

Primljen / Received: 28.1.2016.

Ispravljen / Corrected: 1.2.2017.

Prihvaćen / Accepted: 10.2.2017.

Dostupno online / Available online: 30.12.2018.

# Prevenција pojave akvaplaninga primjenom tehničkih mjera

## Autori:

Doc.dr.sc. **Alina Burlacu**, dipl.ing.građ.Tehničko sveučilište u Bukureštu, Rumunjska  
Građevinski fakultet  
[burlacu\\_alina@yahoo.com](mailto:burlacu_alina@yahoo.com)Prof.dr.sc. **Carmen Răcănel**, dipl.ing.građ.Tehničko sveučilište u Bukureštu, Rumunjska  
Građevinski fakultet  
[carmen.racanel@utcb.ro](mailto:carmen.racanel@utcb.ro)Izv.prof.dr.sc. **Adrian Burlacu**, dipl.ing.građ.Tehničko sveučilište u Bukureštu, Rumunjska  
Građevinski fakultet  
[adrian\\_burlacu@yahoo.com](mailto:adrian_burlacu@yahoo.com)  
[adrian.burlacu@utcb.ro](mailto:adrian.burlacu@utcb.ro)

Stručni rad

**Alina Burlacu, Carmen Răcănel, Adrian Burlacu**

## Prevenција pojave akvaplaninga primjenom tehničkih mjera

Do pojave akvaplaninga, kod cestovnih vozila, dolazi kada se između pneumatika vozila i površine kolnika pojavi sloj vode. Akvaplaning uzrokuje gubitak prionjivosti pneumatika što za posljedicu ima smanjenu upravljivost vozilom. Učinkovitost tehničkih rješenja koja se primjenjuju na uobičajenim cestama analizirana je pomoću specijaliziranog računalnog programa Pavement Surface Runoff Model. U radu je pokazana važnost kvalitete izvedbe habajućeg sloja kolničke konstrukcije, njen utjecaj na sigurnost odvijanja prometa te korelacija između geometrijskih karakteristika elemenata ceste i pojave akvaplaninga.

### Ključne riječi:

akvaplaning, sigurnost cestovnog prometa, vodni film, površina kolnika, geometrijsko oblikovanje ceste

Professional paper

**Alina Burlacu, Carmen Răcănel, Adrian Burlacu**

## Preventing aquaplaning phenomenon through technical solutions

The aquaplaning of a road vehicle occurs when a layer of water appears between the wheels of the vehicle and the road surface. The aquaplaning causes loss of wheel adherence, and results in a reduced vehicle control capability. The efficiency of technical solutions applied on standard roads is analysed using a dedicated computer software called the Pavement Surface Runoff Model. The paper places emphasis on the significance of constructing a good quality pavement-structure wearing course, its influence on traffic safety, and the correlation between geometric properties of road elements and the aquaplaning phenomenon.

### Key words:

aquaplaning, road safety, water film, pavement surface, road geometry design

Fachbericht

**Alina Burlacu, Carmen Răcănel, Adrian Burlacu**

## Vermeidung von Aquaplaning durch Anwendung technischer Maßnahmen

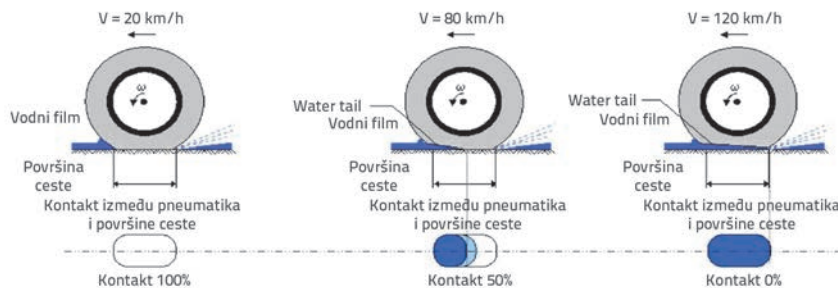
Zum Auftreten von Aquaplaning bei Straßenfahrzeugen kommt es, wenn sich zwischen dem Fahrzeugreifen und der Fahrbahnoberfläche eine Wasserschicht bildet. Aquaplaning verursacht einen Verlust der Reifenhaftung, was eine Verringerung der Lenkbarkeit des Fahrzeugs zur Folge hat. Die Wirksamkeit technischer Lösungen, welche auf üblichen Straßen angewendet werden, wurde mithilfe des speziellen Computerprogramms Pavement Surface Runoff Model analysiert. In der Abhandlung wird die Bedeutung der Qualität der ausgeführten Verschleißschicht der Fahrbahnkonstruktion, deren Einfluss auf die Sicherheit des Verkehrsflusses sowie die Korrelation zwischen den geometrischen Merkmalen der Straßenelemente und des Auftretens von Aquaplaning aufgezeigt.

### Schlüsselwörter:

Aquaplaning, Sicherheit im Straßenverkehr, Wasserfilm, Fahrbahnoberfläche, geometrische Straßengestaltung

### 1. Uvod

Prisutnost vode na površini kolnika znatno utječe na sigurnost cestovnog prometa jer može smanjiti vidljivost i ubrzati pojavu akvaplaninga. Spomenuta pojava smatra se izuzetno opasnom, a podrazumijeva klizanje pneumatika po vodnom filmu koji se nalazi na površini kolnika. Akvaplaning nastaje pod određenim uvjetima, kada brzina vožnje premaši određenu vrijednost, a profil pneumatika i tekstura površine kolnika ne omogućavaju brzu odvodnju ceste. U tom se slučaju između pneumatika i površine kolnika stvara neprekinuti vodni film promjenjive dubine. Vrijednost koeficijenta trenja smanjuje se na 0,1, naročito kada dođe do blokiranja kotača uslijed kočenja (slika 1.). Voda se na kolniku ne nakuplja samo na mjestima povećane hrapavosti ceste, već i u zonama u kojima nije pravilno riješena oborinska odvodnja. Nadalje, sama konfiguracija ceste, poput područja prijelaznih krivina, može pogodovati akumuliranju vode na kolniku. U studiji [1] provedenoj u Njemačkoj na dionici autoceste sa šest prometnih trakova, autori su istaknuli činjenicu da je rizik za nastanak prometnih nesreća u kišnim uvjetima dvostruko veći u području prijelaznih krivina nego na ostalim dijelovima ceste. U uvjetima suhog kolnika rizik nastanka prometnih nesreća je otprilike podjednak na svim dijelovima ceste, što upućuje na potrebu za dodatnim analiziranjem ovog aspekta pri projektiranju cestovne infrastrukture te na potrebu ulaganja dodatnog napora pri razvoju novih metoda koje bi omogućile poboljšanje dosadašnjeg stanja.



Slika 1. Modeli kontakta između pneumatika i površine kolnika [2]

Tablica 1. Učestalost po kategorijama intenziteta bujičnih tj. godišnjih padalina maksimalnog intenziteta, ovisno o trajanju [%] [6]

Trajanje padalina	Bujična kiša			Godišnje padaline maksimalnog intenziteta		
	Maksimalni intenzitet [mm/min]					
	<0,5	0,5 – 1,0	>1,0	<0,5	0,5 – 1,0	>1,0
< 1 sat	-	1,5	23,6	0,2	1,7	32,1
1-2 sata	-	1,5	18,8	-	1,2	28,6
2-3 sata	-	1,5	14,0	-	0,4	16,4
3-6 sata	0,4	9,2	27,7	-	0,4	14,3
> 6 sati	-	0,7	1,1	-	0,8	3,9
<b>Ukupno</b>	0,4	14,4	85,2	0,2	4,5	95,3

Istraživanja vezana uz nastanak akvaplaninga počela su se provoditi početkom tridesetih godina prošlog stoljeća [3], prije svega radi poboljšanja uređaja za odvodnju. Međutim, sustavnih istraživanja nije bilo sve do šezdesetih godina prošlog stoljeća kada je zbog naglog širenja cestovne mreže, povećanja širine kolnika i brzine prometovanja uočen utjecaj odvodnje cesta na sigurnost odvijanja prometa [4]. Cilj je bio istražiti utjecaj nagiba ceste i duljine puta otjecanja vode s kolnika na dubinu vodnog filma. Sedamdesetih godina prošlog stoljeća prvi su put prilikom istraživanja površinske odvodnje u obzir uzeti podatci o geometriji ceste s ciljem određivanja utjecaja na dubinu vodnog filma [5].

### 2. Relevantni faktori

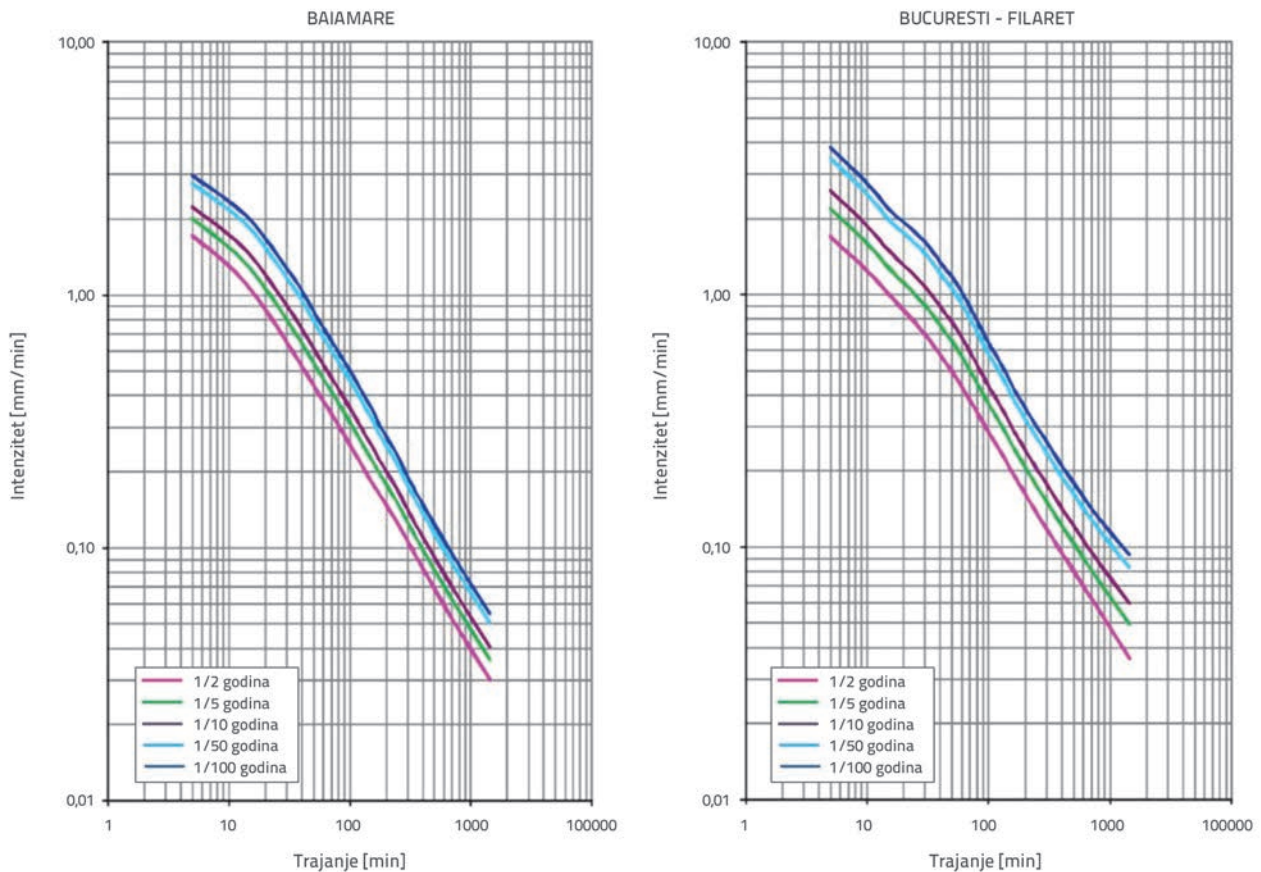
#### 2.1. Vremenski uvjeti

Pluviometrijski podatci zabilježeni na meteorološkim postajama u Rumunjskoj između 1901. i 2000. godine pokazuju tendenciju smanjenja oborina na godišnjoj razini, ali i eskalaciju sušnih razdoblja u južnom dijelu države u razdoblju poslije 1960. godine. U razdoblju između 1946. i 2000. godine u pojedinim regijama zabilježena su na godišnjoj razini povećanja broja dana s jakim kišnim padalinama (najveće dnevne količine bile su 12 %) i izuzetno jakim kišnim padalinama (najveće dnevne količine bile su 40 %).

Obilne kiše uzrokovane su prodorom tropskog vlažnog zraka, odnosno interakcijom morskog polarnog zraka i neujednačenog zagrijavanja Zemljine površine tijekom toplijeg dijela godine.

Prema kategorizaciji padalina, na vrhu imamo bujične kiše gdje kod maksimalnog intenziteta, koji prelazi 1,0 mm/min, bilježimo ukupnu vrijednost trajanja od 85,2 %, a situacija je ista i za godišnje maksimalne vrijednosti kišnih padalina (tablica 1.). Za bujične kiše trajanje padalina maksimalnog intenziteta varira od 2 do 5 minuta (55,4 %), nakon čega slijedi kategorija s jednogodišnjim padalinama (ispod 25,0 % u oboj slučaju). Situacija je slična i kod godišnjeg maksimalnog intenziteta kišnih padalina gdje trajanje maksimalnog intenziteta padalina iznosi do 5 minuta (95,3 %).

Na dijagramu prikazanom na slici 2. vidljivi su različiti intenziteti oborina: od 1,8 mm/min za petominutno trajanje i dvogodišnji povratni period te od 4 mm/min za petominutno trajanje i stogodišnji povratni period [7]. Prema mišljenju stručnjaka [8], oborine su učestalije i obilnije nego u prijašnjim razdobljima, pa je potrebno poduzeti odgovarajuće mjere kako bi se poboljšala infrastruktura i spriječila pojava akvaplaninga.



Slika 2. Krivulje intenziteta – trajanja – učestalosti temeljene na podacima iz dijagrama oborina [7]

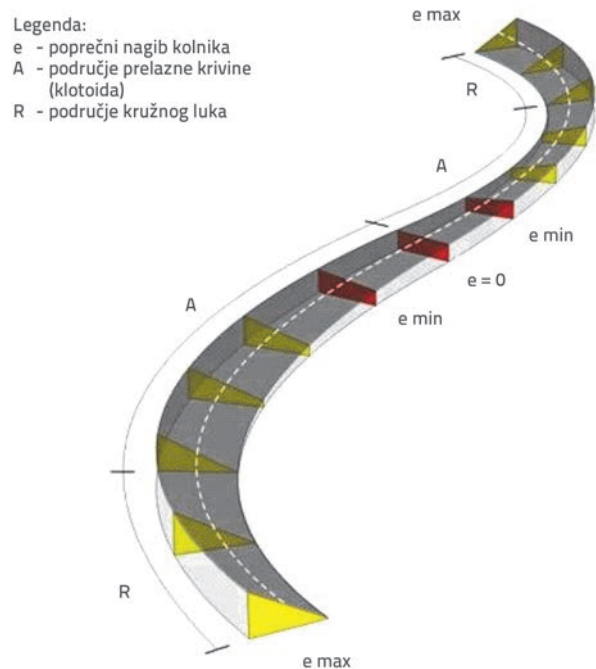
## 2.2. Geometrijsko oblikovanje ceste

Geometrijsko oblikovanje ceste podrazumijeva izradu trodimenzionalnog modela ceste u kojem su objedinjeni pojedinačni dvodimenzionalni modeli (situacija, uzdužni profil i poprečni profili) čiji su elementi projektirani u skladu s odredbama postojećih normi. Međusobna usklađenost elemenata te analiza aspekata kao što su vidljivost, kapacitet oborinske odvodnje te udobnost sudionika u prometu osnova su za procjenu točnosti postupka geometrijskog oblikovanja.

U ovom potpoglavlju analizirana je učinkovitost površinske odvodnje ceste sa stajališta geometrijskog oblikovanja. Vrijednosti uzdužnog (minimalni 0,5 % i maksimalni 8,0 % [9]) i poprečnog nagiba (minimalni 0,2 % i maksimalni 7,0 % [9]) određuju smjer, brzinu i duljinu puta otjecanja vode s površine kolnika.

U pojedinim slučajevima odvodnja s površine kolnika nije optimalna čak ni onda kada je cesta izvedena u skladu sa svim projektnim zahtjevima. Te slučajeve uglavnom susrećemo u prijelaznom području između dvije uzastopne prijelazne krivine, kao što je navedeno u studiji izrađenoj u Njemačkoj [1]. Takva područja pogodna su za nastanak pojave akvaplaninga osobito na cestama sa znatnom širinom kolnika na kojima su dopuštene velike brzine. Specifični dijelovi tih prijelaznih područja su prijelazne krivine (u situaciji ceste) i vitoperenje (u poprečnom presjeku). Na slici 3. vidljivi se trodimenzionalni prikaz takve dionice ceste, sastavljene od dva uzastopna, povezana segmenta tipa: kružni

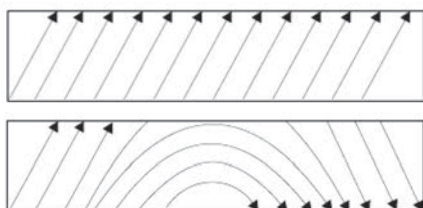
luk - klotoida, s konstantnim polumjerima  $R_1$  i  $R_2$ . Prema rumunjskim normama, primjena prijelaznih krivina je obavezna.



Slika 3. Trodimenzionalni prikaz dviju uzastopnih prijelaznih krivina [10]

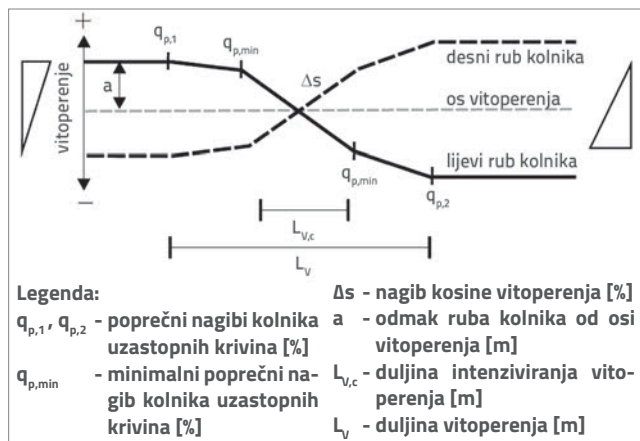
Na kapacitet odvodnje takve dionice ceste ne utječe promjena zakrivljenosti nego promjena poprečnog nagiba kolnika, naročito u području između dvije prijelazne krivine gdje je poprečni nagib kolnika jednak nuli ( $e = 0$ ), kao što je to specificirano u normama. Ta se činjenica vidi na slici 4., gdje su prikazani smjerovi otjecanja vode s kolnika za slučaj ceste s konstantnim poprečnim i uzdužnim nagibom te za slučaj ceste s promjenjivim poprečnim i konstantnim uzdužnim nagibom.

Zbog promjene poprečnog nagiba kolnika u zoni vitoperenja, duljina putanja koje predstavljaju smjer otjecanja vode je veća. Štoviše, otjecanje vode s kolnika se smanjuje smanjenjem poprečnog nagiba kolnika, što podrazumijeva otežanu odvodnju i rezultira akumuliranjem vode na kolniku.



Slika 4. Smjer otjecanja vode za kontinuirani poprečni i uzdužni nagib (gore) i za promjenjivi poprečni nagib i kontinuirani uzdužni nagib (dolje)

Kako bi se osigurala učinkovitost odvodnje kolnika, posebnu pažnju treba obratiti na oblikovanje središnjeg dijela prijelaznog područja imajući na umu činjenicu da su vrijednosti poprečnih nagiba manje od minimalne vrijednosti. Zbog toga projektiranje ovog područja mora biti strogo usklađeno s postojećim normama (slika 5.).



Slika 5. Shema vitoperenja protusmjernih horizontalnih krivina [10]

Zbog vitoperenja dolazi do promjene uzdužnog nagiba ruba kolnika (nagib kosine vitoperenja  $\Delta s$ ) u odnosu na nagib osi ceste. Nagib kosine vitoperenja  $\Delta s$  treba biti u granicama od 0,1a do 0,9 % [10]:

$$\Delta s = \frac{q_{p,1} - q_{p,2}}{L_{v,c}} a \quad (1)$$

U nekim slučajevima mogu se pojaviti problemi s odvodnjom, čak i onda kada se uzmu u obzir svi zahtjevi definirani relevantnim normama, pa je potrebno uložiti dodatne napore u svrhu pronalazjenja komplementarnog rješenja.

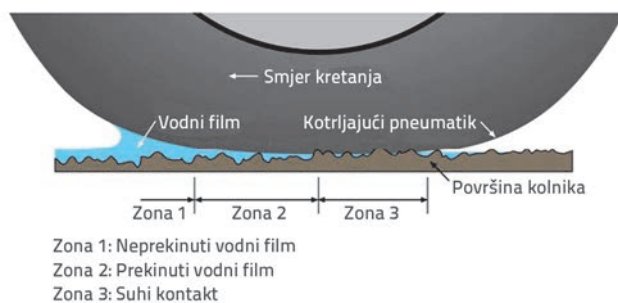
### 2.3. Površina kolnika

Tekstura površine kolnika je parametar koji na brojne načine utječe na sigurnost i udobnost sudionika u prometu (razine buke, hrapavost, otpornost na klizanje), a može se definirati kao odstupanje stvarne teksture površine kolnika od idealne potpuno ravne površine iskazano valnom duljinom  $\lambda_t$ . Na temelju ovog načela teksturu površine kolnika možemo svrstati u četiri kategorije [11]:

- mikrotekstura:  $\lambda_t < 0,5$  mm
- makrotekstura:  $0,5$  mm  $< \lambda_t < 50$  mm
- megatekstura:  $50$  mm  $< \lambda_t < 500$  mm
- neravnost:  $500$  mm  $< \lambda_t$ .

Brojna laboratorijska istraživanja pokazala su da mikrotekstura utječe uglavnom na hrapavost površine. Istraživanja makroteksture koja je odgovorna za adekvatnu odvodnju kolnika prikazana su u ovom pododjeljku. Megatekstura i neravnost kolnika također utječu na otjecanje vode s obzirom na uzdužni nagib ceste. Ipak, oni nisu biti razmatrani u ovom radu.

Karakteristični element makroteksture površine kolnika je retencijski volumen koji ovisi o srednjoj dubini profila teksture. Kada je taj volumen manji od volumena kišnih oborina, na kolniku nastaje kontinuirani vodni film. Istodobno zbog hrapavosti može doći do usporenog otjecanja vode s kolnika i formiranja površina s većom dubinom vodenog filma (slika 6.).

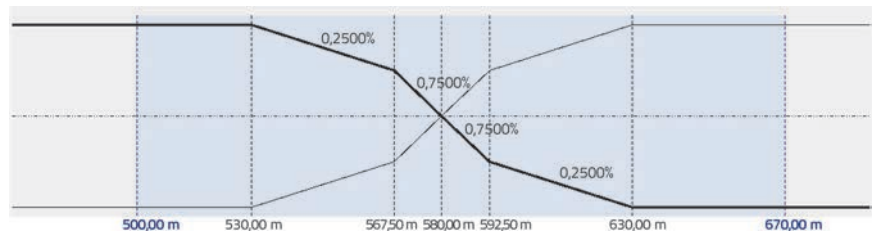


Slika 6. Vodni film na kontaktu između pneumatika i površine kolnika [12]

### 3. Analiza pomoću računalnog programa Pavement surface runoff model

Protok vode, koja otječe s kolnika za vrijeme i nakon prestanka kišnih oborina, nestabilan je i promjenjiv u vremenu. Na slici 7. prikazane su tri faze (vlaženje, stabilan tok i sušenje) profila otjecanja vode s kolnika u korelaciji s vremenom. Ako površina kolnika ima neravnosti, proces vlaženja i sušenja dalje se dijeli na još dvije faze:

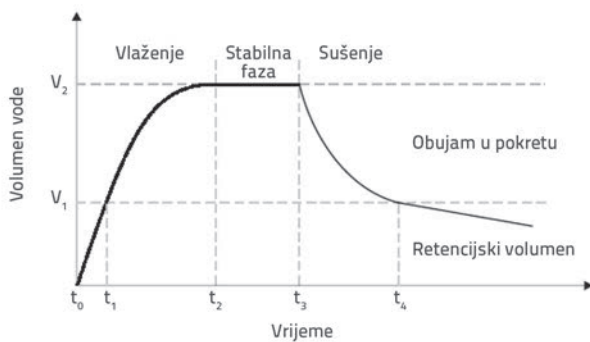
- $t_0 < t < t_1$  voda počinje ispunjavati raspoloživi retencijski volumen,  $V_1$ ;
- $t_1 < t < t_2$  volumen vode premašuje retencijski volumen pa se na kolniku počinje formirati vodni film, sve dok ne dosegne konstantnu razinu;
- $t_2 < t < t_3$  volumen vode koji formira vodni film je konstantan ( $V_2 - V_1$ );
- $t_3 < t < t_4$  volumen vode počinje se smanjivati kada se dosegne vrijednost  $t_3$ ; trenutak kada prestanu kišne oborine, dubina vode se neprestano smanjuje;
- $t_4 < t$  vodni film potpuno nestaje i ostaje samo voda u retencijskom volumenu, koja postupno isparava.



Slika 9. Pogled na shemu vitoperenja u računalnom programu PSRM

Računalni program PSRM korišten je pri analizi dionica cesta i autocesta različitih tipova. Dionice su se sastojale od dvije uzastopne protusmjerne horizontalne krivine. Svrha primjene PSRM-a bila je odrediti problematične točke s aspekta odvodnje vode na potezima vitoperenja kolnika. Istovremeno, u skladu s prethodno navedenim normama, podatci o širini kolnika, duljini poteza vitoperenja, uzdužnom i poprečnom nagibu ceste te vrsti habajućeg sloja kolničke konstrukcije upisani su u odgovarajuće grafičko korisničko sučelje (slika 8.) te su prikazani grafički (slika 9.).

Osim toga, za potrebe simulacije odabran je intenzitet kišnih oborina od 1,5 mm/min u petominutnom trajanju, prema dijagramima iz rumunjske norme br. 9470-73. Za pojedine dijelove Rumunjske to je karakteristična vrijednost intenziteta za povratni period od godinu dana (slika 10.).



Slika 7. Dijagram otjecanja vode s kolnika ovisno o vremenu [10]

Što se tiče pojave akvaplaninga, druga faza tj. stabilni tok, najopasnija je jer je dubina vodnog filma maksimalna. Računalni program *Pavement surface runoff model* (skraćeno PSRM), razvijen na Sveučilištu u Stuttgartu, omogućuje simuliranje otjecanja vode sa kolnika uzimajući u obzir geometrijsko oblikovanje elemenata ceste, različite vrste habajućeg sloja i uređaja za odvodnju te promjenjiv intenzitet i trajanje kišnih oborina.

Station	Querneigung [%]	Station [m]
-3		0,00
-2	-5,00	30,00
-1	-2,50	67,50
0	0,00	50,00
1	2,50	92,50
2	5,00	130,00
3		170,00

Versatz [m]: 0,00

Längsneigung [%]: 0,00

Standardverwindung (odabrano) / Schrägverwindung

Regelquerschnitt: RQ 10,5

Fahrbahnbreite [m]: 7,50

Slika 8. Grafičko korisničko sučelje za definiranje geometrijskih elemenata (računalni program PSRM)

Simulationseinstellungen

Simulationszeit [min]: 01:00

Zellgröße X [m]: 0,10

Zellgröße Y [m]: 0,10

Regenmenge [mm/min]: 0,7500

Init. Wasserhöhe [mm]: 0,0001

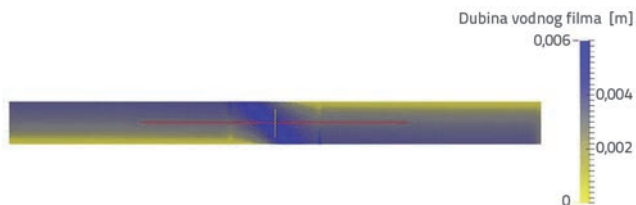
Slika 10. Grafičko korisničko sučelje za unos podataka o oborinama (računalni program PSRM)

U razmatranje su uzeti najnepovoljniji slučajevi. Ispitivanje je provedeno na trideset teoretskih modela:

- 18 modela cesta širine kolnika 14 metara, s potezom vitoperenja duljine 45 m, promjenjivim uzdužnim nagibom ceste (0,5 %, 3,5 % i 6,0 %) i poprečnim nagibom kolnika (3 % i 6 %) te s tri različite teksture površine kolnika glatka (prosječna dubina profila: 0.4 mm), prosječna (prosječna dubina profila: 0.89 mm) i gruba (prosječna dubina profila: 1.8 mm);
- 12 teoretskih modela autocesta širine kolnika 10 metara (za odvijanje prometa u jednom smjeru), s potezom vitoperenja duljine 140 m, promjenjivim uzdužnim nagibom autoceste (0,2 i 4 %) i poprečnim nagibom kolnika (3 % i 7 %), a tekstura površine kolnika varirana je na identičan način kao i u slučaju kod cesta.

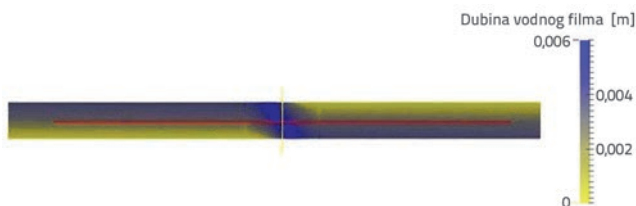
Nakon analize (simulacije) provedene na prethodno opisanih trideset modela, definirani su najnepovoljniji modeli čiji parametri uzrokuju najveću dubinu vodnog filma (slike 11. i 12.):

- za cestu to je model s grubom teksturom površine kolnika, s poprečnim nagibom kolnika 3 %, uzdužnim nagibom 0,5 %, potezom vitoperenja duljine 45 m i kolnikom širine 14 m.



Slika 11. Dubina vodnog filma na kolniku ceste (računalni program PSRM)

- za autocestu to je model s grubom teksturom površine kolnika, s poprečnim nagibom kolnika 3 %, uzdužnim nagibom 0,2 %, potezom vitoperenja duljine 140 m i kolnikom širine 10 m (za odvijanje prometa u jednom smjeru).



Slika 12. Dubina vodnog filma na kolniku autoceste (računalni program PSRM)

#### 4. Tehnička rješenja i preporuke za prevenciju pojave akvaplaninga

Iako još nije razvijena jednadžba za precizno izračunavanje brzine vožnje pri kojoj dolazi do akvaplaninga, empirijske studije su otkrile da vozači gube kontrolu nad vozilom zbog akumulacije vode na dijelu kolnika minimalne duljine 9 metara pri brzinama većim od 85 km/h kada je dubina vodnog filma minimalno 2,5 mm. Posljednjih nekoliko godina na ovu temu je u Njemačkoj izrađen čitav niz studija [1, 2, 10]. Studije su usmjerene na klimatske promjene te na povećanje broja prometnih nesreća za vrijeme kišnih oborina. Odabrana su tri tipa tehničkih rješenja koja se primjenjuju na brojnim lokacijama.

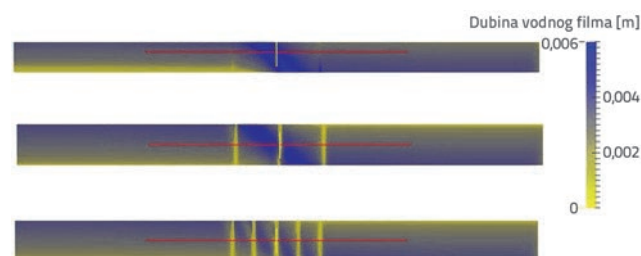


Slika 13. Primjeri poprečnih kanalicama izvedenih na autocesti u Njemačkoj

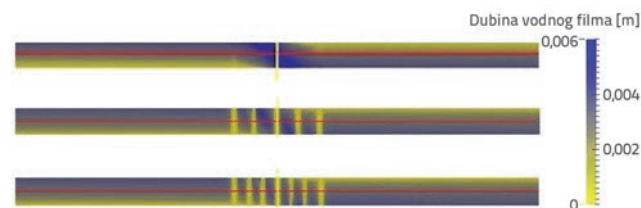
#### 4.1. Poprečne kanalice

U njemačkoj pokrajini Brandenburg, na dijelu autoceste A10 južno od Berlina, nalazi se vrlo opasna dionica s betonskim kolnikom. Izgrađena je u godinama neposredno nakon ujedinjenja Njemačke. Iako su pri projektiranju u obzir uzeti vremenski uvjeti koji podrazumijevaju intenzivne kiše, predloženi poprečni nagib kolnika nije dostatan s aspekta otjecanja vode s kolnika zbog čega dolazi do pojave akvaplaninga i velikog broja prometnih nesreća. Jedina adekvatna metoda koja se mogla primijeniti na ovoj dionici uključivala je ugradnju poprečnih betonskih kanalicama s čeličnim rešetkama. Kanalice su izvedene preko čitave širine kolnika, što je u slučaju autoceste uključivalo i zaustavni trak (slika 13.). Širina kanalicama iznosila je najmanje 30 cm, a minimalni međusobni razmak iznosio je 5 metara, kao što se vidi na rezultatima simulacije provedene pomoću specijaliziranog računalnog programa PSRM.

Simulacija je provedena na najnepovoljnijim modelima opisanim u prethodnom poglavlju. Na dionici ceste razmatrana je ugradnja 3 odnosno 5 poprečnih kanalicama, a na dionici autoceste 5 odnosno 7 poprečnih kanalicama (slike 14. i 15.).



Slika 14. Simulacija utjecaja poprečnih kanalicama na dionici ceste (računalni program PSRM)



Slika 15. Simulacija utjecaja poprečnih kanalicama na dionici autoceste (računalni program PSRM)

#### 4.2. Dijagonalni nagib kolnika

Relevantne studije pokazuju da su najopasnije zone, odnosno zone najosjetljivije na pojavu akvaplaninga, područja gdje je poprečni nagib kolnika približno jednak nuli, tj. područja prijelaznih krivina između dvije uzastopne protusmjerne horizontalne krivine. Kako bi se izbjegao nepovoljni poprečni nagib kolnika, razvijene države poput

Njemačke, Austrije i Švicarske primjenjuju tehničko rješenje koje uključuje oblikovanje dijagonalnog nagiba kolnika na području intenziviranja vitoperenja (slika 16.). Drugim riječima, u točki u kojoj je prethodno vrijednost poprečnog nagiba ceste bila jednaka nuli izvodi se dvostrešni poprečni nagib kolnika čija vrijednost iznosi 2,5 %.

Ova metoda se spominje u njemačkim smjericama RAS-L (FGSV 1995) i RAA (FGSV 2008), ali je samo prikazan izraz za izračunavanje duljine dijagonalnog nagiba kolnika s obzirom na širinu kolnika i projektnu brzinu:

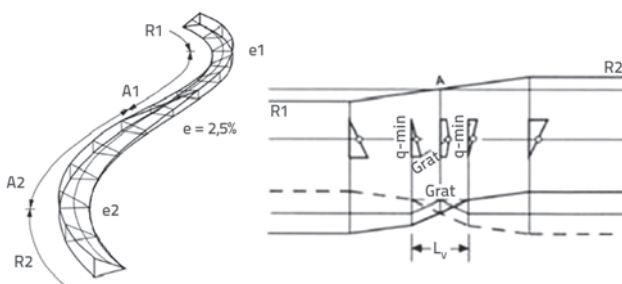
$$L_v = 0,1 \cdot B \cdot V_p \quad (2)$$

gdje je:

$L_v$  - duljina dijagonalnog nagiba kolnika [m]

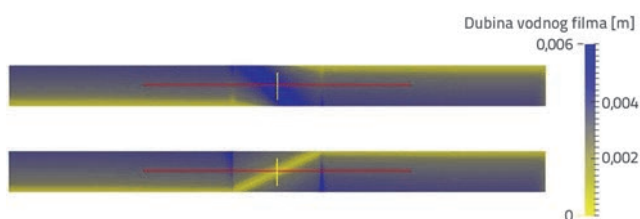
$B$  - širina kolnika [m]

$V_p$  - projektna brzina [km/h].

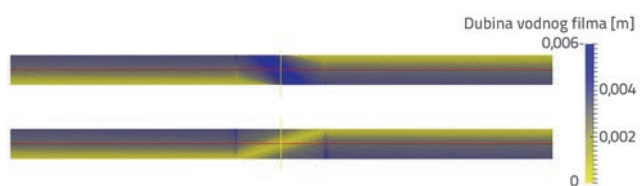


Slika 16. Primjer primjene dijagonalnog nagiba kolnika [13]

Najnepovoljniji modeli prikazani u prethodnom poglavlju uzeti su u razmatranje te je napravljena simulacija (slike 17. i 18.). Znatne poteškoće koje se javljaju prilikom izvedbe projektiranog rješenja glavni su nedostatak ovog tehničkog rješenja. Međutim, s aspekta smanjenja dubine filma vode postižu se vrlo dobri rezultati, kao što prikazuju slike 17. i 18.



Slika 17. Simulacija utjecaja dijagonalnog nagiba kolnika na dionici ceste (računalni program PSRM)



Slika 18. Simulacija utjecaja dijagonalnog nagiba kolnika na dionici autoceste (računalni program PSRM)

### 4.3. Brazdanje vozne površine kolnika - žlijebljenje

Jedna od mjera koja se primjenjuje radi postizanja bržega otjecanja vode s kolnika je žlijebljenje površine kolnika pomoću posebnog uređaja s dijamantnim reznim diskovima. Tim se uređajem na površini betonskog kolnika urezuju tanki uzdužni ili poprečni žljebovi, kao što je prikazano na slici 19. Dimenzije žljebova se određuju izrazom:

$$V_c = B_c \cdot T_c \cdot \frac{1000}{S_c + B_c} \quad (3)$$

gdje je:

$V_c$  - volumen žljebova [mm<sup>3</sup>/m]

$B_c$  - širina žlijeba [mm]

$T_c$  - dubina žlijeba [mm]

$S_c$  - razmak između žljebova [mm].

Kako bi se smanjili mogući negativni utjecaji na motociklistički promet, u njemačkim se smjericama za uzdužne žljebove preporučuje maksimalna širina žlijeba u rasponu od 2,4 mm do 2,6 mm. Maksimalna širina poprečnih žljebova treba biti u rasponu od 6 mm do 10 mm. Minimalna dubine žlijebjenja još uvijek nije propisana, ali preporučena dubina iznosi 3 mm. Maksimalna dubina žlijebjenja iznosi približno 5 mm zbog toga što bi dublje žlijebljenje dovelo do znatnog povećanja troškova izvedbe.



Slika 19. Žlijebljenje površine kolnika

Žlijebljenje površine kolnika znatno pridonosi smanjenju dubine vodnog filma. Međutim, korisnost žljebova se smanjuje tijekom zimskog razdoblja zbog pojave ciklusa smrzavanja i odmrazavanja. Ova metoda se stoga može razmatrati samo kao privremeno rješenje i prema mišljenju autora praktičnija je za betonske kolnike.

### 5. Zaključak

Na temelju studija koje su uključivale računalne simulacije te studija slučaja u kojima je prikazano nekoliko nedavno implementiranih tehničkih rješenja u Njemačkoj, u radu je pokazana važnost kvalitete izvedbe habajućeg sloja kolničke konstrukcije, njen utjecaj na sigurnost odvijanja prometa te korelacija između geometrijskih karakteristika elemenata ceste i pojave akvaplaninga.

Što se tiče studija o pojavi akvaplaninga, potrebno je napomenuti da prisutnost vode na kolniku ima važnu ulogu u povećanju

rizika od nastanka prometnih nesreća, na koji također utječu i horizontalni i vertikalni elementi ceste te karakteristike površine kolnika.

S obzirom na sve češću pojavu jakih kiša u proteklih nekoliko godina i na povećanje njihovog intenziteta, može se očekivati da će se takav trend nastaviti te da će količina i intenzitet oborina još više rasti. Situaciju dodatno pogoršavaju alarmantni statistički podaci o prometnim nesrećama uzrokovanim gubitkom kontrole nad vozilom za vrijeme kišnih oborina. Zbog toga se postojeće stanje cestovne infrastrukture treba poboljšati na način da se pri projektiranju u obzir uzmu nedavne klimatske promjene.

U vezi s time predlaže se izbjegavanje parametara ceste istovjetnih onima prikazanim u trećem poglavlju (s grubom teksturom površine kolnika, poprečnim nagibom kolnika 3 % te s uzdužnim nagibom 0,5 % za ceste i 0,2 % za autoceste). Rezultati simulacija provedenih pomoću računalnog programa PSRM pokazuju da ti parametri uzrokuju pojave vodnog filma dubine do 6 mm, što podrazumijeva vrlo visok rizik nastanka akvaplaninga.

U radu je također prikazan čitav niz odgovarajućih tehničkih rješenja za navedenu problematiku koja se već primjenjuju u pojedinim dijelovima Njemačke i Austrije. Također su analizirane najnepovoljnije situacije prema rumunjskoj normi STAS 863-85

vezane uz vremenske uvjete opisane u normi STAS 9470-73.

Primjenom poprečnih kanalisa smanjuje se dubina vodnog filma sa 6 mm na 4 mm pa čak i na 2 mm, čime se znatno smanjuje rizik od pojave akvaplaninga. Isti se rezultat postiže primjenom dijagonalnog nagiba ceste kojim se eliminira poprečni nagib ceste čija je vrijednost približno jednak nuli na dijelu ceste između prijelaznih krivina dviju uzastopnih protusmjernih horizontalnih krivina. U praksi se dobri rezultati postižu primjenom obiju metoda. Glavni je nedostatak tih metoda u tome što je za njihovu izvedbu potrebna posebna mehanizacija i kvalificirana radna snaga.

U radu je prikazana i metoda žlijebljenja površine kolnika. Žljebovi omogućuju odvodnju vode, ovisno o potrebi, u uzdužnom i poprečnom smjeru. U Rumunjskoj se ta metoda može razmatrati samo kao privremeno rješenje zbog nepovoljnih klimatskih uvjeta. Međutim, može se primjenjivati u područjima s velikom vjerojatnošću pojave akvaplaninga.

## Zahvala

Autori zahvaljuju Institutu za ceste i promet Sveučilišta u Stuttgartu što im je ustupio svoja istraživanja i računalni program jer su temelj ovog istraživanja.

## REFERENCES

- [1] Ressel, W., Herrmann, S.R.: Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen: Berechnung der Wasserfilmdicke. Nr. 997 in Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Wirtschaftsverl. NW, Verlag fuer NeueWissenschaft, Bremerhaven, 2008.
- [2] Herrmann, R.S.: Simulationsmodell zum wasserabfluss- und aquaplaning-verhalten auf fahrbahnoberflächen, PhD Thesis, Stuttgart University, 2008.
- [3] Pieper, K.: Regenabfluss von Straßenflächen. Dissertation, Technische Hochschule Dresden, Dresden, 1938.
- [4] Ross, N.F., Russam, K.: The depth of rain water on road surfaces. RRL Report LR 236, 1968.
- [5] Höcker, A.: Die Oberflächenentwässerung von Fahrbahnen und ihre Bedeutung für den Strassenentwurf. Nr. 118 in Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für NeueWissenschaft, Bonn, 1971.
- [6] Tudose, T.: Genetic characteristics and spatial-temporal manifestations of heavy rainfall and maximum yearly intensity in the north-western part of Romania, Phd Thesis, Cluj Napoca, Romania, 2013.
- [7] Cheva, I.S., Breza, T., Baci, M., Dumitrescu, A.: Characteristics of extreme atmospheric rainfall in Romania based on intensity-duration-frequency curves, Scientific communications session, National Meteorological Administration, Bucharest, 8-9 November, 2012.
- [8] <http://www.natgeo.ro/dezbateri-globale/mediu/9632-fenomene-extreme-din-romania>, accessed at 14.12.2015.
- [9] STAS 863-85: Geometrical elements of paths. Design prescriptions, 1985.
- [10] Wolff, A.: Simulation of Pavement Surface Runoff using the Depth-Averaged Shallow Water Equations, PhD Thesis at Stuttgart University, 2013.
- [11] DIN 13473-1: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen -Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe. Deutsches Institut für Normung, 2004.
- [12] Burlacu, F.A.: The influence of road characteristics on road safety, PhD Thesis at Technical University of Civil Engineering Bucharest, 2014.
- [13] Technische Universität Dresden, Universität Stuttgart: Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen für zur Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen, Zwischenbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Dresden, 2013.