

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,  
Prometnotehnična smer

Kandidat:

**Primož Bračič**

# **Voda na vozišču in prometna varnost**

**Diplomska naloga št.: 275**

**Mentor:**  
doc. dr. Alojzij Juvanc

Ljubljana, 26. 4. 2007

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani **PRIMOŽ BRAČIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
**»VODA NA VOZIŠČU IN PROMETNA VARNOST«.**

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 25.3.07

## **IZJAVA O PREGLEDU NALOGE**

Nalogo so si ugedali učitelji prometne smeri:

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 556.12:625.7:656.1.08  
**Avtor:** Primož Bračič  
**Mentor:** prof.dr. Alojz Juvanc  
**Naslov:** Voda na vozišču in prometna varnost  
**Obseg in oprema:** 67 str., 11 pregl., 23 sl., 26en.  
**Ključne besede:** akvaplaning, polje zastajajoče vode, povratna voda, debelina vodnega filma, prometna varnost

### **Izvleček**

Diplomsko delo obravnava pojav akvaplaninga in z njim povezano prometno varnost oziroma nevarnost. V uvodnih poglavjih so predstavljene oblike akvaplaninga oziroma hidroplaninga ter vzroki za nastanek le – tega. Vzrokov za nastanek vodnega filma na cestišču je veliko, ni pa vsaka debelina kritična. Do nesreč prihaja pri velikih debelinah filma in hitrostih vozil. Pojavu akvaplaninga se lahko v veliki meri izognemo že v fazi projektiranja, če nam to zaradi estetskih in voznodinamičnih vzrokov ne uspe 100% obstajajo tudi gradbenotehnični ukrepi s katerimi dosežemo, da voda ne ostaja na vozišču. V diplomu so opisane te metode izmed katerih se nekatere že uspešno uporabljajo v praksi, nekatere pa je potrebno še izpopolniti. Del naloge je posvečen načinom odtoka vode iz cestišča, ter metodam in parametrom za analizo in izračun odtoka vode iz vozne površine. V zadnjem delu raziskave, sta opisana najbolj pogosta vzroka akvaplaninga, in sicer polje zastajajoče vode in območje povratne vode. Ta dva pojava sem obravnaval v povezavi s širino vozišča. Ugotoviti sem skušal katere širine vozišča so nevarne za hidroplaning pri različnih nagibih cestišča in hitrostih vozil.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

**UDC:** 556.12:625.7:656.1.08  
**Author:** Primož Bračič  
**Supervisor:** prof. dr. Alojz Juvanc  
**Title:** Water stagnation on carriageway and traffic safety  
**Notes:** 67 p., 11 tab., 23 fig., 26 eq.  
**Key words:** hydroplaning, water stagnation, area of periodic water, water depth, traffic safety

### **Abstract**

My diploma paper deals with the phenomena of aquaplaning and its connection with safety in traffic. In preface I introduce the forms of aquaplaning or hydroplaning and reasons for it. There are many reasons for the beginning of water layering on the road, but not every quantity is critical. Accidents happen when the layers are thick and the driving speed is too high. We can avoid this phenomena in the planning phase, but if it is not possible, because of the aesthetic reasons or the dynamic of driving, there are constructional measurements with which we achieve that the water does not stay on the road. In my paper I also talk about methods from which some are already being used, while others still need improvement. Part of my work is dedicated to the ways of draining water from the road and the methods and parameters for analysing and calculating the quantity of drained water from the road. In the last part of my research I describe the most common reasons for aquaplaning, which are the field of stagnated water and the area of periodic water. I dealt with those two reasons in connection with the road width. I was trying to find out which width of roads are dangerous for the phenomena of hydroplaning in different road inclines and various car speeds.

## **ZAHVALA**

Ob zaključku diplomske naloge bi se rad zahvalil mami in očetu, ki sta ves čas mojega študija verjela vame, me bodrila in omogočila, da sem študij končal. Dragi oče iskreno mi je žal, da nisi dočakal tega trenutka, ker vem kako vesel in ponosen bi bil. Hvala, da sta mi omogočila izobrazbo, čeprav vama tega kar sta zame storila žal ne bom mogel nikoli povrniti.

Hvala tudi Urški, ki mi je ves ta čas stala ob strani.

Posebna zahvala gre tudi mojemu mentorju gospodu Alojzu Juvancu, ki mi je zaupal, mi pomagal, ter mi v težkih trenutkih dal dovolj časa, da sem si ponovno zbral misli.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>AKVAPLANING</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Splošno o pojavu akvaplaninga</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Oblike akvaplaninga</b>	<b>4</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Dinamični akvaplaning</b>	<b>4</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Viskozni akvaplaning</b>	<b>6</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Akvaplaning pri devulkanizaciji pnevmatike</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>PADAVINE</b>	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>Vrste padavin</b>	<b>7</b>
<b>3.2</b>	<b>Obdelava podatkov</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>VPLIVI NA DEBELINO VODNEGA FILMA</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>Intenziteta padavin</b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b>Rezultirajoči nagib trajektorije odtoka vode</b>	<b>11</b>
<b>4.3</b>	<b>Hrapavost površine vozišča</b>	<b>12</b>
<b>4.4</b>	<b>Dolžina trajektorije odtoka vode</b>	<b>13</b>
<b>4.5</b>	<b>Veter</b>	<b>14</b>
<b>4.6</b>	<b>Neravnine</b>	<b>14</b>
<b>4.7</b>	<b>Talne označbe</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>NAČINI ODTOKA VODE IZ CESTIŠČA</b>	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>METODE IN PARAMETRI ZA ANALIZO IN IZRAČUN ODTOKA VODE IZ VOZIŠČA</b>	<b>17</b>
<b>6.1</b>	<b>Sintetični hidrogram odtoka v trikotni obliki</b>	<b>19</b>
<b>6.2</b>	<b>Racionalna metoda</b>	<b>26</b>
<b>6.3</b>	<b>Modificirana racionalna metoda</b>	<b>27</b>
<b>6.4</b>	<b>Računalniški izračuni</b>	<b>29</b>
<b>6.4.1</b>	<b>Canalis</b>	<b>30</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Hydra</b>	<b>32</b>



<b>7</b>	<b>PROMETNA VARNOST</b>	<b>34</b>
<b>7.1</b>	<b>Teoretične osnove trenja</b>	<b>35</b>
<b>7.2</b>	<b>Vpliv zgradbe cestišča na koeficient trenja</b>	<b>38</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Stanje pnevmatik</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>OBMOČJE ZASTAJAJOČE VODE</b>	<b>41</b>
<b>8.1</b>	<b>Vozišče izven območja vijačenja (<math>q \geq q_{\min}</math>)</b>	<b>41</b>
<b>8.2</b>	<b>Vijačenje pri zelo majhnih nagibih nivelete</b>	<b>41</b>
<b>8.3</b>	<b>Vijačenje pri velikih nagibih nivelete</b>	<b>42</b>
<b>8.4</b>	<b>Mehanizem gibanja polja zastajajoče vode</b>	<b>42</b>
<b>9</b>	<b>OBMOČJE POVRATNE VODE</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>PREPREČITEV AKVAPLANINGA</b>	<b>47</b>
<b>10.1</b>	<b>Konstruktivske zahteve</b>	<b>47</b>
<b>10.1.1</b>	<b>Prečni nagibi</b>	<b>48</b>
<b>10.1.1.1</b>	<b>Minimalni prečni nagib</b>	<b>48</b>
<b>10.1.1.2</b>	<b>Maksimalni prečni nagib</b>	<b>48</b>
<b>10.1.2</b>	<b>Vzdolžni nagibi</b>	<b>49</b>
<b>10.1.2.1</b>	<b>Minimalni vzdolžni nagib</b>	<b>49</b>
<b>10.1.2.2</b>	<b>Maksimalni vzdolžni nagib</b>	<b>50</b>
<b>10.1.3</b>	<b>Rezultirajoči nagibi</b>	<b>50</b>
<b>10.1.4</b>	<b>Pomik osi vijačenja</b>	<b>51</b>
<b>10.2</b>	<b>Gradbeno tehnični ukrepi</b>	<b>51</b>
<b>10.2.1</b>	<b>Žlebičenje cestišča</b>	<b>52</b>
<b>10.2.2</b>	<b>Obrabna plast drenažnega asfalta brez dodatnega dreniranja podlage</b>	<b>55</b>
<b>10.2.3</b>	<b>Obrabna plast drenažnega asfalta in drenirana podlaga</b>	<b>56</b>
<b>11</b>	<b>ODVISNOST AKVAPLANINGA OD ŠIRINE VOZIŠČA</b>	<b>60</b>
<b>11.1</b>	<b>Osnovni parametri, ki vplivajo na debelino vodnega filma</b>	<b>60</b>
<b>11.2</b>	<b>Vrednosti parametrov v Slovenskem prostoru</b>	<b>60</b>
<b>11.3</b>	<b>Tipski prečni profili na Slovenskih cestah</b>	<b>61</b>
<b>11.4</b>	<b>Vzdolžni nagibi pri različnih širinah cestišča, ki zadostujejo za umik polja zastajajoče vode iz cestišča</b>	<b>62</b>

<b>12</b>	<b>ZAKLJUČKI</b>	<b>65</b>
<b>VIRI</b>		<b>66</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Debelina vodnega filma v odvisnosti od hrapavosti
- Preglednica 2: Lastnosti območja v odvisnosti od njegove oblike
- Preglednica 3: Merodajna jakost naliva za različne kategorije cest
- Preglednica 4: Vrednosti koeficienta odtoka ( $K_o$ ) v odvisnosti od vrste površine
- Preglednica 5: Vrednosti koeficientov za različne nepropustne površine prispevnega območja
- Preglednica 6: Nivoji porazdelitve strukture cestne površine po ISO 13473-1
- Preglednica 7: Območja uporabe različnih gradbenotehničnih ukrepov
- Preglednica 8: Kritični prečni nagibi in pripadajoča krit. dolžina območja vijačnega prehoda
- Preglednica 9: Merodajna jakost naliva za določene vrste cest
- Preglednica 10: Tipski prečni profili (vir: 39 člen Pravilnika o projektiranju cest)
- Preglednica 11: Zadostni vzdolžni nagibi za različne širine cest pri katerih se polje zastajajoče vode pomakne iz vozišča

## KAZALO SLIK

Slika 1: Nabiranje vode pred kolesi pri večanju hitrosti in zmanjševanju kontakta z vozišče

Slika 2: Koncept treh območij

Slika 3: Višina padavin v ekstremnih nalivih s povratnimi dobami 2,10 in 50 let

Slika 4: Spreminjanje debeline vodnega filma z intenzivnostjo padavin

Slika 5: Spreminjanje debeline vodnega filma z rezultirajočim nagibom

Slika 6: Vpliv teksture površine na debelino vodnega filma

Slika 7: Vliv dolžine vodnega odtoka na debelino vodnega filma

Slika 8: Osnovna primera odtoka vode na vijačenih voziščih

Slika 9: Razdelitev debelin vodnih filmov na območju vijačenja okoli osi pri različnih niveletah pri prehodu iz desne v levo krivino.

Slika 10: Oblike prispevnega območja (listnati, podolgovati, trikotni, pravokotni)

Slika 11: Osnovni koncept odvodnjavanja izven mestnih cest v vkopu in nasipu

Slika 12: Diagram vpijanja za razna tla

Slika 13: Primer izpisa podatkov pri računalniškem programu Hydra

Slika 14: Primer spreminjanja koeficienta trenja ob dežju

Slika 15: Teoretična določitev koef. trenja

Slika 16: Obremenitev na deformabilno kolo pri kotaljenju po togi podlagi

Slika 17: Faktorji, ki vplivajo na velikost koeficienta trenja

Slika 18: Vijačenje okoli desnega roba

Slika 19: Vijačenje okoli osi

Slika 20: Vijačenje okoli levega roba

Slika 21: Vrezovanje žlebičev v površino vozišča

Slika 22: Detajl žlebičenja na vozišču

Slika 23: Detajl izvedbe drenažnega asfalta z ALU-profilu

## 1 UVOD

Voda na vozišču in prometna varnost sta usodno povezani. Voda na vozišču se lahko pojavi kot polje zastajajoče vode ali pa pride do povratne vode. Kaj storiti, da do tega ne bo prihajalo oziroma kaj storiti, če do tega že pride? V kolikšni meri je ogrožena prometna varnost? To so vprašanja, ki si jih mora postaviti vsak projektant, preden se loti projektiranja ceste oziroma vozišča.

V tej nalogi bom skušal obdelati najpomembnejše dejavnike in rešitve povezane s hidroplaningom oziroma akvaplaningom. Opisal bom konstrukcijske rešitve pri projektiranju, da se izognemo akvaplaningu že v fazi načrtovanja ter gradbeno tehnične metode za rešitev tega problema. V fazi konstruiranja so pomembni pravilno izbrani prečni in vzdolžni nagibi ter predvsem rezultirajoči nagibi, ki so najpomembnejši v odnosu do akvaplaninga. Ukvarjal se bom tudi z vplivi, ki v večji ali manjši meri vplivajo na debelino vodnega filma, ki je glavni razlog za nastanek akvaplaninga. Na debelino vplivajo dolžina odtoka vode (dolžina trajektorije), intenziteta padavin, hrapavost podlage, veter, neravnine in tudi talne označbe, saj predstavljajo umetno nanešeno oviro na cestišče. Problem akvaplaninga nastane tudi pri preobremenitvah voziščnih konstrukcij, ki nastanejo zaradi delovanja prometne obtežbe. Debelina vodnega filma je lahko za prehitrega voznika usodna, saj pri velikih hitrostih pnevmatika nima časa prebiti vodnega filma zato v takšnih primerih nastane pod celotno naležno površino pnevmatike plast vode, ki pnevmatiko popolnoma ločuje od vozne površine. Zaradi tega pojava je le vprašanje časa kdaj bo voznik izgubil oblast nad vozilom ter s tem ogrozil sebe ter druge udeležence v prometu. Del naloge sem zato posvetil tudi prometni varnosti, posebno vplivu hitrosti voznika v povezavi z nepričakovano oviro na cestišču, kakor lahko akvaplaning tudi imenujemo.

Za projektanta je najpomembnejše, da vodo čim hitreje odvede iz vozišča v naprave za odvodnjavanje. To pomeni, da bo debelina vodnega filma najmanjša. Eno od poglavij je zato namenjeno tudi odtoku vode iz cestišča.

V nalogi se bom ukvarjal tudi z odvisnostjo akvaplaninga od širine vozišča, oziroma stopnjo nevarnosti pri posamezni širini. Ugotoviti bom skušal, katere širine vozišča so nevarne za akvaplaning pri različnih nagibih in pri katerih hitrostih.

## 2 AKVAPLANING

### 2.1 Splošno o akvaplaningu

Hidroplaning, oziroma po večini evropskih držav akvaplaning, je eden izmed največjih problemov, povezan s prometno varnostjo. Do hidroplaninga pride, kadar imamo povečano debelino vodnega filma na cestišču. Na mokrih vozni površinah se z naraščajočo hitrostjo vožnje trenje pnevmatike zmanjšuje. Vzrok za zmanjševanje trenja sta viskoznost in gostota vode, ki ovirata izrinjanje vode z naležne površine pnevmatike na vozni površini ter količina vode, ki jo je potrebno odstraniti z naležne površine v določeni enoti časa. Problem je najbolj izrazit, kadar je hitrost vozila prevelika, teža pa premajhna, debelina vodnega filma na vozni površini pa velika. Takrat lahko nastane pod celotno naležno površino pnevmatike plast vode, ki pnevmatiko popolnoma ločuje od vozne površine. Vsak element naležne površine pnevmatike, ki pride v območje naleganja na vozno površino, potrebuje določen čas, da prebije film vode in da prepotuje celotno področje naleganja. Čas potreben za prebitje filma ni odvisen od hitrosti, pač pa od oblike pnevmatike, debeline in viskoznosti vmesnega vodnega filma vode ter hrapavosti vozne površine. Ker pa je čas potovanja v območju naleganja obratno sorazmeren hitrosti vožnje, je lahko krajši od časa potrebnega za prebitje vodnega filma. V takšnem primeru ostane na celotni naležni površini pnevmatike film vode neprekinjen in tako nastane hidroplaning.

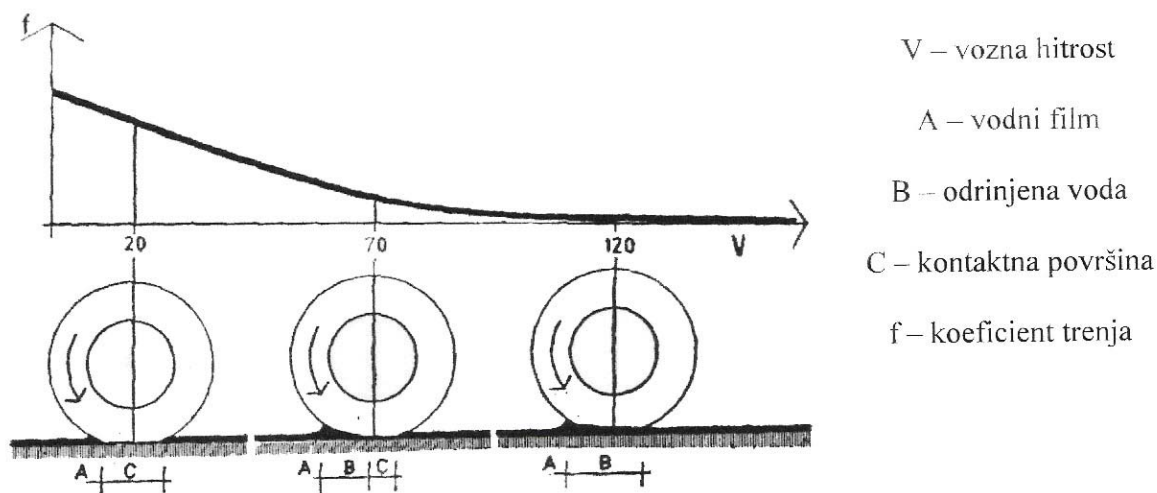
Posledica hidroplaninga je, da ni mogoče prenašati s pnevmatike na vozno površino nikakršnih drugih sil, razen sile teže vozila, niti momentov. Ker je še tako majhen zavorni moment večji od pogonskega momenta, je posledica nastalega stanja in zaviranja praktično takojšnje blokiranje koles vozila. Razen sile trenja vode med naležno površino pnevmatike in vozno površino, ne obstaja nobena druga. Ta pa je izredno majhna in podobna sili trenja na mokrem ledu. Voznik slej ko prej izgubi oblast nad vozilom.

## 2.2 Oblike akvaplaninga

Za kakšno obliko akvaplaninga gre, je v največji meri odvisno od debeline vodnega filma na vozišču.

### 2.2.1 Dinamični akvaplaning

Spodnja slika prikazuje vpliv debeline vodnega filma in hitrosti vožnje na spremembo koeficienta trenja, ki ponazarja dinamični akvaplaning. Takšen primer je najpogostejši pri večjih debelinah vodnega filma, od 10mm in več.



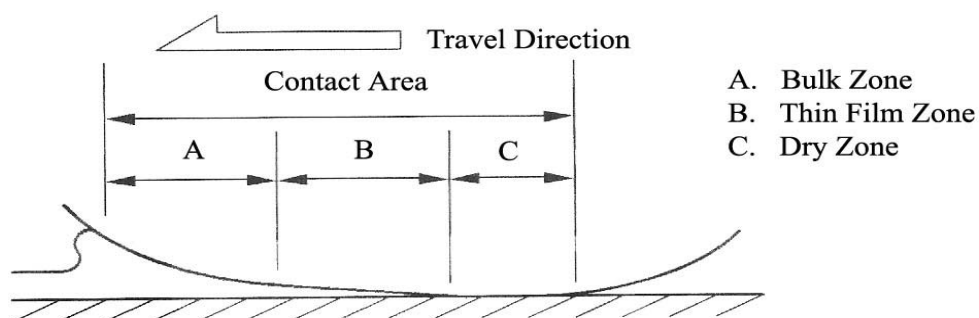
Slika 1: Nabiranje vode pred kolesi pri večanju hitrosti in zmanjševanju kontakta z voziščem

Slika prikazuje pnevmatike pri različnih hitrostih na mokrem vozišču pri čemer je predpostavljeno, da je hitrost manjša od kritične hitrosti, ki povzroči efekt akvaplaninga. Pri tem lahko kontaktno površino razdelimo na tri dele:

Del A - vodni film, katerega že samo ime pove, da je obkrožen z vodnim filmom, ki ne dopušča, da bi se skozi prenašala sila trenja. Dinamični pritisk, ki nastane ob trku med vodo in kolesom povzroča dvigovanje le-tega. V coni B se sile trenja v določeni meri prenašajo skozi prekinjeni vodni sloj, cona C pa prikazuje suho območje, v katerem se sila trenja lahko aktivira. Kadar vozilo vozi z nizko hitrostjo, nimamo vodnega filma med kolesom in cesto, ko pa vozilo povečuje hitrost, se povečuje dinamični pritisk, ki povzroča dvigovanje kolesa, in



takrat območje A postaja dominantno. Ko pa kolo popolnoma izgubi stik s cestiščem cona C izgine. Pravimo, da takrat vozilo zaplava na vodnem filmu. V tem primeru je kritična hitrost manjša od dejanske hitrosti.



Slika 2: Koncept treh območij

Kritična hitrost, pri kateri vozilo zaplava na površini, je odvisna od inflacijskega pritiska v pnevmatiki, merjenega v barih in je podana z izrazom:

$$V_{krit} = 60,8 * p^{1/2}$$

Do kritične hitrosti pa lahko pridemo tudi na osnovi hidrodinamičnega pritiska, glede na to, da akvaplaning nastane takrat, ko se hidrodinamični pritisk izenači s pritiskom pnevmatike. Pri tem izračunu upoštevamo gostoto vode, hitrost pri akvaplaningu, kontaktno površino pnevmatike in koeficient dvigovanja. Na osnovi teh podatkov s preračunavanjem dobimo izraz za kritično hitrost:

$$V_{kr} = 62,8 p^{1/2}$$

Pri tem izračunu zanemarimo globino voznega sloja pnevmatike, debelino vodnega filma in strukturo vozišča, ki pa na akvaplaning zagotvo vplivajo.

### **2.2.2 Viskozni akvaplaning**

Velja za vodne filme majhne debeline, okrog enega milimetra ali manj. Pri preučevanju tega pojava se zanemari dinamični pritisk in se akvaplaning razlaga izključno zaradi viskoznosti vode. Za analiziranje tega pojava nujno potrebujemo nekatere aproksimacije. Kontaktno površino pnevmatike med vožnjo zamenjamo z fiksno elipsasto ploščo, ki nalega na vozišče, ki je prekrito z viskozno tekočino. Na ta način lahko definiramo čas naleganja v odvisnosti od pritiska pnevmatike, dinamične viskoznosti vode in oblike kontaktne površine.

V realnih pogojih sile trenja prej prodrejo skozi tanek vodni film. V tem primeru je od hitrosti vozila odvisno, ali bo dovolj časa za nastanek suhega kontakta ali pa bo guma začela drseti po mikroskopsko tankem vodnem sloju. Takšen akvaplaning je značilen za vlažna cestišča in lahko nastane pri kakršni koli hitrosti.

### **2.2.3 Akvaplaning pri devulkanizaciji pnevmatike**

Ta pojav nastaja največkrat na letalskih pistah, redko pa tudi pri izvenmestnih cestah. Zaradi trenja prihaja do segrevanja na površini stika med pnevmatiko in z vodo prekritim voziščem. Ko se naležna površina pnevmatike segreje do temperature topljenja, ki je pri okrog 205°C, nastane tanka plast stopljene gume, ki zadržuje vodo v zarezah. Ta voda pa se pretvarja v paro pod pritiskom, ki dviguje kolo od površine vozišča.

### **3.PADAVINE**

#### **3.1 Vrste padavin**

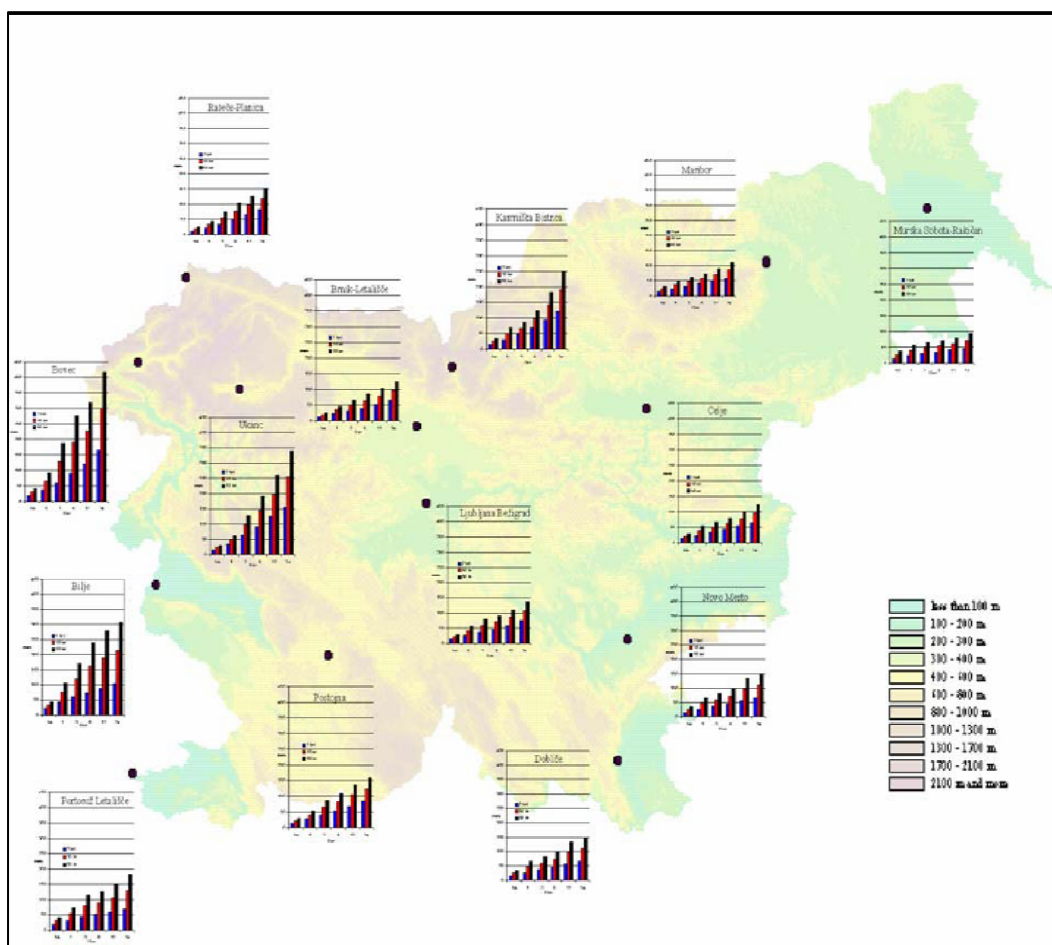
Padavine se delijo glede na agregatno stanje, v katerem se pojavljajo, in glede na način nastanka padavin. Vlažen zrak se ohlaja pod točko rosišča in vodna para se začne kondenzirati v vodne kapljice ter ledene kristale. Iz tega nastanejo oblaki, v katerih nastaja dež, ki pade na zemljo, ko se vodne kapljice povečajo do take velikosti, da zaradi teže padejo na tla. Kadar se vodna para kondenzira pri temperaturah pod 0°C, nastane sneg. Ti dve padavini sta količinsko tudi edini pomembni za hidrologijo.

#### **3.2 Obdelava podatkov**

Najpomembnejši podatki o padavinah so intenziteta, ki jo izražamo v količini padavin na čas (mm/min), čas trajanja v minutah ali urah in pogostost (1/leto) ali povratna doba (leta). Povezave med temi dejavniki statistično obdelujemo in za rezultate dobimo tako imenovane krivulje ITP (I - intenziteta, T - trajanje, P - pogostost). Najpomembnejša ugotovitev povezovanja teh dejavnikov je, da intenziteta padavin pada z naraščajočim časom trajanja in krajšimi povratnimi dobami.

Višina letnih padavin nekega kraja je premo sorazmerna nadmorski višini in obratno sorazmerna oddaljenosti od morja. Pregled letne količine padavin podajajo izohiete, krivulje, ki spajajo mesta z isto višino padavin. Podatke o padavinah izdaja Agencija Republike Slovenije za okolje (knjiga Povratne dobe za ekstremne padavine po Gumbelovi metodi). Ekstremni dogodki kot so ekstremni nalivi, zelo debela snežna odeja, se pojavljajo občasno. Statistično lahko predvidimo, kako pogosto se v povprečju ekstremni dogodek zgodi, z izračunom povratnih dob za ekstremne dogodke. Ta izračun temelji na statistični analizi niza izmerjenih maksimalnih letnih padavin ali višine snežne odeje. Podatki o povratnih dobah za ekstremne padavine so pomembni pri načrtovanju kapacitet odtokov, določanju maksimalnih možnih pretokov pri močnih padavinah, pri načrtovanju obrežnih nasipov, ... Za izračun povratnih dob za ekstremne padavine se uporablja Gumbelova metoda. Kot vhodne podatke se uporabi dolgoletne nize 5-minutnih meritev višine padavin z ombrografi.

Metoda da smiselne rezultate samo takrat, ko so nizi vhodnih podatkov daljši od 10 let. Povratna doba  $T$  nekega dogodka je povprečni interval časa, znotraj katerega je vrednost nekega dogodka dosežena ali presežena enkrat. Tako se na primer za povratno dobo 10 let ustrezna višina padavin pojavi v povprečju enkrat vsakih 10 let. Dogodki se ne pojavijo vsakih 10 let v kronološkem smislu, ampak pričakujemo, da se bo dogodek pojavil 10-krat v 100 letih ali v povprečju vsakih 10 let. V statistiki poznamo več metod za oceno ekstremnih vrednosti količin. Te nam na osnovi krajšega niza podatkov omogočajo oceno ekstremov v daljšem časovnem obdobju. Vse gradijo na predpostavki, da se klimatske razmere glede na obravnavano obdobje ne bodo spremenile in upoštevajo statistike večletnega niza meteoroloških merjenj (aritmetično sredino, oceno variance, letne ekstreme, ...). Gumbelova metoda, ki je ena najpogosteje uporabljenih metod za računanje povratnih dob ekstremnih vrednosti, dopušča neomejeno naraščanje ekstremov, z daljšanjem povratne dobe in daje dobre rezultate predvsem za krajše povratne dobe.

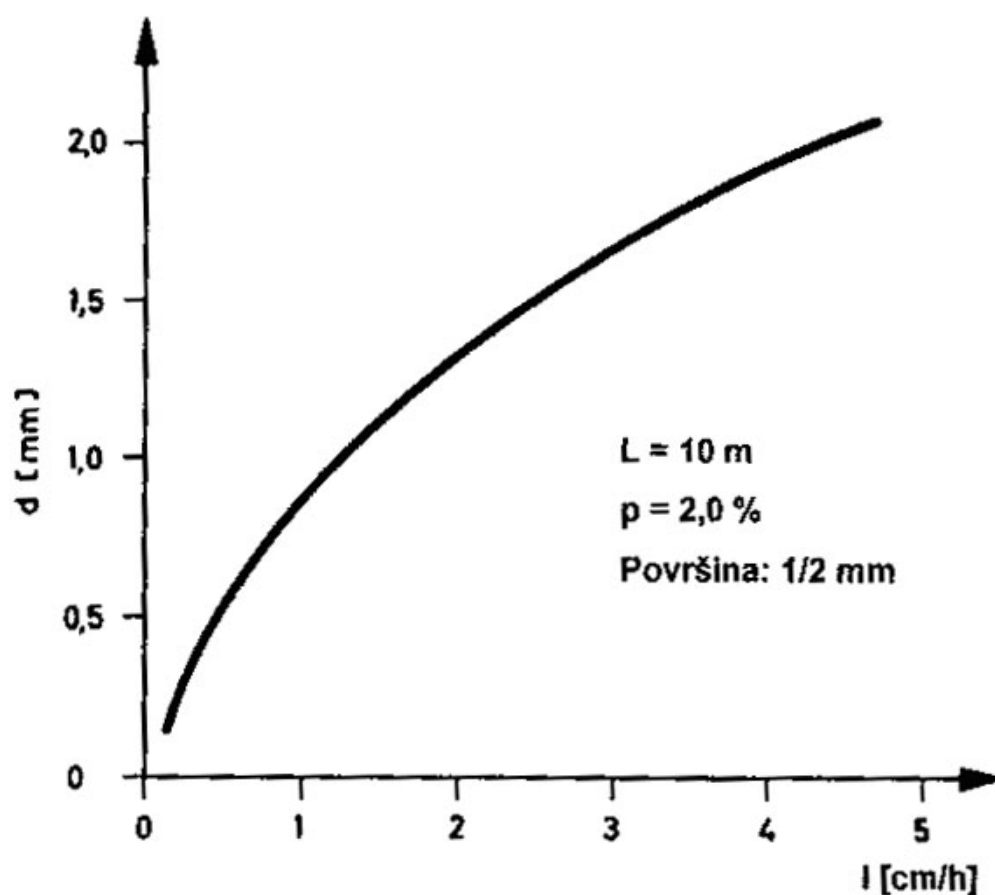


Slika 3: Višina padavin v ekstremnih nalivih s povratnimi dobami 2,10 in 50 let

## 4 VPLIVI NA DEBELINO VODNEGA FILMA

### 4.1 Intenziteta padavin

Povprečna intenziteta padavin je odvisna od klimatskih dejavnikov in se zelo razlikuje glede na geografsko lego določenega kraja. Razlikujejo pa se tudi dopustne meje povprečne intenzivnosti naliva, in sicer glede na stopnjo ogroženosti področja ali določenega objekta. Debelina vodnega filma degresivno raste z večanjem intenzitete padavin.



Slika 4: Spreminjanje debeline vodnega filma z intenzivnostjo padavin

To je faktor, na katerega ne moremo vplivati, lahko pa poskrbimo za ustrezno odvodnjavanje in na ta način preprečimo pojav akvaplaninga. Za dimenzioniranje naprav za odvodnjavanje se uporabljajo s predpisi določene količine, ki izhajajo iz izbranih še sprejemljivih pogojev

voznih razmer na vozišču in so odvisne od povprečne intenzivnosti naliva v izbranem časovnem trajanju (5, 10, 15 ali 20 minut), ki se pojavlja v izbranih časovnih intervalih (povratna doba). V Sloveniji opredelitve za ta dva parametra nimamo. V prejšnji državi je bila povratna doba za odvodnjavanje na cestah določena s standardom JUS U.C4.020 in je za avtoceste veljala 10 let, za ostale ceste pa 5 let.

V sklopu izdelave projekta ceste moramo uporabiti s strani Agencije republike Slovenije za okolje dane podatke o merodajnih nalivih za območje, kjer bo potekala bodoča cesta. Podatki za posamezne meteorološke postaje za območje cele Slovenije so podani v prilogi Tehničnih smernic. Pri izračunu upoštevamo projektirani cesti najbližjo meteorološko postajo z izvrednotenimi padavinami.

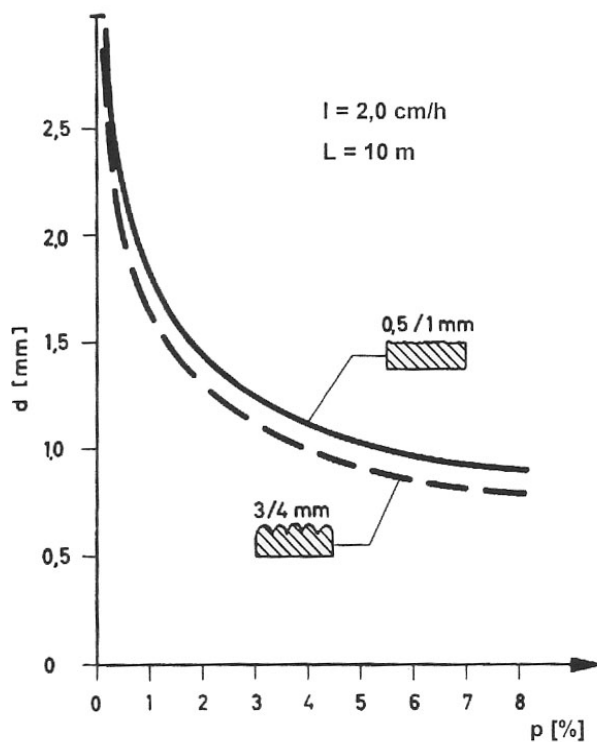
#### SEZNAM POSTAJ

MARIBOR – TABOR	MURSKA SOBOTA – RAKIČAN
BABNO POLJE	NOVA GORICA
BOVEC	NOVELO PRI TEMNICI
BRNIK – LETALIŠČE	NOVI LAZI
CELJE	NOVO MESTO
ČEPOVAN	PLANINA NAD SEVNICO
ČRNIVEC	PODKRAJ
ČRNI VRH NAD POLHOVIM GRADCEM	PODPECA
DOBLIČE (ČRNOMELJ)	POLIČKI VRH
DUH NA OSTREM VRHU	PORTOROŽ – BELI KRIŽ
GORNJI LENART	POSTOJNA
ILIRSKA BISTRICA	RADENCI
JAVORJE NAD POLJANAMI	RAKITNA
JAVORNIŠKI ROVT	RATEČE – PLANICA
JERUZALEM	ROGAŠKA SLATINA
KADRENCI	RUT
KAMNIŠKA BISTRICA	SEVNO

KNEŠKE RAVNE	SLOVENSKE KONJICE
KOČA NAD ŠUMIKOM	STARA FUŽINA
KOČEVJE	ŠMARATA
LESCE	ŠMARTNO PRI SLOVENJ GRADCU
LISCA	UKANC
LJUBLJANA – BEŽIGRAD	VEDRIJAN
MARTINJE	VOGEL
MAŠUN	ZGORNJA ŠČAVNICA
MESTNI VRH PRI PTUJU	ZGORNJE JEZERSKO

#### 4.2 Rezultirajoči nagib trajektorije odtoka vode

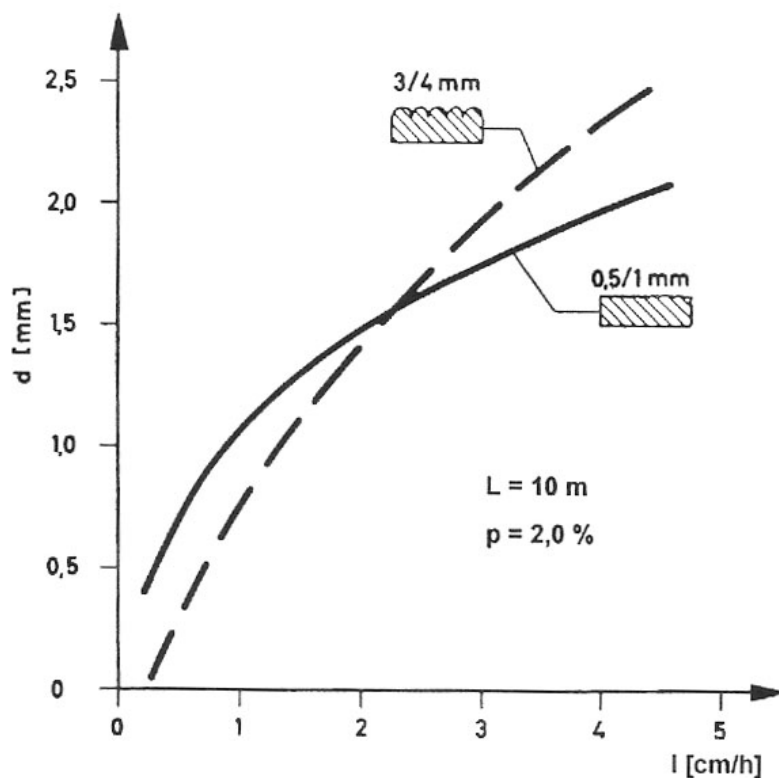
Debelina vodnega filma se degresivno manjša z večjim rezultirajočim nagibom. Večanje nagiba nad 3% samo neznatno zmanjša debelino vodnega filma. Pod nagibom približno 2,0-2,5% pa je učinek večji. Povečanje nagibov (posebno v začetnem območju okrog 0%) vodi k občutnemu zmanjšanju debeline vodnega filma.



Slika 5: Spreminjanje debeline vodnega filma z rezultirajočim nagibom

### 4.3 Hrapavost površine vozišča

Tekstura površine vozišča je lahko bolj zaprta ali bolj odprta. Pri odprtih teksturah so v splošnem debeline manjše kot pri zaprtih. To razmerje se obrne šele pri večjih dolžinah odtokov ali intenzitetah, ki pa so zelo redke.



Slika 6: Vpliv teksture površine na debelino vodnega filma

Sodobne vozne površine imajo praviloma določeno fino in grobo hrapavost. Za fino je značilno prebijanje zadnjega tankega filma vode (ostrina zrn), za grobo hrapavost pa odvod pretežne vode z naležne površine (drenažna sposobnost). Za majhne vozne hitrosti se uporabljajo vozne površine s fino hrapavostjo, za večje hitrosti pa se uporabljajo bolj groba zrna, tako da dobimo grobo hrapavost. Globina praznin na asfaltnih voziščih je med 0,3mm in 0,9mm, pri asfaltnih z mastiksom pa večja od 0,7 mm.

Cementno betonska vozišča imajo manjšo hrapavost, in sicer med 0,2 in 0,4mm pri običajni izvedbi (angl. broomed) ter okoli 1,2mm pri izvedbi z mikrožlebičenjem (angl. grooved).



Razmere pri odtoku po vozišču se glede na hrapavost spreminjajo različno.

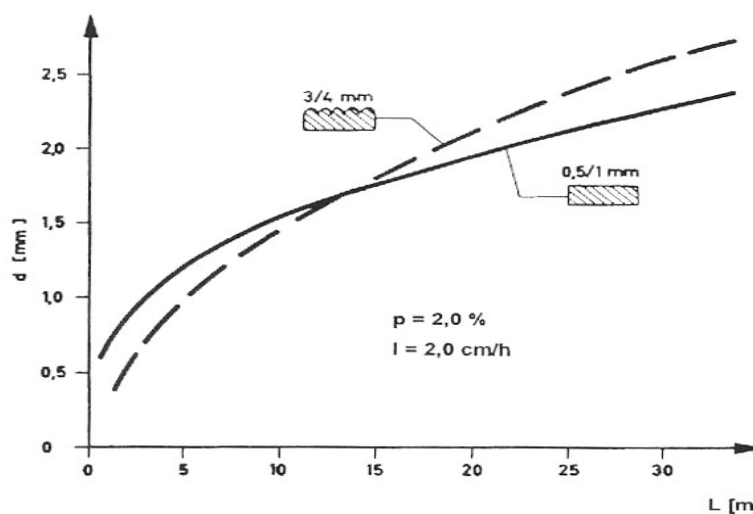
Preglednica 1: Debelina vodnega filma v odvisnosti od hrapavosti

Nagib linije odtoka S	%	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Najugodnejša globina hrapavosti T	mm	1,2	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3
Debelina vodnega filma $D_{max}$ na $L=10,00$ m	mm	10,59	4,95	3,57	2,94	2,57	2,32
DVF na $L = 10,00$ m pri hrapavosti $T = 0,6$	mm	10,32	4,95	3,55	2,90	2,50	2,23
DVF na $L = 10,00$ m pri hrapavosti $T = 0,4$	mm	10,04	4,91	3,57	2,94	2,57	2,30
DVF na $L = 10,00$ m pri hrapavosti $T = 0,2$	mm	9,48	4,72	3,48	2,90	2,55	2,30

$T=0,4$ mm je reprezentativna vrednost, ki daje praktično optimalne rezultate. Malenkostno večje debeline vodnega filma, ki bi jih pri večji hrapavosti izračunali pri majhnih nagibih linije odtoka, je treba gledati z določeno rezervo. Pri takih hrapavostih sta prisotna intenzivnost obrabe in vnos umazanije, oboje pa zmanjšuje začetno hrapavost. Debelina hrapavosti  $T=0,4$  je tista, pri kateri so debeline vodnega filma na vozišču najmanj ugodne.

#### 4.4 Dolžina trajektorije odtoka vode

Podaljšanje dolžine odtoka na vozišču in širina vozišča povzročata regresivno povečanje debeline vodnega filma. Količine dežja, ki odteka iz vozišča, so večje pri daljših odtokih. Relativno povečanje debeline vodnega filma je pri odprtih teksturah večje kot pri zaprtih.



Slika 7: Vliv dolžine vodnega odtoka na debelino vodnega filma

#### **4.5 Veter**

Tudi veter vpliva na debelino vodnega filma, pa čeprav le v majhni meri. Če ni vetra, potem voda teče le zaradi vpliva sile teže v smeri nagiba vozišča. Predvsem pri večjih jakostih vetra se debelina vodnega filma lahko poveča ali pa zmanjša. Ugodnost ali neugodnost je odvisna od smeri vetra, ki lahko piha proti smeri maksimalnega nagiba ali obratno.

#### **4.6 Neravnine**

Neravnine na cestišču najpogosteje nastanejo zaradi neutrjene podlage, katera se kasneje zaradi vpliva vode pod voziščno konstrukcijo dodatno posede in nastanejo razpoke ter luknje, v katerih se nabira meteorna voda, ki iz vozišča ne more odteči. Luknje lahko nastanejo tudi zaradi nedokončane konsolidacije, tako da se vozišče ob dokončanju gradnje še vedno neenakomerno poseda.

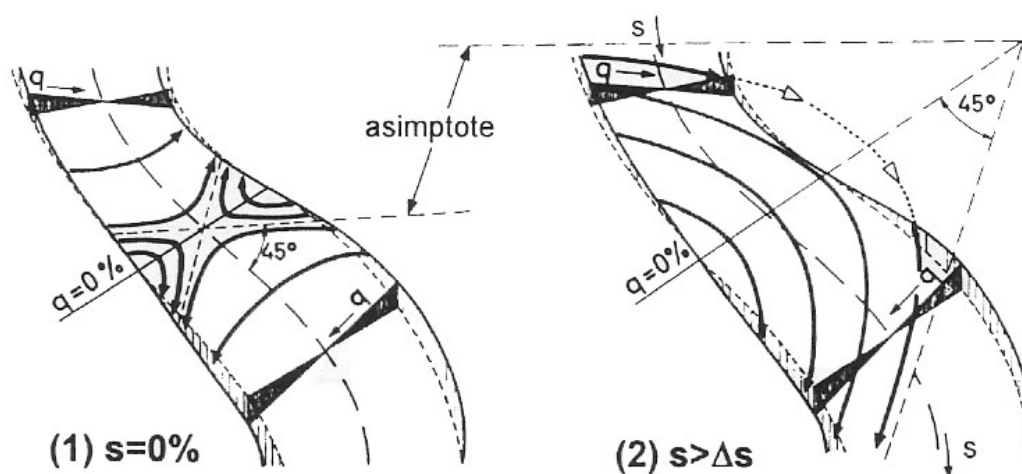
Pomembna so tudi odstopanja površine vozišča, ki so posledica bodisi odstopanj teoretičnih vrednosti od dejanskih pri vgradnji obrabnega sloja bodisi kolesnic, ki nastanejo zaradi delovanja prometne obtežbe. Pri globokih kolesnicah lahko nastanejo podolžni pasovi s prečnim nagibom 0 % ali celo z nasprotnosmernim. V primeru majhnega vzdolžnega nagiba, bo stalen odtok vode med zgornjim in spodnjim robom vozišča možen šele tedaj, ko bo v kolesnici zbrana voda dosegla višino roba kolesnice, ki je bližji spodnjemu robu vozišča.

#### **4.7 Talne označbe**

Talna označba predstavlja umetno nanešeno oviro na cestišče, katera negativno vpliva na odtok vode iz vozišča. Voda se zadržuje za njo in koncentrirano odteka.

## 5 NAČINI ODTOKA VODE IZ CESTIŠČA

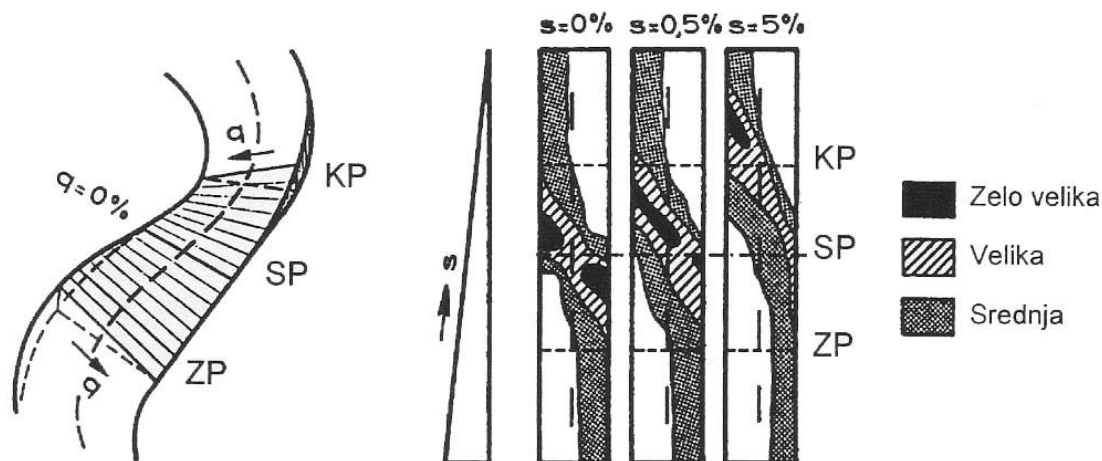
Pri vijačenju se spremeni predznak prečnega nagiba vozišča, zaradi tega pa na vozišču vedno obstaja območje povratne vode. Spodnja slika prikazuje, kako teče voda po cestišču. Pri vzdolžnem nagibu 0 % in vijačenju okoli osi ceste (Slika 8 levo) se voda na območju ničnega prečnega nagiba preliva na eno in na drugo stran tako, da obstajata dve površini povratne vode. Posledično na sredini nastaja vmesno območje, na katerem voda zastaja in ga imenujemo območje zastajajoče vode. Problemu akvaplaninga pri povratni vodi se brez dodatnih gradbenih ukrepov na vozišču ni mogoče izogniti. Problem območja zastajajoče vode pa lahko rešujemo že v fazi projektiranja in to na način, da se vsem vzdolžnim linijam vozišča zagotovi vsaj minimalni vzdolžni nagib, pri katerem je odtekanje vode po površini in po napravah za odvajanje še mogoče ( $\Delta s_{\text{min-odvod}}$ ).



Slika 8: Osnovna primera odtoka vode na vijačenih voziščih

Slika 8 (desno) nam prikazuje gibanje vode pri  $s > \Delta s$ , kjer je zaradi enako predznačenih nivelet robov vozišča območje povratne vode samo eno. S povečevanjem širine vozišča se območje povratne vode povečuje, kar na sliki pomeni, da bi voda tekla tudi po črtkani trajektoriji.

Kako se premika območje velikih debelin vodnega filma po vozišču, je lepo vidno na naslednji sliki. Večji kot je nagib, dlje od prevojne točke (prečni profil s prečnim nagibom 0 %) je to območje, ker se tu združi povratna voda.



Slika 9: Razdelitev debelin vodnih filmov na območju vijačenja okoli osi pri različnih niveletah pri prehodu iz desne v levo krivino.

ZP - Začetek območja prehodnice

SP - Sredina območja prehodnice

KP - Konec območja prehodnice

## 6 METODE IN PARAMETRI ZA ANALIZO IN IZRAČUN ODTOKA VODE IZ VOZIŠČA

Dimenzioniranje hidrotehničnih objektov (kanali, prepusti, ...) nam pogojuje velikost pretoka, ki se na nepreučeni prispevni območjih določa posredno, na osnovi ocen parametrov, ki so relevantni za odtok. Vsako prispevno območje je potrebno upoštevati kot poglavje zase, saj se medsebojno, zaradi velikega števila parametrov, precej razlikujejo.



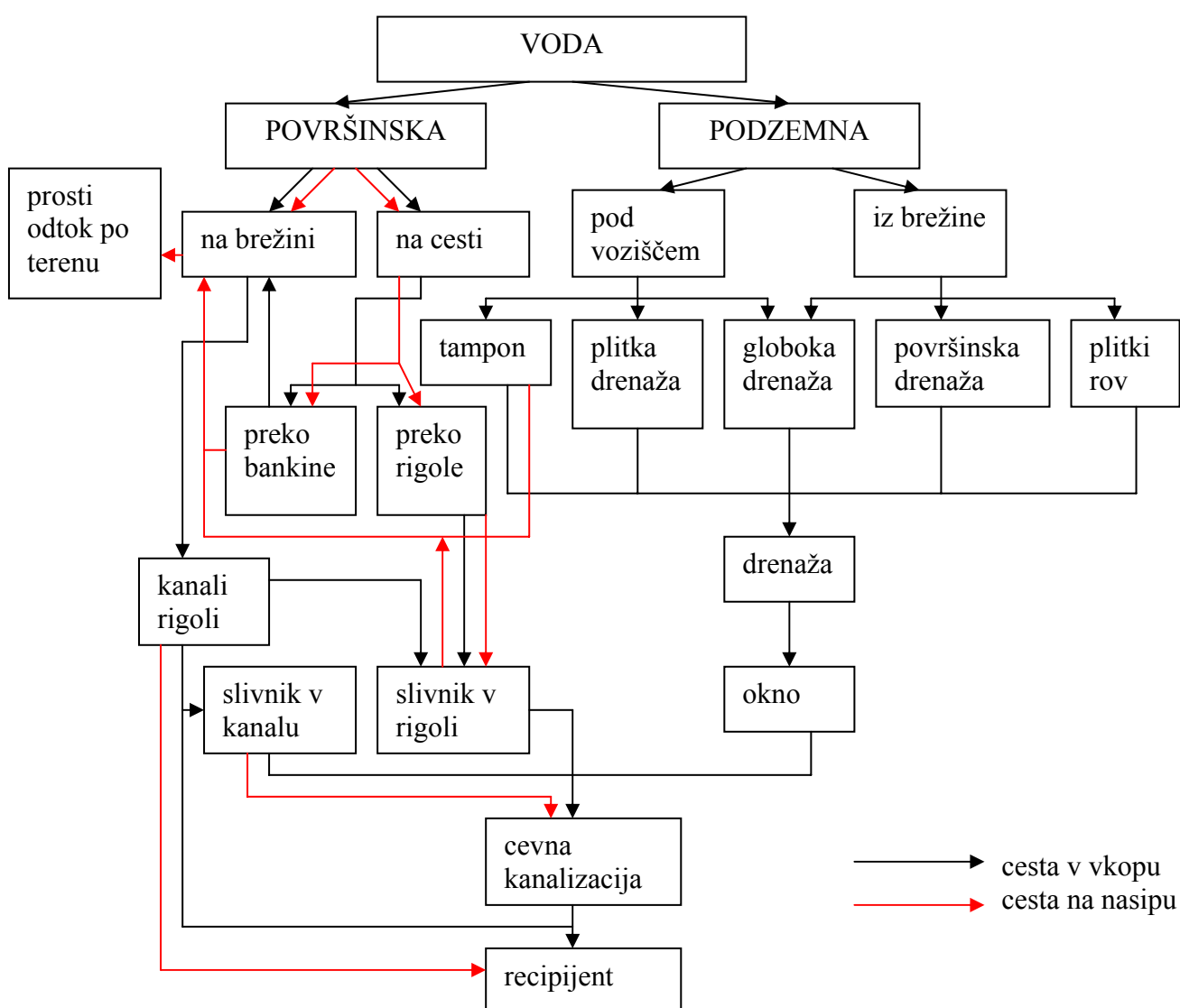
Slika 10: Oblike prispevnega območja (listnati, podolgovati, trikotni, pravokotni)

Preglednica 2: Lastnosti območja v odvisnosti od njegove oblike

LISTNATI	Hitra koncentracija Zelo velika intenziteta Kratkotrajno odtekanje
PODOLGOVATI	Počasna koncentracija Majhna intenziteta Dolgotrajno odtekanje
TRIKOTNI	Hitra koncentracija Velika intenziteta Dolgotrajno odtekanje
PRAVOKOTNI	Počasna koncentracija Velike vode dolgo trajajo Dolgotrajno odtekanje

Ker so postopki za določanje merodajnega pretoka zapleteni, se še vedno največkrat uporablja iskustvena »inženirska« metoda.

Padavine z manjšo intenzivnostjo in daljšim trajanjem v celoti prestreže vegetacija ali pa poniknejo. Enako se dogaja tudi pri intenzivnih in kratkotrajnih padavinah. Ko padavine nasitijo tla, se začne površinski odtok. To vodo je nujno spraviti v naprave za odvodnjavanje (jarki, koritnice, robniki, požiralniki, revizijski jaški, kanalizacijski sistemi ipd.).



Slika 11: Osnovni koncept odvodnjavanja izven mestnih cest v vkopu in nasipu

Dimenzije elementov za odvodnjavanje cest so odvisne od tega, kakšen naliv se upošteva v hidravličnem računu v skladu z naslednjo preglednico:

Preglednica 3: Merodajna jakost naliva za različne kategorije cest

Vrsta ceste	Projektna hitrost [km/h]	Pogostost naliva[let]	Jakost naliva [l/sek]
Daljinska	80 – 130	25	350
Povezovalna	60 – 90	10	220
Zbirna	40 – 70	5	170
Dostopna	40 - 60	1	130

Modelov, ki se uporabljajo za izračun transformacije padavin v odtok, je veliko. Vsi modeli vsebujejo niz parametrov, med katerimi so najpomembnejši parametri infiltracije, parametri zadrževanja vode na površini in karakteristike odtočnih površin.

V nadaljevanju so poleg računalniških izračunov predstavljene še tri metode, ki se v praksi uporabljajo ter imajo skupno osnovo. Pri vseh mora proces vsebovati:

- Zbiranje parametrov in podatkov o prispevnem območju, ki so potrebni, da bi lahko zanesljivo ocenili maksimalni odtok, upoštevajoč odvisnost višine padavin in njihovega trajanja za določeno povratno dobo.
- Vrednost merodajnega pretoka, ki je določen na enem prispevnem območju, pod pogoji in na osnovi lastnosti le-tega, se pod nobenim pogojem ne sme prenašati na sosednje prispevno območje. Dobljeni merodajni maksimalni pretok je treba gledati kot osebno vrednost tega prispevnega območja.

### 6.1 Sintetični hidrogram odtoka v trikotni obliki

Osnovna predpostavka pri tej metodi je, da lahko realni hidrogram iz prispevnih območij, ki je krivočrten, aproksimiramo s trikotno obliko. Hidrogram je frekvenčna krivulja, s pomočjo katere prikazujemo rezultate meritev odtoka. Prikazuje nam časovne spremembe pretoka.

Zanima nas vrednost maksimuma hidrograma odtoka  $Q_{max}$ , izhajamo pa še iz prostornine vode, ki pade na prispevno območje ( $V_p$ ).

$A$  – površina prispevnega območja

$P_b$  - višina padavin v mm

Del vode, ki pade na tla se izgubi :

- Izguba zaradi ponikanja vode v tla –  $V_{pon}$  : Takoj po pričetku dežja voda s terena ne prične odtekati, ampak najprej zapolni ves akumulacijski prostor, ki ga ima na voljo.
- Izguba zaradi izhlapevanja –  $V_i$  : Del padavin takoj izhlapi, del pa ponikne, če pade na propustna tla. Intenziteta izhlapevanja ni konstantna, ampak je odvisna od zračne vlage, vetra in temperature, ponikanje pa je odvisno od lastnosti tal, nagnjenosti terena, poraslosti, vlažnosti idr.
- Izguba vode, ki jo vpijejo rastline –  $V_b$

Volumen padle vode zmanjšamo za izgube in dobimo sledečo enačbo:

$$V_o = V_p - (V_{pon} + V_i + V_b) \quad (1.1)$$

Količino odtekajoče vode definiramo s koeficientom odtoka  $K_o$ , ki predstavlja odnos med prostornino vode, ki odteka in prostornino vode, ki je padla na neko prispevno območje. To ni konstantna vrednost, saj je odvisna od vrste dejavnikov, poleg lastnosti povodja, tudi od intenzivnosti in trajanja padavin, vlažnosti zemljišča ipd. Predstavlja pa lahko tudi razmerje med efektivnimi ( $P_e$ ) in bruto padavinami ( $P_b$ ).

$$K_o = \frac{V}{V_p} = \frac{P_e}{P_b} \quad (1.2)$$

Prostornino odtoka vode dobimo iz diagrama in je enaka površini le tega:

$$V_o = \frac{1}{2} * Q_{max} * T_b \quad (1.3)$$



Sedaj lahko izrazimo  $Q_{\max}$ :

$$Q_{\max} = \frac{2 * Pe * A}{Tb} \quad (1.4)$$

Za izračun maksimalne vrednosti odtoka vode za znano prispevno območje, je potrebno definirati še osnovnico trikotnika hidrograma odtoka ( $Tb$ ) in prostornino odtoka oziroma efektivne padavine ( $Pe$ ).

Trajanje odtoka je odvisno od velikosti prispevnega območja, njegove oblike, dolžine, nagiba, ter trajanja merodajnih padavin.

Trajanje odtoka je sestavljeno iz dveh delov oziroma obdobj:

- obdobje povečanega pretoka ( $Tp$ ),
- obdobje ko pretok upada ( $Tr$ ).

Ob upoštevanju teh ugotovitev lahko enačbo za maksimalni pretoka zapišemo na naslednji način:

$$Q_{\max} = 2 * Pe * \frac{A}{Tp} + Tr \quad (1.5)$$

Čas povečanega pretoka ( $Tp$ ) izračunamo s pomočjo časa trajanja poti ( $t_{pot}$ ), ki ga lahko določimo na več načinov. Najenostavnejši izračun je s pomočjo metode hitrosti, pri kateri uporabimo enostaven izraz:

$$t_{pot} = \frac{L}{v} \quad (1.6)$$

pri čemer je  $L$  dolžina toka v metrih,  $v$  pa povprečna hitrost toka v m/s.

Pri izračunu poti po tej metodi, lahko pride do opaznih napak, ki so posledica približkov, zato je nujno čim boljše poznavanje terena. Pogosto se čas izračuna le za dele prispevnih območij.

Poleg tega moramo pozorno oceniti povprečno hitrost toka na prispevnem območju, tako da ustrezno določimo parametre toka. Ti parametri so pot, hrapavost in nagib, ki jih lahko merimo ali pa ocenimo na terenu.

Trajanje poti pa je možno izračunati še na druge načine, ki so zahtevnejši, in sicer z empiričnimi metodami hidrologije ali s kinematskim valom.

Po teoriji kinematskega vala se čas poti izračuna:

$$t_{pot} = \frac{L * 0,6 * n * 0,6}{ik * 0,4 * 10,3} \quad (1.7)$$

pri čemer so:

L – dolžina toka v [m],

n – hrapavost prispevnega območja po Maningu v [m-1/3s],

ik – intenzivnost merodajnih padavin [m/s], da lahko dobimo čas koncentracije v sekundah.

Zgornjo formulo lahko uporabimo v primeru, kadar imamo prispevno območje, pri katerem je tok možno definirati kot »dvodimenzionalni ravninski tok«. Kadar odtekanje poteka v več rokavih, ki se medsebojno sekajo, vijugajo, širijo in krčijo, nam ta enačba ne daje dovolj točnih rezultatov, saj je težko določiti, katera pot toka je dominantna.

Na celotnem prispevnem območju ali njihovih delih morajo biti parametri približno izenačeni. Kadar imamo prispevno območje razdeljeno na dele, je čas koncentracije prispevnega območja ( $T_c$ ) enak vsoti časov potovanja na delnih prispevnih območjih. Odtok, ki nastane po dežju, ne odteče takoj v kanal, ampak potrebuje določen čas, da kanal doseže. Čas, v katerem voda doseže kanal, je odvisen od oddaljenosti od kanala, hrapavosti površine po kateri odteka ter intenzitete padavin. Za določitev trajanja povečanja pretoka ( $T_p$ ) se uporablja povezava:

$$T_c = 0,67 * T_p \quad (1.8)$$

$T_p$  pa se izračuna iz izraza:

$$T_p = t_p + \frac{T_k}{2} \quad (1.9)$$

$t_p$  je čas zamude, ki ga lahko izračunamo s pomočjo različnih enačb:

$$1) \quad t_p = a * T_k + t_o \quad (1.10)$$

$$2) \quad t_p = 0,75 * \frac{L * L_c * 0,37}{I * ur^{1/2}} \quad (1.11)$$

Za prvo enačbo potrebujemo še to, ki ga lahko izračunamo:

$$t_o = 1,06 * \frac{L * 0,47}{I} \quad (1.12)$$

ali

$$t_o = 0,40 * L * 0,67 * \frac{L * L_c * 0,086}{I^{1/2}} \quad (1.13)$$

Pri čemer so:

L – dolžina toka v [km],

L<sub>c</sub> – dolžina prispevnega območja do težišča v [km],

I – nagib prispevnega območja v [%],

A – koeficienti od 0,3 do 0,5 za prispevna območja od 20 – 100 km<sup>2</sup>,

I<sub>ur</sub> – izravnani nagib prispevnega območja v [%].

Obstajajo pa še drugi izrazi za izračun časa zamude ( $t_p$ ), ki upoštevajo še druge parametre prispevnega območja.

Trajanje upadanja pretoka ( $T_r$ ) je v funkciji časa rasti pretoka ( $T_p$ ) ter se enostavno zmnoži.

Vrednosti koeficienta je od 1,05 do 1,55 za prispevna območja od 2 do 100km<sup>2</sup>.

Pri določanju izgube padavin obstaja veliko različnih načinov. Eden izmed načinov je uporaba krivulj (Curve Number), na podlagi katerih se na osnovi bruto padavin določajo učinkovite padavine. Za to metodo potrebujemo zelo natančne podatke o prispevnem področju, zato je prisotnost hidrotehnika skoraj nujna.

Curve Number(CN) je karakteristika prispevnega območja, ki se računa na osnovi informacij o:

- vrsti tal – zemljišča prispevnega območja v primerjavi z geološko sestavo,
- vrsti in kvaliteti površine prispevnega območja,
- načinu obdelave, če je prispevna površina kmetijsko zemljišče,
- stanju predhodne vlažnosti v tleh ob dežju.

Glede na geološko sestavo tal se upoštevajo naslednje vrste zemljišč:

- prepustna in globoka tla (puhlica, pesek),
- plitkejša tla (peščena in glinena tla),
- plitka tla (pretežno glinena tla),
- zelo plitka glinena tla.

Na osnovi informacij o vrsti površja sledijo vrednosti parametra CN:

naravna – neobdelana tla	75 – 95
Obdelano zemljišče	60 – 90
Žitarice	60 – 85
livade – jase	40 – 80
Gozdovi	25 - 70

Prve vrednosti veljajo za srednje vlažna tla ob pričakovanju novih padavin, druge vrednosti pa so zelo vlažna tla pred padavinami in odtokom. Meje so postavljene zelo široko, kar nam pove, da moramo biti pri takšnih analizah zelo previdni.

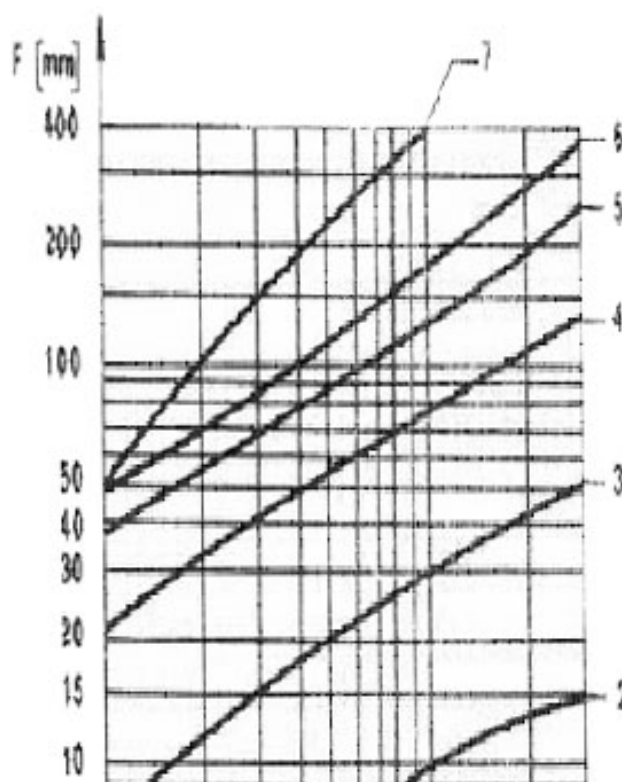
Za izračun efektivnih padavin potrebujemo tudi izraz za deficit vlage ( $d$ ):

$$d = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25,4 \quad d[\text{mm}] \quad (1.14)$$

Sedaj lahko efektivne padavine izračunamo po izrazu:

$$Pe = \frac{(Pb - 0,2d)^2}{Pb + 0,8d} \quad (1.15)$$

Na podlagi naštetih izrazov lahko ocenimo maksimalno vrednost hidrograma odtoka iz znanega nepreučenelega prispevnega področja. Za izračun merodajnega pretoka je potrebno najti niz parametrov, velikosti in odvisnosti, ki veljajo za konkretne pogoje in kar je najpomembnejše, za opazovano podnebje. Iz literature je potrebno izbrati ustrezen izraz, formulo in po potrebi ugotoviti, da je zbirka podatkov, ki ga imamo na razpolago nezadosten.



Slika 12: Diagram vpijanja za razna tla :1-glina, 2-ilovica, 3-glina z malo peska, 4-glina z veliko peska, 5-pesek z veliko gline, 6-pesek s srednjo količino gline, 7-pesek z malo gline

## 6.2 Racionalna metoda

To je ena izmed najstarejših metod za določitev hidrograma odtoka vode iz poznane prispevnega območja. Metoda se je tekom let izpopolnjevala in se zelo pogosto uporablja še danes. Razlog za uporabo je predvsem enostavnost uporabe, rezultati, ki jih s to metodo dobimo, pa so malenkost večji kot so dejanske razmere, kar je za inženirsko prakso dobrodošlo.

Za uporabo te metode morajo veljati nekatere predpostavke opazovanega prispevnega območja, in sicer:

- prispevna površina mora biti pravokotne oblike,
- nagib prispevnega območja v smeri toka mora biti enakomeren,
- površina prispevnega območja mora imeti približno konstantno hrapavost.

Pri računu odtoka se uporabljajo padavine enakomerne intenzivnosti. Osnovni parametri, ki jih pri izračunu hidrograma odtoka uporabljamo so : trajanje padavin ( $T_k$ ), intenzivnost padavin ( $i_k$ ), čas koncentracije ( $T_c$ ), velikost prispevnega območja ( $A$ ) in koeficient odtoka ( $K_o$ ).

Oblika hidrograma je odvisna od medsebojnega odnosa med trajanjem padavin ( $T_k$ ) in časom koncentracije ( $T_c$ ). Imamo tri možnosti:

- Padavine trajajo krajši čas kot je čas koncentracije ( $T_k < T_c$ )
- Padavine trajajo toliko, kolikor traja čas koncentracije ( $T_k = T_c$ )
- Padavine trajajo dlje kot čas koncentracije ( $T_k > T_c$ )

Maksimalni hidrogram odtoka ( $Q_{\max}$ ) računamo različno in je odvisen od medsebojnega odnosa časov. Kadar je  $T_k < T_c$  :

$$Q_{\max} = \frac{T_k}{T_c} * K_o * i_k * A \quad (2.1)$$

V primerih, ko je  $T_k = T_c$  ali  $T_k > T_c$ :

$$Q_{\max} = K_o * i_k * A \quad (2.2)$$

Podatki o koeficientu odtoka ( $K_o$ ) so podani v tabelah glede na kategorijo površine:

Preglednica 4: Vrednosti koeficienta odtoka ( $K_o$ ) v odvisnosti od vrste površine

<b>vrsta površine</b>	<b>vrednost <math>K_o</math></b>
Asfaltne ali betonske, popolnoma nepropustne	0,9 – 1,0
Dobro nabite, malo prepustne (prst, prod)	0,5 – 0,8
Naravne, slabo poraščene, malo prepustne	0,2 – 0,5
Naravne, z zelo močno vegetacijo, zelo prepustne	0,1 – 0,3

Vrednosti koeficientov za posamezno vrsto tal so postavljene precej široko. Manjše vrednosti načeloma vzamemo, kadar preračunavamo odtok vode za padavine manjšega povratnega obdobja (do dveh let). Večje vrednosti pa uporabimo, kadar izvajamo preračun za padavine z daljšim povratnim obdobjem (pet ali deset let). Ob nepravilnem izboru koeficienta lahko dobimo precej neuporabne rezultate, zato je odločitev smiselno prepustiti strokovnjaku.

### 6.3 Modificirana racionalna metoda

To je izboljšana racionalna metoda, ki jo je predlagal Argue. Merodajni čas koncentracije se določa na osnovi toka po nepropustnih površinah. Argue upošteva vprašanje analize odtoka z nepropustnih delov prispevnega področja (strehe, pločniki, parkirišča, platoji, ...), s katerih voda odteka preko prepustnih terenov (parki, gozdovi, ...), saj je v praksi prispevno območje sestavljeno iz prepustnih in neprepustnih delov, ki imajo različne koeficiente odtoka. Izračun odtoka je zato bolj zapleten. Koeficienti za nekatere površine so podani v naslednji tabeli.

Preglednica 5: Vrednosti koeficientov za različne nepropustne površine prispevnega območja

Vrsta površine	Vrednost koef.
Strehe s pločevinasto ali emajlirano kritino	95
Strehe z običajno kritino	85-90
Ceste in poti, utrjene z betonom ali asfaltom	85-90
Tlak iz naravnega ali umetnega kamna z zalitimi stiki	75-85
Tlak iz naravnega ali umetnega kamna z nezalitimimi stiki	50-70
Z bitumensko emulzijo obrizgana površina	25-60
Slabo utrjene poti brez površinske obdelave	15-30
Kolodvori in igrišča	10-30
Parki, vrtovi in travniki	5-25
Gozd	1-20

Maksimalni pretok lahko določimo na dva načina, in sicer:

- s celotnega prispevnega območja,
- z nepropustnega dela prispevnega območja in z enega dela prepustnih površin.

Pri prvi metodi se merodajno trajanje padavin določa na osnovi ocene odtoka z najdaljšega neprepustnega dela prispevnega območja –  $T_c$ .

Ekvivalentna neprepustna površina celotnega prispevnega področja se izračuna po naslednjih izrazih:

$$(KoA)_{celo} = (Ko, ekA) \quad (3.1)$$

pri čemer je ekvivalentni koeficient odtoka enak:

$$Ko, ek = \frac{Kon * An + Kop * Ap}{An + Ap} \quad (3.2)$$

$A_p$  – površina prepustnih tal

$A_n$  – površina nepropustnih tal



Maksimalni pretok se nato izračuna po izrazu:

$$Q_{\max} = K_{o,ek} A i_k \quad (3.3)$$

pri čemer se upošteva, da je intenzivnost padavin  $i_k$  določena za primer  $T_k = T_c$ .

V drugem primeru se merodajno trajanje padavin ocenjuje na osnovi odtoka z najdaljšega neposredno povezanega neprepustnega dela prispevnega območja – TN.

Pri tem je nepropustni del prispevnega območja tisti, s katerega voda ne odteka preko prepustnih površin.

Delno ekvivalentno nepropustno površino izračunamo z izrazom:

$$(K_{oA})_{del} = K_{o,n} * A_n + \frac{TN}{TC} K_{o,p} * A_p \quad (3.4)$$

Maksimalni pretok pa se izračuna po izrazu:

$$Q_{\max} = (K_{oA})_{del} * i_k \quad (3.5)$$

pri čemer je intenzivnost padavin določena na osnovi  $T_k = TN$ .

#### 6.4 Računalniški izračuni

Računalniki nam omogočajo, da se celotna analiza odtoka ob padavinah z razvojem numeričnih metod, postopkov in sredstev za računanje izvede bolj natančno. V Sloveniji se največ uporabljata programa Hydra in Canalis, ki se še vedno izpopolnjujeta. V nadaljevanju sta opisani različici programa, ki se sedaj uporabljata.

### 6.4.1 Canalis 6

Canalis je računalniški program za načrtovanje kanalizacijskih sistemov, ki deluje v okolju AutoCAD, Autodesk MAP ali Autodesk CIVIL 3D. Razvoj programa sega v zgodnja devetdeseta leta. Program je bil do sedaj že velikokrat nadgrajen v skladu z željami velikega števila uporabnikov v Sloveniji in celotni Srednji in Vzhodni Evropi.

Sestavljen je iz štirih osnovnih modulov, situacija, vzdolžni profili, hidravlika in data extension. Lahko jih uporabljamo neodvisno, vendar le skupno delovanje omogoča hitro in kvalitetno projektiranje kanalizacijskih sistemov.

Canalis lahko v skupnem projektu kanalizacijske mreže združuje različne kanalizacijske sisteme (meteorne, fekalne in mešane). Kanalizacijski sistem določimo z interaktivnim vnašanjem elementov kanalizacije in / ali z branjem podatkov, pridobljenih na osnovi geodetskih posnetkov. Pri vnosu in urejanju podatkov nam je v pomoč sodoben in uporabniku prijazen uporabniški vmesnik. Omogočeno je delo z večimi terenskimi črtami.

Elemente kanalizacijskega sistema izbiramo izjemno hitro in učinkovito. Podatke nato prikažemo v jasnih in preglednih tabelaričnih izpisih ali jih pregledujemo v drevesnem pogledu.

V Canalisu lahko vsakemu kanalizacijskemu sistemu določimo številne podatke, ki se izpišejo v risbo kanalizacijskega sistema na način, ki je najprimernejši v dani situaciji. Uporabnik lahko preko številnih nastavitev in možnosti spreminja razpored in obliko oznak. V program je vgrajena skupina ukazov za analizo presečišč z drugimi komunalnimi in infrastrukturnimi vodi (voda, elektrika, plin itd.).

Program Canalis omogoča samodejno določanje prispevnih in vplivnih površin. Novost v različici 6 je upoštevanje otokov, kar je še posebej dobrodošlo pri upoštevanju streh ali asfaltiranih površin.

Poleg hidravličnega izračuna po Prandtl-Colebrookovih enačbah, omogoča še Reinholdovo metodo izračuna in izračun po TRRL metodi (retencijska metoda). Možen je izračun premera glede na dane pretoke in padce ali pa izračun padcev glede na dane premere in pretoke.

Novi Canalis omogoča samodejno ažuriranje podatkov med situacijo in vzdolžnimi profili brez uporabe zunanjih datotek ali baze. Vsi podatki so shranjeni v risbi. Omogočeno je tako risanje situacije in vzdolžnih profilov v eni sami risbi, kot tudi delo z ločenimi risbami za večje sisteme, ki jih lahko obdeluje več uporabnikov hkrati.

Na voljo je niz pomožnih funkcij za hitro in učinkovito določitev nivelete. V vzdolžnem profilu, ki ga obdelujemo, lahko prikažemo že določena skupna vozlišča drugih kanalov. Postavljeno niveleto lahko interaktivno pregledujemo, spreminjamo in ažuriramo.

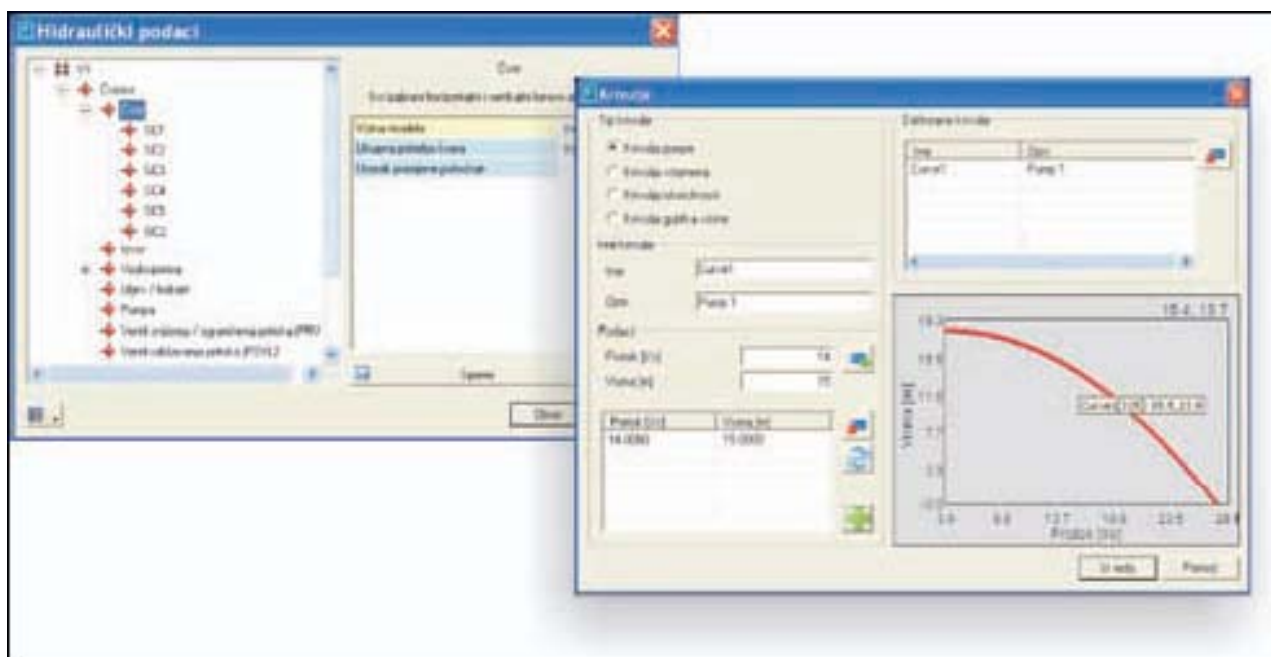
Pomembna novost v Canalisuu so dinamični jaški. Obliko jaška določimo v posebnem urejevalniku. Na tak način lahko v vozlišča postavimo poljubne objekte z uporabniško določeno grafiko.

Na poljubnih odsekih kanala lahko določimo prečni prerez in sloje zasipa. Prečni prerez lahko izrišemo na poljubni stacionaži. V Canalis je vgrajen obsežen izračun izkopov, ki generira izčrpna poročila o volumnih izkopov in zasipov.

Za potrebe izrisa vzdolžnih profilov, kjer nastopajo velike razlike v nadmorskih višinah in za katere bi izrisovanje zahtevalo velike dimenzije papirja, je predvidena skupina ukazov za izdelavo lomljenih vzdolžnih profilov.

## 6.4.2 Hydra

Hydra je programski paket za projektiranje vodovodnih sistemov v urbanih okoljih. Deluje v okolju AutoCAD ali Autodesk MAP. Programski paket je sestavljen iz že znanih modulov Situacija in Vzdolžni profili ter povsem novega modula Montažne sheme.



Slika 13: Primer izpisa podatkov pri računalniškem programu Hydra

Modul Situacija je namenjen izrisu in urejanju vodovodnega sistema. Poleg izrisa sistema s Hydra ukazi je mogoče v vodovodni sistem pretvoriti AutoCAD elemente, kot so polilinijske in bloki z atributi. V sistem nato vnesemo podatke o višini terena, višini nivelete cevi, o premeru cevi in vse ostale podatke o vodovodnem sistemu, ki so potrebni za izračun hidravlike. S skupino ukazov za označevanje sistema je mogoče označiti vozlišča, cevi in smeri toka.

Z modulom Vzdolžni profili izrišemo vzdolžni profil terena in potegnemo niveleto cevi. Risbo nato opremimo z jaški. Program glede na konveksnost oziroma konkavnost samodejno prepozna, ali gre pri jašku za zračnik ali za muldni izpust. Vzdolžnemu profilu določimo zgornji sloj in karakteristike izkopa. Program glede na potek cevi, zgornji sloj in karakteristike izkopa izračuna količino izkopa. Na poljubnih stacionažah lahko izrišemo prečne prereze izkopa in jih samodejno kotiramo. V primeru zelo dolgih vzdolžnih profilov

ali v profilih z veliko višinsko razliko terena program razreže vzdolžne profile na primerno velika območja in jih pripravi za izris na papir.

Prenos podatkov med risbami vzdolžnih profilov in situacije poteka z neposrednim branjem DWG risb (Direct Drawing Reading - DDR), zato jih ni potrebno dodatno zapisovati v ASCII datoteke. Vsaka sprememba v vzdolžnem profilu se samodejno pojavi v situaciji in obratno. Podatke je mogoče zapisati tudi v MS Access bazo za kasnejšo uporabo pri izdelavi katastra. Za uporabnike, ki se ukvarjajo samo z izdelavo komunalnega katastra in ne potrebujejo funkcij za načrtovanje, je na voljo programski paket Urbano.

Modul montažne sheme služi izdelavi montažnih shem v vozliščih vodovodnega sistema. Program ima že definirane elemente vozlišč večine pomembnejših proizvajalcev. Lahko pa uporabnik izdela svoje elemente in jih doda v bazo.

Pri izrisu montažnih shem je bila uporabljena metoda inteligentnega "OSNAPA", ki samodejno prepozna uporabljeni element. Tako jih ni potrebno dodatno obračati, zrealiti ali premikati, saj se elementi samodejno stikajo. Izdelano montažno shemo je mogoče shraniti in jo poljubno spreminjati z AutoCAD ali Hydra ukazi. Vgrajeni so tudi kotiranje, označevanje in prikazi vseh količin v poljubnih oblikah.

V različici Hydra 2.0 je vgrajen tudi enostaven modul za izdelavo digitalnega modela terena - TerraForm. Program omogoča tako vnos terenskih točk kot tudi robov terena. Točke lahko vnesemo tudi neposredno iz datoteke. Na osnovi vhodnih podatkov program izdela mrežo nepravilnih trikotnikov (TIN) ali mrežo pravokotnikov (GRID), ki predstavljajo digitalni model terena.

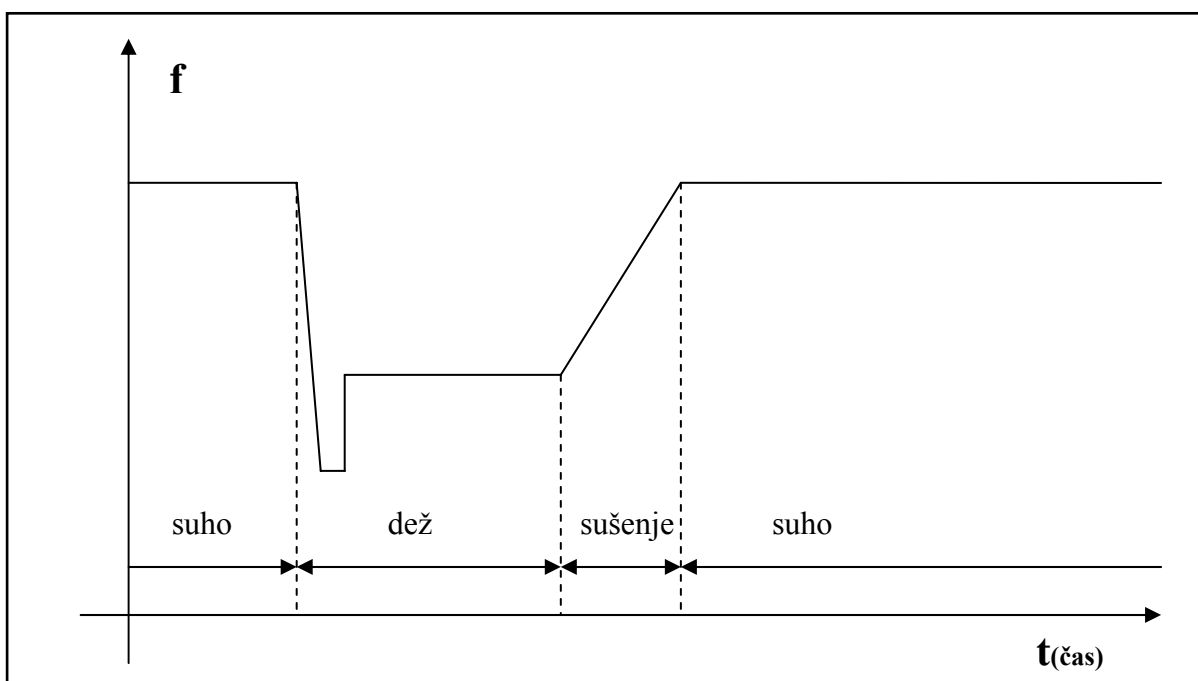
Hidravlični izračun v Hydri temelji na algoritmu za hidravlični izračun EPA (Environmental Protection Agency). Vse količine, potrebne za hidravlični izračun, podamo v preglednih pogovornih oknih z jasnimi opisi in priporočili iz standardov. Po opravljenem izračunu lahko rezultate (tlak, pretok, padec tlačne črte, ...) prikažemo in označimo v Hydra risbi ali iz njih pripravimo tematsko karto.

Program Hydra se je v različici 2.0 razvil v močno in stabilno orodje, ki pokriva vse potrebe projektantov vodovodnih sistemov. Razvijajo pa tudi že nadaljevanje in sicer Hydra 3.0.

## 7 PROMETNA VARNOST

Cestni promet je eden najpomembnejših transportnih načinov v sodobni civilizaciji, zato je vedno hitrejši in gostejši. Na varnost vožnje vpliva veliko dejavnikov kot so: stanje voznika, tehnična izpravnost vozila, karakteristike gum, trenje med pnevmatiko in voziščem, hrapavost, ... V največji meri pa je varnost vožnje odvisna od količine prisotne vode na vozišču in velikosti koeficienta trenja, kateremu bom v tem poglavju posvetil največ pozornosti.

Koeficient trenja je v veliki meri odvisen od prisotnosti vode na cestišču. Odvisen je tudi od dolžine trajanja naliva. Na spodnji sliki je prikazana sprememba odpora drsenja zaradi kratkotrajnih klimatskih vplivov.



Slika 14: Primer spreminjanja koeficienta trenja ob dežju

Iz slike je razvidno, da se koeficient trenja ob pričetku deževja zelo zmanjša. Takrat so na vozišču še nečistoče ( prah, gorivo, mazivo, ...). Iz raziskav prometnih nesreč je tudi razvidno, da se v tem času zgodi tudi največ prometnih nesreč. Ko dež spere nečistoče, se koeficient trenja znatno poveča, nato pa se s sušenjem vozišča stalno povečuje do prvotne vrednosti.

## 7.1 Teoretične osnove trenja

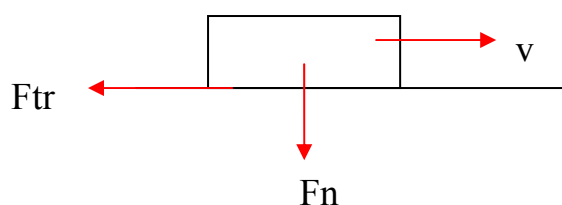
Medsebojna odvisnost med oprijemom pnevmatike s cestiščem ter tveganjem nastanka prometnih nesreč je ključnega pomena. Verjetnost zdrsa vozil na mokrem vozišču je bistveno večja kot na suhem vozišču. Za preprečitev takšnih nesreč je najpomembnejše poznavanje mejnih vrednosti trenja, ki ga popišemo s tornim količnikom.

Pri relativnem gibanju dveh teles, ki se dotikata, oziroma telesa na podlagi, se med njima lahko pojavita dve vrsti trenja, in sicer: drsno trenje in kotalno trenje oziroma kotalni upor.

Drsno trenje se pojavi pri relativnem gibanju dveh površin togih teles v stiku. Pri takšnem gibanju nastane sila odpora proti relativnem gibanju teh dveh površin, ki jo imenujemo sila trenja  $F_{tr}$ . Velikost te sile je odvisna od normalne sile  $F_n$ , s katero delujeta površini druga na drugo, in od koeficienta trenja  $\mu$ , ki je definiran z enačbo:

$$\mu = F_{tr} / F_n \quad , \quad 0 \leq \mu \leq 1 \quad ,$$

ter je odvisen od hrapavosti površin, materiala drsnih ploskev, hitrosti gibanja ter od mazalnega fluida med ploskvama.



Slika 15: Teoretična določitev coef. trenja

Koeficient lepenja oziroma koeficient trenja pri mirovanju  $\mu_0$ , je poseben primer koeficienta trenja pri relativni drsni hitrosti 0.

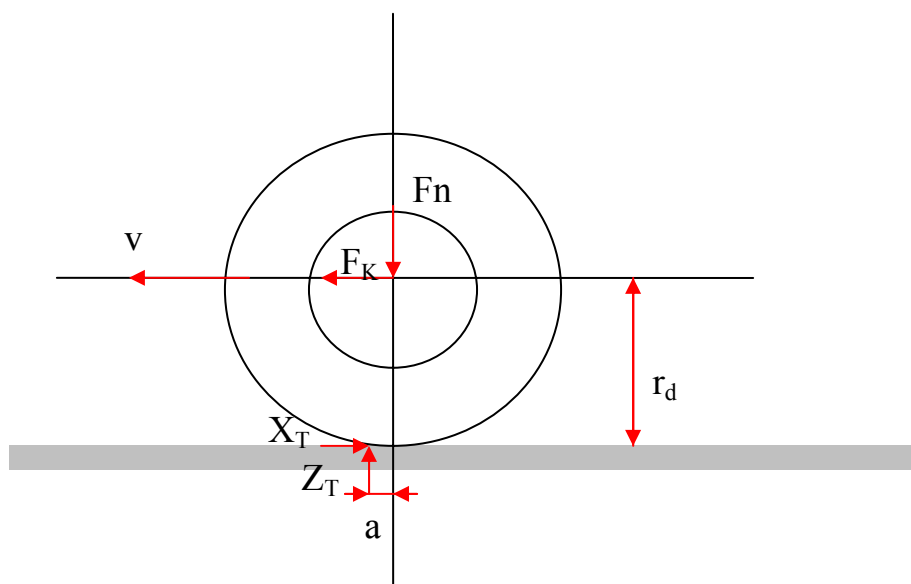
$$\mu_0 = F_l / F_n \quad , \quad 0 \leq \mu_0 \leq 1$$

Koeficiente lepenja in trenja za različne pare materialov teles za praktično uporabo se še vedno določa izključno samo eksperimentalno. Koeficient trenja je odvisen od relativne drsne

hitrosti, vendar je njen vpliv v področju in pri pogojih, ki so pri uporabi vozil, manj pomemben. Takoj, ko se pojavi gibanje, koeficient trenja hitro pade z vrednosti koeficienta lepenja na običajne vrednosti drsnega trenja. Ta se nato z večanjem hitrosti razmeroma malo spreminja, dokler se primer nahaja v območju suhega oziroma mešanega trenja, kar je običajno pri avtomobilskih pnevmatikah. Koeficient trenja začne naraščati s hitrostjo v področju hidrodinamičnega trenja, ko mazalni fluid loči telesi. To področje pa je pri pnevmatikah neuporabno (akvaplaning) in se ga izogibamo, tako da poskrbimo za čim boljši odvod fluida iz področja stika.

Kotalno trenje oziroma kotalni upor se pojavi zaradi deformacije teles pri medsebojnem kotaljenju. S tega stališča si je smiselno podrobneje pogledati kotaljenje valja (kolo) po ravni podlagi (cestišče), kjer se pojavijo trije različni primeri:

- Kotaljenje deformabilnega kolesa po togi podlagi.
- Kotaljenje togega kolesa po deformabilni podlagi.
- Kotaljenje deformabilnega kolesa po deformabilni podlagi.



Slika16: Obremenitev na deformabilno kolo pri kotaljenju po togi podlagi

$v$  – hitrost težišča pnevmatike

$r_d$  – dinamični polmer pnevmatike



$F_n$  – vertikalna obremenitev pnevmatike

$X_T, Z_T$  – reakcije tal na pnevmatiko

$F_K$  – horizontalna obremenitev pnevmatike

$a$  – premik prijemališča reakcijskih sil

Ker je večina sodobnih cest prevlečenih z asfaltno ali betonsko prevleko, ki se pri obremenitvi deformira bistveno manj kot avtomobilska pnevmatika, je za nas najpomembnejši prvi primer (Slika16).

Posledica deformacije telesa, ki se giblje s hitrostjo  $v$ , je premik prijemališča reakcije  $Z_T$  za razdaljo  $a$  v smeri gibanja kolesa. Vzrok za premik prijemališča sile se skriva v lastnostih visokoelastičnega materiala. Zaradi premika prijemališča sile se pri gibanju deformabilnega kolesa pojavi moment upora proti vrtenju  $M_f$ . V pogojih ravnotežja velja:

$$M_f = Z_T * a = F_K * r_d = X_T * r_d \quad (4.1)$$

Moment  $M_f$  imenujemo tudi moment kotalnega trenja. To je minimalni moment, s katerim moramo pognati kolo, da se prične kotaliti po ravni podlagi. Minimalna potrebna sila v osi kolesa  $F_{K,min}$  je tako enaka izrazu:

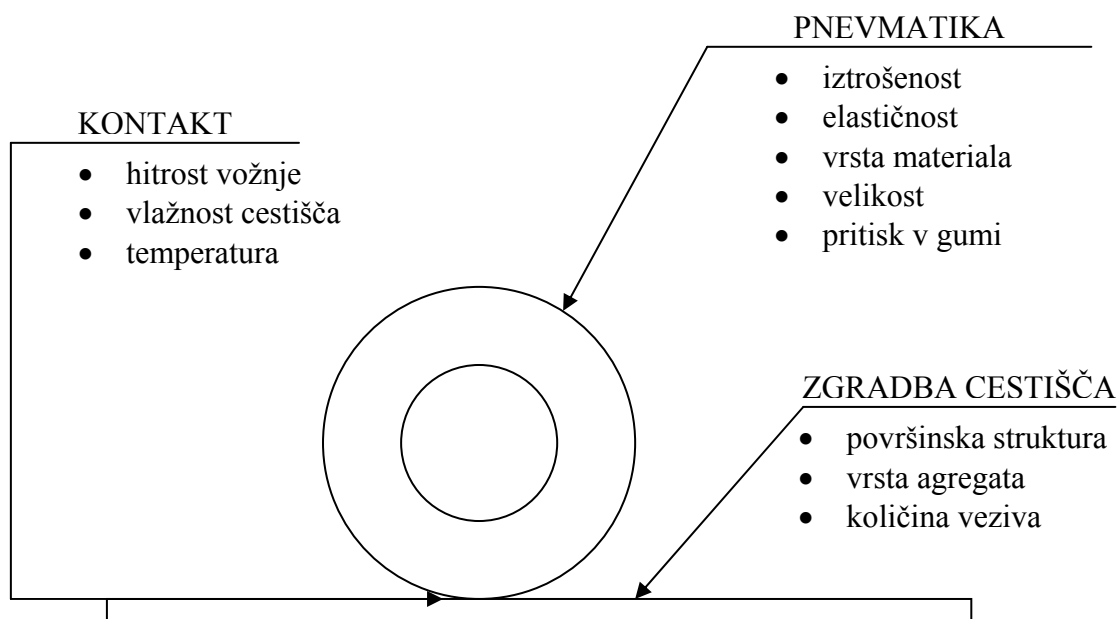
$$R_f = F_{K,min} = \frac{M_f}{r_d} = Z_T * \frac{a}{r_d} = F_n * f \quad (4.2)$$

$$f = \frac{a}{r_d} \quad (4.3)$$

Silo  $F_{K,min}$  imenujemo tudi kotalni upor  $R_f$ .

Koeficient kotalnega upora ( $f$ ) oziroma trenja je v normalnih razmerah bistveno manjši od koeficienta drsnega trenja ( $f \ll \mu$ ) in je na utrjenih cestah reda velikosti 0,01 do 0,025. V takem primeru se bo kolo, ki ni zavrtlo in je obremenjeno s silama  $F_K$  in  $F_n$  (Slika 16), kotalilo po podlagi, v nasprotnem primeru pa bo drselo. Takšne razmere se pojavijo pri poledenosti vozišča.

Koeficient kotalnega trenja je v manjši meri odvisen tudi od vrste kolesa oziroma pnevmatike ter podlage, tlaka polnitve in hitrosti vožnje.



Slika 17: Faktorji, ki vplivajo na velikost koeficienta trenja

Te odvisnosti so v preteklosti matematično določile različne institucije na eksperimentalni osnovi. Danes se kotalni upor pri različnih vozniških pogojih večinoma računsko ocenjuje s pomočjo kompleksnih modelov obnašanja pnevmatik med vožnjo, ki so integrirani v zahtevne numerične in simulacijske sisteme (npr. MSC – ADAMS).

Kotalni upor pri vožnji vpliva samo negativno in je nezaželen. Zato ga poskušamo čimbolj zmanjšati predvsem z razvojem pnevmatik.

## 7.2 Vpliv zgradbe cestišča na koeficient trenja

Cestišča so izdelana iz različnih materialov (asfalt, beton, pesek, ...) in imajo zato tudi različne koeficiente trenja. Izkaže se, da se po koeficientu trenja med seboj lahko močno razlikujejo tudi cestišča iz enakega osnovnega materiala. Temu je vzrok različna tekstura

posameznega vozišča. Tekstura cestišča je odvisna od grobosti vgrajenega materiala, razporejenosti le-tega ter od ostalih vključkov na površini cestišča. Glede na valovno dolžino jo delimo na štiri teksturne razrede.

Preglednica 6: Nivoji porazdelitve strukture cestne površine po ISO 13473-1

	Geometrijski razred (obravnava dolžina cestišča)	Odstopanje v višini strukture (v vertikalni smeri)	Velikostni red
Mikrostruktura	<0,5mm	1 – 500µm	Kamenčki
Makrostruktura	0,5 – 50mm	0,1 – 20mm	Velikost stika pnevmatike
Megastruktura	50 – 500mm	0,1 – 50mm	Velikost pnevmatike
Neravnost	0,5 – 50m		Cestni odsek

Trenje med pnevmatiko in cestiščem se vzpostavi na dva načina. Prvi način deluje na nivoju mikroteksture. Trenje se vzpostavi s pomočjo medmolekularnih vezi. Te se pojavijo na lokalnih območjih, kjer se pojavi dovolj velik tlak med pnevmatiko in cestiščem, da med molekulami pnevmatike in cestišča nastanejo molekulske vezi, ki preprečujejo zdrs pnevmatike.

Drugi način deluje na principu oblikovnega prenosa obremenitve. Površina pnevmatike se deformira tako, da se neravnine cestišča na nivoju makroteksture vtisnejo v zob pnevmatike. Tako se v pnevmatiki pojavijo sile, ki preprečujejo zdrs, kar pa dejansko ni pravo trenje. Velikost vpliva posameznega načina je odvisen od makroteksture in mikroteksture vozišča, deformabilnosti pnevmatike ter vode in umazanije, ki se zadržujeta na cestišču.

Makrostruktura je pomembna tudi za odvajanje vode iz cestišča, saj vsebuje kanale po katerih odteka. S tem se izboljšuje trenje v primeru mokrega cestišča in preprečuje splavanje oz. akvaplaning.

Megatekstura in neravnine vplivajo predvsem na kotalni upor in na samo sledenje pnevmatike cestišču.

Največji vpliv na torne sposobnosti vozišča ima agregat, saj se nahaja v večini. Ne smemo pa zanemariti tudi veziva, saj ima tudi ta pomemben vpliv na koeficient trenja. Vsak višek veziva nad potrebno količino za normalno oblitje zrna se pri vročih temperaturah pojavlja kot plastična asfaltna zmes, ki zelo zmanjšuje kontakt med pnevmatiko in voziščem.

### **7.3 Stanje pnevmatik**

Na zdrs pnevmatike na cestišču v največji meri vpliva iztrošenost gume, ki se ocenjuje glede na globino kanalov na njeni površini. Nove gume v primerjavi z starimi iztrošenimi pnevmatikami, pri katerih je površina gladka, imajo lahko za 100% večjo oprijemljivost. Do velikih razlik v kvaliteti pnevmatike in s tem seveda boljšem obnašanju na vozišču prihaja tudi pri novih gumah, kar seveda pogojujejo tehnične karakteristike gume.

## 8 OBMOČJE ZASTAJAJOČE VODE

### 8.1 Vozišče izven območja vijačenja ( $q \geq q_{\min}$ )

Debelina vodnega filma na tem območju je praktično neodvisna od vzdolžnega nagiba ceste. Pri spremembi vzdolžnega nagiba ceste se z istim faktorjem spremenita rezultirajoči nagib kot tudi dolžina tokovnice.

V formuli za izračun debeline vodnega filma:

$$D = \frac{0,103 * T^{0,11} * L^{0,43} * I^{0,59}}{S^{0,42}} - T \quad [\text{mm}] \quad (5.1)$$

imata dolžina tokovnice  $L$  in njen nagib  $S$  skoraj enaki potenci, zato je njuno razmerje praktično enako. Dejanske razlike pri rezultirajočih nagibih med 2,5 ( $q=2,5\%$ ,  $s=0\%$ ) in 10% ( $s=7\%$ ,  $q=7\%$ ) so le 1,4 %, kar je glede na natančnost ostalih pogojev na vozišču zanemarljivo malo.

### 8.2 Vijačenje pri zelo majhnih nagibih nivelete

Zelo majhni nagibi nivelete so tisti, kjer pri izvedbi vijačenja pride do polja zastajajoče vode in hkrati do spremembe predznaka vzdolžnega nagiba enega izmed robov vijačenega vozišča. Velikost polja zastajajoče vode je odvisno od izbora velikosti koeficienta spreminjanja vzdolžnega nagiba roba vozišča » $k$ «, s katerim se opredeli minimalni relativni nagib tega roba glede na nagib nivelete. Polmeri, ki pri tem nastanejo, tvorijo koncentrične kroge, znotraj katerih so rezultirajoči nagibi zelo majhni, dolžina odtoka vode pa kratka, ker prevladuje prečni nagib. Zaradi majhnega rezultirajočega nagiba je odtok vode počasen, kar kljub kratkim razdaljam povzroča povečane debeline vodnega filma na vozišču. Akvaplaning se pojavi že pri majhnih količinah padavin.

### 8.3 Vijačenje pri velikih nagibih nivelete

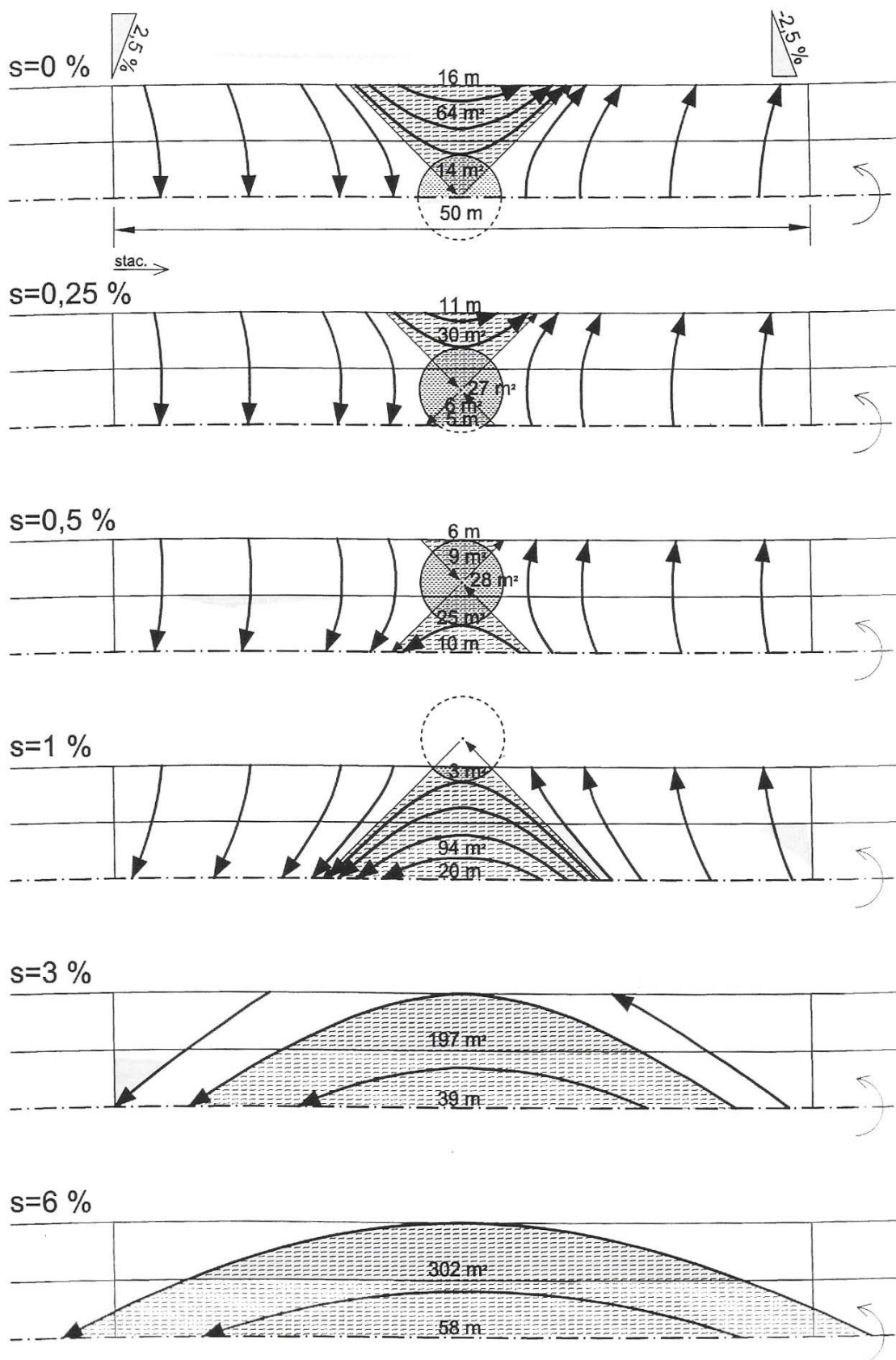
Pri velikih nagibih nivelete nastane problem, ker se lahko zgodi, da niveleta strmejšega roba vozišča preseže maksimalen dovoljeni nagib, ki je predpisan za določen tip ceste. Iz tega sledi, da je potrebno izbrati ustrezen rob, okrog katerega bo potekalo vijačenje in to na način, da je niveleta nasprotnega roba manj strma od osi vijačenja.

Rezultirajoči nagibi v območju vijačenja so veliki, kar povzroča velike hitrosti vode, po drugi strani pa so trajektorije odtoka vode daljše, ker imamo manjše prečne nagibe. Voda teče vzdolž vozišča in prihaja do velikih površin območja povratne vode in na ta način do povečanja debeline vodnega filma na območju, ki je 10m in več oddaljen od prečnega profila s prečnim nagibom 0%.

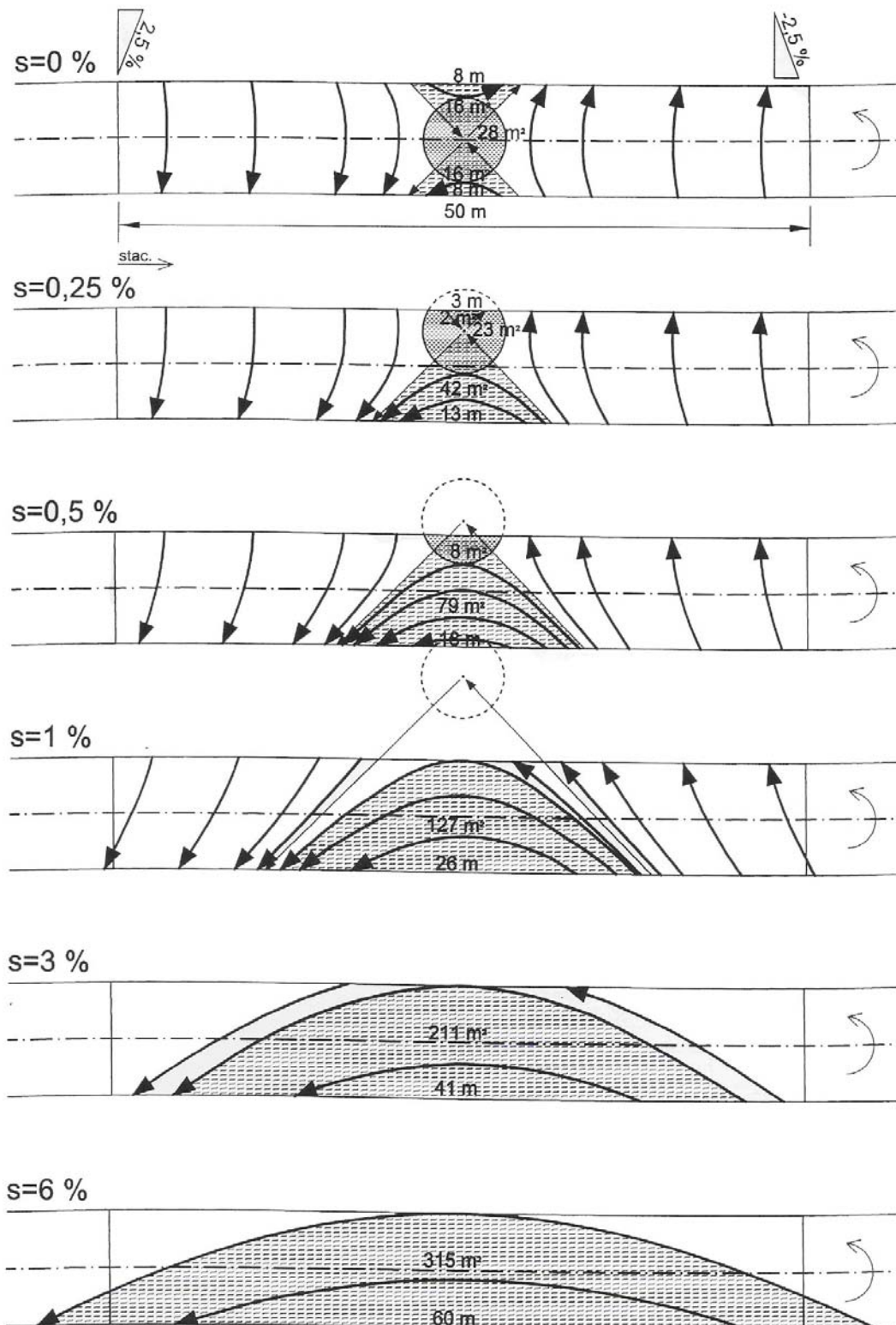
Pri večjih vzdolžnih nagibih izbira osi vijačenja ni več tako pomembna, saj imamo zadosten rezultirajoči nagib, kar povzroči, da voda hitro odteka iz vozišča.

### 8.4 Mehanizem gibanja polja zastajajoče vode

Polje zastajajoče vode je problematično, ker na tem področju voda vedno ostaja in izgine šele z izhlapevanjem. To polje v obliki kroga ima neko svoje središče, ki se nahaja na križišču prevojnne točke vijačenja in tiste vzdolžne linije na vozišču, katere nagib dobi pri tem vijačenju vrednost 0%. Krog lahko spravimo izven vozišča z ustreznim nagibom nivelete. S spreminjanjem vzdolžnega nagiba nivelete, se linija pomika v prečni smeri. Smer pomikanja je odvisna od predznaka spreminjanja nagiba nivelete in smeri sukanja vozišča pri vijačenju. Pozitivni predznak povečanja nivelete pomakne krog zastajajoče vode v smer vrtenja, negativni pa v nasprotno smer. Isto velja tudi za učinek pomika središča polja zastajajoče vode. Tradicionalno velja, da povečanje nagiba nivelete za 0,1% povzroči pomik središča polja zastajajoče vode za 1m. Slike v nadaljevanju prikazujejo pomikanje polja zastajajoče vode za tri različne primere, glede na način vijačenja.

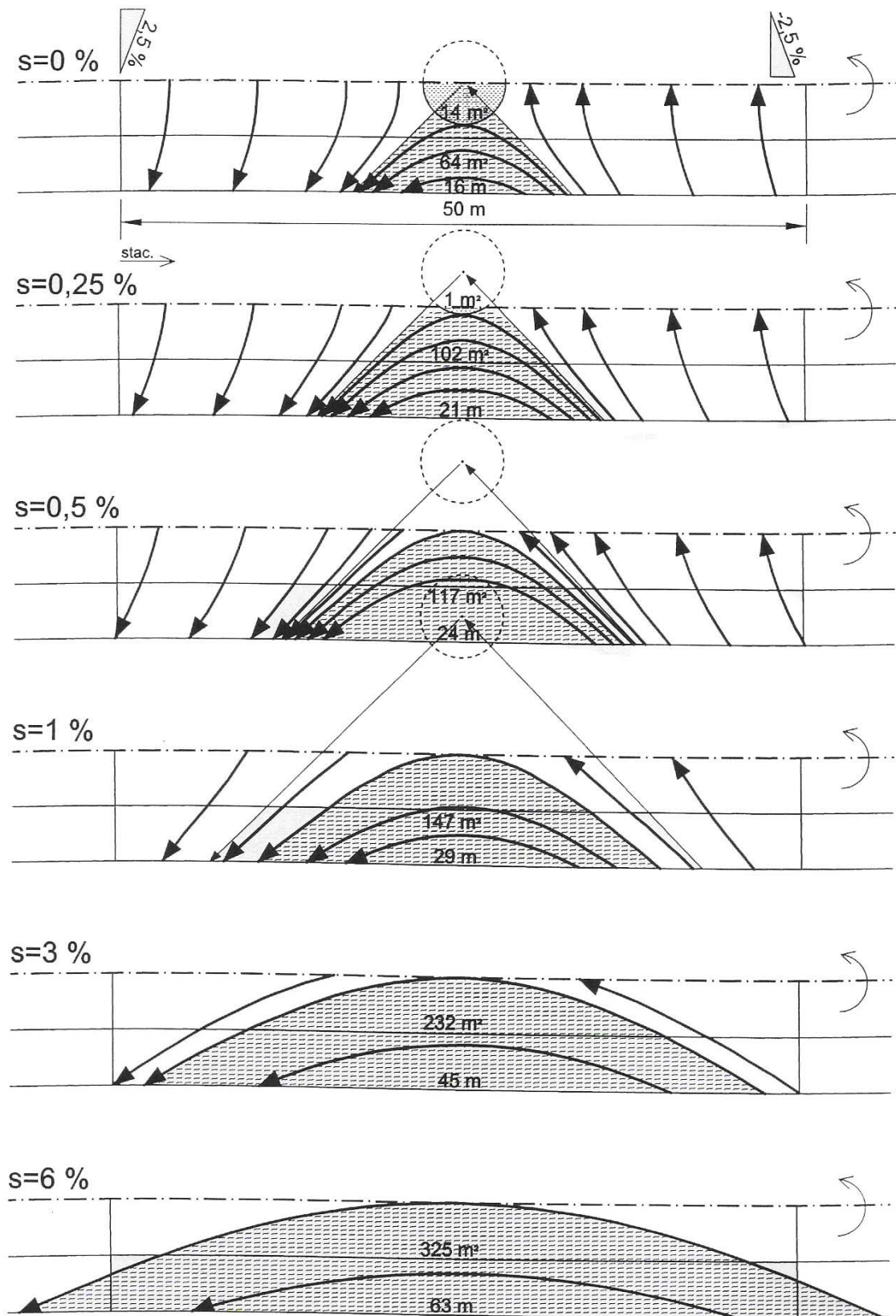


Slika 18: Vijačenje okoli desnega roba



Slika 19: Vijačenje okoli osi





Slika 20: Vijačenje okoli levega roba

## 9 OBMOČJE POVRATNE VODE

To je neka ploskev vozišča, po kateri voda odteka proti nasprotnemu robu vozišča in se nato, zaradi spremembe prečnega nagiba, vrne nazaj na prvotni rob. Meja ploskve je določena z najdaljšo trajektorijo odtoka vode in robom vozišča, od katerega voda odteka in se k njemu vrača. Na koncu te trajektorije, na robu vozišča, je območje, kjer se združi veliko povratne vode in vode s nasprotnega roba, zato je tu debelina vodnega filma najbolj povečana in to je mesto, kjer nastane hidroplaning.

Kadar določamo območje povratne vode, moramo vedno upoštevati celotno širino utrjene površine, tudi odstavní pas. To ni potrebno, kadar so posamezni deli vozišča vzdolžno ločeni glede na smer prečnega nagiba, takrat upoštevamo širino in površino za vsak prečni nagib posebej.

Povratna voda je najbolj problematična, kadar imamo majhne nagibe med 0 in 1%, kar posledično povzroča majhen rezultirajoči nagib in zaradi tega majhne hitrosti vode in počasnejše odvodnjavanje, ter pri velikih nagibih nad 3%, ker se poveča območje povratne vode in kljub večjim rezultirajočim nagibom ter posledično večjim hitrostim, prihaja do povečanja debeline vodnega filma.

Dolžine trajektorij povratne vode so odvisne od širine in vzdolžnega nagiba vozišča ter od koeficienta  $k$ , uporabljenega v ožjem območju vijačenja. Čim manjši je  $k$ , tem daljše je območje nevarno za nastanek akvaplaninga.

## 10 PREPREČITEV AKVAPLANINGA

Največje težave z zadrževanjem vode nastajajo na območjih vijačenja ceste, kjer prihaja do sprememb prečnega nagiba vozišča in je potrebno velikost vzdolžnega nagiba obravnavati kot rezultirajoči vzdolžni nagib, vektorsko sestavljen iz nagiba nivelete in sekundarnega vzdolžnega nagiba.

Podobne težave srečujemo tudi pri priključevanju sekundarnih cest, kjer lahko zaradi neustrezno sprojektiranega odvodnjavanja prihaja do zadrževanja vode na območju priključevanja sekundarne ceste.

Pri umeščanju ceste je ravno tako pomembna tudi višina nivelete, saj je najbolje, da to določimo tako, da omogočamo naravno odvodnjavanje ceste.

Pozorni moramo biti tudi pri prečkanju vodotokov, kjer je potrebno upoštevati hidravlične lastnosti določenega vodotoka in napovedi hidrologov glede visokih voda, tako da nikoli ne pride do konflikta med cesto in naraslim vodotokom.

Poskrbeti pa moramo tudi za odvod vode iz drugih delov vozišča. Z drugimi deli vozišča mislim na odstavne pasove, postajališča, kolesarske steze itd. Glede na vozišče glavne ceste se te površine s ciljem namestitve skupnega vzdolžnega odvodnjavanja (mulda, koritnica) ali višinsko ločijo ali pa se izvede nagib stran od vozišča. Nikoli ne sme priti do odtekanja vode iz teh površin na vozišče in s tem ogrožanja udeležencev v prometu. Tudi za te površine veljajo enake konstrukcijske zahteve, saj moramo vodo čim hitreje spraviti v sistem za odvodnjavanje.

### 10.1 Konstrukcijske zahteve

Prostorsko sliko ceste predstavljajo združene projekcije situacije, vzdolžnega profila in prečnih profilov. Za optimalno rešitev odvodnjavanja ni dovolj, da so skladni konstrukcijski elementi znotraj ene od projekcij, temveč je potrebna medsebojna uskladitev vseh projekcij.

To pomeni, da je potrebno konstruiranje situacijskih elementov ceste vršiti koordinirano glede na vzdolžni profil in obratno.

### **10.1.1 Prečni nagibi**

Ustrezno izbran prečni nagib nam omogoča ustrezno odvodnjavanje, večji kot je, hitreje bo voda odtekla. Poleg tega pa tudi ugodno vpliva na ublažitev sredobežne sile in s tem na ugodnost vožnje.

Velikostni meji prečnega nagiba sta 1% in  $q_{krit}$ . Velikost  $q_{krit}$  je močno odvisna od kritične debeline vodnega filma, ta pa od izbrane vozne hitrosti.

#### **10.1.1.1 Minimalni prečni nagib**

Zagotoviti moramo čim hitrejši odtok padavinske vode k robu vozišča.

Za kvalitetno odvodnjavanje vozišča naj se upoštevajo naslednji minimalni prečni nagibi:

- 2,5% - asfaltno vozišče,
- 2,0% - betonsko vozišče,
- 4,0% - gramozno vozišče.

Odstopanje od teh vrednosti je dopustno le v območju spreminjanja prečnega nagiba med nasprotnosmernima prečnima nagiboma.

#### **10.1.1.2 Maksimalni prečni nagib**

Maksimalno velikost prečnega nagiba pogojuje zdrs mirujočega vozila na cestišču, vrsta ceste (urbana, izvenurbana) in rezultirajoči nagib, pri čemer velja:

- 7,0% - ceste izven naselja in neobzidane ceste v naselju,
- 5,0% - urbane ceste in ulice,
- 5,0% - krajevne ceste (pri hitrostih  $\geq 50$  km/h do 7%).

Povečanje prečnega nagiba ugodno vpliva na ublažitev sredobežne sile in posledično možno večjo hitrost skozi ovinek. Včasih so zaradi tega gradili ceste v nagibu do 14%, v Ameriki pa velja še danes dopustni prečni nagib 12%.

### **10.1.2 Vzdolžni nagibi**

Vzdolžni nagibi naj bi se izvajali čim manjši, pogojuje pa jih izvedba odvodnjavanja, ki je najpomembnejši pogoj, saj vpliva na prometno varnost. Poleg tega pa še vozna dinamika ter estetsko vodenje roba vozišča pri odvodnjavanju.

Vzdolžni in prečni nagib se dopolnjujeta, saj je pomembno pri kakšnem vzdolžnem nagibu izvajamo spremembo prečnega nagiba, ker je od tega odvisen način izvedbe vijačenja. Na območju vijačenja, kjer se prečni nagibi vozišča bližajo vrednosti  $q_i=0$ , ima velikost vzdolžnega nagiba odločilen vpliv na način odtekanja vode iz vozišča. Pri neki svoji velikosti povzroči, da voda po vozišču ne zastaja, ampak odteka. Praktične izkušnje kažejo, da se to zgodi pri velikosti vzdolžnega nagiba približno 1%. Pri vzdolžnem nagibu  $<1\%$  se voda na območju vijačenja ne more umakniti iz vozišča z naravnim padcem, pri  $>1\%$  pa se zaradi podaljšanja trajektorij odvoda močno poveča debelina vodnega filma.

Pri bolj blagih načinih spreminjanja prečnega nagiba je velikost polja zastajajoče vode okoli ničelne točke bistveno večja. Mejna velikost vzdolžnega nagiba se poveča na okoli 2,5%. Ta vrednost je druga vrednost velikosti vzdolžnega nagiba, ki jo je treba upoštevati, ko določamo vrsto in obseg ukrepov na vozišču.

#### **10.1.2.1 Minimalni vzdolžni nagib**

Minimalni vzdolžni nagib  $s_{min}$  je načeloma lahko enak za območja istosmernega prečnega nagiba in za območja, kjer se smer prečnega nagiba menja. Glede odvodnjavanja pa je pametno, da je na območju nasprotnosmernih prečnih nagibov večji vzdolžni naklon kot pri območju istosmernih prečnih nagibov.

### 10.1.2.2 Maximalni vzdolžni nagib

Maksimalne dopustne vrednosti nagiba nivelete  $s_{\max}$  izhajajo iz stabilnosti vozila v pogojih poledice na cesti. V tem primeru je vrednost KDT ( $ft_{\max}$ ) med 0,08 in 0,18 oziroma najpogosteje 0,14. Iz tega sledi, da za zagotovitev celotne prevoznosti na cestah skupine A ne smemo preseči vzdolžnega nagiba 8%, na cestah skupine pa le z vnaprej predvidenimi ukrepi vzdrževanja.

Povečanje teh vrednosti je dovoljeno le v posebno ugodnih klimatskih območjih, kar pa je potrebno določiti v projektu in podati ukrepe za preprečevanje posledic. Tako je treba na zahtevnih klimatskih območjih vrednosti ustrezno zmanjšati.

Maksimalni dopustni nagib nivelete  $s_{\max}$  je odvisen od zasnovalne hitrosti  $V_{\text{zasn}}$  in različne tehnične skupine cest ter je med 8 in 12%.

### 10.1.3 Rezultirajoči nagib

Definicija rezultirajočega nagiba bolj ali manj definira kritična mesta, saj so ta pogojena z velikostjo ali prečnega ali vzdolžnega nagiba. Rezultirajoči nagib je najbolj pomemben pri odvodnjavanju, ker teče voda po vozišču po rezultirajočem nagibu, to je v smeri največjega nagiba in najkrajše poti. Rezultirajoči nagib dobimo z relacijo:

$$q_{\text{rez}}^2 = s^2 + q^2$$

Pri projektiranju se moramo izogibati mestom, kjer bi vrednost rezultirajočega nagiba bila manjša od minimalnih hidravličnih pogojev za odtekanje vode.

Proces vijačenja ceste, torej prehoda prečnega nagiba preko ničelne točke je območje, kjer zaradi majhnih vrednosti prečnih nagibov lahko hitro pride do zastajanja vode na vozišču. Če se na območju vijačenja ni mogoče izogniti majhnim vzdolžnim nagibom, je potrebno za preprečitev akvaplaninga izvesti določene korekcije vozišča (povečanje hrapavosti).

Zlato pravilo glede izbire mesta vijačenja pravi: Območje vijačenja ceste naj ne sovпада z območjem vertikalne zaokrožitve nivelete.

Maksimalna vrednost rezultirajočega nagiba naj bi bila 10%, minimalna vrednost pa mora biti večja od hidravličnega padca za določeno površino.

#### **10.1.4 Pomik osi vijačenja**

Na ta način izločimo polje zastajajoče vode. Pomikanje osi velikostno ni omejeno, os vijačenja pa se lahko nahaja na vozišču ali izven njega. Os po profilu premaknemo toliko, da se polje zastajajoče vode v celoti umakne iz vozišča. V katero smer (levo, desno) polje pomakniti, je odvisno od predznaka vzdolžnega nagiba nivelete (vzpon, padec) in sistema S-krivine (desno-levo, levo-desno), pri čemer velja, da je pomikanje polja v obeh primerih linearno in da je s pomikom osi vijačenja za 1m dosežen isti učinek kot s spremembo nagiba nivelete na prvotni osi za k.

Da se predznak nagiba katerekoli vzdolžne linije vozišča ne bi menjal, je treba pomik osi vijačenja v prečnem profilu izvesti:

- v sistemu D/L-vzpon ali L/D-padec v smeri od desnega proti levemu robu vozišča oziroma preko njega in
- v sistemu D/L-padec ali L/D-vzpon v smeri od levega proti desnemu robu vozišča oziroma preko njega.

#### **10.2 Gradbeno-tehnični ukrepi**

Gradbeno-tehnični ukrepi so:

- žlebičenje obrabne plasti,
- vgraditev obrabne plasti iz drenažnega asfalta brez dodatnega dreniranja podlage (DA),
- vgraditev obrabne plasti iz drenažnega asfalta in drenirane podlage (DA + dodatno odvodnjavanje).

Kakšen gradbeno-tehnični prijem uporabiti, je odvisno od prečnih in vzdolžnih nagibov na določenem odseku cestišča. Območja uporabe gradbenotehničnih ukrepov nam prikazuje naslednja tabela.

Preglednica 7: Območja uporabe različnih gradbenotehničnih ukrepov

	Vzdolžni nagib			
	do 1%	od 1% do 2,5%	nad 2,5%	
Prečni nagib		Tok vode v smeri vožnje	Tok vode proti smeri vožnje	
$-q_{krit}$ do $-1,0$	DA	Žlebičenje	DA	Brez ukrepa
$-1,0$ do $+1,0$	*DA + dodatno odvodnjavanje (simetrično)	Žlebičenje	DA	DA
$+1,0$ do $+q_{krit}$	DA	Žlebičenje	DA	Brez ukrepa

\* Dodatno odvodnjavanje pod drenažnim asfaltom je zahtevano le, kadar pride na območju vijačenja do polja zastajajoče vode

Opomba:  $q_{krit}$  se izbira glede na vrsto ceste in njeno širino in je predstavljena v spodnji tabeli

Preglednica 8: Kritični prečni nagibi in pripadajoča krit. dolžina območja vijačnega prehoda

Širina vozišča	Kritična debelina vodnega filma	Kritični prečni nagib	Stopnja intenzivnosti vijačenja [%/m]		
			k=0,10	k=0,06	k=0,03
$b_{voz}$ [m]	$D_{max}$ [mm pri $V_i$ [km/h]]	$q_{krit}$ [%]	Dolžina območja s krit. debelino vodnega filma [m]		
			$L_{0,10}$	$L_{0,06}$	$L_{0,03}$
8,0	AC 1,75 pri 120	2,00	40,0	66,0	132,0
10,0	AC 1,75 pri 120	2,50	50,0	83,3	166,7
8,0	HC 2,50 pri 100	1,00	20,0	33,0	66,0
10,0	HC 2,50 pri 100	1,25	25,0	41,7	83,3

### 10.2.1 Žlebičenje cestišča

Žlebičenje se uporablja na AC-odsekih, pri katerih je nagib nivelete takšen, da še ne prihaja do polja zastajajoče vode. Žlebičenju se izogibamo pri vzdolžnih nagibih, ki so  $>2,5\%$ , ker v tem primeru dobimo velika območja povratne vode in prihaja do velikih debelin vodnega



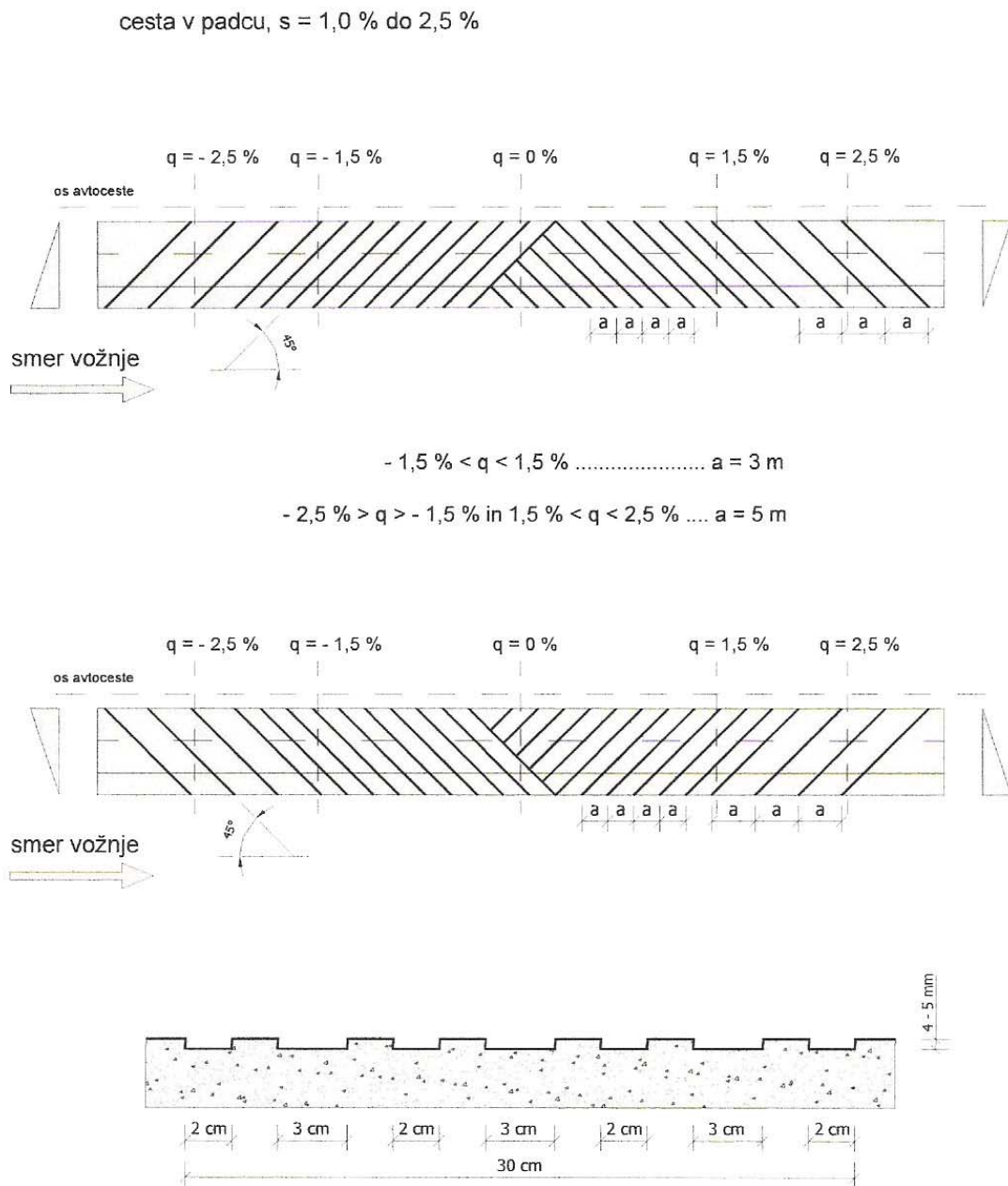
filma. Z žlebiči te vode ne moremo odvesti, zato prihaja do prelivanja in dodatne odebelitve vodnega filma na vozišču. Zasnova žlebičenja mora biti določena s projektom, če pa gre za manjša odstopanja, pa so sprejemljive tudi tipične rešitve.

Žlebičenje se izvaja pod kotom  $45^\circ$  glede na smer vožnje, proti nižjemu robu vozišča. Razmik med posameznimi pasovi je 2 do 5m.



Slika 21: Vrezovanje žlebičev v površino vozišča

Pasovi žlebičenja so široki 30cm in so globine 3 do 6mm. Problem pri žlebičenju lahko nastane, kadar je rob mulde višje od cestišča. Takrat moramo rob dodatno žlebičiti, s čimer se preusmeri odtekanje vode v jašek. Po končanem žlebičenju vozne površine se opravi strojno čiščenje odstranjenega materiala. V zimskih razmerah se v žlebičih nabira sol in slana voda, kar zmanjšuje nevarnost poledice in s tem se prometna varnost povečuje.



Slika 22: Detajl žlebičenja na vozišču

Dobre in slabe lastnosti žlebičenja:

- Na kritičnih območjih vijačenja povečujejo odtekanje vode in na ta način skrajšajo čas nevarnosti akvaplaninga.
- Pri večjem nalivu in večjih nagibih nivelete vozišča voda preplavlja zareze in se preliva v naslednje. Zaradi tega prelivanja iz zareze v zarezo se pojavi val, ki predstavlja lokalno povečano debelino vodnega filma, ki je večja od ostalega površinskega toka.
- Pri vozniku ustvarja ugoden psihološki učinek, saj se voznik počuti varnejšega, kar pa ima lahko pri nekaterih voznikih tudi negativni učinek, saj ta občutek varnosti povzroča večanje hitrosti.
- Vožnja preko žlebičev povzroča ropot.
- Kljub neravninam na vozišču žlebiči ustvarjajo enakomeren padec in omogočajo enakomeren odtok vode iz vozišča.
- Vprašljiva je časovna obstojnost zarez, saj težka vozila v območju kolesnic povzročajo deformacije na cestišču. Pri globokih kolesnicah lahko nastanejo podolžni pasovi z prečnim nagibom 0% ali celo z nasprotnosmernim.
- Ustvarja koncentriran odtok vode s povečanjem gladine odtoka (odtok s prosto gladino).

### **10.2.2 Obrabna plast drenažnega asfalta brez dodatnega dreniranja podlage**

Uporabljamo, kadar imamo dovolj velike nagibe vozišča, saj je takrat odtekanje vode skozi plast drenažnega asfalta dobro. Podlago ni potrebno drenirati, razen v primerih, ko imamo ob straneh robnike.

Priporočljivo je, da se izvaja tako, da na začetku in na koncu območja z drenažnim asfaltom vgradimo drenažno cev, saj nam le-ta zmanjša možnost preplavljanja vozišča izza zaključka ter na začetku drenažne plasti.

Če želimo dodatno izboljšati dreniranje, lahko tudi v tem primeru vgradimo cevi, ki so lahko na konstantni razdalji med seboj, in sicer 25 do 30m. Razmik je lahko konstanten zaradi zadostnega vzdolžnega nagiba.

### **10.2.3 Obrabna plast iz drenažnega asfalta in drenirana podlaga**

Drenažni asfalt uporabljamo na kritičnih območjih za nastanek akvaplaninga. Dodatno dreniranje podlage se uporablja tam, kjer so prečni nagibi manjši od 1%.

Dreniranje se izvaja z vgradnjo ustreznih drenažnih cevi v vrhnji del vezane zgornje nosilne plasti voziščne konstrukcije. Za cevi se ponavadi uporabljajo perforirani aluminijasti profili 40/30/2,5mm, obstajajo pa tudi drugi materiali in načini izvedbe, za katere pa je potrebno drenažno uspešnost in neškodljivost za trajnost in nosilnost voziščne konstrukcije predhodno dokazati.

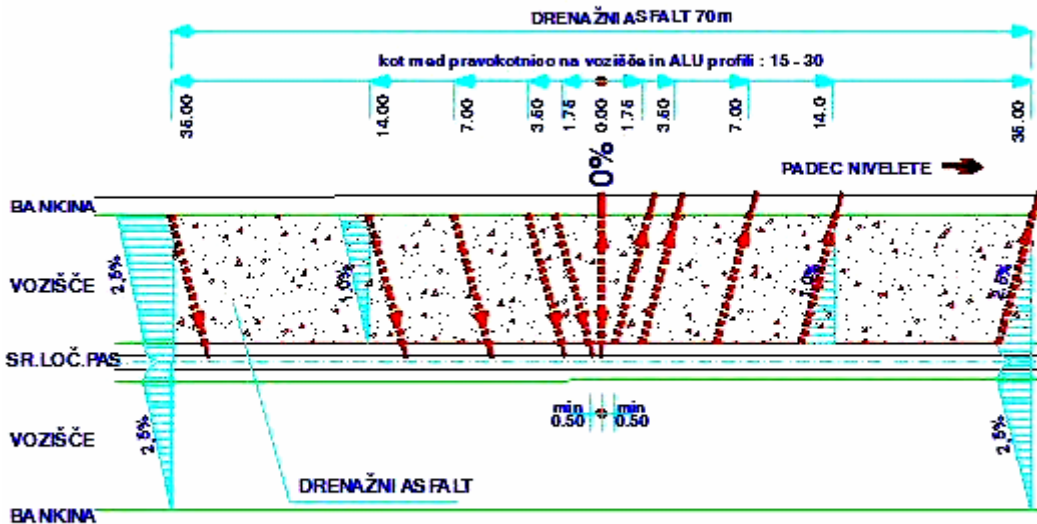
Drenažne cevi vgrajujemo prečno na cestišče in na način, da so proti prevojni točki, kjer je prečni nagib 0%, vse bolj zgoščene. Cevi se praviloma vgradijo pod kotom 15°, po potrebi zaradi zagotovitve nagiba drenaže pa tudi do 30°. Žlebove, v katerih bodo za dreniranje podlage vgrajene aluminijaste cevi, je potrebno zarezati in izsekati iz vezane zgornje nosilne plasti v širini 4,5cm in globini približno 7cm, praviloma vzporedno z niveleto, vendar z minimalnim vzdolžnim nagibom 0,5%. Profile postavljamo v žlebove s pomočjo lesenih zagozd, tako da je daljša stranica profila vertikalna in najvišji del profila poravnan z vrhom VZNP. ALU-profile utrdimo z elastično zmesjo, tako da je prostor izpod profila in ob stranicah zapolnjen do vrha. Medtem, ko zalivamo, pa odstranimo lesene zagozde.

ALU-profilu morajo imeti zgornjo 30mm široko stranico perforirano z okroglimi odprtinami  $\varnothing$  6mm na vsakih 20mm. Preden izvedemo zatesnitev podlage, je potrebno stranico profila zaščititi z vročinsko odpornim lepilnim trakom ali letvo. Zaščito je pred izdelavo plasti drenažnega asfalta potrebno odstraniti.

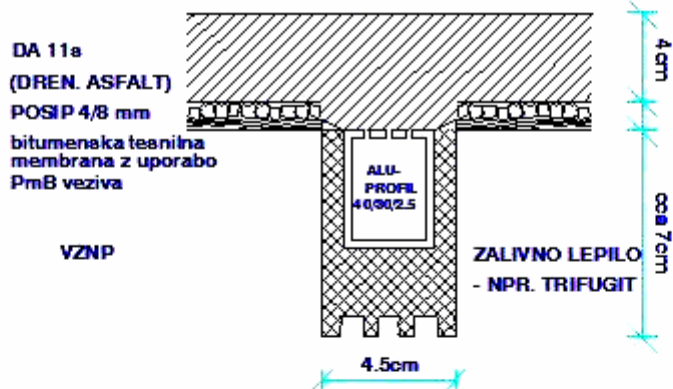
Pri vgradnji in zaščiti ALU-profila je treba predhodno očiščeno površino VZNP zatesniti z bitumensko tesnilno membrano z uporabo PmB veziva v količini približno 2,0kg/m<sup>2</sup>.

Na membrano je potrebno izvesti posip s karbonatno frakcijo 4/8mm, ki jo je treba uvaljati in prebitek odstraniti z motorno krtačo. Kamnita zrna za posip morajo biti v asfaltnem obratu odprašena in obvita z dodatkom bitumenskega veziva v količini 0,3m-%. Drenažni asfalt na območju vijačenja mora biti vgrajen v debelini 4cm istočasno z obrabno zaporno plastjo preostalega dela ceste, pri čemer mora biti prehod med različnima zmesema izveden zvezno. Na zgornji strani vozišča morajo biti žlebovi in ALU-profilu vgrajeni na odaljenosti 0,5m od roba vozišča oziroma utrjene površine, na spodnji strani pa zaključeni na brežini nasipa ali jarka. Del profila izpod bankine, ki ne sme biti perforiran, mora biti obbetoniran.

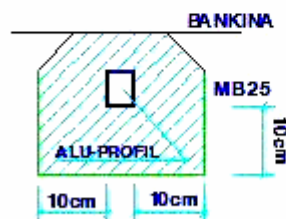
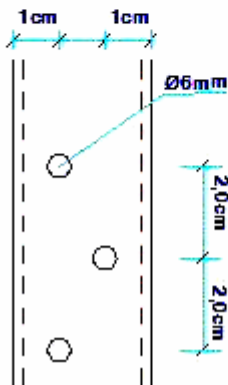
## VIJAČENJE PRI VZD. NAGIBU < 1%



### DETAJL POLAGANJA ALU PROFILA POD ASFALTOM



### DETAJL PERFORACIJE      DETAJL POLAGANJA ALU PROFILA POD BANKINO



Slika 23: Detajl izvedbe drenažnega asfalta z ALU-profilii

Pri opazovanju že vgrajenih sistemov so prišli do sledečih spoznanj:

- Pri zelo močnem nalivu se na drenažni plasti asfalta voda ni nabirala.
- Voda iz profilov izteka v zelo močnem curku.
- Količina iztečene vode je enaka količini padavin.
- Začetek in konec območja, ki sta odvisna od več parametrov, nista definirana.
- Je neobčutljiv za morebitne neravnosti pri vgradnji vozne površine in za kolesnice.
- Drenažna sposobnost in razdalja med ALU-profilu nista definirani.

## 11 ODVISNOST AKVAPLANINGA OD ŠIRINE VOZIŠČA

### 11.1 Osnovni parametri, ki vplivajo na debelino vodnega filma

Debelina vodnega filma je odvisna od intenzivnosti naliva, hrapavosti površine, dolžine linije odtoka ter njenega nagiba. Vse te odvisnosti so v formulo združili v Avstralskem priročniku za načrtovanje in odvodnjavanje cest:

$$D = \frac{0,103 * T^{0,11} * L^{0,43} * I^{0,59}}{S^{0,42}} - T \quad [\text{mm}]$$

D – debelina vodnega filma [mm]

T – hrapavost vozišča [mm]

L – dolžina linije odtoka [m]

I – intenzivnost naliva [mm/h]

S – nagib linije odtoka [%]

### 11.2 Vrednosti parametrov v slovenskem prostoru

- Intenzivnost padavin:

Preglednica 9: Merodajna jakost naliva za določene vrste cest

Vrsta ceste	Projektna hitrost [km/h]	Pogostost naliva [let]	Jakost naliva [l/sek, ha]	Jakost naliva [mm/h]
Daljinska	80 – 130	25	350	125
Povezovalna	60 – 90	10	220	79
Zbirna	40 – 70	5	170	61
Dostopna	40 – 60	1	130	47

- Hrapavost T je različna za različne materiale vozišča. Za izračune se izbere reprezentativna vrednost  $T = 0,4$ , ki nam daje optimalne rezultate. To pomeni, da je ta hrapavost tista najneugodnejša, pri kateri so debeline vodnega filma največje.



- Nagibi linije odtoka S so različni ( $q_{\min} = 2,5\%$ ).
- Običajni maksimalni vzdolžni nagib na avtocesti je 4%, minimalni pa 0,3%.
- Kritične debeline vodnega filma.
- Kritična debelina vodnega D pri 100km/h = 2,0 do 2,5mm  
     pri 120km/h = 1,5 do 2,0mm  
     pri 80km/h = 3,5 do 4,0mm  
     pri 60km/h = 8,0 do 12mm

Debeline vodnega filma so informativne in se razlikujejo glede na različne izračune (Kalender, Gegenbach, ...).

### 11.3 Tipski prečni profili na slovenskih cestah

Preglednica 10: Tipski prečni profili (vir: 39 člen pravilnika o projektiranju cest)

Vrsta ceste	Projektna hitrost [km/h]	Vozni pasovi [m]	Robni pasovi [m]	Širina vozišča [m]	Širina sr.pasu [m]	Širina bankine [m]	TPP [m]
AC	130	4 x 3,75	2 x 0,50 2 x 2,50	2 x 10,50	4,00	2 x 1,00	27,00
AC	110	4 x 3,50	2 x 0,50 2 x 2,50	2 x 10,00	4,00	2 x 1,00	26,00
HC	110	4 x 3,50	2 x 0,50 2 x 2,50	2 x 10,00	2,00	2 x 1,00	24,00
HC	90	4 x 3,50	2 x 0,50	2 x 8,00	2,00	2 x 1,00	20,00
GC	100	2 x 3,50	2 x 0,50	8,00	/	2 x 1,50	11,00
GC	80	2 x 3,25	2 x 0,25	7,00	/	2 x 1,25	9,50
GC	90	2 x 3,50	2 x 0,25	7,50	/	2 x 1,50	10,50
GC	70	2 x 3,00	2 x 0,25	6,50	/	2 x 1,00	8,50
RC	80	2 x 3,25	2 x 0,25	7,00	/	2 x 1,25	9,50
RC	60	2 x 2,75	2 x 0,25	6,00	/	2 x 1,00	8,00
RC	70	2 x 3,00	/	6,00	/	2 x 1,00	8,00

RC	50	2 x 2,50	/	5,00	/	2 x 1,00	7,00
LC	60	2 x 2,75	/	5,50	/	2 x 1,00	7,50
LC	40	2 x 2,50	/	5,00	/	2 x 0,75	6,50
LC	60	2 x 2,75	/	5,50	/	2 x 0,75	7,00
LC	40	2 x 2,50	/	5,00	/	2 x 0,75	6,50
LP	50	2 x 2,50	/	5,00	/	2 x 0,75	6,50
LP	30	2 x 2,00	/	4,00	/	2 x 0,75	5,50
MP	50	2 x 2,00	/	4,00	/	2 x 0,75	5,50
MP	30	1 x 3,50	/	3,50	/	2 x 0,75	5,00

Prečni profil ceste sestavljajo vozni pasovi, dodatni prometni pasovi, robni in odstavni pas, bankina, koritnica z bermo, pločnik s površino za kolesarski promet, cestni jarek, rob konstrukcije cestnih objektov, prometna signalizacija ter zaščitne konstrukcije ob vozišču. Dimenzija tipskega prečnega profila se določi za vrsto ceste, prometno obremenitev in projektno hitrost.

Vodo moramo v naprave za odvodnjavanje spraviti iz vseh površin. Nikoli ne sme priti do odtekanja vode iz teh površin na vozišče in s tem ogrožanja udeležencev v prometu.

#### **11.4 Vzdolžni nagibi pri različnih širinah cestišča, ki zadostujejo za umik polja zastajajoče vode iz cestišča**

Za dobro odvodnjavanje je najpomembnejša izbira nivelete in osi vijačenja. S pravilno izbiro, lahko že z majhnimi nagibi krog zastajajoče vode premaknemo iz vozišča, oziroma v naprave za odvodnjavanje, iz katerih pa se voda v nobenem primeru ne sme vrniti nazaj na vozišče.

V tabeli so predstavljeni zadostni nagibi, pri katerih polje zastajajoče vode steče iz vozišča pri vijačenju okrog desnega roba, sredine in levega roba vozišča na območju od 2,5% do -2,5% prečnega nagiba. Obravnavan je primer za vijačenje iz pozitivnega v negativni prečni nagib pri pozitivni niveleti, ki je ena izmed štirih možnih variant. Ostale variante so še:

- vijačenje iz pozitivnega v negativni prečni nagib pri negativni niveleti,

- vijačenje iz negativnega v pozitivni prečni nagib pri pozitivni niveleti,
- vijačenje iz negativnega v pozitivni prečni nagib pri negativni niveleti.

Vse te variante so si med seboj podobne, tako da je za predstavitev rezultatov dovolj le ena. Velikost polmera in posledično površine polja zastajajoče vode je odvisna od izbora velikosti koeficienta spreminjanja vzdolžnega nagiba roba vozišča [k], s katerim se opredeli minimalni relativni nagib tega roba glede na nagib nivelete. Ponavadi je velikost koeficienta 0,1[%/m]. Sprememba nagiba nivelete za 0,1% pomeni, da se središče polja pomakne za 1m. Pri velikosti  $k=0,1$  dobimo polje zastajajoče vode z radijem 3m in površino  $28,27\text{m}^2$ . Koeficient k se v nekaterih primerih zaradi estetskih vzrokov lahko zmanjša na vrednost 0,06 ali celo 0,03. Zmanjšanje koeficienta ima za posledico povečanje radija in s tem površine polja zastajajoče vode. Za faktor 0,06 je radij 5m in površina  $78,54\text{m}^2$ , za faktor 0,03 pa je radij 10m in površina  $314,2\text{m}^2$ . Iz tega sledi, da manjši kot je k, tem daljše je območje nevarno za nastanek akvaplaninga.

Preglednica 11: Zadostni vzdolžni nagibi za različne širine cest pri katerih se polje zastajajoče vode pomakne iz vozišča

<b>k= 0,1 [%/m]</b>	<b>Nagib, pri katerem polje zastajajoče vode zdrsne iz cestišča</b>		
<b>Širina vozišča</b>	<b>Vijačenje okoli levega roba</b>	<b>Vijačenje okoli desnega roba</b>	<b>Vijačenje okoli osi</b>
<b>3,0</b>	0,30	0,60	0,45
<b>4,0</b>	0,30	0,70	0,50
<b>5,0</b>	0,30	0,80	0,55
<b>6,0</b>	0,30	0,90	0,60
<b>7,0</b>	0,30	1,00	0,65
<b>8,0</b>	0,30	1,10	0,70
<b>9,0</b>	0,30	1,20	0,75
<b>10,0</b>	0,30	1,30	0,80
<b>11,0</b>	0,30	1,40	0,85
<b>12,0</b>	0,30	1,50	0,90

Pri vzdolžnem nagibu 0% je pri vijačenju okoli levega roba polje zastajajoče vode na levem robu vozišča, pri vijačenju okoli desnega na desnem robu pri vijačenju okoli osi, pa je polje točno na sredini, saj sta niveleti robov enako veliki in nasprotno predznačeni.

Pri majhnih vzdolžnih nagibih je značilno, da so rezultirajoči nagibi v območju vijačenja zelo majhni, dolžine odtokov vode pa kratke, ker prevladuje prečni nagib. Čeprav so dolžine kratke, prihaja do povečanja debeline vode, saj je odtok vode zaradi majhnih nagibov počasen. Pri večjih vzdolžnih nagibih pa so rezultirajoči nagibi večji, zato je odtok vode hitrejši, podaljša pa se pot vode, saj voda teče zaradi manjšega prečnega nagiba vzdolž vozišča. Pri vzdolžnih nagibih, večjih od 3%, izbira osi vijačenja ne vpliva več, saj je rezultirajoči nagib zadosten, da voda hitro odteka iz vozišča.

Iz prejšnje tabele je razvidno, da lahko s pravilno izbiro vijačenja zagotovimo izločitev polja zastajajoče vode z vozišča že z vzdolžnim nagibom 0,3%. Rezultati tabele se lahko na enostaven način prevedejo tudi za vrednosti  $k=0,06$  in  $k=0,03$ .

## 12 ZAKLJUČKI

Voda na vozišču nam predstavlja veliko nevarnost, ker povzroča nastanek pojava hidroplaninga. Pomembno je, da zagotovimo čim hitrejši odtok vode s cestišča, da je debelina vodnega filma čim manjša. Le ta je odločilna za varnost vožnje. Kadar imamo veliko debelino vodnega filma in majhno težo vozila ter neustrezno drenažno sposobnost vozne površine in pnevmatike nastane pod naležno plastjo pnevmatike plast vode, ki pnevmatiko pri večjih hitrostih popolnoma loči od vozne površine in pride do zdrsa vozila. Za različne hitrosti so definirane različne kritične debeline vodnega filma. Za nastanek akvaplaninga so najbolj kritična območja pri spremembah prečnega nagiba, zlasti pri majhnih vzdolžnih nagibih. Na območju kjer je prečni nagib nič (prevojnina točka) prihaja do zastajanja vode in s tem do velikih debelin vodnega filma. Ta pojav imenujemo polje zastajajoče vode. Ta problem lahko rešimo že v fazi projektiranja in sicer z ustreznim minimalnim vzdolžnim nagibom pri katerem je odtekanje vode po površini in napravah za odvodnjavanje še mogoče. Pomembna je tudi izbira nivelete in osi vijačenja, saj s pravilno izbiro pomaknemo območje zastajajoče vode izven vozišča in preprečimo nastanek akvaplaninga. Bistveno je, da se ta voda ne vrne nazaj na vozišče ampak steče v naprave za odvodnjavanje. Drugi problem je problem povratne vode, ki pa se ga ne da rešiti v fazi projektiranja, temveč potrebujemo dodatne gradbene ukrepe, ki so opisani v poglavju 10.2. Nekateri ukrepi so bolj, nekateri pa manj uspešni in jih je potrebno še raziskati in izboljšati.

Pojavu akvaplaninga so najbolj izpostavljene avtoceste, oziroma ceste, kjer so širine vozišča in s tem trajektorije odtoka vode velike. Istočasno pa so na teh cestah velike hitrosti. Zaradi velike hitrosti je stik oziroma trenje med pnevmatiko in voziščem majhno in hitro lahko pride do zdrsa vozila s cestišča. Na ta način lahko pride do hudih prometnih nesreč, tudi s smrtnim izidom. Na cestah nižjih kategorij hitrosti niso tako velike, zato majhne debeline vode ne vplivajo na stabilnost vozila. Manjše so tudi hitrosti in na ta način tudi manjše posledice nesreč.

## VIRI

Ajdič, M., Brenčič, M., Ločniškar, A., Petkovšek, A., Prestor, J., Žmavc, J. 1999. Smernice za določitev načina zaščite podzemne vode na območju avtoceste. Ljubljana, DARS: 20 str.

Andjus, V. & all. 1987. Odvodnjavanje puteva i gradskih saobraćajnica OP'87. seminarsko gradivo, GF Univerziteta u Beogradu, Beograd.

Ceste. 2003. Zapiski s predavanj, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 32 str.

Grogger, H. and Weiss, M. 1996. "Calculation of the Three-Dimensional Free Surface Flow Around an Automobile Tire", Tire Science and Technology Vol.24, No.1, 39 str.

Grogger, H. and Weiss, M. 1997. "Calculation of Hydroplaning of a Deformable Smooth-Shaped and Longitudinally-Grooved Tire", Tire Science and Technology Vol.25, No.4, 265 str.

Rakovec, J., Vrhovec, T. 1998. Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Ljubljana: 242 str.

Juvan, A. 1996. Smernice za projektiranje javnih cest in njihovih elementov s stališča zagotavljanja prometne varnosti in ekonomičnosti njihove gradnje. Ljubljana, Ministrstvo za promet in zveze Republike Slovenije DRSC – Direkcija RS za ceste 1996.

Juvanc, A., Jan, A., Juvan Šinkovec, K., Podgoršek, M., Potočnik D. 2003. Navodila za načrtovanje in tehnično izvedbo vijačnih prehodov na cestah. Ljubljana, DDC, Družba za svetovanje in inženiring: 46 str.

Podgoršek, M. 1999. Voznodinamični odzivi in nastanek polja zastajajoče vode na območju vijačenja. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Prometno tehniška smer: 59 str.

Pravilnik o odvodnjavanju in čiščenju padavinske vode z javnih cest. UL RS št 32/93, 44/95.

Pravilnik o projektiranju cest,  
<http://www.lgb.si/predpisi/PPC.htm>, (november 2005).

Projektiranje cest. 2004. Zapiski s predavanj, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG: 45 str.

Queensland Government. Department of **Main Roads**. October 2002. Road Drainage Design Manual, Chapter 4 – Design.

[http://www.mainroads.qld.gov.au/MRWEB/prod/CONTENT.NSF/0/f4fda7a02f2bec664a256be4001d4984/\\$FILE/chapter%204.pdf](http://www.mainroads.qld.gov.au/MRWEB/prod/CONTENT.NSF/0/f4fda7a02f2bec664a256be4001d4984/$FILE/chapter%204.pdf) (14.12. 2005).

Queensland Government, Department of Main Roads, October 2002, Road Drainage Design Manual, Chapter t – Worked examples,

[http://www.mainroads.qld.gov.au/MRWEB/prod/CONTENT.NSF/0/f4fda7a02f2bec664a256be4001d4984/\\$FILE/chapter%207.pdf](http://www.mainroads.qld.gov.au/MRWEB/prod/CONTENT.NSF/0/f4fda7a02f2bec664a256be4001d4984/$FILE/chapter%207.pdf) (14.12. 2005).

Roy Spillane. 2003. Reducing potencial for Aquaplaning. Planning and Design Symposium april 2003. Queensland Department of Main Roads: 10 str.

TSC 03.380 - Odvodnjavanje cest (delovni osnutek). november 2003. Ljubljana: 83 str.  
Zbornik referatov / 7. slovenski kongres o cestah in prometu. [20.-22.] oktober 2004.  
Portorož. DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije (v sodelovanju z društvi cestnih in prometnih strokovnjakov, uredil Matija Vilhar). Ljubljana:1239 str.

Žmavc, J. 1997. Gradnja cest – voziščne konstrukcije. DRC – Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani.