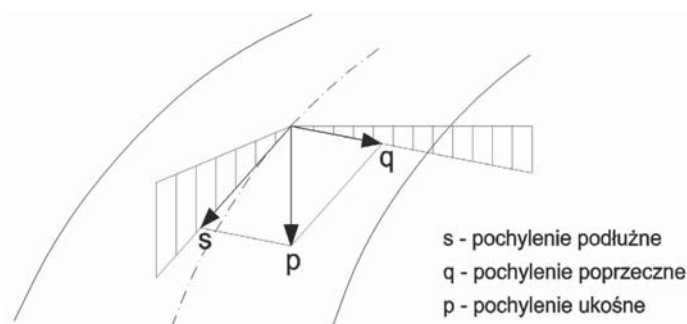
Sprawne i szybkie odwodnienie drogi jest nadrzędnym kryterium z zakresu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Kwestia właściwego odwodnienia drogi stanowi także istotny element utrzymania i eksploatacji drogi.

Odcinek drogi, na którym następuje zmiana przechylenia poprzecznego jezdni, nazywa się *rampą drogową*. Jest to element drogi wpływający na dynamikę i bezpieczeństwo jazdy. W każdym kraju istnieją inne uwarunkowania i doświadczenia wpływające na stosowaną procedurę projektowania odcinka zmiany kierunku pochylenia poprzecznego jezdni.

W artykule przedstawiono zasady kształtowania ramp drogowych obowiązujące w Polsce oraz w Niemczech. Zasady te przeanalizowano pod względem odwodnienia jezdni, zwracając szczególną uwagę na rozwiązania stosowane w przypadku małych (zblizonych do zera) pochyłeń podłużnych. Poddano również ocenie wpływ parametrów przekroju poprzecznego drogi na poprawność ukształtowania rampy. Parametrami tymi są: pochylenie podłużne osi obrotu oraz dodatkowe pochylenie podłużne obracanej krawędzi jezdni. Za kryterium oceny przyjęto bezpieczeństwo ruchu drogowego, tj. zapewnienie kierowności i stateczności pojazdów poruszających się po mokrej nawierzchni w obrębie rampy drogowej. Miarą tego kryterium oceny powinna być prędkość *aquaplaningu*, czyli prędkość, przy której następuje utrata przyczepności kół pojazdu do nawierzchni. Jednak jej określenie jest trudne, gdyż zależy ona od wielu zmiennych.

Rampa drogową

Rampa drogową powinna być zaprojektowana w taki sposób, aby zapewniała stateczności ruchu pojazdów, odwodnienie nawierzchni jezdni oraz względy estetyki. Prawidłowe



Rys. 1. Pochylenie ukośne

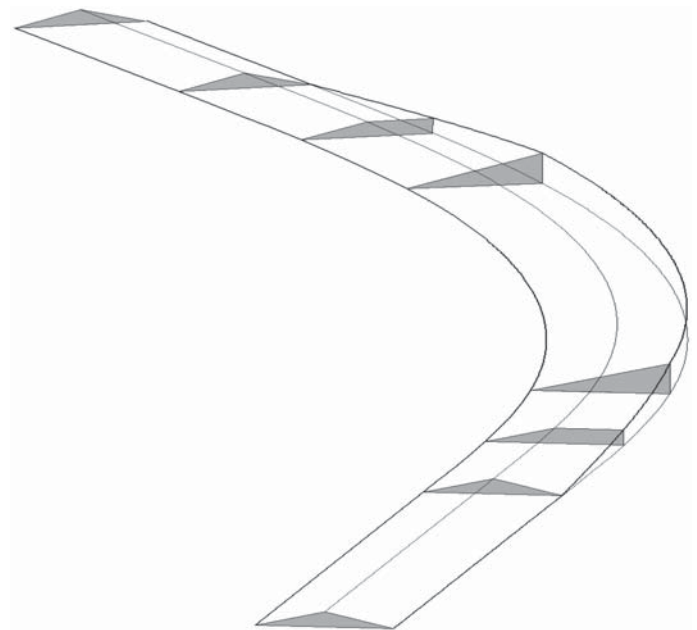
odprowadzenie wody opadowej z jezdni jest istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu. Źle odwodniona nawierzchnia traci swoje właściwości antypoślizgowe, a w skrajnych przypadkach może wywołać zjawisko *aquaplaningu*, którego konsekwencją jest całkowita utrata przyczepności kół pojazdu do nawierzchni.

Warunkiem sprawnego odwodnienia jest zapewnienie odpowiedniego spadku nawierzchni. Kierunek spływu wody określony jest wektorem pochylenia ukośnego, którego składowymi są pochylenie podłużne oraz poprzeczne. Zależności pomiędzy pochyleniami przedstawia rysunek 1.

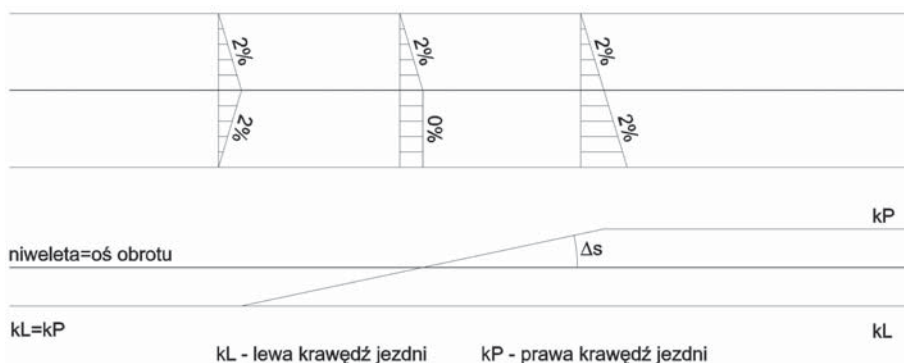
Wzór na pochylenie ukośne (opis symboli podano na rys. 1):

$$p = \sqrt{s^2 + q^2} \quad (1)$$

Odwodnienie nawierzchni na prostoliniowym odcinku drogi w planie nie stanowi problemu. Nadanie jezdni wymaganego pochylenia poprzecznego sprawia, że woda opadowa szybko spływa z jezdni do rowów odwadniających lub do ścieku przykrawężnikowego. Zapewnienie odpowiedniego pochylenia poprzecznego jest skuteczną i tanią metodą szybkiego odprowadzania wody z jezdni. Nawet w przypadku zblizonego do zera pochylenia podłużnego niwelety drogi, pochylenie ukośne będzie wystarczająco duże, aby zapewnić odwodnienie.



Rys. 2. Izometryczny szkic rampy drogowej



Rys. 3. Interpretacja pochylenia dodatkowego

Należy jednak zauważyć, że pochylenie podłużne przy zerowym pochyleniu poprzecznym nie zapewnia prawidłowego odwodnienia. W związku z tym powinno się starannie projektować miejsca, na których nie można zapewnić odpowiedniego pochylenia poprzecznego. Do takich miejsc należy zaliczyć rampy drogowe. Izometryczny szkic rampy drogowej przedstawiono na rysunku 2.

Na powyższym szkicu widać, że kształtowanie przechyłki odbywa się przez obrót zewnętrznej krawędzi jezdni wokół osi obrotu (w tym wypadku niwelety), co powoduje zmianę jej pochylenia podłużnego. Różnicę pochylenia osi obrotu i pochylenia obracanej krawędzi jezdni nazywa się *dodatkowym pochyleniem podłużnym krawędzi jezdni*. Interpretację pochylenia dodatkowego przedstawiono na rysunku 3.

Pochylenie dodatkowe można wyznaczyć posługując się następującym wzorem:

$$\Delta s = \frac{q_e - q_a}{L_v} \cdot a \quad (2)$$

w którym:

q_e – pochylenie poprzeczne na końcu rampy, [-]

q_a – pochylenie poprzeczne na początku rampy, [-]

L_v – długość rampy, [m]

a – odległość krawędzi jezdni od osi obrotu. [m]

Ważnym aspektem z punktu widzenia kierującego pojazdem jest estetyka oraz płynność optyczna drogi. Według [2, 3] przy projektowaniu drogi należy uwzględniać warunki estetyki, które spełnia się przez świadome kształtowanie obrazu drogi i jej otoczenia. Ponadto zachowanie się kierowcy podczas jazdy zależy głównie od informacji wzrokowych pochodzących z obserwowanego w czasie jazdy ruchomego obrazu drogi i jej otoczenia. Obraz ten powinien zapewniać kierowcy, a także innym uczestnikom ruchu, poczucie bezpieczeństwa i wygody w poruszaniu się po drodze oraz wywoływać wrażenia piękna i harmonii.

Powyższe wymagania w odniesieniu do rampy drogowej sprowadzają się do prowadzenia krawędzi nawierzchni w taki sposób, aby nie była zaburzona percepcja krzywizny trasy. W przeciwnym razie kierowca może odruchowo zmienić kierunek jazdy. O płynności drogi decyduje wartość pochylenia dodatkowego. Jest to czynnik wpływający również na odwodnienie zniekształconej w wyniku obrotu części jezdni. Dobór odpowiedniej jego wartości skutkuje występowaniem akceptowanych przez człowieka przeciążeń, co przekłada

się na komfort i wygodę podróżowania. Te zagadnienia zadecydowały o tym, że w przepisach technicznych pochylenie dodatkowe uczyniono głównym parametrem decydującym o poprawności ukształtowania rampy.

Wymagania w przepisach polskich i niemieckich

Przepisy obowiązujące w Polsce

W Polsce przepisem powszechnie obowiązującym regulującym zasady kształtowania ramp drogowych jest [1]. Poniżej zestawiono zapisy pośrednio i bezpośrednio dotyczące odcinka zmiany kierunku pochylenia poprzecznego jezdni.

§ 17.1. Jezdnia drogi powinna mieć pochylenie poprzeczne umożliwiające sprawny spływ wody.

Wprowadzenie pochylenia poprzecznego jezdni umożliwia odprowadzenie wody opadowej, która zalegając na nawierzchni pogarsza jej właściwości antypoślizgowe. Ponadto w ujemnych temperaturach woda może tworzyć niebezpieczne śliskie obszary.

Złe odwodnienie przyspiesza także degradację nawierzchni, gdyż penetrująca w jej strukturę woda zamarzając rozszerza się, co skutkuje naruszeniem konstrukcji i osłabieniem jej zdolności do przenoszenia obciążeń od ruchu drogowego.

§ 17.2. Pochylenie poprzeczne jezdni, z zastrzeżeniem ust. 3, powinno wynosić nie mniej niż:

- 1) 2,0 % – nawierzchni twardej ulepszonej
- 2) 3,0 % – nawierzchni twardej nie ulepszonej
- 3) 4,0 % – nawierzchni gruntowej ulepszonej

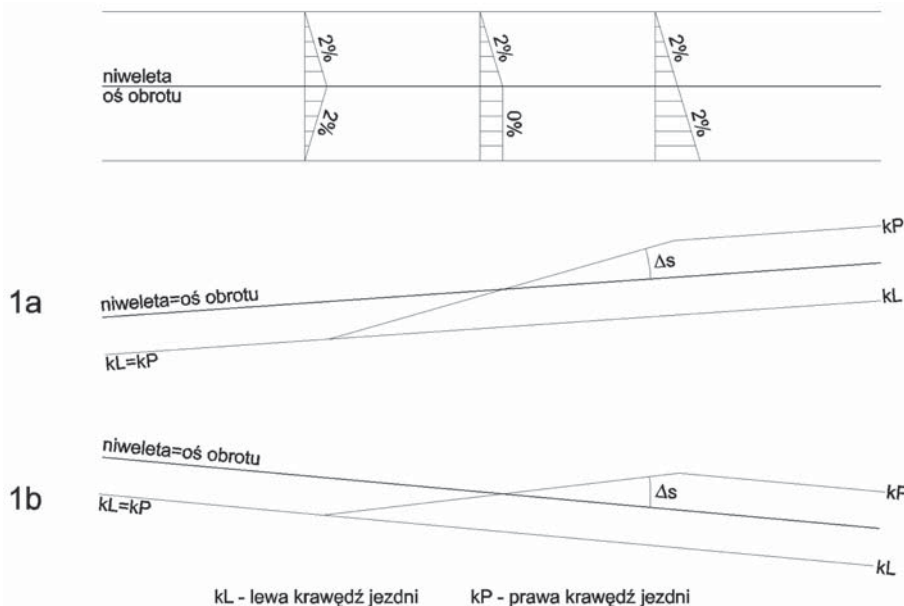
Pochylenie poprzeczne zależy od materiału, z jakiego wykonana jest nawierzchnia. Oczywiście jest, że woda szybciej spływa po powierzchni gładkiej. Dlatego właśnie nawierzchnie wykonane z materiałów kamiennych wymagają większych pochyłeń poprzecznych, niż nawierzchnie bitumiczne czy betonowe.

§ 18.1. Zmiana pochylenia poprzecznego jezdni powinna być wykonana na krzywej przejściowej, prostej przejściowej, jeśli krzywa przejściowa nie jest wymagana, lub na łuku kołowym o większym promieniu, jeżeli jest to krzywa koszowa.

Na krzywej przejściowej przy stałej prędkości pojazdu zachodzi liniowy przyrost przyspieszenia odśrodkowego aż do wartości maksymalnej uzyskanej na łuku kołowym. W związku z tym zmianę pochylenia poprzecznego jezdni należy wykonywać na krzywej lub prostej przejściowej, aby na łuku przechyłka osiągnęła wartość docelową.

§ 17.3. Zachowanie pochyłeń poprzecznych, o których mowa w ust. 2, nie jest wymagane na krzywych przejściowych i na prostych przejściowych przed i za łukiem kołowym, na których następuje zmiana kierunku pochylenia poprzecznego jezdni, jeżeli:

- 1) pochylenie podłużne osi i krawędzi jezdni są większe od



Rys. 4. Warianty rampy drogowej

dotychczasowego pochylenia podłużnego, o którym mowa w § 18. ust. 3, nie mniej niż o 0,2%

2) są spełnione warunki, o których mowa w § 18. ust. 3.

W § 17.3.1 nie sprecyzowano dokładnie czy chodzi o oś drogi, czy o oś obrotu. Na drogach jednojezdniowych najczęściej te dwie linie pokrywają się; niweleta drogi pokrywa się z niweletą osi obrotu. Na drogach dwujezdniowych zaś oś obrotu najczęściej zlokalizowana jest w innym miejscu (np. na krawędzi pasa ruchu lub na środku jezdni). Można jednak wnioskować, że autor [1] miał na myśli oś obrotu. Świadczą o tym zapisy o pochyleniu dodatkowym, które definiowane jest jako różnica pochylenia osi obrotu i pochylenia krawędzi jezdni.

Oczywistym jest, że na rampie drogowej nie jest możliwe spełnienie warunku § 17.2. W związku z tym został wprowadzony przepis o zapewnieniu odpowiedniego pochylenia dodatkowego.

Według [2] zbyt duże dodatkowe pochylenie krawędzi jezdni, która zmienia kierunek pochylenia poprzecznego może stwarzać zagrożenie utraty stateczności ruchu pojazdów, a także nie jest wskazane ze względów estetycznych. W celu sprawnego odprowadzenia wody z jezdni, w miejscu gdzie pochylenie poprzeczne zmienia się od -2% do +2% muszą być zapewnione dodatkowe pochylenia krawędzi jezdni zgodne z § 18.3.

Pochylenia podłużne osi i krawędzi jezdni zmieniającej kierunek pochylenia poprzecznego powinny być większe od dodatkowego pochylenia podłużnego nie mniej niż o 0,2%, gdyż gwarantuje to zachowanie kierunku spływu wody opadowej z tej części powierzchni jezdni, która ulega zniekształceniu [2]. Warunek ten można by ograniczyć do przypadku, w którym pochylenie obracanej krawędzi jezdni jest przeciwne do pochylenia osi obrotu (rys. 4b), jednak w [1] obowiązuje on także w przypadku zgodnych kierunków obu pochyżeń (rys. 4a).

Sytuacja przedstawiona na rysunku 4b jest szczególnie niebezpieczna, gdyż w przypadku niewielkiego pochylenia

podłużnego osi obrotu (ewentualnie niwelety) ciężko jest spełnić warunek o minimalnym pochyleniu dodatkowym. Zmiana kierunku pochylenia poprzecznego sprawia, że pochylenie podłużne obracanej krawędzi jezdni zmniejsza się w stosunku do pochylenia osi obrotu o wartość pochylenia dodatkowego. W efekcie na jezdni powstawać mogą powierzchnie bezodpływowe zagrażające bezpieczeństwu ruchu drogowego.

§ 18.3. Zmiana pochylenia poprzecznego jezdni powinna być tak prowadzona, aby dodatkowe pochylenia podłużne krawędzi nie przekraczały wartości określonych w tabeli 1:

Przy określaniu górnej granicy pochylenia dodatkowego pod uwagę zostały wzięte aspekty dynamiki jazdy. Nie może ono być za duże, gdyż groziłoby to wywróceniem się pojazdu jadącego po rampie. Ponadto mogłoby powodować przeciążenia uciążliwe dla użytkowników drogi. Dolną granicę warunkuje konieczność sprawnego odprowadzenia wód opadowych.

Tabela 1. Minimalne i maksymalne wartości pochylenia dodatkowego

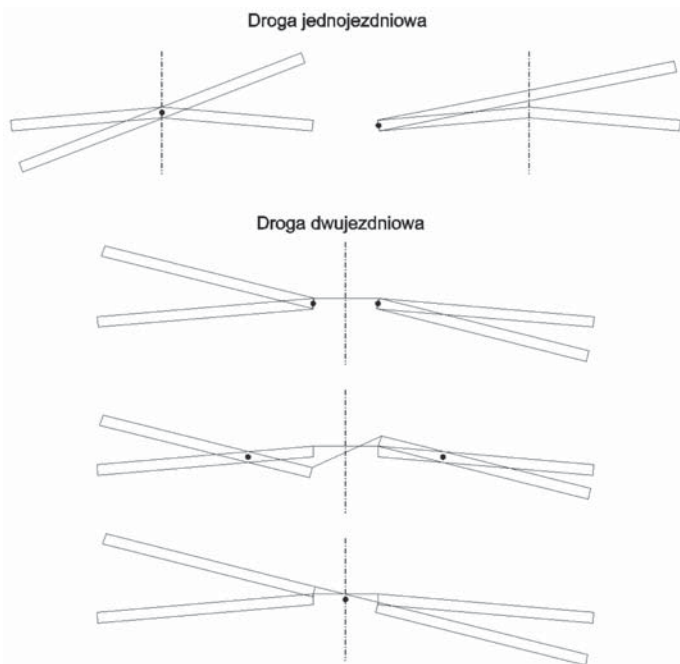
Prędkość projektowa [km/h]	Dopuszczalne dodatkowe pochylenie krawędzi jezdni [%]	
	największe	najmniejsze na odcinku o pochyleniu poprzecznym ≤ 2%
120 – 100	0,9	0,1·a a – odległość krawędzi jezdni od osi obrotu
80	1,0	
70, 60	1,6	
≤ 50	2,0	

§ 18.2. Usytuowanie osi obrotu powinno być tak dobrane, aby zapewnić sprawny odpływ wody oraz płynny przebieg krawędzi jezdni.

Na drogach jednojezdniowych oś obrotu najczęściej projektuje się tak, aby pokrywała się z osią drogi. W przypadku dróg dwujezdniowych często oś tę sytuuje się w innym miejscu. Według [2] przy wyborze lokalizacji osi obrotu należy spełnić warunki odwodnienia jezdni oraz zaleca się uwzględnić następujące czynniki:

- występowanie skrzyżowania lub jednopoziomowego przejazdu kolejowego,
- potrzebę wykorzystania istniejącej nawierzchni przy przebudowie lub rozbudowie drogi,
- zasady prowadzenia barier ochronnych oraz urządzeń odwadniających (rowy, ścieki),
- aspekty estetyki (kształt pasa dzielącego).

Przykłady lokalizacji osi obrotu w przypadku dróg jednojezdniowych oraz dwujezdniowych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Przykłady lokalizacji osi obrotu

§ 24.4. Pochylenie ukośne jezdni powinno być nie mniejsze niż 0,7% i nie większe niż 12%.

Dolna granica pochylenia ukośnego wynika z warunku sprawnego odwodnienia jezdni. Autorzy [1] założyli, że pochylenia to równe 0,7% jest wystarczające do zapewnienia spływu woda opadowej z nawierzchni. Górna granica określona została przy uwzględnieniu bezpieczeństwa ruchu w warunkach zimowych.

§ 24.5. Pochylenie niwelety jezdni powinno wynosić nie mniej niż 0,3% z zastrzeżeniem § 17.3.

W [1] zawarty jest warunek określający minimalne podłużne pochylenie niwelety. Ograniczenie to determinowane jest przez konieczność odwodnienia korpusu drogi. Eliminuje on możliwość projektowania poziomej niwelety. Długie odcinki o pochyleniu podłużnym zbliżonym do zera byłyby ciężkie do odwodnienia ze względu na trudności w prowadzeniu niwelety rowów odwadniających.

Szybkie odprowadzenie wody z jezdni gwarantuje bezpieczeństwo ruchu, gdyż eliminuje możliwość wystąpienia poślizgu wodnego (*aquaplaning*) lub na cienkiej warstwie lodu.

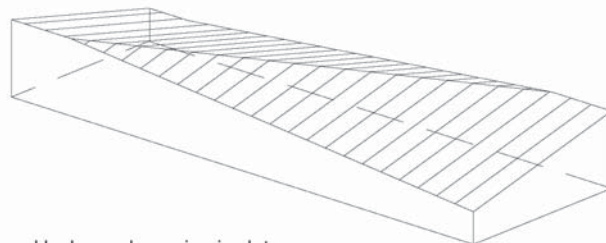
Znaczne utrudnienia w sprawnym odprowadzeniu wody opadowej z jezdni o małym pochyleniu podłużnym (mniejszym niż określone w §24 ust. 5) napotyka się na rampie drogowej, gdy pochylenie poprzeczne zmienia się od +2% do -2%. Klasyczny sposób zmiany pochylenia poprzecznego powoduje wówczas powstawanie powierzchni bezodpływowych (rys. 6), a w wypadku krzywych esowych spływ wody z jednej strony jezdni na drugą.

Jeżeli nie ma możliwości zwiększenia pochylenia podłużnego do wartości określonej w §24 ust. 5, to można zastosować jeden z poniższych sposobów:

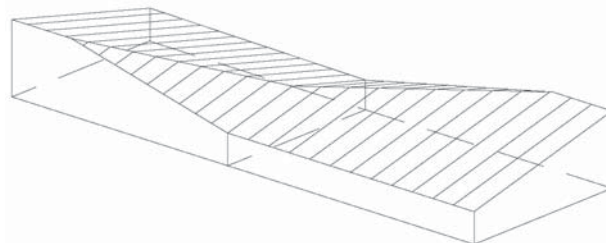
1) Wprowadzenie na jezdni dodatkowej krawędzi ukośnej (rys. 7).

Ideą metody przedstawionej poglądowo na rysunku 7 jest zastosowanie przekroju poprzecznego o pochyleniu dwustronnym (o kształcie daszkowym) w miejscu o zerowym pochyleniu poprzecznym.

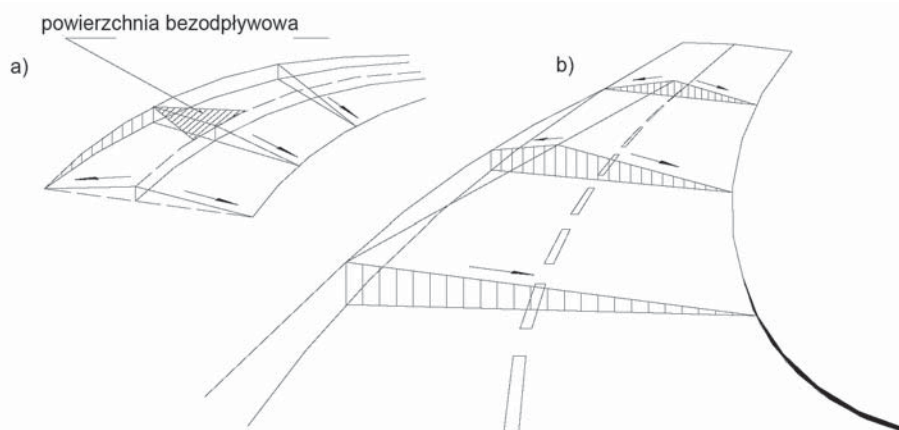
a) na odcinku drogi o stałym pochyleniu podłużnym



b) na wklęsłym załamaniu niwelety



Rys. 7. Dodatkowa krawędź ukośna na jezdni [2]



Rys. 6. Zmiana pochylenia poprzecznego jezdni a sprawne odprowadzenie wody

Ograniczony zakres stosowania tego sposobu uzasadnia się pogorszeniem wygody jazdy, szczególnie w warunkach zimowych. Pojazd poruszający się po wyznaczonym pasie ruchu najeżdżając na skośną krawędź jest narażony na działanie sił podłużnych i poprzecznych podobnych do sił, jakich doznaje pojazd zmieniający pas ruchu w trakcie wyprzedzania na drodze o przekroju daszkowym. W celu złagodzenia tych negatywnych efektów zaleca się, aby długość odcinka, na którym pochylenie poprzeczne jezdni zmienia się od +2% do -2% była nie mniejsza niż:

$$L = 0,1 \times b \times V_p$$

gdzie:

- L – długość odcinka zmiany pochylenia poprzecznego jezdni (m),
- b – szerokość jezdni (m),
- Vp – prędkość projektowa drogi (km/h).

Nie jest jednak wskazane zbytnie wydłużenie odcinka L, gdyż konstrukcję nawierzchni na tym odcinku trzeba wykonać ręcznie. W efekcie zastosowania tego sposobu uzyskuje się zdecydowane i szybsze odprowadzenie wody opadowej z jezdni, co podnosi poziom bezpieczeństwa ruchu.

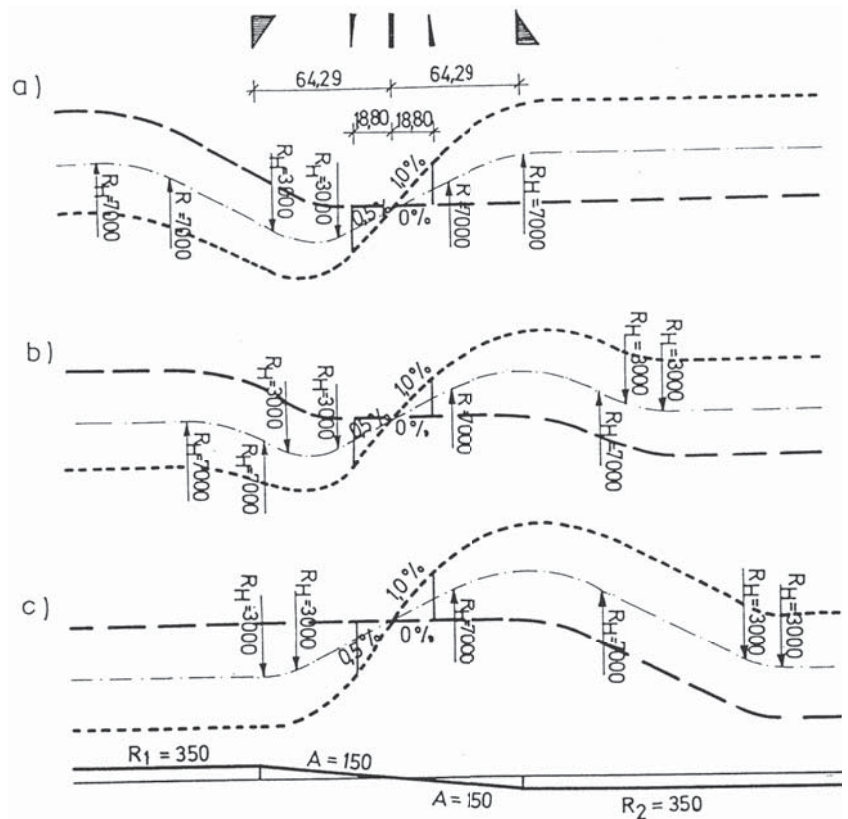
2) Lokalna korekta niwelety jezdni (rys. 8 i 9).

Sposób ten stosuje się na dwujezdniowych drogach wyższych klas. Założeniem metody jest kształtowanie rampy drogowej tak, aby w miejscu zerowego pochylenia poprzecznego jezdni uzyskała wystarczające pochylenie podłużne (zwykle nie mniejsze niż 0,5%) do sprawnego odprowadzenia wody opadowej.

W wypadku poziomej niwelety jezdni można zastosować trzy warianty rozwiązania:

- przekrój o zerowym pochyleniu poprzecznym jest zlokalizowany poniżej niwelety osi jezdni; tworzy się wówczas wklęsłość na niwelecie jezdni (rys. 8a),
- przekrój o zerowym pochyleniu poprzecznym jest umieszczony na poziomie niwelety osi jezdni; powstają w przekroju podłużnym wklęsłość i wypukłość złagodzone łukami (rys. 8b),
- przekrój o zerowym pochyleniu poprzecznym jest zlokalizowany powyżej niwelety osi jezdni (rys. 8c).

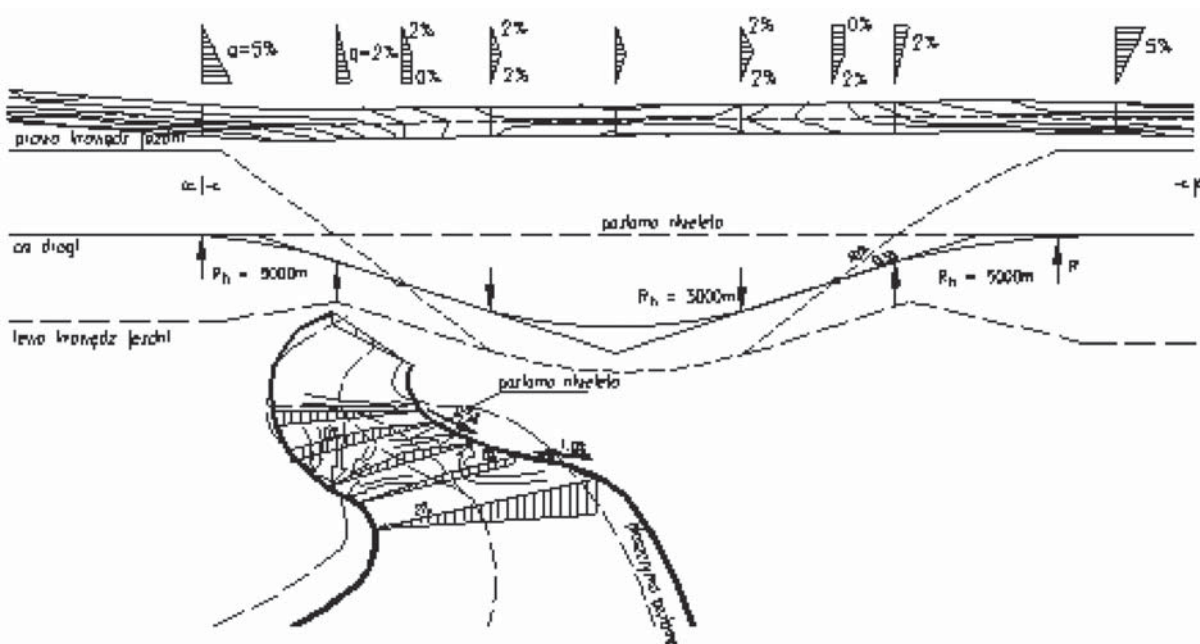
Sposób ten nie zawiera wad poprzedniej metody, wymaga jednak precyzyjnego wykonawstwa robót. Modyfikację tej metody przedstawiono na rysunku 9. Podobnie



Rys. 8. Lokalna korekta niwelety jezdni [2]

jak w wariantcie przedstawionym na rysunku 8a, lokalnemu obniżeniu ulega oś jezdni, by w efekcie uzyskać wystarczający do odprowadzenia spadek podłużny w miejscu zmiany kierunku pochylenia poprzecznego. Następnie są konstruowane dwie rampy rozdzielone odcinkiem o przekroju daszkowym.

Zastosowanie jednego ze sposobów kształtowania powierzchni jezdni na rampie drogowej usytuowanej na ma-



Rys. 9. Lokalna korekta niwelety jezdni z przekrojem pośrednim o pochyleniu daszkowym [2]

łym pochyleniu podłużnym wymaga sprawdzenia czy jest zagwarantowane pochylenie ukośne jezdni nie mniejsze niż 0,7% (§24 ust. 4), a także wychwycenie powierzchni bezodpywowych. Przeprowadzenie takiej oceny jest możliwe za pomocą programu komputerowego lub na podstawie analizy planu warstwicowego powierzchni jezdni (rys. 9).

3) Niekonwencjonalne sposoby odprowadzenia wody

Może to być:

- porowaty beton asfaltowy jako warstwa ściernalna wchłaniająca wodę opadającą,
- nacięcia podłużne i poprzeczne na nawierzchni betonowej.

Są to sposoby kosztowne i wymagające specjalistycznych technologii i wykonawstwa.

Przepisy obowiązujące w Niemczech

Zasady projektowania dróg obowiązujące w Niemczech podane są w [4]. Wymagania dotyczące ramp drogowych podzielone zostały na dwie grupy w zależności od tego czy jezdni ograniczona jest krawężnikami, czy nie. W obu grupach obowiązują te same kryteria, tj. maksymalne dopuszczalne pochylenie dodatkowe krawędzi jezdni oraz minimalna dopuszczalna różnica pomiędzy tym pochyleniem a pochyleniem podłużnym osi obrotu, ewentualnie niwelety. Granice, w jakich powinno zawierać się pochylenie dodatkowe, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Minimalne i maksymalne wartości pochylenia dodatkowego

Prędkość projektowa [km/h]	Δs_{max} [%]		Δs_{min} [%]
	$a < 4,00$ m	$a \geq 4,00$ m	
50	0,50·a	2,00	0,10·a ($\leq \Delta s_{max}$)
60 – 70	0,40·a	1,60	
80 – 90	0,25·a	1,00	
100 – 120	0,225·a	0,90	

gdzie: a – odległość krawędzi jezdni od osi obrotu

Wartości przedstawione w tabeli 2 są analogiczne do wartości zawartych w przepisach polskich. Autorzy [4] wprowadzili jednak kolejny czynnik warunkujący maksymalne pochylenie dodatkowe. Oprócz prędkości projektowej drogi należy również uwzględnić odległość obracanej krawędzi jezdni od osi obrotu. W przepisach polskich maksymalne pochylenie dodatkowe jest wartością zależną tylko od prędkości projektowej.

Według [4] zmiana kierunku pochylenia poprzecznego powinna być wykonana na krzywej przejściowej, a w przypadku jej braku po połowie na wzajemnie stykających się elementach. W przypadku krzywej koszarowej rampę należy kształtować na łuku o większym promieniu. Krawędzie jezdni na rampie drogowej powinny być prowadzone bez widocznych załamania.

1) Kształtowanie rampy na jezdni nieograniczonej krawężnikami

Gdy oś obrotu pokrywa się z osią drogi, autorzy [4] zalecają zapewnienie w obrębie rampy drogowej pochylenia podłużnego niwelety nie mniejszego niż 0,7%. W projektowaniu należy jednak unikać stosowania wartości minimalnych. Pożądane pochylenie podłużne na odcinku zmiany kierunku pochylenia poprzecznego wynosi 1,0%. Wprowadzono również warunek na minimalne pochylenie dodatkowe. Powinno ono różnić się od pochylenia niwelety o nie mniej niż 0,2%, a lepiej o 0,5%. Warunek ten można zapisać w postaci nierówności:

$$s - \Delta s \geq 0,2\% \text{ (0,5\%)} \quad (3)$$

w której:

s – pochylenie podłużne niwelety [%],

Δs – dodatkowe pochylenie podłużne krawędzi jezdni [%].

W przypadku gdy oś obrotu nie pokrywa się z osią drogi (np. na drogach dwujezdniowych), należy zapewnić pochylenia spełniające poniższą nierówność:

$$s + \Delta s \geq 0,7\% \quad (4)$$

Oznaczenia symboli zgodnie ze wzorem (3).

W przeciwieństwie do polskich, niemieckie przepisy dokładnie precyzują, jakie warunki powinny być spełnione, gdy oś obrotu pokrywa się z osią drogi oraz w przypadku, gdy linie te mają inną lokalizację.

2) Kształtowanie rampy na jezdni ograniczonej krawężnikami

Wymagania dotyczące kształtowania ramp na drogach o jezdni ograniczonej krawężnikami są mniej radykalne. Wynika to z tego, że drogi te najczęściej biegają w terenach zabudowanych i poruszające się po nich pojazdy osiągają mniejsze prędkości. Poza tym w takich przypadkach często odwodnienie jezdni realizowane jest poprzez kanalizację deszczową, co pozwala na złagodzenie warunku dotyczącego minimalnego pochylenia podłużnego.

Ponadto w przypadku takich dróg istnieje znacznie mniejsza swoboda projektowania ze względu na ograniczenia terenowe i np. występowanie przy jezdni lub w pasie dzielącym torowiska tramwajowego. W związku z tym warunki dotyczące kształtowania ramp drogowych wynikające z konieczności odwodnienia jezdni mogły zostać osłabione.

Według [4] w przypadku dróg projektowanych w krawężnikach pochylenie podłużne powinno wynosić co najmniej 0,5%. Jest to wartość absolutnie minimalna, której nie można przekroczyć w obrębie rampy drogowej.

W przypadku dróg projektowanych w krawężnikach minimalna różnica pomiędzy dodatkowym pochyleniem krawędzi jezdni a pochyleniem osi drogi wynosi 0,5%. W wytycznych warunek ten zapisany jest w następującej postaci:

$$s - \Delta s \geq 0,5\% \quad (5)$$

Oznaczenia symboli zgodnie ze wzorem (3).

Podsumowanie dotychczasowej praktyki

Analiza przepisów techniczno-budowlanych obowiązujących w Polsce i w Niemczech, pozwala stwierdzić, że ich

autorzy formułując zasady kształtowania ramp drogowych kierowali się przede wszystkim koniecznością zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników drogi. Głównym problemem, jakiemu obecnie muszą sprostać projektanci, jest zapewnienie odwodnienia jezdni. Zjawisko to jest jak najbardziej uzasadnione, gdyż woda opadowa zalegająca na nawierzchni zmniejsza współczynnik przyczepności kół pojazdu do nawierzchni, pogarszając tym samym warunki bezpieczeństwa ruchu. Należy zauważyć, że aktualne przepisy techniczne podają jedynie warunki geometryczne, których spełnienie powinno gwarantować spływ wody z jezdni. Dotyczą one najczęściej pochylenia ukośnego, dodatkowego pochylenia podłużnego obracanej krawędzi jezdni oraz różnicy pochylenia podłużnego osi obrotu i pochylenia dodatkowego. Doświadczenie zarówno polskie, jak i zagraniczne dowodzi, że w niektórych przypadkach spełnienie przyjętych kryteriów może okazać się niewystarczające do zapewnienia sprawnego odwodnienia. Sytuacja taka może wystąpić na drogach o wielopasowym przekroju poprzecznym (np. autostrady), kiedy szerokość jezdni dochodzi do kilkunastu metrów. Wówczas powierzchnia zlewni, z której spływa woda w obszar bezodpływowy, jest bardzo duża, co przy intensywnym deszczu może powodować tworzenie się w tym miejscu warstwy wody o grubości zagrażającej bezpieczeństwu pojazdów. Niestety obowiązujące przepisy nie uwzględniają tego problemu. Nie podają metody pozwalającej na sprawdzenie sprawności odwodnienia w warunkach rzeczywistych; metody, która uwzględniałaby faktyczny stan techniczny nawierzchni, natężenie padającego deszczu oraz przestrzenne ukształtowanie drogi.

W związku z tym faktem obecnie daje się zauważyć tendencję do bardziej szczegółowego podchodzenia do problemu odwodnienia dróg.

Kształtowania ramp przy małych pochyleniach podłużnych

W punkcie 3 przedstawiono analizę obowiązujących wymagań technicznych dotyczących zasad kształtowania ramp drogowych. W związku z postawioną tezą, że nie są one wystarczające do zapewnienia bezpieczeństwa ruchu drogowego, zastosowano kryterium, które weryfikowałoby przepisy pod tym właśnie względem. Należy wspomnieć, że przez bez-

pieczeństwo ruchu drogowego rozumiane jest zapewnienie odpowiedniej *przyczepności* kół samochodu do nawierzchni oraz zapewnienie *kierowalności* pojazdu podczas jazdy po mokrej nawierzchni w obrębie rampy drogowej. Kryterium tym może być *prędkość aquaplaningu*.

Aquaplaning

Na suchej jezdni ok. 90% siły przyczepności stanowi adhezja, tj. wzajemne oddziaływanie cząsteczek nawierzchni i gumy, z której wykonana jest opona. Pod wpływem wilgotności powietrza, opadów i innych czynników siła adhezji maleje. Poważnym zagrożeniem jest zjawisko *aquaplaningu*, polegające na tworzeniu się pomiędzy oponą a jezdnią wodnego klina, który zmniejsza powierzchnię kontaktu opony z nawierzchnią. Zjawisko to powstaje podczas jazdy z dużą prędkością, kiedy bieżnik opony nie nadąża z odprowadzaniem wody. Kiedy na drodze zalega warstwa wody znacznej grubości, opona musi poradzić sobie z wypompowaniem kilkudziesięciu litrów w ciągu sekundy. Ilość wody do odpompowania wzrasta wraz z przyrostem prędkości pojazdu. Według [6] przy prędkości pojazdu równej 90 km/h bieżnik opony musi odprowadzić około 10 litrów wody na sekundę, aby nie doszło do utraty przyczepności. W powstawaniu zjawiska *aquaplaningu* wyodrębnić można 3 fazy. Zostały one przedstawione na rysunku 10.

Faza 1 – Pojazd porusza się z prędkością optymalną; dostosowaną do warunków panujących na drodze. Bieżnik odprowadza wodę spod koła umożliwiając pełny kontakt opony i nawierzchni.

Faza 2 – Pojazd porusza się z prędkością, przy której bieżnik nie nadąża z całkowitym odprowadzaniem wody. Klin wodny wdiera się pod oponę zmniejszając powierzchnię kontaktu opony z nawierzchnią.

Faza 3 – Pojazd porusza się z prędkością, przy której niemożliwe jest zachowanie kontaktu opony z nawierzchnią. Klin wodny unosi oponę. Następuje *aquaplaning* i pojazd staje się niesterowny.

Prędkość aquaplaningu jako kryterium sprawnego odwodnienia

Zjawisko *aquaplaningu* jest poważnym zagrożeniem dla kierowców i dlatego nie można pominąć go przy projektowa-



Rys. 10. Fazy powstawania aquaplaningu [6]

niu dróg i ulic. Jeżeli wyznacznikiem prawidłowego ukształtowania rampy drogowej jest sprawne odwodnienie, to prędkość przy jakiej zachodzi zjawisko *aquaplaningu* powinna być głównym parametrem uwzględnianym przy projektowaniu. Kierowanie się tym kryterium pozwalałoby na kształtowanie rampy drogowej tak, aby zachowane było bezpieczeństwo użytkowników drogi.

W latach 80. Czasownikow i Wasiliew przeprowadzili szereg badań nad *aquaplaningiem*. W rezultacie zaproponowali następującą zależność pozwalającą określić prędkość, przy której następuje utrata przyczepności kół do nawierzchni.

$$v_{aq} = 36 \cdot \sqrt{\frac{23,5 \cdot P}{\rho \left[1 - \left(\frac{0,72 \cdot \Delta}{h} \right)^2 \right]}} \quad (6)$$

w której:

Δ – tekstura nawierzchni [mm],

P – ciśnienie powietrza w oponach [MPa],

ρ – gęstość wody [g/cm³],

h – grubość warstwy wody zalegającej na nawierzchni [mm].

Wzór (6) został zaprezentowany przez Wasiliewa w [8].

Badania, których efektem był wzór (6) dowiodły, że prędkość *aquaplaningu* zależy od tekstury nawierzchni, ciśnienia w powietrza w oponie, gęstości wody oraz grubości jej warstwy zalegającej na nawierzchni. Wasiliew i Czasownikow do analiz użyli opony gładkiej. W związku z tym wyprowadzona przez nich zależność nie może być wykorzystywana do obliczeń prowadzonych w przypadku warunków rzeczywistych. Późniejsze analizy wykonane przez specjalistów z firmy Pirelli wykazały, że rzeźba i głębokość bieżnika mają duży wpływ na *aquaplaning*. Na podstawie własnych doświadczeń zmodyfikowali wzór Wasiliewa o składniki uwzględniające głębokość bieżnika opony:

$$v_{aq} = 36 \cdot \sqrt{\frac{23,5 \cdot P}{\rho \left[1 - \left(\frac{0,72 \cdot \Delta}{h} \right)^2 \right]}} + 0,0653 \cdot g^3 - 0,951 \cdot g^2 + 7,0206 \cdot g - 0,1 \quad (7)$$

w którym: g – głębokość bieżnika [mm], pozostałe symbole zgodnie ze wzorem (6).

Synteza wniosków wynikających z zależności podanych przez Wasiliewa pozwala stwierdzić, że na *aquaplaning* wpływają:

- parametry nawierzchni: szorstkość (tekstura), orientacja przestrzenna jezdni (pochylenie ukośne);
- parametry techniczne pojazdu: obciążenie, stan ogumienia (głębokość i rzeźba bieżnika), ciśnienie powietrza w oponie, szerokość opony;
- warunki atmosferyczne: natężenie deszczu (grubość warstwy wody);
- prędkość pojazdu.

Ponadto wpływ ma także stan techniczny pojazdu; stan zawieszenia (głównie amortyzatorów) oraz układu kierowniczego. Czynniki te są jednak trudne do ujęcia w matematyczne zależności, dlatego też są pomijane.

Wnioski

1. Analizy bezpieczeństwa ruchu wskazują, że rampy drogowe na dwujezdniowych drogach w Polsce są miejscem koncentracji wypadków, których podstawową przyczyną jest zjawisko *aquaplaningu*.
2. Zasady kształtowania ramp drogowych umieszczone w przepisach techniczno-budowlanych w Polsce zawierają wymagania geometryczne, które nie chronią przed zagrożeniami spowodowanymi *aquaplaningiem*.
3. Wprowadzenie do zasad kształtowania ramp drogowych jako kryterium prędkość *aquaplaningu*, to znaczy prędkość, przy której następuje utrata przyczepności kół pojazdu do nawierzchni jezdni sprawia trudności, gdyż we wzorach analitycznych prędkość ta zależy od wielu zmiennych, opisujących cechy i stan nawierzchni, głębokość warstwy wody oraz właściwości opon, trudno dostępnych na etapie projektowania.
4. Zagrożenie *aquaplaningiem* jest szczególnie wysokie na rampach drogowych o małym pochyleniu podłużnym, mniejszym niż dodatkowe pochylenie krawędzi jezdni powiększone o 0,2%. W takich przypadkach należy stosować specjalne metody usprawniające spływ wody opadowej z jezdni zestawione w niniejszej pracy dyplomowej.
5. W ramach pracy dyplomowej wykonano ocenę poprawności ukształtowania rampy drogowej na przykładzie istniejącego odcinka drogi dwujezdniowej w Polsce. Jako kryterium oceny przyjęto wymagania zawarte w przepisach techniczno-budowlanych w Polsce a także rozkład i wartości pochyłeń ukośnych oraz kształt i długości linii spływu wody opadowej. Stwierdzone miejsca o utrudnionym spływie wody zlikwidowano przez przebudowę rampy.
6. Trudności poprawnego kształtowania ramp drogowych wynikają z braku w literaturze technicznej metody ustalania prędkości *aquaplaningu* na podstawie dostępnych danych na etapie projektowania ramp. Opracowanie takiej metody jest bardzo potrzebne.

Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Dz. Ust. Nr 43, poz. 430, Warszawa, 14 maja 1999 r.
- [2] Komentarz do warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie, Część I i II, GDDKiA, Warszawa 2000 r.
- [3] Wytyczne projektowania dróg I i II klasy technicznej (autostrady i drogi ekspresowe), Załącznik nr 1 do zarządzenia nr 5/95 Generalnego Dyrektora Dróg Publicznych z dnia 31 marca 1995 r. Warszawa 1995r.
- [4] Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, RAA, Ausgabe 2008 r.
- [5] Pietzsch, W.: *Projektowanie dróg i ulic*, WKiŁ, Warszawa 1979 r.
- [6] Prochowski L.: *Mechanika ruchu*. WKiŁ, Warszawa 2005 r.
- [7] Sandecki T.: *Kształtowanie zmian pochyłeń poprzecznych dróg przy małych pochyleniach podłużnych*. Warszawa 1986 r.
- [8] Wasiliew A.: *Projektovane dorog s učetom v'janja klimata na uslovja dviženja*. Moskwa 1986.
- [9] Datka S.: *Odwodnienie dróg i ulic*. WKiŁ, Warszawa 1970 r.
- [10] Rozporządzenie MI z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych. Dz. U. Nr 12/2002, poz. 116 z póź. zmianami.