

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*



Podiplomski program Gradbeništvo  
Hidrotehnična smer

Kandidat:

**Tadej Markič**

## **Stabilizacijski objekti v vodotokih**

**Magistrska naloga št. 198**

**Mentor:**  
prof. dr. Franc Steinman

**Somentor:**  
prof. dr. Matjaž Mikoš

Ljubljana, 22. 2. 2008



Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*

Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
fgg@fgg.uni-lj.si



**PODIPLOMSKI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA**

**MAGISTRSKI ŠTUDIJ  
HIDROTEHNIČNA SMER**

Kandidat:

**TADEJ MARKIČ, univ.dipl.inž.grad.**

## **Stabilizacijski objekti v vodotokih**

Magistrsko delo števil.: 198

## **Stabilisation structures in watercourses**

Master of Science Thesis No.: 198

**Mentor:**  
prof. dr. Franci Steinman

**Predsednik komisije:**  
izr. prof. dr. Matjaž Četina

**Somentor:**  
prof. dr. Matjaž Mikoš

**Član:**  
prof. dr. Bojan Majes

Ljubljana, 22. februar 2008



## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Spodaj podpisani Tadej MARKIČ, univ. dipl. inž. grad., z vpisno številko 26300151, rojen 11. 08. 1953 v Ljubljani izjavljam, da sem avtor magistrske naloge z naslovom:

Stabilizacijski objekti v vodotokih.

S svojim podpisom izjavljam, da:

- je predloženo magistrsko delo izključno rezultat mojega lastnega raziskovalnega dela,
- sem poskrbel, da so vsa dela avtorjev, ki sem jih uporabljal v predloženem delu , navedena in citirana v skladu s fakultetnimi navodili,
- sem poskrbel, da so vsa dela avtorjev, ki sem jih uporabljal v predloženem delu , navedena v seznamu virov v skladu s fakultetnimi navodili,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del, bodisi v obliki citata, bodisi v obliki skoraj dobeseidnega parafraziranja, bodisi v grafični obliki, s katerimi so tuje misli oziroma ideje predstavljene kot moje lastne – kaznivo dejanje po zakonu (Zakon o avtorstvu in podobnih pravicah, Ur. l. RS, št. 21/95).
- se zavedam posledic, ki jih dokazano plagiatorstvo lahko predstavlja za predloženo delo in za moj status na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo.
- izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz magistrske naloge za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Ljubljana, 15. 02. 2008

Podpis avtorja: Tadej Markič univ. dipl. inž. grad.

## **IZJAVE O PREGLEDU NALOGE**

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

UDK: 556.12:627.4/.5(043.3)

Avtor: Tadej Markič

Mentor: prof. dr. Franc Steinman

Somentor: prof. dr. Matjaž Mikoš

Naslov: Toge zgradbe v in ob vodotokih

Obseg in oprema: 248 str., 31 pregl., 79 sl., 14 graf.

Ključne besede: hidravlika, hudournik, padavine, prelivna polja, regulacija (urejanje) vodotokov, struga, voda, vodni skok, toga zgradba, prečni prag, podporni zid

### **IZVLEČEK**

V nalogi so obdelane toge zgradbe v in ob vodotokih. Njihova osnovna naloga je ohranjati stabilnost nosilnega telesa prometnice. Pri zagotovitvi prostora za prometnice, se mora predvideti zadostni pretočni prerez vodotoka. Najvažnejša je izbira pravega objekta ob izpolnitvi razumnih zahtev vseh uporabnikov prostora. V primeru stika prometnice in struge le na krajšem odseku, je primernejše izbrati vzdolžno konstrukcijo, ki bo medsebojno ločila strugo in prometnico. Ob daljšem skupnem poteku prometnice in struge pa je največkrat ugodneje urediti strugo in prilagoditi potek prometnice novo oblikovanemu terenu z uporabo prečnih zgradb. Prečne zgradbe stabilizirajo dno vodotoka na izbrani niveleti. V nalogi so zbrane rešitve in pristopi različnih avtorjev. Z uporabo njihovih rešitev se lahko predvidi potek struge tako, da se zmanjša višinska razlika med prometnico in strugo. Ob manjši višinski razliki pa se lahko namesto podporne konstrukcije zgradi zemeljski nasip. Ravno tako se sanacija izpodkopanih temeljev lahko zagotovi s prečnimi zgradbami in posledično ponovno zasutje temeljev z dvigom nivelete struge. Izbira ugodnejše konstrukcije temelji na primerjavi medsebojnih prednosti in pomanjkljivosti vzdolžnih oziroma prečnih zgradb. Ob delnem upoštevanju zahtev posameznega uporabnika so lahko posegi v prostor slabi oziroma celi škodljivi.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

UDC: 556.12:627.4/.5(043.3)

Author: Tadej Markič

Supervisor: prof. dr. Franc Steinman

Co Supervisor: prof. dr. Matjaž Mikoš

Title: Rigid Structures in and by Riverbeds

Notes: 248 p., 31 tab., 79 fig., 14 graf.

Key words: hydraulics, torrent, precipitations, overfall fields, river course regulation, river channel, water, hydraulic jump, rigid structure, transverse sill, supporting wall

## **ABSTRACT**

The focus of the thesis are the rigid structures in and by the watercourses. Their main task is to maintain the stability of traffic route substrate. To assure the space for traffic routes, a sufficient runoff section of river course needs to be foreseen. The most important is the selection of the right structure upon fulfilment of reasonable requirements of all users. In case the traffic route and river channel are jointed only shortly, it is more adequately to choose longitudinal construction that will separate the river channel and traffic route. However, when the traffic route and river channel run together for a longer section, it is usually more advantageous to regulate the river channel and adjust the traffic route to the new designed ground, using transversal structures. The transverse structures stabilise the riverbed in the chosen level. This thesis combines the solutions and approaches of various authors. With the implementation of their solutions, the river channel course can be designed in the manner that the altitude difference between traffic route and river channel decreases. However, when the altitude difference is low, earthworks can be built instead of supporting construction. Likewise, the improvement of sapped foundations can be assured with transverse structures and consequently re-filling the foundations with river level elevation. The selection of the most advantageous construction rests on the comparison of mutual advantages and disadvantages of longitudinal or transverse structures. If the requirements of individual user are only partially considered, the activities which affect the environment can be poor or even harmful.



## ZAHVALA

Vsem skupaj, ki živite in delate (ste delali) z menoj, se iskreno zahvaljujem. Magistrsko delo sem nosil s seboj od leta 1988, pa je bilo toliko pomembnejšega v tem obdobju (otroci postanejo polnoletni), da ga nikakor nisem uspel zaključiti. Z delom sem pričel v »rajni Jugoslaviji«, nato sodeloval pri ustanovitvi Slovenije, sedaj ga z veseljem zaključujem v Evropski zvezi. Hvala Vam za pomoč, pa tudi za vzpodbude: »no, pa le zaključi magistrski študij, saj je že čas«. Ob petdesetletnici sem se spraševal, kaj imam povedati, pa razen treh sinov nisem našel nič primerljivega. Učenost, ki sem jo pridobil iz dostopnega znanja, sem združil v magistrskem delu. Zaradi obilo lastnih izkušenj v gradbeništvu tako dobrih kot slabih se najbrž že lahko imam za gradbenika. Naj zahvalo zaključim z opisom hudournika iz pesnitve Franceta Prešerna Krst pri Savici:

Ko se neurnik o povodnji vlije,

Iz hriba strmega v dolino plane,

Z derečimi valovomi ovije,



Kar se mu zoperstavi, se ne vgane

In ne počije pred , da jez omaga;

Duplje, 15. 02. 2008

Tadej Markič univ. dipl. inž. grad.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
1.1	Vodilni opis naloge	1
1.2	Stik prometnice in vodotoka	3
1.2.1	Problematika poteka prometnic	4
1.2.2	Problematika premostitev	5
1.2.3	Temeljenje konstrukcij	7
1.2.4	Potek trase prometnic	7
1.3	Raziskovalne metode in orodja	8
<b>2</b>	<b>TEORETIČNA IZHODIŠČA IN STANJE TEHNIKE</b>	<b>9</b>
2.1	Oblikovanje vodnih zgradb	9
2.1.1	Osnovna delitev hidrotehničnih objektov	9
2.1.2	Prečne zgradbe	10
2.1.3	Vzdolžne zgradbe	11
2.2	Obtežbe togih pregrad	11
2.2.1	Dimenzioniranje objektov	12
2.2.2	Globalno statično ravnotežje	13
2.2.3	Statični račun za geomehaniko	14
2.3	Določanje varnosti	15
2.3.1	Osnove	16
2.3.2	Indeks varnosti	19
2.4	Obtežbe in obtežbeni primeri	20
2.4.1	Primeri stalnih, koristnih, izrednih obtežb	20
2.4.2	Hidrodinamične obremenitve	26
2.4.3	Dodatna in posebna obtežba	27
2.4.4	Udarne sile drobirskega toka	28
2.5	Prevzemanje obtežb	32
2.5.1	Lastnosti zemljine	33
2.5.2	Raziskave temeljnih tal	36

2.5.3	Nosilnost temeljnih tal .....	37
2.5.4	Strižna nosilnost temeljnih tal .....	37
<b>2.6</b>	<b>Odtočne količine .....</b>	<b>43</b>
2.6.1	Splošno .....	43
2.6.2	Odtok v strmih strugah.....	45
<b>2.7</b>	<b>Pretočni profili.....</b>	<b>52</b>
2.7.1	Tok realne tekočine s prosto gladino.....	52
2.7.2	Koeficient hrapavosti .....	57
<b>2.8</b>	<b>Prelivi, pragovi in stopnje.....</b>	<b>66</b>
2.8.1	Splošno .....	67
2.8.2	Kriterij potopljenosti .....	69
2.8.3	Splošna enačba preлива.....	70
2.8.4	Prelivi s praktično obliko .....	72
2.8.5	Pretok na širokem pragu.....	77
2.8.6	Upoštevanje povečanja pretočnega profila preлива za prenos plavin .....	80
<b>2.9</b>	<b>Hidravlični vodni skok.....</b>	<b>81</b>
2.9.1	Oblika hidravličnega skoka.....	88
2.9.2	Hidravlični izračun podslapja.....	92
2.9.3	Določitev debeline ojačitve podslapja.....	107
2.9.4	Stopnje, stopnice v strugi in drče .....	111
2.9.5	Vzdolžni padeč in kaskade v strugi .....	114
2.9.6	Konsolidacijske ojačitve v strugi in njihova medsebojna oddaljenost.....	118
<b>2.10</b>	<b>Prodonosnost.....</b>	<b>121</b>
2.10.1	Enačba Meyer – Peter, Müller .....	121
2.10.2	Enačba Bagnolda .....	123
2.10.3	Spremembe povprečne hitrosti v rečnem koritu.....	126
2.10.4	Pričetek gibanja posameznega zrna.....	127
2.10.5	Mehanika gibanja rečnih plavin.....	130
2.10.6	Gostota rečnih plavin.....	133
2.10.7	Dinamična sila toka .....	134
2.10.8	Stabilizacija dna.....	137

2.10.9	Utrditve in zaščite brežin .....	139
2.10.10	Dopustne hitrosti.....	141
<b>2.11</b>	<b>SWOT analiza.....</b>	<b>145</b>
<b>2.12</b>	<b>Objekt, gradnja, služnost in stavbna pravica .....</b>	<b>145</b>
<b>3</b>	<b><i>VZDOLŽNE IN PREČNE CESTNE ZGRADBE OB VODOTOKU.....</i></b>	<b>147</b>
<b>3.1</b>	<b>Vzdolžne konstrukcije.....</b>	<b>147</b>
3.1.1	Opis obstoječega stanja .....	147
3.1.2	Geologija in geomehanika.....	150
3.1.3	Objekti .....	151
3.1.4	Hidravlične smernice .....	152
<b>3.2</b>	<b>Prečne konstrukcije.....</b>	<b>154</b>
3.2.1	Obstoječe stanje .....	154
3.2.2	Projektne osnove.....	155
3.2.3	Objekti .....	155
3.2.4	Vodnogospodarske smernice.....	155
3.2.5	HEC-RAS .....	156
3.2.6	Primerjava funkcije prečne in vzdolžne vodne zgradbe.....	161
3.2.7	Shematični prikaz uporabe prečnih in vzdolžnih pregrad.....	162
<b>4</b>	<b><i>ZAKONODAJNA IZHODIŠČA.....</i></b>	<b>163</b>
<b>4.1</b>	<b>Zakon o graditvi objektov.....</b>	<b>163</b>
4.1.1	Pravilnik o vrstah zahtevnih, manj zahtevnih in enostavnih objektov, o pogojih za gradnjo enostavnih objektov brez gradbenega dovoljenja in o vrstah del, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči .....	164
<b>4.2</b>	<b>Zakon o vodah .....</b>	<b>166</b>
4.2.1	Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture .....	171
<b>4.3</b>	<b>Zakon o varstvu okolja .....</b>	<b>172</b>
4.3.1	Uredba o emisiji snovi pri odvajanju padavinske vode z javnih cest.....	173
<b>4.4</b>	<b>Zakon o javnih cestah .....</b>	<b>174</b>
4.4.1	Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest .....	176

4.4.2	Pravilnik o projektiranju cest .....	177
<b>4.5</b>	<b>Zakon o varnosti v železniškem prometu.....</b>	<b>178</b>
4.5.1	Pravilnik o pogojih za graditev gradbenih objektov ali drugih objektov, saditev drevja ter postavljanje naprav v varovalnem progovnem pasu in v varovalnem pasu ob industrijskem tiru .....	179
4.5.2	Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja proge slovenskih železnic .....	179
<b>4.6</b>	<b>Zakon o gozdovih .....</b>	<b>179</b>
4.6.1	Pravilnik o gozdnih prometnicah.....	181
4.6.2	Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim namenom .....	181
<b>5</b>	<b>OBDELAVE IN UGOTOVITVE .....</b>	<b>182</b>
<b>5.1</b>	<b>Potok Jereka .....</b>	<b>182</b>
5.1.1	Izračun pričakovanih visokih voda.....	182
5.1.2	Opis prečnih profilov .....	183
5.1.3	Tehnične rešitve .....	184
5.1.4	Drugi vidiki posegov.....	185
<b>5.2</b>	<b>POTOK RIBNICA .....</b>	<b>185</b>
5.2.1	Izračun pričakovanih visokih voda.....	185
5.2.2	Opis prečnih profilov .....	186
5.2.3	Tehnične rešitve .....	186
<b>5.3</b>	<b>Skupne ugotovitve .....</b>	<b>189</b>
5.3.1	Presoja različnih zasnov s SWOT analizo .....	189
5.3.2	Uporabnost SWOT analize za obravnavane primere .....	192
5.3.3	Primerjava gradbenih količin med prečnimi in vzdolžnimi konstrukcijami ...	192
<b>5.4</b>	<b>Zaključki - sklepne ugotovitve.....</b>	<b>193</b>
<b>6</b>	<b>POVZETEK .....</b>	<b>195</b>
<b>7</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>198</b>
<b>VIRI</b>	<b>.....</b>	<b>202</b>
<b>PRILOGE</b>	<b>.....</b>	<b>206</b>

**KAZALO TABEL**

Tabela 2.1: Vrednost koeficienta $k$ za normalno porazdelitev spremenljivke .....	18
Tabela 2.2: Kombinacije obtežb .....	32
Tabela 2.3: Tabela pretokov – Kresnik .....	45
Tabela 2.4: Primerjava pravokotni – trapezni pretočni presek .....	49
Tabela 2.5: Vpliv vegetacije ( $n_v$ ) na koeficient hrapavosti (metoda SCS) .....	61
Tabela 2.6: Vpliv spremembe velikosti prečnega profila $S$ ter spremembe oblike prečnega profila ( $n_s$ ) .....	62
Tabela 2.7: Vpliv nepravilnosti površine dna ( $n_p$ ) .....	63
Tabela 2.8: Korekcijski faktorji za vpliv ovir v toku ( $n_o$ ) .....	63
Tabela 2.9: Vpliv meandriranja na koeficient hrapavosti $n_G$ .....	64
Tabela 2.10: Koordinate za konstrukcijo prelivnih curkov po Creager-Oficerovu .....	75
Tabela 2.11: Tabela koeficientov potopljenosti $\sigma$ .....	76
Tabela 2.12: Tabela koeficientov hitrosti $\phi/m$ .....	78
Tabela 2.13: Tabela koeficientov potopljenosti $\sigma_p$ za razmerje $h_1/H_0$ .....	79
Tabela 2.14: Koeficient hitrosti $\phi$ .....	84
Tabela 2.15: Tip podslapja v odvisnosti od Froudovega števila .....	91
Tabela 2.16: Prostorninska teža vode z vsebnostjo zraka .....	106
Tabela 2.17: Vrednosti kinetičnega koeficienta viskoznosti ( $\sigma$ ) pri različni temperaturi vode .....	121
Tabela 2.18: Odpornostna vlečna sila za določene utrditve .....	139
Tabela 2.19: Mejne hitrosti v naravnih koritih po Tiefenbacherju .....	142
Tabela 2.20: Dopustne hitrosti v naravnih koritih .....	143

Tabela 2.21: Dovoljene hitrost za regulacije hudourniških strug v Srbiji .....	143
Tabela 5.1: Dolžina podslapja ob višini stopnje 1.40 m .....	187
Tabela 5.2: Odtočne razmere dolvodno .....	187
Tabela 5.3: Skupna dolžina podslapja po različnih metodah .....	188
Tabela 5.4 : Skupna dolžina podslapja ob različnih podpornih silah .....	188
Tabela 5.5: Debelina utrditev podslapja .....	189
Tabela 5.6: SWOT primerjava za vzdolžno in prečno zgradbo .....	191
Tabela 5.7: Primerjava gradbenih količin.....	193

## KAZALO SLIK

Slika 1.1: Pregrada ob državni cesti R3-633/1099 Bitnje – Jereka .....	3
Slika 2.1: Zdrs konstrukcije po najšibkejši temeljni plasti.....	13
Slika 2.2: : Premiki (pomiki in zasuki) konstrukcije .....	21
Slika 2.3: Velikost zemeljskih tlakov v odvisnosti od smeri premikov .....	24
Slika 2.4: Ravnovesje v vzporedni lameli (1-2-3-4) .....	25
Slika 2.5: Komprimacijski tlaki.....	25
Slika 2.6: Vpliv izpustnic skozi konstrukcije.....	27
Slika 2.7: Udarne sile drobirskega toka .....	29
Slika 2.8: Pred zasutjem pregrade zadaj – prepustna tla .....	29
Slika 2.9: Po zasutju pregrade zadaj - prepustna tla.....	30
Slika 2.10: Udarec drobirskega toka na pregrado .....	30
Slika 2.11: Polno zasutje prostora pred pregrado.....	30
Slika 2.12: Polno zasutje, novo oblikovano dno struge, pregrada spodkopana .....	31
Slika 2.13: Stična površina betona temelja – temeljna zemljina po izkopu.....	37
Slika 2.14: Strižna nosilnost $\tau_f$ porušne drsine pod temeljem .....	38
Slika 2.15: Kontrolna drsina in ravnotežje zemeljske prizme ACDF.....	38
Slika 2.16: Pravokotna centrična obtežba .....	40
Slika 2.17: Pravokotna ekscentrična obtežba.....	41
Slika 2.18: Poševna obtežba (v jedru prereza) in poševna obtežba na poševnem temelju....	41
Slika 2.19: Drsina na poševnem terenu pred temeljem .....	42



Slika 2.20: Način upoštevanja globine temeljenja in lokalni zdrs ((1)...lokalni zdrs, (2)...splošni zdrs, (3)...globalni zdrs).....	43
Slika 2.21: Strižne napetosti med posameznimi sloji.....	46
Slika 2.22: Prehod mirnega v deroči tok, deročega v mirni in prehod deročega v kritični tok .....	50
Slika 2.23: Konstantna specifična energija v enakomernem toku.....	51
Slika 2.24: Povečevanje in zmanjševanje specifične energije.....	52
Slika 2.25: Tok s prosto gladino .....	52
Slika 2.26: Sprememba pretoka po času .....	53
Slika 2.27 Kritični profil – vzdolžni, prečni prerez .....	55
Slika 2.28: Ureditev struge iz dveh materialov .....	65
Slika 2.29: Oznake preliva (odgnani vodni skok).....	67
Slika 2.30: Udarni prag ali zid, poglobitev podslapja, ter kombinacija poglobitve podslapja in udarnega pragu oziroma zidu.....	69
Slika 2.31: Odgnani vodni skok .....	69
Slika 2.32: Prosti preliv $h_0/(H_0+H_1)\leq 0,8$ in potopljen preliv $h_0/(H_0+H_1)\geq 0,8$ (Jevtić 1978)	70
Slika 2.33: Creager-Oficerov preliv TIP I in Creagerjev preliv TIP II .....	73
Slika 2.34: Potopljeni preliv .....	76
Slika 2.35: Nepotopljen širok prag $h_1/H_o\leq 0,8$ .....	77
Slika 2.36: Višina nanosa plavin (po Wehrmann-u) .....	80
Slika 2.37: Popolni vodni skok ( $a>h'$ ) .....	81
Slika 2.38: Diagram podporne sile S za Q = konst. (levo) ter diagram pretoka Q za S=konst. (desno) .....	86
Slika 2.39: Odgnani popolni vodni skok in popolni vodni skok .....	88

Slika 2.40: Podprt (potopljen) vodni skok .....	89
Slika 2.41: Valovit hidravlični skok (poglobitev in udarni prag).....	94
Slika 2.42: Polni udarni prag preko vse širine struge in zobčasti udarni prag po Smrčeku..	95
Slika 2.43: Zobčasti udarni prag tipa Rehbock .....	95
Slika 2.44: Domet vodnega slapu .....	97
Slika 2.45: Preliv s širokim pragom.....	98
Slika 2.46: Praktični profil prelivnega pravokotnega prereza .....	100
Slika 2.47: Običajen vodni skok s poglobitvijo podslapja .....	102
Slika 2.48: Prerez naravnega podslapja .....	103
Slika 2.49: Globina tolmana pod rečno stopnjo in globina tolmana pod jezom .....	104
Slika 2.50: Postavitev podporne pregrade.....	107
Slika 2.51: Utrditev podslapja z vodno blazino .....	107
Slika 2.52: Utrditev podslapja brez vodne blazine.....	110
Slika 2.53: Določitev kota padca curka na ploščo .....	110
Slika 2.54: Prečni prerez kaskad.....	112
Slika 2.55: Prag v dnu struge – potopljen preliv, prag v dnu struge – nepotopljen preliv in prag dvignjen nad dno struge .....	112
Slika 2.56: Kaskade v strugi .....	114
Slika 2.57: Zmanjšanje vzdolžnega padca .....	115
Slika 2.58: Kaskada kot preliv s širokim pragom .....	115
Slika 2.59: Večstopenske kaskade brez tolmunov .....	116
Slika 2.60: Večstopenske kaskade s tolmunom .....	116
Slika 2.61: Vzdolžni prerez struge med prečnimi pragovi .....	118

Slika 2.62: Sile, delujoče na delec vode .....	124
Slika 2.63: Sile na prodnik oziroma na posamezno zrno .....	127
Slika 2.64: Stabilna lega zrna in Labilna lega zrna.....	128
Slika 2.65: Zrno v labilnem ravnovesju in prodnik št. 2 podpira prodnik št. 1 .....	129
Slika 2.66: Površinski sloj prodnikov na dnu struge in skoki prodnika .....	130
Slika 2.67: Kotaljenje prodnika.....	130
Slika 2.68: Komponente težnega pospeška na poševnem terenu .....	131
Slika 2.69: Delujoče sile na vodni element.....	132
Slika 2.70: Dinamična dvižna sila toka na prodnik.....	134
Slika 2.71: Pričetek gibanja posameznega zrna .....	136
Slika 2.72: Zasutje prostora za pregradami s plavinami .....	138
Slika 2.73: Istočasna gradnja pragov (globina temeljev sledi terenu).....	138
Slika 2.74: Gradnja pragov v daljšem časovnem obdobju (temeljenje v novo oblikovanem terenu) .....	138
Slika 2.75: Zaščita brežin s kamnitimi zložbami in kamenometi.....	141
Slika 3.1 Skalni blok v strugi Jereke .....	148
Slika 3.2: Situacija vzdolžne zgradbe oziroma prečnih zgradb.....	162
Slika 3.3: Situacija prečnih zgradb oziroma vzdolžne zgradbe.....	162
Slika 4.1: Prečni tehnični profil javne ceste .....	175

## KAZALO GRAFOV

Graf 2.1: Zvezna funkcija gostote verjetnosti in distribucije .....	16
Graf 2.2: Normalna porazdelitev spremenljivke .....	17
Graf 2.3: Funkciji obtežbe in odpora prikazani kot normalna porazdelitev .....	18
Graf 2.4: Funkcija gostote verjetnosti vrednosti stanja nosilnosti $f_z(z)$ ter prekrivanje funkcij obtežbe $f_s$ in odpornosti $f_R$ .....	19
Graf 2.5: Mobilizacija pasivnega zemeljskega tlaka za nekoherentne zemljine v odvisnosti od premika stene $V/V_p$ .....	23
Graf 2.6: Prikaz suhe prostorninske teže $\gamma_d$ od vsebnosti vode ( $w$ ) v % .....	35
Graf 2.7: Specifična energija ob konstantnem pretoku; E – krivulja .....	48
Graf 2.8: Pretok ob konstantni specifični energiji; Q – krivulja .....	48
Graf 2.9: Določitev razmerij konjugiranih višin ob različnih padcih struge .....	92
Graf 2.10: Določitev razmerja konjugiranih globin .....	93
Graf 2.11: Krivulji pretoka vodotoka in preлива .....	113
Graf 2.12: Diagram M-P-M .....	123
Graf 2.13 Diagram Bagnolda za reševanje enačbe plavin .....	126
Graf 2.14: Enotske krivulje granulacijskega sestava .....	133

## KAZALO PRILOG

<i>Priloga 1: Prikaz povodij potokov Jereka in Ribnica.....</i>	<i>206</i>
<i>Priloga 2a: Izračun količin visokih voda potoka Jereka.....</i>	<i>207</i>
<i>Priloga 2b: Pretočna sposobnost struge pred posegom .....</i>	<i>208</i>
<i>Priloga 2c: Pretočna sposobnost struge po čiščenju.....</i>	<i>208</i>
<i>Priloga 3: Prečni prerez obstoječe pregrade Jereke .....</i>	<i>209</i>
<i>Priloga 4: Pregledna situacija poteka ceste ob potoku Jereka.....</i>	<i>210</i>
<i>Priloga 5: Situacija poteka ceste in struge na odseku 1 .....</i>	<i>211</i>
<i>Priloga 6: Situacija poteka ceste in struge na odseku 2 .....</i>	<i>212</i>
<i>Priloga 7: Vzdolžni profil ceste in potoka Jereka z lokacijo prečnih pregrad.....</i>	<i>213</i>
<i>Priloga 8: Projektiran vzdolžni prerez skupnega poteka ceste in dna struge Jereka.....</i>	<i>214</i>
<i>Priloga 9: Prečni prerezi obstoječega stanja struge in ceste pred rekonstrukcijo ceste... </i>	<i>215</i>
<i>Priloga 10: Prečni prerezi struge in ceste s prikazom projektantskih rešitev.....</i>	<i>216</i>
<i>Priloga 11: Prečni profili s prikazom usklajenih rešitev med strugo in cesto .....</i>	<i>217</i>
<i>Priloga 12a: Izračun pretočnih sposobnosti struge različnih oblik in padcev.....</i>	<i>218</i>
<i>Priloga 12b: Trapezna oblika prečnega prereza struge .....</i>	<i>218</i>
<i>Priloga 13: Izračun visokih voda potoka Ribnica.....</i>	<i>220</i>
<i>Priloga 14a: Izračun pretočnih sposobnosti korita potoka Ribnica pod mostom .....</i>	<i>221</i>
<i>Priloga 14b: Skica profila z vodostajem <math>Q_{100}</math>.....</i>	<i>221</i>
<i>Priloga 15a: Dimenzioniranje podslapja Ribnice .....</i>	<i>222</i>
<i>Priloga 15b: Vzdolžni prerez poglobitve podslapja.....</i>	<i>223</i>
<i>Priloga 16: Izračun zavarovanja in utrditve podslapja za prečnim pragom pod mostom..</i>	<i>224</i>
<i>Priloga 17: Določitev koeficienta hrapavosti struge potoka Ribnica .....</i>	<i>225</i>

<i>Priloga 18: Določitev hidravličnega skoka dolvodno od mostu potoka Ribnica.....</i>	<i>228</i>
<i>Priloga 19: Izračun podslapja v odvisnosti od podpornih sil.....</i>	<i>231</i>
<i>Priloga 20: Utrditev podslapja z vodno blazino.....</i>	<i>234</i>
<i>Priloga 21: Časopisna vest o poškodbi državne ceste R3-633/1099 Bitnje – Jereka ob potoku Jereka.....</i>	<i>237</i>
<i>Priloga 22: Primerjava gradbenih količin prečnih in vzdolžnih zgradb.....</i>	<i>238</i>
<i>Priloga 23a: Zaščita brežin s kamnitimi zložbami in kamenometi (Schoklitsch, 1930).....</i>	<i>240</i>
<i>Priloga 23b: Zaščita brežin z betonom in armiranim betonom (Schoklitsch, 1930).....</i>	<i>241</i>
<i>Priloga 23c: Zaščita brežin s Palvis mrežami (ni gibanja plavin) (Schoklitsch, 1930).....</i>	<i>241</i>
<i>Priloga 23d: Zaščita brežin s kamnitimi kaštami (Schoklitsch, 1930).....</i>	<i>242</i>
<i>Priloga 23e: Zaščita brežin z obrežnim armirano betonskim zidom (Schoklitsch, 1930)...</i>	<i>242</i>
<i>Priloga 24: Slika vzdolžne konstrukcije med kolesarsko stezo in reko Savo.....</i>	<i>243</i>

## **1 UVOD**

V magistrskem delu so obravnavane toge zgradbe v in ob vodotokih povezane s prometnicami. Potreben prostor za prometnice se največkrat zagotovi s posegom v vodni svet z izgradnjo vzdolžnih zgradb – podpornih zidov ali z izgradnjo prečnih zgradb – pregrad. Pri zagotavljanju prostora za prometnice, ob zagotovitvi zadostnega pretočnega prereza vodotoka, je najvažnejša izbira pravilnega objekta ob izpolnitvi razumnih zahtev vseh uporabnikov prostora. Ob delnem upoštevanju oziroma neupoštevanju zahtev posameznega uporabnika, so lahko posegi slabi ali celo škodljivi. Vode in zemlje se ne da prevarati.

### **1.1 Vodilni opis naloge**

Pregrada kot celota se umesti v prostor prečno na vzdolžni potek struge hudournika, potoka ali reke. Osnovna naloga toge pregrade kot stabilizacijskega objekta je zaustavitev poglobljanja struge in s tem preprečitev rušenja bregov struge in brežin, ki pri poglobljanju izgubljajo oporo dna. Zahteva po stabilnosti brežin je posledica zahteve po stabilnosti prometnic, ki so običajno ravno tako speljane po dolinah ob sami strugi ali v pobočju. V primeru, ko konstrukcija stoji na pobočju, nad možnimi neposrednimi vplivi voda v strugi, (ni potrebna hidravlična preveritev), je sestavni del prometnice. Taka konstrukcija se imenuje podporna (zgrajena pod prometnico) ali oporna konstrukcija v primeru, da je zgrajena nad prometnico. Toga zgradba je z ozirom na statiko objekt, ki vrši svojo nalogo brez spreminjanja svoje oblike. Pri regulacijah vodotokov se uporabljajo prečne zgradbe pravokotno na os struge in vzdolžne zgradbe vzporedno s potekom struge. Pri togi konstrukciji je še posebej pomembno temeljenje, za kar se mora pridobiti geomehanske podatke. Točnejši kot so podatki temeljne zemljine, tehnično pravilnejše se lahko določi način in obliko temeljenja. Določitev ustreznih obtežb na konstrukcijo je osnovnega pomena za izbiro geometrijske oblike, ki omogoča zagotovitev varnosti ter ekonomičnosti. Z zagotovitvijo stabilnega nivoja nosilnih temeljnih tal, kot je to npr. preprečitev poglobljanja struge, se zmanjša višina potrebne konstrukcije, ki bistveno vpliva na obliko

konstrukcije in stroške izgradnje. Najvažnejši podatki za izračun in oblikovanje togih pregrad so geomehanski podatki, pripadajoče obtežbe in hidravlične ureditve, ki jih proučujejo geomehaniki, geologi; gradbeni konstruktorji in vodarji. Namen združitve različnih znanj v celoto je pomoč pri odločitvi za celovito rešitev zaščite področja, po katerem potekajo struge hudournikov, potokov ali rek in prometnic ali železnic, ki medsebojno vplivajo. Običajno geomehaniki in geotehniki rešujejo nestabilnosti terena na področju prometnic ločeno od zahtev vodarjev na področju voda. Še slabše, zgolj delno zagotavljajo zadostno širino potrebnega prostora za potek cestnega ali železniškega nasipa z izgradnjo podpornih ali opornih konstrukcij, ne oziraje se na celovito rešitev in s tem zmanjšujejo nivo uslug uporabnikom prometnice. Ob celoviti proučitvi oblike in stanja terena ter nestabilnosti bregov struge, predvsem zaradi poglobljanja struge, se lahko z izgradnjo prečnih in vzdolžnih togih pregrad ustavi poglobljanje in spodkopavanje dna brežine ali temeljev obstoječih konstrukcij, oziroma se lahko ob zagotovitvi zadostne pretočne sposobnosti struge dno celo dvigne in s tem posledično zmanjša velikost podporne oziroma oporne konstrukcije, kar pomeni pocenitev gradnje. Najlepše prečne in vzdolžne zgradbe kot podporne ali oporne konstrukcije so tiste, ki so čim boljje umeščene v prostor. Kot primer je prikazana prečna zgradba kot ustalitvena pregrada na sliki št. 1.1 ob državni cesti. Z dvigom dna struge se je zaščitilo cestno telo gorvodno od pregrade. Ob poružitvi podpornega zidu ceste pod pregrado, niso ponovili ideje obstoječe rešitve, temveč so s piloti temeljili podporni zid pod nivo dna struge potoka, ne oziraje se na možnost ureditve struge z izgradnjo nove zaplavne pregrade dolvodno ob vtoku potoka v sotesko.





Slika 1.1: Pregrada ob državni cesti R3-633/1099 Bitnje – Jereka

Picture 1.1: The barrier along the state highway R3-633/1099 Bitnje - Jereka

Delo v nalogi temelji na primerjavi zasnov togih zgradb v in ob vodotokih, kot konstrukcij uporabljenih pri posegih v vodno zemljišče, glede na prednosti in pomanjkljivosti. Pri tem je upoštevana zaščita dna in brežin struge s ciljem zagotoviti stabilni odsek vodotoka pred erozijo v celoti in ne zgolj breg, po katerem poteka prometnica. Narava namreč ne upošteva njene delitve na različna ministrstva.

## 1.2 Stik prometnice in vodotoka

Skozi ozke doline se običajno poleg vodotoka, pojavi še potreba po prometnici, zato cestno telo največkrat poseže v vodni svet. Načrtovalci in izvajalci se morajo zavedati nujnosti sodelovanja z vsemi uporabniki prostora in sprejeti premišljene in tehnično pravilne rešitve. V RS je dolžina enotirnih železniških prog 892 km in dvotirnih 329 km (Prometni inšpektorat RS, MZP), dolžina avtocest in hitrih cest 398 km, hitrih dvopasovnih, glavnih in regionalnih cest 5872 km (Družba RS za avtoceste, Družba RS za državne ceste). Dolžina vodotokov znaša okoli 28000 km, od tega je vsaj 16000 km vodotokov občasno brez vode (Bat et al., 2003).

### 1.2.1 Problematika poteka prometnic

Od vseh gradbenih objektov so prometnice s spremljajočimi objekti (pregrade, podporni in oporni zidovi, mostovi, prepusti, nasipi itd.) najbolj neposredno v stiku z vodotoki, zato v času visokih voda in hudourniških izbruhov utrpijo največje poškodbe. Nekateri trdijo, da so zaradi klimatskih razmer neurja, visoke vode in hudourniški izbruhi v zadnjih letih vse pogostejši, škoda in druge posledice pa stalno naraščajo. Zaradi razgibanega reliefa potekajo ceste v hribovitih in gorskih pokrajinah v veliki meri po najnižjih delih dolin in grap, po katerih naravno tečejo tudi vodotoki. Ceste so pogosto vzporedne ali celo tik ob strugah in jih zelo velikokrat prečkajo, marsikdaj pa prečijo poplavna ali drugače (npr. zaradi plazov) ogrožena območja. Največ težav in poškodb se pojavlja na lokalnih in regionalnih cestah, ki jih je v Sloveniji največ. Glede na nižjo kategorijo prometnic velja slabši standard gradnje, hkrati pa je zanje pogosto premalo sredstev, zaradi tega so v slabem stanju, neustrezne in zastarele, njihovo obnavljanje in vzdrževanje pa je pomanjkljivo. Vzroki težav, povezanih s hudourniško erozijo so različni, razdelimo jih lahko v dve veliki skupini, naravne in antropogene (Gavrilović, 1972). Običajno se pojavijo v kombinaciji, ko posledice več naravnih vzrokov zvečajo še različni antropogeni vzroki. Vsako prometnico lahko obravnavamo kot tujek v naravi, ki poruši ravnotežje v prostoru oziroma okrepi erozijske procese. Slabo načrtovana in zgrajena prometnica vedno povzroči dolgotrajne probleme, saj ima zelo velike stroške vzdrževanja, nastaja pa tudi škoda ob neurjih. S pravilnim načrtovanjem, upoštevanjem naravnih procesov povezanih zlasti z vodotoki, erozijsko geomorfologijo in geološko podlago ter optimalno izvedbo pa so lahko negativne posledice, katerih finančno oceno določi projekt objekta, zmanjšane na najmanjšo možno mero. Projektant nove prometnice ali rekonstrukcije stare, bi moral vsak njen neposreden stik s strugo vodotoka, ki zahteva prečne ali vzdolžne zgradbe obravnavati kot problem, ki se mora strokovno in dolgoročno rešiti tako z vidika prometnice kot struge. Pri tem mora upoštevati časovno in prostorsko dinamiko vodotokov in prometne infrastrukture, predvsem pa medsebojne vplive, ki so različni pri premostitvah (most, prepust) in pri stabilizacijskih zgradbah (prečni pragovi, stopnje, oporni in podporni zidovi).

### 1.2.2 Problematika premostitev

Premostitve so pogosto neustrezno umeščene v prostoru. Nenadna in preostra sprememba geometrije v strugi lahko povzroči zastajanje plavin pred vtokom ali pa močno erodiranje ogroženega dela brežine, spodkopavanje opornikov oziroma vtoka. Premostitev naj bo obvezno načrtovana in zgrajena tako, da bo sprememba na strugi vodotoka glede poteka, dimenzij in oblike struge čim manjša. Neustreznost premostitev je eden najpogostejših problemov prekinitve prevoznosti prometnic, ki nastanejo tako rekoč ob vsakem hudourniškem izbruhu ali visokih vodah. Na račun »varčevanja« pri gradnji in s tem zmanjšanja celotnih stroškov gradnje ali obnove ceste so poznejši stroški vzdrževanja in zagotavljanja prevoznosti nekajkrat višji. Najbolj problematične so premajhne dimenzije pretočnih odprtih, neustrezna umestitev premostitve na traso vodotoka, neustrezna izvedba in neizpolnitev bistvenih zahtev za mehansko odpornost in stabilnost (ZGO-1B, 2007. člen 9) predvsem vtoka in iztoka. Ustreznost izvedbe in dimenzioniranja premostitev na hudourniških je še posebej pomembna zaradi njihove nepredvidljivosti o velikosti pretoka, morebitne zamašitve s plavjem in prekinjenega transporta sedimentov. Neznaten potoček se lahko med lokalno nevihto spremeni v pravo hudourniško lavo, ki nosi skale in debla. Med hudourniškim izbruhom si posledice zaradi premajhne pretočne odprtine sledijo po stopnjah (odvisno od količine plavin ter trajanja in višine visoke vode), od katerih vsaka naslednja povzroča drastično zvečanje škode in s tem stroškov sanacije (Klabus, 1990). Odprtine premostitev na vodotokih z izrazito hudourniškim vodnim režimom morajo zagotavljati prevodnost pretokov z najmanj s 100-letno povratno dobo ( $Q_{100}$ ) na cesti s projektno hitrostjo večjo od 60 km/h in za ceste v naselju, ter za pojav visoke vode z 20-letno povratno dobo ( $Q_{20}$ ) na ostalih cestah (Pravilnik o projektiranju cest, 2005. člen 60). Varnostna višina nad gladino vodotoka je najmanj 1,00 m za hudourniške vodotoke, in 0,50 m za ostale vodotoke. Neustrezno zgrajen vtok ovira vtekanje in povzroči zastajanje vode in plavin pred njim, lahko pa voda z erodiranjem vtok poškoduje in s tem ogrozi celoten objekt. Ravno tako nestrokovno zgrajen in neutrjen iztok lahko povzroči vzvratno erodiranje in spodkopavanje premostitve. Vtok mora biti zgrajen čim bolj gladko, brez ostrih robov in prehodov ter z zožitvijo tako, da je vtekanje hitro in neovirano, iztok pa mora biti ustrezno stabiliziran in zavarovan (Hamill, 1999). Izvedbe so odvisne od tipa in velikosti premostitve ter jakosti hudournika. Pri izrazito hudourniških vodotokih, ki nosijo

zelo velike količine plavin velikih dimenzij (debla, panji, skale), je praktično nemogoče ustrezno dimenzionirati dovolj velike odprtine premostitev. Zaradi tega so potrebni dodatni proti erozijski ukrepi in objekti na daljšem odseku struge gorvodno od prepusta, ali lovilni objekti – brez njih namreč premostitev ne more funkcionirati. Zaplavno uvajalne objekte, ustalitvene in druge ureditvene ukrepe v strugi gorvodno od premostitve, mora projektant ceste načrtovati skupaj s strokovnim sodelovanjem urejevalcev hudournikov. Obravnavati jih je treba kot nujne in nepogrešljive ukrepe za varno in dolgoročno funkcioniranje ceste. Zavarovanja so funkcionalni objekti, povezani s prometnico, in mora zanje skrbeti vzdrževalec prometnice (Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest, 1998, člen 24). Zelo pogoste poškodbe na prometnicah v času visokih voda so zajede ali odplavljeni cestni nasipi ter poškodbe prešibkih obrežnih zavarovanj vodotokov, predvsem v konkavnih delih brežin. Hudourniške struge so običajno strme in nepravilne, hudourni voda pa teče hitro in vrtinčasto. V konkavah se hitrost vode še poveča, njena erozijska moč v bočni smeri postane občutno večja kot na premih odsekih. Posledica je močno bočno pa tudi vertikalno erodiranje. Poškodbe si sledijo v odvisnosti od trajanja in višine visoke vode: spodkopavanje nasipa cestnega telesa ali obrežnega zavarovanja, odplavljanje nasipa, porušitev zavarovanja, nastanek zajed, ki se povečujejo, odnesen del prometnice, posledice v nizvodni smeri zaradi odlaganja plavin. Na erozijo vode občutljivi nasipi prometnic ob strugah vodotokov morajo biti ustrezno zavarovani. Zavarovanja konkavnih delov brežin vodotoka z zidovi, zložbami ali kaštami morajo biti močnejša, nadvišana, globlje temeljena in bolj utrjena kot na premih odsekih vodotoka. Za varnost zavarovanja struge pred spodkopavanjem so obvezni ustalitveni pragovi na nizvodnem zaključku podporne konstrukcije in v kritičnih profilih, ki preprečujejo poglobljanje dna struge. Le v primeru stabilnega skalnega dna oziroma stabilnega rečnega odseka pragovi niso potrebni. Na obeh koncih zavarovanja so obvezna zaključna krila, usidrana v brežino vodotoka. Zelo priporočljivo je dodatno ojačanje konkavnih zavarovanj z jezbicami ali krilnimi pragovi, ki stabilizirajo objekt, v času izjemnih razmer pa preprečijo verižno rušenje. Načrtovanje obrežnih zavarovanj ter ustalitvenih objektov mora biti premišljeno in sistematično. Načrtovalci in graditelji prometnic morajo upoštevati, da so obrežna zavarovanja vodotokov z ustalitvenimi pragovi enoviti in soodvisni objekti in da je vsako obrežno zavarovanje brez ustalitvenih pragov pomanjkljivo in zato zelo ogroženo.

### **1.2.3 Temeljenje konstrukcij**

Ustrezno temeljenje obrežnih konstrukcij prometnic in mostnih opornikov v strugah vodotokov je še posebej pomembno, saj so spremembe dna in oblike struge stalne in zelo nepredvidljive, še zlasti kadar niveleta strmejša od 3%. V času visokih voda se lahko zaradi zastajanja plavin dno dvigne ali pa na daljšem ali krajšem odseku sunkovito poglobi. Večja poglobitev struge lahko povzroči spodkopavanje obrežnega zidu ali mostnih opornikov, posedanje objekta in pojav razpok; v skrajnem primeru se konstrukcija lahko zruši. Posledice porušitve so zelo hude in nepredvidljive tudi v nizvodni smeri in okolici struge, škoda v takih primerih pa je zelo velika. Obrežna zavarovanja v strugah vodotokov naj bi bila temeljena glede na terenske razmere, padec nivelete in ustaljenost dna struge.

### **1.2.4 Potek trase prometnic**

Prometnice, ki potekajo po ozkih dolinah in grapah, so pogosto neprimerno speljane. Strugam vodotokov odvzemajo prostor, povzročajo zoženje struge in njeno prestavitev tik pod pobočje itd. Naj je prometnica, ki poteka skozi dolino, še tako pomembna, v vsakem primeru bo tudi vsa hudourniška voda tekla po dolini. Temu dejstvu se ni možno izogniti. Zaradi utesnitve struge hudournika zaradi gradnje prometnice na daljšem odseku se odtočni režim, erozijske razmere celotnega vodotoka in tudi recipienta zelo spremenijo. Na neposredno ogroženem odseku je močna posledica tega zastajanje plavin ali okrepitev erozijskih procesov. V prvem primeru se lahko preozek pretočni profil struge zatrpa in niveleta zviša. Posledica je preplavitev konstrukcije prometnice in poškodovanje zgornjega ustroja, nastanek zajed in poglobljanje struge v dolvodni smeri. V drugem primeru povzroči zoženje struge in njena prestavitev proti nasprotnemu pobočju, okrepitev erozijskih procesov v bočni in vertikalni smeri, spodkopavanje pobočja, nastanek usadov, ki drsijo v strugo in lahko v skrajnem primeru povzročijo zaježitev struge z nepredvidljivimi posledicami. Pogosto povzroča probleme s prevoznostjo potek nivelete prometnice, nižje od gladine vodotoka. V Zakonu o javnih cestah (ZJC-UPB, 2006. člen 60) je zahtevan potek nivelete vozišča nad koto gladine vodotoka ali vodne akumulacije tako, da omogoča pretok visokih voda z 20 letno povratno dobo. Posledica prenizke nivelete so preplavitve prometnice, zasipavanje s plavinami ter nastanek poškodb nasipa in planuma zgornjega ustroja. Pri projektiranju prometnic skozi ozke doline ali grape vzporedno ob strugi

vodotokov se mora upoštevati objektivno omejenost prostora in erozijsko geomorfologijo (Klabus, 1999). Struga vodotoka mora imeti prednost pri umestitvi prometnice v prostor. Prevajati mora predvidene visoke vode z vsemi plavinami, pri tem pa voda ne sme do projektne vrednosti temeljne ploskve objekta erodirati dna in brežin ali preplavljati okolice. Niveleta prometnice mora potekati nad gladino visoke vode. Širino prometnice, zlasti ceste na določenih najtežavnejših odsekih, objektivno omejujejo terenske razmere, zato je nesmiselno vztrajati pri predpisani širini vozišča za določeno kategorijo državne ceste (ZJC-UPB, 2006. člen 3). Z določitvijo predpisane širine cestnega telesa bi tako utesnili vodotok, da bo ob vsaki višji vodi poplavljal ter povzročal nadaljnje poškodbe cestnih konstrukcij. Načrtovalci in graditelji prometnic morajo nujno preseči ozko specializirano miselnost in zgolj kratkoročno utemeljevanje stroškov izvedbe. To morajo spoznati tudi investitorji in pristojni upravljalci prometnic na vseh ravneh. Nujno je sodelovanje s hidrotehniko od faze načrtovanja nove prometnice dalje. Vzporedno z gradnjo prometnice, ki potekajo po vplivnem območju vodotoka, je obvezno urejanje erozijskih razmer vodotoka.

### **1.3 Raziskovalne metode in orodja**

Pri izdelavi magistrske naloge sem stanje tehnike o mehaniki tal, statiki in hidravliki prevzel iz strokovne literature, znanstvenega tiska, spletnih strani na internetu in projektiranih ter izvedenih projektih ureditev vodotokov. Pri tem sem uporabil metodo analize in sinteze ter metodo grafičnega prikazovanja. Poleg tega sem pridobil mnenja strokovnjakov iz področja projektiranja prometnic, gradbenih konstrukcij, temeljenja objektov in urejanja voda. Dodatno sem uporabil pridobljeno znanje in razumevanje na podiplomskem študiju in praktične izkušnje ob projektiranju, izvajanju ter nadzoru graditve cest in hidrotehničnih objektov. Različne rešitve s prečnimi oziroma vzdolžnimi objekti sem analiziral in razčlenil z metodo grafičnega prikazovanja do jasnih odnosov med posameznimi sestavinami, z induktivno metodo in metodo generalizacije sklepal iz posameznega primera na splošno, z deduktivno metodo in metodo specializacije določil kriterije za ureditev struge. Tako sem lahko združil vsa znanja in spoznanja v predlagane ugodnejše rešitve sprejemljive tako za prometnice kot za vodotoke, ki sem jih vrednotil glede na usvojena spoznanja na podlagi metod analize, sinteze in deskripcije ter komparativne metode.

## **2 TEORETIČNA IZHODIŠČA IN STANJE TEHNIKE**

Zaradi hudourniškega značaja vodotokov v Sloveniji, saj so razprostranjeni na skoraj 9000 km<sup>2</sup> Slovenije, kjer je 1700 km glavnih hudourniških strug in nad 4000 km njihovih pritokov, so na njih zgrajene številne prečne pregrade in pragovi. Običajno pregrade poleg ustalitve nivelete dna potoka omogočajo tudi odvzem vode za uporabnika. Vsak človekov poseg ali funkcionalno zaključena celota (sistem) deluje le ob izpolnjevanju pravnih, ekonomskih in tehničnih zahtev. Gradnja jezov kot hidrotehničnih objektov (Steinman, 2004) je bila vedno osnovna gradbena dejavnost. Zgodovina pa kaže, da je izvedba večjih vodnogospodarskih objektov možna le ob zadostni stopnji organiziranosti družbe.

### **2.1 Oblikovanje vodnih zgradb**

Človekove posege lahko ločimo na objekte, naprave in ureditve ter območja s pravnim režimom. Voda in hidrotehnični objekt sta obojestransko odvisna med seboj. (Steinman, 2004). Najvažnejša je pravilna umestitev v prostor, ob kompromisnih rešitvah, ki upoštevajo prioritete upravičenih zahtev ostalih uporabnikov prostora. Vodnogospodarski objekti so praviloma dragi in potencialno nevarni, zato morajo biti dobro zgrajeni z zagotovljeno veliko (predpisano) varnostjo.

#### **2.1.1 Osnovna delitev hidrotehničnih objektov**

Hidrotehnične objekte delimo glede na skupne in specifične lastnosti (ZGO-1B, 2007) in glede na status v infrastrukturo in na objekte v posebni rabi. Pri infrastrukturi je mogoča delitev na različne resorje glede na njihovo pristojnost in primarno rabo, ki jo določajo področni zakoni (Steinman, 2004). Med uporabniške vodoogradnje spadajo vodooskrba in različna področja inženirske hidrotehlike kot so namakanje, izraba vodnih moči, vodni transporti in rekreacija. Med varovalne gradnje se prišteva zaščita voda (pred človekom), zaščita (človeka) pred vodami, zaščita (narave) pred erozijo in drenaža (osuševanje zemljišč, zgradb). Tako se vodnogospodarski objekti, naprave in ureditve delijo na vodno infrastrukturo (ZV-1, 2002), drugo infrastrukturo na vodah in na objekte v posebni rabi.

Status vodnogospodarskega objekta nakazuje obveznosti upravljavcev in razmejitev med njimi (ZJC-UPB-1, 2006. 36. člen). Cestna infrastruktura na vodah so na primer prepusti pod cestami, saj so del cestne infrastrukture, ki je hkrati vodnogospodarski objekt. Tako je možno, da ima isti tip vodnogospodarskega objekta, naprave ali ureditve glede na pogoje njegove uporabe različen status. Status nakazuje obveznosti lastnika (država ali lokalne skupnosti, zasebni sektor) tudi do vzdrževanja objekta (Steinman, 2004).

### **2.1.2 Prečne zgradbe**

Pomemben del hidrotehničnih objektov so prečne zgradbe v obliki pregrad in jezov. Problematika je skupna tudi manjšim zgradbam in ureditvam ter jo je zanje možno v pretežni meri smiselno uporabiti. V nadaljevanju se bomo ukvarjali z manjšimi objekti, saj na primer za velike pregrade veljajo dodatni, strožji zakoni.

Osnovne vrste prečnih zgradb, ki se uporabljajo pri regulaciji hudourniških strug, so pregrade in pragovi. Pregrade so prečne zgradbe, katerih koristna višina je večja od 2.00 m. Namen pregrade je zaščita prečnega profila struge pred nadaljnjimi erozijskimi procesi, saj zagotovijo zmanjšanje vzdolžnega padca struge in posledično manjše hitrosti in vlečne sile, zadrževanje plavin za gorvodne dele hudourniške struge, zadrževanje plavin v zaplavnih objektih in konsolidacija erozijskih procesov na gorvodnih delih brežin in struge. V odvisnosti, za kateri del struge je pregrada projektirana, razlikujemo zadrževalne, ustalitvene in zaplavne pregrade (Gavrilović, 1972). Zadrževalne pregrade imajo namen zadržati gorvodno čim več plavin. Ustalitvene pregrade so zgrajene s ciljem utrditve pretočnega profila, zmanjšanje vzdolžnega padca struge in varne ter trdne opore zadržanim sedimentom za pregrado. Namen zadrževalne pregrade je zadržati poplavni val, pri nizkih vodah pa je pretok odvisen od velikosti pretočne sposobnosti izpusta iz pregrade (dušilka). Prečne zgradbe-pregrade v urejenih strugah in kanalih se imenujejo kaskade. Pragovi so prečne zgradbe v hudourniškem koritu majhnih koristnih višin od 0.20 m do 2.00 m. Pragovi utrdijo prečni profil hudourniške struge in stabilizirajo gorvodne nanose in erozijske procese. Talni pragovi - rečna rebra so prečne zgradbe koristne višine 0.00 m, ki utrdijo vzdolžni padec in prečni profil struge (Gavrilović, 1972).



Možne so različne delitve pregrad glede na izvedbo, oziroma na način prevzemanja vodnih pritiskov. Zaradi splošnega pregleda navajamo delitev pregrad na podlagi konstrukcije, namena in uporabljenega materiala. Na podlagi konstrukcije ločimo: polnostenske, težnostne, ločne (cilindrične, enakokotne, kupolaste) in ploščate (votle); razčlenjene, stebarske in konzolne; odprte, režne (reže, previsne, pokončne, lestvene), stebne in mrežne. Na podlagi namena (funkcije) pa pregrade za zajez vode, zaustavitev hudourniških plavin, zadrževalne in konsolidacijske; lovilne, prebiralne (kvaliteta) in zaprte (kvantiteta). Na podlagi uporabljenega materiala pregrade delimo na betonske (monolitne, iz prefabriciranih elementov), zidane (opečne, betonske), jeklene, kamnite (zložene, nasute, slojevite), lesene, zemeljske (homogene, slojevite), kaštne zgradbe in košare iz jeklenih mrež napolnjene s kamenjem (Steinman, 2004).

### **2.1.3 Vzdolžne zgradbe**

Zaradi pomanjkanja prostora se s ciljem pridobitve zadostne širine prometnic gradijo različne oblike konstrukcij. Običajno se naravno strma brežina zasuje ali izkoplje in omeji z gradbeno konstrukcijo podpornim ali opornim zidom. Zmanjšanje pretočnega prereza struge zahteva celovito ureditev struge v območju vzdolžne zgradbe. V nalogi se bomo omejili le na pregrade, pragove, oporne in podporne zidove, ki se lahko obravnavajo kot toge konstrukcije.

## **2.2 Obtežbe togih pregrad**

Pri preverjanju stabilnosti pregrad se mora poznati obtežbe in lastnosti okolja, npr. geomehanske podatke, pri preverjanju mehanske odpornosti pa vplive obtežb na konstrukcijo in material preverjanega objekta in (nosilne) okolice. Določitev upravičene, pogosto pa predpisane varnosti, najbolj vpliva na izbiro konstrukcije in stroške izgradnje.

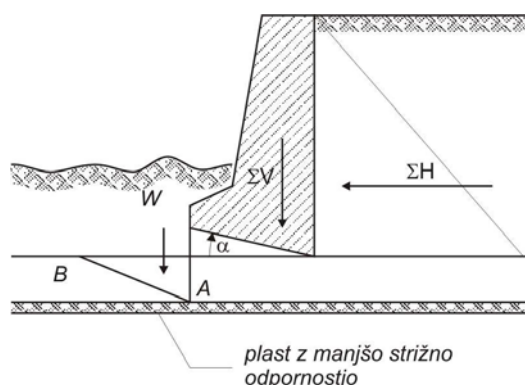
### 2.2.1 Dimenzioniranje objektov

Pri dimenzioniranju togih objektov upoštevamo tri glavne obtežbene primere in sicer:

- osnovni obtežbeni primer (OOP), pri katerem se šteje, da je konstrukcija v celoti varna za projektne vrednosti obtežbe, za katere je računana,
- izjemni obtežbeni primer (IOP), pri katerem konstrukcija zavzame mejno stanje nosilnosti (MSN) in
- ekstremni obtežbeni primer (EOP), kjer konstrukcija doseže mejno stanje uporabnosti (MSU).

Glavna obtežba (koristna obremenitev) teh objektov so tlaki vode, sedimentov in zemljine, saj na njih praviloma ni hidromehanske ali druge opreme. Običajno se privzame predvideno stoletno visoko vodo kot osnovno obtežbo. V primeru hudournikov se privzame dodatno plavine, pri drobirskih tokovih pa zemljinski tok z dinamičnim delovanjem na konstrukcijo. Konstrukcija kot celota mora biti sposobna prevzeti vse osnovne napetosti (tlake zemlje, hidrostatične tlake in vzgon, hidrodinamične tlake in porne nadpritiske, lastno težo objekta in koristno obtežbo), dodatne napetosti (kapilarne tlake, tlake zaledenitve in lezenja tal, nabrekanja tal, temperaturno obtežbo, potresne in dinamične sile) in posebne napetosti (npr. ločno delovanje konstrukcije).

Zakon o graditvi objektov (ZGO-1B, 2007. člen 9), v gradbenih predpisih za posamezne vrste objektov, zahteva njihove tehnične značilnosti tako, da objekti izpolnjujejo bistvene zahteve za mehansko odpornost in stabilnost, varnost pred požarom, higienske in zdravstvene zaščite in zaščite okolice, varnosti pri uporabi, zaščite pred hrupom in varčevanja z energijo in ohranjanja toplote. V nadaljevanju naloge se bomo omejili le na zagotavljanje trdnosti in stabilnosti podpornih in opornih konstrukcij. Preveritev velikosti in lege tlačnih in nateznih napetosti v konstrukciji, kot pravokotni pritisk na ploskev, in strižno napetost, ležečo v preiskovani ravnini (metoda dopustnih napetosti), se določi z osnovno splošno enačbo za homogen prerez. Pri tem je treba poiskati najneugodnejši primer. Zato ne zadošča le analiza ravnotežnih pogojev na temeljni (stični) ploskvi. Kot primer je na sliki 2.1 prikazan zdrs konstrukcije po najšibkejši plasti, ki leži globlje od plasti, v katero je temeljena konstrukcija.



Slika 2.1: Zdrs konstrukcije po najšibkejši temeljni plasti

Picture 2.1: Slip of construction down the weakest fundamental layer

### 2.2.2 Globalno statično ravnotežje

Da konstrukcija ne zdrsne (translacija - pomik) in/ali se ne zvrne (rotacija - zasuk) morajo biti zagotovljeni ravnotežni pogoji za obravnavano ravnino: vsota vseh horizontalnih sil je nič, vsota vseh vertikalnih sil je nič in vsota vseh momentov (navorov) je nič. Pri stabilnostni analizi konstrukcije moramo dokazati zadostno varnost pred nezgodo premaknitve konstrukcije kot istočasnim pomikom in zasukom, prekoračitvijo napetosti v temeljnih tleh in loma materiala. Stabilnost konstrukcije mora biti zagotovljena z ustreznim faktorjem varnosti v vseh prerezih znotraj konstrukcije in v temeljnih tleh. Dosežene napetosti uporabljenega materiala morajo zadostiti vsem pogojem, predpisanim za uporabljeni in vgrajeni material.

Zadostne dimenzije temelja zagotavljajo lego rezultante v jedru prereza in posledično stabilnost konstrukcije ob izpolnjenem pogoju zadostne nosilnosti temeljnih tal in sprejemljivega posedeka konstrukcije. Varnostni količnik proti prevrnitvi je razmerje med vsoto stabilnostnih in prevrnitvenih momentov. Stabilnost konstrukcije povečuje ustrezna oblika temelja (razširitev) na strani možne prevrnitve in lastna teža konstrukcije. Prevratvene momente na pregrado povzročajo vodni in zemeljski pritiski ter vzgonski pritiski. Stabilnost konstrukcije proti zdrsni je odvisna od delujočih obtežb na konstrukcijo in upora proti premiku (pomik in zasuk), ki se lahko pojavi v poljubni ravnini. Privzamemo samo trenjski upor brez mobilizacije strižnega kota in kohezije. Dodatno varnost proti zdrsni

lahko dosežemo z večanjem nagiba površine temeljne rege. Pri izračunu najmanjšega koeficienta varnosti moramo upoštevati največjo horizontalno silo in njej pripadajočo vertikalno silo. Temeljna tla prevzemajo obremenitve konstrukcije oblikovane tako, da prehod obremenitve iz konstrukcije v temeljna tla ne povzroči globalne ali/in lokalne porušitve.

Osnovna mejna ravnotežja pri stabilnostni analizi konstrukcije uporablja mehanika tal za določanje stabilnosti prereza proti zdrsu. Količnik varnosti predstavlja razmerje med maksimalno možno strižno odpornostjo in dejansko strižno napetostjo v prerezu. Koeficient strižnega trenja je določen kot razmerje največjega strižnega upora, ki ga lahko mobilizira material v določeni ravnini, proti celotni horizontalni obtežbi. Za točnejši izračun koeficienta strižnega trenja se upošteva nizvodni pasivni odpor zemljine.

### **2.2.3 Statični račun za geomehaniko**

Statični račun togih konstrukcij je dejansko stabilnostna analiza podpornega ali opornega zidu. Običajno se izdeluje in preverja na podlagi predvidene geometrije, projektnih obtežb in pridobljenih geomehanskih podatkov (strižni kot, kohezija, kohezijski delež strižne trdnosti, prostorninska teža, nosilnost temeljnih tal, adhezija, koeficient horizontalnega aktivnega pritiska, koeficient horizontalnega pasivnega pritiska, vertikalna površinska obtežba, globina, merjena od vrha stene, nagib površine tal za steno, kot strižne odpornosti med tlemi in steno, prostorninska teža zaledne zemljine, normalna napetost pravokotno na steno v globini  $z$  (aktivno mejno stanje), normalna napetost pravokotno na steno v globini  $z$  (pasivno mejno stanje), tangencialna napetost na steno v globini  $z$  (aktivno mejno stanje), tangencialna napetost na steno v globini  $z$  (pasivno mejno stanje). Izbira in osnovne dimenzije prečnega prereza konstrukcije se določijo z ozirom na obremenitev, geomehanske podatke temeljnih tal, umestitvijo v prostor in izgledom. Pri določanju vplivov, ki jih upoštevamo v projektu, je treba upoštevati vse interakcije med temeljnimi tlemi in konstrukcijo. Pri stabilnostni analizi se upoštevajo osnovne obtežbe: aktivni (mirni, pasivni) zemeljski tlak, hidrostatični tlak in vzgon, hidrodinamični tlak in porni nadtlak, lastna teža objekta in koristna (prometna) obtežba, dodatne obtežbe: kapilarni tlak, tlak zaradi zaledenitve, lezenje tal, nabrekanje tal, potresne in dinamične sile, vpliv temperature, vključno z delovanjem zmrzali in posebne obtežbe: ločno delovanje konstrukcije. Določi se

potek sil delujočih na temelj in velikosti ter lego njihove rezultante. Dimenzioniranje temelja naj zagotovi širino in nagib temeljne površine za zagotovitev stabilnostnih pogojev: zadostne varnosti proti zdrsni po talni površini temelja in zadostne varnosti glede na porušitev temeljnih tal in dopustnega usedka. Za dokaz, da so doseženi faktorji varnosti proti porušitvi temeljnih tal in da so deformacije sprejemljive, moramo upoštevati mejna stanja nosilnosti in uporabnosti. V času gradnje se mora preveriti stabilnost posameznih kampad in v primeru nestabilnosti, z začasnimi konstrukcijskimi ukrepi zagotoviti stabilnost konstrukcije.

### **2.3 Določanje varnosti**

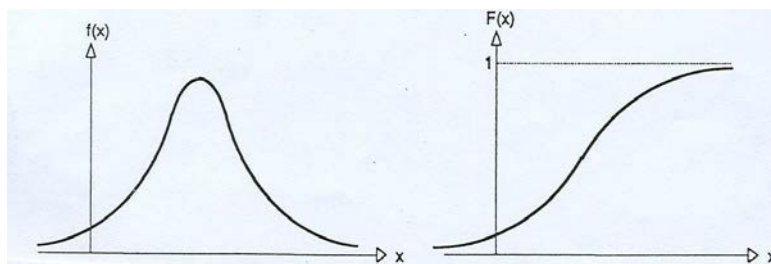
Do nezgode lahko pride iz določenih naravnih nevarnosti (potres, poplava, zemeljski plaz, snežni plaz), do nesreče pa zato, ker ni bilo sreče. Varnosti ne moremo zagotavljati tako, da se zanašamo na srečo, temveč da zagotovimo take razmere, da do škodljivega dogodka - nezgode ne pride ali čimbolj poredko, vendar v tem primeru že tvegamo. Naravna nevarnost se udejani v naravni nezgodi. Gradbeniško se objekti skonstruirajo tako, da nosilna konstrukcija prenese predvideno verjetno in koristno obtežbo v temeljna tla in se ne poruši. Poplavno nevarnost v naseljih in ob prometnicah določamo z verjetnostjo nastanka oziroma z recipročno vrednostjo verjetnosti – povratno dobo. Manjšo verjetnost prekoračitve nastopa škodljivega dogodka za uporabnika zagotovimo z izbranim časovnim obdobjem (daljšo povratno dobo). Tveganje pomeni, da ne zagotavljamo takih razmer, da škodljivi dogodek ne bi mogel nastopiti. S tveganjem pričakujemo v določenem časovnem obdobju izgube na premoženju in celo smrtne žrtve. Tveganje (Mikoš, 2007) je odvisno od pričakovane nevarnosti  $N$ , ranljivosti  $R$ , kot odpornosti proti učinkom naravnih nevarnosti in vrednosti ogroženca  $V$ . Matematično se tveganje določi kot njihov zmnožek  $T = N R V$ . Specifično tveganje je zmnožek vrednosti ogroženca in ranljivosti. Ob zagotovitvi takih razmer, da do škodljivega dogodka ne more priti oziroma v zelo dolgem časovnem obdobju, ni nevarnosti niti škodnega potenciala. Optimizacija zagotovitve varnosti in škodnega potenciala temelji na principu koristi in stroškov in je odvisna od stopnje sprejemljivega tveganja. Graditev konstrukcij objektov predstavlja vrsto nevarnosti. Graditelji pri gradnji delajo kljub nadzoru napake, čeprav so prepričani, da so projektirali in zgradili popolnoma varno konstrukcijo. Varnost konstrukcije je vprašljiva kljub spoštovanju vseh zakonskih zahtev in tehničnih

regulativ. Varnost proti neki nevarnosti obstaja takrat, ko je nevarnost s pomočjo ustreznih rešitev pod kontrolo, ali če se omeji na sprejemljivo majhno (zanemarljivo) vrednost.

### 2.3.1 Osnove

Na varnost konstrukcije vplivajo naslednji štirje sklopi: zunanji vplivi (človeške aktivnosti, klimatski pogoji, izredni dogodki); vplivi računske nenatančnosti oziroma poenostavitev; vplivi materiala (nosilnost oziroma nezadostno poznavanje drugih lastnosti) in nepravilnosti pri gradnji. Znotraj posameznega sklopa vplivajo na varnost konstrukcije napake, ki se delijo na: grobe (lahko se ugotovijo pri nadzoru in se izključijo); slučajne (upoštevajo se pri verjetnosti njihovega nastanka) in sestavljene (upošteva se analiza verjetnosti njihovega nastanka). Sistem varnosti mora zagotavljati primerljivost karakteristik materialov med seboj, upoštevati obstoječe izkušnje in uporabnost v inženirski praksi. (Androić, 2003)

Pri določevanju varnosti konstrukcije se mora odločiti, kakšna je upravičena stopnja varnosti, odvisna predvsem od verjetnosti nastopa obtežbe, kar neposredno vpliva na stroške izgradnje konstrukcije. Funkcija gostote verjetnosti in njeni parametri se določijo na podlagi dobljenih rezultatov meritev in opazovanj mejnih stanj nosilnosti in uporabnosti za posamezno konstrukcijo. Ti rezultati se razvrščajo v dogodke in vsote dogodkov. V primeru, da gre širina dogodkov proti nič, število rezultatov pa proti neskončnosti (Androić, 2003), se empirijska distribucija lahko prikaže kot zvezna funkcija.



Graf 2.1: Zvezna funkcija gostote verjetnosti in distribucije

Diagram 2.1: Continuous function of probability and distribution density

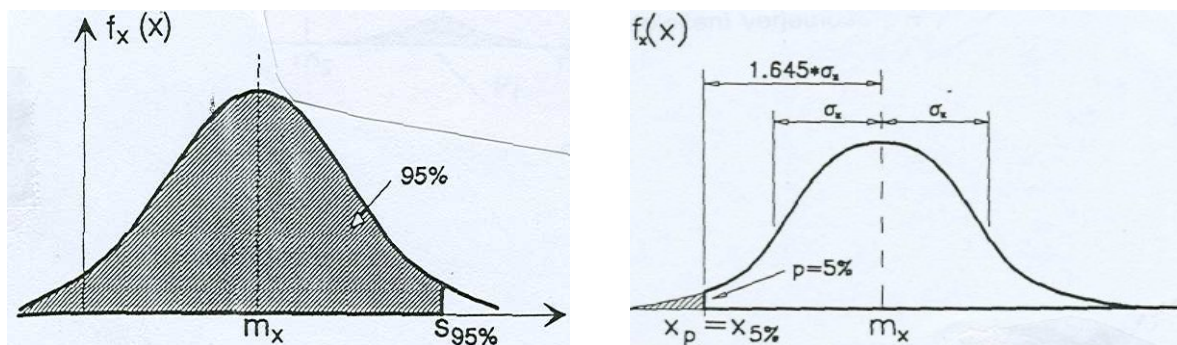
Zveza med funkcijama je:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(x) dx, \frac{dF_x}{dx} = f_x(x) \quad (2.1)$$

Vrednost funkcije  $F_x(x)$  je odstotek rezultatov manjših ali enak rezultatu  $x_I$ . Verjetnost  $p_f$ , da rezultat  $x$  ne bo večji od rezultata  $x_I$  pa je:

$$p_f = F_x(x_I) = \int_{-\infty}^{x_I} f_x(x) dx \quad (2.2)$$

Temeljna funkcija gostote verjetnosti je normalna razporeditev neke vrednosti, npr.: nosilnosti, obremenitve. Fraktilna vrednost ( $x_p$ ) je vrednost, ki je pri določeni verjetnosti  $p\%$  prekoračena ali dosežena. Osnovne lastnosti normalne porazdelitve so prikazane na grafu št. 2.2.



Graf 2.2: Normalna porazdelitev spremenljivke

Diagram 2.2: Normal distribution of variable

Fraktilna vrednost  $x_p$ :

$$x_p = m_x \pm k \sigma_x, \quad (2.3)$$

kjer so:

$m_x$  ... povprečna vrednost spremenljivke

$\sigma_x$  ... varianca spremenljivke

$k$  ... številski koeficient

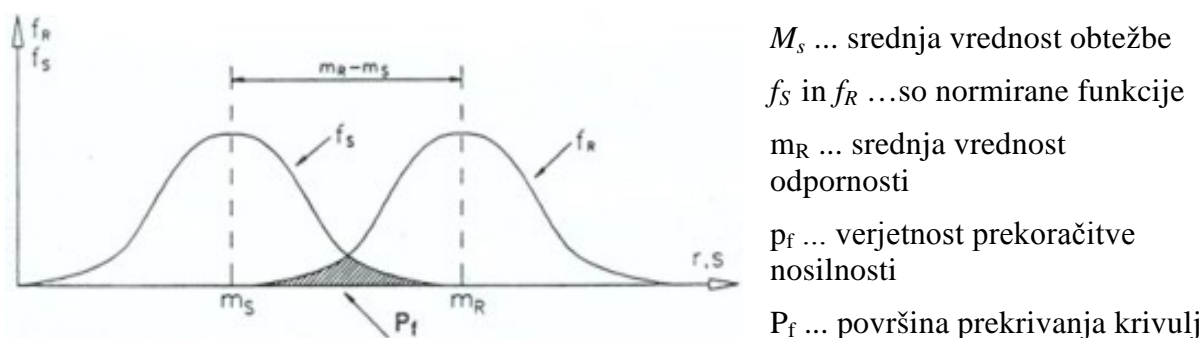
Predznak  $\pm$  je odvisen od velikosti fraktilne vrednosti in sicer za  $x_p > 50 \%$  (+) in za

$x_p < 50 \%$  (-).

Tabela 2.1: Vrednost koeficienta  $k$  za normalno porazdelitev spremenljivkeTable 2.1: Value of  $k$  coefficient for normal distribution of variable

p(%)	50.00	20.00	10.00	5.00	2.50	2.275	1.00
k	0.000	0.842	1.282	1.645	1.960	2.000	2.326

Verjetnost prekoračitve nosilnosti in s tem verjetnost porušitve se analizira tako, da se na osnovi zbranih statističnih podatkov določi funkcijo obtežbe na konstrukcijo ( $f_s$ ) in funkcijo odpora konstrukcije ( $f_R$ ). Funkciji sta prikazani v skupnem koordinatnem sistemu (Androić, 2003) na grafu št. 2.3.



Graf 2.3: Funkciji obtežbe in odpora prikazani kot normalna porazdelitev

Diagram 2.3: Function of loading and resistance shown as normal distribution

Funkcije gostote verjetnosti obtežbe in odpornosti lahko zapišemo kot razmerje:

$$\gamma_0 = \frac{m_R}{m_s} \dots \text{razmerje srednjih vrednosti odpora in obtežbe}$$

Nominalni koeficient varnosti je definiran kot razmerje med 5 % fraktilom odpornosti ( $r_p$ ) in 95 % fraktilom verjetnosti ( $s_p$ ) nastopa obtežbe:

$$\gamma_p = \frac{r_p}{s_p} \dots \text{razmerje srednjih vrednosti odpora in obtežbe.}$$

Za mero varnosti konstrukcije ( $p_f$ ) se vzame verjetnost prekoračitve nosilnosti konstrukcije (porušitve).



### 2.3.2 Indeks varnosti

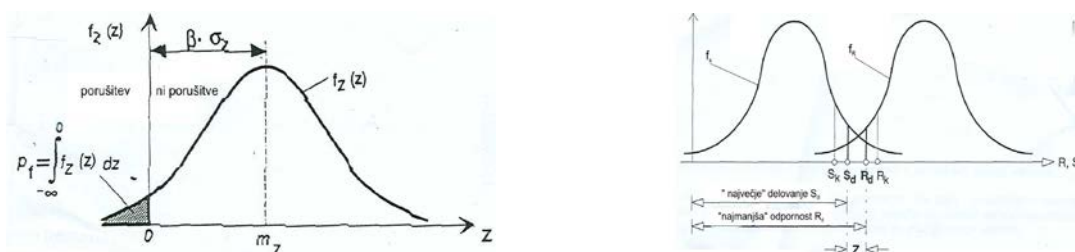
Stanje varnosti konstrukcije  $Z$  se lahko zapiše v odvisnosti od obtežbe  $S_d$  in odpornosti  $R_d$  kot razlika med odpornostjo in obtežbo.

$$Z = R_d - S_d \quad (2.4)$$

Obstajata možnosti:

a:  $S_d = R_d$        $Z = 0$  ... s tem je določeno mejno stanje konstrukcije

b:  $S_d > R_d$        $Z < 0$  ... mejno stanje je prekoračeno, konstrukcija ni varna



Graf 2.4: Funkcija gostote verjetnosti vrednosti stanja nosilnosti  $f_z(z)$  ter prekrivanje funkcij obtežbe  $f_s$  in odpornosti  $f_R$

Diagram 2.4: Function of probability density of load capacity value  $f_z(z)$  and overlapping of loading  $f_s$  and resistance  $f_R$  functions

Faktor  $\beta$  določa oddaljenost srednje vrednosti  $m_z$  od osi  $f_z(z)$  in lahko služi kot mera varnosti:

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_s}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_s^2}} \quad (2.5)$$

$$S_k \gamma_s \leq \frac{R_k}{\gamma_R}, \quad (2.6)$$

kjer so:

$S_d$  ... računaska obtežba (aktivna spremenljivka)

$R_d$  ... računaska odpornost (pasivna spremenljivka)

$S_k$  ... karakteristična obtežba (95 % fraktila)

$R_k$  ... karakteristična odpornost (5 % fraktila)

$\gamma_s$  ... delni faktor varnosti za obtežbo

$\gamma_R$  ... delni faktor varnosti za odpornost

Proučevanje nesreč je privedlo do spoznanja, da zgolj s povečevanjem faktorjev varnosti za obtežbe ( $\gamma_s$ ) in nosilnosti ( $\gamma_R$ ) ni mogoče povečevati varnost konstrukcije. Odpraviti se morajo napake, ki največ vplivajo na zmanjševanje varnosti.

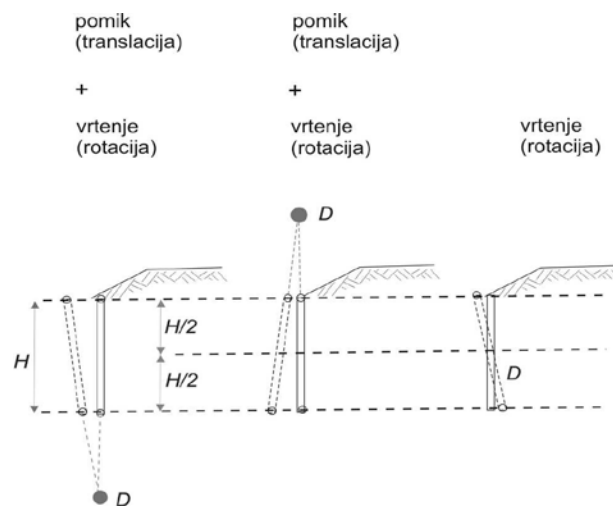
## 2.4 Obtežbe in obtežbeni primeri

Glede na trajanje v delimo obtežbe na stalne in premične. Poleg delitve obtežb glede trajanja, se deli obtežbe na prostorsko določene obtežbe (vedno na istem mestu) in prostorsko nedoločene obtežbe, ki zavzemajo različne lege v prostoru (obtežba vozil). Kadar obravnavamo problem v dveh razsežnostih, zanemarimo prostorske učinke konstrukcije npr. ločni učinek. Sile na konstrukcijo lahko obravnavamo razdeljene na vertikalne in horizontalne komponente. Obtežbe se delijo glede na odziv konstrukcije na statične in dinamične obtežbe. Glede na namen se lahko delijo obtežbe na nepremične, pomične; dolgotrajne, kratkotrajne; trenutne, trajne in končne vrednosti. Iz praktičnih razlogov delimo obtežbe na lastno težo, koristno obremenitev in obtežbo v času graditve.

### 2.4.1 Primeri stalnih, koristnih, izrednih obtežb

Stalna obtežba je obtežba, ki bo delovala na konstrukcijo ves čas trajanja objekta, ali pa so njene spremembe med trajanjem objekta minimalne, ali se obtežbe samo večajo (manjšajo) vendar v določenih mejah (teža konstrukcije, teža nadgradnje, zemeljski tlaki, deformacije, hidrostatični tlaki, posedki in prednapenjanje). Koristne obtežbe so tiste, za katere je verjetnost nastopa velika in se spreminjajo intenzivno skozi čas: koristna obtežba, deformacije, posamezni deli konstrukcije v času gradnje, montažne obtežbe, obtežba snega, ledu, potresna obtežba, posledice sprememb gladine vode, sprememba temperature in obtežba z valovi. Izredne obtežbe so obtežbe, ki trajajo le kratek čas, verjetnost nastopa v času trajanja objekta je zelo majhna: trčenja, eksplozije, posedki in zdrsi terena, vetrovi, netipični za pokrajino, potresi, požari in ekstremne erozije.

Če sile na konstrukcijo obravnavamo razdeljene na horizontalne in vertikalne komponente sil, so vertikalne sile: lastna teža pregrade, obtežba vode na kroni pregrade, koristna obtežba na kroni pregrade, pritisk tal, vertikalna komponenta zemeljskega pritiska zaradi trenja med steno in zemljino, vzgon. Horizontalne sile so: vodni pritisk čiste vode  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ , vodni tlak vode skupaj s plavinami  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ , pri drobirskih tokovih pritisk tekočine z  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$  izza pregrade. Pri polni pregradi se mora dodati k višini stalne zaježbe še prelivna višina visokih voda  $H = H_1 + H_0$ . Vodni tlak na temelj se privzame v celotni višini, enako kot tlak tal, horizontalna komponenta zemeljskega tlaka in horizontalna komponenta zemeljskega tlaka nastalega zaradi koristne obtežbe. Velikost, smer in razpored zemeljskega tlaka so odvisni od možnosti premika (pomika in zasuka) podporne konstrukcije. Pri tem se privzame, da se zasipni material nahaja v labilnem stanju. Premiki se lahko določijo kot zasuki konstrukcije okoli vrtilišča D. V primeru, da vrtilišče leži pod konstrukcijo ali globlje, nastane zdrs po vsej višini nad drsno ploskvijo. V primeru vrtilišča nad polovico višine konstrukcije nastopi zdrs samo po eni določeni drsini. V primeru, da vrtilišče leži nad sredino konstrukcije in peto konstrukcije, nastopi kombiniran zdrs.



Slika 2.2: : Premiki (pomiki in zasuki) konstrukcije (VSS, 1966)

Picture 2.2: Movement (shifts and wrenches) of construction (VSS, 1966)

V odvisnosti od lege in velikosti premikov razlikujemo aktivni, mirni in pasivni zemeljski pritisk. Za določitev aktivnega, pasivnega ali mirnega zemeljskega pritiska moramo poznati karakteristike zemljine za strižno trdnost (strižni kot, kohezijo), prostorninsko težo nasipnega materiala, kot trenja med notranjo stranjo konstrukcije in terenom, smer premika

konstrukcije; geometrijske karakteristike prečnega prereza konstrukcije; skupno višino konstrukcije, nagib notranje (zaledne) površine konstrukcije, nagib zaledja, velikost in razporeditev prometnih zunanjih obtežb in pogoje podzemne vode.

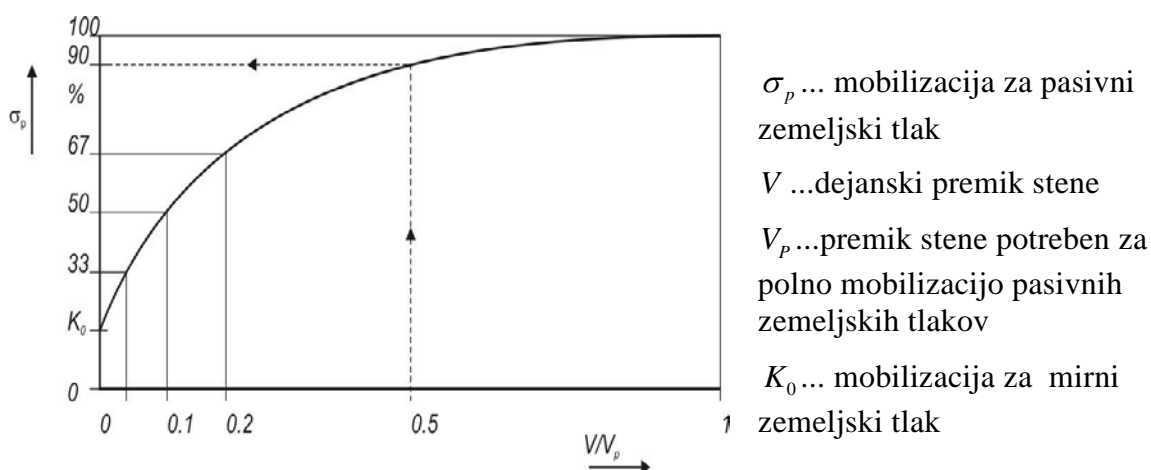
Aktivni zemeljski tlaki nastopijo, ko se podporni zid premika od zasipa zaledja. Da bi se aktiviral aktivni zemeljski tlak se mora zid premakniti za 1‰ višine zidu  $H$  (VSS, 1966). Proučiti je treba potrebne premike za mobilizacijo aktivnega mejnega stanja pri vertikalni steni, ki podpira horizontalno zaledje v nekoherentnih tleh. Velikost teh premikov je odvisna od načina premika zidu v smeri odmikanja od zemljine (zasuk v peti ali kroni, pomik, upogib) in od gostote zemljin. Količniki za aktivne pritiske so, za rahla in gosta tla podani v Evrokodu 7. Upoštevati je treba dejstvo, da so pomiki, potrebni za razvoj pasivnega mejnega stanja v nekoherentnih tleh za navpično steno, ki podpira horizontalno zaledje, mnogo večji kot pri aktivnem mejnem stanju zemeljskih tlakov. Evrocod 7 podaja velikostni red količnikov za polni pasivni zemeljski tlak in v oklepajih za polovično velikost mejne vrednosti. Količniki podanih pomikov naj se v primeru, ko obravnavamo tla pod nivojem vode, povečajo za 1.5 do 2.0 krat.

Mejne vrednosti zemeljskega tlaka je treba določiti ob upoštevanju premika zemljine in zidu ob poružitvi ter oblike odgovarjajoče porušene ploskve. Mejne vrednosti zemeljskega tlaka, ki izhajajo iz predpostavljenih ravnih porušnic, se lahko za visoke vrednosti strižnega kota in parametra stika med zidom in tlemi  $\delta$  zelo razlikujejo od vrednosti, ki jih dobimo za ukrivljene porušne ploskve in tako vodijo do rezultatov na nevarni strani. V primerih, kjer razpore, sidra in podobni elementi omejujejo premike podporne konstrukcije, je potrebno upoštevati, da aktivni in pasivni zemeljski tlaki morda ne zavzamejo ekstremnih vrednosti in temu ustreznih razporeditev.

Vmesne vrednosti zemeljskega tlaka nastopijo, če so premiki zidu premajhni za mobilizacijo mejnih vrednosti. Pri določanju vmesnih vrednosti zemeljskega pritiska je potrebno upoštevati velikost in smer premikov zidu glede na zemljino, kjer je ( $V_p$ ) premik potreben za polno mobilizacijo pasivnih zemeljskih tlakov in ( $V$ ) dejanski premik stene.

Mirni zemeljski tlak  $E_0$  nastopi, ko se podporni zid ne premika temveč miruje npr.: krilni zidovi, zidovi zgradb, oporniki. Mirni tlak je treba upoštevati tudi pri tistih delih konstrukcije, ki se ne smejo deformirati v smeri delovanja zemeljskega tlaka in pri tistih

konstrukcijah, ki so temeljene neposredno na nepodajnih, skalnatih tleh tako, da deformacije v smeri pritiska niso mogoče. To velja v izjemnih primerih tudi za dele konstrukcij, ki so temeljeni na kolih, če segajo do trdne hribine. Ravno tako je priporočljivo pri vertikalnih zidovih upoštevati mirni zemeljski tlak. Ob premiku navpičnega zidu od zaledja, preide zid takoj preko nevtralne vertikalne ravnine, torej je že v labilnem ravnovesju. Ob takem zidu se človek počuti zelo nelagodno. Tlaki se lahko aktivirajo postopoma, dokler ne nastopijo premiki. V tem trenutku se mirni zemeljski tlaki zmanjšajo na velikost aktivnih zemeljskih tlakov. Kadar ni relativnega premika zidu glede na zemljinu, je treba zemeljski pritisk izračunati iz mirnega stanja napetosti. Običajno privzamemo, da je normalno konsolidirana zemljina za podpornim zidom v mirnem stanju tedaj, ko je premik konstrukcije manjši od 0.5 ‰ višine zidu (Eurokod 7).



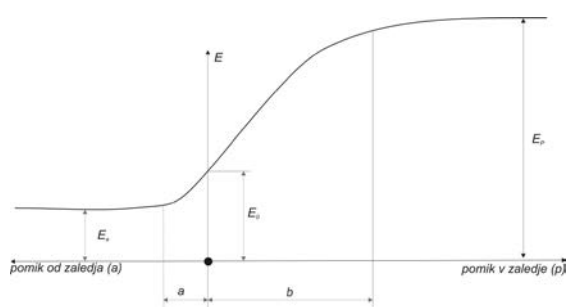
Graf 2.5: Mobilizacija pasivnega zemeljskega tlaka za nekoherentne zemljine v odvisnosti od premika stene  $V/V_p$  (Eurokod 7)

Diagram 2.5: Mobilisation of passive earth pressure for incoherent soil depending on wall movement  $V/V_p$  (Eurokod 7)

Pasivni zemeljski tlak  $E_p$  nastopi, ko se zid premika proti zaledju. Pasivni tlak se aktivira pri premikih velikosti okoli 1% višine zidu.

Podporne konstrukcije so največkrat obremenjene z aktivnim zemeljskim tlakom, ki nastane kot posledica zdrsa zemljine po porušnici. Pri izračunu se lahko kohezija zanemari (Šuklje, 1984). Osnovne predpostavke po Coulombovi teoriji določitve zemeljskih pritiskov tal so, da je popolnoma toga konstrukcija ravninski problem, neskončno dolg zid, porušnice so ravne ploskve (črte) in velja Coulombova enačba za strižno trdnost zemljine. Trenje med

konstrukcijo in zaledno zemljino se sme upoštevati samo takrat, kadar lahko nastopijo dovolj veliki pomiki za njegovo aktiviranje, vertikalne sile pa se pri tem prenesejo v temeljna tla brez bistvenih poseganj. Delež mobiliziranega trenja ob zidu in adhezije naj se upošteva kot funkcija trdnostnih parametrov zemljine, trenjskih lastnosti stične površine med konstrukcijo in zemljino, smeri in velikosti premikov konstrukcije glede na zemljino, sposobnosti konstrukcije za prevzem vertikalnih sil, ki nastanejo kot zaradi trenja in adhezije med konstrukcijo in zemljino. Velikost strižnih napetosti, ki se lahko mobilizirajo na stiku med zaledno steno konstrukcije in zemljino, določa parameter  $\delta$  tega stika.



$E$  ...zemeljski tlak v odvisnosti od premika

$E_0$  ...mirni zemeljski tlak brez premika

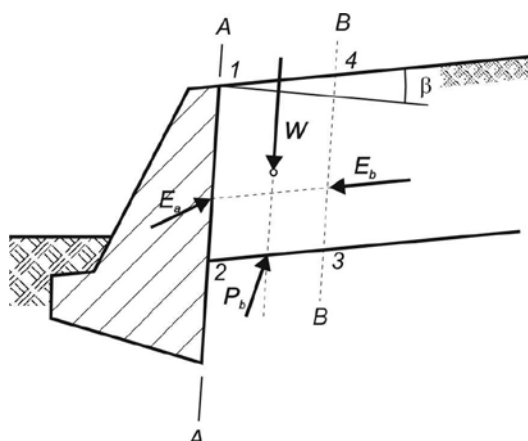
$E_p$  ... pasivni zemeljski tlak pri premiku v zaledje

$E_a$  ...aktivni zemeljski tlak pri premiku od zaledja

Slika 2.3: Velikost zemeljskih tlakov v odvisnosti od smeri premikov (VSS 1966)

Picture 2.3: Size of earth pressures depending on directions of movements (VSS 1966)

Mejna napetostna stanja v neskončnih, enakomerno nagnjenih homogenih pobočjih brez obtežbe na površju je proučeval Rankin. V takšnih pobočjih imajo napetosti na vertikalne ploskve smer pobočja, napetosti ki so pobočjem vzporedna pa navpično smer. Začetno mirno napetostno stanje se postopno bliža mejnemu (zdrsnemu) aktivnemu stanju ob predpostavki, da se prereza skozi pobočje med seboj oddaljujeta. Napetosti na vertikalne prereze so specifične vrednosti notranjih sil. Če neskončno pobočje prerežemo, in si zgornji preostali del pobočja mislimo podprt s togo podporno konstrukcijo, ne velja več ekvivalentnost sosednjih prerezov, ker sta material in geometrija prostora levo od prereza drugačna kot desno od prereza. V primeru delovanja enakomerne zvezne obtežbe na zemljino s kohezijo se določi svobodno višino, ki zniža višino za določitev zemeljskega tlaka z upoštevanjem strižnega kota.

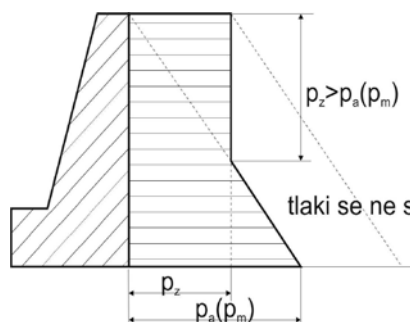


$E_a$  ...aktivna zemeljska sila v prerezu A  
 $E_b$  ...aktivna zemeljska sila v prerezu B  
 $w$  ...teža zemljine  
 $P_b$  ...reakcijska sila podlage  
 $\beta$  ...nagib pobočja

Slika 2.4: Ravnovesje v vzporedni lameli (1-2-3-4) (ŠUKLJE, 1984)

Picture 2.4: Balance in parallel blade (1-2-3-4) (ŠUKLJE, 1984)

Tlak zemljine zaradi komprimacije nasipnega polnila za zidom pri togih, nepodajnih delih konstrukcije, vzamemo v poštev v velikosti:  $P_z = 40 \text{ kN/m}^2$ , če je ta vrednost večja od drugih tlakov zemljine. Ta tlak se ne prišteva k drugim tlakom zemljine.



$p_z$  ...tlak zaradi komprimacije  
 $p_a$ ...aktivni zemeljski tlak  
 $p_m$  ...mirni zemeljski tlak

Slika 2.5: Komprimacijski tlaki

Picture 2.5: Compressed pressures

Velikost mirnega zemeljskega tlaka  $E_0$  je večja od aktivnega in občutno nižja od pasivnega zemeljskega tlaka. Določa se iz obrazca po Brinch-Hansenu:

$e_0 = \gamma h (1 - \sin \varphi)$  za  $\alpha = \beta = 0$  (Šuklje, 1984). V Evrokodu 7 je koeficient mirnega zemeljskega tlaka za horizontalno površje tal določen z izrazom:  $k_0 = (1 - \sin \varphi') \sqrt{OCR}$ .

Zaradi varnosti pasivni zemeljski tlak, to je odpora tal delujočega na temelj, ne upoštevamo. Dejansko ni zagotovljeno trajno delovanje tega tlaka na temelj v času uporabe konstrukcije. Polni zemeljski odpor se zelo redko doseže, predvsem zaradi potrebnih velikih premikov (100-krat več kot pri aktivnem tlaku). Zbitost terena pred temeljem je ravno tako vprašljiva.

Zemeljski tlak (pasivni tlak) se sme upoštevati pri prevzemu horizontalnih obremenitev samo, če se trenje lahko mobilizira vzdolž potencialnih porušnih ploskev v skladu z dopustnimi posedanji temeljev oziroma zagatnih sten. Konsolidacijske deformacije tal, izzvane s povečanim zemeljskim tlakom, morajo biti v skladu z možnimi in dovoljenimi pomiki temeljev ali zagatnih sten. Če se ne izdela poseben detajlni statični račun, se sme zemeljski tlak uporabiti pri plitvih in globokih temeljih le v višini aktivnega tlaka, izračunanega za  $0,75 \tan \varphi$ , kjer je  $\varphi$  strižni kot zemljine. (Ur. l. SFRJ, 1974). V Evrokodu 7 so v diagramih podani podatki za koeficiente zemeljskih pritiskov v odvisnosti od predvidenih strižnih karakteristik, nagiba terena in konstrukcije ter velikostjo trenja med konstrukcijo in zemljino.

#### 2.4.2 Hidrodinamične obremenitve

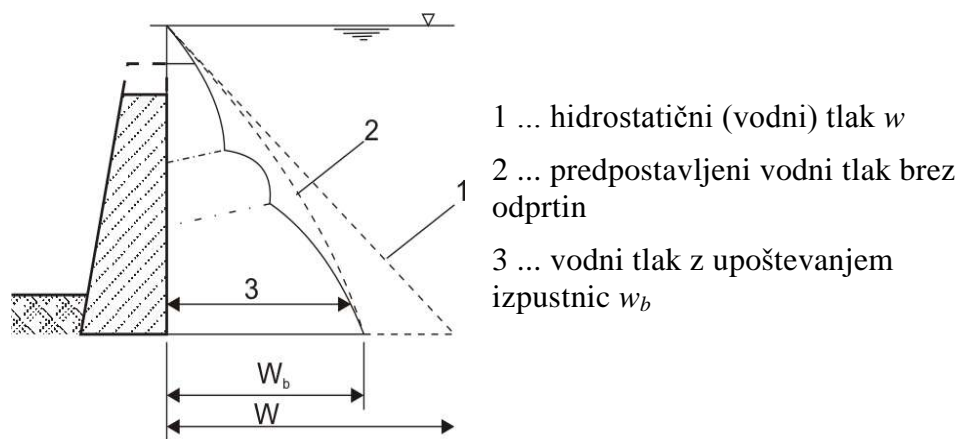
Vodni (hidrostatični) tlak in vzgon se javljata v porah tal zasičenih z vodo. Tlaki delujejo na vse strani horizontalno enakomerno ter na vertikalno ploskev, ki ne prepušča vode. Vodni (hidrostatični) tlak občutno poveča rezultanto sil na podporno konstrukcijo, kar je posledica zbiranja vode v zemljini za zidom. Pri konstrukcijah, ki podpirajo zemljino srednje ali nizke vodne prepustnosti (melj, glina) je potrebno privzeti, da za zidom delujejo vodni tlaki. V primeru, da ni drenaž in izpustov se mora računati s tlakom vode izza opornega zidu, ki se doda zemeljskim tlakom. Pri izračunu zemeljskega tlaka se namesto prostorninske teže naravno vlažne zemljine  $\gamma$ , vzame prostorninska teža zemljine potopljene v vodi. Kadar se konstrukcijo temelji na prepustni podlagi (s precejanjem), je treba upoštevati zmanjšano prostorninsko težo zaradi upoštevanja vzgona. Pri različnih vodnih nivojih gorvodno oz. dolvodno se upošteva porazdelitev tlakov vzdolž precejanja. Pri mirujoči vodi je sila vodnega tlaka  $W = \gamma_w h A$ . Pri tekoči vodi, s hitrostjo  $v$ , pa velja:

$$W = \frac{m v^2}{2} = \gamma_w \frac{v^2}{2g}. \quad (2.7)$$

Hidrodinamični tlak (filtracijski tlak) nastaja v porah tal, v katerih obstaja strujanje podtalnice, in je sorazmeren gradientu filtracijskega pretoka podtalnice v opazovani točki tal. Sila je produkt med težo vode in hidravličnim padcem. Hidrodinamični tlak deluje na delce tal kot sila mase v smeri strujanja podtalnice. Porni nadtlak nastaja v porah tal, ki so



zasičene z vodo in ima hidrostatični značaj. V zasičenih zemljinah je porni nadtlak sestavljen iz hidrostatične komponente in od nadtlaka, ki nastaja v stisljivih zemljinah, kot posledica spremembe obtežbe tal. V nezasičenih zemljinah se lahko nadtlak zraka v porah razlikuje od nadtlaka vode. Pri stalnih obtežbah tal se porni nadtlak s časom zmanjšuje zaradi iztiskanja vode iz por zemljine. Porni nadtlak nastaja predvsem v stisljivih zemljinah majhne prepustnosti. V primeru odprtini skozi podporne konstrukcije (prepustnice, izlivnice) se v okolici odprtini pojavi prostorski tok, ki je težko izračunljiv. Predpostavka, da deluje na konstrukcijo celotni vodni tlak, je zadosti točna in na varni strani.



Slika 2.6: Vpliv izpustnic skozi konstrukcije

Picture 2.6: Impact of outlets through constructions

O prepustnem umetnem ali naravnem zasipnem materialu z ozirom na obtežbo govorimo takrat, ko skozi pore zasipnega materiala ne teče več vode, kot jo lahko izteče skozi odprtine, torej voda ne zastaja v materialu, temveč se material odvodnjava, osušuje. S tem se povečujejo strižne karakteristike, pregrada se razbremenjuje. Talni vodni pritisk se ne privzame v izračun.

### 2.4.3 Dodatna in posebna obtežba

Sile dodatne obtežbe se upoštevajo pri popolni analizi temeljenja v skladu z ustreznimi predpisi za predvidene objekte. Če je velikost dodatne obtežbe blizu velikosti koristne obtežbe ali lastne teže, je treba dodatno obtežbo vnesti v izračun v vseh fazah analize temeljenja. Kapilarni pritisk nastaja v porah zemljin, ki so zasičene z vodo in so izpod

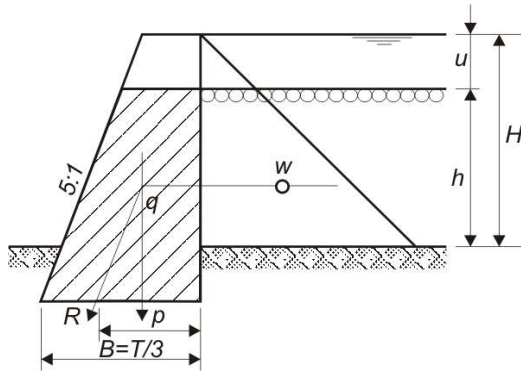
nivoja podtalnice ter delujejo kot sila mase vode. Velikost kapilarnega pritiska je odvisna od relativne vlage zraka in višine kapilarnega dviga vode v tleh, določa pa se z merjenjem in raziskovanjem. Pritisk zaradi zaledenitve nastaja v tleh pri temperaturah pod 0°C, če so pore popolnoma ali deloma zasičene z vodo. Velikost pritiska zaledenitve je odvisna od stopnje zaledenitve. Lezenje tal nastane zaradi viskoznih deformacij v glinastih tleh. Lezenje tal je povzročeno s popuščanjem napetosti pri stalni deformaciji, majhne deformacije obremenjenih zrn tal pa pri stalni obtežbi. Sile lezenja tal se določijo, če utegnejo vplivati na konstrukcijo gradbenega objekta in temelje. Nabrekanje je povečanje prostornine tal zaradi povečanja količine vode v tleh ali zaradi zmanjšanja obtežbe, in je omejeno na glinaste zemljine. Sile nabrekanja lahko povzročijo povečanje pritiska na temelje konstrukcije, če so preprečene deformacije temeljev. Velikost in smer delovanja potresnih (seizmičnih) in dinamičnih sil sta odvisna od vplivov, ki jih povzročajo. Sile potresnega (seizmičnega) in dinamičnega delovanja se upoštevajo v skladu s predpisi za izračunavanje zadevnih konstrukcij ali na podlagi razpoložljivih podatkov merjenja in dejanskih raziskav. Dinamični vplivi nastanejo zaradi hitrih sprememb obtežbe, zaradi periodičnih ali neperiodičnih udarnih sil, eksplozije, vibracije mase ali elementov konstrukcij, ki se prenašajo na temelj in tla.

Kot primer posebne obtežbe naj navedemo le ločno delovanje v tleh, ki nastane v posebnih primerih deformacije tal, kot posledica strižnih napetosti na mejah območja tal, ki je v stanju mejnega ravnovesja. Ločno delovanje vpliva na razporeditev in na velikost pritiska na mejnih površinah mase tal. Upošteva se v primeru neugodnega delovanja na konstrukcijo.

#### **2.4.4 Udarne sile drobirskega toka**

Najpomembnejše pri določitvi velikosti sile drobirskega toka je izračun oblike valovanja v posamezni plasti. Aktivni zemeljski tlak zasutja za pregrado se določi po enačbah za zemeljski tlak, pasivni zemeljski tlak (odpor zemljine) se določi glede na stanje temeljne zemljine. Dodatno se upošteva vodni tlak podzemne vode. Pri prostostoječi togi pregradi se mora upoštevati udarec drobirskega toka v velikosti od 7 do 13 kratne povečave statičnih količin, kot da ima drobirski tok prostorninsko težo 70 – 130  $kN/m^3$  (predavanja Boku, Dunaj). Posebno to velja za nove pregrade, z odprtimi kronami, v bližini naseljenih

področij. Pri izračunih varnosti konstrukcije na rekah drobirskega toka ali strižnega plazu se privzame v izračun tlačni pritisk 100 do 700 kN/m<sup>2</sup> (Logar, J. et al, 2006).



$u$  ... višina preliva

$h$  ... višina gladine vode nad dnom struge ob pregradi

$w = \gamma_w H$  ... specifični tlak vode [kN/m<sup>2</sup>]

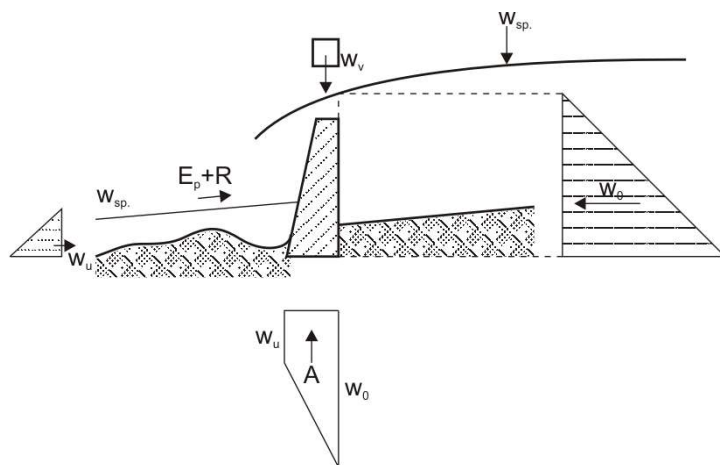
$W$ ... sila vodnega tlak [kN]

Slika 2.7: Udarne sile drobirskega toka

Picture 2.7: Main striking forces of gravel-stone drift

Ob nastopu drobirskega toka se pojavijo različna stanja, zato je za vsa treba preveriti varnost pregrade. Na kratko bodo ta stanja opisna v obtežbenih primerih od 1 do 5:

### OBTEŽBENI PRIMER 1: Pred zasutjem pregrade zadaj – prepustna tla



$W_0$  ... vodni tlak zgornje vode

$W_u$  ... vodni tlak spodnje vode

$E_p + R$  ... odpornost tal

$R$  ... trenjska sila

$G$  ... lastna teža pregrade

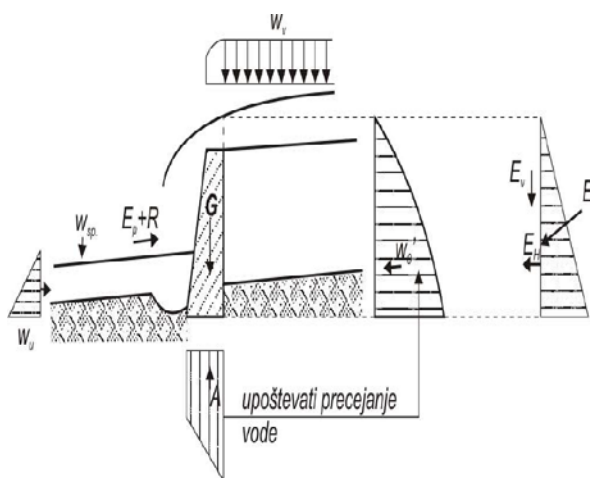
$W_v$  ... obtežba vode

$A$  ... vzgon

$W_u$ ,  $W_v$  in  $A$  se v računu zanemarijo.

Slika 2.8: Pred zasutjem pregrade zadaj – prepustna tla

Picture 2.8: Before filling in the barrier at the rear – permeable soil

**OBTEŽBENI PRIMER 2: Po zasutju pregrade zadaj**

$E$  ... aktivni zemeljski tlak

$E_H$  ... horizontalna komponenta aktivnega zemeljskega tlaka

$E_v$  ... vertikalna komponenta aktivnega zemeljskega tlaka

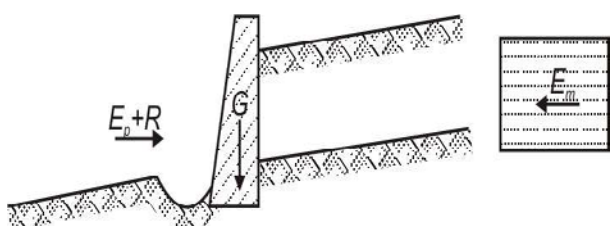
$W_0$  ... vodni pritisk ob upoštevanju precejnega toka

$W_u, W_v, A$  in  $E_v$  se v računu zanemarijo

$$W_0' + E_H \cong W_0$$

Slika 2.9: Po zasutju pregrade zadaj - prepustna tla

Picture 2.9: After filling in the barrier at the rear – permeable soil

**OBTEŽBENI PRIMER 3: Udarce drobirskega toka na pregrado**

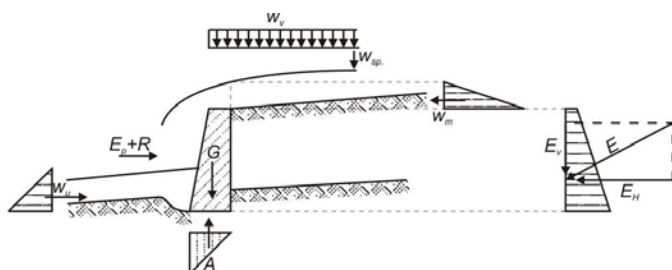
$G$  ... lastna teža pregrade

$E_p + R$  ... odpornost pregrade

$E_m$  ... udarec drobirskega toka (7-13 krat več od statičnega tlaka)

Slika 2.10: Udarce drobirskega toka na pregrado

Picture 2.10: Stroke onto barrier by gravel-stone drift

**OBTEŽBENI PRIMER 4: Polno zasutje, nova hudourniška struga, nizvodna struga ostane nespremenjena.**

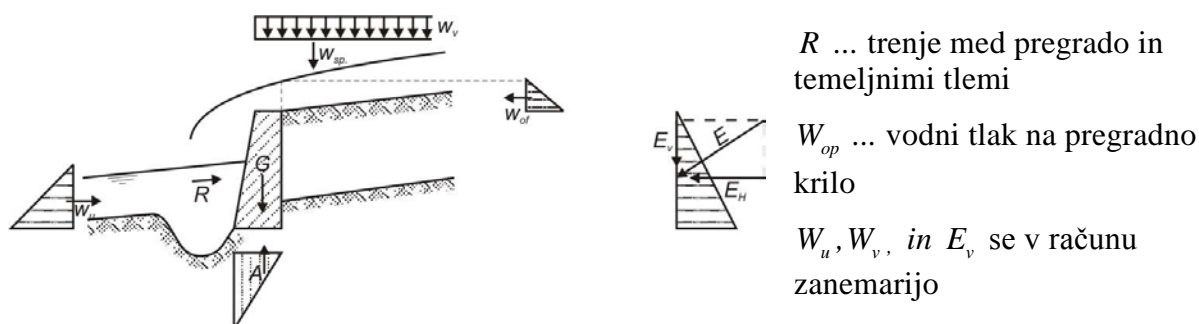
$W_m$  ... udarec drobirskega toka na krila pregrade

$W_u, W_v, A$  in  $E_v$  se v računu zanemarijo

Slika 2.11: Polno zasutje prostora pred pregrado

Picture 2.11: Filled space to capacity in front of barrier

### OBTEŽBENI PRIMER 5: Polno zasutje, novo oblikovano dno struge, pregrada spodkopana



$R$  ... trenje med pregrado in temeljnimi tlemi

$W_{op}$  ... vodni tlak na pregradno krilo

$W_u, W_v$ , in  $E_v$  se v računu zanemarijo

Slika 2.12: Polno zasutje, novo oblikovano dno struge, pregrada spodkopana

Picture 2.12: Filled to capacity, newly created riverbed, undermined barrier

Ko so določene posamezne obtežbe, je treba upoštevati njihovo hkratnost nastopa. Naslednje kombinacije obtežb pokrivajo skoraj vse okoliščine: običajni obtežbeni primer (OOP), izjemni obtežbeni primer (IOP) in ekstremni obtežbeni primer (EOP). Pri tem je lahko dodatna obtežba: temperatura, sedimenti, led, strjevanje betona in drugo, posebna obtežba pa potres in podobno. Pomembno je vedeti, da so zahtevani faktorji varnosti za zgoraj navedene kombinacije obtežb različni

Pregrada mora biti dimenzionirana na najbolj neugodno kombinacijo obtežb, ki imajo razumno veliko verjetnost, da se bodo zgodile hkrati. Obravnavane obtežbe (zemeljski tlaki, vodni tlaki, udarne sile, dodatna teža konstrukcije, prometna obremenitev) imajo v smislu pojavnosti, verjetnosti, intenzitete in trajanja različne ovojnice. V posameznih obtežbenih primerih so te obtežbe združene glede na namen preverjanja konstrukcije.

Tabela 2.2: Kombinacije obtežb

Table 2.2: Load combinations

Vir osnovne obtežbe	Kombinacija obtežb				
	običajna OOP	običajna IOP	ekstremna EOP	izjemni IOP	ekstremna EOP
$W_0$ vodni tlak zgornje vode	✓	✓	/	/	✓ (na krilo)
$W_u$ vodni tlak spodnje vode	/	/	/	/	/
G lastna teža pregrade	✓	✓	✓	✓	✓
$W_v$ teža vode	/	/	/	/	/
A vzgon	/	/	/	/	/
$E_p$ pasivni odpor zemljine	✓	✓	✓	✓	/
R trenjske sile	✓	✓	✓	✓	✓
$E_{ah}$ horizontalni aktivni zemeljski tlak	/	✓	/	✓	✓
$E_{av}$ vertikalni zemeljski tlak	/	/	/	/	/
$E_m$ udarec drobirskega toka	/	/	✓	✓ (na krilo)	/

## 2.5 Prevzemanje obtežb

Za nosilnost temelja podporne konstrukcije in njegovo dimenzioniranje se mora preveriti stabilnost tal. V tem primeru se preverja koeficient varnosti proti zdrsu za večje število drsin izbranih tako, da se koeficient varnosti izračuna zadosti točno. Vsak primer se mora samostojno izračunati. S ciljem poenostavitve in časovnega prihranka se je privzela splošna

enačba nosilnosti ( $Q_v$ ) ob predpostavkah, da se teža konstrukcije, obtežbe in kohezije določi za različne drsine in se sešteje; oziroma da se vpliv ekscentričnosti obtežbe ali nagiba terena na nosilnost določi ločeno za različne drsine in sešteje. Obe predpostavki dajeta rezultate na varni strani dimenzioniranja - večje dimenzije temelja podporne konstrukcije. V primeru večslojnega zaledja z različnimi strižnimi karakteristikami se ravno tako izračuna merodajna drsina za dovoljeno nosilnost temelja podporne konstrukcije. V enačbi nosilnosti se mora upoštevati dejanska prostorninska teža. V primeru dviga podtalnice v bližino podložnega betona se mora upoštevati prostorninska teža potopljene zemljine. Določitev velikosti koeficientov varnosti pri dimenzioniranju je odvisna od lastnosti zemljine, konstrukcije in privzete metode izračuna. Najvažnejše pri določitvi karakteristik zemljine je njena homogenost in točnost strižnih koeficientov ter na podlagi nezanesljive določitve teh podatkov določena velikost možnega odstopanja rezultatov.

### 2.5.1 Lastnosti zemljine

V statičnem računu se morajo lastnosti zemljine izraziti s števili – koeficienti tal in sicer kot opisna razporeditev – klasifikacija tal in računске količine – podatki (prostorninska teža, strižni kot, kohezija, poroznost, vlažnost (vsebnost vode), stopnja zasičenosti z vodo, premer zrna, meja tečenja, plastičnosti, koeficient prepustnosti, modul stisljivosti in normalne napetosti. Pri uporabi koeficientov se je potrebno zavedati, da so to le reprezentativne (aproksimativne) srednje vrednosti, četudi so pridobljene na podlagi laboratorijskih ali neposrednih raziskav. Za gradbenike so pomembne karakteristike zemljine kot nosilnega elementa (nosilnost temeljnih tal), obremenilnega elementa (obtežba nosilne konstrukcije) in uporabnega gradbenega materiala.

Kohezija ni stalna lastnost materiala. Odvisna je od prekonsolidacije zemljine, načina obtežbe, trajanja obtežbe, vsebnosti vode, granulometrijske in mineraloške strukture zemljine. Pri izračunih trajnih objektov se mora kohezijo upoštevati z veliko previdnostjo.

Modul je izbran za čim enostavnejši opis snovi. Enota modula je enaka enoti za napetosti. Osnova je Hookov zakon, ki predpostavlja, da je raztezanje (deformacija) sorazmerna z napetostjo:  $\varepsilon = \alpha \sigma \rightarrow \sigma = \varepsilon/\alpha = \varepsilon E = \Delta l/l E$ . Elastični modul (E) je namišljena napetost, ki deformira telo za njegovo dolžino. V tem primeru je  $\Delta l/l$  enako 1 in  $\sigma$  enaka modulu. Z

modulom stisljivosti ( $M_E$ ) izračunamo stisljivost edometriških vzorcev pri katerih bočnih napetosti  $\sigma_2 = \sigma_3$  ne merimo. Zveza (Nonveiller, 1979 182) med modulom elastičnosti ( $E$ ) in modulom linearne kompresije ( $M_E$ ) je:

$$M_E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1}; \quad M_E = K + \frac{4}{3}G; \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad G = \frac{E}{2(1+2\nu)}; \quad \frac{E}{M_E} = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu},$$

kjer so:

$K$  ...kompresijski modul (modul volumske deformacije)

$G$  ...distorzijski modul (modul strižne deformacije)

$\nu$ ...Poissonov količnik (Poissonovo število je količnik med prečnim skrčkom in skrčkom  $\nu = \varepsilon_p/\varepsilon$ )

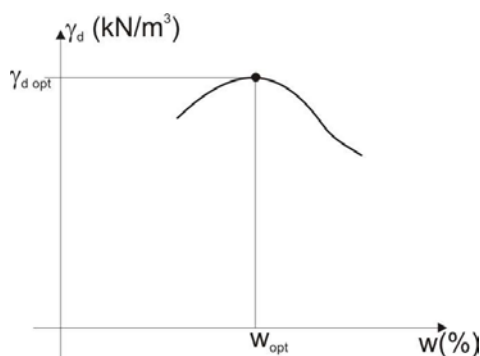
Ob predpostavki, da je Poissonov količnik 0,3 sledi razmerje:

$$M_E = \frac{4}{3}E \cong 1.33E_1 \quad (2.8)$$

$$E_1 = \frac{3}{4}M_E = 0.75M_E \quad (2.9)$$

Zbitost zemljine se določa v laboratoriju z normalnim Proctorjevim postopkom, ki se izvaja na frakcijah manjših od 10mm. Ob določeni energiji komprimiranja se določi razmerje med prostorninsko težo tal ( $\gamma_d$ ) in vsebnostjo vode ( $w$ ). Z  $w_{opt}$  se označuje optimalna vsebnost vode, pri kateri se dobi optimalna suha prostorninska teža ( $\gamma_{dopt}$ ) materiala po sušenju. Za  $\gamma_{dopt}$  je prepustnost in stisljivost tal minimalna, strižna trdost doseže maksimum pri  $w < w_{opt}$ . Pri koherentnih tleh so tla za  $w_{opt}$  zasičena od 80 do 85%. Meja tečenja  $w_L$  in meja plastičnosti  $w_p$  so pravi pokazatelji optimalne količine vode v zemljini. Dejansko je  $w_{opt}$  od 2% do 4% pod mejo plastičnosti  $w_p$  in 50% meje tečenja  $w_L$ .





kjer so:

$\gamma_{d\ opt}$  ...optimalna prostorninska teža

$w(\%)$  ...vsebnost vode v %

$w_{opt}$  ...optimalna vsebnost vode v %

Graf 2.6: Prikaz suhe prostorninske teže  $\gamma_d$  od vsebnosti vode ( $w$ ) v %

Diagram 2.6: Display of dry volume weight  $\gamma_d$  from water content ( $w$ ) by %

Prepustnost zemljine običajno, za laminarni tok, določimo po Darcy-jevem zakonu. Hitrost filtriranja vode v zemlji je najenostavneje izražena z linearno odvisnostjo hitrosti od hidravličnega padca:

$$v = k i, \quad (2.10)$$

kjer pomeni:

$v$  ... hitrost precejanja vode (filtracijska hitrost) [cm/s]

$k$  ...koeficient prepustnosti (filtracijski koeficient) [ cm/s]

$i$  ....hidravlični padec – razmerje med hidravlično izgubo in dolžino precejanja

V zelo poroznih gramoznih (prodih) prehaja laminarno strujanje vode v turbulentno strujanje. V tem primeru Darcyjev zakon ne velja. V primeru anizotropne zemljine (različna prepustnost v različnih smereh) se mora konstanto nadomestiti z matriko konstant v koordinatnih smereh  $x, y, z$  ( $k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$ ). Za določeno vrsto naravnih tal se koeficient prepustnosti določi le do reda velikosti (1, 10,  $10^2$ , ...). Koeficient se lahko spreminja za več potenc števila 10. Tako velik razpon nastane zaradi zbitosti in razporeda zrn, velikosti in oblike zrn ter granulacije. Pore so lahko med seboj povezane ali so ločene. Običajno so zemljišča anizotropna in sicer je horizontalna prepustnost ( $k_x = k_y$ ) večja od vertikalne prepustnosti ( $k_z$ ). V manjši meri je prepustnost odvisna od kvalitete vode (viskoznost, slanost). Koeficient prepustnosti je osnovni podatek za reševanje problemov podzemnih voda (znižanje nivoja, vdor vode v izkop, dimenzije filtra). Določi se s preizkusi in se mora pri izračunih privzeti v območju  $k = 10^{n \pm 0,5}$ .

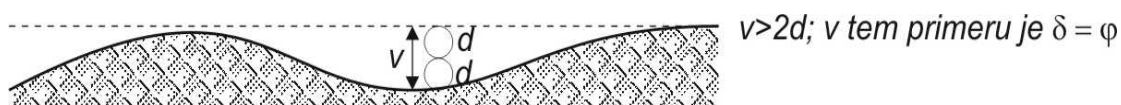
## 2.5.2 Raziskave temeljnih tal

Dobro poznavanje tal je predpogoj za ekonomsko ugodno zasnovo objekta. S takim pristopom se izognemo večini težav v času gradnje. Predvsem se morajo določiti merodajni podatki temeljne zemljine, ki so nujni pri dimenzioniranju in določitvi temeljev. Obseg raziskav je odvisen od pogojev temeljenja in vrste predvidene konstrukcije. Najprej se morajo zbrati razpoložljivi podatki o terenu na katerem se bo gradilo. Včasih predhodno zbrani podatki zadoščajo za oceno pogojev temeljenja. V večini primerov dobljeni podatki omogočijo izbor nadaljnjih raziskav, ki naj bi bile enostavne in cenene ter bi zadostovale za uporabne projektne osnove. Ti podatki se lahko v času raziskav dopolnjujejo z novimi spoznanji in podatki. V osnovi naj sodelujejo pri raziskavah gradbeni inženir, geomehanik in geolog. Zbrati je potrebno čim več podatkov o terenu in sicer: topografijo, geologijo, meteorološke podatke, hidrologijo. Podatki o starih objektih in terenu naj se rekonstruirajo na osnovi starih načrtov (zbirnih kart) in primerjajo z današnjim stanjem. Pregleda naj se zgodovinske arhive, pogovori z ljudmi, ki poznajo zemljišče in povedo svoje izkušnje ter z njimi pregleda teren, na katerem se bo gradilo. Kritična ocena zbranih podatkov omogoča odločitev ali so podatki zadostni ali so potrebne dodatne raziskave.

Lastnosti zemljin se preiskujejo na porušeni in neporušeni vzorci na terenu (preizkusi »in situ«) ali v laboratoriju in sicer: geofizične raziskave (seizmične, geoelektične kot indirektna metoda), določitev slojev z globinskimi sondami (zbijanjem ali vtiskovanjem penetrometra), raziskave s pomočjo sondažnih jam, oken, rovov, zasekov, sondažnih vrtin, presekov, jam in galerije), jemanje nepoškodovanih vzorcev za laboratorijske raziskave, vgraditev piezometrov za spremljanje nivoja podzemne vode, določitev strižnih karakteristik s krilno sondo, določitev prepustnosti terena, določitev nosilnosti in stisljivosti tal s poskusno obremenitvijo, določitev prostorninske teže na kraju samem, laboratorijske preiskave glede na geotehnične probleme, identifikacija tal in klasifikacija materiala, določitev geodetskega spremljanja terena, če se sumi na plazenje terena. V geotehničnem poročilu naj bi bila zbrana vsa dokumentacija o preiskanem materialu, ocenitev in razlaga izdelanih preiskav, opis terenskih pogojev in opozorilo pri gradnji določenega objekta. V poročilu bi naj bili predlogi za kontrolo v času gradnje in v času uporabe objekta in sicer za tla izpod temeljev in kontrolo posedanja v času gradnje ter kasneje v času uporabe.

### 2.5.3 Nosilnost temeljnih tal

Temelj ima nalogo, prenesti vse obremenitve v tla brez škode za konstrukcijo, ki obremenjuje temelj z rezultanto vseh sil. Temelj mora biti tako dimenzioniran, da rezultanta vseh sil delujočih na temelj ne more povzročiti zdrsna konstrukcije v temeljni regi, statično porušitev tal pod temeljem in nevarnega posedanja. Poleg tega morajo napetosti v temelju konstrukcije ostati v dovoljenih mejah. Pri nagnjenem terenu se preveri še globalna stabilnost celotne brežine vključno s konstrukcijo. Pri preveritvi nosilnosti tal projektant izbere geometrijo temelja in izračuna varnostne koeficiente proti zdrsni in proti statični porušitvi temeljnih tal. Neposredno pri dimenzioniranju temelja projektant izbere globino temelja in varnostne koeficiente proti zdrsni in statični porušitvi tal ter z izračunom določi obliko temelja. Pri določanju kota trenja je treba upoštevati gladkost stične betonske površine. Če je višina valov neravne površine večja od dvakratnega premera največjega zrna zemljine, se sme za kot trenja privzeti kot notranjega trenja zemljine.



Slika 2.13: Stična površina betona temelja – temeljna zemljina po izkopu

Picture 2.13: Contact area of foundation concrete – foundation soil after excavation

### 2.5.4 Strižna nosilnost temeljnih tal

V primeru, da se temelj preobremeni, se posede zaradi stisljivosti tal in zaradi bočnega dviga zemljine. Mejna obtežba, ki jo tla lahko prevzamejo, a da pri tem ne nastopi statični lom tal, imenujemo nosilnost tal. Običajno se privzame nosilnosti tal kot dovoljena obtežba, Nosilnost tal je odvisna od strižne nosilnosti. Da bi teren bočno popustil, bi se morala pod temeljem oblikovati drsina. Vzdolž drsine bi strižna nosilnost dosegla vrednost izračunano v Coulombovem zakonu.



Nosilnost  $Q$  se določi iz ravnotežja sil v prizmi  $ABC$ . Na to prizmo delujejo sile  $Q$ ,  $E_1$ ,  $E_d$  in  $G_1$ . Enačba momenta v odnosu na točko  $M$ , če upoštevamo radije s slike št. 2.13 znaša:

$$Q = \frac{G_1 g_M + E_1 e_M}{q_M} \quad (2.12)$$

V slovenskem nacionalnem dodatku k Evrokodu 7 1. del je navedeno, da se v Sloveniji uporablja za geotehnično projektiranje projektni pristop 2 (DA 2), razen za preverjanje globalne stabilnosti, kjer se uporablja projektni pristop 3 (DA 3) in da se pri tem uporablja nespremenjen nabor delnih faktorjev, kot je zapisan v izvorni verziji Evrokoda 7, 1. del. V članku (Gradbeni vestnik, 2006). je obdelana primerjava projektnega pristopa in nabora delnih faktorjev Nemčije in Slovenije.

Za izračun projektne vertikalne nosilnosti tal lahko uporabljamo približne enačbe (Evrokod 7), dobljene po teoriji plastičnosti in iz rezultatov preizkusov. Omogočiti morajo upoštevanje naslednjih parametrov: strižno trdnost temeljnih tal, predpostavljeno s projektnimi vrednostmi  $c_u$ ,  $c'$  in  $\varphi'$ , ekscentričnost in nagnjenost projektnih obtežb, obliko, globino in nagnjenost temelja, nagnjenost površine tal, tlake talne vode in hidravlične gradiente, spremembe v temeljnih tleh, zlasti slojevitost. Vsak temelj se mora izračunati z upoštevanjem vplivov vseh 12 parametrov. Tako veliko število parametrov povzroča preračun vseh kombinacij, ki nastopajo v praksi, kar je nepraktično celo s sodobnimi računalniki. Zato račun poenostavimo (VSS, 1966) z uporabo izračunanih faktorjev nosilnosti. Nosilnost temelja je enaka vsoti nosilnosti od teže, obtežbe temelja in kohezije.

### Dokazi nosilnosti (VSS, 1969) bodo prikazani za nekatere običajne primere:

- Pravokotna centrična obtežba deluje v jedru prereza: V tem primeru ima napetost v temeljnih tleh strešno obliko. Zemeljski klin ABC odriwa pasivni del ACD in BCD navzven. Največja dopustna vertikalna nosilnost:

$$Q_v = B \left( \frac{B \gamma N'_\gamma}{2} + q N'_q + c N'_c \right), \quad (2.13)$$

kjer so:

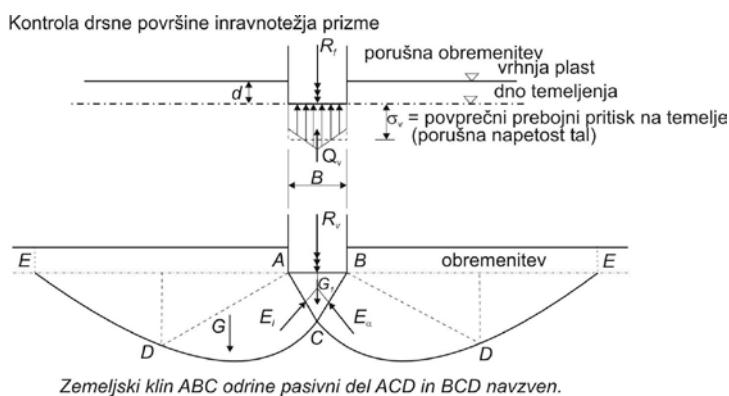
$B$  ... širina temelja

$\gamma$  ... prostorninska teža tal pod temeljno ravnino

$q$  ... lastna teža tal nad temeljno ravnino

$c$  ... kohezija tal pod temeljno ravnino

$N'_\gamma, N'_q, N'_c, \dots$  faktorji nosilnosti



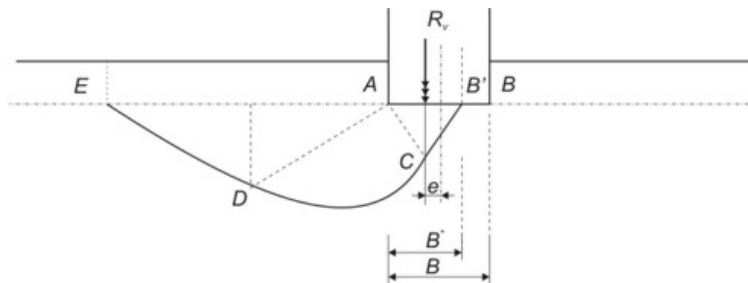
Slika 2.16: Pravokotna centrična obtežba

Picture 2.16: Rectangular centric load

Koeficient varnosti proti poružitvi temeljnih tal:

$$F_{stat} = \frac{Q}{R} = \frac{Q_v}{R_v} \quad (2.14)$$

- Pravokotna ekscentrična obtežba deluje izven jedra prereza: V tem primeru ima napetost v tleh trapezno oziroma trikotno obliko. Zdrs nastopi na strani ekscentričnosti (VSS, 1966).



**B'**... tlačna širina temelja **B**

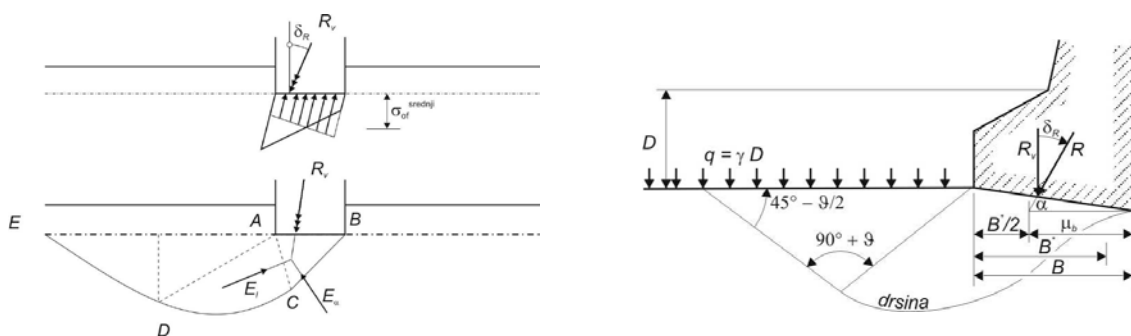
Zdrs nastopi na strani ekscentričnosti.

Slika 2.17: Pravokotna ekscentrična obtežba

Picture 2.17: Rectangular excentric load

- Poševna ekscentrična obtežba deluje v jedru prereza. Zemeljski klin ABC je zaradi poševne obtežbe nesimetričen. Odriva zemeljski klin (prizmo) navzven. Zdrs nastopi na šibkejši strani  $AC < BC$  temelja. Zaradi ekscentričnega delovanja rezultante je drsina spremenjena in nosilnost zmanjšana. Nosilnost ekscentrično obremenjenega temelja (običajno v praksi) je zadosti točno določena ob privzeti stvarni (efektivni) širini temelja  $B^*$ . Rezultanta  $R_v$  leži vedno v sredini  $B^*$ . Pri tem je nosilnost temelja:

$$Q_v = B \left( \frac{B \gamma N'_\gamma}{2} + q N'_q + c N'_c \right) \quad (2.15)$$

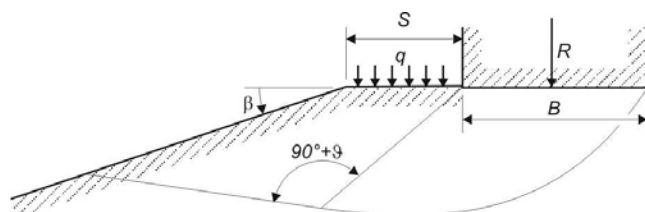


Slika 2.18: Poševna obtežba (v jedru prereza) in poševna obtežba na poševnem temelju

Picture 2.18: Inclined load (in profile core) and inclined load on inclined foundation

Koeficient varnosti proti poružitvi temeljnih tal je tedaj:  $F_{stat} = \frac{Q}{R} = \frac{Q_v}{R_v}$ .

- **Brežina pred temeljem:** Pojav brežine pred temeljem pomeni oslabitev polprostora pred temeljem. Zato računamo le odziv temeljne zemljine navzven, na strani oslabitve temeljnih tal, v smeri porušitve.



Slika 2.19: Drsina na poševnem terenu pred temeljem

Picture 2.19: Glide slope on inclined ground in front of foundation

Nosilnost temeljnih tal se lahko izračuna z uporabo korekcijskih faktorjev izračunanih po Mayerhofu za teren ( $q_\gamma$ ,  $q_q$ ,  $q_c$ ) odvisnih od strižnega kota, nagiba brežine in širine brežine pred zidom po enačbi:

$$Q_v = B \left( \frac{B \gamma N'_\gamma q_\gamma}{2} + q q_q N'_q + c q_c N'_c \right) \quad (2.16)$$

kjer so:

$B$ ...širina temelja [m]

$\gamma$ ...prostorninska teža tal pod temeljno ravnino

$q$  ...lastna teža tal nad temeljno ravnino

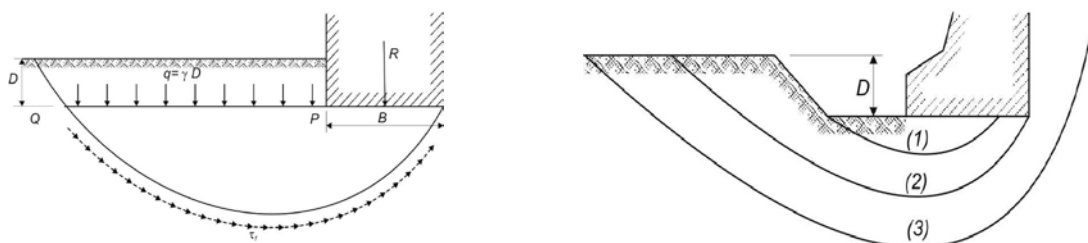
$c$  ...kohezija tal pod temeljno ravnino

$q_\gamma$ ,  $q_q$ ,  $q_c$ ...brezdimenzijski koeficienti

$N_\gamma$ ,  $N_q$ ,  $N_c$ ... faktorji nosilnosti terena

Pri plitvih pasovnih temeljih, kjer je globina temeljenja ( $D$ ) manjša od širine temelja ( $B$ ) se strižna trdnost nad temeljno rego (QP) zanemari in se vzame nadomestno vertikalno obtežbo  $q = \gamma D$ . Pri globokem temeljenju ( $D > B$ ) se strižna trdnost zemljine nad temeljno rego (QP) lahko upošteva. V tem primeru so korekcijski faktorji oblike terena spremenjeni (Brinch, Hansen, Mayerhof).





Slika 2.20: Način upoštevanja globine temeljenja in lokalni zdrs ((1)...lokalni zdrs, (2)...splošni zdrs, (3)...globalni zdrs)

Picture 2.20: Method of consideration of foundation depth and local slide ((1)...local slide, (2)...general slide, (3)...overall slide)

Do sedaj uporabljana nosilnost temeljnih tal se je uporabljala pri preverjanju konstrukcije na zdrs v splošnem. Predpostavljalo se je, da se je lahko formirala predpostavljena strižna ravnina. Predpostavka je bila realnejša ob utrjenem terenu. V primeru neutrjenega terena lahko nastopi zaradi stisljivosti lokalni zdrs, ki lahko nastopi tudi, če se pred temeljem zasutje odstrani. Po Terzaghiju se lahko varnost proti lokalnemu zdrs določi z uvedbo korekcijskih faktorjev tal. V tem primeru se nosilnost izračuna po enačbi

$$Q_v = B' \left( \frac{B' \gamma N'_\gamma q_\gamma}{2} + q q_q N'_q + c q_c N'_c \right), \text{ kjer upoštevamo, da sta strižni koeficient } \tan \varphi^* = \frac{2}{3} \tan \varphi$$

in  $c^* = \frac{2}{3} c$  in koeficient varnosti:  $F_{stat} = \frac{Q_v}{R_v}$ . Običajno je, da se izbere globina temelja, ki je

najmanj enaka merodajni globini zmrzovanja na področju gradnje konstrukcije.

## 2.6 Odtočne količine

### 2.6.1 Splošno

Določitev pretokov vodotokov je eden najvažnejših podatkov potrebnih pri hidravličnih računih. Kjer ni na voljo meritev pretokov, se v inženirski praksi uporabljajo empirični obrazci. Običajno so izračunani pričakovani pretoki za določena področja ali za vodozbirna področja posameznih odvodnikov. Obrazložitev obrazcev je večkrat zgolj opisna, tako da je mogoča zelo široka uporaba. Empirične metode upoštevajo letne in dnevne višine padavin ( $h$ ), površino ( $F$ ), obseg površine, srednji padeč terena ( $I_{sr}$ ), prepustnost zemljišča, srednji letni odtok, dolžino povodja, intenziteto padavin, čas trajanja naliva in podobno. Obrazci

predstavljajo odtoke, ki naj bi se čim bolj približali dejanski velikosti odtokov, ki bi jih pridobili s pomočjo merjenja. Na ARSO se lahko pridobijo potrebni podatki za posamezen vodotok. V praksi je bil pogosto uporabljen obrazec avtorja P. Kresnika za izračun odtočne količine v odvisnosti od velikosti povirja in razpona najvažnejšega parametra. Odtočni koeficient  $\alpha$  upošteva hrapavost terena in je velikosti od 0,6 do 6,0 (Schoklitsch I, 1930). Za reko Dravo v Beljaku je bila npr. določena vrednost odtočnega koeficienta 0,77. Enačba je preverjena z izmerjenimi pretoki odvisnimi od velikosti povirja in predvsem od vrednosti odtočnega koeficienta  $\alpha$  :

$$Q_{\max} = \alpha F \frac{32}{0.5 + \sqrt{F}} \quad (2.17)$$

kjer so:

$\alpha$  ... odtočni koeficient [-]

$F$  ...površina povirja [ $\text{km}^2$ ]

$Q_{\max}$ ...največji pretok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

Podjetje za urejanje hudournikov (PUH) v svojih projektih za urejanje hudournikov uporablja naslednje vrednosti odtočnega koeficienta  $\alpha$  :

0,40 – 0.50 manjši nagibi, velik delež prepustne podlage (kras ali močvirna zemljišča, velik delež gozda);

0,60 srednji do strmi nagibi, večinoma nepropustna podlaga, do 75% gozda;

0,70 – 0,80 pretežno strmi nagibi, velike višinske razlike, nepropustna podlaga, površina porasla do 50% z gozdom in

0,80 – 1,00 zelo strmi nagibi, do 25% gozda, alpski svet.

V spodnji tabeli so za ilustracijo izračunani pretoki v odvisnosti od odtočnega koeficienta in površine.

Tabela 2.3: Tabela pretokov – Kresnik

Table 2.3: Rate of flows table - Kresnik

F[km <sup>2</sup> ]	0,5 + F <sup>1/2</sup>	32 F	Q[m <sup>3</sup> /s]		q [m <sup>3</sup> /skm <sup>2</sup> ]	
		0,5 + F <sup>1/2</sup>	α = 0,6	α = 6	α = 0,6	α = 6
1	1,5	21,4	12,8	128	12,8	128
10	3,66	87,5	52,5	525	5,25	52,5
100	10,5	305	183	1830	1,83	18,3
500	22,9	700	420	4200	0,84	8,4
1000	32,1	1000	600	6000	0,60	6,0
2000	45,3	1480	888	8880	0,44	4,4

Razlika pretoka pri najmanjšem in pri največjem koeficientu je 10 kratna, pri večanju zlivne površine, pa se specifični pretok manjša.

### 2.6.2 Odtok v strmih strugah

Pri vodotoku v odprtih strugah lahko nastopijo, glede na padec, prečni prerez, odtočne količine in koeficiente hrapavosti, mirni, kritični ali deroči tok. Mirni tok je počasi mirno tekoča voda, površina je zelo malo valovita in ima stabilni izgled. Globina toka je večja od kritične globine. Deroči tok je hitro tekoč do deroč tok, površina v drčah je gladka z nemirnim izgledom toka, toda dolvodno so močni valovi z veliko hitrostjo, voda se prične peniti, vsrkava zrak in se obarva belo. Globina toka je manjša od kritične globine. Kritični tok nastane na prehodu med mirnim in deročim tokom. Stalno se spreminja, je nemiren in nestabilen tok z gladko do valovito površino. V tem primeru je globina toka enaka kritični globini. Pri stalnem (stacionarnem) toku je srednja hitrost  $v$  in razlika tlakov  $\Delta p$  odvisna od fizičnih lastnosti tekočine, od geometrijskih dimenzij struge, v kateri se giblje tekočina in od hrapavosti dna ter sten struge. Gostota homogene tekočine (Agroskin, 1964) je določena z razmerjem med njeno maso in prostornino. Specifična teža homogene tekočine je določena z razmerjem teže in njene prostornine.

Fizikalne lastnosti tekočine (vode) so specifična teža, gostota in masa:

$$\gamma = \frac{M}{L^2 T^2} \dots \text{specifična teža [kN/m}^3 \text{]}$$

$$\rho = \frac{M}{L^3} \dots \text{gostota [kg/m}^3 \text{]}$$

$M$  ... masa [kg]

$L$  ... dolžina [m]

$T$ ... čas [s]

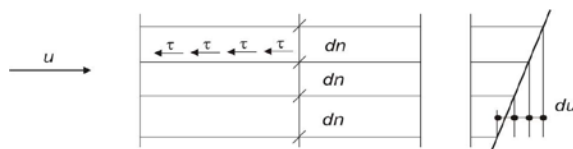
Dinamični koeficient viskoznosti  $\mu$  drugače imenujemo tudi dinamični koeficient notranjega trenja. Vedno pozitivne tangencialne napetosti med tokovnicama, ki so enake sili trenja med sosednjima slojema, so premo sorazmerne razliki hitrosti ( $du$ ) in obratno sorazmerne oddaljenosti med slojema ( $dn$ ):

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dn},$$

$u$ ...hitrost

$du$ ...razlika hitrosti

$\tau$ ...strižna napetost



Slika 2.21: Strižne napetosti med posameznimi sloji

Picture 2.21: Shear tensions between several layers

Fizikalne lastnosti se opisujejo z vrsto dimenzijskih karakteristik, ugodnejši pa so opisi fizikalnih lastnosti z brezdimenzijskimi števili (Agroskin, 1964). Brezdimenzijsko število za procese s prevladujočim vplivom teže ( $\gamma$ ) se imenuje Froudovo število, ki izraža razmerje med vztrajnostnimi in težnostnimi silami ter prikazuje stopnjo kinetičnosti vodotoka.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g h}} \quad \text{oziroma} \quad F_r^2 = \frac{v^2}{g h} \quad (2.18)$$

$F_r$  ... Froudovo število (brez enot)

$v$  ... hitrost vodnega toka [m/s]

$g$  ... težni pospešek [m/s<sup>2</sup>]

$h$  ... globina vode [m]

Mehanska energija, ki jo ima tok tekočine v enoti časa v opazovanem prerezu struge, se imenuje energija prereza. Specifična energija prereza je energija prereza na enoto teže glede na horizontalno ravnino. Pri stalnih tokovih s prosto gladino (tokovnice so ravne in vzporedne) je atmosferski manometrski tlak enak za vse prereze, zato izpade iz enačbe. Dobimo:

$$E_0 = E_{\text{potencialna}} + E_{\text{kineti}} \quad ,$$
$$E_0 = h + \frac{\alpha_c v_0^2}{2g} = h + \frac{\alpha_c}{2g} \cdot \frac{Q^2}{S^2} \quad (2.19)$$

kjer so:

$E_0$ ... specifična energija [m]

$h$  ... največja globina prereza [m]

$\alpha_c$  ... koeficient kinetične energije (1,01 – 1,08)

$g$  ... težni pospešek [m/s<sup>2</sup>]

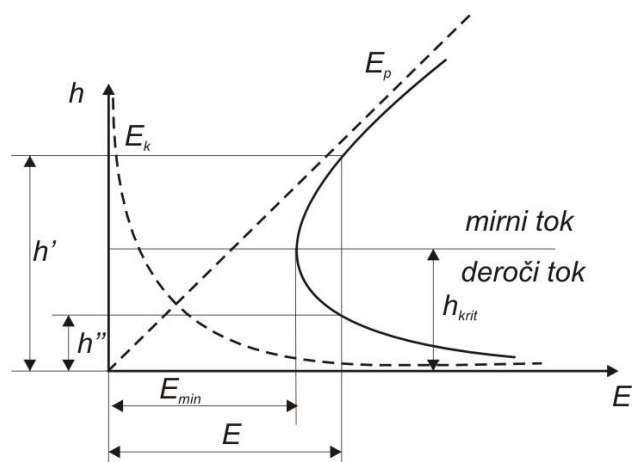
$Q$  ... pretok [m<sup>3</sup>/s]

$S$  ... prečni prerez [m<sup>2</sup>]

Preureditev enačbe za energijsko višino lahko izvedemo tudi tako, da z njo izrazimo pretok:

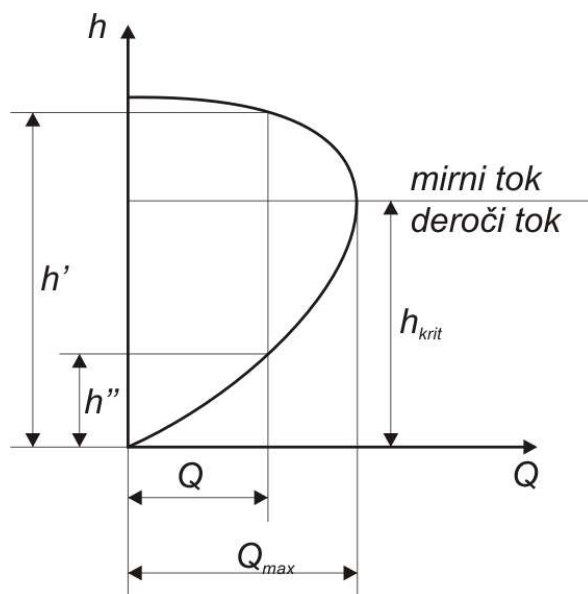
$$Q = S v = S \sqrt{\frac{2g}{\alpha_c} (E - h)} \quad (2.20)$$

Grafični ponazoritvi obeh enačb, ki prikazeta režime toka v prečnem prerezu, sta dani na naslednjih dveh grafih št. 2.7 in 2.8:



Graf 2.7: Specifična energija ob konstantnem pretoku; E – krivulja (Steinman, 2004)

Diagram 2.7: Specific energy at constant rate of flow; E – curve (Steinman, 2004)



Graf 2.8: Pretok ob konstantni specifični energiji; Q – krivulja (Steinman, 2004)


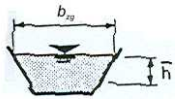
Diagram 2.8: Rate of flow at constant specific energy ; Q – curve (Steinman, 2004)

Spremembe specifične energije povzročajo dve območji odprtih tokov in sicer območje mirnega toka (hitrost toka je majhna ( $Fr < 1$ )) in območje deročega toka (hitrost toka je

velika ( $Fr > 1$ )). Tok v razmejitvi je poimenovan kritični tok (globina toka je enaka kritični globini ( $Fr = 1$ )). Za struge oblike trapeza z ožjim dnom in velikim padcem lahko enačbe Froudovega števila za pravokotnik prilagodimo trapezni obliki korita, če uporabimo poenostavljen izračun, kjer nadomestimo trapezni prerez z ekvivalentnim (namišljenim) pravokotnim koritom.

Tabela 2.4: Primerjava pravokotni – trapezni pretočni presek (Zeller, 1984)

Table 2.4: Comparison rectangular – trapezoid rating section (Zeller, 1984)

velikost vzdolžnega padca	pravokotni prerez 	trapezni prerez 
majhni padci ( $\leq 15\%$ )	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h}}$ $h = \frac{S}{b}$	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \bar{h}}}$ $\bar{h} = \frac{S}{b_{zg}}$
veliki padci ( $\geq 15$ do $20\%$ )	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g h \cos \alpha}}$	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \bar{h} \cos \alpha}}$ $\bar{h} = \frac{S}{b_{zg}}$

V tabeli št. 2.4 so uporabljene naslednje oznake:

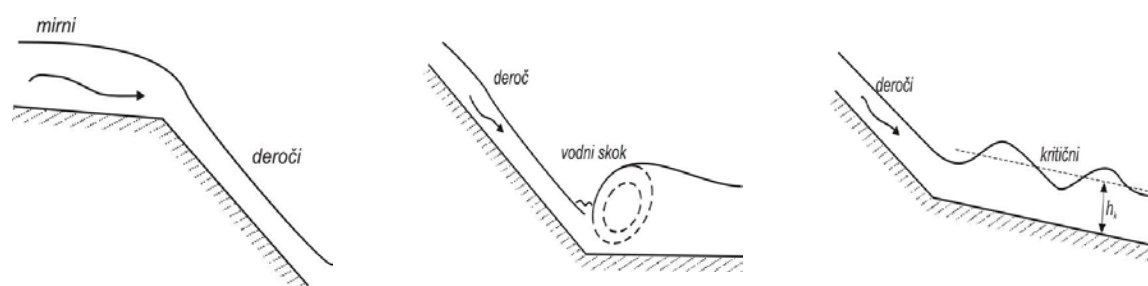
$S$  ... pretočni prerez [ $m^2$ ]

$b_{zg}$ ... širina gladine [m]

$\bar{h}$  ... srednja globina vode namišljenega ekvivalentnega pravokotnega pretočnega profila prelivne širine  $b_{zg}$  [m]

$\alpha$  ... padec oziroma nagib dna [ $^\circ$ ]

Vzdolž vodotoka pa se pojavljajo tako lomi nivelete, kot spremembe prečnih prerezov ali hrapavosti sten. Tedaj se pojavijo gladinske krivulje, ki opisujejo prehod med posameznimi režimi toka. Zelo pomembna je sprememba toka iz mirnega v deroči ali iz deročega v mirni tok. Prehod mirnega toka v deroči tok je gladek zvezni prehod tekoče vode brez valov in običajno brez poškodb korita.



Slika 2.22: Prehod mirnega v deroči tok, deročega v mirni in prehod deročega v kritični tok (Steinman, 2004)

Picture 2.22: Transition from subcritical to supercritical flow, from supercritical to subcritical flow and from supercritical to critical flow (Steinman, 2004)

Prehod deročega toka v mirni tok je nezvezen. Tok je zelo nemiren, pojavi se vodni skok kjer se tvori megla in prši. Težnostni val se ne more širiti gorvodno, ker velja  $v > (g h)^{0,5}$ , tako da je učinek motnje prenesen dolvodno, kjer se pojavi vodni skok. Razburkana gladina se ohranja na daljšem odseku dolvodno, dokler valovi ne izginejo. Višina valov je največ do  $v^2/2g$ .

Pri prehodu deročega toka v kritični tok se pojavi oscilirajoči vodni skok z valovi okrog kritične globine ( $h_k$ ). Valovi se pojavijo na daljšem odseku dolvodno, dokler ne izginejo. Valovi se dvignejo največ do  $\alpha v^2/2g$ . Prehod je zelo nestabilen in je v širšem območju privzet med  $1.0 \leq F_r \leq 1.7$ , kjer se tvorijo valovi. Prehod mirnega toka v kritični je zvezno potekajoč brez poškodb korita in razburkanosti gladine. V praksi dejansko pri  $F_r \approx 1.0$  ni ostre meje med mirnim in deročim tokom.

Kritična globina prereza, kjer je energija prereza najmanjša, je odvisna od geometrijskih oblik vodotoka in pretoka, ni pa odvisna od vzdolžnega padca in stanja struge. Pri enakomernem toku se gladina ustali na višini odvisni predvsem od padca in stanja struge. Vzdolžni padec struge, pri katerem je globina enaka kritični globini, se imenuje kritični padec:



$$i_{krit} = \frac{g O_{krit}}{C_{krit}^2 B_{krit}} [1], \quad (2.21)$$

kjer so:

$g$  ... težni pospešek [ $m/s^2$  ],

$O_{krit}$  ... omočen obseg [m],

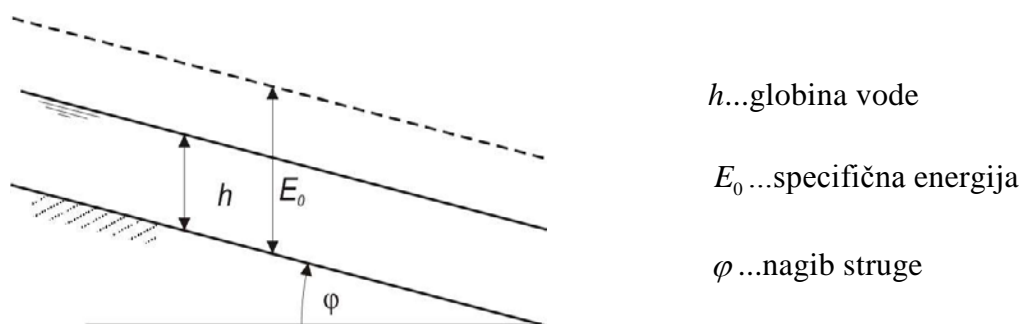
$C_{krit} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$  ... de Chezyev koeficient,

$B_{krit}$  ... širina vodnega ogledala ob  $h_{krit}$  [m],

$\lambda$  ... Darcyev koeficient odpora trenja in

$C = R^{1/6}/n_G$  ... povezava med de Chezyjevo in Manningovo enačbo.

V primeru, da je dejanski padec struge manjši od  $J_{krit}$  je normalna globina večja od kritične in tok je miren. Obratno je pri padcu struge večjem od  $J_{krit}$ , kjer je globina struge manjša od kritične globine ( $h_{krit}$ ) in je tok deroč. Pri stalnem, enakomernem toku je delo sile teže določeno z vzdolžnim padcem  $J$ . Pri toku navzdol pridobljena potencialna energija se v celoti porabi za premagovanje hidravličnih uporov. V takem toku je količina specifične energije konstantna.

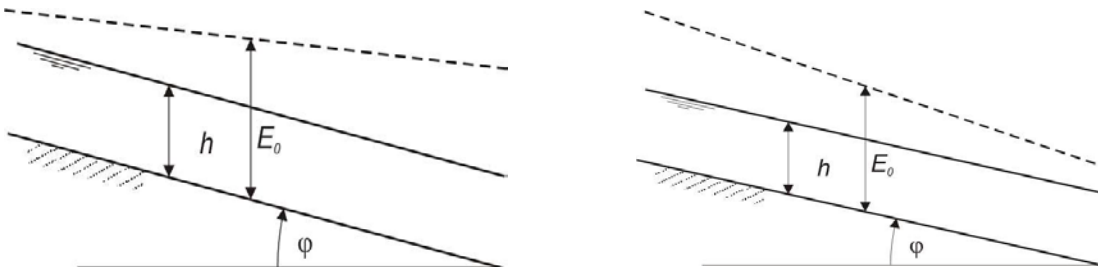


Slika 2.23: Konstantna specifična energija v enakomernem toku

Picture 2.23: Constant specific energy in uniform flow

V primeru, da je hitrost toka manjša od hitrosti enakomernega toka, potem se za premagovanje hidravličnih uporov ni porabila vsa razpoložljiva potencialna energija oz. celotno delo sile teže vode, zato dolvodno specifična energija narašča (levo, slika št. 2.24).

V primeru večje hitrosti toka od hitrosti enakomernega toka (desni del slike št. 2.24), se dolvodno specifična energija troši za premagovanje povečanega trenja, zato se zmanjšuje (Agroskin, 1966).



Slika 2.24: Povečevanje in zmanjševanje specifične energije

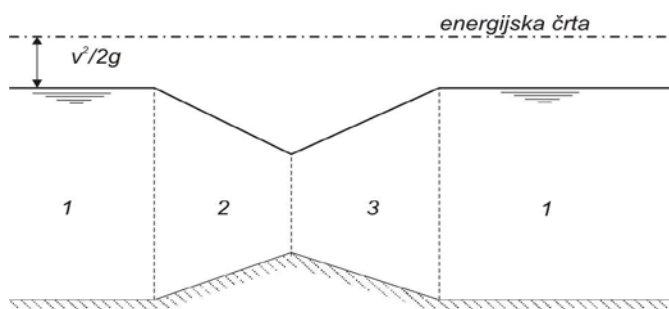
Picture 2.24: Expansion and reduction of specific energy

## 2.7 Pretočni profili

Količina dotekajoče vode pogojuje velikost prečnega prereza ob doseženi hitrosti pretoka. Geometrijska oblika korita vpliva na površino trenja in posredno na hitrost. Stanje dna in brežin vpliva na velikost koeficienta trenja, katerega določitev najbolj vpliva na izračun hitrosti tekočine.

### 2.7.1 Tok realne tekočine s prosto gladino

Osnovna lastnost toka s prosto gladino je, da vsaj na del površine vodnega telesa (na gladino) deluje tlak okolice ( $p_o$ ). Obravnavamo le enodimenzijski (1D) stalni enakomerni tok, kjer sta pretok in prerez konstantna in stalni neenakomerni tok, kjer je pretok konstanten, prerez pa se vzdolž vodotoka spreminja.



1...enakomerni tok

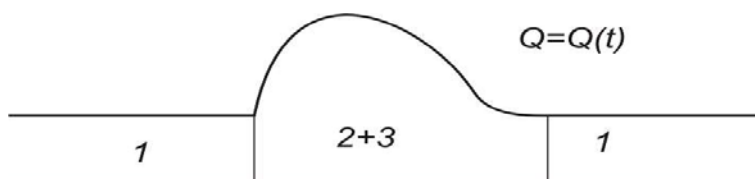
2...pospešujoči tok

3...pojemajoči tok

Slika 2.25: Tok s prosto gladino (Steinman, 2004)

Picture 2.25: Flow with free level (Steinman, 2004)

Pri dinamiki vodnega toka ločimo (Slika 2.265) enakomerni, pospešujoči in pojemajoči tok:



Slika 2.26: Sprememba pretoka po času (Steinman,2004)

Picture 2.26: Modification of rate of flow by time (Steinman,2004)

Porazdelitev hitrosti v enodimenzionalnem modelu je zapisana tako, da se v izračunih upošteva le srednja hitrost ( $\bar{u}$ ). Hitrost je funkcija vzdolžnega padca struge, relativne hrapavosti struge ali velikosti zrn in hidravličnega radija ali (ob zadostni širini struge) od njene globine. (Steinman, 2004):

$$\bar{u} = \frac{Q}{S}, \quad (2.22)$$

kjer sta:

$Q$  ...pretok [ $m^3/s$ ],

$S$  ...prečni prerez struge [ $m^2$ ].

Vpliv dejanskih razmer v strugi (neenakomerne porazdelitve hitrosti ) je zajet s popravnimi koeficienti (Boussinesqov ali Corriolissov koeficient). Povprečne hitrosti enakomernega toka lahko izračunamo po različnih enačbah:

- de Chezy (1769):

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{\rho g}{K}} \cdot \sqrt{RJ_0} = C\sqrt{RJ_0} \quad (2.23)$$

$$C = \sqrt{\frac{\rho g}{K}} \quad [m^{1/2} s^{-1}] \quad (2.24)$$

$K$  ... sorazmernostna konstanta

- Manning-Gauckler-Strickler (1889):

$$\bar{u} = \frac{1}{n_G} R^{2/3} \sqrt{J_0} \quad (2.25)$$

$n_G$  ... koeficient hrapavosti [ $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ ]

Zveza koeficientov  $C$  in  $n_G$  ob izenačenju srednje hitrosti:

$$C = \frac{1}{n_G} R^{1/6} \quad (2.26)$$

Enačbi de Chezyja in Manninga se uporabljata za vodotok s stabilno, ravno strugo. V aluvialnih koritih, kjer so prisotni še različni drugi vplivi in transport plavin, je analiza razmer veliko bolj zahtevna. Klasični metodi de Chezyja in Manninga za izračun stalnega toka nista več uporabni (pravilni). Za hitrost toka v strmih strugah, deročem toku in v prehodnem režimu je uporabnejša enačba Jaretta. Enačba je uporabna zaradi njene enostavnosti in ne zahteva poznavanja karakterističnih zrn plavin, ki so pogosto zelo nezanesljivi podatki (Rajar et al., 1990):

$$v = 3.11 R^{0.83} J_d^{0.12} \quad (2.27)$$

kjer je:

$J_d$  ...označuje padec dna struge

$R$  ...hidravlični radij

Enačba je primerna za izračun strmih naravnih vodotokov, ki so ravni, enakomerni, s povezano gladino in minimalno vegetacijo na brežinah, s stabilnim dnom iz samic in proda, brez vpliva zajezeb, z malo lebdečimi plavinami.

Kvantitativno izraženi pogoji so naslednji:

lastnosti tipičnega zrna  $0.02 \leq d_{16} \leq 0.12 \text{ m}$

širina dna struge:  $6.7 \leq B_d \leq 52.8 \text{ m}$

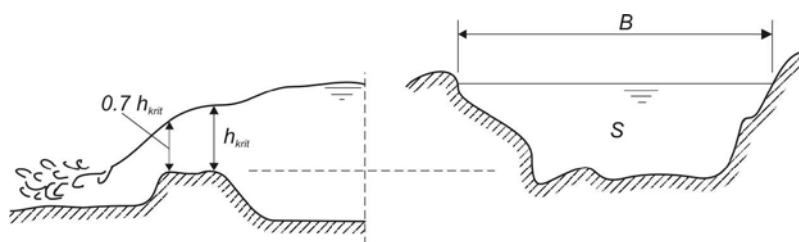
hidravlični radij:  $0.15 \leq R \leq 2.10 \text{ m}$

premer 90% zrna plavin:  $0.09 \leq d_{90} \leq 0.98 \text{ m}$

vzdolžni padec:  $0.002 \leq J \leq 0.039$

Za zelo strme in nepravilne struge se lahko hitrost najboljše izračuna na osnovi parametrov prereza za kritični tok. Metoda bazira na določitvi pretoka na osnovi parametrov enega samega profila, kjer veljajo (od padca neodvisne) enačbe za kritični režim toka. V tem profilu odteka voda z minimalno energijo. Takoj pod tem profilom (Rajar, 1990) nastane vodni skok.

Vse do sedaj opisane formule določajo hitrosti v bistvu na osnovi stalnega enakomernega ali kvazi-enakomernega toka, saj je hitrost funkcija katerega od naslednji parametrov: vzdolžnega padca struge, relativne hrapavosti ali velikosti zrn, hidravličnega radija ali širine gladine, ki so karakteristični na nekem odseku vzdolž toka. Pri zelo strmih in nepravilnih strugah, kjer so v toku velike skale in samice, ki ponekod profil delno zapirajo, pa je seveda tok daleč od stalnega in enakomernega. Tu postane povprečenje zgoraj omenjenih parametrov po odseku tako nezanesljivo, da netočnost metode preseže  $\pm 100\%$  osnovne vrednosti. V takih primerih priporočamo, da se uporabi metoda, ki bazira na čisto drugačnem principu. Parametre se določi na osnovi enega samega profila, ki naj bo profil, v katerem je kritični režim toka. Taki profili so v zelo nepravilnih koritih pogosti, saj je bistveno, da v takem profilu odteka tok z minimalno energijo, praktično pa to vidimo, ker nastane takoj pod tem profilom bolj ali manj izrazit vodni skok. Če torej prehaja mirni tok preko kritičnega, imamo vsaj lokalno tik pod kritičnim prerezom deroči tok, ki potem preide v mirnega preko vodnega skoka in je to zanesljiv znak, da imamo nad tem mestom kritični profil. Pojav približno kaže slika št. 2.28.



Slika 2.27 Kritični profil – vzdolžni, prečni prerez (Rajar, 1990)

Picture 2.27: Critical profile – longitudinal, cross section (Rajar, 1990)

Pravilna izbira kritičnega profila je morda najtežji del problema. Najbolje ga je poiskati v kaki zožitvi profila, kajti če je profil širok, s posameznimi ovirami, se lahko zgodi, da nastane več ločenih delnih profilov z različnimi kotami gladine. Paziti moramo, da ne merimo preseka preveč v dolvodnem delu preлива, ker se tam višina zaradi depresijske

krivulje že zmanjša na približno  $0.7 h_{krit}$ . Ko torej izberemo profil in izmerimo prečni prerez, lahko izračunamo pretok. Ker velja:

$$F_r = \frac{Q^2 B}{g S^3} = 1 \quad (2.28)$$

dobimo:

$$Q = \sqrt{\frac{g S^3}{B}} \quad (2.29)$$

Tako izmerjeni, oziroma izračunani pretok je za zelo nepravilne struge gotovo točnejši, kot izračunani po do sedaj opisanih enačbah. Največja napaka lahko nastane pri oceni lokacije kritičnega profila, vendar bo tudi tu napaka najverjetneje manjša od  $\pm 25\%$ . Če presek ( $S$ ) in širino gladine točno izmerimo, lahko to smatramo za edino napako, če pa jo izmerimo le približno ali celo ocenimo, pa je točnost seveda dodatno poslabšana zaradi netočnosti meritve geometrijskih karakteristik. Namesto Jarrettove enačbe za izračun srednjih pretočnih hitrosti, je primernejša empirična enačba Rickenmanna (Mikoš, 1996) za izračun stalnega toka v strmih hudourniških strugah brez izrazitih skokov. Potenčna enačba za srednjo hitrost sestoji iz vplivnih parametrov zemeljskega pospeška upoštevanega v brezdimenzijskem faktorju, pretoka vode, vzdolžnega padca struge in 90% -nega zrna plavin, ki je tudi najtežje določljiv parameter. Vse Rickenmannove empirične enačbe povzemajo terenske meritve opravljene na strugah brez izrazitih skokov ali stopenj. Podana enačba velja za vzdolžne padce dna struge med 0.8% in 63.0% in razmerje med pretočno globino voda in hrapavostjo dna struge  $d_{90}(cm)$  v intervalu od 0.4 do 4.0.

$$v = 0.79 Q^{0.34} I^{0.20} d_{90}^{-0.35}$$

kjer je:

$v$ ...srednja hitrost ( $m/s$ ),

$Q$ ...pretok vode ( $m^3/s$ ),

$I$ ...vzdolžni padec dna struge ( $/$ ) in

$d_{90}$ ...90%-no zrno plavin ( $m$ ).

### 2.7.2 Koeficient hrapavosti

Osnovni kriterij za odločitev, ali bomo uporabili de Chezyjevo ali Manningovo enačbo je, kako natančno je možno določiti primerno (ustrezno) vrednost koeficienta hrapavosti. V splošnem lahko pričakujemo, da sta  $C$  in  $n_G$  odvisna od Reynoldsovega števila, hrapavosti na ostenju in oblike prečnega prereza kanala. To ustreza hipotezi, da se  $n_G$  in  $C$  obnašata na enak način, kot Darcy-Weisbachov faktor trenja  $\lambda$ , uporabljen za (določitev) ocenitev energijskih izgub v cevovodih. Veljajo naslednje zveze:

$$I_0 = \frac{\lambda}{4R} \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (2.30)$$

Manningov koeficient trenja:

$$n_G = R^{1/6} \sqrt{\frac{\lambda}{8g}} \quad (2.31)$$

de Chezijev koeficient trenja:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (2.32)$$

kjer količine pomenijo:

$I_0$  ...ravnotežni padec dna struge,

$\bar{u}^2$  ...povprečna hitrost,

$R$  ...hidravlični radij,

$\lambda$ ...faktor trenja,

$g$  ...pospešek prostega pada.

Spreminjanje  $C$  in  $n_G$  je odvisno od dogajanja v turbulentnem toku. Turbulentni tok nad hidravlično gladko površino je tok, pri katerem so hrabe na obodu popolnoma prekrite z viskozno laminarno plastjo. Turbulentni tok nad hidravlično hrapavo površino pa se pojavi, ko hrabe štrlijo iz laminarne plasti in bistveno vplivajo na obnašanje toka, zato nastopi

zaviranje toka na obodu kanala. Vpliv viskoznih sil postane zanemarljivo majhen, zato postane koeficient upora toka neodvisen od Reynoldsovega števila (kjer je:  $Re = 4R\bar{u}^2/\nu$ ). Med tema dvema ekstremoma se nahaja še prehodno območje turbulentnega toka. V analizah ki sledijo, bomo uporabljali  $k_s$  kot parameter (Stricklerjev koeficient z dimenzijo), ki opiše hrapavost oboda. Določen je bil za tipični premer zrna peska, s katerim je bila oblepljena preiskovana površina. Tri različne režime turbulentnega toka (gladek, prehodni in popolnoma hrapavi) razmejuje Reynoldsovo število, ki ga izrazimo s pomočjo koeficienta  $k_s$  in s t. i. »strižno hitrostjo«. Le-to izvednotimo za stalni, enakomerni tok iz povprečne vrednosti strižne napetosti na ostenju, ki znaša:

$$\tau_0 = \rho g R I_0. \quad (2.33)$$

Tako je strižna hitrost:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g R I_0} \quad (2.34)$$

in strižno Reynoldsovo število ( $Re_*$ ):

$$Re_* = \frac{u_* k_s}{\nu}, \quad (2.35)$$

kjer so:

$\rho$ ...gostota vode,

$\tau$ ...strižna napetost,

$g$ ...pospešek prostega pada,

$R$ ...hidravlični radij,

$I_0$ ...ravnotežni padec dna struge,

$k_s$ ...enakomerna peščena hrapavost oboda po Nikuradzeju,

$\nu$ ...hitrost toka.

Ločimo naslednja območja:



Meje območja s prehodnim režimom toka so podane z intervalom  $4 \leq Re_* \leq 100$ , kjer spodnja meja definira konec hidravlično gladkega (turbulentnega) področja in zgornja meja začetek popolnoma hrapavega turbulentnega toka. Za območje hidravlično gladkega ostenja veljata enačbi (Blasius):

$$\text{za } Re < 100,000 \quad \lambda = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad \text{in za } Re > 100,000 \quad \lambda = 2.0 \log \left( \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2.51} \right)$$

V prehodnem območju med hidravlično gladkim in hrapavim tokom lahko  $\lambda$  ocenimo z modificirano Colebrookovo enačbo (prirejeno za tok s prosto gladino), kjer vpeljemo hidravlični radij kot karakteristično dolžino toka:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log \left( \frac{k_s}{12R} + \frac{2.5}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

Za hidravlično hrapav režim toka lahko faktor trenja ocenimo iz enačbe:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \log \left( \frac{12R}{k_s} \right)$$

Dogajanje v odprtih kanalih je torej podobno tistemu, ki ga srečamo v ceveh, zato je modificiran Moodyev diagram ustrezen (primeren) tudi za ocenitev  $\lambda$  in s tem tudi za ocenitev  $C$  ali  $n_G$ .

Ko se povečata vodostaj in pretok, se vrednost  $n_G$  v večini vodotokov zmanjša. To je posledica relativnega vpliva večjih ovir v koritu, ki imajo odločilen vpliv na vrednost  $n_G$  pri nizkem vodostaju, torej takrat, ko so delno potopljene v vodi, njihov vpliv pri veliki globini pa postane majhen. Vrednost za  $n_G$  se lahko tudi povečuje s povečevanjem vodostaja in pretoka, če so višji predeli brežin hrapavi, zarasli ali košato porasli, ali pa če vodostaj naraste toliko, da se izlije v poplavno območje, kjer se vrednost  $n_G$  spreminja z globino potopitve. V takih primerih je potrebno upoštevati sestavljeno vrednost  $n_G$ . Prisotnost pojava odlaganja plavin in izpodjedanja povzroča spreminjanje oblike korita, to pa povečanje vrednosti koeficienta  $n_G$ . Pomembno je ugotoviti, ali sta pojava prisotna in ali bosta prisotna tudi po ureditvi vodotoka.

V primeru velikih Reynoldsovih števil in velike hrapavosti, kar je običajni primer v naravnih koritih, postane faktor trenja neodvisen od Reynoldsovega števila in skoraj sorazmeren z  $R^{-1/3}$ . Če privzamemo, da je  $\lambda$  podan kar z  $R^{-1/3}$  in to vrednost vnesemo v ustrezno enačbo, lahko ugotovimo, da je za take pogoje Manningov koeficient  $n_G$  konstanten. Zato ima Manningova enačba konstantno vrednost za  $n_G$  le v primeru popolnoma hrapavega kanala in turbulentnega toka. V tem primeru je za ocenitev (določitev) primerne vrednosti za  $n_G$  potrebno kvalitativno poznavanje faktorjev, od katerih je  $n_G$  odvisen, saj je sicer v večini praktičnih problemov  $n_G$  funkcija večjih spremenljivk.

Koeficient  $n_G$  lahko za poenostavljene izračune vzamemo iz tabel, sestavljenih na podlagi meritev, vendar ga moramo za strme in zelo hrapave (gorske) vodotoke korigirati. Postopek korekcije so razvili pri Soil Conservation Service v ZDA, zato ima metoda SCS (SCS method of estimating  $n_G$ ) ime po organizaciji. Korekcija se vrši v sedmih korakih: Izbira osnovnega  $n_G$ , kjer izbiramo med kanali (strugo) v zemljini ( $n_G = 0.02$ ), vsekanimi v skalo ( $n_G = 0.025$ ), kanali v finem ( $n_G = 0.024$ ) in grobem ( $n_G = 0.028$ ) gramozu. V naslednjih korakih so podani modifikacijski faktorji, ki izražajo različne vplive na tok. Pri tem si pomagamo s povzročeno turbulenco različnih vplivov kot mero za velikost motnje. Vpliv, ki povzroči v toku opazno turbulenco, moramo primerno iz vrednotiti z izbiro ustreznega korekcijskega faktorja. Ko ocenjujemo vrednost za  $n_G$ , moramo pri tem upoštevati vpliv zarasti ( $n_v$ ), ki zaustavlja tok in s tem povečuje vrednost za  $n_G$ .

V splošnem je ta vpliv na vrednost koeficienta hrapavosti ( $n_G$ ) velik. Odvisen je predvsem od globine in višine vodnega toka, gostote in porazdelitve rastja ter tipa rastja. Upoštevanje vsega tega je nujno potrebno predvsem pri projektiranju manjših vodotokov, saj običajno niso redno vzdrževani.

Vpliv nepravilnosti korita ( $n_s$ ) zajame spreminjanje oblike prečnih presekov vodotoka vzdolž poteka struge vodotoka. V naravnih vodotokih so spremembe največkrat posledica naplavljanja in odlaganja plavin ali pa izpodjedanja brežin. Običajno imajo postopne spremembe prečnih presekov le majhen vpliv na vrednost  $n_G$ , medtem ko nenadne spremembe povzročijo povečanje vrednosti hrapavosti  $n_G$ . Povečanje je možno pričakovati tudi v primeru, ko upoštevamo vse upore v toku le preko koeficienta hrapavosti  $n_G$  na omočenem obodu vodotoka (Steinman, 2004).

Tabela 2.5: Vpliv vegetacije ( $n_v$ ) na koeficient hrapavosti (metoda SCS)  
 Table 2.5: Influence of vegetation ( $n_v$ ) on roughness coefficient(SCS method)

<b>Pogoji v strugi</b>	<b>vpliv na <math>n_v</math></b>	<b>min. in max. faktor</b>
gosta travniška trava, plevel, globina toka 2-3 krat večja od višine trave gibki poganjki šibja kot: vrba, topol, globina toka 3-4 krat večja od višine vegetacije	majhen	0.005-0.010
travniška trava, globina vode 1-2 krat višine trave grmičasto rastje (kot 1-2 leti stare vrbe) na brežinah, brez pomembnejše vegetacije na dnu, R (hidravlični r.) > 0.6 m	srednji	0.010-0.025
vrbe ali topoli, stari 8-10 let, izven vegetacijske dobe, prepleteni s plevelom, vsa vegetacija brez listja. R>0.6 grmičaste vrbe (stare 1 leto, v vegetacijski dobi, z listjem, prepletene s plevelom) na brežinah, na dnu kanala ni vegetacije. R>0.6 m	velik	0.025-0.050
travniška trava, globina toka manjša od njene polovične višine enoletne grmičaste vrbe (v vegetacijski dobi, z listjem, prepletene s plevelom) na brežinah gosta preslica na rečnem dnu. R < 3-4.6 m drevesa v vegetacijski dobi, vmes grmičevke, plevel, vse z listjem, katerikoli R<3-4.6 m	zelo velik	0.050-0.100

Trenutna sprememba velikosti prečnega prereza S od profila do profila, zahteva velik faktor korekcije, postopno spreminjanje vzdolž struge pa manjšega ali sploh nobenega. Sprememba oblike prečnega profila izraža hkrati tudi vpliv prestavljanja matice toka z enega na drugi breg, ki lahko, če se zgodi na kratki razdalji, privede do vrtincev in povratnega toka.

Vpliv hrapavosti površine ( $n_p$ ) se zajame s hrapavostjo omočenega oboda kanala, ki predstavlja osnovni parameter za ocenitev vrednosti za  $n_p$ . Če je material na obodu kanala finejši, je vrednost za  $n_p$  nizka in nanjo spremembe globine toka malo vplivajo. Če pa obod sestavljajo gramoz in/ali prodniki, potem je vrednost za  $n_p$  večja in se lahko spreminja v odvisnosti od globine toka. Veliki prodniki se običajno zbirajo na dnu takih vodotokov, zato

dobimo visoko vrednost za  $n_p$  pri nizkih vodostajih in relativno nizko vrednost za  $n_p$  pri visokih vodostajih. Vpliv hrapavosti omočenega oboda ( $n_p$ ) ocenimo kot vpliv makro hrapavosti rečnega dna na koeficient  $n_G$  (Steinman, 2004). Konkretno površino primerjamo z gladkostjo, ki bi bila za dani odsek in material dosegljiva v idealnih pogojih, ter izberemo ustrežni faktor korekcije.

Tabela 2.6: Vpliv spremembe velikosti prečnega profila S ter spremembe oblike prečnega profila ( $n_s$ )

Table 2.6: Influence of cross-section S size and cross-section shape modification ( $n_s$ )

Značaj spremembe velikosti in oblike profila ( $n_s$ )	faktor korekcije
Velikost S in oblika se postopno spremenita	0.000
Občasno izmenično ponavljanje velikih in majhnih prerezov S ali/in občasno prestavljanje matice toka z enega na drugi breg	0.005
Stalno spreminjaje velikosti prereza S vzdolž toka ali/in pogosto prestavljanje matice toka z enega na drugi breg	0.010-0.015

Vpliv prereza in ovir  $n_o$ , ki predstavljajo zapreke zaradi dotoka plavin, zaradi večjih debel ali zdrsov materiala, lahko bistveno vpliva na vrednost  $n_G$ . Stopnja vpliva je odvisna od števila in velikosti teh preprek. Faktor za relativni vpliv ovir v koritu - toku ( $n_o$ ) izberemo glede na število in značilnosti ovir v toku. Po SCS so lahko ovire tudi jeziki odloženih naplavin (prodišča), prodniki, balvani (skale samice), štori, korenine, padla in nakopičena debela. Pri oceni vpliva ovire upoštevamo v kolikšni meri ovira spremeni prečni prerez pri različnih globinah toka, obliko ovire (oglate povzročajo večji vpliv (turbulenco), kot zaobljene) in lokacijo ter razporeditev ovir v vodotoku v vzdolžni in prečni smeri. Metoda SCS priporoča vrednosti korekcijskih faktorjev, ki so naveden v tabeli št. 2.8.

Tabela 2.7: Vpliv nepravilnosti površine dna ( $n_p$ )

Table 2.7: Influence of irregularity of bottom surface ( $n_p$ )

Nepravilnost	Opis površine dna ( $n_p$ )	faktor korekcije
gladka površina	zablateno korito, najboljša možna površina za dani material	0.000
majhna	dobro vzdrževani vodotoki, minimalno erodirane ali izprane brežine kanalov ali drenažnih kanalov	0.005
srednja	srednje do slabo vzdrževani tokovi, srednje erodirane ali zamočvirjene brežine kanalov ali drenažnih kanalov	0.010
velika	zelo zamočvirjene brežine naravnih vodotokov, zelo erodirani kanali ali drenažni kanali, nepravilne površine v skalo vklesanih kanalov	0.020

Tabela 2.8: Korekcijski faktorji za vpliv ovir v toku ( $n_o$ )

Table 2.8: Correction factors for impact of obstacles in flow ( $n_o$ )

Vpliv ovire ( $n_o$ )	faktor korekcije
zanemarljiv	0.000
majhen	0.010-0.015
znaten	0.020-0.030
zelo velik	0.040-0.060

Potek trase vodotoka oziroma meandriranje lahko povzroči dodatne upore vodnemu toku. Medtem ko krivine velikih polmerov brez pogostih sprememb v smeri zavoja nudijo relativno majhen odpor toku vode, pa meandri majhnega premera znatno povečajo vrednost

koeficienta  $n_G$ . Za določitev vplivov oblike trase (zvijuganost – meandriranja,  $n_m$ ) najprej določimo razmerje dolžin  $l_m/l_s$ , kjer je  $l_s$  razdalja med začetkom in koncem obravnavanega odseka po zračni črti,  $l_m$  pa po osi vodotoka. Glede na dobljeno razmerje izberemo faktor korekcije ( $m$ ).

Tabela 2.9: Vpliv meandriranja na koeficient hrapavosti  $n_G$

Table 2.9: Impact of meander on roughness coefficient  $n_G$

$l_m/l_s$	meandriranje	faktor $m$
1.0-1.2	šibko (majhno)	1.000
1.2-1.5	znatno (srednje)	1.15
>1.5	močno (veliko)	1.30

Vrednost popravljenega koeficienta hrapavosti  $n'_G$  je vsota osnovne vrednosti koeficienta hrapavosti in vseh korekcij v predhodnih korakih:

$$n'_G = n_G + n_v + n_s + n_p + n_o$$

Končna vrednost koeficienta hrapavosti, z upoštevanjem vijugavosti trase, pa se izračuna po enačbi :

$$n'_G = (n_G + n_v + n_s + n_p + n_o) \cdot m, \quad (2.36)$$

kjer pomenijo:

$n_G$ ... osnovni koeficient hrapavosti, odvisen od materiala, ki sestavlja korito,

$n_v$ ... vpliv vegetacije,

$n_s$ ... vpliv nepravilnosti in sprememb korita,

$n_p$ ... vpliv hrapavosti oboda,

$n_o$ ... vpliv ovir v koritu,

$m$ ... faktor meandriranja.

Za preliminarne poenostavljene izračune lahko koeficient  $n_G$  določimo tudi na podlagi 50% zrna, po obrazcu:

$$n_G = 0.039 \cdot \sqrt[6]{d_{50}} \quad (2.37)$$

Vendar smo pri tem omejeni s pogojem, da relativna hrapavost ne sme biti velika (lahko je majhna ali kvečjemu srednja). Za to enačbo je Strickler analiziral podatke, zbrane iz različnih potokov v Švici, ki so imeli formirane struge iz grobega materiala in niso bile podvržene tvorbi sipin na dnu struge (Rajar et al., 1990).

Pri visokih vodah lahko odteka voda po urejeni strugi in višje po naravni strugi. V tem primeru je koeficient upora  $k_G$  po Stricklerju sestavljen iz  $k$  – struge in  $k$  – brežin. Enotni koeficient upora se določi z naslednjo enačbo:

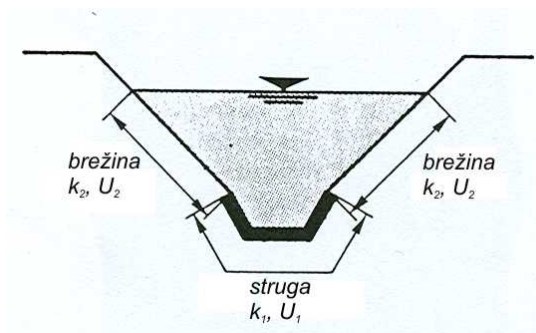
$$k_m = \left( \frac{U_1 + U_2}{\frac{U_1}{k_1^{3/2}} + \frac{U_2}{k_2^{3/2}}} \right)^{2/3}, \quad (2.38)$$

kjer so:

$k_m$ ...enotni koeficient upora

$U_1, U_2$ ...omočen obod

$k_1, k_2$ ...koeficient upora za strugo, brežino



Slika 2.28: Ureditev struge iz dveh materialov (Zeller, 1984)

Picture 2.28: Regulation of river bed made of two materials

Za kakovostne izračune je potrebno opraviti meritev (posnetek) stanj na terenu pri enem ali več (poplavnih) dogodkih. Manningov koeficient hrapavosti se tedaj določi na podlagi izmerjenih pretokov, poteka gladin in karakteristik vodotoka na stabilnem odseku vodotoka. Potrebno je, da sta definirana (opazovana) vsaj dva prečna preseka. Če imamo izmerjenih  $N$  prečnih presekov na obravnavanem odseku vodotoka, izračunamo koeficient hrapavosti po enačbi:

$$n_G = \frac{1}{Q} \left( \frac{(h + h_u)_1 - (h + h_u)_N - \sum_{j=2}^N (k \Delta h_u)_{j-1,j}}{\sum_{j=2}^N \frac{L_{j-1,j}}{(S R^{2/3})_{j-1} \cdot (S R^{2/3})_j}} \right) \quad (2.39)$$

kjer uporabljene oznake pomenijo:

$h$ ... gladina prostega toka v profilu glede na znane podatke ostalih profilov,

$(\Delta h_u)_{j-1,j}$  ... sprememba hitrostne višine med profiloma  $j-1$  in  $j$ ,

$h_u = \frac{\alpha_c \bar{u}^2}{2g}$  ... hitrostna višina v profilu (kinetična energija),

$k$ ... koeficient, ki zajema neenakomernost kanala ( $k = 0$ , če je kanal enakomeren,  $k = 0.5$  za neenakomeren vodotok),

$L_{j-1,j}$  ... razdalja med profiloma  $j-1$  in  $j$ .

## 2.8 Prelivi, pragovi in stopnje

Zaradi pregrade v strugi ali zožitve struge se gladina vode pred pregrado ali zoženjem dvigne do višine, ki omogoča celoten pretok vode ( $Q$ ) ob povečani hitrosti preko pregrade. Objekt, kjer voda teče pod razliko tlakov in zožitve korita se imenuje preliv. Odsek, kjer teče voda preko preliva se imenuje krona ali prag preliva. Pri prostem (nepotopljenem) prelivu je kota krone preliva nad gladino spodnje vode. Del vodotoka gorvodno pred prelivom se imenuje gornja voda, za prelivom dolvodno pa spodnja voda. Talni prag je objekt, kjer je spodnja voda višja od krone praga.

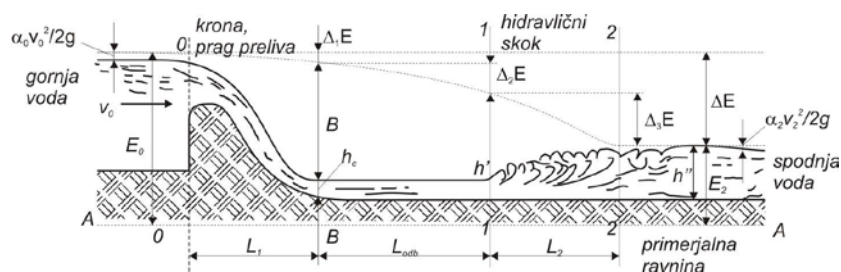


### 2.8.1 Splošno

Med gradbene objekte, ki jih voda stalno ali občasno preliva, spadajo stopnje (kaskade), jezovi, drče, konzolni odskoki. Prelivi so lahko z ostrim robom, praktičnega pravokotnega profila, s širokim pragom in praktičnega zaobljenega profila. Našteti preliivi so lahko glede na: smer toka vode pravokotni, poševni, vzporedni (bočni), zakrivljeni, sestavljeni (lomljena os); dotok vode k prelivu brez bočne zožitve (kontrakcije) struge ali z bočno zožitvijo; način povezave slapu z gladino spodnje vode popolni, nepotopljeni preliv (ni vpliva spodnje vode) ali potopljeni nepopolni preliv (zajezba s spodnje strani); nagib natočne stene vertikalni, poševni nagnjeni preliv proti toku ali v smeri toka; geometrijo prelivnega prečnega prereza na trikotni (Thompson), pravokotni (Rechbock), trapezni (Cipoletti z naklonom brežin 4:1), sestavljeni prerez in ozračenje spodnje konture prelivnega curka ozračeni, neodzračeni in prisesani preliv.

Povezava slapu s spodnjo vodo zavzema naslednje oblike: popolni (normalni) vodni skok, valovit vodni skok, podprt (potopljeni) vodni skok, odgnani vodni skok in površinski vodni skok. Slap (curek) padajoče vode je najvažnejši element preliiva, saj se v njegovih mejah zmanjšuje energija vodotoka. Hidravlični račun slapa določa obliko povezave prelivnega curka z gladino spodnje vode (Steinman, 1992).

Za primerjalno ravnino se privzame dno struge spodnje vode. Specifična energija za slapom se označi z  $E_0$ . Tako je razlika  $\Delta E = E_0 - E_2$  tisti del energije, ki se porabi pri toku vode čez pregrado.



Slika 2.29: Oznake preliiva (odgnani vodni skok)

Picture 2.29: Overflow designation (delayed hydraulic jump)

Del energije  $\Delta_1 E$  se potroši pri pretoku čez pregrado do zoženega (kontrahiranega) prereza, del energije  $\Delta_2 E$  se potroši v odbojnem delu vodnega skoka in del energije  $\Delta_3 E$  v samem vodnem skoku.

$$E_0 = \Delta_1 E + \Delta_2 E + \Delta_3 E = E_2 + \Delta E, \quad (2.40)$$

kjer oznake pomenijo:

$E_0$ ...specifična energija pred slapom,

$\Delta E$ ...porabljena energija,

$E_2$ ...specifična energija za slapom.

Poraba energije v prelivnem delu je odvisna od njegove oblike. Najugodnejša je oblika preliva, kjer se pojavlja najmanj odlepljenja toka od konstrukcije in vrtinčenja, ki povzročata dodatne energijske izgube in tako zmanjšuje prelivno sposobnost objekt oziroma koeficienta preliva ( $\mu$ ) ter povečuje prelivno višino. Oblika vodnega skoka v podslapju je odvisna samo od gibanja vode dolvodno od preliva. Valovit skok porablja malo energije, popolni hidravlični skok pa veliko energije. V primeru, da se v območju preliva ne porabi celotna energija  $\Delta E$ , se povezava slapu s spodnjo vodo izvrši v obliki odgnanega vodnega skoka. Del energije se v tem primeru porabi za premagovanje trenja vzdolž odbojne dolžine (med B in 1).

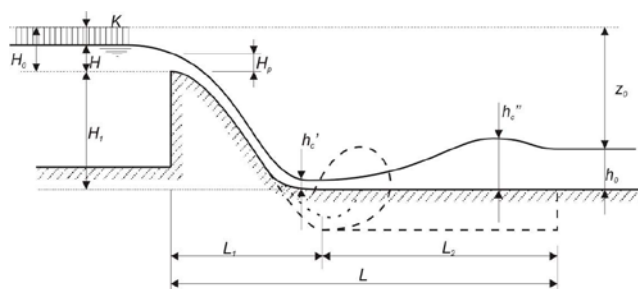
V strugah z normalno hrapavostjo so izgube majhne, poraba energije se vrši na dolgem delu podslapja. Vodotok ima na tem delu povečano hitrost. Korito se mora zaradi velike energije vode dodatno utrditi. Osnovna naloga projektanta je, zmanjševanje dolžine podslapja, npr. s povečevanjem hrapavosti na prelivnem delu. Tako se bo hidravlični skok pojavil bližje pragu in posledično se bo skrajšalo podslapje. Najugodnejše je, da deroči tok preide v mirni tok v mejah same zgradbe, podnožje preliva je v tem primeru začetek hidravličnega skoka, stik slapu je v obliki podprtega (potopljenega vodnega) skoka ( $\Delta E - \Delta_1 E$ ) in je dolžina podslapja najkrajša. Zmanjšanje energije  $\Delta_2 E$  na dolžini zajezbe se lahko zagotovi z povečanjem hrapavosti oziroma s povečanjem globine spodnje vode. V tem primeru bo nastal podprt skok. Vsa odvečna energija ( $\Delta_2 E - \Delta_3 E$ ) se bo porabila v tem skoku. Običajno se slap umiri z izgradnjo podslapja s poglobitvijo in udarnim pragom v spodnji vodi.



Slika 2.30: Udarni prag ali zid, poglobitev podslapja, ter kombinacija poglobitve podslapja in udarnega pragu oziroma zidu

Picture 2.30: Shock crest or wall, deepening of plunge pool, and combination of plunge pool deepening and shock crest or wall

V primerih, ko ni posebnih ureditev dolvodno, se pojavi odgnani vodni skok, kjer sta:



$h'_c$ ...globina v zoženem (kontrahiranem) preseku, manjša od  $h_{kr}$

$h''_c$ ...globini  $h'_c$  odgovorjajoča (konjugirana) višina vala, večja od  $h_{kr}$

Slika 2.31: Odgnani vodni skok

Picture 2.31: Delayed hydraulic jump

Na spodnji strani pragu se pojavi stoječi val imenovan vodni skok. Za določitev (vodnega skoka) stoječega vala vpeljemo povezani (konjugirani) globini  $h'_c$  in  $h''_c$ . Razlika  $h''_c - h'_c$  je višinska razlika vodnega skoka (Jevtić, 1978).

## 2.8.2 Kriterij potopljenosti

Začetek potopljenosti preliva je takrat, ko je višina spodnje vode enaka višini vode na prelivu  $(H_o+H_1)=h_o$ . Ob upoštevanju dotočne hitrosti preliv ni potopljen dokler velja:  $h_o/(H_o+H_1) > 0.88$ . Velikost tega razmerja je odvisna od oblike preliva (Agroskin. 1964). Potapljanje in s tem oviranje odtoka se prične pri razmerju  $h_o/(H_o+H_1) > 0.75$ , če ni izboljšav vtoka na prag, in pri zagotovljenem ugodnem vtoku na prag do razmerja  $h_o/(H_o+H_1) > 0.85$ . Za nepotopljeni (prosti) prelivni prag velja pogoj:

$$\frac{h_o}{(H_o + H_1)} \leq 0.8, \quad (2.41)$$

$$H_0 = H + \frac{v}{2g} \quad [\text{m}], \quad (2.42)$$

kjer so:

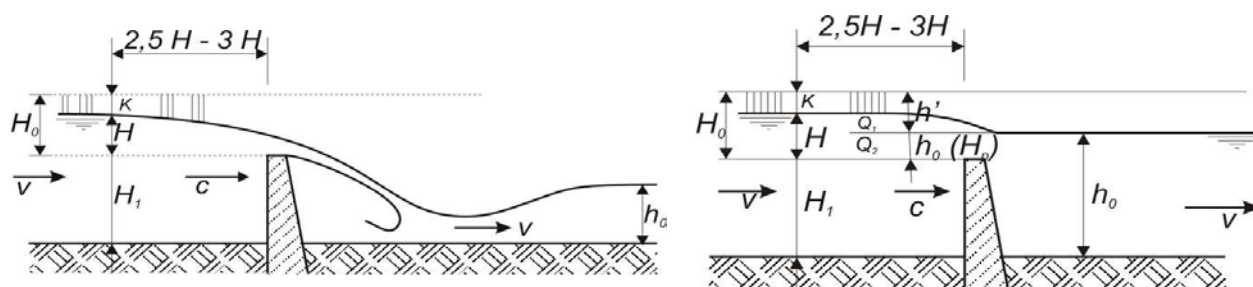
$h_0$ ...višina spodnje vode,

$H$ ... normalna globina (višina) prelivnega curka,

$H_p$ ... normalna globina prelivnega curka na pragu,

$H_o$ ... nadomestna višina prelivnega curka,

$v$ ...hitrost vode pred pragom [ m/s ].



Slika 2.32: Prosti preliv  $h_0/(H_0+H_1) \leq 0.8$  in potopljen preliv  $h_0/(H_0+H_1) \geq 0.8$  (Jevtić 1978)

Picture 2.32: Free overflow  $h_0/(H_0+H_1) \leq 0.8$  and submerged overflow  $h_0/(H_0+H_1) \geq 0.8$  (Jevtić 1978)

V primeru večjega razmerja od 0,85 med višino potopljenega praga s strani spodnje vode in višine  $(H_0+H_1)$  zgornje vode, se smatra (Agroskin, 1964) prelivni prag za potopljenega:  $h_0/(H_0+H_1) \leq 0.85$ .

### 2.8.3 Splošna enačba preliva

Pretok  $Q$  na prelivu je odvisen od širine preliva, prelivne višine  $H$  vode nad krono preliva (gornje vode), dotočne hitrosti  $v$  in zemeljskega pospeška prostega pada  $g$ . Dotok prinaša s seboj energijski potencial, ki se izračuna kot prelivna višina z upoštevanjem hitrosti dotoka na pregrado:

$$H_0 = H + \alpha \frac{v^2}{2g}. \quad (2.43)$$

Privzame se, da je pretok linearno odvisen od širine preliva  $b$ . Pri izpeljani enačbi za pretok dobimo še vpliv geometrije prečnega prereza. Za pravokotni preliv se enačba za pretok glasi:

$$Q = \frac{c}{\sqrt{2}} b \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (2.44)$$

$c$  ...brezdimenzijski koeficient proporcionalnosti, ki prikazuje lastnosti konstrukcije samega preliva ( ostri rob, zaobljen rob, širok rob)

V primeru, da nivo spodnje vode zmanjšuje pretok vode preko preliva, se dodatno uvede v enačbo pretoka popravni koeficient  $\mu$  manjši od 1. Tako je enačba pretoka:

z upoštevanjem višine vode na prelivu in da je  $m = \frac{c}{\sqrt{2}}$ :

$$Q = \mu m b \sqrt{2g} H_p^{3/2}, \quad (2.45)$$

z upoštevanjem višine vode, ki se izmeri v oddaljenosti  $2,5 H$  do  $3,0 H$  za pregrado pa:

$$Q = \mu m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (2.46)$$

Hitrost dotekajoče vode [ $m/s$ ] na pregrado se določi:

$$v = \frac{Q}{b(H_1 + H)}, \quad (2.47)$$

Kjer oznake pomenijo:

$Q$  ....pretok vode v [ $m^3/s$ ]

$H$ ....globina vode [m]

$H_1$ ...višina objekta [m]

$b$ ...srednja širina korita pred pragom [m]

$g$ ... zemeljski pospešek prostega pada [ $9.81 m/s^2$ ]

V primeru dotočne hitrosti  $v \approx 0$  [m/s] je hitrost prelivanja vode na pragu:

$$v = \sqrt{2gH} \quad (2.48)$$

v primeru dotočne hitrosti večje od nič ( $v > 0,4$  m/s) se hitrost prelivanja poveča:

$$v = \sqrt{2gH + 2gK} = \sqrt{2g(H + K)}, \quad (2.49)$$

kjer je:

$K$ ...energijska višina dotekajoče vode pred prelivom [m]

$H$  ...globina vode pred prelivom [m]

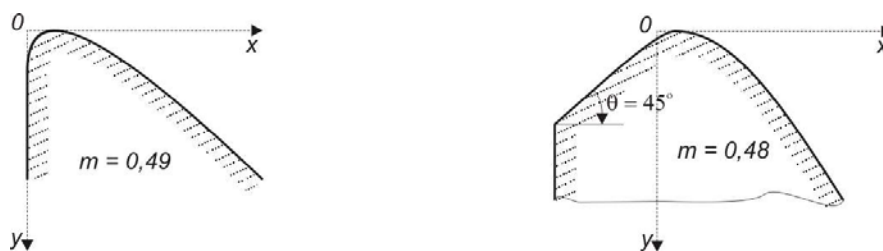
Če je hitrost dotekajoče vode enaka hitrosti prelivanja (Agroskin, 1964), je energijska višina:

$$K = \frac{v^2}{2g}. \quad (2.50)$$

#### 2.8.4 Prelivi s praktično obliko

Obliko prelivnega objekta določata namen in konstrukcijske zahteve. V hidrotehnični praksi se največ uporabljajo takšne oblike prelivnega hrbita, ki sledijo spodnji površini prelivnega curka, ki bi se pojavila pri popolnem ostrorobem prelivu. Če izdelamo prelivni objekt v skladu s spodnjo konturo curka, govorimo o brezvakumskem profilu, saj se prelivni curek niti ne odlepi niti ne naleže na prelivni hrbet. Kadar se pojavi odlepljanje curka od podlage, se pojavijo podtlaki na površini pregrade. Le-ti nekoliko povečajo prelivno sposobnost, vendar pa povzročajo nezaželene učinke (nestabilnost curka, vibracije, poškodbe vrhnjega sloja), zato se temu v praksi izogibamo (Steinman, 1992).

V enačbi pretoka za širino  $b$  se mora upoštevati tudi prečno zoženje profila. Za konstrukcije zaokroženih profilov se lahko privzamejo različne oblike. V praksi se uporabljajo profili brez nastanka podtlakov imenovani Creager-Oficerov ali Creagerjev preliv. Vrednosti krivulje, ki opiše obliko teh prelivov, so podane za enotino višino preliva 1.00 m v tabeli št. 2.10 za dva tipa preliva prikazana na sliki št. 2.33.



Slika 2.33: Creager-Oficerov preliv TIP I in Creagerjev preliv TIP II

Picture 2.33: Creager-Oficer overflow TIP I and Creager overflow TIP II

V spodnjem delu se profil prelivnega hrbtna združi z dnom podslapja po krivulji z namenom usmeritve vode k iztoku. S tako konstrukcijo se prepreči udarec curka v dno tolmana. Običajno se radij izbere v odvisnosti od višine jezua  $H_1$  in gladine vode na jezua  $H_p$ . Za jezove nižje od 10 m je radij zaokrožitve  $0.5 H_1$  (Agroskin, 1964).

Preliv ne ustvarja podtlaka na pregrado, krona je zaokrožena. Za takšen primer lahko izračunamo vpliv potopljenosti kot zmanjšano pretočno sposobnost na  $m'$  preliva:

$$q = \sigma m \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad [m^3/s] \quad (2.51)$$

Koeficient potopljenosti po Bazainu je:

$$\sigma = 1.05 \left( 1 + 0.2 \frac{a}{H_1} \right) \left( \frac{H_0 - a}{H_0} \right)^{3/2}, \quad (2.52)$$

kjer oznake pomenijo:

$\sigma$  ... koeficient potopljenosti [brez enote]

$a$  ... gladina spodnje vode v odvisnosti na višino praga preliva [m]

$H_0$  ... globina dotekajoče vode

$H_1$  ... višina pregrade

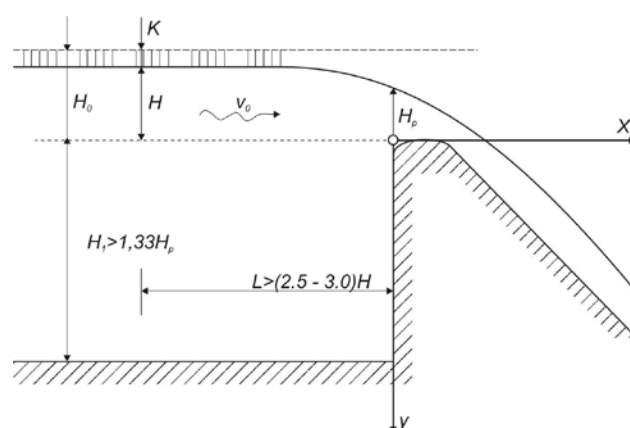
K ...energijska višina dotekajoče vode



Tabela 2.10: Koordinate za konstrukcijo prelivnih curkov po Creager-Oficerovu

Table 2.10: Coordinates for construction of nappe after Creager-Oficer

x (m)	TIP I Creager - Oficerov preliv			TIP II Creager preliv		
	y (m)			y (m)		
	obris prelivne krone	obris curka		obris zidu	obris curka	
zunanja površina		notranja površina	zunanja površina		notranja površina	
<b>0.0</b>	0.126	-0.831	0.126	0.043	-0.781	0.043
0.1	0.036	-0.803	0.036	0.010	-0.756	0.010
0.2	0.007	-0.772	0.007	<b>0.000</b>	-0.724	<b>0.000</b>
0.3	<b>0.000</b>	-0.740	<b>0.000</b>	0.005	-0.689	0.005
0.4	0.007	-0.702	0.007	0.023	-0.648	0.023
0.6	0.060	-0.620	0.063	0.090	-0.552	0.090
0.8	0.147	-0.511	0.153	0.189	-0.435	0.193
<b>1.0</b>	0.256	-0.380	0.267	0.321	-0.293	0.333
1.2	0.393	-0.219	0.410	0.480	-0.120	0.500
1.4	0.565	-0.030	0.590	0.665	-0.075	0.700
1.7	0.873	0.305	0.920	0.992	0.438	1.05
<b>2.0</b>	1.235	0.693	1.31	1.377	0.860	1.47
2.5	1.96	1.50	2.10	2.14	1.71	2.34
<b>3.0</b>	2.824	2.50	3.11	3.06	2.76	3.39
3.5	3.818	3.66	4.26	4.08	4.00	4.61
<b>4.0</b>	4.93	5.00	5.61	5.24	5.42	6.04
4.5	6.22	6.54	7.15	6.58	7.07	7.61



Slika 2.34: Potopljeni preliv (Jevtić, 1978)

Picture 2.34: Submerged overflow (Jevtić, 1978)

Koeficient potopljenosti je za nekaj razmerij med višino pregrade in globino dotekajoče vode izračunan v tabeli 2.11.

Tabela 2.11: Tabela koeficientov potopljenosti  $\sigma$ Table 2.11: Submergence coefficients  $\sigma$ 

$H_1/H_0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\sigma$	1,00	0,991	0,983	0,972	0,956	0,937	0,907	0,856	0,778	0,621	0,000

Bazainov obrazec za koeficient potopljenosti se lahko uporabi ob razmerju  $(H_0 - H_1)/H_1 < 0,7$ . Pri razmerju  $(H_0 - H_1)/H_1 > 0,7$  se bo prag zaradi oddaljenosti vodnega skoka spremenil v nepotopljen preliv. Enačba ne upošteva bočnega zoženja (kontrakcije) vodnega curka (Jevtić 1978).

### 2.8.5 Pretok na širokem pragu

V primeru, da je prag oziroma prelivna krona tako dolga, da curek naleže na krono praga in so tokovnice vzporedne vzdolž krone, poimenujemo tako konstrukcijo široki prag. Dolžina, kjer dobimo razmere širokega praga je odvisna od prelivne višine nad pragom  $H_p$ . Široki prag nastane v območju:

$$0.67 < \frac{L}{H_p} \leq 10.0, \quad (2.53)$$

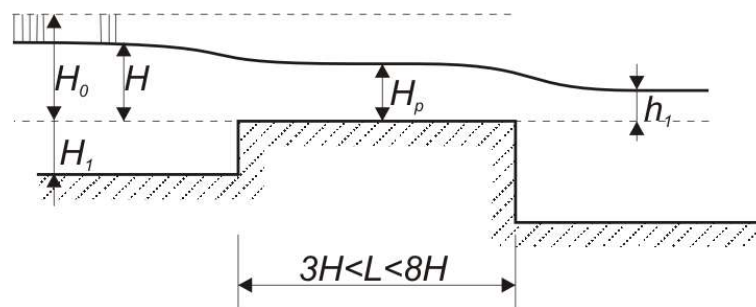
kjer so:

$L$ ...dolžina širokega praga [m]

$H_p$ ...globina vode na pragu [m]

Tok vode preko širokega praga je lahko miren ali deroč. Važno je, da na neki dolžini praga dosežemo stalni enakomerni tok ob izenačitvi vzdolžnih padcev energije, gladine in krone praga (Steinman, 1992).

- Pretok na nepotopljenem širokem pragu



Slika 2.35: Nepotopljen širok prag  $h_1/H_0 \leq 0,8$  (Jevtić 1978)

Picture 2.35: Unsubmerged broad crest  $h_1/H_0 \leq 0,8$  (Jevtić 1978)

Šteje se, da široki prag povzroči zaježitev. Kadar spodnja voda ne ovira odtoka, se izračuna pretok za tekoči meter preлива po enačbi:

$$q = \varphi h \sqrt{2g(H_0 - H_p)} \quad [\text{m}^2/\text{s}]. \quad (2.54)$$

Skupni pretok celega pretočnega profila:

$$Q = \varphi b h \sqrt{2g(H_0 - H_p)} \quad [\text{m}^3/\text{s}], \quad (2.55)$$

kjer oznake pomenijo:

$H_p$  ... višina vode na pragu [m],

$\varphi$  ... koeficient hitrosti v odvisnosti od oblike robu praga in razmerja  $H_1/H_0$ ,

$b$  ... širina praga preлива [m].

Tabela 2.12: Tabela koeficientov hitrosti  $\varphi/m$  (Jevtič, 1978)

Table 2.12: Speed coefficients  $\varphi/m$  (Jevtič, 1978)

Pogoji praga	$H_p/H_0 < 0,5$	$H_p/H_0 = 0,5/1$	$H_p/H_0 = 1/1,5$	$H_p/H_0 > 1,5$
Pravokotna oblika	0,96 / 0,37	0,915 / 0,35	0,87 / 0,33	0,85 / 0,32
Zaobljeno rebro (robovi praga)	0,98 / 0,38	0,96 / 0,37	0,915 / 0,35	0,89 / 0,34
Nagnjen zgornji čelni zid (natok)	0,98 / 0,38	0,98 / 0,38	0,98 / 0,38	0,96 / 0,37

V enačbi pretoka ni upoštevano prečno (bočno) zoženje. Pogoj nepotopljenosti praga je zagotovljen ob pogoju  $h_1/H_0 \leq 0,8$  (Jevtič, 1978).

• **Pretok vode na potopljenem širokem pragu za  $h_1/H_0 \geq 0.8$**

Enačba Bahmetieva ne upošteva bočnega zoženja vodnega curka. Izračun pretoka je:

$$Q = \sigma_p m b \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad [\text{m}^3/\text{s}], \quad (2.56)$$

kjer oznake pomenijo:

$\sigma_p$  ... koeficient potopljenosti, določen z razmerjem po tabeli Pavlovskega,

$b$  ... širina praga [m],

$m$  ... koeficient preliva.

Tabela 2.13: Tabela koeficientov potopljenosti  $\sigma_p$  za razmerje  $h_1/H_0$

Table 2.13: Submergence coefficients  $\sigma_p$  for ratio of  $h_1/H_0$

$h_1 / H_0$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$\sigma_p$	1,00	0,97	0,92	0,85	0,74	0,55	0,00

Dejanska vrednost  $m$  je odvisna od geometrije širokega praga in hidravličnih razmer (ostri, zaobljeni robovi),  $m$  je vedno manjši od 0,385 (Jevtić, 1978). Pri prelivih na pregradah, pragovih in kaskadah se v primeru krajše dolžine (širine glede na strugo) prelivnega praga od širine korita gornje dotekajoče vode pojavi zaradi bočne utesnitve dotoka prečno zoženje curka. Pri izračunavanju pretoka preko preliva s prečnim zoženjem se mora v enačbah za pretoke nadomestiti dejansko širino » $b$ « preliva z zoženo širino » $b_c$ «. Bočno zoženje se določi po obrazcu Frensis (Jevtić, 1978):

$$b_c = b - 0.1n\xi H_0 \quad [\text{m}], \quad (2.57)$$

kjer oznake pomenijo:

$b$  ... širina praga preliva [m],

$n$ ... število bočnih zožitev,

$H_o$ ...skupna višina toka ( $H+K$ ) [m],

$\xi$ ... koeficient obtoka, ki je po Creagerju odvisen od oblike vertikalne bočne površine vtoka in znaša:

za ostri rob:  $\xi = 1.0$ ,

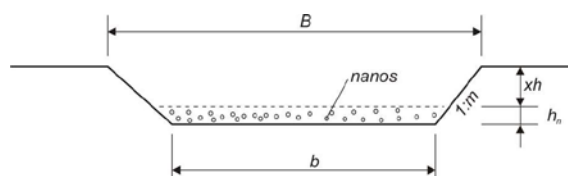
za polkrožni rob:  $\xi = 0.7$ ,

za ostri rob pod kotom  $45^\circ$ :  $\xi = 0.7$ ,

za parabolično zaobljeni rob:  $\xi = 0.4$  (Jevtić, 1978).

### 2.8.6 Upoštevanje povečanja pretočnega profila preliva za prenos plavin

Skozi pretočni profil na prelivu kaskade, pragu ali pregrade (jezu) teče poleg določene količine vode, še določena količina vlečenih plavin, ki zavzemajo najnižjo površino toka ob dnu struge. Zrinjene plavine dejansko zmanjšujejo pretočno kapaciteto preliva izračunanega za čisto vodo.



Slika 2.36: Višina nanosa plavin (po Wehrmann-u)

Picture 2.36: Height of debris deposit (after Wehrmann)

Nanos se mora upoštevati vedno, kadar ni zagotovljeno zaustavljanje, to je odlaganje plavin za pregrado. Po Wehrmannu je višina nanosa:

$$h_n = \frac{\mu \gamma V_d^2}{2g(\gamma' - \gamma)k_t} \quad [\text{m}], \quad (2.58)$$

kjer oznake pomenijo:

$h_n$ ... višina sloja zaplavljanja ali prenosa plavin [ m ],

$\gamma$  ... prostorninska teža vode [ $\text{kN}/\text{m}^3$  ],

$\gamma'$  ... prostorninska teža nanosa [ $\text{kN}/\text{m}^3$  ],

$v_d = 0.50 v_{sr}$  ... hitrost vode v dnu korita [ $\text{m}/\text{s}$  ],

$g$ ... težni pospešek [ $9.81 \text{m}/\text{s}^2$  ],

$k_t$ ... koeficient trenja,

$\mu$  ... koeficient upora nanosa (Jevtić, 1978):

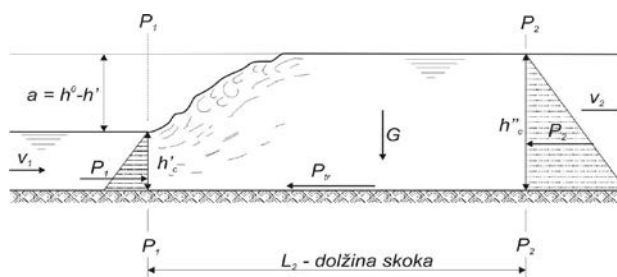
naravni nanos:  $\mu = 1.00$ ,

zaobljeni nanos:  $\mu = 1.457$ ,

ostrorobi – hrapavi nanos:  $\mu = 0.789$  .

## 2.9 Hidravlični vodni skok

Prikazano je bilo, da se na prehodu iz deročega v mirni tok pojavi vodni skok. Ker je to pomemben pojav (na katerega je vezana tudi gradnja podslapja) bomo podali skrajšani opis teoretičnih podlag.



Slika 2.37: Popolni vodni skok ( $a > h'$ )

Picture 2.37: Perfect hydraulic jump ( $a > h'$ )

Zunanje sile, ki spreminjajo gibalno količino so tlaki v prerezih  $P_1$  in  $P_2$ , teža vode  $G$  in sila trenja  $P_{tr}$ . Zapišimo enačbo za povečanje gibalne količine, ki je produkt mase in hitrosti:

$$P_1 - P_2 - P_{tr} = \rho \alpha' Q (v_2 - v_1),$$

kjer so:

$\rho$  ...gostota tekočine [ kg/m<sup>3</sup> ],

$\alpha'$  ...Boussineskov koeficient,

$Q$  ...pretok [ kN/m<sup>3</sup> ],

$v_1$  ...vtočna hitrost [ m/s ],

$v_2$  ...iztočna hitrost [ m/s ],

$P_1$  ...hidrostatski tlak dotekajoče vode [ m/s ],

$P_2$  ...hidrostatski tlak odtekajoče vode [ m/s ].

Razporeditev tlakov upoštevamo po hidrostatičnem zakonu, ko se linearno veča z globino. Za težo vode se privzame, da deluje vertikalno, kot da je dno korita na mestu pregrade vodoravno:

$$P_1 = \gamma h'_c A_1 \quad P_2 = \gamma h''_c A_2$$

$A_1, A_2$  ...pretočni prerez zgoraj, pretočni prerez spodaj

$P_{tr} \cong 0$  (silo trenja na dolžini skoka zanemarimo)

Iz zgornjih enačb sledi (Agroskin, 1964 207) enačba popolnega skoka:

$$\frac{\alpha' Q^2}{g A_1} + A_1 h'_{ct} = \frac{\alpha' Q^2}{g A_2} + A_2 h''_{ct}, \quad (2.59)$$

kjer velja:

hitrost dotekajoče vode:  $v_1 = Q/A_1$ ,

hitrost odtekajoče vode:  $v_2 = Q/A_2$ ,



$\alpha'$  je Boussinesqov koeficient, ki pove odnos med stvarno gibalno količino in gibalno količino izračunano z upoštevanjem povprečne hitrosti. S poskusi je dokazano, da je  $\alpha'$  dejansko 1, kar pomeni, da je sila zunanega trenja na dimenzije hidravličnega skoka v koritih z običajno hrapavostjo zanemarljiva.

Zaradi enostavnosti zapisa se uvaja krajša oblika enačbe kot funkcija skoka:

$$\frac{\alpha' Q^2}{g A} + A h_{ct} = \Theta(h). \quad (2.60)$$

Konjugirani globini ( $h_c'$  in  $h_c''$ ) sta med seboj povezani in sicer z naraščanjem ene globine, njej konjugirana druga globina upada. Za pravokotno korito se iz funkcije skoka (Jevtić 1978, 207) dobita kot rešitev enačbi za konjugirani globini:

$$h_c' = \frac{h_c''}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{8h_{kr}^3}{h_c''^3}} - 1 \right) \quad (2.61)$$

$$h_c'^3 = \left[ p + 1.5 \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \right] h_1^2 + \frac{q^2}{2g} (1 + \zeta) = 0, \quad \zeta = 0.2$$

oziroma:

$$h_c'' = \frac{h_c'}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{8h_{kr}}{h_c'} \right)^3} - 1 \right) \quad (2.62)$$

$$h_c'' = \frac{1}{2} h_c' + \left( \frac{1}{4} h_c'^2 + 4 h_c' \frac{v_1^2}{2g} \right)^{1/2},$$

kjer je:

$h_c'$  ... globina v zoženem (kontrahiranem) prerezu [ m ],

$h_c''$  ... konjugirana globina [ m ],

$h_{ct}$  ... globina vode, kjer je težišče pretočnega prereza [ m ],

$$h_{kr} \dots \text{kritična globina} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad [\text{m}],$$

$h_0 \dots$  globina vode [ m ],

$q \dots$  pretok po m' preliva =  $Q/b$  [ m<sup>2</sup>/s ],

$g \dots$  težni pospešek = 9,81 [ m/s<sup>2</sup> ].

Globina v zoženem prerezu v podslapju je določena:

$$h'_c = \frac{Q}{\phi b \sqrt{2g(H_0 + H_1 - h'_c)}} \quad [\text{m}] \quad (2.63)$$

z iteracijskim postopkom približevanja se lahko določi vrednost  $h'_c$ .

V gornji enačbi pomenijo posamezne oznake:

$\phi \dots$  koeficient hitrosti v odvisnosti od globine (gornje) vode za pregrado. Vrednosti so podane v sledeči tabeli (Tabela 2.14).

Tabela 2.14: Koeficient hitrosti  $\phi$

Table 2.14: Speed coefficient  $\phi$

$H_1$ [m]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$\phi$	0,97 – 0,95	0,95 – 0,91	0,91 – 0,88	0,88 – 0,86	0,86 – 0,85

$H_0 \dots$  skupna višina dotekajoče vode nad višino pregrade in višina zaradi hitrosti vode [ m ]

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g} \quad (2.64)$$

$H \dots$  globina preliva zgornje vode [ m ]

$v_0 \dots$  dotočna hitrost na preliv [ m/s ]

$\alpha$  ... Boussinesquov koeficient  $\alpha = 1.01 - 1.10$

$H_1, \dots$  višina jezua [ m ]

Pri oblikovanju hidravličnega skoka nastanejo energijske izgube velikosti 65% do 67% prvotne energije. Dejansko se energijske izgube ustvarijo pri transformaciji dela kinetične energije v toplotno zaradi povečanega trenja in turbulence po formiranju hidravličnega skoka (Agroskin, 1964).

Podporne reakcije se uporabljajo predvsem pri izračunu pojavov v povezavi z vodnim skokom (dimenzioniranje podslapij). A. Koch je količino:

$$\rho g F = \gamma \left( \frac{\alpha}{g} Q v_2 + \frac{p_2}{\gamma} A_2 \right) = \gamma \left( \frac{\alpha}{g} Q v_1 + \frac{p_1}{\gamma} A_1 \right) \quad (2.65)$$

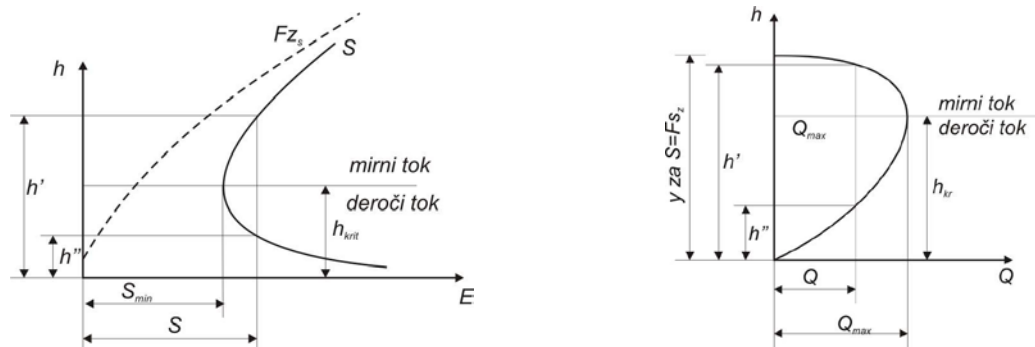
imenoval kot podporno reakcijo, saj ima izraz ( $\rho g F$ ,  $F[\text{m}^3]$ ) enoto sile. Zunanji sili, dinamična komponenta teže in trenja na ostenju korita, sta glede na sile tlaka in gibalno količino zanemarljivi. Tako izraz za podporno reakcijo dobi obliko:

$$S = \frac{\alpha}{g} Q v + \frac{p}{\gamma} A = A \left( \frac{\alpha}{g} \cdot \frac{Q^2}{A^2} + z_p \right) \quad (2.66)$$

oziroma enačba za pretok:

$$Q = S v = \sqrt{\frac{q}{\alpha} A \left( S - \frac{p A}{\gamma} \right)} \quad (2.67)$$

Obe enačbi sta predstavljeni grafično v diagramu S-h ali Q-h na sliki št. 2.38 kot zvezni krivulji, z ekstremoma  $S_{\min}$  in  $Q_{\max}$ .



Slika 2.38: Diagram podporne sile  $S$  za  $Q = \text{konst.}$  (levo) ter diagram pretoka  $Q$  za  $S = \text{konst.}$  (desno) (Franke, 1974)

Picture 2.38:  $S$  supporting power for  $Q = \text{const.}$  (left) and  $Q$  rate of flow for  $S = \text{const.}$  (right) (Franke, 1974)

Za konstanten pretok  $Q$  torej obstaja najmanjša podporna reakcija  $S_{\min}$ . Pri večjih velikostih podpornih reakcij je pretok manjši tako v mirnem kot v deročem režimu. Za konstantno vrednost podporne reakcije se lahko določi največji možni pretok  $Q_{\max}$ . Manjši pretoki so tako možni v mirnem, kot v deročem režimu toka ob ustreznem padcu dna struge, da se ohranja konstantna podporna sila na daljšem odseku (Steinman, 1992). Iz primerjave podpornih reakcij je razvidno, da lahko nastopijo trije primeri in sicer:

$S_1 = S_2$ : popolni hidravlični skok, ni odbojne dolžine, prva konjugirana višina nastopi v peti pregrade.

$S_1 > S_2$ : prva konjugirana višina se pojavi od pete jezua dolvodno, kjer je  $S_1 = S_2$ .

$S_1 < S_2$ : hidravlični skok nastane dolvodno od dna (pete) pregrade. Disipacija energije je v tem primeru zelo slaba (Vischer, 2002).

Za pravokotni prerez velja:  $z_p = h/2$ ,  $A = b h$ ,  $Q = b q$

Ob pogoju, da je specifični pretok enak kritičnemu specifičnemu pretoku  $q = q_{kr}$  velja:

$$S_{kr} = S_{\min} = \frac{3}{2} h_{kr}^2 = \frac{3}{2} \left( \frac{q_{kr}^2}{g} \right)^{2/3} \quad (2.68)$$

Iz zgornje enačbe se določi (Franke 1974) kritično višino ( $h_{kr}$ ) in specifični kritični pretok ( $q_{kr}$ ):

$$h_{kr} = \sqrt{\frac{3}{2} S_{kr}} \quad (2.69)$$

$$v_{kr} = \sqrt{g h_{kr}} = g^{1/2} \left( \frac{2}{3} S_{kr} \right)^{1/4} \quad (2.70)$$

$$q_{kr} = g^{1/2} h_{kr}^{3/2} \quad (2.71)$$

Brezdimenzijske enačbe z vpeljavo koeficientov  $v$  (v razponu od 0 do 1) in  $m$  (v razponu od 0 do 0.62040 ( $3^{1/3}/3$ )) dobijo naslednje oblike:

$$h' - h'' = (v' - v'') \sqrt{2S}$$

$$\mu = v' - v'^3 = v'' - v''^3$$

Splošna enačba za specifični pretok na meter širine preliva tako dobi obliko:

$$q = \mu g^{1/2} (2S^3)^{1/4},$$

kjer lahko  $m$  določimo iz tabel (Franke, 1974), oziroma lahko izračunamo konjugirani višini:

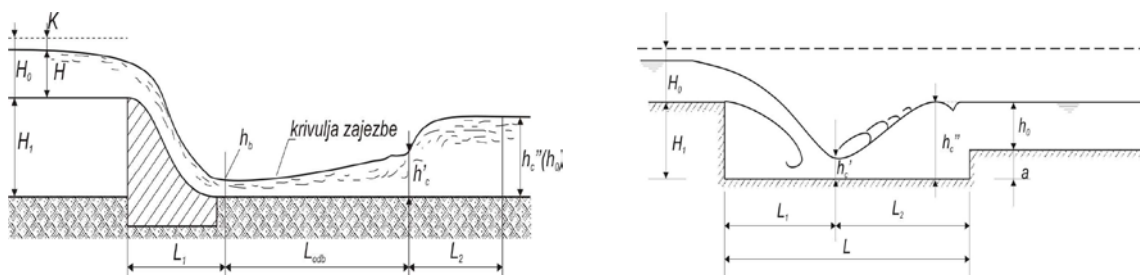
$$h' = \frac{h''}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr''} + 1 \right) \text{ in} \quad (2.72)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr'} + 1 \right). \quad (2.73)$$

V odvisnosti od konjugiranih višin  $h'_c$  in  $h''_c$  in gladine vode dolvodno ima hidravlični skok lahko obliko odgnanega vodnega skoka ( $h'_c > h_0$ ), popolnega (normalnega) vodnega skoka ( $h''_c > h_0$ ) ali podprtega (potopljenega) vodnega skoka ( $h''_c < h_0$ ).

## 2.9.1 Oblika hidravličnega skoka

Odgnani skok se pojavi, ko je globina spodnje vode ( $h_b$ ) manjša od višine  $h_c'$ . V tem slučaju se formira krivulja na dolžini zajeze ( $L_{odb}$ ) od globine  $h_b$  do  $h_c'$ . Ta primer je najneugodnejši, saj velike hitrosti na daljšem dolvodnem odseku, katerega dolžina je odvisna od pretoka povzročajo poškodbe korita. Dolžina vodnega skoka  $L_2$  se meri od lokacije, kjer nastopata  $h_c'$  do  $h_c''$ .

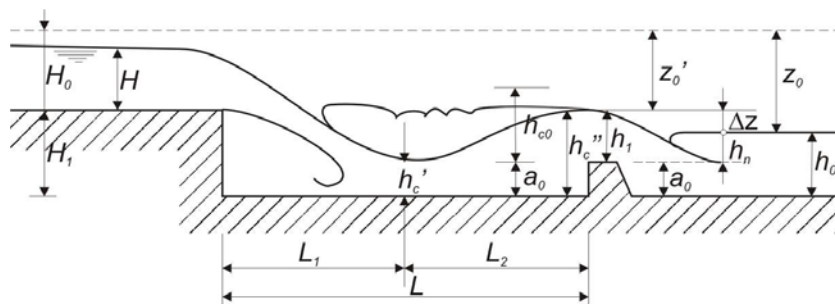


Slika 2.39: Odgnani popolni vodni skok (Agroskin, 1964) in popolni vodni skok (Jevtić, 1978)

Picture 2.39: Delayed perfect hydraulic jump (Agroskin, 1964) and perfect hydraulic jump (Jevtić, 1978)

Popolni (normalni, običajni) vodni skok se pojavi, ko je globina spodnje vode ( $h_0$ ) enaka višini  $h_c''$ , zmanjšani za globino poglobitve podslapja, to je za višino udarnega pragu  $a$ . Dolžina zajeze je nič, skok se prične na dnu (podnožju) pregrade. Gladina  $h_c'$  se postopno preko gladine  $h_c''$  združi s spodnjo vodo. Razlika konjugiranih globin ( $h_c'' - h_c'$ ) predstavlja višino vodnega skoka.

Podprt (potopljen) vodni skok nastane, kadar je konjugirana višina  $h_c''$  manjša od gladine spodnje vode. Ta oblika skoka je za oblikovanje preliwa najugodnejša.



Slika 2.40: Podprt (potopljen) vodni skok (Jevtić, 1978)

Picture 2.40: Supported (submerged) hydraulic jump (Jevtić, 1978)

Tipi vodnega skoka so odvisni od brezdimenzijskega Froudovega števila ( $F_r$ ), v katerem je upoštevan vpliv teže:

$$F_r^2 = \frac{(v')^2}{g h_c'} \Rightarrow F_r = \frac{v'}{\sqrt{g h_c'}}$$

$h_c'$  ...prva konjugirana višina [m]

$v_0$  ... dotočna hitrost [m/s]

$v'$  ... hitrost v zoženi globini  $h_c'$  [m/s]

$g$  ... pospešek prostega pada [m/s<sup>2</sup>].

Učinkovito disipacijo energije lahko dosežemo le z dobro razvitim vodnim skokom. Delež disipirane energije v vodnem skoku v odvisnosti od Froudovega števila dotekajočega curka deročega toka v prvi konjugirani globini (Steinman, 1992) je naslednji:

$F_r = 1.0 - 1.7$  ni vodnega skoka,

$F_r = 1.7 - 2.5$  slaboten vodni skok (15% disipacija energije),

$F_r = 2.5 - 4.5$  oscilirajoči vodni skok (20%-45% disipacija energije),

$F_r = 4.5 - 9.0$  stabilni, učinkovit vodni skok (45%-75% disipacija energije).

Dimenzioniranje podslapja pri stopnji višine  $H_1$  zahteva oblikovanje prelivnega curka, da se doseže ustrezna izbira tipa skoka in določitev globine  $a$  za katero se mora poglobiti podslapje. Izračun poglobitve se izvaja iteracijsko s postopnim približevanjem. Poizkusi J. N. Bradleya in A. J. Peterke (Tehničar 6, 1989) so pokazali, da lahko naredimo razdelitev v 4 tipe, ki so podani v tabeli št. 2.15:

Za izračun konjugiranih višin za pravokotni prerez, če privzamemo vodoravno korito, velja naslednja enačba:

$$\frac{h_c''}{h_c} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8 Fr^2} - 1 \right) \Rightarrow Fr^2 = \frac{v_1^2}{g h_c}, \quad (2.74)$$

$Fr$ ...Froudovo število za  $h_c$  (zgornja voda).

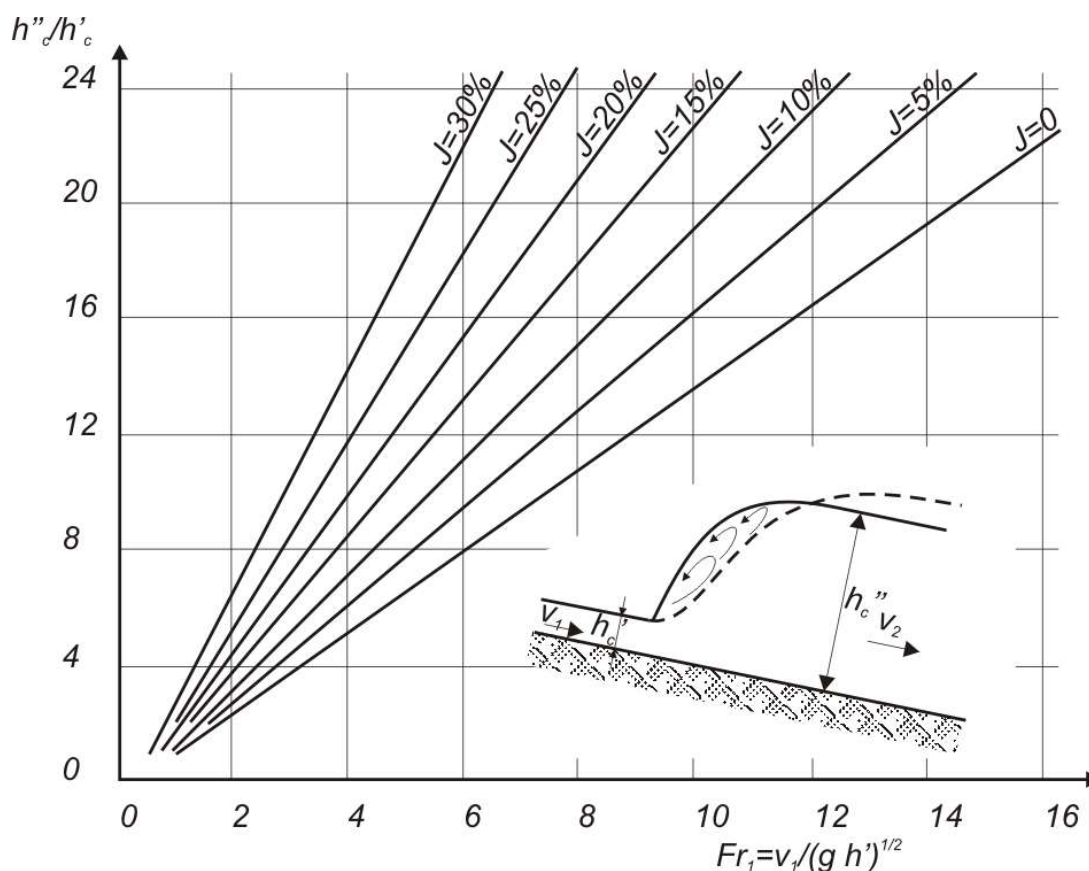


Za poljuben naklon korita je uporaben brezdimenzijski diagram avtorja V.T. Chow (Zeller, 1984). Na abscisi je Froudovo število od 0 do 16, na ordinati pa razmerje med konjugiranimi višinama. Premice v diagramu omogočajo določitev razmerja med konjugiranimi globinama za različne vzdolžne padce korita.

Tabela 2.15: Tip podslapja v odvisnosti od Froudovega števila

Table 2.15: Plunge pool type in dependence to Froud number

<b>Froudovo število</b>	<b>Karakteristika vodnega skoka</b>	<b>Način projektiranja podslapja</b>
3-6	Začetno stanje skoka	Ni potrebna posebna konstrukcija za umirjanje, saj zadošča utrditev ustrezne dolžine podslapja
6-20	Prehodno stanje z zelo valovito površino. Valovi na večji dolžini dolvodno poškodujejo brežine zemeljskih kanalov.	Najbolje je spremeniti dimenzije objekta. Tudi dodatna nazobčanost (zobje) na podslapju ne omogočajo skrajšanja podslapja. Podslapje naj se v celoti izdelava v betonu, tudi bočne stene. Dolžina podslapja naj bo računsko povečana za faktor varnosti $1,05 \div 1,10$ .
20-80	Lepo razvit hidravlični skok	Dotekajoči curek v celoti najbolje porablja odvišno energijo. Mogoče je skrajšati podslapje na 0,50 do 0,70 računsko potrebne dolžine.
80-144	Hidravlični skok ima valovito površino. Valovi se razprostirajo dolvodno.	Predvideti poglobitev podslapja. Za $F_r > 100$ so ugodnejši drugi tipi umirjanja.
> 144	Zelo valovita (hrapava) površina skoka	Privzeti je treba druge tipe za porabo odvišne energije dotekajoče vode.



Graf 2.9: Določitev razmerij konjugiranih višin ob različnih padcih struge

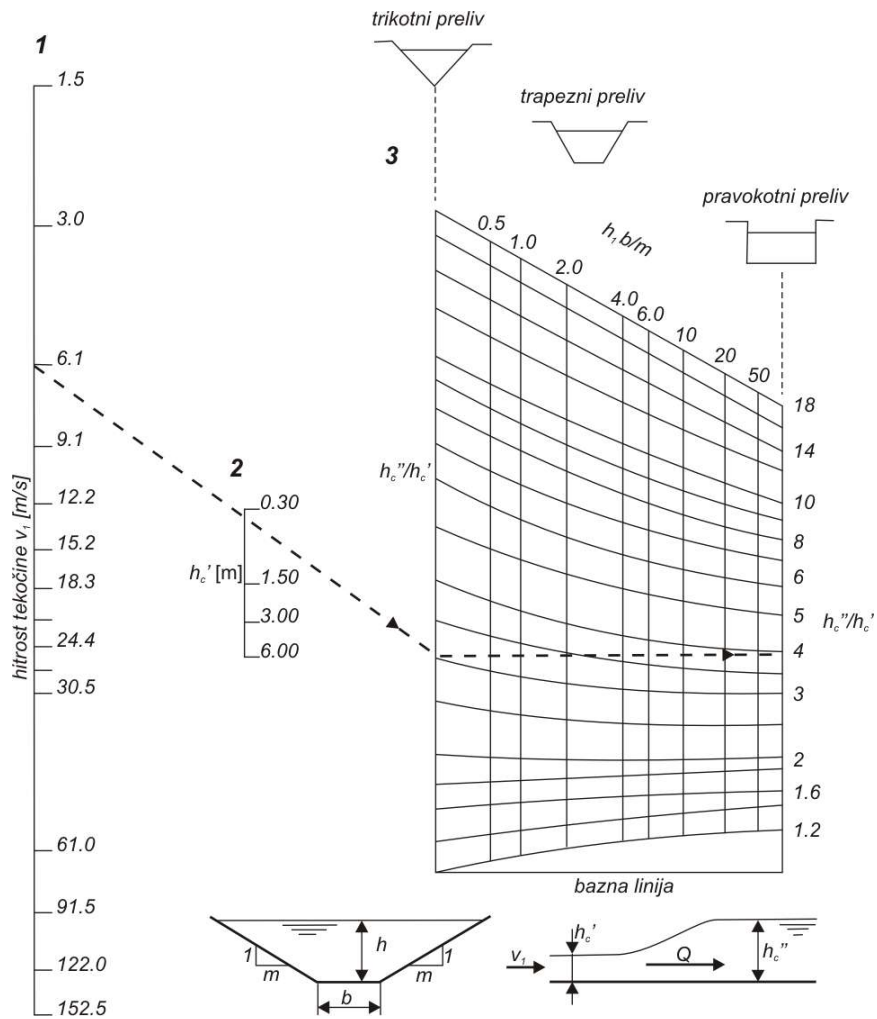
Diagram 2.9: Determination of conjugated height ratios at various channel falls

S pomočjo diagrama za pravokotno korito se lahko določi razmerje tudi za konjugirane globine trapeznega prereza. Na skali 1 se poišče hitrost, na skali 2 pa pripadajočo globino  $h'_c$ . Medsebojno se točki poveže in črta podaljša do začetka grafikona za trikotno korito, nato pa lahko vodoravnica do konca grafikona pokaže vrednosti tudi za pravokotno korito.

## 2.9.2 Hidravlični izračun podslapja

Podslapja se gradijo z namenom zmanjševanja to je porabe odvečne energije prelivnega curka. S poglobitvijo dna podslapja in s tem, povečanja globine spodnje vode, se omogoči skrajšanje dolžine do nastopa popolnega skoka. Z vidika varnosti obratovanja je najugodnejša globina spodnje vode, ki povzroči oblikovanje potopljenega hidravličnega skoka. S hidravličnim računom je zato treba določiti globino podslapja in dolžino skoka v podslapju, ki določa dolžino objekta podslapja.

Višina nasprotne stopnice  $a$  v podslapju se določi tako, da je globina vode v podslapju ( $h_0+a$ ) večja od konjugirane višine  $h_c'$ . Ustrezno globino lahko zagotovimo s spustitvijo dna podslapja s ciljem ustvarjanja vodne blazine, s povišanjem udarnega praga ali s kombinacijo poglobitve podslapja ter udarnega praga.



Graf 2.10: Določitev razmerja konjugiranih globin

Diagram 2.10: Determination of conjugated depths ratio

Globina poglobitve se določi (Jevtić, 1978) iz pogoja:

$$a = \sigma h_c'' - h_0, \quad (2.75)$$

kjer je:  $\sigma$  stopnja varnosti potopljenosti skoka (1,05 – 1,15),  $h_c''$  druga konjugirana globina in  $h_0$  globina vode nizvodno.

Globina udarnega praga se določi (Jevtić, 1978) iz pogoja:

$$a_0 = \sigma h_c'' - h_1,$$

kjer je:  $\sigma$  stopnja varnosti potopljenosti skoka (1,05 – 1,15) in  $h_1$  globina vode nad udarnim pragom.

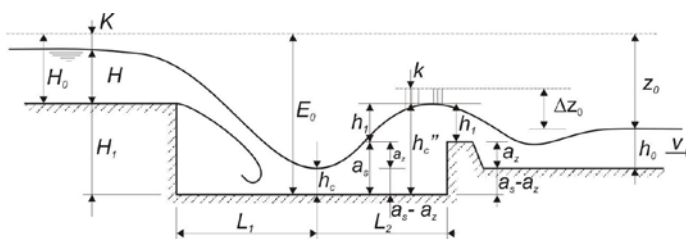
Globina podslapja  $a_s$  je v kombiniranem primeru, ko se uporabita poglobitev in udarni prag, določena iz pogoja, ki sledi iz slike št. 2.41:

$$h_1 + a_s = h_1 + a_z - a_z + a_s = \sigma h_c'',$$

kjer so:

$h_1$  ... višina vode nad udarnim pragom,

$h_2''$  ... konjugirana globina v podslapju.



Slika 2.41: Valovit hidravlični skok (poglobitev in udarni prag) (Jevtić, 1978)

Picture 2.41: Undulating hydraulic jump (deepening and shock crest) (Jevtić, 1978)

Z določitvijo neznanke  $a_z$  ali  $a_s$  se lahko iz pogoja določi drugo neznanke. Višina potopljenega zidu se določi ob predpostavki, da za njim ob prelivanju vode preko zidu nastane skok v kontrahiranem preseku. Pretok preko zidu bo nepotopljen. Višina potopljenega zidu bo v tem primeru:

$$a_z = \sigma h_c'' - h_1$$

Razlika energije, ki se porabi za tok preko udarnega praga (Jevtić, 1978) je v tem primeru  $\Delta z_0$ :

$$\Delta z_0 = \frac{\alpha q^2}{2g\varphi_1^2 h_n^2} = \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_n^2}, \quad (2.76)$$

kjer so:

$\varphi_1 \approx \varphi$  ...koeficient hitrosti,

$\Delta z_0 + h_0$  ...specifična energija vodotoka pred zidom v odnosu na dno struge za zidom:

$$(a_s - a_z) = (\sigma h_c'' + k) - (\Delta z_0 + h_0)$$

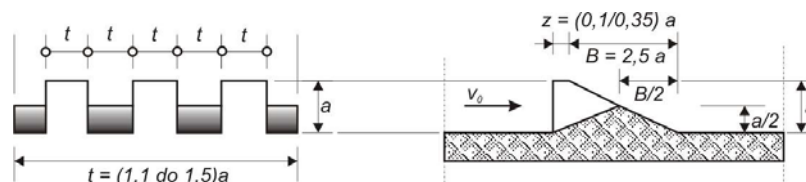
$$k = \frac{\alpha v^2}{2g}.$$

Nekaj oblik udarnih pragov je prikazanih na slikah št. 2.42 in 2.43:



Slika 2.42: Polni udarni prag preko vse širine struge in zobčasti udarni prag po Smrčku (Jevtić, 1978)

Picture 2.42: Full shock crest over all channel widths and cogged shock crest after Smrček (Jevtić, 1978)



Slika 2.43: Zobčasti udarni prag tipa Rehbock (Jevtić, 1978)

Picture 2.43: Cogged shock crest of Rehbock type (Jevtić, 1978)

Dolžina podslapja sestoji iz odskočne dolžine prelivnega curka, to je od dometa slapa ( $L_1$ ) in dolžine vodnega skoka v podslapju ( $L_2$ ), kot kaže slika št. 2.44. Račun je prikazan za masno

točko v curku. V času  $t$  delec vode v težišču slapa, ki prosto pada, napravi v horizontalni in vertikalni smeri naslednje dolžine poti:

$x = ut$  ...enakomerni tok v horizontalni smeri ( $x$ ),

$u = \varphi \sqrt{2gh}$  ...hitrost v horizontalni smeri ( $x$ ),

$y = \frac{gt^2}{2}$ ;  $t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$  ... prosti pad v vertikalni smeri ( $y$ ),

$v = gt$  ...hitrost v vertikalni smeri ( $y$ ).

Z odstranitvijo časa  $t$  iz enačb gibanja dobimo trajektorijo delca, kjer je  $x$  pot delca v vodoravni smeri ( $L_1$ ):

$$x = u \sqrt{\frac{2y}{g}} \text{ oziroma:}$$

$$x = \varphi \sqrt{2gh} \sqrt{\frac{2y}{g}} = 2\varphi \sqrt{hy}, \quad (2.77)$$

kjer so:

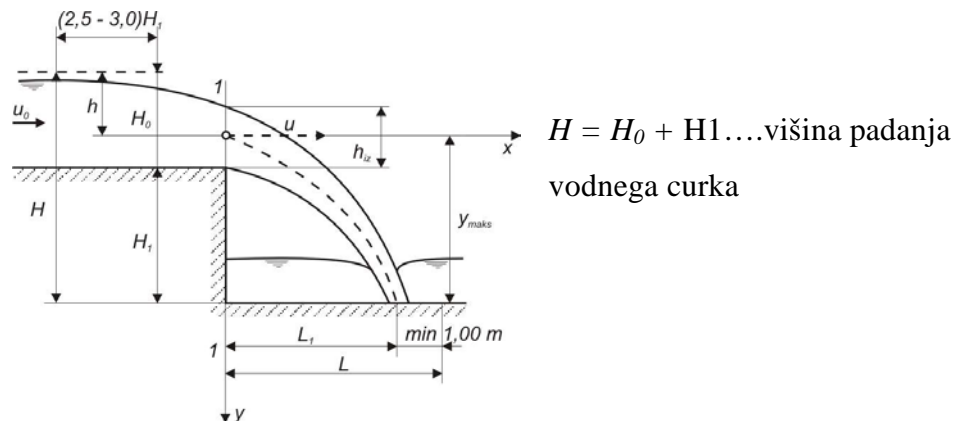
$h$ ...je polna tlačna višina do težišča curka [ $m$ ],

$\varphi$  ...koeficient hitrosti npr.:

za višino pregrade 1.00 m:  $\varphi = 0.97 - 0.95$ ,

za višino pregrade 2.00 m:  $\varphi = 0.95 - 0.90$ ,

$y$  ...globina pada curka, v primeru do dna -  $y_{\max}$ .



Slika 2.44: Domet vodnega slapu (Agroskin, 1964)

Picture 2.44: Waterfall range (Agroskin, 1964)

Domet vodnega curka v vodoravni smeri ( $L_1$ ), ko lahko zanemarimo majhno dotočno hitrost ( $u_0$ ), izračunana za višino pregrade  $H_2 = H_0 + H_1$  je:

$$L_1 = u \sqrt{\frac{2H}{g}}, \quad (2.78)$$

kjer je:

$u$  .....hitrost prelivanja vode na pregradi [m/s].

Če je poleg hitrosti prelivanja ( $u$ ) pomembna tudi velikost dotočne hitrosti ( $u_0$ ) (Jevtić, 1978), potem je domet slapu (Angerholz) podan z naslednjo enačbo:

$$L_1 = (u + u_0) \sqrt{\frac{2H_1}{g}} + H. \quad (2.79)$$

kjer je:

$u_0$ .... hitrost dotečkajoče vode [m/s],

Izračunana dolžina dometa slapu se meri od sprednjega lica praga kot je prikazano na sliki št. 2.44 (prerez 1-1). Tako je izraz za dolžino praga:

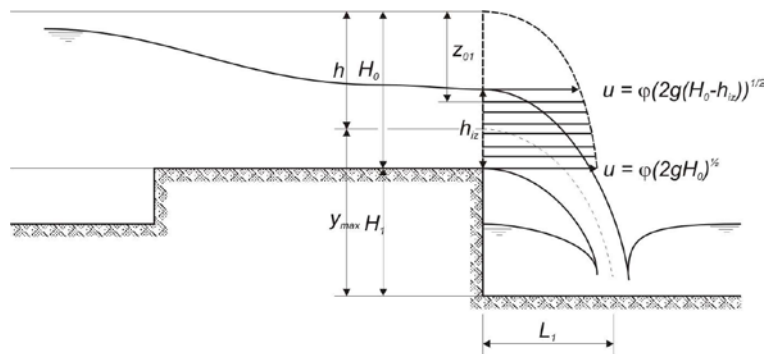
$$L_1 = 2\varphi \sqrt{h y_{max}}, \quad (2.80)$$

$y_{\max}$  pa je tlačna višina od gladine vode do težišča slapu .

Potrebna dolžina ojačanega podslapja z dodano varnostno dolžino 1.00 m je:

$$L = L_1 + 1.0 \text{ m} . \quad (2.81)$$

Pri prelivanju preko širokega praga je treba upoštevati, da je prelivni curek oblikovan kot kaže slika št. 2.45.



Slika 2.45: Preliv s širokim pragom (Agroskin, 1964)

Picture 2.45: Overflow with broad-crested weir (Agroskin, 1964)

Dolžina dometa  $L_1$  za sredino slapu je:

$$L_1 = 2\varphi\sqrt{(H_0 - 1/2 h_{iz})(H_1 + 1/2 h_{iz})} , \quad (2.82)$$

kjer so:

$h = H_0 - h_{iz}/2$  ... tlačna višina od gladine do sredine slapu,

$y_{\max} = H_1 + h_{iz}/2$  razdalja od sredine do dna slapu.

Iztočno globino slapu  $h_{iz}$  se določi brez upoštevanja višjega tlaka v curku na iztoku in privzetju razporeditve hitrosti po paraboli:

$$u^2 = 2\varphi^2 g z_{01} ,$$



$z_{01}$  ... globina strujnice od tlačnega horizonta.

Površina diagrama hitrosti, kot šrafitiranega dela kvadratne parabole na sliki št. 2.43 znaša:

$$F = \frac{2}{3} \varphi H_0 \sqrt{2g H_0} - \frac{2}{3} \varphi (H_0 - h_{iz}) \sqrt{2g (H_0 - h_{iz})} .$$

Specifični pretok:

$$q = m \sqrt{2g} H_0^{3/2} .$$

Iz gornjih enačb sledi iztočna višina ( $h_{iz}$ ):

$$h_{iz} = \left( 1 - \left( 1 - \frac{3m}{2\varphi} \right)^{3/2} \right) H_0 , \quad (2.83)$$

kjer oznake pomenijo:

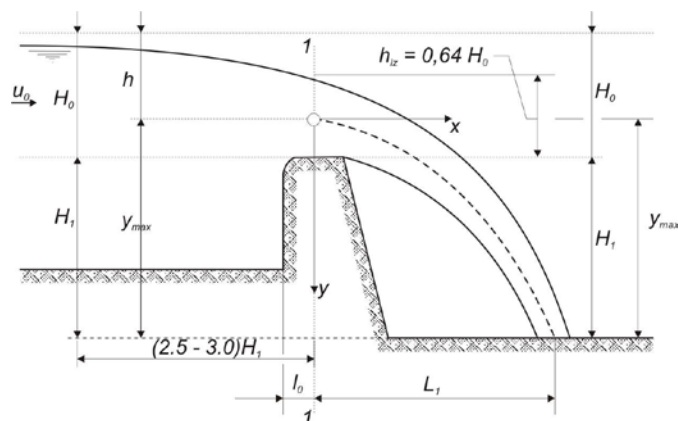
$m$  ... koeficient preliva,

$\varphi$  ... koeficient hitrosti.

V zgornjih računih lahko privzamemo  $m = 0.385$  in  $\varphi = 1.0$ , zato je v tem primeru  $h_{iz} = 0.44h_0$ . Tako dobimo naslednjo dolžino dometa slapu (Agroskin, 1964):

$$L_1 = 1.75 \sqrt{H_0 (H_1 + 0.22H_0)} . \quad (2.84)$$

Tudi prelivni curek preko preliva praktične oblike ima drugačno geometrijo, kar je prikazano na sliki (št. 2.46).



Slika 2.46: Praktični profil prelivnega pravokotnega prereza (Agroskin, 1964)

Picture 2.46: Practical profile of overflow-rectangular section (Agroskin, 1964)

Ob privzetju parametrov (M. N. Pavlovski) za iztočno višino  $h_{iz} = 0.64H_0$ , koeficienta hitrosti  $\varphi = 1.0$  in debeline preliva  $l_o = 0.3H_0$  se lahko izračuna tlačna višina do sredine slapu:

$$h = H_0 - \frac{h_{iz}}{2} = 0.68H_0 \quad (2.85)$$

in razdalja od sredine do dna slapu:

$$y_{max} = H_1 + \frac{h_{iz}}{2} = H_1 + 0.32H_0. \quad (2.86)$$

Enačba  $L = 2\varphi\sqrt{h y_{max}}$  dobi ob zamenjavi  $h$  in  $y_{max}$  z gornjima izrazoma (Agroskin, 1964) naslednjo obliko:

$$L = 1.65\sqrt{H_0(H_1 + 0.32H_0)}. \quad (2.87)$$

Domet slapu za naravno neutrjeno podslapje določa tudi dolžino podslapja, ki se lahko določi približno po Angerholzer-ju (1913):

$$L_1 = \left( u_0 + \sqrt{2gH_0} \sqrt{\frac{2H_1}{g} + H_0} \right), \quad (2.88)$$

kjer so:

$L_1$ ...dolžina podslapja merjena od objekta [m],

$u_0$ ...dotekajoča hitrost [m/s],

$H$ ...višina pregrade [m],

$H_0$ ...globina prelivne vode merjene  $(2.5 \text{ do } 3.0)H_1$  od preliva gorvodno,

$y$ ...razlika nivojev zgornje in spodnje vode [m].

Enačba upošteva horizontalno komponento parabole, vključno z varnostnim popravkom  $H_0$ . Težava je pri točni določitvi dotočne hitrosti  $u_0$ . Vprašanje v praksi pa je tudi, če je dodatek  $H_0$  zadosten. Enačba daje srednjo vrednost dolžine podslapja (Jevtić, 1978).

Enačba Müllerja (ETH Zürich) velja samo za dotočno višino  $H_0$  od 0,75 m do 1,50 m in denivelacijo nivojev  $H_1$  od 1.50m do 4.00m in pretoka od 2.00 m<sup>3</sup>/s do 6.00 m<sup>3</sup>/s na tekoči meter prelivne širine preliva:

$$L = 4 H_0^{3/2} \cdot H_1^{1/2}, \quad (2.89)$$

kjer so:

$L_1$ ...dolžina podslapja [m],

$H_1$ ...višina pregrade [m],

$H_2$ ...globina prelivne vode [m].

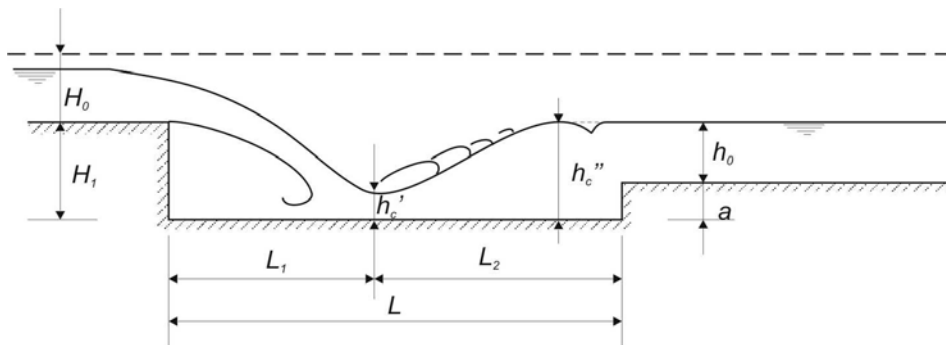
Dotočna hitrost se predpostavi, tako ni mogoče določiti razstoja pregrade in prednjega zaščitnega zidu. Enačba podaja večje dolžine podslapja kot Angerholzerjeva, v kateri ni določevanja dotočne hitrosti.

Odggnani popoln vodni skok prikazan na sliki št. 2.31 nastane, kadar je globina spodnje vode ( $h_b$ ) je manjša od prve konjugirane višine  $h_c'$ . V tem slučaju se formira krivulja zajezbe od globine  $h_b$  do  $h_c'$ . Ta primer je najneugodnejši, saj velike hitrosti povzročajo poškodbe korita. Dolžina vodnega skoka znaša:

$$L_2 = 4.3 h_c''. \quad (2.90)$$

Popolni vodni skok, če je predvidena poglobitev podslapja nastane, če je globina spodnje vode ( $h_0$ ) enaka višini  $h'_c$  zmanjšani za višino udarnega pragu. Dolžina vodnega skoka v tem primeru znaša:

$$L_2 = 3.2h_c'' \quad (2.91)$$



Slika 2.47: Običajen vodni skok s poglobitvijo podslapja (Jevtić, 1978)

Picture 2.47: Common hydraulic jump with plunge pool deepening (Jevtić, 1978)

Potopljen (podprt) vodni skok, če se podslapje konča z udarnim zidom, daje najugodnejše razmere (Jevtić, 1978). Pri potopljenem (podprtem) skoku je konjugirana višina  $h'_c$  manjša od gladine spodnje vode. Dolžina vodnega skoka se lahko giblje v razponu:

$$L_{2\min} = 4.8(h_c'' - h'_c), \quad (2.92)$$

$$L_{2\max} = 6.6(h_c'' - h'_c). \quad (2.93)$$

Popolni skok (poglobitev podslapja in udarni zid) nastane, kadar je globina spodnje vode ( $h_1$ ) enaka razliki druge konjugirane višine ( $h''_c$ ) in globine podslapja ( $a_0$ ). Dolžine popolnega skoka se po različnih avtorjih razlikujejo:

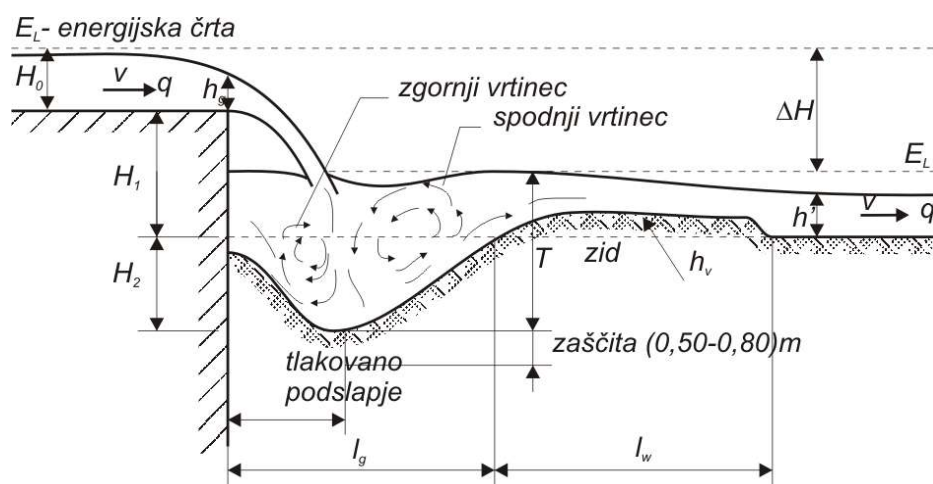
Pavlovski: 
$$L_2 = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (2.94)$$

Čertousov: 
$$L_2 = 10,3h' \left( \sqrt{\frac{\alpha q^2}{g h'^3}} - 1 \right)^{0,81}, \quad (2.95)$$

Pikalov: 
$$L_2 = 4h' \sqrt{1 + 2 \frac{\alpha q^2}{g h'^3}}. \quad (2.95)$$

Zato se dolžine gibljejo v prej omenjenem razponu med 4.8 do 6.6 kratne velikosti razlike konjugiranih višin (Jevtič, 1978).

Določitev deformacije korita naravnega podslapja, ki se pojavi pod prelivom bo prikazana s pomočjo slike št. 2.48. Voda pri padcu na dno prirodnega slapa povzroča na delu neposrednega udara kot tudi na delu povečanih hitrosti erozijo dna korita. Pri tem se ustvarjajo vrtinci, ki so lahko nevarni za stabilnost prečne konstrukcije. Poglobitve se morajo upoštevati poleg vpliva zmrzali pri temeljenju objekta.



Slika 2.48: Prerez naravnega podslapja

Picture 2.48: Profile of natural plunge pool

Preko pregrade padajoča voda ustvarja v strugi pod pregrado tolmun. Pretočna količina in višina pada vplivata neposredno na globino tolmana, velikost plavin pa ima pozitiven vpliv, saj zmanjšuje globino podslapja.

Vse empirične enačbe so sestavljene na sledečih predpostavkah:

$$T = \frac{w \Delta H q}{d_m}, \quad (2.96)$$

kjer so:

$T$ ...globina tolmana [m],

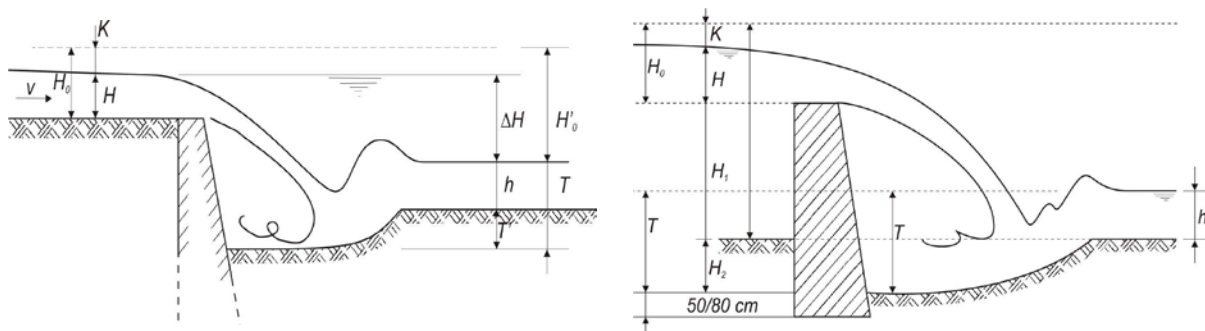
$\Delta H$ ...razlika med zgornjo in spodnjo vodo [m] (denivelacija nivojev),

$q$ ...pretok na enoto širine pragu [ $m^3/s$ ],

$d_m$ ...prerez merodajnega zrna plavin [mm] (90% zrn je po teži manjše od  $d_m$ , 10% pa večje),

$w$ ...proporcionalni koeficient.

Pri tem je pomembna dotočna hitrost zgornje vode in globina spodnje vode.



Slika 2.49: Globina tolmana pod rečno stopnjo in globina tolmana pod jezom (Jevtić, 1978)

Picture 2.49: Depth of river pool below river level and depth of river pool below dam (Jevtić, 1978)

Izračun globine tolmana lahko poteka po različnih avtorjih:

- Avtor E. A. Schoklitsch (1930) je za največjo globino tolmana na podlagi modelnih raziskav predlagal enačbo:

$$T = \frac{(4.57 \cdot \Delta H^{0.2} \cdot q^{0.57})}{d_m^{0.32}}, \quad (2.97)$$

ki velja za ozračevane prelive (Jevtić, 1978).

- Avtor Veronese (1937) je predlagal enačbo:

$$g_T = \frac{3.68 \Delta H^{0.225} q^{0.54}}{90^{0.42} d_m}. \quad (2.98)$$

Obe enačbi ne upoštevata Froudovega števila, zato ni mogoče primerjati režima toka modelnih preiskav in stanja v naravi.

- Avtor Riediger je predlagal, naj bo globina tolmana  $T'$  določena (Tehničar 6, 1989) na naslednji način:

energ. višina vode:

$$\text{zgoraj: } H_0 = H + v^2/2g \cong 0.05v^2 + h_0 ,$$

$$\text{spodaj: } H'_0 = \Delta H + v^2/2g \cong 0.05v^2 + \Delta H .$$

Tako globina tolmana pri normalni gostoti vode znaša:

$$T' = v_0^2 + 2\Delta H = 0.10v_0^2 + 2\Delta H , \quad (2.99)$$

če je deformacija podlage :

$$T' = T - h ,$$

dobimo naslednjo enačbo:

$$\gamma T = \frac{T' + 10\gamma_0}{T' + 10T} = \frac{T' \gamma_t}{3 - 2\gamma_t} , \quad (2.100)$$

kjer v enačbah uporabljene količine pomenijo:

$H_0$  ... globina v dovodni strugi s hitrostno višino [ m ]

$v$  ... hitrost dotoka vode [ m/s ]

$h$  ... globina vode v koritu [ m ]

$\Delta H$  ... razlika višin zgornje in spodnje vode [ m ]

$H'_0$  ... razlika višin zgornje in spodnje vode povečana s hitrostno višino [ m ]

$T$  ... globina dna pod nivojem spodnje vode – globina tolmana [ m ]

$T'$  ... globina dna tolmana pri normalni gostoti vode  $\gamma_w$  [ m ]

$\gamma_0$  ... prostorninska teža vode v padanju, ki je pomešana z zrakom [ kN/m<sup>3</sup> ]

$\gamma_T$  ... prostorninska teža vode na dnu tolmana [ kN/m<sup>3</sup> ]

Pri tem je treba upoštevati, da se prostorninska teža curka, v katerega vdira zrak, zmanjšuje, kot kaže naslednja tabela št. 2.16.

Tabela 2.16: Prostorninska teža vode z vsebnostjo zraka

Table 2.16: Cubic weight with air content

$H'_0/H_0$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\gamma_0$	1,00	0,71	0,57	0,50	0,45	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32

- Avtor Wehrmann je predlagal, naj bo globina tolmana določena:

$$T = \frac{2(H + K)}{0,3\gamma_w - \frac{K + H}{K + H + H_1}} = \frac{2H_0}{0,3\gamma_w - \frac{2H_0}{H_0 + H_1}}, \quad (2.101)$$

kjer je:

$K$ ...hitrostna višina dotekajoče vode [m],

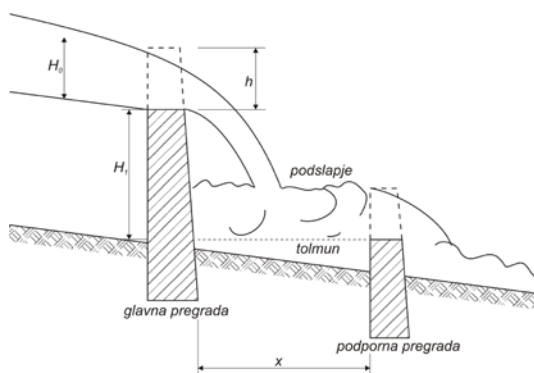
$H$ ...globina vode pred in za objektom [m],

$\gamma_w$ ...teža vode [ $\text{kN/m}^3$ ],

$H_0$ ...skupna višina  $K+H$  [m] od tega je 0,5 m – 0,8 m, potrebna zaščita temelja pod dnom tolmana in poglobitev tolmana  $T - h_1$ .

Postavitev podporne pregrade omogoča nastanek vodne blazine, v kateri padajoča voda troši energijo z vrtnčenjem. Širina tolmana naj bo med širino pretočne sekcije ( $b$ ) in 1,5 kratno širino pretočne sekcije. Dolžina podslapja ( $L_1+L_2$ ) je odvisna od višine slapu in pretočne količine ter pripadajoče hitrosti.





Slika 2.50: Postavitev podporne pregrade  
 Picture 2.50: Construction of supporting barrier

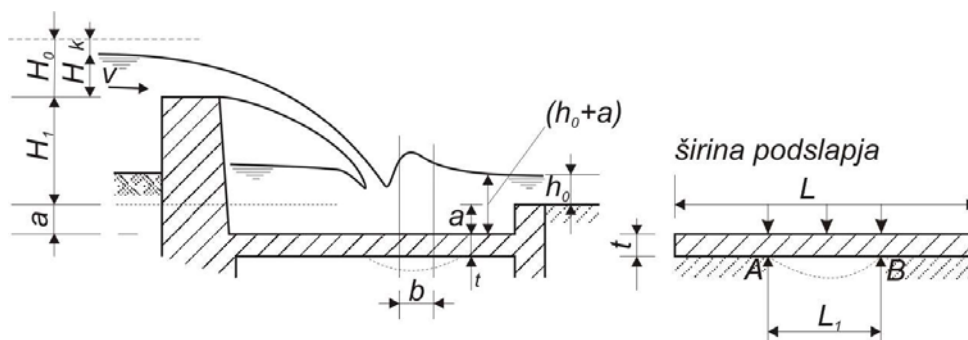
Ureditev vodnega bazena (tolmuna, vodne blazine) učinkovito ščiti dno med glavno in podporno pregrado. Pri večjih prelivnih višinah se pojavijo tudi velike dinamične obremenitve, zato je potrebna modelna preiskava.

### 2.9.3 Določitev debeline ojačitve podslapja

Podslapje kaskade ali pregrade, kjer so prekoračene dopustne obremenitve dna, se običajno zgradi iz betona ali zloženega kamenja. Debelina plošče podslapja z vodno blazino je odvisna od globine prelivne vode in debeline vodne blazine ( $H_0 + a$ ). Globina podslapja brez vodne blazine je odvisna od globine prelivnega slapu vode in višine pregrade ( $H_0 + a$ ), to je od višinske razlike vode, ki pada v podslapje in s tem ustvarja deformacijsko delo.

V nadaljevanju bosta prikazana dva obtežbena primera, enkrat za podslapje z vodno blazino in drugič brez nje:

- Obtežbeni primer ( $H_0 + a$ ):



Slika 2.51: Utrditev podslapja z vodno blazino (Jevtić, 1978)

Picture 2.51: Consolidation of plunge pool using water cushion (Jevtić, 1978)

Za primer, prikazan na sliki št. 2.51 je delo vode, ki pada v podslapje je enako kinetični energiji:

$$E_k = \frac{m}{2} v^2, \quad (2.102)$$

kjer so:

$m = G/g$  ...masa vode [ kg/m<sup>3</sup> ],

$v = \sqrt{2g(H_0 + H_1)}$  ...hitrost padanja vode [ m/s ],

$G = 10.00Q$  ...teža dotekajoče vode [ kN/s ],

$Q$  ...pretok vode [ m<sup>3</sup>/s ],

$\gamma_w$  ...prostorninska teža vode  $\gamma_w = 10.00$  [ kN/m<sup>3</sup> ],

$\gamma_0$  ...prostorninska teža kamenja  $\gamma_0 = 10.00$  [ kN/m<sup>3</sup> ],

$a$  ...poglobitev podslapja [ m ].

Ravno tako se lahko upošteva, da je delo vode enako produktu njene teže z določeno potjo, kar da enačbo:

$$D = 10.00Q(H_0 + a) \quad (2.103)$$

V izračun debeline utrditve podslapja je potrebno privzeti statično pravilno podprto ploščo (nosilec), ki je obtežena z udarom vode (pritiskom). Zaradi regresivnega delovanja stoječega vala, ki se oblikuje pri skoku obstaja nevarnost razbitja in iztrganja dela plošče (nosilca) na dolžini  $L_1$ , ki se lahko privzame kot dvostransko

podprt nosilec. Širina izseka  $L_1$  bo pri tem enaka statičnemu razponu nosilca. Obrazložitev dimenzioniranja armirane konstrukcije presega obseg naloge.

Pri določitvi debeline kamnitega podslapja, ki ne more prevzemati nateznih sil, se določi upogibni moment:

$$M = \frac{qL_1^2}{12}, \quad (2.104)$$

kjer so:

$q$  ... enakomerna obtežba [ kN/m ],

$L_1$  ... razpetina nosilca [ m ].

Nato pa se iz naslednje enačbe lahko izračuna debelina podslapja  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{6M}{\sigma b}}, \quad (2.105)$$

kjer zanašajo uporabljene oznake:

$b$  ... širina kamnitega tlaka 1,00m [ m ],

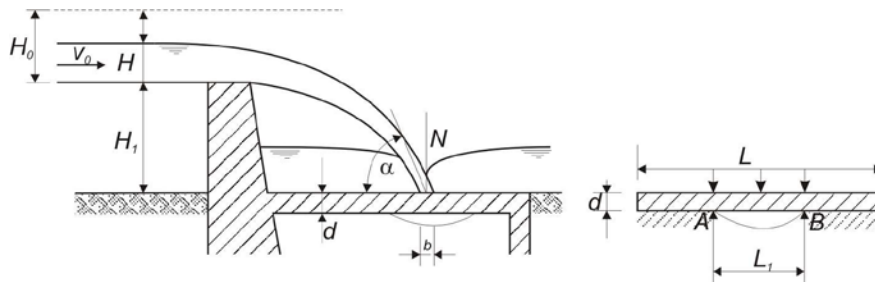
$d$  ... debelina kamnitega tlaka [ m ],

$\sigma$  ... dovoljena tlačna napetost kamnitega tlaka [ kN/m<sup>2</sup> ],

$M$  ... upogibni moment .

- Obtežbeni primer ( $H_0 + H_1$ ):

Za primer prikazan na sliki št. 2.52 bo prikazan način izračuna debeline utrditve podslapja brez vodne blazine.

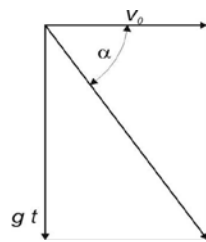


Slika 2.52: Utrditve podslapja brez vodne blazine (Jevtić, 1978)

Picture 2.52: Consolidation of plunge pool without water cushion (Jevtić, 1978)

Če privzamemo, da curek pada le na eno tretjino utrditve, to je  $L_1 = 1/3L$ , je delo teže vode:

$$D = 10.00 Q (H_0 + H_1). \quad (2.106)$$



$$\tan \alpha = \frac{gt}{v_0} = \frac{1}{v_0} \sqrt{2g(H_0 + H_1)}$$

Slika 2.53: Določitev kota padca curka na ploščo

Picture 2.53: Determination of jet decline angle on slab

Ker curek udarja poševno na podlago (Slika 2.53), znaša pravokotna komponenta teže na dno utrditve:

$$N = G \sin \alpha. \quad (2.107)$$

Enakomerna obtežba vode za širino  $b = 1.0m$  upošteva specifični dotok na  $m^1$ :

$$q_v = \frac{N}{L} = \frac{D \sin \alpha}{L} = \frac{\gamma Q (H_0 + H_1) \sin \alpha}{L}. \quad (2.108)$$

Ker znaša lastna teža nosilca za pas s širino  $l = 1.0m$ :

$$q_z = b d \gamma_0,$$

je skupna obtežba:

$$q = q_v + q_z.$$

Določitev kamnite debeline podslapja  $d$  poteka podobno, kot v prejšnjem primeri:

$$\text{Upogibni moment: } M = \frac{q L_1}{12},$$

$$\text{odpornostni moment: } W = \frac{b d^2}{6} = M/\sigma,$$

$$\text{kar omogoča izračun debeline kamnitega podslapja: } d = \sqrt{\frac{6M}{\sigma b}}.$$

Če upoštevamo, da je dovoljena upogibna napetost lomljenca v cementni malti kot vezivu  $\sigma = 250 \text{ kN/m}^2$ , dobimo:

$$M = M_v + M_z,$$

$$M_v = \frac{q_v L_1^2}{12} = \frac{L_1^2}{12} \frac{\gamma_w Q (H_0 + H_1) \sin \alpha}{L},$$

$$M_z = \frac{q_z L_1^2}{12} = d \gamma_0 \frac{L_1^2}{12},$$

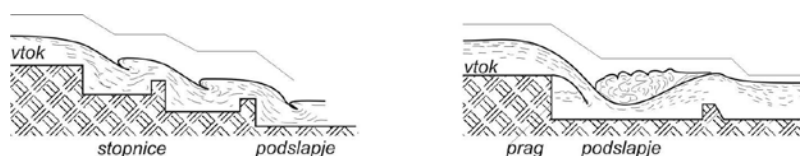
$$d^2 = \frac{6(M_v + M_z)}{\sigma b} = \frac{6 L_1^2}{12 \sigma b} \left( \frac{\gamma_w Q (H_0 + H_1) \sin \alpha}{L} + d \gamma_0 \right).$$

Rešitev kvadratne enačbe po debelini  $d$  (Jevtić, 1978), poda debelino kamnitega podslapja.

#### 2.9.4 Stopnje, stopnice v strugi in drčje

Dno struge hudournika se lahko zaščiti pred erozijo dna, to je pred nezaželenim poglobljanjem, z uporabo kaskad (stopnic) v strugi hudournika. Večinoma je ugodnejše stopničenje dna s kaskadami, kot izgradnja (višjih) prečnih objektov. Višina in medsebojna oddaljenost prečnih objektov je odvisna od vzdolžnega padca in odpora tal (dopustne vlečne sile). Obseg stopničenja je odvisen od skupne denivelacije terena, razlike med naravnim in projektiranim padcem ter dolžine struge na katerem se izvaja zaščita. Namesto

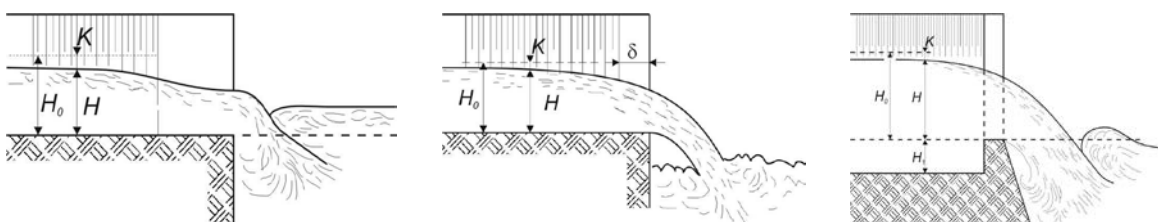
stopničastega dna se v primeru velikih vzdolžnih padcev in slabe podlage izvede oblaganje struge. Pri umirjanju hudournikov se lahko kaskade privzamejo kot samostojni sistem regulacije ali kot dopolnitev celotne ureditve. V vsakem primeru se kaskade gradijo s ciljem zmanjšanja vzdolžnega padca struge in zmanjšanja viškov energije toka v območjih pretoka preko prelivov. Kaskade povezujejo gladino zgornje in spodnje vode. Razlika med njima pogojuje izgradnjo ene ali več stopnic.



Slika 2.54: Prečni prezek kaskad (Agroskin, 1964)

Picture 2.54: Cross section of cascades (Agroskin, 1964)

Hidravlično se izračuna ločeno dotočni del in povezavo (spoja) slapa s spodnjo vodo. Dotočni del kaskade se praktično gradi kot preliv s širokim pragom. Prag preliva je lahko na globini dna struge ali pa je privzdignjen.



Slika 2.55: Prag v dnu struge – potopljen preliv, prag v dnu struge – nepotopljen preliv in prag dvignjen nad dno struge (Agroskin, 1964)

Picture 2.55: Crest in riverbed – submerged overflow, crest in riverbed – unsubmerged overflow, and crest raised above riverbed (Agroskin, 1964)

Kaskada sestoji iz struge, ki ima stopničasto dno tako, da s stopnjami zmanjšamo vzdolžni padec z več manjšimi slapovi z vmesnimi krajšimi vodoravnimi strugami. Za zaščito vmesnih strug se predvidijo tolmeni. V literaturi (Schoklitsch, 1930) so podane enačbe:

- Rümelina, ki podaja dolžino za kaskado:

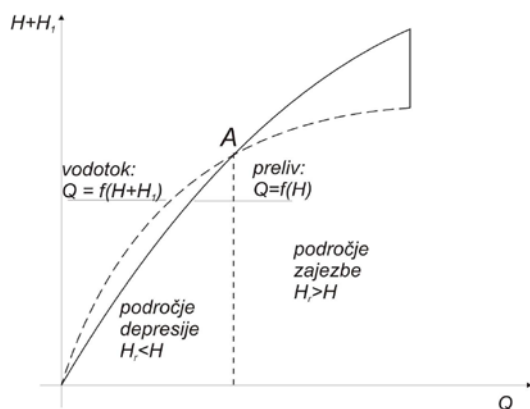
$$L = y + 3h \quad (2.109)$$

- Schöklitscha, ki podaja dolžino za kaskado s tolmunom:

$$L = 3h \quad t_{\min} = 2dm \quad (2.110)$$

Bočno zoženje preлива s širokim pragom povzroči še prečno gibanje vode. V primeru brez prečnega zoženja in praga na mestu hipnega znižanja dna struge je gibanje vode po krivulji depresije. Običajno je pretok skozi vtočni del nepotopljen. Pri izbiri širine vtočnega dela se mora upoštevati možnost nastanka krivulje zajezbe ali depresije pred kaskado. Obstaja možnost izbire take širine uvajalnega dela, da ne bo nastal niti zastoj niti depresija. Zato se izbrano širino kaskade določi iz pogoja višine pregrade  $H$ . Različnost pretokov od privzetega računskega dotoka povzroča ob manjšem dotoku depresijo prelivnega curka, ob večjem dotoku pa zastoje (zajezitev) vodne mase.

Za vodotok se lahko skonstruira krivulja pretokov v odvisnosti od globine za zvezni pretok,  $Q=f(H+H_1)$ . Za preliv se skonstruira pretočna krivulja  $Q=f(H)$ . Krivulji se sekata v eni točki, levo je področje depresije, desno je področje zajezbe. V področju depresije je računška višina ( $H_r$ ) manjša od višine vode ( $H$ ) nad prelivom, v področju zajezbe je računška višina večja od višine vode nad prelivom. V spodnjem diagramu sta prikazani krivulji za prag dvignjen nad dnom struge.



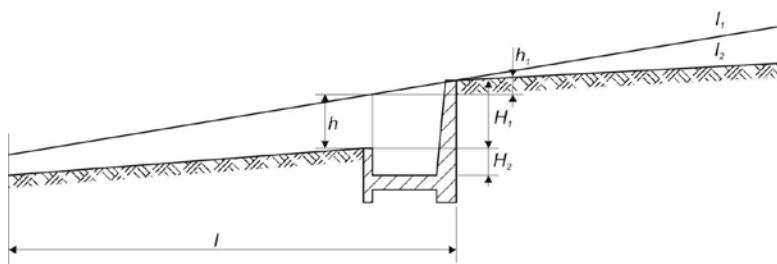
Graf 2.11: Krivulji pretoka vodotoka in preлива (Agroskin, 1964)

Diagram 2.11: Curves of rate of flow of stream and overflow (Agroskin, 1964)

Depresija povzroča v vodotoku nestabilnost struge, pri zastojih lahko nastopi odlaganje plavin, poleg tega se mora predvideti globljo strugo zaradi preprečitve prelivanja vode preko roba struge ob maksimalnih pretokih.

### 2.9.5 Vzdolžni padec in kaskade v strugi

Za določitev prikazane kaskade morajo biti v strugi znani osnovni elementi za regulacijo toka, kot so naravni padec struge ( $I_1$ ), projektirani padec struge ( $I_2$ ), razlika padcev ali denivelacija terena ( $H_1$ ) in medsebojna razdalja kaskad ( $l$ ). Naravni padec struge se določi na podlagi geodetske situacije ali neposrednega niveliranja. Projektirani padec se določi z računskimi metodami na osnovi merodajnega premera zrn plavin in hidravličnega radija.



Slika 2.56: Kaskade v strugi (Jevtić, 1978)

Picture 2.56: Cascades in channel (Jevtić, 1978)

Po Valentini-ju je padec  $I$  definiran:

$$\tan \alpha = I_2 = C \frac{a}{R} \quad (2.111)$$

$$a^3 = \frac{V}{n}, \quad (2.112)$$

kjer uporabljene oznake pomenijo:

$C$ ...konstanta

$R$ ...hidravlični radij [m],

$a$ ...srednji premer zrna [m],

$V$ ...skupni volumen zrn podlage zbranih na  $1 \text{ m}^2$  reprezentančne površine dna struge,

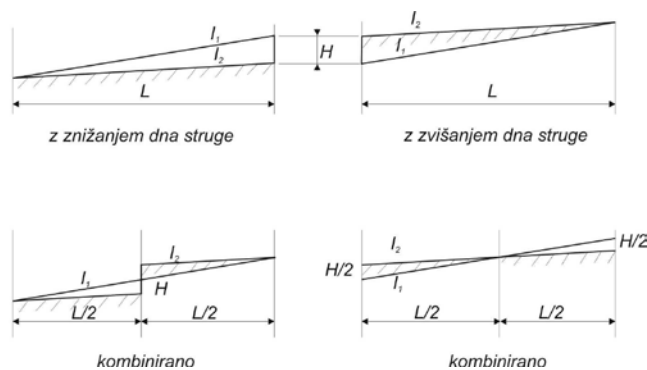
$n$ ...skupno število zrn plavin.

Srednji premer zrna se dobi na osnovi presejne krivulje. Razlika padca terena ali denivelacija terena predstavlja izbrano višino kaskade  $H$ . Iz vseh posameznih elementov se določi medsebojni razmak stopnic:



$$L = \frac{H_1}{I_1 - I_2} \quad (2.113)$$

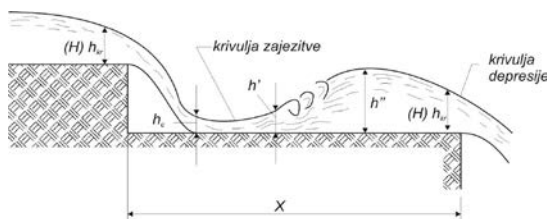
V odvisnosti od oblike terena (topografije) in potreb projektiranja se zmanjšanje padca dna struge izvede z niževanjem ali višanjem dna struge, kot kaže slika št. 2.57 (Jevtić 1978).



Slika 2.57: Zmanjšanje vzdolžnega padca (Jevtić, 1978)

Picture 2.57: Decreasing of longitudinal fall (Jevtić, 1978)

Hidravlični račun sestoji iz računa vtočnega dela, kaskadnih stopnic in iztoka – podslapja. Vtočni del kaskad se računa na enak način, kot za preliv. Stopnice kaskade se oblikujejo tako, da se zagotovi trošenje kinetične energije v mejah posamezne stopnice, ki nastane s padanjem curka vode na stopnico. Zadnja stopnica se običajno projektira v obliki podslapja za kaskado z eno stopnico. Pri tem se predvidi potopljen preliv na zadnji stopnici. Brez formiranja skoka potok na stopnici ne more doseči kritične globine in s tem ne more potrošiti svoje energije do minimalne velikosti, ki bi odgovarjala kritični globini.

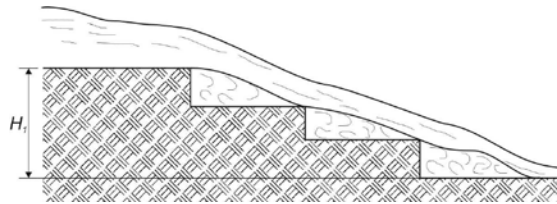


Slika 2.58: Kaskada kot preliv s širokim pragom (Agroskin, 1964)

Picture 2.58: Cascade as overflow with broad crest (Agroskin, 1964)

Da bi se ustvaril skok je potrebno, da je na sami stopnici globina vode večja od  $h_{kr}$ , ker pri padcu slapa na stopnico nastane globina  $h_c$  večja od  $h_{kr}$ . Povečanje globine vode na stopnici se lahko doseže z umetno pregrado v obliki odbojnega zidu na kraju stopnice ali s povečanjem hrapavosti. Udarni (odbojni) zid na stopnici kaskade, ima enako vlogo kot pri

podslapju pri povezavi s spodnjo vodo. Zaradi tega nastane ime kaskade s tolmunom. Pri kaskadah brez odbojnih zidov običajne hrapavosti bi vodni skok lahko nastal zaradi porabe znatnega dela energije vodotoka za premagovanje trenja vzdolž stopnice. Zaradi majhne izgube energije na stopnici običajne hrapavosti, bi bila potrebna velika dolžina stopnice, ki bi zagotovila prehod iz deročega v mirni tok na dolžini stopnice.



Slika 2.59: Večstopenjske kaskade brez tolmunov (Agroskin, 1964)

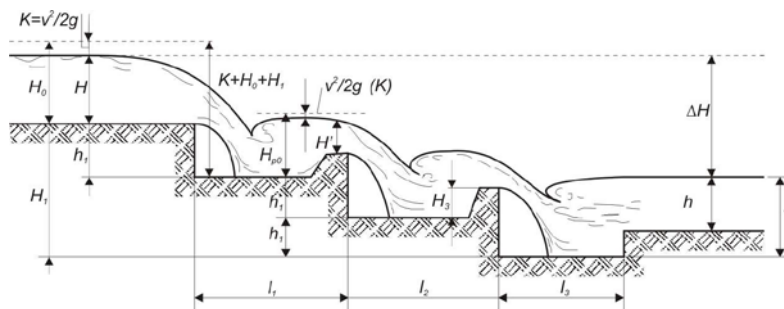
Picture 2.59: Multilevel cascades without river pool (Agroskin, 1964)

Pri kratkih stopnicah bi ostal deroči tok, zato bi kinetična energija celo naraščala vzdolž kaskad, ki ne bi vršile svoje osnovne funkcije. Spajanje vodotoka s spodnjo vodo bi se poslabšalo, iztočni del bi bil izpostavljen razdiralni moči vode. Vsekakor mora večstopenjska kaskada brez tolmunov imeti daljše stopnice od kaskad s tolmunom. Vertikalne dimenzije stopnice ( $h_1$ ) se določijo (privzamejo) na podlagi predpostavke o izbiri enakih višin stopnic  $h_1 = H_1/N$ , kjer pomeni:

$H_1$ ...razlika višinskih kot med zgornjo in spodnjo vodo

$N$ ...število stopnic, ki se določi na temelju tehnično – ekonomskega računa

Večstopenjske kaskade s tolmunom so dimenzionirane tako, da zaključne stene zagotavljajo, da vodni skok nastane v tolmunu kaskade. Tolmun zadnje kaskade mora biti potopljen s strani spodnje vode.



Slika 2.60: Večstopenjske kaskade s tolmunom (Agroskin, 1964)

Picture 2.60: Multilevel cascades with river pool (Agroskin, 1964)

Višina udarnega zidu se izbere tako, da na stopnici nastane globina:

$$H' + H_3 > h_p'', \quad (2.114)$$

kjer je:

$H'$  ...globina vode nad udarnim zidom (preliv),

$H_3$  ...višina udarnega zidu,

$h_p''$  ...druga konjugirana globina podprtega skoka.

Pri krajšanju stopnic se mora zagotoviti oblika podprtega hidravličnega skoka (Jevtić 1978, 209) za katerega velja pogoj:

$$H' + H_3 = \sigma h_p'' = 1.05 h_p''. \quad (2.115)$$

Dolžina stopnice:

$$I_{st} = I_{dom} + I_{sk} + \delta, \quad (2.116)$$

kjer so:

$I_{dom}$  ...dolžina dometa curka

$I_{sk}$  ...dolžina podprtega skoka

$\delta$  ...debelina zidu

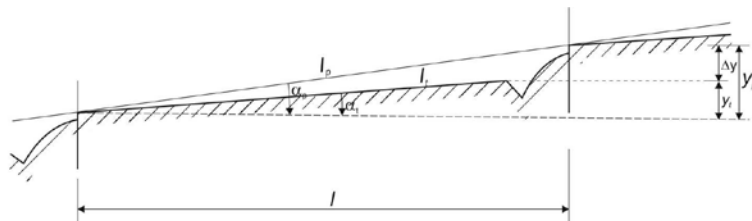
$\sigma$  ...koeficient povečanja konjugirane višine (varnost)

Podobno kot kaskade, se lahko uporabljajo pri vodnih zgradbah tudi hrapave drče. Konstrukcija drče se deli na vtočni del, žleb in iztočni del. Zgrajene so z običajno hrapavostjo ali s povečano (umetno) hrapavostjo. Drča z običajno hrapavostjo (drča) je

kanal pravih oblik stalne ali spreminjajoče višine, katere hidravlični padec je večji od kritičnega padca za računski pretok. Na takih drčah (šumeliščih) nastane deroči tok, ki ga je treba na stiku s spodnjo vodo umiriti. V drčah s povečano hrapavostjo pa nastane pri enakomernem pretoku manj burni tok, pogosto s ciljem, da nastane zaradi povečane hrapavosti, celo mirni tok.

### 2.9.6 Konsolidacijske ojačitve v strugi in njihova medsebojna oddaljenost

Z namenom preprečitve naravnega destruktivnega dela vode v oblikovanju erozijskih žarišč v strugi, se morajo v strugi zgraditi tehnični objekti. Z uporabo objektov in ustvarjanjem vrste umetnih erozijskih žarišč vzdolž struge, se zaustavi dolgotrajno poglobljene struge v smeri vzpostavljanja stalne in stabilne linije padca dna za cel odsek. Erozijsko delo vode bo usmerjeno na vzpostavljanje krajših enakomernih fiksnih točk, ki jih tvorijo ojačitve vkopane v dno struge s prelivnim pragom in bodo umetno regulirale strugo v prostoru. Z zgrajenimi ojačitvami za konsolidacijo dna in brežin struge se vzpostavi dinamično ravnotežje vodnega toka med razdiralnimi silami vode in odpornimi silami struge. V primeru večjega projektiranega padca dna struge od dovoljenega za vrsto podlage in globino vode nastanejo spremembe, kot je vidno premikanje delcev podlage korita med ojačitvami, spodkopavanje dna struge v delu neposredno pod prelivnim robom, vodni val spodkopava in poglobi tolmun, dolvodno pa voda z izkopanim materialom tolmana zasuje strugo. Težnja hitrejšega ali počasnejšega zniževanja nivelete dna struge je odvisna od večje ali krajše razdalje med ojačitvami ter poglobljanja dna struge na črto kompenzacijskega padca ob vzdolžnih deformacijah korita.



Slika 2.61: Vzdolžni prerez struge med prečnimi pragovi (Jevtić, 1978)

Picture 2.61: Longitudinal section of channel between transverse crests (Jevtić, 1978)

Iz slike št. 2.61 se vidi, da je za predvideni vzdolžni padec  $I_p$  dna korita, ki je večji od dovoljenega padca  $I_t$ , nastopila deformacija obstoječe generalne linije. Posledica je

poglobitev struge za  $\Delta y$ , odvisno od predvidene medsebojne razdalje ojačitev  $l$ .

Če je projektiran vzdolžni padec:

$$\tan \alpha_p = I_p = \frac{y_p}{l} \quad (2.117)$$

in projektiran hidravlični ravnotežni padec:

$$\tan \alpha_t = I_t = \frac{y_t}{l}. \quad (2.118)$$

Pri tem je projektirana višinska razlika:

$$y_p = l I_p \quad (2.119)$$

in dejanska višinska razlika:

$$y_t = l I_t, \quad (2.120)$$

ter višina znižanja nivelete:

$$\Delta y = y_p - y_t = l(I_p - I_t). \quad (2.121)$$

Dejansko potrebno razdaljo med ojačitvami lahko izračunamo:

$$l = \frac{\Delta y}{I_p - I_t}, \quad (2.122)$$

kjer je:

$l$ ...razdalja med pregradami

$y$ ...višina znižanja nivelete

$I_p$ ...projektiran vzdolžni padec

$I_t$ ...ravnotežni padec

Za izbrane velikosti projektiranega padca in dejanskega padca, ki je funkcija odpora struge (vlečna sila), se lahko izračuna razmak  $l$  ali pripadajoča višina spuščanja dna struge  $\Delta y$ , če

upoštevamo, da je:

$S_0 = \gamma R I_t$  .... vlečna sila na enoto površine struge [kN/m<sup>2</sup>] in

$I_t = \frac{S_0}{\gamma R}$  ....ravnotežni padec.

Dejansko mora biti odporna moč struge  $S_0$  določena na osnovi vlečne sile na začetku gibanja plavin  $T_0$  [kN/m<sup>2</sup>], ki je po Krey-u določena z:

$$T_0 = S_0 = 0,05(\gamma_n - \gamma)d, \quad (2.123)$$

kjer so:

$\gamma_n$  ....specifična teža nanosa [kN/m<sup>3</sup>]

$\gamma_w$  ... specifična, oziroma prostorninska teža čiste vode [kN/m<sup>3</sup>]

$d$  ... merodajen premer zrna v strugi v m (velja  $d = d_{50\%}$  na granulometrijski krivulji)

Iz enačbe za kompenzacijski (ravnotežni) padec  $T_0$ :

$$T_0 = \gamma_w R_0 I_t \text{ [ m ]},$$

kjer je :

$T_0$ ...kompenzacijski ravnotežni padec [ m ],

od tod sledi enačba za hidravlični radij  $R_0$ :

$$R_0 = \frac{T_0}{\gamma_w I_t}. \quad (2.124)$$

Za de Chezijev koeficient po Mostkov-u dobimo:

$$C_0 = 22 \log \left( \frac{R_0}{d} \right) + 9,5 \frac{d}{R_0} + 1,5 \quad (2.125)$$

in hitrost toka na začetku gibanja plavin:

$$v_o = C_o \sqrt{R_o I_t} \quad [m/s]. \quad (2.126)$$

Debelina laminarnega sloja je:

$$\delta = 11 \frac{\sigma}{\sqrt{\frac{T_o g}{\gamma_w}}}, \quad (2.127)$$

kjer je:

$\sigma$  ... kinetični koeficient viskoznosti vode (za vodo pri  $T = 20^\circ \text{C}$ ,  $V = 0,0101$ ). Določen je kot kriterij turbulentnosti in hrapavosti objekta, ki se določi iz razmerja  $d/\delta$ .

Objekt je hidravlično gladek (tok je laminaren), če je  $d/\delta < (d/\delta)_{\text{lim}} = 1 \div 10$ ; oziroma hrapav (tok je turbulenten), če je  $d/\delta > (d/\delta)_{\text{lim}} = 1 \div 10$ , kar vse končno določa tip objekta in režim toka vode v njem (Jevtić, 1978).

Tabela 2.17: Vrednosti kinetičnega koeficienta viskoznosti ( $\sigma$ ) pri različni temperaturi vode

Table 2.17: Value of kinetic coefficient of viscosity ( $\sigma$ ) at various water temperatures

T (°C)	0	5	10	12	14	16	18	20	30
$\sigma(\text{cm}^2/\text{s})$	0.0178	0.0152	0.0131	0.0124	0.0117	0.0111	0.0106	0.0101	0.0080

## 2.10 Prodnosnost

V literaturi je dokumentiranih veliko različnih pristopov v preučevanju pogojev pričetka gibanja delcev, ki so v stanju mirovanja na rečnem dnu. V osnovi se avtorji lahko delijo glede na deterministični pristop in statistični pristop.

### 2.10.1 Enačba Meyer – Peter, Müller

Pogoj za pričetek gibanja delca plavin na rečnem dnu je izražen s pomočjo kritične hitrosti na dnu ( $u_o$ ) ali kritične strižne napetosti napetosti ( $\tau_{0cr}$ ). Raziskave so bile izpeljane brez

detajlnih raziskav vzrokov samega pojava. Kot rezultati teh raziskav so nastali empirični obrazci, ki določajo pričetek gibanja rečnih plavin. Tipičen predstavnik te skupine obrazcev je enačba Meyer-Peter, Müller v nadaljevanju (M-P-M enačba):

$$\tau_{0_{cr}} = 0.047(\gamma_s - \gamma) dm, \quad (2.128)$$

kjer so:

$\tau_{0_{cr}}$  ... kritična strižna napetost pri kateri se prične gibanje delcev [kN/m<sup>2</sup>]

$\gamma_s$  ... specifična teža nanosa [kN/m<sup>3</sup>]

$\gamma$  ... specifična teža vode [kN/m<sup>3</sup>]

$d_m$ ... premer merodajnega zrna nanosa [m]

Enačba temelji na zelo obsežnih in detajlnih meritvah v laboratoriju, ki so obsegale najprej delce enakomerne velikosti, nato mešanice naravnih materialov, delce lignita in barita. Raziskave (Meyer-Peter, Müller) so obsegale sledeče karakteristike plavin in toka:

$1\text{ cm} \leq H \leq 13\text{ cm}$  ... višina vode

$0.0004 \leq J_n \leq 0.020$  (2%) ... vzdolžni padec

$0.40\text{ mm} \leq d \leq 30\text{ mm}$  ... premer zrna

$2.5\text{ kN/m}^3 \leq \gamma_s \leq 32.00\text{ kN/m}^3$  ... koncentracija zrna

Na osnovi teh raziskav sta M.-P.,M. definirala empirično enačbo:

$$\left(\frac{n_r}{n}\right)^{3/2} \cdot \frac{Q_s}{Q_n} \cdot \frac{\gamma R J_n}{(\gamma_s - \gamma) dm} = C_{MPM} + 0.25 \cdot \frac{g_s^{2/3}}{(\gamma_s - \gamma) dm} \cdot \left(\frac{\gamma}{g}\right)^{1/3},$$

kjer so:

$n$  ... koeficient hrapavosti rečnega dna, vključno z vplivom oblik nanosov na dnu [m<sup>1/3</sup>s].

$n_r$  ... koeficient hrapavosti, velikost je odvisna od velikosti zrn nanosa, ki se izračuna po



enačbi:

$$n_r = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \left[ \text{m}^{-1/3} \text{s} \right] \quad (2.129)$$

$d_{90}$  ... zrno, od katerega je večjih samo 10% zrn na presevani krivulji [m]

$Q_s$  ... del skupnega pretoka, ki sodeluje pri transportiranju rečnih plavin [m<sup>3</sup>/s]

$Q_n$  ... skupni pretok reke [m<sup>3</sup>/s]

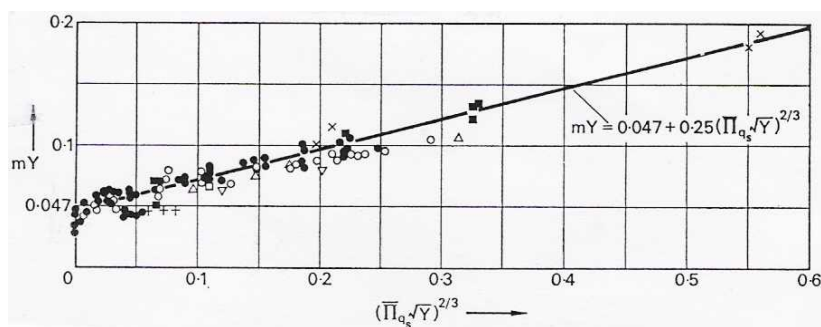
$dm$  ... zrno merodajnega premera [m]:

$$dm = \frac{\sum_{i=1}^{100} d_i \Delta p_i}{100}, \quad (2.130)$$

$g_s$  ... enotni prenos nanosa [kN/ms]

$C_{MPM}$  ... 0.047 brezdimenzijski parameter MPM, Shieldsov parameter

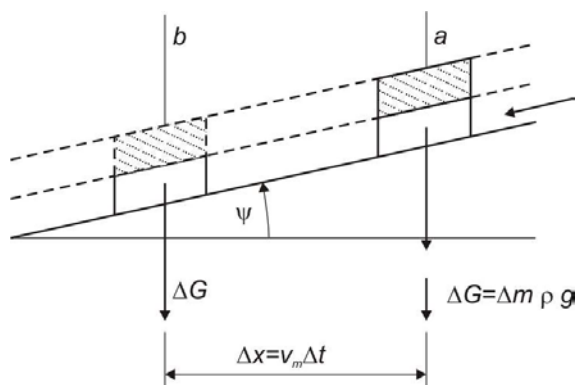
Enačba M-P-M je grafično predstavljena na grafu št. 2.12.



Graf 2.12: Diagram M-P-M (Yalin, 1972)

Diagram 2.12: M-P-M Diagram (Yalin, 1972) **Enačba Bagnolda**

Enačba temelji na analizi bilance razpoložljive energije. Osnovna predpostavka je, da se tangencialna komponenta sile toka na premikajočem sloju plavin prenaša na nižji mirujoči sloj in tako povzroči njegovo gibanje. Vrednost, ki sproži gibanje, imenujemo kritična kinetična napetost ( $\tau_{ocr}$ ).



Slika 2.62: Sile, delujoče na delec vode (Yalin, 1974)

Picture 2.62: Forces acting on small part of water (Yalin, 1974)

Koristno zaviralno delo ( $R$ ) ob premiku teže plavin iz točke a v točko b opravi sila trenja ( $T_r$ ), ki nasprotuje gibanju:

$$R = \Delta G \tan(\psi) v_M \Delta t, \quad (2.131)$$

kjer so:

$\tan(\psi)$ ...koeficient trenja

$v_m$ ...hitrost gibanja mase nanosa

Sila trenja je:

$$T_r = \Delta G \tan(\psi).$$

Količina prenesenega materiala ( $g_s$ ) v enoti časa ( $\Delta t = 1$ ) na enoto širine rečnega korita je:

$$g_s = \Delta G v_M \Delta t = \Delta G v_M \text{ [(kN/m)s]}.$$

Koristno delo izraženo z enotskim prenosom materiala:

$$R = g_s \tan(\psi). \quad (2.132)$$

Razpoložljiva (uporabna) energija toka ( $E_R$ ), ki ustvarja delo ( $R$ ) je določena z izrazom:

$$E_R = (\tau_0 - \tau_{ocr}) u_d, \quad (2.133)$$

kjer je:

$u_d$  ... hitrost toka v globini  $y = d$  od dna struge.

Po določitvi koristnega dela ( $R$ ) in razpoložljive energije ( $E_R$ ), se lahko določi koeficient »koristnega delovanja« toka  $\eta$ :

$$\eta = \frac{R}{E_R} = \tan(\psi) \cdot \frac{g_s}{(\tau_0 - \tau_{ocr})u_d}. \quad (2.134)$$

Iz gornje enačbe se določi enotni prenos plavin po Bagnoldu:

$$g_s = \frac{\eta}{\tan(\psi)} (\tau_0 - \tau_{ocr}) U_d. \quad (2.135)$$

Hitrost ( $u_d$ ) je upoštevana v izrazito turbulentnem toku, za katerega na ravnih odsekih velja logaritemski zakon razporeditve hitrosti po vertikali, napisan v obliki enačbe:

$$\frac{u}{v_*} = \frac{1}{\chi} \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + B = 2.50 \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + 8.50. \quad (2.136)$$

V primeru, da je  $y = ks = d$  se določi hitrost po enačbi:

$$u = u_d = 8.50 v_*,$$

strižna hitrost ob ostenju pa po enačbi:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}.$$

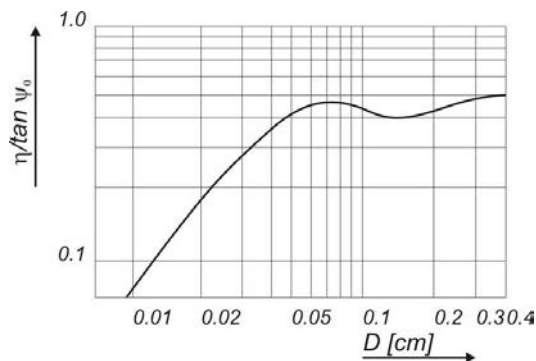
Z nadomestitvijo  $u_d = 8.50 v_*$  se dobi enačbo za enotni prenos plavin:

$$g_s = \alpha (\tau_0 - \tau_{ocr}) v_*, \quad (2.137)$$

$$\alpha = \frac{8.50 \eta}{\tan(\psi)}. \quad (2.138)$$

Spodnji diagram št. 2.13 Bagnolda je pomoč pri reševanju enačbe za enotni prenos plavin

$g_s$ .



Graf 2.13 Diagram Bagnolda za reševanje enačbe plavin (Muškatirović, 1976)

Diagram 2.13: Bagnolda diagram for solving debris equation (Muškatirović, 1976)

Enačba za  $g_s$  velja za transport drobnega peska, ne velja pa za primere, kjer se viskoznost lahko zanemari.

### 2.10.3 Spremembe povprečne hitrosti v rečnem koritu

Hitrost je v največji meri funkcija vzdolžnega padca. Zveza je izražena z različnimi obrazci in sicer:

- de Chezy: 
$$v = c\sqrt{RJ}, \quad (2.139)$$

- Forheimer: 
$$v = \frac{1}{n} R^{0.70} J^{1/2}, \quad (2.140)$$

- Ganguillet-Kutter- Manning: 
$$v_m = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2}. \quad (2.141)$$

za padec od 1.0 % do 5.0 % je vrednost  $n$  od 0.01 do 0.05.

- Gauckler-Strickler: 
$$v_m = K R^{3/2} J^{1/2}. \quad (2.142)$$

Enačbe se med seboj ne razlikujejo veliko, zato se lahko uporablja katerikoli obrazec. Pri spremembi vzdolžnega padca (Yalin 1972, 119) se hitrost spremeni po kvadratnem zakonu:

$$v_1 = c\sqrt{RJ_1} \quad v_2 = c\sqrt{RJ_2}, \quad (2.143)$$

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{J_1}{J_2}. \quad (2.144)$$

#### 2.10.4 Pričetek gibanja posameznega zrna

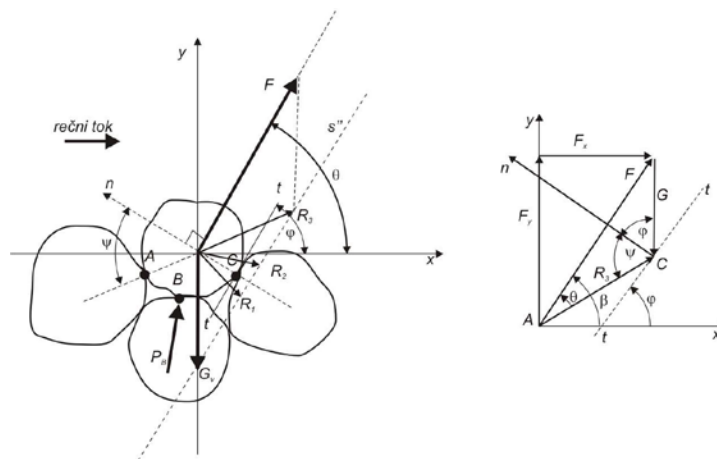
Gibanje posameznega zrna (prodnika) nastane, ko je odpor trenja in teža prodnika zmanjšana za vzgon, manjša od vpliva hitrosti na površino prodnika. Predpostavljeno je ravninsko stanje, kar je približek na dejansko prostorsko stanje. Na prodnik delujejo naslednje osnovne sile:

$F$  ... hidrodinamična sila

$P$  ... sila reakcije dna na prodnik

$T$  ... sila trenja (ponazorjena s kotom trenja  $\psi$ )

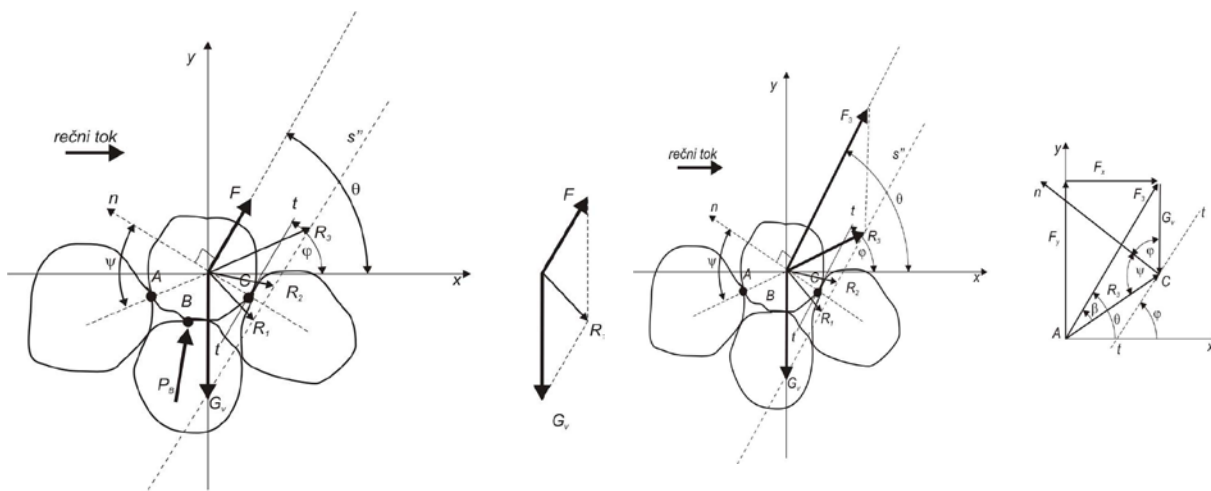
$G_v$  ... teža prodnika v vodi



Slika 2.63: Sile na prodnik oziroma na posamezno zrno (Yalin, 1972)

Picture 2.63: Forces on boulder or on single gravel-stone (Yalin, 1972)

Stabilnost zrna je odvisna od lege rezultante vseh sil delujočih na prodnik. Dodatna poenostavitev je, da vse sile delujejo v eni točki, tako da je vrtilni moment delujočih sil enak nič. V primeru, da leži rezultanta med B in C, je zrno v stabilnem položaju, nanj deluje reakcija tal  $\bar{P}_B$ .



Slika 2.64: Stabilna lega zrna in Labilna lega zrna (Muškatirović, 1976)

Picture 2.64: Stable position of grain and labile position of stone (Muškatirović, 1976)

V primeru, da leži rezultanta  $R_2$  nad točko C, vendar pod smernico rezultante  $R_3$  ni več reakcije tal  $P_B$  v točki B. Prodnik se opira samo na točko C in se nahaja v labilnem položaju. Opazovan prodnik se bo premaknil, ko bo rezultanta  $R_2$  zavzela položaj rezultante  $R_3$ .

Prodnik se bo premaknil v trenutku, ko bo kot med rezultanto in normalo na tangento v točki C izenačen s kotom trenja  $\psi$ . V tem trenutku velja sinusna zveza med dinamično silo ( $F$ ) in težo prodnika ( $G_v$ ):

$$\frac{F}{\sin(\varphi + \psi)} = \frac{G_v}{\sin(\beta)} \quad \frac{F}{G} = \frac{\sin(\varphi + \psi)}{\sin \beta}, \quad (2.145)$$

$$\sin(\beta) = \cos(\theta - (\varphi + \psi)) \quad \beta = \pi/2 - (\varphi + \psi - \theta). \quad (2.146)$$

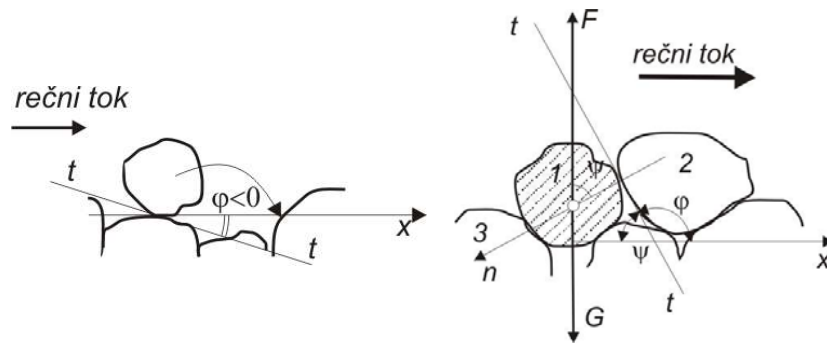
Kot ( $\varphi$ ) je odvisen od geometrijskih karakteristik prodnika in njegovega položaja glede na sosednje prodnike. Kot trenja ( $\psi$ ) je odvisen od pogojev podpiranja prodnika od sosednjih prodnikov. Kot ( $\theta$ ) je odvisen od geometrijske oblike prodnika ter od hitrosti in viskoznosti tekočine.

Pregled mejnih položajev prodnika in pripadajočih pogojev premika dobimo, če opravimo pregled pogojev:

$$\varphi = -\psi$$

$$\frac{F}{G_v} \geq 0$$

Pogoja sta izpolnjena edino pri mirovanju (hitrost je nič). Prodnik je v labilnem stanju in se bo premaknil s ciljem zagotovitve stabilnega stanja. (Yalin, 1972 ).



Slika 2.65: Zrno v labilnem ravnovesju in prodnik št. 2 podpira prodnik št. 1 (Yalin, 1972)

Picture 2.65: Grain in labile balance and boulder Nr. 2 supports boulder Nr. 1 (Yalin, 1972)

Če pogoja veljata v naslednji obliki:

$$\varphi + \psi \approx \pi; \theta \approx \pi/2$$

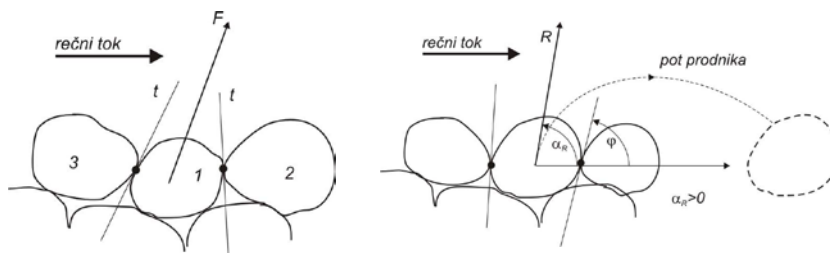
$$\frac{F}{G_v} \Rightarrow \infty$$

se prodnik št. 1 v tem primeru ne more premakniti, dokler se sosednji prodnik št. 2 dolvodno ne premakne.

Če veljata pogoja:

$$\varphi + \psi \approx \pi; \theta = \pi/2,$$

je v tem primeru je opazen vpliv gorvodnega prodnika št. 3 in nizvodnega prodnika št. 2. Vsi prodniki skupaj tvorijo površino dna struge, posamezni prodniki, ki se lahko premaknejo, ne glede na spremembo dna struge, sestavljajo površinski sloj na dnu struge.



Slika 2.66: Površinski sloj prodnikov na dnu struge (Yalin, 1972) in skoki prodnika (Muškatirović, 1976)

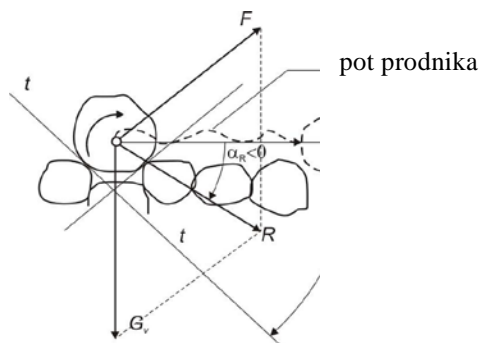
Picture 2.66: Superficial stratum of boulder on riverbed (Yalin, 1972) and boulder jump (Muškatirović, 1976)

Če je možni premik prodnika v odvisnosti od smeri rezultante glede na os  $x$ , prodnik izgubi stik s podlago in se premika v skokih:

$$\alpha_R > 0; \varphi > \pi/2 - \psi.$$

Če prodnik ne izgubi stika s podlago in se premika s kotaljenjem, velja:

$$\alpha_R < 0; \varphi < \pi/2 - \psi$$



Slika 2.67: Kotaljenje prodnika (Muškatirović, 1976)

Picture 2.67: Boulder roll (Muškatirović, 1976)

Kratek prikaz možnih premikov pokaže kompleksnost procesov, ki se še poveča, če na plavine delujejo tudi druge sile (kohezija, vegetacija in podobno).

### 2.10.5 Mehanika gibanja rečnih plavin

Rečno korito, ki je oblikovano v lastnem nanosu materiala (aluvialno), je stalno pod vplivom rečnega toka. Na stiku vode z dnom (brežinami) pretočnega profila se zaradi trenja pojavijo povprečne strižne napetosti ( $\tau_0$ ):



$$\tau_0 = \gamma h J, \quad (2.147)$$

kjer so:

$\gamma$  ... teža vode [ $\text{kN/m}^3$ ],

$h$  ... globina vode [m],

$J$  ... vzdolžni padec (padec energijske črte  $J_E$ ).

Ob pogoju, da je širina struge ( $b$ ) najmanj 30 kratnik globine vode, velja naslednja zveza:

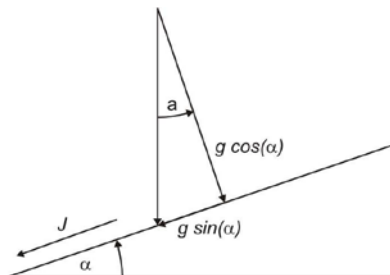
$$R = \frac{F}{O} \approx \frac{hb}{2h+b} \approx h. \quad (2.148)$$

Pričetek gibanja delca je odvisen od velikosti delca in od velikosti strižne napetosti ( $\tau_0$ ) na tem mestu. V primeru, da je strižna napetost ( $\tau_0$ ) večja od strižne kritične vrednosti napetosti (odpora) za delec določene velikosti (mase), pride do premika delcev, iz katerih je oblikovano rečno dno. Tok vode (tekoče agregatno stanje) in gibanje plavin (trdno agregatno stanje) sta medsebojno povezana in se tako tudi morata obravnavati (dvofazno gibanje). Za poenostavljen izračun privzamemo, da je rečni tok enakomeren, ravninski in nespremenljiv (stalen enakomerni tok). Osnovna sila, ki povzroča tok vode v naravi je gravitacija, ki jo razdelimo na dinamično komponento v smeri vodnega toka:

$$g_x = g \sin(\alpha) \approx g \tan(\alpha) \approx g J \quad (2.149)$$

in v statično komponento pravokotno na smer vodnega toka:

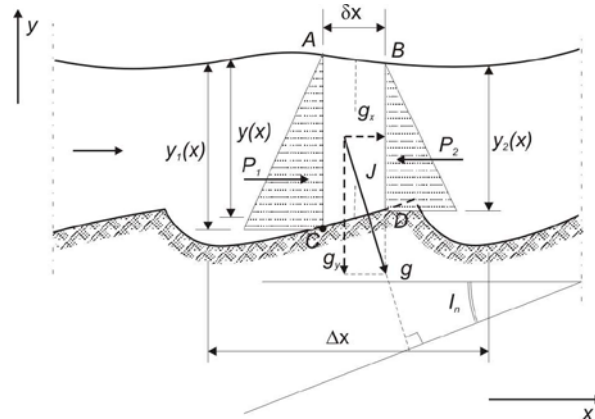
$$g_y = g \cos(\alpha) \approx g. \quad (2.150)$$



Slika 2.68: Komponente težnega pospeška na poševnem terenu  
Picture 2.68: Acceleration of weight components on inclined ground

Elementarna sila ( $dT$ ), ki deluje na obravnavan element tekočine ( na sliki št. 2.69 označen z ABCD), je odvisna od dinamične komponente sile teže v smeri vodnega toka:

$$dT = g_x J_n \rho y(x) dx \approx g J_n \rho y(x) dx .$$



Slika 2.69: Delujoče sile na vodni element (Muškatirović, 1976)

Picture 2.69: Forces acting on water element (Muškatirović, 1976)

Skupna sila v globini  $y(x)$  se dobi s seštevanjem vseh delnih sil:

$$T = g \rho J_n y(x) = \gamma J_n y(x) . \quad (2.151)$$

Komponenta  $g_y$  pogojuje hidrostatični pritisk, ki je sorazmeren globini vode, merjeno od gladine vode:

$$p = g_y \rho \bar{y} \approx g \rho y . \quad (2.152)$$

Diferencialna sila tlaka ( $dP$ ), ki deluje na element (ABCD) se lahko izrazi:

$$dP = -g \rho y(x) \frac{d\varphi}{dx} dx .$$

Razmerje med tlakom in težo delca:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{1}{J} \frac{d y(x)}{d x} \approx \frac{g_y}{g_x} . \quad (2.153)$$

Ko se tok približuje enakomernemu toku, se relativni vpliv dinamične komponente teže ( $g_x$ ) postopoma zgublja in posredno tudi vpliv Froudovega števila (Muškatirović 1976, 160).

### 2.10.6 Gostota rečnih plavin

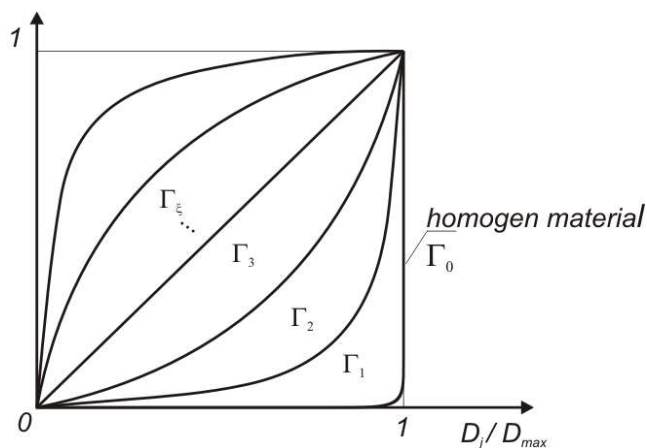
Gostota plavin ( $\rho_s$ ) znaša  $\gamma_s/g$ . V vodi, ob upoštevanju vzgona, je gostota plavin podana z naslednjim izrazom:

$$\gamma_s = g \bar{\rho} = g (\rho_s - \rho_w). \quad (2.154)$$

Absolutna velikost zrna plavin je zrno, ki zadošča naslednji brezdimenzijski enačbi:

$$p = p \left( \frac{d_i}{d_{\max}} \right). \quad (2.155)$$

Osnova brezdimenzijske karakteristike je oblika zrna plavin in oblika brezdimenzijske krivulje granulometrijske sestave.



Graf 2.14: Enotske krivulje granulacijskega sestava (Yalin, 1972)

Diagram 2.14: Unit curve of granular structure (Yalin, 1972)

$p_j$  ... zastopanost vseh delcev, katerih premer je manjši od premera ( $d_i$ )

Hrapavost ( $k_s$ ) se po definiciji hrapavosti zapiše:

$$k_s \approx m d_{\max}, \quad (2.156)$$

kjer je ( $m$ ) funkcija oblike zrna plavin in geometrijskega sestava.

### 2.10.7 Dinamična sila toka

V enakomernem toku realne tekočine v gladkem koritu (hrapavost  $k_s$  je nič) je položaj delca premera ( $d$ ) določen z razdaljo ( $y$ ) merjeno od dna struge. Kinetične lastnosti toka v območju opazovanega delca so nesimetrične. Delujoča dvižna sila ( $F$ ) na delec ni vzporedna z osjo c-c, temveč leži pod kotom odklona ( $\theta$ ) gledano od osi c-c vzporedne z abscisno osjo ( $x$ ). Velikost sile ( $F$ ) je določena z naslednjo enačbo:

$$\frac{F}{\rho d^2 u_x^2} = \Phi_F \left( \frac{\mu d}{\nu}, \frac{y}{d} \right). \quad (2.157)$$

Za posamezne komponente velja:

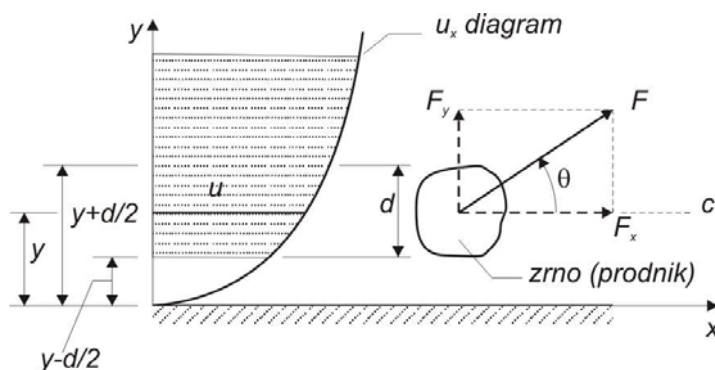
$$\frac{F_x}{\rho d^2 u_x^2} = \Phi_x \left( \frac{\mu d}{\nu}, \frac{y}{d} \right), \quad (2.158)$$

$$\frac{F_y}{\rho d^2 u_x^2} = \Phi_y \left( \frac{\mu d}{\nu}, \frac{y}{d} \right), \quad (2.159)$$

$$\theta = \Phi_\theta \left( \frac{\mu d}{\nu}, \frac{y}{d} \right), \quad (2.160)$$

kjer je:

$u$  ...hitrost v oddaljenosti  $y$  od dna (tipična hitrost).



Slika 2.70: Dinamična dvižna sila toka na prodnik (Muškatirović, 1976)

Picture 2.70: Dynamic lifting forces of flow on boulder (Muškatirović, 1976)

Reynoldsovo število je brezdimenzijsko število, ki izraža razmerje med vztrajnostnimi in

viskozni silami. Laminarni tok je tok, v katerem prevladujejo viskozne sile. V laminarnem toku se delci gibljejo približno po določenih, relativno gladkih trajektorijah. Turbulentni tok v kanalih opazimo pri Reynoldsovih številih večjih od približno 5000, pri toku skozi porozno snov pa pri Reynoldsovih številih večjih od 10 (Mikoš, 2002).

Velikost  $Re_d = \mu d / \nu$  se imenuje Reynoldsovo število zrna (delca) plavin ( $Re_d$ ). Zveza med funkcijami  $\Phi_x$  in  $\Phi_y$  in funkcijama  $\Phi_F$  in  $\Phi_\theta$  se lahko določi:

$$\Phi_x = \Phi_F \cos(\Phi_\theta) \quad \Phi_y = \Phi_F \sin(\Phi_\theta). \quad (2.161)$$

Oblika funkcij je odvisna od oblike delca in njegove orientacije v toku. Delujoča sila ( $F$ ) na delec narašča z večanjem hitrosti. Pri majhnih hitrostih se sila linearno večja, pri večjih hitrostih se večja sorazmerno s kvadratom hitrosti. Velikost komponent delujoče sile ( $F_x, F_y$ ) je odvisna od vrednosti Reynoldsovega števila ( $Re_d$ ), od položaja delca ( $y/d$ ) in velikosti kota odklona ( $\theta$ ). Brezdimenzijska delujoča sila ( $F_x / \rho d^2 u^2$ ) se zmanjšuje za male vrednosti ( $Re_d$ ), ob istočasnem povečevanju dvižne sile ( $F_y / \rho d^2 u^2$ ). Dvižna sila ni odvisna od velikega Reynoldsovega števila ( $Re_d$ ). Kriterij za velika in majhna Reynoldsova števila je približno določen z naslednjimi vrednostmi :

$$\frac{u d}{\nu} < 1.0 \dots \text{majhne vrednosti } (Re_d)$$

$$\frac{u d}{\nu} > 1000 \dots \text{velike vrednosti } (Re_d),$$

kjer uporabljene oznake pomenijo:

$u$  ... hitrost,

$d$  ... premer zrna,

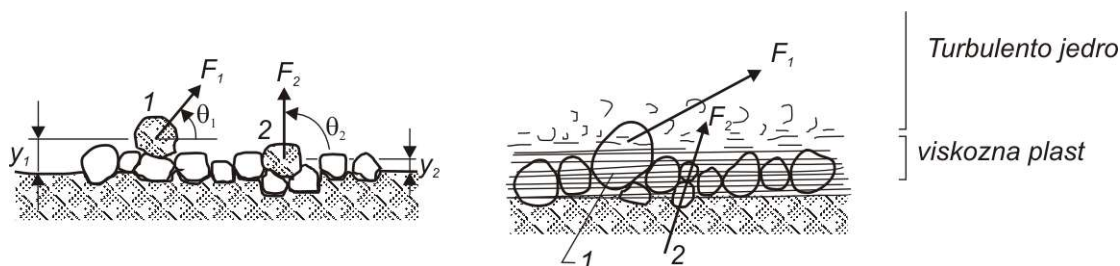
$\nu = \rho / \mu$ , kjer sta:

$\rho$  ... gostota tekočine,

$\mu$  ... viskoznost tekočine.

Relativna lega delca ( $y/d$ ) vpliva na velikost sile ( $F$ ). Pri velikosti ( $y/d$ )  $\approx 1.20$  do  $1.50$  je dvižna komponenta sile enaka nič ( $F_y=0$ ), tako da je vlečna sila ( $F_x$ ) enaka delujoči potisni sili na delec ( $F$ ). Pogoji gibanja je odvisen tudi od medsebojne lege posameznih delcev. Potisna sila deluje v smeri toka in nastane zaradi povečanega pritiska na čelnem delu ter zmanjšanega pritiska na zadnjem delu zrna. Dvižna sila deluje v smeri navzgor. Nastane zaradi povečanega pritiska na dnu (pod zrnem) ter zmanjšanega pritiska na zgornjem delu zrna zaradi zakrivljenosti tokovnic okoli zrna. Zrno je v ravnotežju (stabilno), dokler njegova potopljena teža kljubuje potisni in dvižni sili (Verbovšek, 1984).

Tangencialne sile ( $\tau_o$ ) in dinamična dvižna sila ( $F$ ) predstavljajo dve možnosti pristopa k analizi pričetka gibanja in prenosa plavin. V strugah z gibljivim dnom predstavljajo posamezna zrna ovire za tok (Muškatirović, 1976).



Slika 2.71: Pričetek gibanja posameznega zrna (Yalin, 1972)

Picture 2.71: Commencement of movement of singular grain (Yalin, 1972)

Tangencialne sile ( $\tau_o$ ) in dinamična dvižna sila ( $F$ ) predstavljajo dve možnosti pristopa k analizi pričetka gibanja in prenosa plavin. V strugah z gibljivim dnom predstavljajo posamezna zrna ovire za tok (Muškatirović, 1976).

Enačba (Muškatirović 1976, 322) predstavlja brezdimenzijske količine: vlečne sile (leva stran) in Reynoldsovo število plavin (desna stran). Pričetek gibanja rečnih plavin se prične:

$$\frac{(\tau_o)_{cr}}{(\gamma_s - \gamma_w)d} = f\left(\frac{v_* d}{\gamma_q}\right) = Re_d^*$$

kjer uporabljene oznake pomenijo:

$Re_d^*$ ... Schieldsovo število,

$(\tau_0)_{cr}$  ... kritična tangencialna napetost v dnu struge,

$\gamma_s$  ... specifična teža nanosa,

$\gamma_w$  ... specifična teža vode,

$d$  ... premer zrna nanosa.

Na ta način lahko s pomočjo navedenega kriterija lokalne erozije preverimo pričetek gibanja plavin.

### 2.10.8 Stabilizacija dna

Poglabljanje dna struge in poškodbe zaradi bočne erozije se mora preprečiti, da sicer nevarno plazovito pobočje dobi varno podporo v peti nasipa. Nizke prečne pregrade v strugi (pragovi) zmanjšujejo vzdolžni padec in posredno vlečne sile. Plavine se odlagajo med prečnimi pragovi, dno struge se okrepi, pete bočnih brežin se utrjujejo. Nagib brežin se zmanjša in preide v stabilni naklon. Vzdolžni padec med pragovi se določi po enačbi Meyer-Peter:

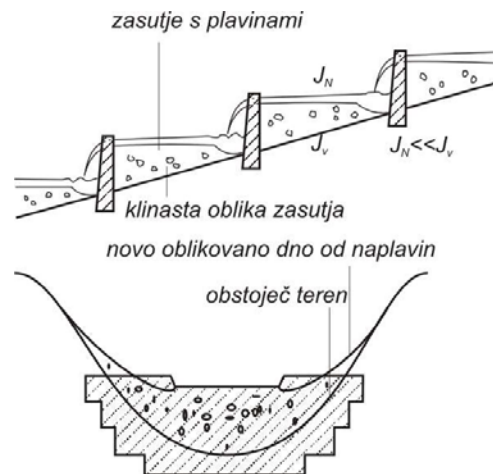
$$J_n \approx \frac{0.4 d_{90}^{9/7}}{q_{\max}^{6/7}},$$

kjer je:

$d_{90}$  ... velikost 90% zrn [m],

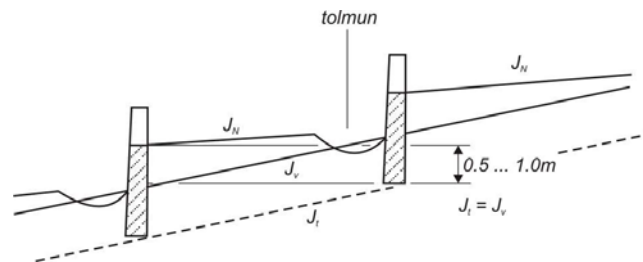
$q_{\max}$  ... največji specifični odtok v strugi pri širini 1m' [(m<sup>3</sup>/s)m] (Vischer, 2002).

Ob istočasni gradnji prečnih pregrad (pragov), se mora pregrade temeljiti v raščen teren. Razmak med pregradami se izbere tako, da spodnja pregrada prekriva zgornjo za 0.5 m do 1.0 m. Gradnja pregrad, ki se bo izvajala v daljšem časovnem obdobju, se mora pričeti z gradnjo spodnje pregrade. Po zapolnitvi prostora za pregrado z nanosom, se zgradi višje nova pregrada. Po zapolnitvi prostora in vzpostavitvi vzdolžnega padca  $J_n$  in tvorbi tolmuna za pregrado se nadaljuje stopničenje. Temeljenje pregrade poteka v novo oblikovanem (nasutem) deponiranem terenu.



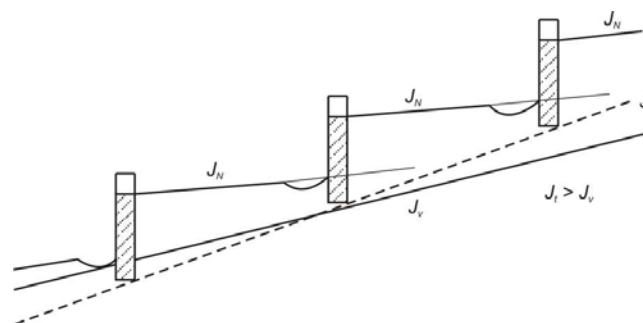
Slika 2.72: Zasutje prostora za pregradami s plavinami

Picture 2.72: Covering the place behind barriers with debris



Slika 2.73: Istočasna gradnja pragov (globina temeljev sledi terenu)

Picture 2.73: Simultaneous construction of crests (depth of foundations follows ground)



Slika 2.74: Gradnja pragov v daljšem časovnem obdobju (temeljenje v novo oblikovanem terenu)

Picture 2.74: Construction of crests in long-term period (foundation-making in newly created ground)

Oblika pregrade je odvisna od oblike terena na mestu gradnje. Srednja prelivna širina naj ne bi bila večja od polovice prvotne širine struge. Ob večji širini struge se mora dodatno utrditi



brežine podslapja. Preliv mora prevajati s projektom predvideno pretočno količino vode, običajno  $Q_{100}$ . Gladina prelivne vode naj bi bila na  $2/3$  višine pretočnega profila. Nikakor prelivna voda ne sme prelitati krilnih zidov ali celo obliti brežino ob zaključku krila.

### 2.10.9 Utrditve in zaščite brežin

Dno struge se utrdi z namenom, da ga obremenitve ob visoki vodi čimmanj preoblikujejo. Tako večino časa utrditev miruje, le v ekstremnih primerih je za kratek čas pod projektno obremenitvijo. Za utrditve se uporablja obstojno kamenje večjih dimenzij, betonski bloki ali kamenje v betonu. Pri regulaciji strug se zaščiti in utrdi struga z gradbenimi deli na zaščiti brežin in dna struge, prečnimi in vzdolžnimi zgradbami za usmerjanje toka, prečnimi pregradami in pragovi ter prekopi. Pri hudourniških strugah se uporablja zaščita iz masivnih materialov kamenja in betona. Glede na velikost vlečne sile so v uporabi različne utrditve iz zloženega ali nametanega kamenja z dodatno utrditvijo pete v funkciji temelja zaščite. Vlečne sile se določi za  $1m^2$  ploskve kot dinamične komponente teže vode globine  $h$  nad ploskvijo površine  $1m^2$  (Schoklitsch, 1930).

Teža vode za površino  $1 m^2$  je:  $G = \gamma_w V = \gamma_w h \quad [kN/m^2]$

Dinamična komponenta sile teže vode za površino  $1m^2$ :  $S = G \sin \alpha \approx G \tan \alpha \approx \gamma h J$   $[kN/m^2]$ , tako je vlečna sila (napetost) utrditve dna:

$$s = \frac{S}{1.00 \cdot 1.00} \approx S \quad [kN/m^2] \quad (2.162)$$

Vrednosti po Schoklitschu so podane v enotah  $kg/m^2$ , kar se je spremenilo v  $kp/m^2$  (vlečna sila v  $kp$  na  $m^2$ ), danes pa so dovoljene enote  $daN/m^2$  (deka Newton na  $m^2$ ).

Tabela 2.18: Odpornostna vlečna sila za določene utrditve (Schoklitsch, 1930)

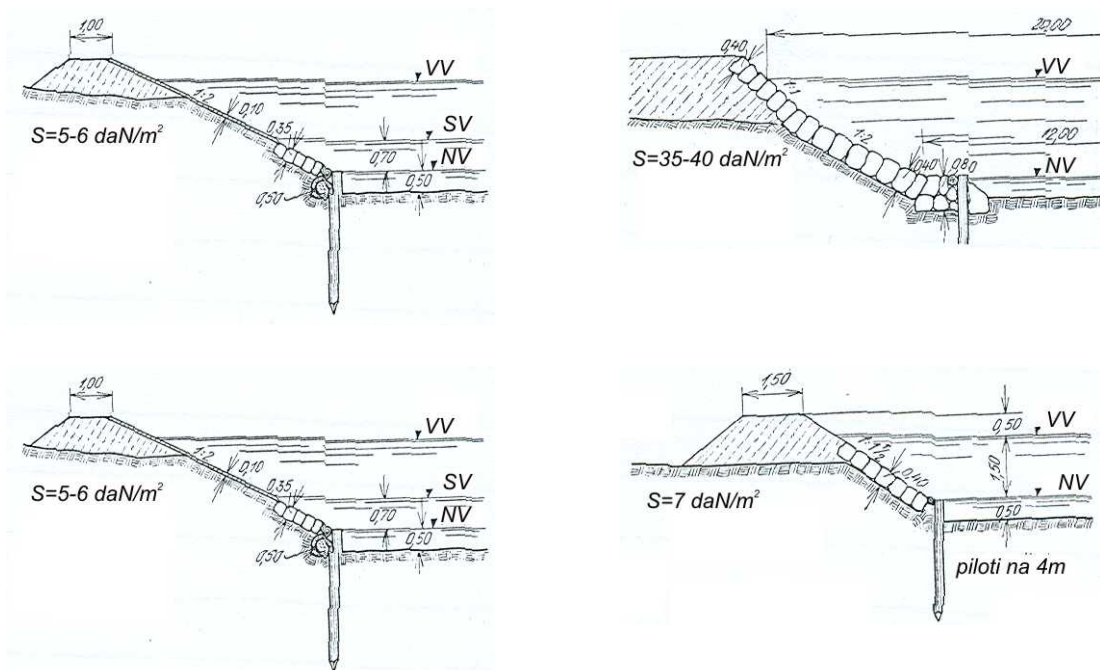
Table 2.18: Resistive pulling force for particular consolidations (Schoklitsch, 1930)

vrsta utrditve	vlečna sila [ $kg/m^2$ ]	preračun na današnje (SI) enote $daN/m^2$
grob pesek	1.0	1.0

---

gramoz	1.5	1.5
ruša pri kratkotrajni obremenitvi	2.0	2.0
kamnita obloga nagiba 1:1 debeline 0.3 m	16.0	16.0
kamnita obloga	17.0	17.0
kamenomet iz velikih blokov	24.0	24.0
suho zloženi zid na leseni podlagi	60.0	60.0
kamnite zložbe	do 150	do 150

Na sliki št. 2.75 so prikazani štirje primeri utrditve, ostali primeri iz prakse so podani v prilogi št. 23.



Slika 2.75: Zaščita brežin s kamnitimi zložbami in kamenometi (Schoklitsch II, 1930)

Picture 2.75: Protection of slopes with stone compounds (Schoklitsch II, 1930)

#### 2.10.10 Dopustne hitrosti

Za pravilno odločitev o obliki in utrditvi regulacijske struge je treba poznati velikost pretoka ( $Q$ ), vzdolžni padec ( $J$ ) in, iz predvidene oblike struge, srednjo hitrost. Pretočni profil struge se izbere tako, da največja hitrost ne prekorači dopustne hitrosti za material predviden za utrditev struge. Istočasno morajo biti hitrosti vode s plavinami tako velike, da ne prihaja do odlaganja plavin.

Tabela 2.19: Mejne hitrosti v naravnih koritih po Tiefenbacherju (Gavrilović, 1972)

Table 2.19: Speed limits in natural water channels after Tiefenbacher (Gavrilović, 1972)

vrsta materiala, iz katerega je sestavljeno naravno korito hudournika	mejne hitrosti [m/s]		
	$v_{\max}$	$v_{\text{sred}}$	$v_{\min}$
drobna glina, lončarska zemlja	0.19	0.15	0.08
droben pesek	0.25	0.20	0.13
običajna zemeljska korita	1.52	1.20	0.76
drobno kamenje	2.03	1.60	1.02
peščena korita s slojevitimi stenami	3.50	2.75	1.75
korita iz čvrstih, eruptivnih sten	5.35	4.20	2.67

Podobne rezultate raziskav ima tudi Telford, ki navaja, da se erozija oziroma transport navedenih materialov prične, ko se navedene hitrosti povečajo za približno 20%. Glede na poskuse, ki jih je izvršil Bazin (Gavrilović, 1972) so maksimalna, povprečna in minimalna hitrost v naslednjih razmerjih:

$$v_{\min} = 0.5 v_{\max} = 0.625 v_{\text{sred}} \quad (2.163)$$

oziroma:

$$v_{\text{sred}} = 0.785 v_{\max} \quad (2.164)$$

ali

$$v_{\max} = 1.25 v_{\text{sred}} \quad (2.165)$$

Dopustne povprečne vrednosti hitrosti naravnih korit ob pogoju, da jih voda vidneje ne erodira so dane v tabelah v nadaljevanju.

Tabela 2.20: Dopustne hitrosti v naravnih koritih (Gavrilović, 1972)

Table 2.20: Permissible speeds in natural water channels (Gavrilović, 1972)

<b>vrsta materiala, ki gradi korito</b>	<b><math>v_{sred}</math> [m/s]</b>
droben pesek	0.15
debel pesek	0.40 – 0.50
običajna zemlja	0.25 – 0.80
droben gramoz	1.50 – 1.70
debel gramoz	1.70 – 2.00
korita v konglomeratih ali brečah	2.00 – 2.50
korita iz suho zloženih zidov	2.30 – 2.60
zidovi v cementni malti iz kamenja ali betona	2.50 – 3.50
srednje čvrst material	2.60 – 3.50
gladki kamniti bloki v cementni malti	3.50 – 4.00

Tabela 2.21: Dovoljene hitrost za regulacije hudourniških strug v Srbiji (Gavrilović, 1972)

Table 2.21: Permissible speeds for torrent channels in Serbia (Gavrilović, 1972)

<b>material, ki sestavlja hudourniško korito</b>	<b><math>v_{sred}</math> [m/s]</b>
hudourniški nanos, običajna zemlja	2.00
konsolidiran hudourniški nanos ojačan s prečnimi zgradbami	4.00
korita iz suho zloženega kamenja	4.50
korita iz kamenja v cementni malti	5.50
betonska korita C-16/20	6.00

Enačbo pričetka gibanja nanosa plavin (Nešič, 1966) premera ( $d$ ) v odvisnosti globine vode ( $h$ ) in vzdolžnega padca ( $J$ ), pri čemer velja  $d = 8hJ$ , lahko dobimo iz naslednjih enačb:

hitrost pričetka gibanja za prodnik:

$$v = 4.53\sqrt{d}, \quad (2.166)$$

hitrost pričetka gibanja za oglat kamen:

$$v = 3.23\sqrt{d}, \quad (2.167)$$

hitrost odvisna od premera prodnika (Nešič, 1966):

$$v = \sqrt{25d}. \quad (2.168)$$

Določitev potrebnega premera prodnika v kamenometu, ki temelji na odvisnosti med hitrostjo in premerom kamnja, je raziskal ISBASH. Potrební premer kamna ( $d_s$ ) v tem primeru je:

$$d_s = \frac{v^2}{2C^2 g \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}, \quad (2.169)$$

kjer so:

$v$  ... hitrost [m/s],

$C$  ... faktor [brez enote]:

$C = 0.86$  za gladke kamnite struge, velika turbulenca (tolmuni, drče),

$C = 1.20$  za kamenomete, različne brežine, majhna turbulenca, majhni padci,

$\rho_s$  ... specifična gostota materiala [ $\text{kg/m}^3$ ],

$\rho_w$  ... specifična gostota vode [ $\text{kg/m}^3$ ].

Za tlakovanje s približno okroglim kamenjem velja (Heinemann, 2003) za debelino sloja ( $s$ ) naslednja enačba (ISBASH):

$$d_{50} \geq d_s,$$

$$1.26 d_{50} \leq d_{100} \leq 1.7 d_{50},$$

$$d_{100}/2.5 \leq d_{15} \leq d_{50},$$

$$s \geq 2 d_{50} \text{ in } s \geq 1.5 d_{100}.$$

### **2.11 SWOT analiza**

Ime je sestavljeno iz začetnic besed Strengths, Weaknesses, Opportunities in Threats (Antončič, 2002) kar v Slovenščini pomeni prednosti, pomanjkljivosti (slabosti), priložnosti in tveganja (nevarnosti). Z analizo SWOT želimo celovito oceniti prednosti in pomanjkljivosti, priložnosti in tveganja za tu obravnavane gradbene posege v strugo. Bistvo takšne celovite ocene sta analiza in vrednotenje preteklih, sedanjih in prihodnjih ukrepov. Prijemi ocenjevanja so različni, lahko so usmerjeni na celoto ali pa na posamezne dele (Možina, 2002). Pri celovitem ocenjevanju prečnih in vzdolžnih zgradb se poskuša ugotoviti, kje ima posamezna zgradba prednosti pred drugo zgradbo in kje so njene glavne slabosti. Rezultati analize SWOT so temelj za izbiro ustrezne oblike konstrukcije. SWOT matrika ponuja štiri možnosti rešitev in sicer strategijo izkoristka prednosti in priložnosti, strategijo izkoristka prednosti in izogibanja nevarnostim, strategijo izkoristka priložnosti za premostitev slabosti ter strategijo zmanjševanja slabosti in izogibanju nevarnostim.

### **2.12 Objekt, gradnja, služnost in stavbna pravica**

Pojem gradnje nima enotne definicije, saj gre za skupni pojem, ki zajema izvedbo gradbenih in drugih del, gradnjo novega objekta in nadomestno gradnjo ali odstranitev objekta (ZGO-1B, 2007. člen 2). Pojem objekt je skupni pojem, ki vsebuje tipe objektov državnega pomena, objekte gospodarske javne infrastrukture, zahtevne, manj zahtevne, enostavne, pomožne, začasne in vadbene objekte.

Po Zakonu o graditvi objektov se za dokazilo o pravici graditi šteje izpisek iz zemljiške knjige, iz katere izhaja, da ima investitor na določeni nepremičnini lastninsko ali kakšno drugo stvarno ali obligacijsko pravico, ki mu omogoča gradnjo oziroma izvajanje del na takšni nepremičnini; notarsko overjena pogodba z dokazilom o vložitvi predloga za vpis pogodbe o pridobitvi lastninske ali kakšne druge stvarne ali obligacijske pravice na določeni nepremičnini v zemljiško knjigo ali drugo listino, ki v skladu z zakonom izkazuje pravico graditi oziroma izvajati dela na določeni nepremičnini. Gradnja na vodnih zemljiščih, če so v javni lasti, je možna na podlagi tako imenovanega dokazila o pravici graditi (ZGO-1B, 2007. člen 56). Težave pa nastopijo, ker so v Sloveniji lastniki vodnih zemljišč tudi občine ali osebe zasebnega prava (pravne ali fizične osebe). Upravni postopki, s katerimi država kot lastnik vodnih zemljišč dovoljuje posege na vodna zemljišča, sta vodno soglasje in vodno dovoljenje. O pridobivanju, razpolaganju in upravljanju s stvarnim premoženjem države in občin je bila sprejeta uredba vlade (Uredba o pridobivanju, razpolaganju in upravljanju s stvarnim premoženjem občin, 2003). Zaradi odvajanja voda z zemljišča ali dovajanja voda na zemljišče se sme v korist tega zemljišča ustanoviti služnostna pravica odvajanja ali dovajanja vode čez sosednja zemljišča (ZV-1, 2002). Služnost se mora najprej natančno določiti v čim manjšem obsegu racionalno in gospodarno. Služnost ustanovljena na nepremičnini države je odplačna, razen če ni z zakonom ali predpisom drugače določeno. Zakon o vodah določa v 8. odstavku 21. člena, da vodno zemljišče v lasti države ni v pravnem prometu, torej ni možno ustanavljati razpolagalne stvarne pravice - služnosti. V slovenski pravni red je bila z izdajo novega stvarno pravnega zakonika (SPZ, 2002) vnesena stvarna stavbna pravica (superficies), ki daje upravičencu pravico imeti v lasti zgrajeno zgradbo nad ali pod tujo nepremičnino, pri čemer je zgradba kakršen koli zgrajen objekt v širšem smislu. Stavbna pravica, kot posebna pravica uporabe, se lahko ustanovi, če se s tem ne posega v splošno rabo javnega dobra (SPZ, 2002 člen 265). V primeru gradnje na vodnih zemljiščih kot javnem dobrem ne gre za pogodbeno ustanovljeno pravico uporabe, ampak gre dejansko za pravni okvir ustanovitve posebne pravice uporabe. V zemljiški knjigi (ZZK-1, 2003) je določeno, da se vanjo vpisujejo določene obligacijske pravice, še posebej to velja za posebno pravico uporabe javnega dobra (ZZK-1, 2003. člen 13). Ustava RS v 70. členu določa, da se na javnem dobrem lahko pridobi posebna pravica uporabe pod pogoji, ki jih določa zakon. Kadar je javno dobro v državni lasti, je na njem mogoče pridobiti le



posebno pravico uporabe.

### **3 VZDOLŽNE IN PREČNE CESTNE ZGRADBE OB VODOTOKU**

Prometnice morajo biti stalno prevozne, zato so sanacije in rekonstrukcije njihova stalnica. Za nadaljnjo obdelavo, predvsem prednosti in slabosti posameznih rešitev, sta izbrana dva primera. Prvi primer je vzdolžni podporni zid ceste ob strugi potoka brez poseganja v samo strugo, drugi primer pa ureditev struge v območju premostitve s prečnimi pragovi, ki zagotavlja stabilnost cestnega telesa ob vodotoku. Za prvi primer ni bila predvidena izdelava lokacijske dokumentacije in pridobivanje lokacijskega dovoljenja. Projektna dokumentacija je bila izdelana na nivoju projekta za gradbeno dovoljenje in izvedbo sestavljena iz splošnega dela (podatki o naročniku in projektantu, vsebini projekta, projektna naloga, izjave, mnenja, soglasja, geološko-geotehnično poročilo, hidravlične smernice in revizija projekta) in tehničnega dela, sestavljenega iz tekstualnega dela (tehnično poročilo, statični račun, predračun) in grafičnega dela (pregledne, katastrske in komunalne situacije, prečni, vzdolžni in karakteristični profili, detajli posameznih konstrukcij).

#### **3.1 Vzdolžne konstrukcije**

Državna cesta R3 – 633, odsek 1099 Bitnje - Jereka (Uredba o kategorizaciji državnih cest, 1998) predstavlja prometno povezavo v smeri Bohinjska Bistrica – Jereka – Pokljuka - Mrzli studenec, oziroma Srednja vas - Bohinjsko Jezero (Priloga 1). Trasa se od odcepa ceste Bled – Bohinj v naselju Bitnje strmo vzpenja po pobočju, začetek obravnavanega odseka pa se nahaja na območju, kjer se niveleta na krajšem odseku 200 m nekoliko prevesi, nadaljevanje obravnavanega odseka pa ponovno poteka v nagibu do 12 % v smeri Jereke.

##### **3.1.1 Opis obstoječega stanja**

Na obravnavanem odseku trasa poteka v ozki soteski hudourniškega potoka Jereka. Na začetnem delu je struga Jereke precej pod niveleto ceste, ki jo od struge loči strmo, z gozdom poraščeno pobočje, levo pa se nad cesto dviguje strm kamniti masiv Šavnice. V

stacionaži 0,824 km (profil št. 3) je v strugi Jereke kamniti prag, gorvodno nad njim pa je med cesto in strugo potoka zgrajen podporni zid. Deloma je bil obnovljen leta 2002 dolžine cca 30,0 m v okviru sanacije udara, v nadaljevanju pa je stabilnostno še dokaj v solidnem stanju. V konstruktivnem smislu je obstoječi zid izdelan deloma iz betona, deloma iz kamna, mestoma poraščen z rastlinjem in v temeljih pretežno erozijsko poškodovan. Struga Jereke poteka neposredno pod podpornim zidom do stacionaže 0,904 km, v nadaljevanju pa se struga pomakne nekoliko v desno, med cesto in nižjim podpornim zidom pa se pojavi brežina. Na desni strani se podporni zid zaključi v stacionaži 0,944 km ob strugi Jereke, ki je na tem delu precej odmaknjena od ceste, vmes pa se razteza z grmičevjem poraslo pobočje. Potok Jereka se ponovno približa v stacionaži 1,084 km neposredno cesti, struga in cesta sta ločeni s kamnitim podpornim zidom, ki se mestoma konča na skalnih balvanih, na zaključnem delu pa je izveden betonski podporni zid. Na celotnem odseku podpornega zidu je zgrajena nizka prekinjena betonska ograja. Višinska razlika med niveleto potoka in ceste na tem delu le 2.00 m do 3.00 m, pretočno sposobnost struge pa dodatno ovirajo skalni balvani v strugi.



Slika 3.1 Skalni blok v strugi Jereke

Picture 3.1: Rock block in Jereka channel

V stacionaži 1,084 km je tesen hudourniškega potoka najožja, saj znaša skupna širina za

cesto in strugo le cca 10,0 m. V nadaljevanju, do konca obravnavanega odseka, se dolina Jereke, ledinsko imenovana Korita, postopoma razširi, struga potoka se začasno oddalji od ceste desno, strmina pobočja na levi strani ceste pa se ublaži in na zaključnem delu preide v manjši dokaj položen travnik s stanovanjsko hišo. Zaradi reliefnih pogojev je cesta na celotnem odseku ozka, lokalno je širina dodatno omejena zaradi skalnih previsov nad cesto. Podporni zid v začetnem delu je bil leta 2002 saniran, preostale podporne in oporne konstrukcije na obravnavanem odseku pa so potrebne temeljite obnove, zaradi neustrezne lege jih bo potrebno del porušiti in izdelati nove.

Potok poteka v ozki Alpski dolini, ki je v osnovi zgrajena iz karbonskih skladov apnencev in dolomitov. Hribinska podlaga je pretežno kompaktna, delno razpokana, slabo do močno pretrta in na površini preperela, pokrita s sedimenti ledeniških naplavin. Zanje je značilna sestava iz pobočnih gruščov karbonatnih kamenin, apnenca in dolomita z glino in meljem ter samicami premera do 70 cm. Skupna debelina sedimentov gruščev presega 20 m. Klasifikacija zemlji po AC (Artur Casagrande) je GF<sub>s</sub> do GF<sub>c</sub> s samicami (Šuklje, 1967).

Klimatske in hidrološke razmere na obravnavanem odseku so alpske, količina padavin je velika, možne so velike koncentracije odtoka, v zimskem času so temperaturne razmere izrazito neugodne. Glede na hudourniški značaj potoka Jereka je moč pričakovati nenadna povečanja pretokov vode v strugi.

Horizont podtalne vode ima prosto gladino in se nahaja v vrhnjem gruščnatem sloju. Gladina podtalne vode se nahaja na povprečni globini 6,20 m pod površjem bregov oziroma v nivoju korita, katero uravnava predvsem gladina vodotoka. Glede na granulometrijski sestav je srednja vrednost koeficienta prepustnosti pobočnih gruščov  $0.5^{-3}$  m/s.

Pred pričetkom projektiranja rekonstrukcije ceste R3-633/1099 so bile pridobljene projektne osnove za obnovo, ki obsegajo: projektno nalogo, geodetski posnetek obstoječega stanja, geotehnično poročilo o rezultatih raziskav in pogojih rekonstrukcije ceste, hidravlične smernice in poročilo o stanju objektov (podpornih zidov, opornih zidov in prepusta).

### 3.1.2 Geologija in geomehanika

Geološko področje spada k tektonski enoti Južne Alpe, ki jo sestavljajo karbonatne kamnine. To so masivni apnenci srednje jurske starosti (Jura 135-180 milij. let) Področje je preprejeno s prelomi. Najbolj številni so prelomi v dinarski smeri (SZ-JV), ki so nastali v pliocenu (Terciar 1-70 milj. let). Prečno na njih so še pogosti prelomi v smeri SV-JZ iz istega obdobja, medtem, ko so prelomi alpske smeri (V-Z) nastali v triasu (Trias 180-230 milij. let). Važnejša preloma dinarske smeri, med katerima poteka obravnavana cesta, sta Jereški in Studorski prelom. Po dolini potoka Jereka gre glavni prelom v smeri SV-JZ, na tem odseku je še več lokalnih prelomov. Ob prelomih je hribina razpokana in poškodovana ter podvržena preperevanju tako da so predvsem v dnu pobočij pogosti pokrovi deluvialnega pobočnega grušča. Ob potoku Jereka so mestoma odloženi aluvialni sedimenti.

Področje grade srednje jurski sedimenti. To so plastoviti in masivni mikritni in oolitni apnenci, srednje do debelo plastoviti in masivni, svetlo sive do sive barve. So zelo trdni, mestoma (predvsem ob prelomih) pa razpokani. Na jurskih sedimentih dobimo različno obsežne in različno debele pokrove deluvialne preperine - pobočnega grušča. To so zaglinjeni do zameljeni grušči sive, rjavo sive in rjave barve, odloženi v srednje gostem do zelo gostem stanju. Mestoma so vmes vložki gline. Predvsem ob prelomih pa so v grušču samice in večji bloki apnenca. Ob potoku Jereka je odložen aluvialni nanos, ki ga sestavlja zameljen do zaglinjen prod s peskom, gruščem, samicami in vložki gline. Nanos je odložen v rahlem do srednje gostem, redko v zelo gostem stanju, svetlo sive, sive do svetlo rjave barve. Prevladujeta zameljen in peščen prod in grušč, mestoma jezerska kreda, samice in organski ostanki. Nasip je rjave, sivo rjave in sive barve. Srednje jurski apnenci, ki grade dolino, po kateri poteka obravnavani odsek ceste, so izredno trdni, masivni do debelo plastoviti. V geološki preteklosti je bilo prav na tem področju izredno aktivno tektonsko delovanje. Ob številnih prelomih je hribina močno razpokana. Pogosti so odseki, ko so se ob prelomih odkrušili veliki bloki apnenca in se sprijeli s pobočnim gruščem. To so pogojno stabilni odseki pobočja. Zaradi tektonike se smeri vpada jurskih plasti lokalno spreminjajo, generalno pa vpadajo na desnem bregu Jereke proti zahodu, na levem bregu pa bolj proti vzhodu. Pobočni grušči so dobro prepustni, hribina (apnenec) pa je razpoklinsko prepustna.

### 3.1.3 Objekti

Na območju obdelave je predvidena izvedba dveh podpornih zidov in opornega zidu ter podaljšanje obokanega prepusta. Skupna dolžina podpornega zidu 1 od profila št. 4 do profila št. 12a znaša 145 m, Na pretežnem delu gre za obnovo obstoječega podpornega zidu, popolnoma nov zid se izvede le na dolžini 40 m. Obstoječi zid se sanira z izvedbo nove armiranobetonske obloge dodatno sidrane s trajnimi geološkimi sidri. Dograjena betonska obloga se izvede v naklonu čelne stene 10:1 in temelji na globini 1,50 m pod dnom struge. Zgornji del zidu v višini cca 1,50 m od krone se ponovno zgradi v celotni dolžini. Za odvajanje zaledne vode je predvidena izvedba izcednic podaljšanih skozi obstoječi zid. Dolžina dela podpornega zidu od kampade št.12 do št.19 znaša 40 m. Oblikovno je podporni zid izveden kot težnostni betonski zid. Temeljenje je plitvo v prodno gruščnati podlagi, čelni vidni del zidu pa se izvede iz kvalitetnega lomljenca ob hkratnem betoniranju zalednega betonskega dela.

Dolžina celotnega zidu 2 od profila št. 17 do profila št. 22 znaša 107 m. Glede na stanje konstrukcije je podporni zid razdeljen na štiri dele: prvi del zidu predstavlja kamniti podporni zid, izdelan iz deloma obdelanih kamnov, spodnji del pa iz večjih kamnov nepravilnih oblik položenih v beton z ustrezno zapolnjenimi stiki (zid je bil pred kratkim obnovljen v spodnjem delu, na zgornjem delu pa lokalno odstopa vezivo v fugah); drugi del je na celotni višini izdelan iz neobdelanih kamnov, stiki med njimi pa niso zapolnjeni z vezivom, lokalno so spodjedeni; tretji del zidu je betonski, na površini so vidne močne erozijske poškodbe; zid nima ustreznega temelja in je na več mestih spodjedeni; zadnji del podpornega zidu (kampade št. 17 do št. 21) je betonski in je bil obnovljen, na novo je izvedena tudi peta temelja. Sanacija podpornega zidu se izvede skladno z obstoječim stanjem oziroma stopnjo poškodovanosti. Betonska varnostna ograja je izbrana zaradi ustrezne zaščite prometa, na drugi strani pa izbrana oblika ograje zagotavlja zaščito pred visoko vodo v potoku, ki na tem mestu ogroža cesto s preplavljanjem.

Kot sanacija prvega dela podpornega zidu (kampade št.1 do št. 5) se izvede nova krona z betonsko varnostno ograjo, spodnji del pa se na delu, kjer so prisotne poškodbe finega materiala, ustrezno obnovi; na drugem delu zidu (kampade št. 6 do št. 10) je predvidena sanacija erozijskih poškodb z dograditvijo ustreznih kamnitih elementov v betonu (skladno

z že izvedeno sanacijo prvega dela zidu) in izvedbo nove krone z betonsko varnostno ograjo; na tretjem delu (kampade št. 11 do št. 16) se izvede nova AB obloga z novo peto temelja, ki se podaljša proti strugi; obloga se sidra v obstoječo konstrukcijo, v kroni pa se izvede podaljšek v konzolo, kot na ostalem delu zidu, na njej pa se postavi betonska varovalna ograja in na četrtem delu podpornega zidu (kampade št.17 do št. 21) se postavi nova krona z betonsko varovalno ograjo na obstoječem betonskem zidu. Zaradi konfiguracije terena, po katerem poteka cesta, je izvedba brežin omejena na nekaj krajših odsekov. Brežine se uredijo v nagibu 1 : 1,5, oziroma nad opornimi zidovi v nagibu obstoječega terena. Deli nasipnih brežin se zgradijo kot rolirane brežine. Tako je predvidena izvedba rolirane brežine pod novim podpornim zidom med profilom št. 7 in profilom št. 9, ter v nadaljevanju od zaključka podpornega zidu 1 do profila št. 14 + 14,0 m. Posebni hortikulturni ukrepi niso predvideni. Po postavitvi ustreznih podpornih in opornih objektov ter ostalih posegih v brežine se izvede ustrezna rekultivacija prizadetih površin v smislu humuziranja in zatratitve. Vsi posegi v strugi morajo biti po končanih delih ustrezno sanirani, eventualno odlaganje gradbenih odpadkov v strugo ni dovoljeno. Predvidene rolirane brežine naj se izvedejo iz izkopanega materiala.

Za realizacijo predvidenega obsega del bo potrebno izkopati cca 3700 m<sup>3</sup> materiala III - IV. kategorije, ki ga bo potrebno odpeljati in trajno deponirati. Poleg tega bo na trasi ceste tudi cca 1500 m<sup>3</sup> izkopa V. kategorije, ki se lahko porabi za izvedbo roliranih brežin (800 m<sup>2</sup>), podpornih in opornih zidov, ob ustreznem drobljenju pa tudi za izvedbo kvalitetnih zasipov za podpornimi in opornimi zidovi, ki jih je na trasi 264 m<sup>3</sup>. Poleg omenjenih zasipov z zahtevo po 92 % – 98 % zbitosti bo potreben tudi zasip cca 640 m<sup>3</sup> materiala z zahtevano zbitostjo 92 % po standardnem Proctorjevem postopku. Zasipi za podpornimi in pred opornimi zidovi se izvajajo v plasteh do 0,30 m do stopnje zbitosti 92% - 98% po standardnem Proctorjevem postopku. Zasipi pred podpornimi zidovi in za opornimi zidovi pa na isti način do 92 % zbitosti.

### **3.1.4 Hidravlične smernice**

Predvidena je rekonstrukcija 462 m dolgega odseka državne ceste R3 - 633/1099 skozi najožji del soteske imenovane Korita, kjer struga potoka Jereka poteka vzporedno s cesto. Problematična sta le dva odseka, kjer se cesta nahaja tik ob strugi in je podprta z zidovi.

Vmesni odsek je neproblematičen, saj je struga širša in nekoliko bolj oddaljena od ceste, ta pa je podprta s solidnimi betonskimi zidovi. Odsek med profili št. 1 in št. 7 je problematičen predvsem zaradi utesnenosti in globoke struge, prevodnost pretočnih profilov pa je dovolj velika. Cesta je podprta z obrežnimi novejšimi zidovi, ki so deloma najnovejši iz betona, deloma pa zelo stari zloženi iz kamna v suho. Struga se nahaja globoko pod cesto. V profilu št. 3 je zgrajena ustalitvena pregrada s stopnjo višine 4,50 m. Podslapje pregrade je naravno, vendar sledov poglobljanja in erodiranja ni, saj je dolvodno v strugi več naravnih skalnih balvanov, ki stabilizirajo rečno dno, med njimi pa so tolmeni.

Najožji del odseka je med profilom št. 17 do profila št. 22. V strugi nekaj metrov pod profilom št. 18 se nahaja velik skalni balvan (raščena skala), ki močno zmanjša pretočni profil in s tem pretočno sposobnost struge. V primeru visoke vode s plavajočimi predmeti (predvsem les), lahko na tem mestu pride do zagozdenja oz. zaježitve struge in posledično preplavitve cestišča. Prevodnost struge za pričakovane visoke vode je premajhna. Poplavljanje cestišča je pogosto. Prevodnost struge na obravnavanem odseku je zaradi zgoraj opisane skale ter veliko grobih plavin na dnu struge dokaj majhna - ob predpostavki zelo velike hrapavosti dna znaša prevodnost obstoječe struge  $Q = 21,50 \text{ m}^3/\text{s}$ , kar je približno  $Q_{10}$ . Pri tem ni upoštevana morebitna zaježitev struge zaradi zagozdenja plavajočega lesa, s čimer bi se razmere še občutno poslabšale.

V vodnogospodarskih pogojih je Jereka opisana kot srednje velik hudournik alpskega tipa, katerega pričakovane visoke vode znašajo na obravnavanem odseku  $37 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nanos plavin je zmeren. Pretočnost struge je na prvem delu od stacionaže 0,784 km do stacionaže 0,904 km zadostna, tako da visoke vode ne ogrožajo ceste v smislu preplavljanja. Problematičnejši je odsek gorvodno od stacionaže 1,104 km, kjer poleg utesnenosti struge pretočnost dodatno ovirajo skalni balvani. Najproblematičnejši prerez je v stacionaži 1,124 km, kjer je prevodnost profila na območju balvana le  $Q_{10}$ . Na tem delu tako prihaja do prelivanja vode na cestišče. Predvideni posegi v okviru rekonstrukcije upoštevajo napotke iz hidravličnih smernic v smislu ustreznega temeljenja podpornih zidov in zaščite pred erozijo. Odstranitev dela skalnega balvana v km 1,124 v načrtu ni predvidena, je pa možna, v kolikor bi z njo soglašal Zavod za varstvo naravne dediščine, kar naj se uskladi v času gradnje. Odvodnjavanje podzemnih zalednih voda je urejeno s sistemom drenaž, ki se izvedejo z drenažnimi cevmi na podložni plasti iz cementnega betona. Iztoki iz drenažnih cevi so

speljani v jaške cevni prepustov.

## **3.2 Prečne konstrukcije**

Na hudourniku Ribnica v Srednji vasi v Bohinju je predvidena izgradnja novega nadomestnega mostu. Most je na državni cesti R-3, odsek 1098, Jereka-Bohinjsko Jezero. Predviden nov nadomestni most je na isti lokaciji (priloga 1) kot obstoječ, z nekoliko ostrejšim kotom med osjo mostu in strugo hudournika. V okviru izgradnje novega mostu je v območju križanja s strugo hudournika predvidena celotna rekonstrukcija objektov in ureditve struge v območju premostitve s prečnimi pragovi in zavarovanji brežin hudourniške struge.

### **3.2.1 Obstoječe stanje**

Vodnogospodarska ureditev hudournika Ribnica na območju obravnavanega mostu je že stara in dotrajana. Izvedena je bila za stabilizacijo nivelete struge na območju mostu in za zavarovanje brežin pred erozijo. Gorvodno od mostu sta brežini nezavarovani, na prvih nekaj metrih od vtoka v mostno odprtino gorvodno so na obeh brežinah opazne zajede, še naprej po toku navzgor pa je desna brežina položna in stabilna, levo brežino, na kateri je zgrajeno leseno gospodarsko poslopje, pa varuje star, iz kamna v suho zložen zid. Dno struge pod mostom je bilo zavarovano s tlakom iz kamna v betonu. Tlak je že sedaj povsem uničen, hudournik ga je erodiral in odplavil, vidni so le še majhni ostanki. Niveleta struge pa se ne pogloblja zahvaljujoč dolvodnemu pragu, tako da je malenkostno spodkopan le levi mostni opornik. Brežini dolvodno od mostu sta zavarovani – leva brežina z zidom iz kamna v betonu, desna brežina pa s kamnito zložbo zalito z betonom. Ta zložba je dobro ohranjena, na njenem zaključku pa je zajeda. Levobrežni zid je od mostu navzdol spodkopan. Približno 6,00 m dolvodno od mostu se nahaja prag iz kamna v betonu s stopnjo višine 0,80 m. Širina preлива (prečno na os struge) je 7,00 m. Preliv je precej poškodovan, na prelivu manjkajo kamni. Podslapje je poškodovano, v kamnitem tlaku so luknje, ker je kamenje odplavilo. Tako voda na zaključku podslapja s spodkopavanjem



tlaka ustvarja tolmun.

### **3.2.2 Projektne osnove**

Pred pričetkom projektiranja mostu na cesti R3-633/1099 so bile pridobljene projektne osnove, ki sestojе iz projektne naloge, geodetskega posnetka obstoječega stanja, geotehničnega poročila, hidravličnih smernic in poročila o stanju objektov (most, podporni zidovi).

### **3.2.3 Objekti**

Na območju obdelave je predvidena izvedba armiranobetonskega mostu temeljenega na pilotih s pripadajočimi obrežnimi zavarovanji v obliki kamnitih zložb v suho naklona 1:1,5, težnostnimi kamnitimi opornimi zidovi in betonskimi zidovi.

### **3.2.4 Vodnogospodarske smernice**

Minimalni svetli profil mostne odprtine je definiran na gorvodni strani. Na odseku struge nad vtokom v mostno odprtino je potrebno izvesti zavarovanje brežin z zidom iz kamna v betonu višine 2,60 m. Na levi brežini naj se izvede zid do obstoječega zidu iz kamna v suho pri gospodarskem objektu dolžine 10,00 m, na desni brežini je predviden zid dolžine 6,00 m, z zaključnim krilom zidu. Odsek struge vzdolž mostnih opornikov naj poteka v enaki smeri kot je obstoječa, dno struge lahko ostane netlakovano, temelji opornikov pa naj bodo z ozirom na potencialno globinsko erozijo globoko vsaj 1,20 m pod niveleto. Dolvodno od mostu je potrebno obstoječi spodkopani levobrežni zid podzidati, na desni brežini, kjer je po zaključku zložbe nastala zajeda, pa je treba le to sanirati z nadaljevanjem zavarovanja v dolžini 10,00 m s kamnito zložbo v suho, nagiba 1 : 1,5 in višine 2,00 m nad niveleto. Na zaključku tega zavarovanja je potrebno izvesti zaključno krilo. Poškodovani preliv obstoječega praga 6,00 m dolvodno od mostu je treba pozidati ročno s krono iz kamna v

cementni malti, sidran v zid praga. Debelina krone naj bo 30 – 40 cm, toliko, da bo nova kota preliwa 573,00 m. Poškodovano podslapje praga naj se zapolni s kamnito zložbo v suho. Ta mora biti izvedena z izkopom podlage, tako da se tolmun ohrani, prepreči pa nadaljnje spodkopavanje; zložena naj bo grobo, z velikimi kamni velikosti do  $1,00 m^3/kos$ , v dolžini 5,00 m in na zaključku podprta z lesenimi piloti. Poseganje v območje strug in brežin oziroma vodnega zemljišča hudournika Ribnica je mogoče le na podlagi tehnične dokumentacije, ki bo izdelana po teh smernicah in potrjena s strani upravljavca vodotoka, ter po pridobitvi dovoljenja ministra za okolje in prostor po 22. členu Zakona o varstvu okolja.

### 3.2.5 HEC-RAS

Na ameriškem centru za hidrologijo (Hydrologic Engineering Center; HEC), ki je oddelek inštituta za vodne vire (Institute for Water Resources; IWR) že dalj časa razvijajo programsko opremo za hidravlične izračune. Prve izvedbe (HEC-1 in HEC-2) so omogočale le računanje hidravlike eno dimenzijskega modela s stalnim tokom. V sredini devetdesetih let pa so začeli razvijati nove verzije, katere bi omogočile čim širšo paleto možnosti pri izračunih. Zadnja verzija je nastala konec leta 2002 in omogoča opravljanje izračuna stalnega in nestalnega toka za poljubno kompleksen rečni sistem. Analiziramo lahko tudi vpliv različnih objektov na vodotoku, kot so mostovi, prepusti, kanali, nasipi in drugo. Ena največjih prednosti novejših verzij je gotovo možnost izvedbe modela eno dimenzijskega nestalnega toka v odprtih vodotokih za različne režime toka. Dobljeni rezultati nam nudijo podatke v posameznih prečnih profilih, mostovih, prepustih, krivuljah pretokov in energijskih izgub, nivojev vodne gladine idr. v grafični, kot tudi v tabelarni obliki. Na voljo so nam grafični rezultati v dvo dimenzijski obliki za prečne prereze, shema rečnega sistema, hidrogrami, pa tudi tri dimenzijski model rečnega korita skupaj z nivoji vodne gladine izračunanih pretokov. Z našo metodo dela pa bomo lahko oblikovali geometrijo vodotoka s pomočjo ArcView razširitve HEC-GeoRAS, kjer bomo tudi analizirali rezultate. Izračuni prikazani s pomočjo HEC-GeoRAS-a nudijo veliko boljše prostorsko predstavo, saj jih lahko povezujemo tudi z drugimi podatki v GIS sistemu. Dandanes, ko je mnenje javnosti o izvedbi posameznih projektih vse bolj pomembno, lahko s simulacijami približamo poseg v prostor tudi širši javnosti.

### **Hidravlična analiza s HEC-RAS-om**

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's-River Analysis System) je računalniški program za analizo vodotokov, ki ga je zasnovala skupina raziskovalcev pod okriljem ameriške vojske.

Program so od prve verzije 1.0 ves čas razvijali in posodabljali in nam danes omogoča račun enodimenzionalnega stalnega in nestalnega toka tako naravnega rečnega sistema kot grajenih kanalov. V naslednjih verzijah naj bi že omogočal tudi račun transporta plavin.

### **Račun stalnega toka**

Tu gre za izračun nivojev vodne gladine skozi prečne profile vodotoka za stalni neenakomerni tok. Omogoča obravnavo mirnega in deročega toka v mreži kanalov, razvejanega rečnega sistema ali posameznega odseka vodotoka. Računanje hidravličnih lastnosti vodotokov temelji na energijski enačbi:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - Y_1 - Z_1 - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = h_e = L \bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (3.1)$$

kjer pomeni:

Y...največja globina,

Z ... kota najnižje točke tal,

$\alpha$  ... energijski koeficient,

V ... srednja pretočna hitrost,

g ...težnostni pospešek,

$h_e$  ... energijska izguba med profiloma,

L ... razdalja med profiloma, - povprečni energijski padec,

C ... koeficient razširitve oz. zožitve.

Padec energije je v posameznem preseku izračunan po enačbi:

$$\bar{S}_f = \left( \frac{Q}{H} \right)^2. \quad (3.2)$$

S K je označena prevodnost:

$$K = \frac{1}{n} A R^{2/3}, \quad (3.3)$$

kjer predstavlja:

n... Manningov koeficient,

A... površina prečnega preseka in

R... hidravlični polmer.

Glavna enačba velja za situacije, kjer prihaja do hipnih sprememb nivoja vodne gladine v posameznih profilih. Med take situacije sodijo izračun neenakomernega vodnega toka (pragovi, prepusti, mostovi, itd), hidravlike ob mostovih in račun vodnega nivoja na sotočjih. Mostove, prepuste, jezove in druge objekte, ki močneje vplivajo na vodni tok lahko obravnavamo v sklopu simulacije. Pri vodnih objektih moramo biti pazljivi, da imamo vedno definiran prečni profil tik pred in za samim objektom. Program je primeren za analiziranje poplavnih tokov in ugotavljanje primernosti možnih ukrepov proti njim, kot so izgradnja kanala in nasipov.

### **Simulacije nestalnega toka**

Z zadnji verzijo programa HEC-RAS 3.1. je prvič možno obravnavati tudi enodimenzionalni nestalni tok. Omogoča nam, da najprej izdelamo model vodotoka, v njem opravimo izračune stalnega neenakomernega toka in nato pri istih vhodnih podatkih geometrije izvedemo še simulacijo nestalnega neenakomernega toka in tako za mirni kot

tudi za deroči vodni tok. Vsi izračuni za prečne profile, mostove, prepuste in druge objekte znotraj območja toka so vključena v analizo nestalnega toka. Ker lahko simuliramo tok v rečnem kanalu in tudi na poplavni ravnici imamo navidezno dvodimenzionalno predstavo.

### **Priprava podatkov za izračun s HEC-RAS-om**

Vnos RAS GIS vhodne datoteke

Ko delamo s programom HEC RAS moramo najprej vnesti geometrijske podatke v naslednjem vrstnem redu:

- situacija vodotoka
- podatki prečnih profilov
- podatki o hidravličnih objektih (prepusti, mostovi..)

S tlorisno situacijo prikažemo, kako poteka tok vodotoka in razporejenost morebitnih pritokov. To osnovno shemo smo zrisali že s pomočjo HEC-GeoRAS-a zato najprej vnesemo RAS GIS datoteko. V programu HEC RAS odpremo nov projekt in vnesemo geometrijo oblikovano v programu ArcView s razširitvijo HEC GeoRAS. Sedaj moramo podatke še dopolniti s podatki o mostovih, prepustih, nasipih, dopolniti podatke neefektivnega toka. Spremenimo lahko potek prečnih prerezov in podobno. Prečni prerezi so lahko določeni s maksimalno 500 točkami, zato moramo v primeru, da je v posameznem profilu le-teh več, nekatere izločiti. Glede na to, da se večkrat točke nahajajo na isti premici se zaradi izločanja nekaterih točk ne pojavljajo napake oziroma pomanjkljivosti v samem izračunu .

Naslednji korak je vnos vrednosti pretokov, določitev robnih pogojev v hidravlični izračun.

US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center (2002): HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, Version 3.1., Davis, CA

HEC-RAS User's Manual je sklop navodil za uporabo programa HEC-RAS.

Najprej so opisane splošne zmožnosti programa in zahteve, ki jih mora izpolnjevati

programska in strojna oprema za uporabo programa.

V nadaljevanju nam najprej definira osnovno terminologijo, ki je uporabljena v programu. Predstavi nam menije in ikone, ki jih program vsebuje, ter prve korake novega projekta od geometrije, podatkov profilov, robne pogoje, zagon izračuna in možnost pregleda rezultatov.

Nato se vrstijo poglavja v katerih so prikazane različne možnosti, katere nudi program. Na začetku so predstavljene osnovne, kot so vnos in možnosti oblikovanja geometrije, podatki stalnega oziroma nestalnega toka, podatki o plavinah itd.

Pri prečnih profilih so najprej prikazane zahteve v vodotoku na odprtem odseku, nato pa zahteve glede postavitve in zgoščenosti prečnih profilov na območju prepustov, prelivov, mostov. V točkah moramo podati lokacijo in obliko objekta, koeficient zožitve oziroma razširitve in določimo metodo, po kateri naj poteka izračun. Poleg geometrije prečnega profila podamo še razdalje med sosednjimi profili, vrednosti Mannigovih koeficientov hrepavosti, mejo med glavnim rečnim koritom in poplavnim območjem. Možna je tudi zgostitev s pomočjo interpolacije.

Program nam omogoča tudi simulacije stalnega neenakomernega toka s prosto gladino. Opisano je podajanje in spreminjanje podatkov za stalni tok. Določiti moramo tudi režim toka (mirni, deroči ali mešani). Za vsako simulacijo določimo še lastnosti, kot so določitev porazdelitve toka na matico in poplavna območja, metodo izračuna naklona dna, numerične tolerance izračuna.

Program nam tudi omogoča pripravo simulacij nestalnega toka s prosto gladino. Posebno poglavje je namenjeno podajanju in spreminjanju podatkov za nestalni tok. Podamo vrsto toka, ki ga želimo obravnavati in lokacije začetnih in robnih pogojev.

Tudi pregledovanju rezultatov je namenjeno eno izmed poglavij. Možno je grafično in tabelarično izpisovanje rezultatov. Izrišemo lahko grafični potek prečnih in vzdolžnih profilov, histogramov, nivogramov, in razporeditev hitrosti v profilu. Za nekatere izrise kot je izris rečnega korita je možen tudi tridimenzionalni prikaz. Pri simulaciji nestalnega toka program naredi animacijo poplavnega vala. Prav tako so vsi rezultati možni tudi v tabelarični obliki.

Zadnja poglavja so namenjena zahtevnejšim operacijam, načinom iskanju in odpravljanju napak. Ena takih možnosti, ki je zanimiva tudi za moj model, je kako program upošteva nadvišanje gladine vode na poplavnih območjih glede na gladino v glavni strugi. Pojav nastopi zaradi zmanjšanja hitrosti toka na poplavnih območjih. Podane so metode, po katerih je simulacija le-tega možna, način vnosa podatkov ter kako pregledati simulacije.

V zadnjem poglavju je opisana možnost uporabe podatkov GIS v programu HEC-RAS, za kar gre tudi v mojem modelu. V programu lahko uporabimo 3D podatke, pripravljene v GIS ali CAD sistemu. Poglavlje opiše načine pretvarjanja GIS oz. CAD podatkov v HEC-RAS obliko, poda načine kako te podatke dopolniti in nato pretvoriti rezultate nazaj v GIS oz. CAD obliko.

### **3.2.6 Primerjava funkcije prečne in vzdolžne vodne zgradbe**

Prečne in vzdolžne zgradbe imajo osnovno nalogo ohranjati stabilnost nosilnega telesa prometnice. Prečne zgradbe stabilizirajo dno vodotoka na izbrani projektirani višini. Tako se lahko zmanjša višinska razlika med planumom prometnice in dnem struge podpre nosilno telo prometnice namesto s podpornim zidom z zemeljskim nasipom. Ravno tako se lahko sanacija izpodkopanih temeljev podpornih konstrukcij namesto podbetoniranja zagotovi s prečnimi pragovi, ki zagotovijo dvig dna struge najmanj na nivo v času izvedbe podpornih konstrukcij. Prečni pragovi bi se morali zgraditi že ob izgradnji podporne konstrukcije. Tako bi ohranili projektiran nivo temeljnih tal pod nivojem struge izven območja zmrzovanja, s prečnimi pragovi pa bi preprečili poglabljanje dna struge. Vzdolžne zgradbe ostro ločijo telo prometnice od struge. Upoštevati morajo možnost poglabljanja dna struge, kar pa je težko predvideti. Višinska razlika med nivojem prometnice in predpostavljenim dnem vodotoka neposredno vpliva na izbiro konstrukcije. Pri stiku dveh prometnic se ob pomanjkanju prostora vsekakor uporabi vzdolžno konstrukcijo, niveleti se vsekakor ne bosta veliko spremenili.

Pri dimenzioniranju prečnih zgradb se mora upoštevati celovita ureditev terena v območju postavitve pregrade. Sestavni del prečne zgradbe je ureditev struge z oblikovanim prečnim pragom in podslapjem. S pravilno izbrano obliko preliava, ki naj bi čim bolj zmanjšal vlečne sile, se določi ureditev podslapja glede na vodni skok, ki nastane ob prelivanju vode preko

krone pregrade. Utrditev podslapja mora v celoti prevzeti vlečne sile vode. Vzdolžne zgradbe so večjih višin različnih oblik in se dimenzionirajo na običajne, izjemne in ekstremne obtežbene primere. Sedaj se največkrat uporabi betonske pilote, konstruktorji pa smatrajo, da do večjih poglobitev ne bo prišlo ne glede na možnost poglobitve dna struge preko 10.00 m.

Izbira vodne zgradbe mora temeljiti na upoštevanju smernic posameznih uporabnikov prostora. Vsak soglasodajalec bi moral postaviti sprejemljive zahteve tako, da bi lahko glede na stanje oblikovanosti prostora, izbrali optimalno konstrukcijsko rešitev.

### 3.2.7 Shematični prikaz uporabe prečnih in vzdolžnih pregrad

(Schematic display of implementation of transverse and longitudinal constructions)



Slika 3.2: Situacija vzdolžne zgradbe oziroma prečnih zgradb

Picture 3.2: Situation of longitudinal construction or transverse constructions



Slika 3.3: Situacija prečnih zgradb oziroma vzdolžne zgradbe

Picture 3.3: Situation of transverse constructions or longitudinal construction



## **4 ZAKONODAJNA IZHODIŠČA**

Dobrine, kamor štejemo zemljišča, gozdove, celinske vode, morje in obale, rude, surovine in druga naravna bogastva so dobrine splošnega pomena. Izkoriščati jih smemo le v skladu s pogoji določenimi v zakonih. Pravni akt Unije (Pogodba o Ustavi za Evropo, 2005) navaja v III-233. členu cilje ohranjanja, varstva in izboljšanja kakovosti okolja ter skrbno in preudarno rabo naravnih virov. V nadaljevanju so obravnavana le nekatera določila, pomembna za obravnavane zgradbe, ki jih dajejo zakoni o graditvi objektov, o vodah, o varstvu okolja, o cestah in železnicah ter o gozdovih z za to nalogo najpomembnejšimi pravilniki in uredbami.

### **4.1 Zakon o graditvi objektov**

V zakonu (ZGO-1B, 2007) se objekti razvrščajo glede na zahtevnost gradnje in vzdrževanja na zahtevne, manj zahtevne in enostavne objekte (člen 8). Z gradbenimi predpisi se za posamezne vrste objektov določijo njihove tehnične značilnosti tako, da ti objekti glede na svoj namen izpolnjujejo eno, več ali vse naslednje bistvene zahteve (člen 9): mehanske odpornosti in stabilnosti, varnosti pred požarom, higienske in zdravstvene zaščite in zaščite okolice, varnosti pri uporabi, zaščite pred hrupom in varčevanje z energijo in ohranitvijo toplote. Bistvene lastnosti objektov so skladnost s prostorskimi deli, zanesljivost in evidentiranost. Skladnost objektov s prostorskimi akti se zagotavlja s projektiranjem, v postopku izdaje gradbenih dovoljenj, z gradnjo oziroma izvajanjem del, v postopku izdaje uporabnih dovoljenj ter z ustrezno uporabo objektov (člen 13). Zanesljivost objekta se zagotavlja s projektiranjem, v postopku izdaje gradbenega dovoljenja, z gradnjo oziroma izvajanjem del, v postopku izdaje uporabnih dovoljenj ter vzdrževanjem objektov. Objekte je treba projektirati in zgraditi oziroma rekonstruirati s takšnimi gradbenimi proizvodi in materiali in na takšen način, da bo objekt zanesljiv kot celota (člen 15). Evidentiranost objektov se zagotavlja v postopku izdaje gradbenih in uporabnih dovoljenj ter z vpisovanjem zgrajenih objektov v uradne evidence. Zemljišča na katerih so zgrajeni objekti, za katere je predpisano gradbeno dovoljenje je potrebno evidentirati v zemljiškem katastru.

Gradbene inženirske objekte, ki sestavljajo gospodarsko javno infrastrukturo, se mora evidentirati v katastru gospodarske javne infrastrukture.

Objekt pridobi status grajenega javnega dobra državnega pomena z ugotovitveno odločbo, ki jo na podlagi sklepa Vlade RS po uradni dolžnosti izda tisto pristojno ministrstvo, v katerega delovno področje sodi takšen objekt (člen 21). Objekt s statusom grajenega javnega dobra mora njegov lastnik oziroma upravljavec vzdrževati v stanju, ki omogoča splošno rabo v skladu z njegovim namenom (člen 22).

#### **4.1.1 Pravilnik o vrstah zahtevnih, manj zahtevnih in enostavnih objektov, o pogojih za gradnjo enostavnih objektov brez gradbenega dovoljenja in o vrstah del, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči**

Na podlagi Zakona o graditvi objektov (ZGO-1B, 2007) je bil sprejet Pravilnik o vrstah zahtevnih, manj zahtevnih in enostavnih objektov, o pogojih za gradnjo enostavnih objektov brez gradbenega dovoljenja in o vrstah del, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči. Šteje se, da je gradnja enostavnih objektov v skladu z osnovno namensko rabo, določeno z izvedbenim prostorskim aktom, če se jih gradi na poselitvenih območjih, ki so določena v izvedbeno prostorskih aktih.

Graditev enostavnega objekta izven poselitvenih območij je možna, če je v skladu z osnovno namensko rabo in v skladu s predpisi s področja ohranjanja narave, upravljanja z vodami in varstva kulturne dediščine (člen 23).

V primeru pomožnega infrastrukturnega objekta (člen 7) morajo biti pomožni cestni objekti za odvodnjavanje ceste (jarki, drenaže, prepusti pretoka do  $5\text{m}^3/\text{min}$ ), pomožni železniški objekti (kot ceste, mreža za lovljenje kamenja, zadrževanje snega pri ograjah) od meje sosednjih zemljišč oddaljeni toliko, kot je to predpisano z izvedbenim prostorskim aktom oziroma morajo biti postavljene na mejo, če tako določa izvedbeni prostorski akt; če z izvedbenim prostorskim aktom ni predpisan odmik od meje sosednjih zemljišč, so oddaljene najmanj 0,5 m; če je odmik manjši, je treba pred začetkom gradnje pridobiti pisno soglasje lastnika oziroma lastnikov sosednjih zemljišč; ob javni cesti njihov zgornji rob ne sme posegati v polje preglednosti, zato se mora pred gradnjo ograje pridobiti soglasje upravljavca ceste. Dela, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči, za katera ni

potrebno gradbeno dovoljenje in s katerimi se lahko začne brez pridobitve lokacijske informacije, so dela v zvezi s splošno rabo naravnih dobrin. Če se namerava izvesti dela na objektu, ki je varovan na podlagi predpisov, ki urejajo kulturno dediščino, je potrebno pred začetkom del pridobiti kulturno varstvene pogoje. Če se namerava izvesti dela na območju, ki je varovano na podlagi predpisov, ki urejajo ohranjanje narave, je treba takšna dela izvesti v skladu s pravili ravnanja, ki jih določa akt o varovanju takšnega območja. Če se namerava izvesti dela, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči na objektu oziroma zemljišču, ki leži v varovalnem pasu ali na varovanem območju, je treba pred začetkom teh del pridobiti soglasje pristojnega organa oziroma službe.

Med zahtevne objekte (člen 2) spadajo objekti z globokim temeljenjem (pasovnimi temelji pri katerih je razmerje med globino in širino temeljna večje od 4; piloti daljši od 20 m), mostovi svetle razpetine več od 8,00 m, avtoceste, hitre, glavne in regionalne ceste, javne železniške proge, ipd. Od vodno gospodarskih objektov sodijo v to skupino tudi pregrade višje od 10,00 m med katere sodijo zemeljska pregrada za zadrževanje vode in plavin, pri kateri je dolžina krone 250 m ali več; betonska pregrada za zadrževanje voda, pri kateri je dolžina krone 50 m ali več in jezovni objekt, pri katerem je dolžina krone 300 m ali več, vodni zbiralniki s kapaciteto več od  $10^5$  m<sup>3</sup> idr. Manj zahtevni objekt (člen 3) je vsak objekt, ki ni uvrščen med zahtevne ali enostavne objekte. Enostavni objekti so pomožni, začasni objekti ali vrste pomožnih infrastruktur. Kot primer so pomožni cestni ali železniški objekti za odvodnjavanje odvodni jarek, koritnice, vtočni zemeljski jarek, vodnjak, ponikovalnica, plitve in globoke drenaže. Tovrstni objekti imajo prepustnost vode do 5 m<sup>3</sup>/min. K enostavnim objektom spada še vodno zajetje (kotanje do 150 m<sup>3</sup>, betonsko korito do 30 m<sup>2</sup> tlorisa, višine do 2 m) idr. Enostavni objekt je lahko grajen brez gradbenega dovoljenja (člen 19), če ima investitor za zemljišče, na katerem naj bi se takšen objekt zgradil, lastninsko ali kakšno drugo stvarno oziroma obligacijsko pravico, ki mu omogoča gradnjo na takšnem zemljišču in če so pri takšnem objektu glede na vrsto, v katero je v skladu s tem pravilnikom uvrščen, izpolnjeni naslednji pogoji: da so njegova velikost in način gradnje ter rabe v skladu z določbami tega pravilnika, da so pri njegovi gradnji izpolnjene zahteve, ki jih glede načina gradnje in odmika od sosednjih zemljišč določa 20. člen tega pravilnika in da so pri njegovi gradnji izpolnjeni lokacijski pogoji, ki jih glede oblikovanja in postavitve objektov določa izvedbeni prostorski akt.

Enostavni objekti, ki se jih lahko gradi brez gradbenega dovoljenja, morajo glede načina gradnje in odmika od sosednjih zemljišč izpolnjevati naslednje zahteve odmika od sosednjih zemljišč (člen 20). Objekti za lastne potrebe so lahko zgrajeni le na zemljišču gradbene parcele, ki pripada stavbi, zgrajeni na podlagi gradbenega dovoljenja, od meje sosednjih zemljišč morajo biti oddaljeni toliko, kot je to predpisano z izvedbenim prostorskim aktom; če z izvedbenim prostorskim aktom ni predpisan odmik od meje sosednjih zemljišč, morajo biti od meje sosednjih zemljišč oddaljeni najmanj 1,5 m; če je odmik manjši, je treba pred začetkom gradnje pridobiti pisno soglasje lastnika oziroma lastnikov sosednjih zemljišč.

## **4.2 Zakon o vodah**

Zakon o vodah (ZV-1, 2002) ureja upravljanje z morjem, celinskimi in podzemnimi vodami (vode) ter vodnimi in priobalnimi zemljišči. Upravljanje z vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči obsega varstvo voda, urejanje voda in odločanje o rabi voda. Dodatno ureja javno dobro in javne službe na področju voda, vodne objekte in naprave ter druga vprašanja, povezana z vodami (člen 1). Cilj upravljanja z vodami ter vodnimi in priobalnimi zemljišči je doseganje dobrega stanja voda in drugih, z vodami povezanih ekosistemov, zagotavljanje varstva pred škodljivim delovanjem voda, ohranjanje in uravnavanje vodnih količin in spodbujanje trajnostne rabe voda, ki omogoča različne vrste rabe voda ob upoštevanju dolgoročnega varstva razpoložljivih vodnih virov in njihove kakovosti (člen 2).

Ob upoštevanju temeljnih načel varstva okolja, upravljanje z vodami ter z vodnimi in priobalnimi zemljišči temelji na načelu celovitosti, ki upošteva naravne procese in dinamiko voda ter medsebojno povezanost in soodvisnost vodnih in obvodnih ekosistemov na območju povodja, zagotavljanja varnosti pred škodljivim delovanjem voda, ki izhaja iz potreb po varnosti prebivalstva in njihovega premoženja, ob upoštevanju delovanja naravnih procesov, načelu upoštevanja najboljših razpoložljivih tehnik in novih dognanj znanosti o naravnih zakonitosti (člen 3.) idr.

Upravljanje z vodami in vodnimi ter priobalnimi zemljišči je v pristojnosti države, razen tistih nalog, za katere je po tem zakonu pristojna lokalna skupnost (člen 4). Rabo in druge posege v vode, vodna in priobalna zemljišča ter zemljišča na varstvenih in ogroženih območjih je treba programirati, načrtovati in izvajati tako, da se ne poslabšuje stanja voda,

da se omogoča varstvo pred škodljivim delovanjem voda, ohranjanje naravnih procesov, naravnega ravnovesja vodnih in obvodnih ekosistemov, ter varstvo naravnih vrednot in območij, varovanih po predpisih o ohranjanju narave (člen 5).

Razvrščanje voda je pomembno v primerih, ko se stikajo prometnice in vodna telesa. Površinske vode se po pomenu, ki ga imajo za upravljanje voda, razvrstijo v:

1. red (Sava, Soča, Kokra, Tržiška Bistrica itd.) in
2. red (Jereka, Koritnica, Čemšenik, Mošenik in drugi).

Zemljišče, na katerem je celinska voda trajno ali občasno prisotna in se zato oblikujejo posebne hidrološke, geomorfološke in biološke razmere, ki določajo vodni in obvodni ekosistem, je vodno zemljišče celinskih voda. Vodno zemljišče tekočih voda obsega osnovno strugo tekočih voda, vključno z bregom, do izrazite geomorfološke spremembe. Vodno zemljišče stoječih voda obsega dno stoječih voda, vključno z bregom, do najvišjega zabeleženega vodostaja. Za vodno zemljišče se štejejo tudi opuščene struge in prodišča, ki jih voda občasno še poplavlja, močvirja in zemljišče, ki ga je poplavela voda zaradi posega v prostor. Vodno zemljišče je lahko v lasti osebe zasebnega ali javnega prava (člen 11). Zemljišče, ki neposredno meji na vodno zemljišče, je priobalno zemljišče (celinskih voda). Zunanja meja priobalnih zemljišč sega na vodah 1. reda 15 metrov od meje vodnega zemljišča, na vodah 2. reda pa 5 metrov od meje vodnega zemljišča (člen 14), vlada pa lahko določi drugačno zunanjo mejo priobalnih zemljišč.

Status naravnega vodnega javnega dobra na vodnem zemljišču se po uradni dolžnosti vpiše v zemljiško knjigo, razen zemljišč presihajočih jezer (člen 15).

Celinske vode in vodna zemljišča so naravno vodno javno dobro. Vodno zemljišče, ki je nastalo zaradi prestavitve ali ureditve naravnega vodotoka, zaježitve tekočih voda, zaradi odvzema ali izkoriščanja mineralnih surovin ali drugega podobnega posega v prostor in se ga lahko nameni splošni rabi, lahko postane grajeno vodno javno dobro.

Grajeno vodno javno dobro ne more postati vodno zemljišče, ki je nastalo zaradi izvajanja vodne pravice in se ga ne more nameniti splošni rabi (člen 17). Naravno in grajeno vodno javno dobro (vodno dobro) lahko uporablja vsakdo tako, da ne vpliva škodljivo na vode, vodni režim in naravno ravnovesje vodnih ter obvodnih ekosistemov in ne omejuje enake

pravice drugim (splošna raba). Na vodnem in priobalnem zemljišču ter na območju presihajočih jezer ni dovoljeno posegati v prostor, razen za: gradnjo objektov javne infrastrukture (kar je primer pri javnih cestah), gradnjo objektov grajenega javnega dobra po zakonu o vodah ali drugih zakonih, ukrepe, ki se nanašajo na ohranjanje narave, gradnjo objektov, namenjenih varstvu voda pred onesnaženjem, idr. Če drugače ni mogoče zagotoviti splošne rabe vodnega ali morskega dobra, lahko vlada zahteva odvzem ali omejitev lastninske pravice na vodnem, priobalnem ali drugem zemljišču po predpisih, ki urejajo razlastitev (člen 41).

Objekti in ureditve ob prometnici namenjene urejanju voda (vodna infrastruktura), so zlasti visokovodni nasip, jez in prag. Za vodno infrastrukturo se, poleg objektov in naprav ali ureditev, šteje tudi vodotok, ki je nastal zaradi prestavitve naravnega vodotoka ali njegove ureditve. Gradnja vodne infrastrukture je v javnem interesu.

Različni pravni režimi vodne infrastrukture so:

1. Vodna infrastruktura je lahko v lasti države ali izvajalca javne službe po zakonu o vodah.
2. Vodna infrastruktura in zemljišča, na katerih je zgrajena, niso grajeno javno dobro.
3. Vodna infrastruktura je lahko v pravnem prometu samo med državo in izvajalcem javne službe.
4. Na vodni infrastrukturi ni mogoče pridobiti lastninske pravice s priposestvanjem.
5. Na vodno infrastrukturo ni mogoče poseči z izvršbo.
6. V primeru stečaja ali likvidacije izvajalca javne službe postane vodna infrastruktura last države, ne glede na določbe predpisov o stečajnem postopku (člen 46).

Pri uporabi vodne infrastrukture za namene, zaradi katerih je bila razglašena za grajeno vodno dobro, ima izvajanje javnih služb po tem zakonu prednost pred splošno rabo (člen 47).

Urejanje voda obsega skrb za ohranjanje in uravnavanje vodnih količin, varstvo pred škodljivim delovanjem voda, vzdrževanje vodnih in priobalnih zemljišč in skrb za hidromorfološko stanje vodnega režima. Posegi zaradi urejanja voda morajo biti načrtovani in izvedeni tako, da bistveno ne poslabšajo lastnosti vodnega režima in bistveno ne porušijo naravnega ravnovesja vodnih in obvodnih ekosistemov (člen 80).

Varstvo pred škodljivim delovanjem voda pred poplavami, površinsko, globinsko in bočno erozijo celinskih voda in zemeljskimi in hribinskimi plazovi (člen 82) obsega izvajanje ukrepov, s katerimi se zmanjšuje ali preprečuje ogroženost pred škodljivim delovanjem voda in odpravlja posledice njihovega škodljivega delovanja. Zaradi zagotavljanja varstva pred škodljivim delovanjem voda se določi območje, ki je ogroženo zaradi poplav, erozije celinskih voda in morja in zemeljskih ali hribinskih plazov. Ogroženo območje določi vlada, ob upoštevanju naravnih možnosti, da pride do škodljivega delovanja voda, števila potencialno ogroženih prebivalcev in velikosti možne škode na objektih, zemljiščih in premoženju.

Zaradi varstva pred škodljivim delovanjem voda se zemljišče na ogroženem območju lahko razvrsti v razrede glede na stopnjo ogroženosti (člen 83). Na ogroženem območju je pri izvajanju dejavnosti ali poseganju v prostor treba upoštevati določbe zakona o vodah. Pogoje in omejitve za izvajanje dejavnosti ali poseganje v prostor na ogroženem območju se podrobneje določijo v vodnem soglasju (člen 85). Za erozijsko območje se določijo zemljišča, ki so stalno ali občasno pod vplivom površinske, globinske ali bočne erozije vode in sicer zemljišča, ki so izvori plavin (erozijska žarišča), pod vplivom hudournih voda (povirja), sestavljena iz kamnin, podvrženih preperevanju. Na erozijskem območju je prepovedano poseganje v prostor na način, ki pospešuje erozijo in oblikovanje hudournikov, ogoljevanje površin, krčenje tistih gozdnih sestojev, ki preprečujejo plazenje zemljišč in snežne odeje, uravnavajo odtočne razmere ali kako drugače varujejo nižje ležeča območja pred škodljivimi vplivi erozije, zasipavanje izvirov, nenadzorovano zbiranje ali odvajanje zbranih voda po erozivnih ali pazljivih zemljiščih, omejevanje pretoka hudourniških voda, pospeševanje erozijske moči voda in slabšanje ravnovesnih razmer, odlaganje ali skladiščenje lesa in drugih materialov, zasipavanje z odkopnim ali odpadnim materialom, odzemanje naplavin z dna in brežin, razen zaradi zagotavljanja pretočne sposobnosti hudourniške struge ter vlačenje lesa (člen 87).

Za pazljivo območje se določijo zemljišča, kjer je zaradi pojava vode in geološke sestave tal ogrožena stabilnost zemeljskih ali hribinskih sestojev. Na pazljivem območju lastnik zemljišča ali drug posestnik ne sme posegati v zemljišče tako, da bi se zaradi tega sproščalo gibanje hribin ali bi se drugače ogrozila stabilnost zemljišča. Na pazljivem območju je prepovedano zadrževanje voda, predvsem z gradnjo teras, in drugi posegi, ki bi lahko pospešili zamakanje zemljišč, poseganje, ki bi lahko povzročilo dodatno zamakanje zemljišča in dvig podzemne vode, izvajati zemeljska dela, ki dodatno obremenjujejo zemljišče ali razbremenjujejo podnožje zemljišča, krčenje in večja obnova gozdnih sestojev ter grmovne vegetacije, ki pospešuje plazenje zemljišč (člen 88).

Za plazovito območje se določijo zemljišča, kjer zaradi klimatskih in topografskih razlogov redno prihaja do pojava snežnih plazov ali pa obstoja velika verjetnost, da se pojavijo. Na plazovitem območju je prepovedano krčenje gozdov, izravnavanje terena ter preusmerjanje snežnih plazov iz ustaljenih naravnih poti na porasla, labilna ali drugače ogrožena zemljišča (člen 89).

Zaradi varstva pred škodljivim delovanjem voda država in lokalne skupnosti zagotavljajo na ogroženem območju načrtovanje, gradnjo in upravljanje vodne infrastrukture, zlasti visokovodnih nasipov, zadrževalnikov, prodnih pregrad, objektov za stabilizacijo dna in brežin, črpališč in odvajanje zalednih voda. Ukrepi se lahko izvajajo tudi izven ogroženega območja, načrtovani in izvedeni pa morajo biti tako, da ne ogrožajo varstva pred škodljivim delovanjem voda dolvodno. Za posege na vodnem ali priobalnem zemljišču, na varstvenih in ogroženih območjih, ki bi lahko trajno ali začasno vplivali na vodni režim ali stanje voda, se lahko izvedejo samo na podlagi vodnega soglasja (člen 150).

Pravna ali fizična oseba, ki namerava izvesti poseg v prostor, lahko od ministrstva zahteva informacijo v zvezi s predpisanimi pogoji, ki jih mora izpolnjevati nameravani poseg, nanašajo pa se na varstvo voda, urejanje voda, varstvo naravnega ravnovesja vodnih in obvodnih ekosistemov in obstoječe vodne pravice drugih oseb.



#### 4.2.1 Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture

Pravilnik (Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture, 2005) izdan na podlagi Zakona o vodah (ZV-1, 2002) podrobneje določa kateri vodni objekti, naprave ali ureditve (v nadaljnjem besedilu: vodni objekti) se štejejo za vodno infrastrukturo (člen 1). Status vodne infrastrukture pridobi vodni objekt, če služi izvajanju javnih služb urejanja voda ali drugih nalog upravljanja z vodami, ki jih mora izvajati država, v skladu z Zakonom o vodah.

Seznam vodnih objektov obsega navedbo: področja, oddelka, skupine, razreda in podrazreda. Talni ali stopenjski prag je objekt v dnu struge, vpet v brežino. Služi za stabilizacijo nivelete dna struge. Sestavni del praga je tudi podslapje oziroma zavarovanje brežin in dna v območju praga. Glede na material je lahko: betonski, leseni, kamniti, iz kašt ali iz žičnih košar. Jez je prečni objekt v strugi, ki ustvarja razliko med gladinama gorvodno in dolvodno jezu, podslapjem ali zavarovanjem dna in brežin v območju jezu in s hidromehansko opremo za regulacijo pretoka. Glede na material je lahko: lesen, betonski, kamnit, iz žičnih košar ali iz kašt. Drča je glede na namen stopenjski prag z izrazito blagim naklonim zračne strani, hrapave ali gladke izgradnje. Po materialu so pretežno zložene iz večjih kamnov v suho ali v betonu. Hudourniške pregrade so sistem pregrad manjših dimenzij, ki služijo za stabilizacijo povirij hudournikov ali za zadrževanje plavin. Po materialu delimo hudourniške pregrade v kamnite, iz kašt, betonske, po konstrukciji pa ločne ali težnostne. Jezbica je posamezni objekt ali skupina objektov, ki služi za usmerjanje toke vode. Glede na material ločimo jezovice v kamnite, betonske, iz žičnih košar. Togo obrežno zavarovanje so objekti za zavarovanje brežin. Sem sodijo vse vrste zidov, ki so po materialu betonski ali kamniti. V gibko obrežno zavarovanje spadajo zložbe, kamenometi, kašte, tonjače, žične košare, popleti idr. Zavarovanja v dnu struge služijo za preprečevanje erozije. Glede na material so lahko: kamnita ali betonska. Regulacija je odsek prestavljenega vodotoka ali obale, ki je preoblikovan z med seboj odvisnimi objekti. Zadrževalnik je objekt za varstvo pred škodljivim delovanjem voda zgrajen na prostoru, kjer se umetno začasno ali stalno zadržujejo vode, plavje ali plavine zaradi varstva pred škodljivim delovanjem voda. Poznamo suhi ali mokri zadrževalnik (zbiralnik, akumulacija). Posebna oblika je prodni zadrževalnik (zadrževalnik proda, prodna pregrada). Stabilizacijski objekt je podporni zid, usmerjevalni objekt za plazove, idr.

### 4.3 Zakon o varstvu okolja

Zakon o varstvu okolja (ZVO-1, 2004) ureja varstvo življenjskega in z njim neločljivo povezanega naravnega okolja ter splošne pogoje rabe naravnih dobrin kot temeljnega pogoja za zdrav in okolje ohranjujoč razvoj. Usmerjanje razvojnih procesov, posegov v prostor in drugih posegov v okolje mora izhajati iz uravnoteženosti razvojnih in okoljskih potreb. Zadovoljevanje potreb sedanje generacije mora upoštevati enake možnosti zadovoljevanja potreb prihodnjih generacij. Namen varstva okolja je ohranitev, izboljšanje in razvoj celovitosti, raznovrstnosti in kakovosti naravnih prvin, naravnih združb, naravnih dobrin in v njihovem okviru naravnih bogastev. Merilo vseh ravnanj in norm varstva okolja je človekovo zdravje, počutje in kakovost njegovega življenja ter preživetje, zdravje in počutje živih organizmov (člen 1). Urejanje zadev varstva okolja je v pristojnosti Republike Slovenije.

Javno dobro, ki je sestavina ekosistemov kmetijskih zemljišč, gozdov, podzemnega sveta, krasi, voda, morja in nerodovitnega sveta, je lastnina republike ali lokalne skupnosti. Razmejitve med republiškim in lokalnim naravnim javnim dobrom ter splošni pogoji uporabe se določijo z zakonom. Naravno javno dobro se lahko uporablja le tako, da s tem nista ogrožena njegova substanca in izključena njegova naravna vloga (člen 16). Voda, ribe in druge prosto živeče oziroma prosto rastoče vodne živali in rastline v odprtih vodah in v ribolovnem morju so lastnina republike. Pridobivanje in uživanje lastnine na zemljiščih in gozdovih ne smeta ogrozati njihove ekološke funkcije (člen 17).

Ministrstvo skladno z načelom obveznega ukrepanja ob ekoloških nesrečah ali poškodbah okolja odredi povzročitelju ali pristojni službi obvezno sanacijo, vzpostavitev novega ali nadomestitev prejšnjega stanja, nujno intervencijo in uvedbo izjemnih ukrepov za varovanje, in sicer v soglasju z ministrom, pristojnim za varovanje posamezne naravne dobrine, in ministrom, pristojnim za zdravstvo, o uporabi ukrepov za zaščito in reševanje, pa tudi v soglasju z ministrom, pristojnim za zaščito in reševanje (člen 35). Kadar se v postopku za izdajo dovoljenja za poseg v okolje presojujejo tudi vplivi na okolje, mora organ, pristojen za odločanje, sestaviti osnutek odločbe in ga ob objavi javnega naznanila poslati skupaj s projektom in preostalimi deli spisa ministrstvu v soglasje. Ministrstvo mora s potrditvijo na odločbi ali s posebnim aktom dati ali odreči okoljevarstveno soglasje.

### **4.3.1 Uredba o emisiji snovi pri odvajanju padavinske vode z javnih cest**

Vladna uredba (Uredba o emisiji snovi pri odvajanju padavinske vode z javnih cest, 2005) izdana na podlagi zakona o varstvu okolja (ZVO-1, 2004) določa ukrepe v zvezi z zmanjševanjem onesnaževanja okolja zaradi odvajanja padavinske vode, ki nastaja na območju javnih cest. (člen 1). Pred točkovnim odvajanjem padavinske odpadne vode v vode ali javno kanalizacijo je treba zagotoviti čiščenje za padavinsko odpadno vodo, ki odteka s cestišča za javne ceste, ki prečkajo medzrnske in razpoklinske vodonosnike, če je dnevno povprečje pretoka vozil večje od 12.000 EOVD/dan, za javne ceste, ki prečkajo kraške vodonosnike, če je dnevno povprečje pretoka vozil večje od 6.000 EOVD/dan, za javne ceste, ki prečkajo območja kamnin s povprečno propustnostjo za vodo manj kot  $10^{-6}$  m/s, če je dnevno povprečje pretoka vozil večje od 40.000 EOVD/dan in javne ceste, s katerih se padavinska odpadna voda odvaja neposredno v vodotok ali v morje, če je dnevno povprečje pretoka vozil večje od 12.000 EOVD/dan. V zadrževalniku se padavinske odpadne vode iz prometnih pasov zbira ločeno od zalednih voda, ki nastajajo na območju javne ceste izven voznih pasov (člen 1).

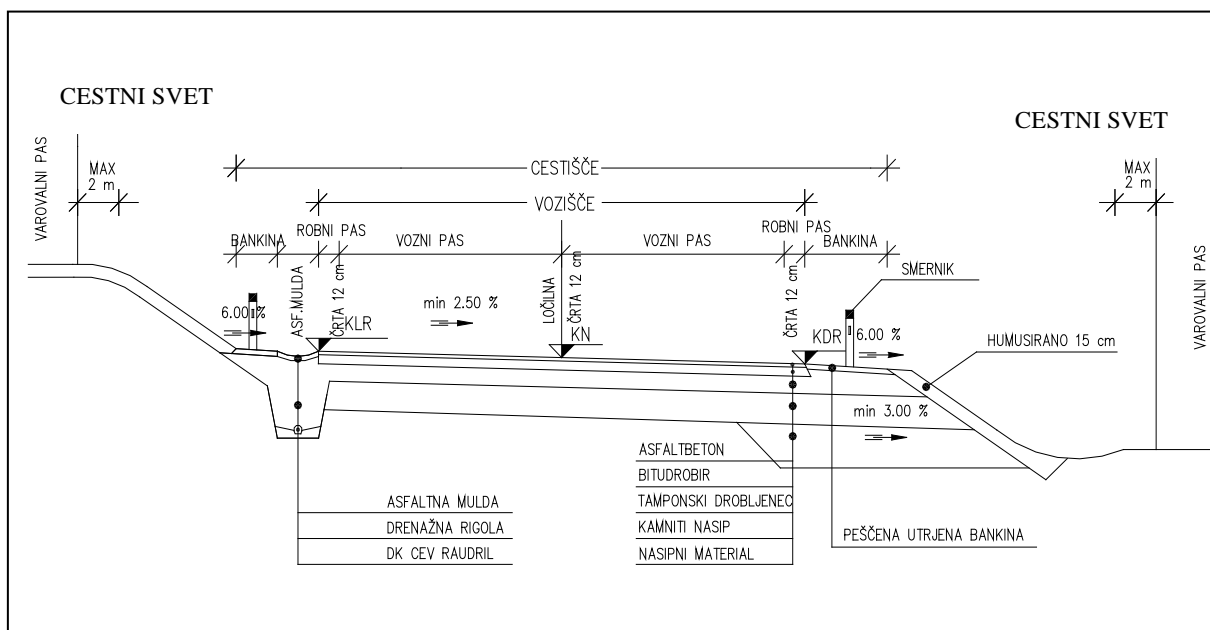
Padavinska odpadna voda, ki odteka iz zadrževalnika ali čistilne naprave padavinske odpadne vode ali lovilca olj, se ne sme odvajati neposredno v podzemne vode, v celinske vode in v vode na najožjem in ožjem vodovarstvenem območju zajetja pitne vode iz površinskih voda. Pri načrtovanju, projektiranju, gradnji ali rekonstrukciji zadrževalnikov in čistilnih naprav padavinske odpadne vode ter lovilcev olj mora investitor javne ceste izbrati takšno zasnovo in tehnične rešitve, ki ob sprejemljivih stroških zagotavljajo čim manjši vpliv na onesnaženost tal in kemijsko ter ekološko stanje voda (člen 4).

Za zaledne vode in padavinsko vodo, ki odteka s cestišča manj obremenjenih (pod 12000 EOVD/dan) javnih cest, je treba pri načrtovanju zagotoviti razpršeno odvajanje padavinske vode. Razpršeno odvajanje zalednih voda ter padavinske vode s cestišča javnih cest ima prednost pred odvajanjem v javno kanalizacijo tudi na območjih poselitve, ki so opremljena z javno kanalizacijo (člen 5). Pri posrednem odvajanju padavinske vode s cestišča javne ceste v podzemne vode se mora med gladino podzemne vode in koto tal nahajati plast neomočenih sedimentov ali kamnin, debeline najmanj 1,00 m (člen 6). Upravljevec javnih cest mora zagotavljati meritve onesnaženosti padavinske odpadne vode na iztoku.

#### 4.4 Zakon o javnih cestah

Javne ceste so državne in občinske ceste. Zakon o javnih cestah (ZJC-UPB 1, 2006) določa status in kategorizacijo javnih cest, določa enotna pravila in strokovne podlage za graditev in vzdrževanje vseh javnih cest, zaradi zagotovitve čim bolj enakih pogojev za kakovosten in varen prevoz vsem uporabnikom cest na celotnem cestnem omrežju v državi, določa obvezno gospodarsko javno službo za zagotavljanje usposobljenosti teh cest za varen in neoviran promet ter ureja upravljanje, graditev, vzdrževanje in varstvo državnih cest in prometa na njih (člen 1). Javne ceste so prometne površine splošnega pomena za cestni promet, ki jih lahko vsak prosto uporablja na način in pod pogoji, določenimi s predpisi, ki urejajo javne ceste in varnost prometa na njih (člen 2). Državne ceste so v lasti Republike Slovenije, občinske ceste pa v lasti občin. Glede na pomen za promet in povezovalne funkcije v prostoru se državne ceste kategorizirajo na avtoceste, hitre ceste, glavne ceste I. in II. reda ter regionalne ceste I., II. in III. reda, občinske ceste pa na lokalne ceste in javne poti. Glede na potek v prostoru so javne ceste v naselju in ceste izven naselja (člen 3). Javne ceste morajo biti grajene in vzdrževane tako, da jih ob upoštevanju prometnih pravil in posebnih pogojev za odvijanje prometa, na primer slabih vremenskih razmer, lahko varno uporabljajo vsi uporabniki cest, ki so jim namenjene. Kadar zaradi prostorskih, okoljevarstvenih, tehničnih ali ekonomskih razlogov javne ceste ali njenega dela ni mogoče zgraditi z elementi, ki v celoti ustrezajo njenemu prometnemu pomenu in vrstam prometa, ki jim je namenjena, se lahko zgradi s slabšimi elementi, katerih vrednosti pa ne smejo biti nižje od še dopustnih za isto kategorijo javne ceste. Tako zgrajena javna cesta ali njen del mora biti opremljena s prometno signalizacijo, ki udeležence v prometu pravočasno opozarja na spremenjene razmere za varno odvijanje prometa (člen 5).

Javno cesto sestavljajo cestno telo, cestni objekti, naprave za odvodnjavanje ceste, brežine ceste, cestni svet, zračni prostor nad voziščem v višini 7 m; prometne površine zunaj vozišča, kot so: počivališča, parkirišča, avtobusna postajališča in obračališča, prostori in objekti za tehtanje in nadzor prometa, površine za pešce in kolesarje na cestišču ceste; priključki na cesto v širini cestnega sveta, prometna signalizacija in prometna oprema, cestne naprave in druge ureditve, namenjene varnosti prometa, zaščiti ceste ter zemljišč in objektov vzdolž ceste pred vplivi prometa na njej in naprave za evidentiranje prometa.



Slika 4.1: Prečni tehnični profil javne ceste

Picture 4.1: Technical cross-section of open road

Za sestavni del javne ceste se štejejo tudi zemljišča, objekti in naprave, ki jih je investitor v javno cesto pridobil ali zgradil za opravljanje rednega vzdrževanja ceste ali za opravljanje spremljajočih dejavnosti ob cesti (člen 13).

Stroške graditve ali rekonstrukcije objektov in naprav, ki posegajo v vodni prostor in so potrebni zaradi izgradnje ceste, kadar prečka vodotok ali poteka ob njem, krije investitor ceste. Vzdrževanje neposrednega zavarovanja podpornega zidu in premostitvenega objekta (brežine pod objektom in pragu pri objektu za zavarovanje temelja objekta) je sestavni del vzdrževanja ceste. Vzdrževanje objektov in naprav, ki služijo vodotoku, ter obrežnih zavarovanj in zavarovanj struge vodotoka so sestavni del vzdrževanja vodotoka (člen 36).

Da se preprečijo škodljivi vplivi posegov v prostor ob državni cesti na državno cesto in promet na njej, je ob teh cestah varovalni pas, v katerem je raba prostora omejena. Gradnja in rekonstrukcija gradbenih objektov ter postavljanje kakršnih koli drugih objektov in naprav v varovalnem pasu državne ceste so dovoljeni le s soglasjem Direkcije za ceste. Direkcija za ceste izda soglasje, če s predlaganim posegom v varovalnem pasu niso prizadeti interesi varovanja državne ceste in prometa na njej, njene širitve zaradi

prihodnjega razvoja prometa ter varovanja njenega videza. Predlagatelj nameravanega posega v varovalni pas državne ceste nima pravice zahtevati izvedbe ukrepov za zaščito pred vplivi ceste in prometa na njej. Varovalni pas se meri od zunanjega roba cestnega sveta n je na vsako stran državne ceste širok: pri avtocestah 40 m, pri hitrih cestah 35 m, pri glavnih cestah 25 m, pri regionalnih cestah 15 m in pri državnih kolesarskih poteh 5 m.

Direkcija za ceste lahko pristojnemu upravnemu organu za gozdarstvo predlaga, da se gozd vzdolž državne ceste ali v njeni bližini, ki je pomemben zaradi njenega varovanja pred drsenjem zemljišča, bočnega vetra, snežnimi plazovi in podobnega, razglasi za varovalni gozd v skladu s predpisi o gozdovih. Pravne ali fizične osebe, ki ob državni cesti pogozdujejo ali urejajo hudournike ter deroče reke, morajo sodelovati z Direkcijo za ceste in prilagoditi vrsto in obseg del tako, da se zavaruje cesta.

Za opravljanje del zunaj varovalnega pasu državne ceste, ki bi lahko povzročila spremembo vodostaja oziroma višine podzemnih voda in bi zato vplivala na stabilnost cestnega telesa, na stroške vzdrževanja ceste ali na promet na cesti, mora investitor pridobiti soglasje Direkcije za ceste. Lastniki ali uporabniki zemljišč (sosedje) ob državni cesti morajo dopustiti prost odtok vode in odlaganje snega na njihovo zemljišče, če se jim s tem ne povzroča škoda. Sosedji ob državni cesti morajo v skladu z zakonom in za odškodnino dopustiti dostop do cestnih objektov zaradi njihovega vzdrževanja, gradnjo odtočnih in ponikovalnih jarkov in drugih naprav za odvod vode od cestnega telesa (člen 63).

#### **4.4.1 Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest**

Na podlagi Zakona o javnih cestah (ZJC-UPB 1, 2006) je bil leta 1998 izdan Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest (Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest, 1998), ki določa vrste vzdrževalnih dela na javnih cestah in potrebni nivo vzdrževanosti javnih cest. Vzdrževanje cest pozimi kot zimska služba, opredeljuje pogoje zagotavljanja prevoznosti cest v zimskem času. Osnovna opravila so pluzenje snega ter posipane snega in poledice. Med obnovitvena dela spada obsežnejše postavljanje novih ali nadomestitve obstoječih cestnih naprav in ureditev, sanacije ali dograditev naprav za

odvodnjavanje, sanacije ali preureditve brežin, sanacije plazov, usadov, posedkov, izpodjedanj in drugih večjih poškodb ceste. Med klimatske obremenitve voziščnih konstrukcij štejemo vpliv temperatur in padavin. Med najpomembnejše klimatske obremenitve uvrščamo izjemne vremenske razmere, neugodne krajevne pogoje, pomanjkljivo odvodnjavanje, zmrzovanje in odtajevanje. Voda lahko pride v cestno telo od zgoraj (padavine), od spodaj (izviri) in od strani (poplave, s pronicanjem skozi bankino). Od koderkoli voda priteče v cestno telo, je nezaželena in škodljiva, še posebno, ker nastane na območju vozišča neenakomerna nosilnost.

#### **4.4.2 Pravilnik o projektiranju cest**

Pravilnik o projektiranju cest (Pravilnik o projektiranju cest, 2005) določa tehnične zahteve, pogoje in normative, ki se morajo zaradi zagotavljanja prometne varnosti in ekonomičnosti gradnje ter vzdrževanja javnih cest in njihovih elementov upoštevati pri izdelovanju projektne in tehnične dokumentacije, namenjene za gradnjo, uporabo in vzdrževanje cest.

Pri projektiranju cest se glede sestava, vsebine in oblike projektne in tehnične dokumentacije, namenjene za gradnjo, uporabo in vzdrževanje cest, uporabljajo določbe predpisov o graditvi objektov, ki urejajo izdelovanje projektne in tehnične dokumentacije, namenjene za gradnjo, uporabo in vzdrževanje objektov, ter določbe predpisov o javnih cestah, ki urejajo tehnične specifikacije. Posamezni izrazi, uporabljeni v tem pravilniku, imajo naslednji pomen: cestni jarek je jarek, ki služi za zbiranje in odvodnjavanje površinske vode s ceste in brežin ob vozišču ter podzemne vode iz cestne drenaže, koritnica in mulda sta elementa zbirnega sistema za kontrolirano odvodnjavanje površinske vode z vozišča in z kopne brežine ter se priključujeta v cestni jarek ali cestno kanalizacijo, premostitveni objekti so gradbeni objekti za premostitev ovir v prostoru, razvrščeni so po vrsti izvedbe na viadukte, mostove, nadvoze, podvoze, podhode, nadhode in prepuste, podporne in oporne konstrukcije so konstrukcije, ki zagotavljajo stabilnost cestnega telesa ali brežine ob cesti in omogočajo zmanjšanje posega v obcestni prostor (3. člen).

Površinska voda z vozišča se odvodnjava preko bankine v cestni jarek ali razpršeno po terenu in v koritnico ali muldo, ki poteka ob robu vozišča in se priključuje v jarek ali kanalizacijo. Odtok površinske vode z utrjene površine cestišča na območju varovanega

vodozbirnega območja se uredi skozi vodotesno kanalizacijo preko objektov za zadrževanje in čiščenje in se priključi na bližnji odvodnik. Količina odtoka površinske vode s ceste se določi s količino padavin na prispevne površine ceste z upoštevanjem koeficientov odtoka.

Premostitveni objekt se projektira na osnovi geometrijski elementov osi in dimenzij prečnega profila ceste ter glede na kot križanja, pogoje premostitve in geotehnične podatke. Geometrijske elemente osi in dimenzije prečnega profila ceste v območju premostitvenega objekta določi projektant ceste v sodelovanju s projektantom objektov in geomehanikom. Odprtine mostu in prepusta se določajo na osnovi hidravličnega računa relevantnega pretoka vodotoka. Kot križanja osi objekta z osjo premostitve je praviloma  $90^\circ$  oziroma v mejah od  $45^\circ$ – $135^\circ$ . Niveleta v območju cestnega objekta je od 0,5% do 4% in mora omogočati dovolj prostora za racionalno izbiro konstrukcijske in zaščitne višine (člen 50). Cestni prepust je namenjen pretoku površinske vode pod cestiščem. Je v obliki cevi, oboka ali škatle, zgrajen iz betonskih elementov, armiranega betona, kamna ali opeke. Dimenzija svetle odprtine prepusta se določi s hidravličnim računom. V cevnem prepustu je nagib nivelete dna prilagojen niveleti korita vodotoka. Minimalni padec prepusta je 0,5%. Vrsta in dimenzije podporne in oporne konstrukcije se določijo na osnovi geotehničnih raziskav in geomehanskega računa stabilnosti terena.

Niveleta vozišča poteka nad koto gladine vodotoka ali vodne akumulacije, tako da ni preplavljena pri pogostnosti pojava visoke vode za  $Q_{20}$ . Prosta odprtina pod mostom in v cestnem prepustu se dimenzionira za pretočno količino pogostnosti pojava visoke vode  $Q_{100}$  na cesti s projektno hitrostjo večjo od  $60 \text{ km/h}$  in ceste v naselju ter za pojav visoke vode  $Q_{(20)}$  na ostalih cestah. Varnostna višina nad gladino vodotoka je minimalno 1,00 m za hudourniške vodotoke in 0,50 m za ostale vodotoke (člen 60).

#### **4.5 Zakon o varnosti v železniškem prometu**

Zakon o varnosti železniškega prometa (ZVZelP, 2004) določa pogoje za varen, urejen in neoviran železniški promet. V progovnem pasu se smejo graditi le objekti, napeljave in naprave javne železniške infrastrukture.



#### **4.5.1 Pravilnik o pogojih za graditev gradbenih objektov ali drugih objektov, saditev drevja ter postavljanje naprav v varovalnem progovnem pasu in v varovalnem pasu ob industrijskem tiru**

Pravilnik (Pravilnik o pogojih..., 1987) določa pogoje za graditev in rekonstrukcijo gradbenih objektov in drugih objektov ter postavljanja naprav v 200 m širokem zemljiškem pasu ob železniški progi (varovalni progovni pas) in v 80 m širokem zemljiškem pasu ob industrijskem tiru (varovalni pas ob industrijskem tiru), računano od osi skrajnih tirov (člen 1).

V varovalnem progovnem pasu in varovalnem pasu ob industrijskem tiru je dovoljeno graditi gradbene objekte ali druge objekte in postavljati naprave na oddaljenosti od železniške proge in industrijskega tira, določeni s tem pravilnikom, glede na njihovo vrsto in namen in ob uporabi ukrepov, s katerimi se zagotavlja varnost prometa, ljudi in premoženja. Razdalja med najbližjo točko cestnega telesa in osjo skrajnega tira se določi za primer železniške proge v nasipu ali useku nižjem od nivelete ceste.

#### **4.5.2 Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja proge slovenskih železnic**

Pravilnik (SJŽ št. 315, 1981) vsebuje v poglavju I. določbe o vzdrževanju spodnjega ustroja prog na omrežju JŽ. Opisuje vzdrževanje zemeljskih tal, razdeljeno za planum proge, nasipe, useke, tamponski sloj, pobočja, območje proge, jarke za odvodnjavanje vode iz zemeljskih tal, obloge pobočij, obložni zidovi, podporni zidovi, drenaže in biološko-tehnična dela. V poglavju VI. je obdelano vzdrževanje objektov za zaščito proge pred površinsko vodo in podnebnimi vplivi razdeljeno v poglavja objektov za zaščito pred naplavinami hudournikov, biološko-tehničnih del in ukrepov, objektov za zavarovanje rečnih tokov, rečno korito in regulacijski objekti pri mostovih, zaščita mostov pred ledom, zaščita prog pred vplivom morskih in jezerskih valov, zaščita proge pred zameti in snežnimi plazovi ter vetrom.

#### **4.6 Zakon o gozdovih**

Zakon o gozdovih (Zakon o gozdovih, 1993) ureja varstvo, gojenje, izkoriščanje, in rabo gozdov ter razpolaganje z gozdovi kot naravnim bogastvom s ciljem, da se zagotovi

sonaravno in večnamensko gospodarjenje v skladu z načeli varstva okolja in naravnih vrednot, trajno in optimalno delovanje gozdov kot ekosistema ter uresničevanje njihovih funkcij. Gozd je zemljišče, poraslo z gozdnim drevjem v obliki sestoja ali drugim gozdnim rastjem, ki zagotavlja katero koli funkcijo gozda. Gozd po zakonu o gozdovih so tudi vsa zemljišča v zaraščanju, ki so kot gozd določena v prostorskem delu gozdnogospodarskega načrta. Funkcija gozdov je ekološka (varovanje gozdnih zemljišč in sestojev, hidrološka, biotopska ter klimatska), socialna (zaščitna funkcija – varovanje objektov, rekreacijska, turistična, poučna, raziskovalna, higiensko – zdravstvena funkcija, funkcija varovanja narave in kulturne dediščine in drugih vrednot okolja), obrambna, estetska in proizvodna funkcija (lesno proizvodna funkcija, pridobivanje drugih gozdnih dobrin ter lovno gospodarska funkcija).

Gozda infrastruktura so gozdne prometnice (gozdne ceste, vlake in stalne žičnice) in drugi objekti v gozdovih, namenjeni predvsem gospodarjenju z gozdovi. Gozdne prometnice se morajo načrtovati, graditi in vzdrževati tako, da se ob upoštevanju tehničnih, gospodarskih in ekoloških pogojev gozdna tla, rastlinstvo in živalstvo čim manj prizadenejo. Pri načrtovanju gozdnih cest je treba poleg pomena gozdne ceste za gospodarjenje z gozdovi in prilagajanja naravnem okolju upoštevati tudi obstoj in razvoj višinskih kmetij ter turistične in rekreativne potrebe. Gozdne prometnice se morajo načrtovati, graditi in vzdrževati, tako da se ne ogrozijo vodni viri, povzročijo erozijski procesi, prepreči odtok visokih vod iz hudournikov, poveča nevarnost plazov, poruši ravnotežje na labilnih tleh, poslabša odtok padavinskih vod, tako da bi bila ogrožena kmetijska ali druga zemljišča ali da bil ogrožen obstoj gozda ali onemogočen njegov obstoj, prizadenejo območja pomembna za ohranitev prosto živečih živali, prizadene naravna in kulturna dediščina in ogrozijo druge funkcije oziroma večnamenska raba gozdov. Gozdne ceste so sestavni del gozda in so javnega značaja. Praviloma jih lahko uporabljajo tudi drugi uporabniki, morajo pa biti označene, da so gozdne ceste in da jih drugi uporabniki uporabljajo na lastno odgovornost (člen 39). Vožnja v gozdu zunaj gozdnih cest je dovoljena le za gospodarjenje z gozdovi ali za reševanje ljudi oziroma premoženja. Gozdovi, ki v zaostrenih ekoloških razmerah varujejo sebe, svoje zemljišče in nižje ležeča zemljišča, in gozdovi, v katerih je izjemno poudarjena katera koli druga ekološka funkcija, se razglasijo za varovalne gozdove. (člen 43) so zavarovano naravno bogastvo.

#### **4.6.1 Pravilnik o gozdnih prometnicah**

Pravilnik o gozdnih prometnicah (Pravilnik o gozdnih prometnicah, 2004) je bil sprejet na podlagi Zakona o gozdovih (Zakon o gozdovih, 1993) in določa pogoje za načrtovanje, projektiranje, gradnjo, vzdrževanje, način uporabe in evidentiranje grajenih gozdnih prometnic ter načrtovanje, pripravo, uporabo in vzdrževanje nagrajenih gozdnih vlak z vidika gospodarjenja z gozdovi ter izvajanja posegov v prostor (člen 1). Gozdna infrastruktura so gozdne prometnice (gozdne ceste, vlake in stalne žičnice) in drugi objekti v gozdovih, namenjeni predvsem gospodarjenju z gozdovi. Z režimom uporabe gozdne ceste se usmerja oziroma določa njeno rabo tako, da se zagotavlja optimalno večnamensko gospodarjenje z gozdom. Glede na namen, rabo in tehnične elemente se gozdne ceste razvrščajo v naslednje kategorije (člen 26).

#### **4.6.2 Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim namenom**

Uredba (Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim pomenom, 2005) je bila izdana na podlagi Zakona o gozdovih (Zakon o gozdovih, 1993). Uredba določa varovalne gozdove in gozdove s posebnim namenom z režimom gospodarjenja s temi gozdovi. Varovalni gozdovi so gozdovi, ki varujejo zemljišča usadov, izpiranja in krušenja, gozdovi na strmih obronkih ali bregovih voda, gozdovi, ki so izpostavljeni močnemu vetru, gozdovi, ki v hudourniških območjih zadržujejo preneglo odtekanje vode in zato varujejo zemljišča pred erozijo in plazovi, gozdni pasovi, ki varujejo gozdove in zemljišča pred vetrom, vodo, zameti in plazovi, ter gozdovi na zgornji meji gozdne vegetacije (člen 2).

Pri gospodarjenju z varovalnimi gozdovi mora Zavod za gozdove zagotavljati: pravočasno obnovo oziroma posek prestarega drevja, malo površinsko izvajanje sečenj, puščanje primerno visokih panjev pri poseku drevja na plazovitih območjih in območjih, kjer je nevarnost snežnih plazov, ročno spravilo oziroma spravilo z žičnimi napravami, sanacijo poškodovanih tal zaradi preprečevanja erozije, odstranjevanje drevja iz hudourniških strug in pravočasno izvedbo vseh gozdno gojitvenih del, ki zagotavljajo ohranitev in stabilizacijo varovalne vloge gozda (člen 5).

## **5 OBDELAVE IN UGOTOVITVE**

V nalogi sta merjalno obdelana dva posega v vodotok in sicer zaradi rekonstrukcije državne ceste R3-633/1099 ob potoku Jereka in gradnje mostu na državni cesti R3-633/1098 preko potoka Ribnica v Srednji vasi. Povodji obeh potokov sta prikazani v prilogi 1.

### **5.1 Potok Jereka**

Obravnavani del struge je razdeljen na odsek 1, kjer je obstoječa prečna pregrada in odsek 2, kjer je problematična pretočna sposobnost struge. Pretočna sposobnost struge na spodnjem odseku 1 med profilom št. 1 in profilom št. 7 ni problematična. Ustalitvena pregrada se nadviša, hkrati pa se hidravlično ugodno oblikuje prelivno krono. Z nadvišanjem bo dosežen dvig dna na gorvodnem odseku, ki ugodno vpliva na stabilnost opornih zidov ceste. Obnovljeni in nadvišani podporni zidovi so ustrezno temeljeni pod dno struge. Povečanje prevodnosti struge na zgornjem odseku 2 od profila št. 17 do profila št. 21 je zagotovljeno z očiščenjem pretočnega profila z odstranitvijo grobih plavin z dna struge, predvsem pa odstranitvijo velikega skalnega bloka pod profilom št. 18. Skalni blok se odstrani le do višine očiščenega dna struge, preostali del skale pa deluje kot naravni talni prag. Izračun pričakovanih visokih voda in pretočne sposobnosti pred in po posegih v strugo je prikazan v prilogi 2. Skica prečnega prereza obstoječe pregrade je v prilogi 3. Pregledna karta povirja potoka Jereka je prikazana v prilogi 4. Situacija poteka ceste in struge je vrisana v prilogah 5 in 6. Vzdolžni prerez obstoječega stanja dna struge z vrisanimi prečnimi pragovi je prikazan v prilogi 7. V prilogi 8 je skupni prikaz poteka ceste in dna struge po projektu.

#### **5.1.1 Izračun pričakovanih visokih voda**

Zlivno območje hudournika Jereka meri do obravnavane ureditve 5,48 km<sup>2</sup>. Za poenostavljen izračun pričakovanih visokih voda smo uporabili formulo Kresnika. Vrednost 0,60 za odtočni koeficient  $\alpha$  smo določili glede na poraščenost ter geološke in geomorfološke značilnosti zlivnega območja. Količina pretoka na ta način izračunanih

pričakovanih visokih voda (priloga 2) znaša  $Q_{max} = 37.04 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pretočnost profilov je računana po Manningu, s Pintarjevo redukcijo hitrosti vode, s privzetim koeficientom hrapavosti  $K = 15$  za naravno strugo pred posegi in koeficientom hrapavosti  $K = 30$  po čiščenju dna in odstranitvi skalnega bloka. Obstoječi vzdolžni padec nivelete struge je 8 %. Zmogljivost pretočnega profila na spodnjem odseku je  $53.48 \text{ m}^3/\text{s}$ , ob povprečni profilni hitrosti vode  $4.14 \text{ /s}$ , in na zgornjem odseku  $42.98 \text{ m}^3/\text{s}$ , ob povprečni profilni hitrosti vode  $4,07 \text{ m/s}$ .

### 5.1.2 Opis prečnih profilov

V prilogi 9 prečnih profilov obstoječega stanja pred rekonstrukcijo so prikazana vplivna področja zunanje meje priobalnega zemljišča struge vodotoka 2. reda, ki znaša 5 m, (ZV-1 2002), člen 14); varovalni pas državne ceste je 15 m (ZJC-UPB, 2006, člen 47) in splošno vplivno področje narave (bregov), katere varuje Zakon o varstvu okolja (ZVO-1, 2004), ki pa ne določa enoznačno širine varovalnega pasu, saj naj bi bilo potrebno varovati naravo v celoti. Na določenem področju sovpadajo interesi prometnic, vodotokov, narave,... Rešitev naj bi bila v uskladitvi zahtev tako, da bo med vsemi možnimi rešitvami izbrana optimalna rešitev (med vsemi zlemi naj se izbere najmanjše zlo!) tako za strugo, za cesto kot za naravo. V projektantskem prerezu (priloga 10) je prikazana rešitev brez posega v obstoječo strugo, ki zato zahteva manj medresorskega usklajevanja. Projektantska rešitev (prerez) ne upošteva zahtev struge vodotoka; boji se poplave prometnice, zato dodatno poplavno varnost zagotovi z uporabo betonske montažne ograje višine 0,75m. S tem naredi vzdolžno korito tudi na cesti, kar oteži vzdrževanje, saj se snega ne more odriniti v strugo! V predlaganem prerezu (priloga 11) je prikazana rešitev poteka ceste in ureditve struge vodotoka tako, da je rešitev sprejemljivejša za okolje z manjšimi gradbenimi posegi. Predlog uskladitve interesov ceste in struge vodotoka temelji na dejstvih, da bo vsa voda iz zaledja potoka Jereka in Jerečca tekla skozi sotesko in da so dopustne občasne zapore državne regionalne ceste do 2 uri. (Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest, 1998, člen 31) Glede na pomembnost ceste (regionalna cesta 3. reda) je dvajsetletna poplavna varnost sprejemljiva (Pravilnik o projektiranju cest, 2005, člen 60). V primeru, ko voda prestopi bregove, bi bila cesta le za kratek čas poplavljen in uporabljena kot del struge. Glede na obdelavo (cesta ima levo in

desno betonske zidove; vozišče asfaltirano) cesta ne bi bila zaradi toka vode poškodovana. Z uporabo predlagane rešitve z upoštevanjem možnosti poplave cestišča, se znižajo oporni zidovi, pa tudi podporni zidovi so manjših dimenzij. Z namestitvijo jeklene varovalne ograje namesto polne betonske ograje se omogoči vzdolžni odziv snega skozi ograjo v potok in s tem enostavnejše zimsko vzdrževanje prevoznosti ceste z zadostno širino za dvosmerni promet. Zima traja v Bohinju vsaj 6 mesecev, kar je za prevoznost ceste večja težava, kot pa pričakovana krajša zapora ceste, zaradi odtočnih količin večjih od pričakovanih dvajsetletnih poplavnih voda ( $Q_{20}$ ).

### 5.1.3 Tehnične rešitve

Podatki o karakteristikah zemljine, pretočnih količinah in poteku državne ceste je treba v celoti privzeti kot nespremenljive danosti. Končna rešitev je odvisna od poteka ukrepov vzdolž ceste in struge hudournika Jereka. Le upoštevanje medsebojnega delovanja struge - potok v omejenem prostoru, bo pripeljalo do ustrezne rešitve tako za strugo kot za cesto in končno za celotno obdelovano področje. Sedaj spodkopani temelji so posledica poglobljanja struge, v času gradnje so bili verjetno zidovi po gradbeniški praksi temeljeni najmanj 1,00m pod takratnim dnom struge. Glede na predlagano rešitev, je upoštevan predviden ugoden vpliv prodonosnosti. Dno struge se bi zvišalo največ do zagotovitve pretoka  $Q_{100}$  glede na potek nivelete ceste. Po zasutju dna gorvodno od pregrade bi bile podporne konstrukcije ob cesti nižje in enostavnejših oblik (enostavne gradbene konstrukcije).

V vodnogospodarskih smernicah je predvideno da je možno nadvišanje pregrade, možnost dodatnega talnega praga, čiščenje pretočnega profila od cestnega profila št. 17 do profila št. 21 in odstranitev skalnega bloka v strugi pod profilom št. 18. Dolvodno od profila št. 17 v dno struge poseganje ni dopustno. Glede na dimenzioniranje pretočnega profila v prilogi št. 12 je projektirana spremenjena oblika profila, katerega naj bi ga zagotavljali na vsej dolžini predvidenega odseka. Koeficient hrapavosti, kot odločujoč faktor pri zagotavljanju pretočnosti, privzamem v mejah od  $K = 20$  do  $K = 35$ . Tako naj bi pričakovana hitrost ne bi bila večja kot 4.00 m/s. Za kasnejše doseganje ravnovesja struge v odvisnosti od dotoka plavin in prodonosnosti se naj bi izdelala talna pregrada kot vmesni profil. Nad pregrado se bo oblikovala z naravnim tlakovanjem posteljica dna, veliki delci se bodo odložili, v transportu plavin bodo le drobnejši delci. Na strmejšem odseku se bo ohranila naravna drča,

na preostalem delu pa zgradili prečni pragovi. Tako se bo doseglo pričakovano zaplavitvev prostora za prečnimi pragovi in dvig nivelete. Peta nasipa ceste se bo z dvigom dna struge dodatno utrdila, saj se bo nasipna brežina skrajšala, brežina pa bo lahko izdelana v stabilnem položnejšem nagibu.

#### **5.1.4 Drugi vidiki posegov**

Gradbena dela morajo upoštevati številne zahteve od doseganja stabilnosti in tudi do doseganja ciljev hidrotehnike in vodnega gospodarstva, kot tudi ciljev varovanja vodnega življa. Izvajati se morajo tako, da ne poslabšajo razmer v biotopu do takšne stopnje, da bi v njem povzročila nepopravljive posledice. Predlagani posegi le na eni strani vodotoka omogočijo popolno ohranjanje nasprotne brežine in z njo vse obrežne vegetacije (Bertok, 1989).

### **5.2 POTOK RIBNICA**

Obravnavana je premostitev potoka Ribnica v Srednji vasi v Bohinju. Pretočna sposobnost struge ni vprašljiva. Mostna konstrukcija leži na zgornji terasi povprečno 7.00 m nad dnom struge. Ustalitvena pregrada dolvodno se sanira, nadviša, hkrati pa se hidravlično ugodno oblikuje prelivno krono. Z nadvišanjem bo dosežen dvig dna na gorvodnem odseku, ki ugodno vpliva na stabilnost krilnih zidov mostu. Obnovljeni in nadvišani podporni zidovi so ustrezno temeljeni pod dno struge. Povečanje prevodnosti struge je zagotovljeno s širino struge 10.00 m. Izračun pričakovanih visokih voda s skico in pretočne sposobnosti mostne odprtine je prikazan v prilogi št. 14. Povodje potoka Ribnica je prikazano na pregledni situaciji v prilogi 1.

#### **5.2.1 Izračun pričakovanih visokih voda**

Zlivno območje hudournika Ribnica meri do obravnavanega mostu 11.33 km<sup>2</sup>. Za izračun pričakovanih visokih voda smo uporabili formulo Kresnika. Vrednost 0.70 za odtočni koeficient  $\alpha$  smo določili glede na poraščenost ter geološke in geomorfološke značilnosti zlivnega območja. Količina pretoka na ta način izračunanih pričakovanih visokih voda (priloga št. 13) znaša  $Q_{\max} = 65.65 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pretočni profil mostu je dimenzioniran po

Manningu s Pintarjevo redukcijo hitrosti vode s privzetim koeficientom hrapavosti  $K = 28$ . Projektirani padec nivelete struge je 1% (manjši kot obstoječi), projektirana širina struge pod mostom pravokotno na os struge je enaka obstoječi, to je 10.00 m. Prav tako je nagib lica novih mostnih opornikov enak obstoječemu 10:1. Zahtevana minimalna višina pretočnega profila mostu znaša po izračunu v prilogi št. 14 2.30 m z 1.00 m rezervne višine za morebitne plavine, kar je skupaj 3.30 m. Zmogljivost pretočnega profila je  $67.13 \text{ m}^3/\text{s}$  ob povprečni profilni hitrosti vode 2.85 m/s. V prilogi št. 16 je dimenzioniranje podslapja potoka Ribnice za prečnim pragom pod mostom.

### 5.2.2 Opis prečnih profilov

Projektirana širina prečnega prereza v območju urejanja struge je enaka razpetini obstoječega mostu 10.00 m. Prav tako je nagib brežin 10:1 enak na vsem območju, tudi novih mostnih opornikov, obstoječemu. Svetla širina struge v območju mostu je  $L_{SV} = 10.00$  m in višina  $H_{SV} = 3.30$  m. Dno struge v mostni odprtini ima prečni nagib 3 % od obrežnega opornika proti sredini struge. Zahtevana minimalna višina pretočnega profila mostu znaša po izračunu (priloga 14) 2.30 m z 1.00 m rezervne višine za morebitne plavine, kar je skupaj 3.30 m. Z ozirom na visoko niveleto nove ceste (na koti 280.00), kota spodnjega roba konstrukcije ne vpliva na pretok potoka. Zmogljivost pretočnega profila je  $67.13 \text{ m}^3/\text{s}$  ob povprečni profilni hitrosti vode 2.85 m/s.

### 5.2.3 Tehnične rešitve

Sanacija in dograditev opornih zidov je skladna z vodnogospodarskimi smernicami. Kamniti prag stopnje višine 0.80 m na dolvodni strani v oddaljenosti 15.00 m od osi mostu se ohrani. Za disipacijo energije je predvidena izgradnja novega podslapja (tolmuna) poglobitve (a) 0.60 m in dolžine ( $L$ ) 10.00 m izračunanega v prilogi 6,15. Zavarovanje dna se izvede s suho zložbo kamenja velikosti do  $1.00 \text{ m}^3$ . Podslapje je zaključeno z betonskim talnim pragom visokim 1.80 m in založitvijo dna struge za piloti v dolžini 3.00 m s kamnom premera  $\emptyset 50 \text{ cm} - \emptyset 60 \text{ cm}$ . Višina vode v pretočnem profilu v odvisnosti od koeficienta hrapavosti in enakem pretoku je podana v tabeli. Voda pod mostom bo lahko imela večje hitrosti, kar posredno pomeni močnejše utrditve podslapja.



Glede na Froudovo število med 2.25 in 3.53 nastopi oscilirajoči (2.5 ÷ 4.5) vodni skok.

Tabela 5.1: Dolžina podslapja ob višini stopnje 1.40 m

Table 5.1: Plunge pool length at the height gradient 1,40 m

	<b>q<sub>100</sub> = 6,6</b>	<b>q<sub>20</sub> = 4,4</b>	<b>q<sub>10</sub> = 3,7</b>	<b>q = 1,5</b>
<b>L<sub>1</sub></b>	7,4 m	6,43	6,06	4,18
<b>L<sub>2</sub></b>	9,88 m	8,13	7,67	6,45
<b>L<sub>3</sub></b>	13,98 m	12,15	11,44	7,89

Tabela 5.2: Odtočne razmere dolvodno

Table 5.2: Downstream run-off situation

<b>K</b>	<b>h [m]</b>	<b>v [m/s]</b>
25	2.35	2.57
30	2.10	3.01
35	1.90	3.43

Določitev koeficienta hrapavosti naravne, spodnje struge in urejene struge je prikazano v prilogi 17. Glede na različne metode je velikost koeficienta hrapavosti med 16.67 (najmanj ugodno) in 32.26 (ugodno). Ob upoštevanju izbranega koeficienta hrapavosti  $K = 25$  je v strugi hitrost  $v = 2.13$  m/s, kar je običajna hitrost, mogoče celo prenizka glede na hudourniški značaj struge. Hidravlični skok se je določil glede na velikost Froudovega števila (priloga št. 18)  $F_r = 1.79$ . Vodni skok je slaboten z disperzijo energije do 15 %. Glede na podatke (Steinman, 1992) se dejanski vodni skok ne pojavi.

Dolžina podslapja je prikazana v tabeli (Tabela 5.3), podrobnejši prikaz izračuna pa v prilogi št. 19.

Izračun podslapja v odvisnosti od podpornih sil (Vischer, 2002) z izenačitvijo energij je prikazan v prilogi št. 19 in sicer za primer poglobitve praga višine 0.60 m in za primer brez poglobitve, ob upoštevanih podatkih spodnje struge:  $K = 25$ ,  $v = 2.57$  m/s,  $Q = 65.65$  m<sup>3</sup>/s.

Tabela 5.3: Skupna dolžina podslapja po različnih metodah

Table 5.3: Total length of plunge pool using various methods

metoda	domet slapu $L_1$ [m]	od $h_1'$ do $h_2''$ $L_2$ [m]	skupaj dolžina [m]
pravokotni prerez	3.80		
široki prag	3.92		
Kinematika	4.87		
Steinman ( $h_1', h_2''$ )	3.90	5.45	9.35
Steinman ( $q$ )	3.90	10.00	13.90
Steinman ( $h_1', h_2''$ )	3.90	10.29 (brez p.)	14.19
Chow	3.90	7.26	11.16

Tabela 5.4 : Skupna dolžina podslapja ob različnih podpornih silah

Table 5.4: Total length of plunge pool at various supporting forces

možnosti	$L_1$	$L_{odb}$	$L_2$	skupaj
odgnani vodni skok	2.62	4.48	9.98	17.08
popolni vodni skok	3.89	/	7.20	11.09
potopljen vodni skok	3.89	/	6.19 do 8.15	10.08 do 12.04

Utrditev podslapja z vodno blazino (Jevtić, 1978) in brez vodne blazine je izračunana v prilogi št. 20. Utrditev podslapja v zloženem kamenju je prevelika če predpostavimo, da so natezne napetosti kamenja v betonu zelo majhne, največ 10% tlačne trdnosti. Bistveno ugodnejše bi zato bilo privzeti natezne napetosti z armaturo oziroma zgraditi poglobitev podslapja. Protiprag višine 0.60 m povzroči, da se prične vodni skok takoj ob koncu slapa in zaježbena dolžina ne nastopi. Dolžina podslapja po različnih avtorjih je od 9.35 m do 14.19 m. Izračunane dolžine podslapja z upoštevanjem podpornih sil so od 10.08 m do 12.04 m; brez vodne blazine pa 17.08 m. Glede na različne rezultate je boljše izbrati poglobitev 0.60 m in s tem krajše podslapje ob popolnem vodnem skoku 11.00 m. Debelina

izbrane utrditve s kamenjem v betonu je skupne debeline 1.00 m.

Tabela 5.5: Debelina utrditev podslapja

Table 5.5: Thickness of plunge pool consolidations

<b>Predpostavljene utrditve</b>	<b>Avtor</b>	<b>Izračunana debelina (m)</b>
vodna blazina, kamenje v betonu	Jevtić, 1978	0.58
brez vodne blazine, kamenje v betonu	Jevtić, 1978	1.68
prosto zloženo kamenje, prodniki	Isbach, Heineman, 2003	$d_{50} = 0.51$ $d = 1.5 d_{100} = 1.31$

Z izgradnjo prečnega praga se oteži migracija vodnega življa. Previsoka vodna stopnja lahko prekine ribje drstne poti, zato je potrebno preveriti možnost izgradnje ribje steze. Obrežna vegetacija je ob izgradnji pragu obojestransko poškodovana.

### 5.3 Skupne ugotovitve

Obvodni prostor se rabi za prometnice, kmetijsko obdelovanje in poselitev. Ob umestitvi prometnice v obstoječ prostor nastane potreba po usklajevanju z obstoječimi uporabniki prostora. Poleg struge odvodnika se mora pridobiti prostor za prometnico. Dodatno se mora stabilizirati niveletni potek struge, saj spreminjanje reliefa s poglobljanjem ogroža nosilno telo prometnice. Celostno ukrepanje prinaša vzajemne (sinergijske) učinke.

Kot primer strokovne podlage, primerne za usklajevanje z drugimi uporabniki prostora bodo dane v primerjavi zasnove z vzdolžnimi ali prečnimi zgradbami s pomočjo analize SWOT, kar bo prikazano v nadaljevanju.

#### 5.3.1 Presoja različnih zasnov s SWOT analizo

V presojo s SWOT analizo sta privzeti prikazani zasnovi ureditve struge vodotoka ali z vzdolžnimi ali s prečnimi zgradbami. V naslednji tabeli št. 5.6 so našteje prednosti,

pomanjkljivosti, priložnosti in tveganja za posamezno rešitev.

Vzdolžna zgradba se lahko zgradi z minimalnimi posegi v vodotok. Ob uporabi pilotnih sten dejansko ni posega v strugo, pred nepredvideno poglobitvijo struge pa se temelji globlje, izdelava se daljše pilote. Cenovno je rešitev neugodna, rešuje zgolj zahteve prometnice po zadostnem prostoru za zgraditev cestišča, ne glede na možnosti istočasne ureditve struge. Prečne zgradbe zagotovijo zadostno površino tako za prometnico kot za strugo vodotoka, ki ga obenem stabiliziramo z utrditvijo brežin, zaščito dna struge, omogočimo odvzem vode itd. Vsak poseg v strugo vodotoka ob izgradnji prečnih zgradb spremeni in poslabša režim vode v tleh, relief, izgled, zmanjša prehodnost poti živečih bitij v vodi. Ravno tako vzdolžne zgradbe zaščitijo samo en breg struge, ostro ločijo prometnico od in strugo vodotoka, otežkočijo dostop do struge in onemogočijo širitev cestnega telesa. Vzdolžne zgradbe omogočajo fiksne pritrditve komunalnih vodov, utrjen in urejen robni venec z varovalno ograjo, prečne zgradbe po zasutju in utrditvi zaledja pregrad pa omogočijo izboljšanje situativnega poteka prometnice. Ob zadostni globini temeljenja vzdolžne konstrukcije je majhna verjetnost porušitve konstrukcije zaradi spodkopavanja temeljnih tal. Stabilnost prečnih zgradb lahko ogrozi tolmun za podslapjem, brez nizvodne stabilizacije niveleta struge grozi prečni zgradbi ravno tako izpodkopanje temeljnih tal.

Tabela 5.6: SWOT primerjava za vzdolžno in prečno zgradbo  
 Table 5.6: SWOT comparison for longitudinal and transverse construction

Vzdolžna zgradba	Prečna zgradba
<b>A. PREDNOSTI</b>	
Majhen poseg v vodotok Utrjena brežina Gradnja v suhem Temeljenje na pilotih, gradbena jama nad projektnimi visokimi vodami Poseg samo v območju premostitve	Majhna gradbena površina Stabilizirana niveleta Omogočena sekundarna raba Vode (odvzem vode, MHE, namakanje, ribogojstvo) Zaščita dna in brežin na vplivnem področju Stabiliziranje brežin Ugodni vpliv na pogoje za življenje vodnega živilja (Bertok, 1989)
<b>B. POMANKLJIVOSTI (slabosti)</b>	
Zahtevna statična analiza Občutljiv na poglobljanje dna struge Zapora prometnice v času gradnje Zaščita samo enega brega struge Večje ogrožanje nasprotnega brega Reliefna ločitev ceste in struge potoka Otežkočen dostop do struge Zelo težavna širitev cestnega telesa	Zahtevna statična analiza Gradnja v vodi Zmanjšanje prehodnosti poti živih bitij Sprem. v vodnih biotopih (Bertok, 1989) Sprememba režima vode v tleh Sprememba izgleda, reliefa
<b>C. PRILOŽNOSTI</b>	
Fiksne pritrditve komunalnih vodov	Sekundarni odvzem vode Odvzem plavja, plavin Rečni breg dostopen uporabnikom ceste Izboljšanje situativnega poteka ceste
<b>D. TVEGANJA (nevarnosti)</b>	
Poglobitev struge, posledica porušitev konstrukcije pri plitvem temeljenju Faktor varnosti je zmanjšan	Nastanek tolmana za podslapjem, posledica zdrs konstrukcije Preprečitev migracijskih poti rib

### **5.3.2 Uporabnost SWOT analize za obravnavane primere**

Izvedena je bila primerjava toge zgradbe v in ob strugah potoka Jereka in Ribnica. Pridobitev prostora za prometnico in vodotok Jereko bi bila možna z razširitvijo prereza struge, z vzdolžnim podpornim zidom ali s prečnim pragom. Razširitev prereza z namenom zmanjšanja strižnih sil in zagotovitvijo stabilnega rečnega odseka ni bila mogoča zaradi ozke doline, velikega padca, rečnega nanosa plavin in geologije. Zasnova z vzdolžnim podpornim zidom je bila obdelana v projektu rekonstrukcije ceste s sanacijo podpornih zidov brez posega v strugo vodotoka. Zasnova s prečnim pragom je bila obdelana v nalogi s celovitim upoštevanjem obstoječega stanja struge in poteka nivelete prometnice. Zasnova zaščite brežin Ribnice je bila v projektu rešena z vzdolžnimi podpornimi zidovi, prečnim pragom in tlakovanjem dna struge. Zasnova s prečnim pragom je bila temeljito obdelana v nalogi z upoštevanjem stanja struge na daljšem odseku in ne zgolj v območju mostu.

Iz analize je razvidno, da so tehnično prečne zgradbe v obliki pragov v ozkih dolinah ugodnejše kot pa vzdolžne zgradbe v obliki obrežnih zavarovanj. V primeru širokih dolin z meandrirano strugo je primernejša tehnična rešitev z vzdolžno zgradbo postavljeno vzporedno s prometnico. Iz naravovarstvenega vidika naj bi brežine zavarovali samo na kritičnih odsekih s konstrukcijami sposobnimi prevzeti projektne (dejanske) vlečne sile. Struge vodotokov naj ostanejo dovolj široke, da ne povečamo vodi hitrosti in z njo povezane rušilne sposobnosti.

### **5.3.3 Primerjava gradbenih količin med prečnimi in vzdolžnimi konstrukcijami**

Količinska primerjava različnih rešitev zagotovitve prostora za prometnico potekajočo ob potoku Jereka na dolžini 220 m' je prikazana v prilogi št. 22.

Iz primerjave bistvenih gradbenih količin je razvidno, da je pri prečnih zgradbah poraba betona vsaj trikrat manjša, površina zaščite bregov dvakrat večja (utrditev obeh bregov!) in potrebnost kamnite obloge dvakrat manjša od rešitve z vzdolžnimi konstrukcijami. Dodatno je po izgradnji prečnih zgradb omogočen dostop do struge, del prometnice pa ni utesnjen z zaključkom vzdolžne zgradbe temveč zvezno prehaja v brežino. Delna zapora ceste pri

gradnji vzdolžne konstrukcije traja več mesecev, brez prekinitev med časom gradnje, prečne konstrukcije pa se zgradijo z občasnimi nekaj dni trajajočimi krajšimi delnimi cestnimi zaporami. Manjša gradbišča prečnih pregrad morajo stalno upoštevati pretok vode, saj leži gradbišče vzdolžne zgradbe iznad vplivov vodotoka, v suhem. Količine so primerjane le neposredno, zato je potrebno analizirati še druge vidike (dostopnost gradbišča, gradnja v suhem, cestne zapore, itd.).

Tabela 5.7: Primerjava gradbenih količin  
 Table 5.7: Comparison of building quantities

Osnovne količine	Prečna zgradba	Vzdolžna zgradba
prostornina pregrad	152 m <sup>3</sup>	546 m <sup>3</sup>
Podporni zidovi	216 m <sup>3</sup>	1104 m <sup>3</sup>
Zaščita bregov	1320 m <sup>2</sup>	660 m <sup>2</sup>
Kamnita obloga prestrmih brežin	814 m <sup>2</sup>	1574 m <sup>2</sup>
Dolžina prometnice brez podpornih zidov	67 m <sup>1</sup>	-
Dostopnost struge	omogočena	ni možna
Dostop do struge v času gradnje	otežkočen	se ne rabi
Delne zapore ceste v času gradnje	občasne (6 x 3 dni)	stalna (90 dni)
Ureditev gradbišča	6 manjših gradbišč	eno gradbišče
Otežkočena gradnja zaradi vode	gradnja v vodi	gradbišče v suhem

#### 5.4 Zaključki - sklepne ugotovitve

Vsa voda iz zaledja, ne glede na prevoznost prometnice, bo odtekla skozi sotesko. Poseganja v varovalni pas odvodnika in/ali prometnice se ne da preprečiti. Zgolj togemu vztrajanju soglasodajalca na zakonsko predpisani širini varovalnega pasu, tehnično in ekonomsko ni sprejemljivo in je za družbo škodljivo. Prav zaradi neuspešnih dogovarjanj in usklajevanj ter zavrženih predlogov posega v varovalni pas odvodnika, na podlagi pravnih aktov, so predlagane projektantske rešitve neekonomične in tehnično vprašljive ter neustrezno, z velikimi gradbenimi posegi, umeščene v prostor. Predlog uskladitve poteka

prometnice in odvodnika mora temeljiti na dejstvu, da bo prometnica začasno ob visokih vodah poplavljena in da promet nekaj ur ne bo mogoč. Za pomoč pri odločitvi uporabe določenega tipa zgradbe je privzeta SWOT analiza, ki s primerjavo prednosti, pomanjkljivosti, priložnosti in tveganj, omogoči izbiro konstrukcije glede na pričakovane rezultate. V nalogi so obdelani dvojni rezultati. Prvi del rezultatov obsega prikaz dimenzioniranja togih zgradb ob/v vodotokih v literaturi, stanja v stroki pri projektiranju in primerjavo različnih pristopov pri določanju hidrodinamične obtežbe ter spremljajočih pojavov. Obdelani so običajni, izredni in ekstremni obtežbeni primeri, ki nastanejo zaradi različnih kombinacij delovanja obtežb ali zaradi pojava poglobljanja temeljnih tal ob stiku vodnega toka in togih zgradb. Drugi del rezultatov obsega primerjalno analizo prečnih in vzdolžnih zgradb. Kot praktični primer sta obravnavana dva posega v prostor in sicer, rekonstrukcija državne ceste ob potoku Jereka in gradnja mostu na državni cesti čez potok Ribnica. Za oba primera so prikazane naravne danosti in izračunane odtočne količine. Nato so obdelane tehnične rešitve, ki izpolnjujejo tako prometno-tehnične kot hidro-tehnične pogoje in druge zahteve soglasodajalcev. Projektantske rešitve, brez upoštevanja vseh udeležencev v prostoru, so slabe. Predlagano izboljšanje projektantskih rešitev je zagotovljeno s skupno obravnavo prometnih in vodnih zgradb, kar je prikazano z izvedenim dimenzioniranjem in primerjavami gradbenih količin prečnih in vzdolžnih zgradb, podanimi v prilogah. V analizi prednosti - pomanjkljivosti – priložnosti – ogroženosti (SWOT) so bile primerjane merljive količine in tudi nemerljivi vidiki predvidenih posegov v prostor. Le skupna projektantska rešitev poteka prometnice in odvodnika v prostoru, z upoštevanjem pravnih, tehničnih in ekonomskih pogojev ter vseh uporabnikov prostora, bo za vse uporabnike prostora najbolj sprejemljiva in za prostor najugodnejša.



## **6 POVZETEK**

Ob vse večjem razvoju prometa in zahtev po varnosti, se tudi prometnice prilagajajo jakosti prometa. Prometnice se projektirajo in gradijo s ciljem večanja prepustnosti in zagotavljanja varnosti vsem udeležencem v prometu. Najtežje se zagotovi zadosti zemljišča, ki se rabi za umestitev prometnice v prostor. Delo v nalogi temelji na primerjavi zasnov togih zgradb v in ob vodotokih, kot togih konstrukcij uporabljenih pri posegih v vodno zemljišče, glede na prednosti in pomanjkljivosti. Pri tem je upoštevana zaščita dna in brežin struge s ciljem zagotoviti stabilni odsek vodotoka pred erozijo v celoti in ne zgolj breg, po katerem poteka prometnica. Narava namreč ne upošteva njene delitve na različna ministrstva.

Osnovna konstrukcija, ki omogoča širitev prometnice, je vzdolžna zgradba zgrajena ob strugi, oziroma v sami strugi odvodnika, kot prečna zgradba. Prečna zgradba se kot pregrada umesti v prostor prečno na vzdolžni potek struge odvodnika. Naloga toge pregrade, kot stabilizacijskega objekta, je zaustavitev poglobljanja struge in s tem preprečitev rušenja bregov struge in brežin, ki pri poglobljanju izgubljajo oporo dna. Zahteva po stabilnosti brežin je posledica zagotavljanja stabilnosti prometnic, ki so običajno ravno tako speljane po dolinah ob sami strugi ali v pobočju. V nalogi so obdelani osnovni postopki pri regulacijah vodotokov z uporabo prečnih zgradb pravokotno na os struge in vzdolžnih zgradb vzporedno s potekom struge.

V obstoječem prostoru, kjer je že obstoječa prometnica utesnjena, se mora pridobiti zadosti prostora za širitev prometnice, vendar ne v škodo površine odtočnega prereza struge odvodnika. Osnova ustreznega poteka prometnice v naravnem okolju je sodelovanje strokovnjakov (gradbeniki, vodarji, geologi) in uporabnikov prostora (lokalna skupnost, naravovarstveniki, urejevalci prostora, gozdarji, itd) od pričetka projektiranja, izgradnje in vzdrževanja zgradbe po izgradnji. Višinsko in situativno mora prometnica zadostiti zahtevam tehničnih predpisov, saj je potek struge odvisen od odtočnih karakteristik odvodnika. S posegi v vodotok se lahko strugo situativno premesti in v višinskem poteku poglobi ali dvigne. Tako se lahko s pravilno uporabo zgradb med prometnico in strugo vodotoka sonaravno uskladi potek prometnice ob strugi s ciljem umestitve prometnice v

pokrajino in zagotovitvijo nemotenega odtoka poplavnih voda brez škode za nosilno telo prometnice ob zagotovljeni prometni varnosti uporabnikom, kar je prikazano v obdelavi potoka Jereka.

V nalogi so z ozirom na statiko obdelane toge zgradbe, ki pod obtežbo ne spreminjajo svoje oblike. Pri togi konstrukciji je še posebej pomembno temeljenje, za kar se mora pridobiti geomehanske podatke. Točnejši kot so podatki temeljne zemljine, tehnično pravilnejše se lahko določi način in obliko temeljenja. Določitev ustreznih obtežb na konstrukcijo je osnovnega pomena za izbiro geometrijske oblike, ki omogoča zagotovitev varnosti ter ekonomičnosti. Z zagotovitvijo stabilnega nivoja nosilnih temeljnih tal, se zmanjša višina potrebne nosilne zgradbe, ki bistveno vpliva na obliko konstrukcije in stroške izgradnje. Najvažnejši podatki za izračun in oblikovanje togih pregrad so geomehanski podatki, pripadajoče obtežbe in hidravlične ureditve, ki jih proučujejo geomehaniki, geologi; gradbeni konstruktorji in vodarji. Namen združitve različnih znanj v celoto je pomoč pri odločitvi za celovito rešitev zaščite področja, po katerem potekajo struge odvodnikov in prometnic.

Dosedanja znanja s področja projektiranja zgradb, temeljenja zgradb in urejanja voda so zbrana in obrazložena za osnovne oblike zgradb, prikazane so obtežbe na zgradbe in zbrani obtežbeni primeri. Proučeno je področje temeljenja togih zgradb od obrazložitve lastnosti temeljnih zemljin, potrebnih geomehanskih raziskav in določitve nosilnosti temeljnih tal. Na področju hidrotehnike je obdelan primer določitve odtočnih količin, zbrani podatki za določitev koeficienta hrapavosti, opisane so enačbe prelivov, pragov in stopenj, obrazložen je hidravlični skok in prodonosnost. Dodatno so prikazane različne utrditve brežin z navedbo dopustnih hitrosti vode različnih avtorjev.

V SWOT analizi je bila izdelana primerjava prečnih in vzdolžnih zgradb na izbranem odseku. Iz analize so razvidne prednosti in pomanjkljivosti izbranih gradbenih rešitev. Iz obdelanega primera je razvidno, da je ugodnejša izbira prečnih obrežnih zavarovanj od vzdolžnih obrežnih zgradb tako glede umestitve v prostor, izgleda, stroškov, enostavnosti gradnje, manjšega oviranja prometa med gradnjo in dostopa v času gradnje.

V prostoru se zakonsko ureja odnos med posameznimi uporabniki. Osnovni zakoni, ki urejajo medsebojna razmerja med njimi, so zakoni o graditvi objektov, o vodah, varstvu

okolja, o cestah in železnicah ter gozdovih. V nalogi so obrazloženi z ozirom na posege v prostor sosedu. Vsak uporabnik ima določene zahteve do sosedu – mejaša, vsi pa so umeščeni v enotni prostor. Medsebojni stik uporabnikov se ureja z varovalnimi pasovi, v katerih se vsak poseg predhodno prouči in uskladi. Ob pomanjkanju prostora se prometnice medsebojno ločijo z vzdolžno zgradbo, v primeru stika prometnic z odvodniki pa je vzdolžna zgradba ena od možnih rešitev, večinoma pa je ugodnejša uporaba prečnih zgradb. Ob celoviti proučitvi oblike in stanja terena ter nestabilnosti bregov struge, predvsem zaradi poglobljanja struge, se lahko z izgradnjo prečnih in vzdolžnih togih pregrad ustavi poglobljanje in spodkopavanje dna brežine ali temeljev obstoječih konstrukcij, oziroma se lahko ob zagotovitvi zadostne pretočne sposobnosti struge dno celo dvigne in s tem posledično zmanjša velikost podporne oziroma oporne konstrukcije, kar pomeni pocenitev gradnje. Najlepše prečne in vzdolžne zgradbe kot podporne ali oporne konstrukcije so tiste, ki so čim bolj umeščene v prostor. V nalogi je na primeru Jereke prikazana možnost uporabe prečnih zgradb kot ugodnejšo rešitev od projektirane vzdolžne zgradbe.

Ob sovpadanju interesov posameznih uporabnikov prostora se mora povezati vse zainteresirane in skupaj interdisciplinarno sprejeti rešitev, ki naj bi bila ob upoštevanju večine pogojev in zahtev posameznih pogajalcev, najmanj moteča v naravi. S ciljem upoštevanja zahtev različnih uporabnikov prostora se izdajajo smernice kot podlaga pri projektiranju. Vsak soglasodajalec bi moral proučiti upravičenost svojih zahtev in ne togo vztrajati pri zahtevanih omejitvah. Vloge dajalcev in prosilcev soglasij se menjajo, dobri odnosi med posameznimi uporabniki prostora so nujni, kar bi se zlasti ob izdaji pogojev in soglasij morali zavedati.

Na obravnavanem odseku poteka poleg struge potoka Jereka še državna cesta. Struga potoka je dolvodno zajezena. Pregrada je zgrajena iz vodoravnih brun zagodenih med vertikalne stene soteske. Ob poružitvi pregrade v soteski ob neurju 18.09.2007 se je poškodoval del ceste. V primeru sanacije porušene pregrade s povišanjem preliva, bi lahko proučili izrabo prostora po zaplavitvi za ugodnejšo umestitev cestnega telesa v prostor in izrabo vode potoka za energijo. V času zapolnitve prodnega zadrževalnika, bi se lahko zbralo podatke o prodonosnosti potoka Jereka in njemu primerljivih povirij. Običajno geomehaniki in geotehniki rešujejo nestabilnosti terena na področju prometnic ločeno od zahtev vodarjev na področju voda. Še slabše, projektanti zgolj delno zagotavljajo zadostno

širino potrebnega prostora za potek cestnega ali železniškega nasipa z izgradnjo podpornih ali opornih konstrukcij, ne oziraje se na celovito rešitev in s tem zmanjšujejo nivo uslug uporabnikom prometnic. Zakonsko bi se moralo urediti sodelovanje vseh uporabnikov prostora, vendar ne zgolj z izdajo soglasja, temveč v strokovno obdelanih in obrazloženih pogojih posameznega soglasodajalca.

## **7 SUMMARY**

Along with the ever-growing traffic and safety demands, the traffic routes also adjust to the traffic density. Traffic routes are designed and constructed with the aim of boosting trafficability and ensuring road safety to all road users. The hardest is to provide enough land for geographical location of traffic route. This thesis is based on the projects comparison of rigid structures in and by the watercourses, as the rigid constructions used at interventions in water ground, according to the advantages and disadvantages. In this context, the river beds and river banks safety is considered in order to ensure the stable section of river course against erosion fully, and not only of the bank where the traffic route is located. The nature namely rejects the divisions between various government departments.

The basic construction, enabling the widening of traffic route, is the longitudinal structure built by the river channel or in the water draining system itself, as a transverse structure. The transverse structure is located as a barrier, transversal to a longitudinal course of waterway. The rigid barrier as a stabiliser aims to stop the deepening of the river channel and therefore to prevent from a destruction of river banks and slopes that loose the support of river bed during the deepening. The demand for stability of slopes is the consequence of assuring the stability of traffic routes that are usually routed through valleys along the river channel or in slope. In the thesis, the basic procedures for regulation of water courses are discussed, using transversal structures rectangular to the river channel axis, and longitudinal constructions parallel with the river channel course.

In the existing location where the existing traffic route is tight, enough place needs to be obtained for widening the traffic route, however not to the detriment of runoff section

surface of waterways. To achieve the proper course of traffic route in natural environment, the cooperation of experts (builders, hydrologists, geologists) and users (local community, nature protectionists, foresters, etc.) is crucial from the beginning of designing, constructing and maintenance of structure. Traffic route has to comply to technical standards in terms of height and position, whereas the river channel course depends on runoff characteristics of waterway. By interventions in the watercourse, the water channel can be displaced and deepened or elevated in high course. With a proper employment of structures between traffic route and river course channel, the course of traffic route along the river channel can be sustainably harmonised to locate the traffic route in the landscape and to assure the undisturbed flood runoff without detriment for the traffic route substrate along with the assured road safety for road users, what is presented in the Jereka river case.

The thesis deals with rigid structures, taking account to the statics, that remain unchanged in their formation while loaded. The foundation is important in particular for rigid construction, for which the geomechanical information needs to be obtained. The preciser the information on base soil, the more accurate can be technical determination of the method and form of foundation. The determination of the corresponding loads on construction is a vital for a selection of geometrical shape that assures safety and economy. If the level of supporting foundation ground is stable, the height of required load-bearing construction is decreased, influencing the construction formation and costs essentially. The most important data for calculation and formation of rigid barriers are geomechanical data, relevant loads and hydraulic arrangements, researched by geomechanics, geologists, building constructors and hydrologists. The principal objective for merging heterogeneous expertise into a whole is to help decide for a comprehensive solution for prevention of area, where the waterway channels and traffic routes are located.

Up-to-date expertise in a field of structure design and foundation and river training are collected and explained for basic structure formations, as well as the loads on structures shown and load cases collected. The foundation of rigid structures is analysed from the explanation of basic soil characteristics, required geomechanical investigations and determination of load-capacity of foundation ground. Within hydrotechnics, the runoff quantities are determined, data for determination of roughness coefficient collected, equations of overflows, sills and levels described and hydraulic jump and bed-material load

explained. Additionally, different consolidations of river banks are shown with the statement of permissible flow velocity by various authors.

The comparison of transverse and longitudinal structures on a chosen section was elaborated, using SWOT analysis. The analysis clearly shows the advantages and disadvantages of the selected constructing solutions. It is evident from the case that the selection of transverse river bank protection is more advantageous than longitudinal river bank structures as in terms of geographical location, appearance, costs, building simplicity, lesser traffic obstructions and access during construction.

The relationship between individual users is regulated by law. The principal acts regulating the mutual relationships are Construction Act, Waters Act, Public Roads Act, Railway Transport Act and Forest Act. The above-mentioned acts are explained in regards to the interventions in the neighbourhood. Each land user has a specific requirements toward his neighbour, thus all of them are located in a single territory. The interacting relations are regulated by buffer zones where each intervention is analysed and reconciliated. When the space is scarce, the traffic routes are separated by longitudinal structure; and when the traffic routes are in contact with waterways, the longitudinal structure is one of the possible solutions, but usually the transverse structures are more advantageous. By comprehensive analysis of formation and situation of the ground and instability of the river bank, especially due to the river bed deepening, it is possible to stop further deepening and sapping of river bank or foundations of existing constructions with the employment of transverse and longitudinal rigid barriers, or, provided that runoff capacity is adequate, the river bed can be even elevated and consequently the size of supporting or pillar construction would decrease and thus the construction costs decrease as well. The most beautiful transverse and longitudinal structures as supporting or pillar constructions are those that are best integrated into space. Thesis includes the Jereka case, where the possibility to use the transverse structures is presented as more advantageous solution to the designed longitudinal structure.

When the interests of the individual land users coincide, all users concerned need to be linked together to find the multidisciplinary solution, which should consider the majority of conditions and claims of individual negotiators and be the least interfering in the nature. The claims of various land users are considered at issuing the guidelines as a basis for

planning. All consent authorities should examine the justification of their claim rather than stick to the requested limitations. The roles of consent givers and receivers change, but the good relationships between individual land users are necessary. This should be clear especially at issuing the conditions and consents.

On the analysed section, there is also a public road beside the Jereka stream channel. In the stream channel there is a downstream dam. The barrier is built from the longitudinal timber, wedged into vertical gorge walls. The thunderstorm on 18.09.2007 pulled down the barrier in the gorge and consequently damaged part of the road. In case of improvement of demolished barrier by increasing the overflow, the land utilization after the filling for more advantageous integration of road into space and utilization of stream water for energy can be analysed. Data on bed-material load of Jereka stream and comparable water sources can be obtained during the filling of gravel reservoir. Usually geomechanics and geotechnics resolve the ground instability on the traffic routes sectors separately from the hydrologists' demands on water sectors. Moreover, the planners merely partially assure the sufficient width of required space for road or railway embankment with building the supporting or pillar constructions, regardless the comprehensive solution. This lessens the level of services to traffic routes users. The cooperation of land users should be regulated by law, although not only with giving the consent, but with the professionally analysed and explained conditions of individual consent authority.

## VIRI

- Agroskin, I. I. 1964. Hidravlika, Zagreb, Tehnička knjiga: 331 str.
- Androić, B. 2003. Metalne konstrukcije I, Inštitut gradževinarstva Hrvaške: 170 str.
- Antončič, B. 2002. Podjetništvo. GV založba. Ljubljana: 390 str.
- Bat, M. et al. 2003. Vodno bogastvo Slovenije. Littera picta. ARSO. Ljubljana: 131 str.
- Bertok, M. 1989. Navodila za izdelavo vodnogospodarskih objektov s stališča ribištva. Ribič št.162. Kočevski tisk. Ljubljana:181 str.
- Brilly, M. et al. Vodne ujme. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. FGG: 186 str
- EUROCOD 7 1. Del (SIST EN 1997-1:2005/oA101:2005
- EC 7, Gradbeni vestnik, 2006, št.10 UDK 624.131.52:006(430)
- Franke, P. G. 1974. Hydraulik fur Bauingenieure. Berlin, Walter de Gruyter & Co.: 374 str.
- Gavrilović, S. 1972. Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji, časopis Izgradnja, Beograd: 292 str.
- Goljevšček, M. 1960. Jezovi, dolinske pregrade in njihovi pogonski objekti. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 91str
- Gradbeni vestnik št.10, 2006. Ljubljana: str. 254
- Hamill, L. 1999. Bridge hydraulics. London: 367 str.
- Heinemann, E. 1998. Hydraulik fur Bauingenieure. Stuttgart, Leipzig: 320 str.
- Humar, L. 2000. Statične analize podpornih konstrukcij po standardu Eurokode 7. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 88 str.
- Jevtić, L. 1978. Inženjerski priručnik za rešavanje problema iz oblasti bujičnih tokova. Beograd: 396 str.
- Klabus, A. 1999. Ujma št. 8, 9,13.
- Kodrič, T. 1999. Ureditvena dela na hudourniku Lajtna v povodju Bače. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 51 str.
- Kranjec, R. 1997. Račun podpornih konstrukcij po obstoječem pravilniku in po standardu Eurokode 7 na konkretnem primeru. Diplomaska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 36 str.
- Loat, R. 2003. Wörterbuch Hochwasserschutz. Bern: 424 str.



- Logar, J. et al. 2006. Danube, European Conference on Geotechnical Engineering (13). Slovensko geološko društvo. Ljubljana
- Mastnak, M. 1997. Ureditev spodnjega toka hudournika Trebše. Diplomski naloga. Ljubljana: 84 str.
- Mehlhorn, G. 1996. Der Ingenieurbau: Grundwissen, Hydrotechnik, Geotechnik. Ernst und Sohn. Berlin: 575 str.
- Mikoš, M. 2007. Gradbeni vestnik, letnik 56
- Mikoš, M. et al. 2002. Hidrološko izražanje, Acta hydrotechnica 20/32, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 863 str.
- Mikoš, M. 1996. Gradbeni vestnik št. 4-5, letnik 45
- Mikoš, M.; Mastnak, M. 1998. Navodila za program HEC-RAS, verzija 2.1, Ljubljana
- Mikoš, M. 2000. Hydraulics in steep mountain streams. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 60 str.
- Mikoš, M. 2000. Urejanje vodotokov, skripta, Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 181 str.
- Možina, S. et al. 2002. Management nova spoznanja za uspeh. Didakta. Radovljica: 750 str.
- Nešić, M. 1966. Regulisanje reka. Gradževinska knjiga. Beograd: 414 str.
- Nonweiler, E. 1979. Mehanika tla i temeljenje gradževina. Zagreb: 780 str.
- Pšeničnik, M. 1979. Hidravlika. Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana: 342 str.
- Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.
- Rajar, R. 1986. Hidromehanika, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo:
- Rajar, R., Steinman, F., Zakrajšek, M in sod. 1987. Hidrodinamika turbolentnih tokov. Ljubljana.
- Rajar, R. et al. 1990. Določanje zakonitosti za hitrosti toka v strmih strugah, deročem toku in prehodnem režimu:
- Rojnik, A. 2005. Hidravlika premostitev. Seminarska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 83 str.
- Šumarska enciklopedija, Zagreb. 1959-G1
- Erozije št.5 str.3 Beograd. 1974

Schoklisch, E. A. 1930. Der Wasserbau I. Julius Springer. Dunaj: 484 str.

Schoklisch, E. A. 1930. Der Wasserbau II. Julius Springer. Dunaj: 1199 str.

Soil Conservation Service USA

Steinman, F. 2004 Osnove gradbeništva, Hidrotehnična smer FGG: 100str.

Steinman, F. 2004 Hidrotehnika, Vodne zgradbe I, Hidrotehnična smer FGG: 91str.

Steinman, F. 1999. Hidravlika. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 295 str.

Steinman, F. 1990. Sekundarni tokovi v odprtih vodotokih. Ljubljana: 57 str.

VSS, 1966. Stuetzmauern, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachmaenner, Zuerich:692 str.

Vischer, D. 2002, Wasserbau, Springer. Berlin: 360 str.

Šuklje, L. 1967. Mehanika tal, Ljubljana, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo: 480 str.

Tehničar 6, 1989. IRO Gradževinska knjiga Beograd. Beograd: 1470 str.

Vošnjak, S. 2003. Hidralične prilike oko stupovlja most. Hrvatske vode u 21. stolečju Zbornik radova: str. 503-509.

US Army Corps of Engineers; Hydrologic Engineering Center (2002): HEC-RAS, River Analysis System User's Manual, Version 3.1., Davis, CA

Ur. l. SFRJ št. 34/74

Ustava RS

Ustava za Evropo (pogodba), 2005

Ujma št. 8 (str. 125 – 128), št. 9 (str.24 – 27), št. 13 (str.173 – 176) KLABUS

Verbovšek, V. 1984. Pretočne hitrosti v strmih strugah. FGG. Ljubljana: 43 str.

Zeller, J. 1984. Rutschungsentwaesserungen. Birmensdorf, Eigenoessische Anstalt fuer das forstliche Versuchswesen:260 str.

ARSO Agencija RS za okolje, Hidrometeorološki zavod Slovenije, napovedi in podatki za reke po Sloveniji, <http://www.arso.gov.si/podro~cja/vode>

zemljevidi, <http://www.kremen.arso.gov.si/nvatlas/>

### **Zakoni:**

Zakon o graditvi objektov ZGO-1B (Ur. l. RS št. 126/07:6414)

Pravilnik o vrstah zahtevnih, manj zahtevnih in enostavnih objektov, o pogojih za gradnjo enostavnih objektov brez gradbenega dovoljenja in o vrstah del, ki so v zvezi z objekti in pripadajočimi zemljišči (Ur. l. RS št. 114/03:5428)

Zakon o vodah ZV-1 (Ur. l. št. 67/02:3237)

Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture (Ur. l. RS št. 46/05:1880)

Zakon o varstvu okolja ZVO-1 (Ur. l. RS št. 41/04:1682)

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju padavinske vode z javnih cest (Ur. l. RS št. 47/05:1901)

Uredba o emisiji snovi in toplote pri odvajanju vod v vode in javno kanalizacijo (Ur. l. RS št. 45/07:2463)

Zakon o javnih cestah ZJC-UPB (Ur. l. RS št. 33/06:1349)

Pravilnik o vrstah vzdrževalnih del na javnih cestah in nivoju rednega vzdrževanja javnih cest (Ur. l. RS št. 62/98:2848)

Pravilnik o projektiranju cest (Ur. l. RS št. 91/05:3896)

Zakon o varnosti v železniškem prometu ZVZelP (Ur. l. RS št. 61/07:3804)

Pravilnik o pogojih za graditev gradbenih objektov ali drugih objektov, saditev drevja ter postavljanje naprav v varovalnem progovnem pasu in v varovalnem pasu ob industrijskem tiru (Ur. l. RS št. 02/87:0164)

Pravilnik o vzdrževanju spodnjega ustroja proge slovenskih železnic (št. 315, SJŽ št. 1981/69)

Zakon o gozdovih (Ur. l. RS št. 30/93:1299)

Pravilnik o gozdnih prometnicah (Ur. l. RS št. 56/07:4445)

Uredba o varovalnih gozdovih in gozdovih s posebnim namenom (Ur. l. RS št. 88/05:3786)

Zakon o zemljiški knjigi ZZK-1 (Ur. l. RS št. 58/03:2857)

Stvarnopravni zakonik SPZ (Ur. l. RS št. 87/02:4360)

Uredba o pridobivanju, razpolaganju in upravljanju s stvarnim premoženjem občin (Ur. l. RS št. 12/03:0498)

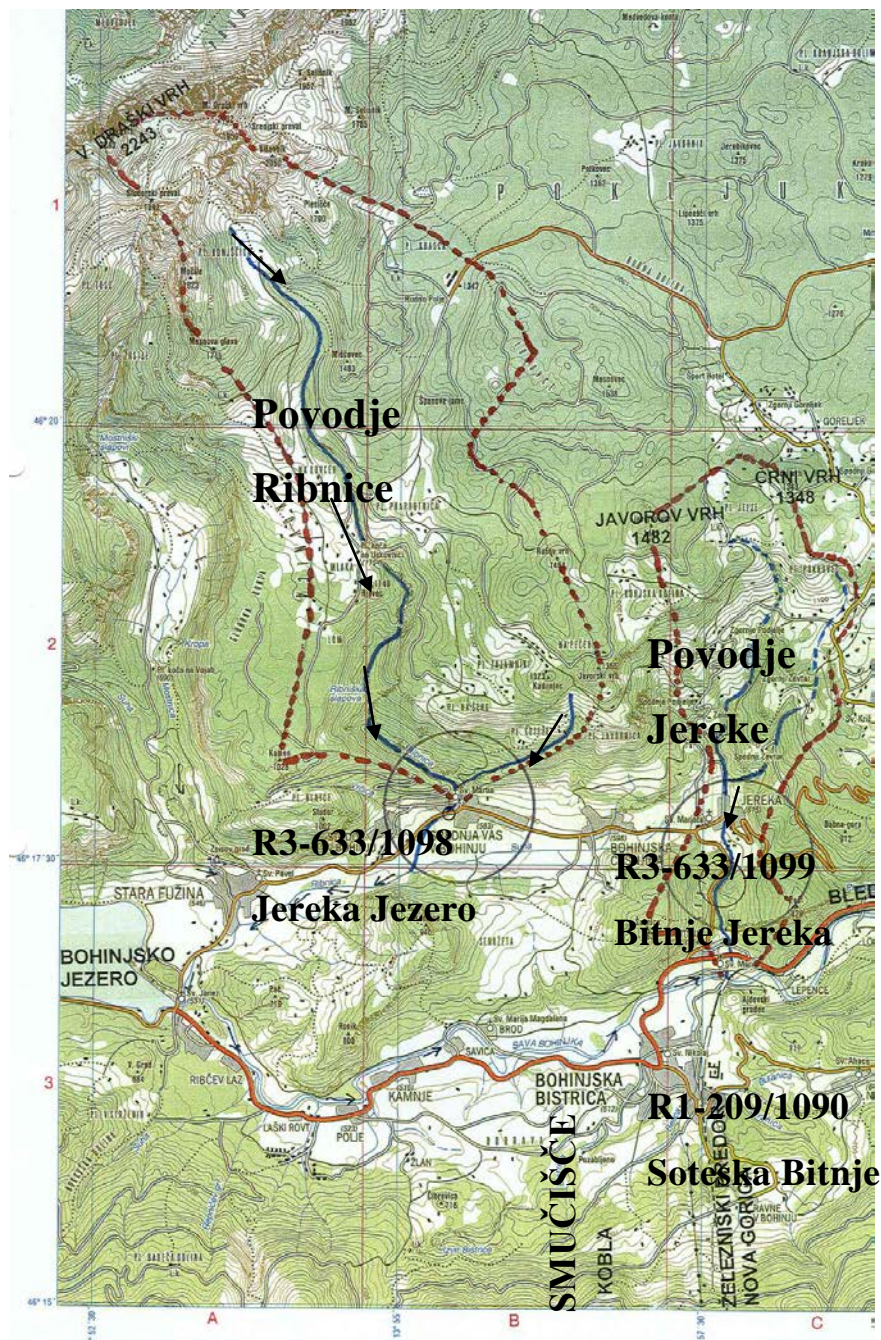
Uredba o kategorizaciji državnih cest (Ur. l. RS št. 33/98, 71/06)

Pravilnik SJŽ št. 1981/69, 315

## PRILOGE

### Priloga 1: Prikaz povodij potokov Jereka in Ribnica

#### Anex 1: Display of Jereka and Ribnica river basins



## **Priloga 2a: Izračun količin visokih voda potoka Jereka**

### **Anex 2a: Calculation o high waters in the case of creek jereka**

Izračun pričakovanih visokih voda s Kresnikovim empiričnim obrazcem:

$$Q_{vv} = \frac{32 \cdot \alpha F}{0.5 + \sqrt{F}}$$

vodotok: Jereka

odsek, kraj: Cesta Bitnje - Jereka

osnovni podatki o zlivnem območju:

$F = 5,48 \text{ km}^2$  ... površina prispevnega območja

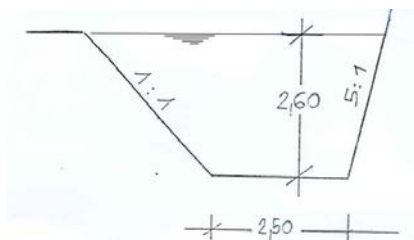
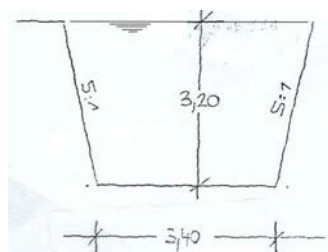
$\alpha = 0,60$  ... odtočni koeficient

$$Q_{vv} = 37,04 \text{ m}^3/\text{s}$$

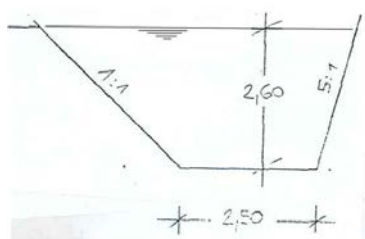
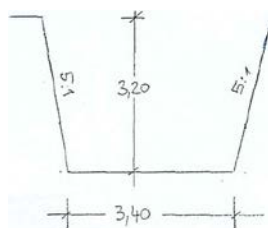
$$Q_{50} = 31,15 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{vv} \times 0,841$$

$$Q_{20} = 24,78 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{vv} \times 0,669$$

$$Q_{10} = 20,83 \text{ m}^3/\text{s} = Q_{vv} \times 0,562$$

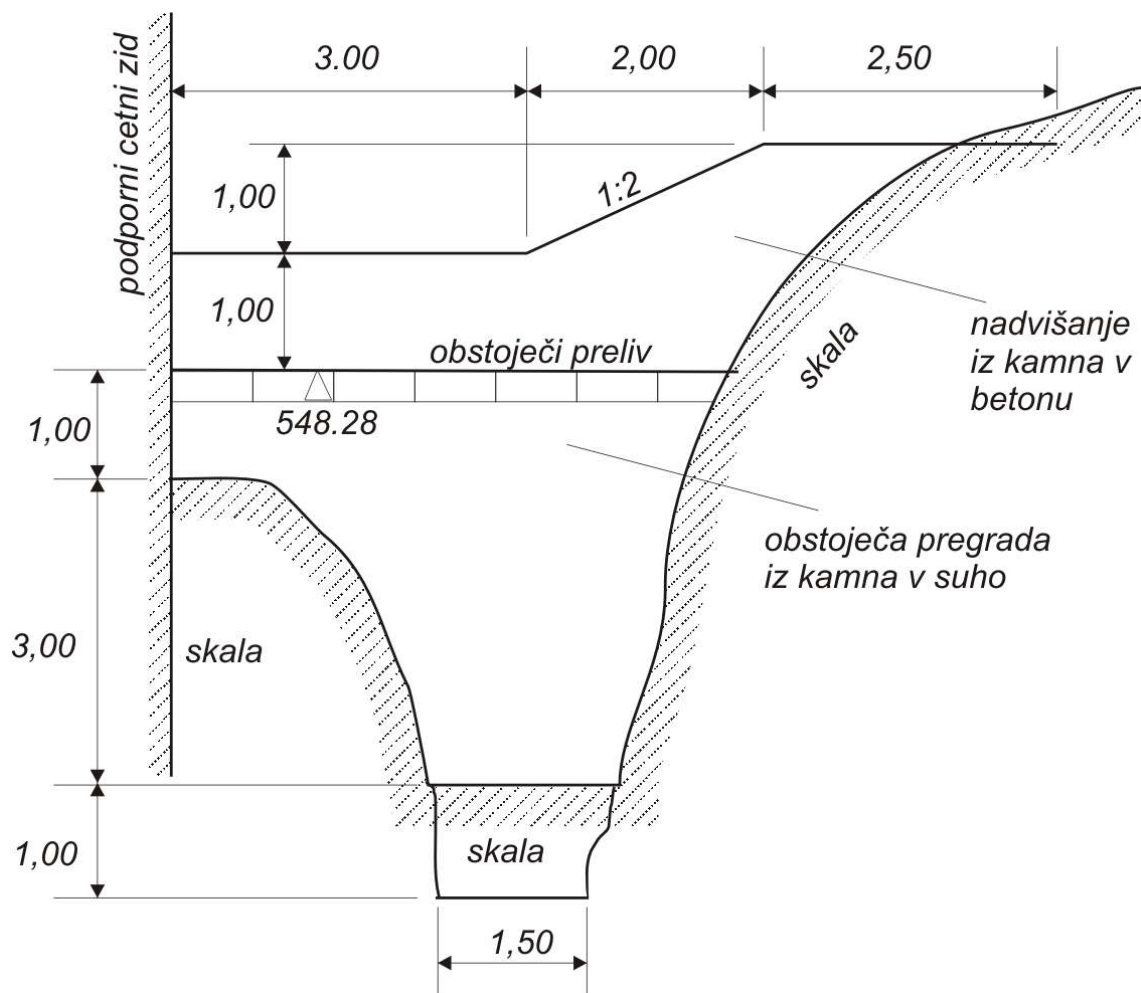
**Priloga 2b: Pretočna sposobnost struge pred posegom****Anex 2b: Rate of flow ability of channel before intervention**koeficient hrapavosti  $K=15$ nagib nivelete  $i=8\%$  $Q = 21,49 \text{ m}^3/\text{s}$  $v = 2,04 \text{ m/s}$ koeficient hrapavosti  $K=15$ nagib nivelete  $i=8\%$  $Q = 26,74 \text{ m}^3/\text{s}$  $v = 2,07 \text{ m/s}$ **Priloga 2c: Pretočna sposobnost struge po čiščenju****Anex 2c: Rate of flow ability of channel after cleaning**

Izračun pretočne sposobnosti struge po čiščenju dna in odstranitvi skalnega bloka z upoštevanjem ugodnejšega koeficienta hrapavosti.

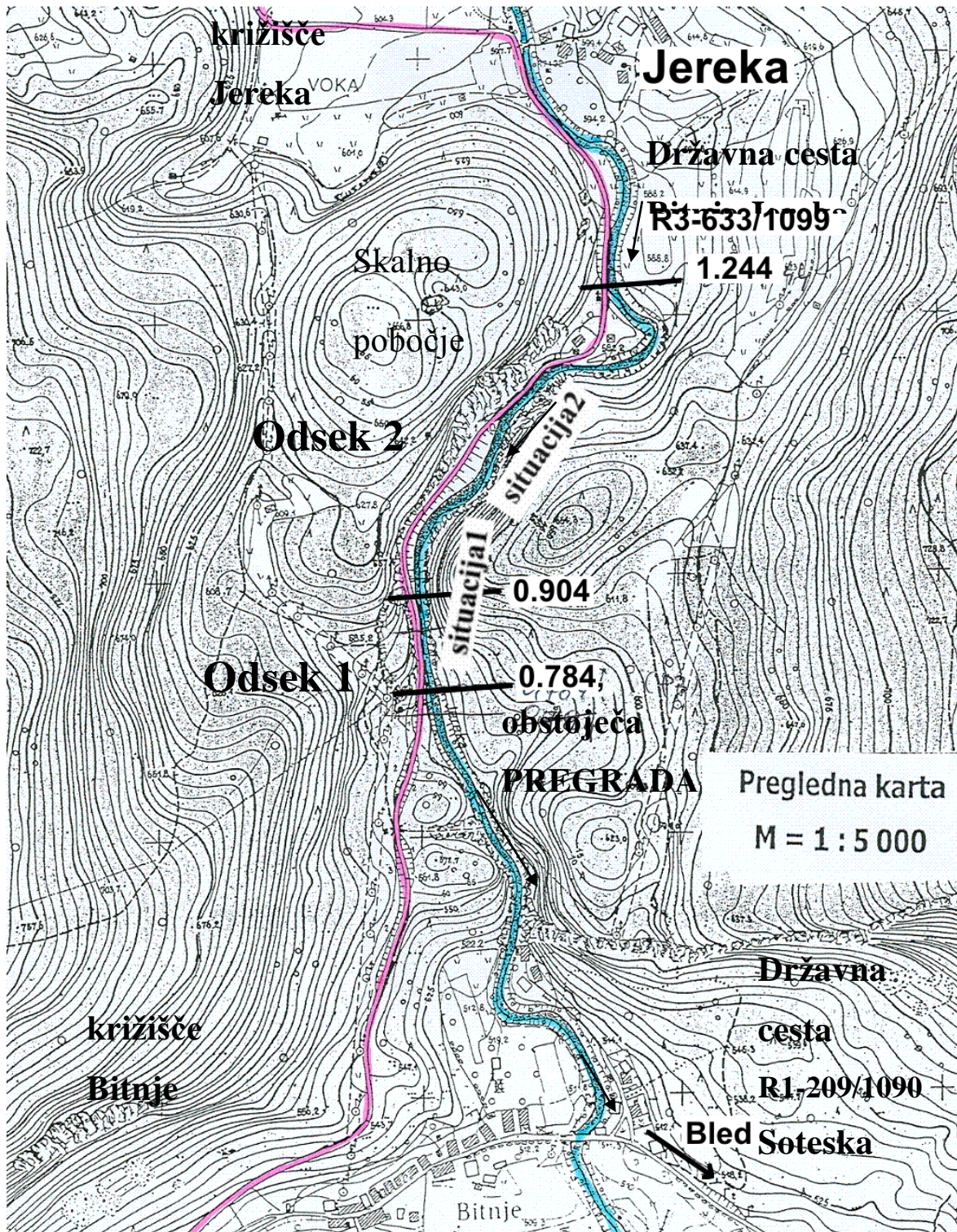
koeficient hrapavosti  $K=30$ nagib nivelete  $i=8\%$  $Q = 42,98 \text{ m}^3/\text{s}$  $v = 4,07 \text{ m/s}$ koeficient hrapavosti  $K=30$ nagib nivelete  $i=8\%$  $Q = 53,48 \text{ m}^3/\text{s}$  $v = 4,14 \text{ m/s}$

### Priloga 3: Prečni prerez obstoječe pregrade Jereke

#### Annex 3: Cross section of existent stone barrier



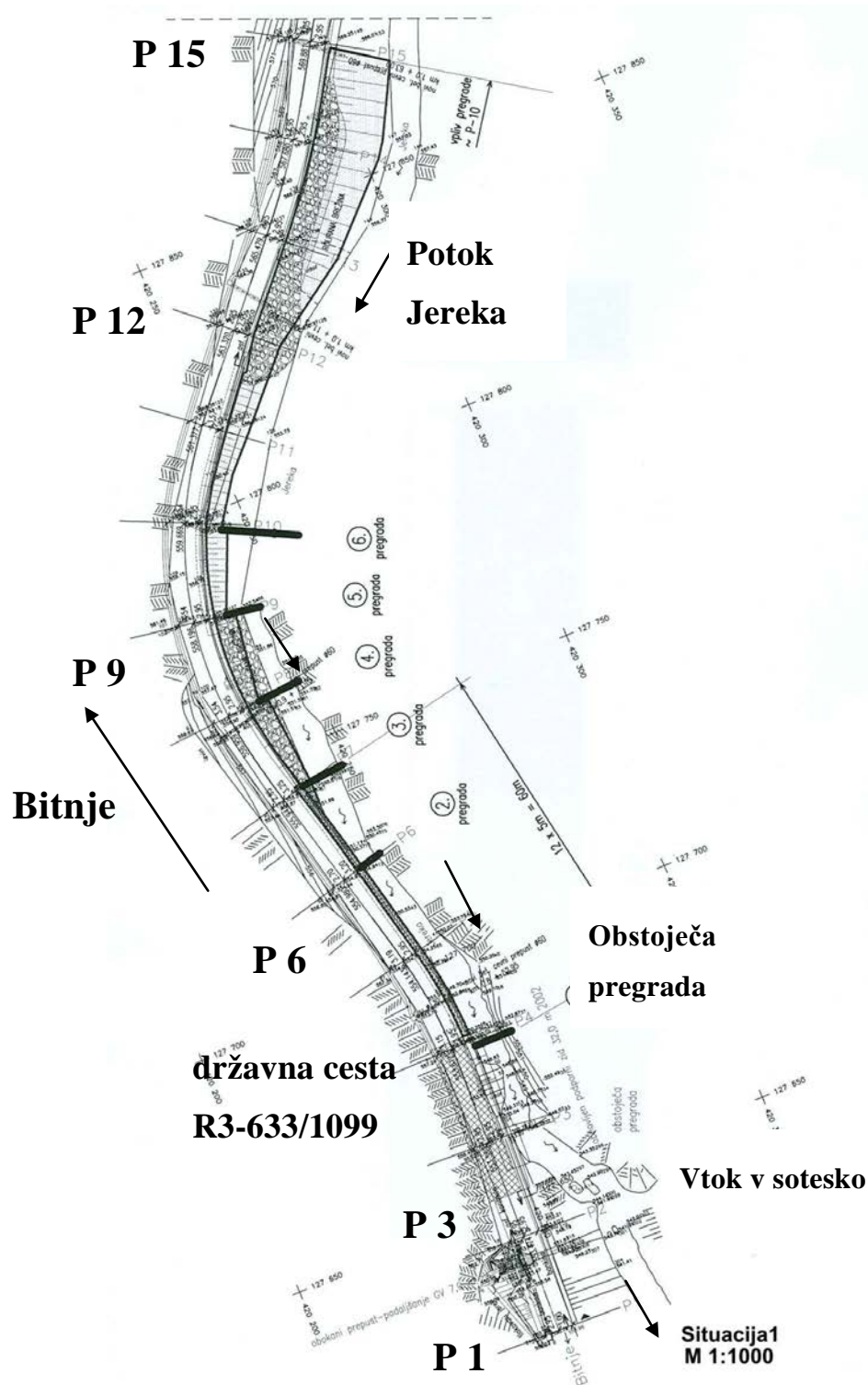
Prečna zgradba kot ustalitvena pregrada je prikazana na sliki št. 11.

**Priloga 4: Pregledna situacija poteka ceste ob potoku Jereka****Annex 4: General map for Jereka case**



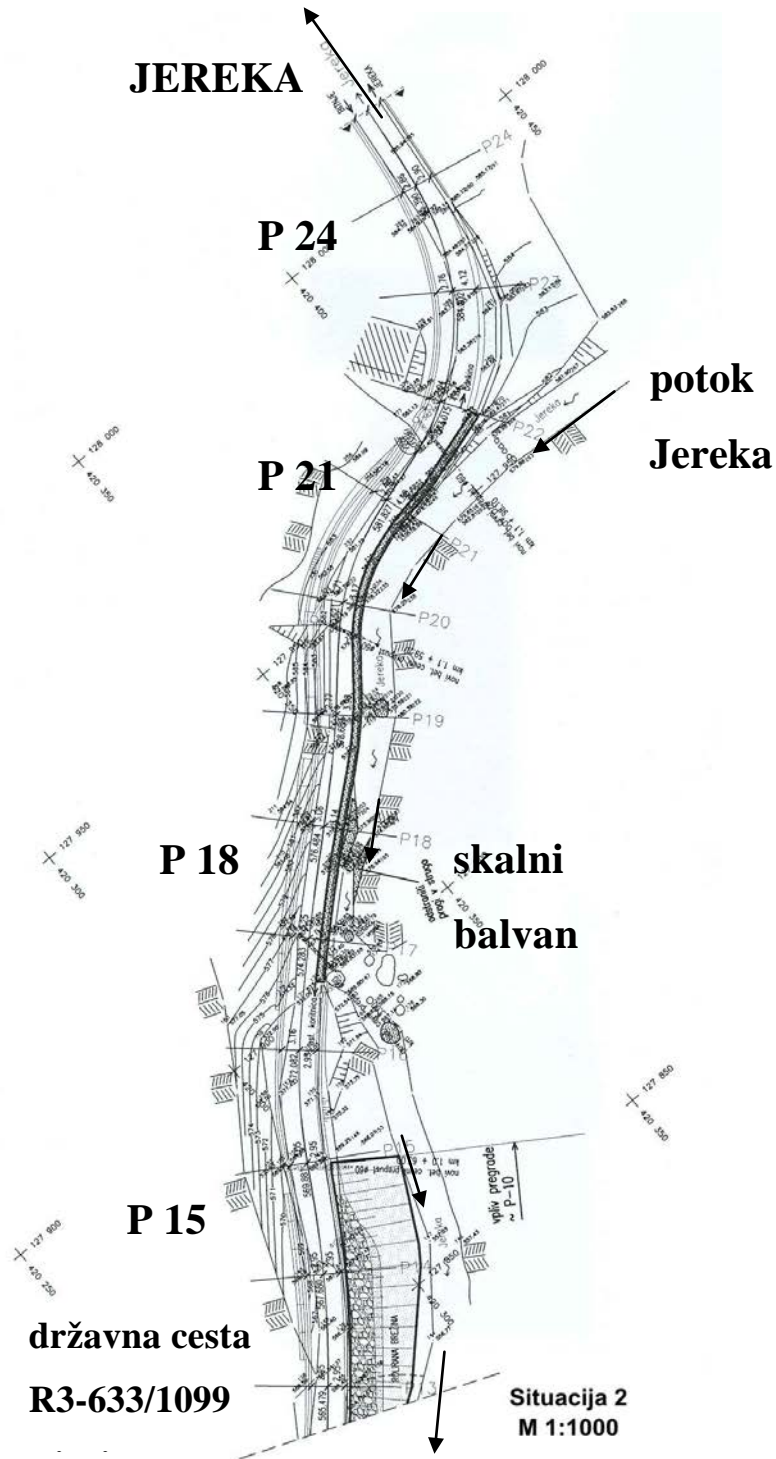
**Priloga 5: Situacija poteka ceste in struge na odseku 1**

**Annex 5: Situation of road and river bed course in Section 1**



**Priloga 6: Situacija poteka ceste in struge na odseku 2**

**Annex 6: Situation of road and river bed course in Section 2**

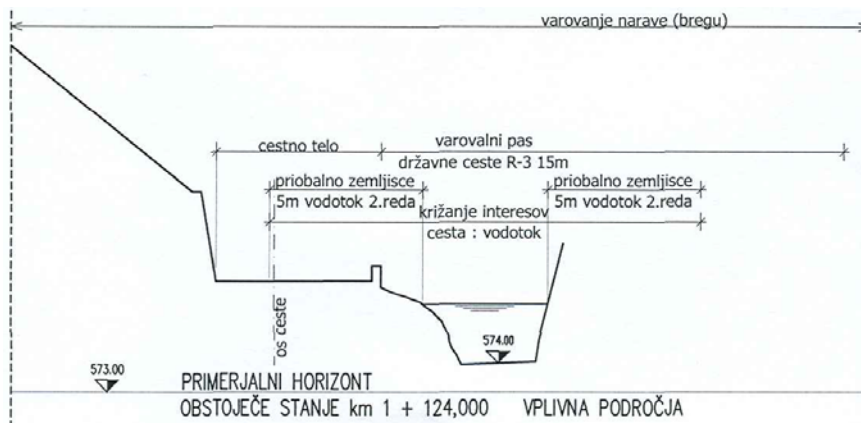
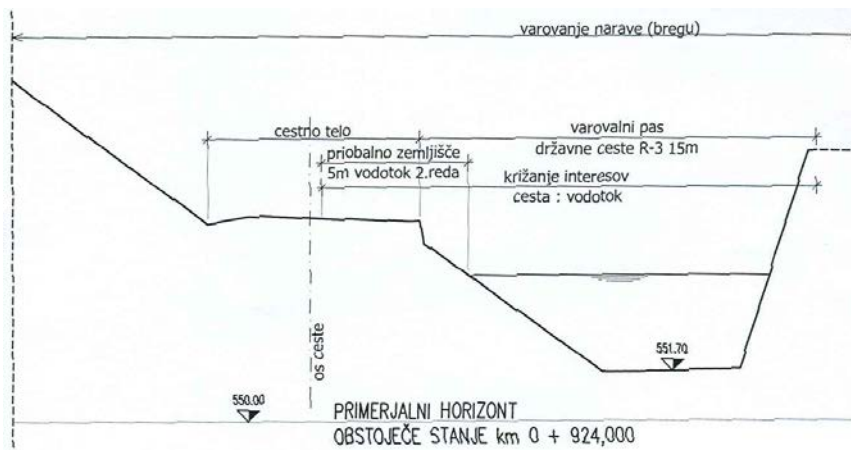
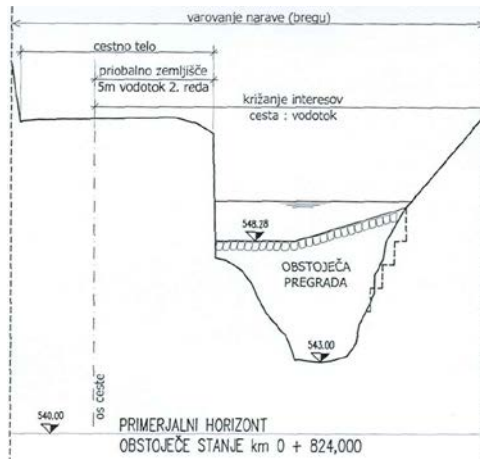


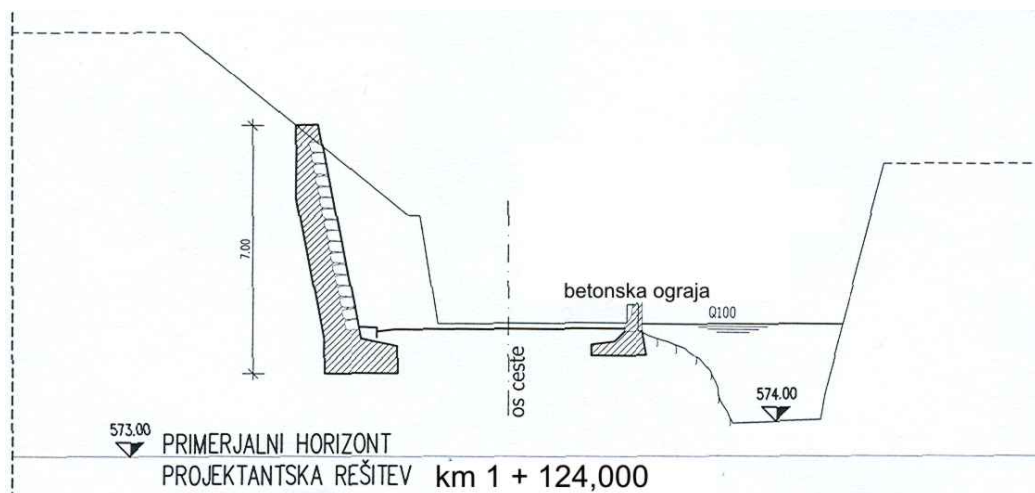
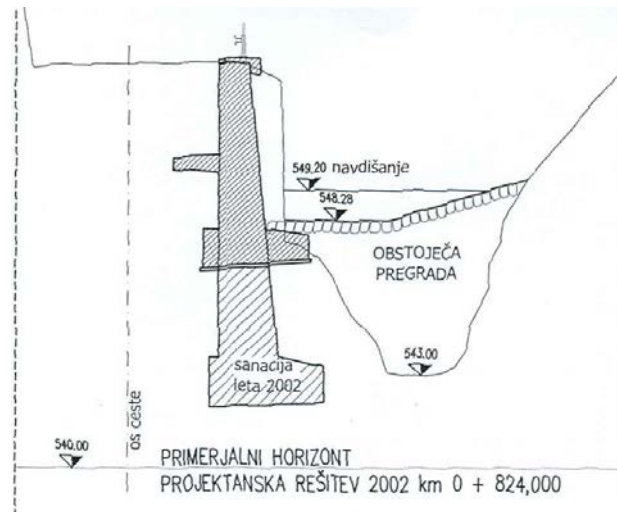




### Priloga 9: Prečni prerezi obstoječega stanja struge in ceste pred rekonstrukcijo ceste

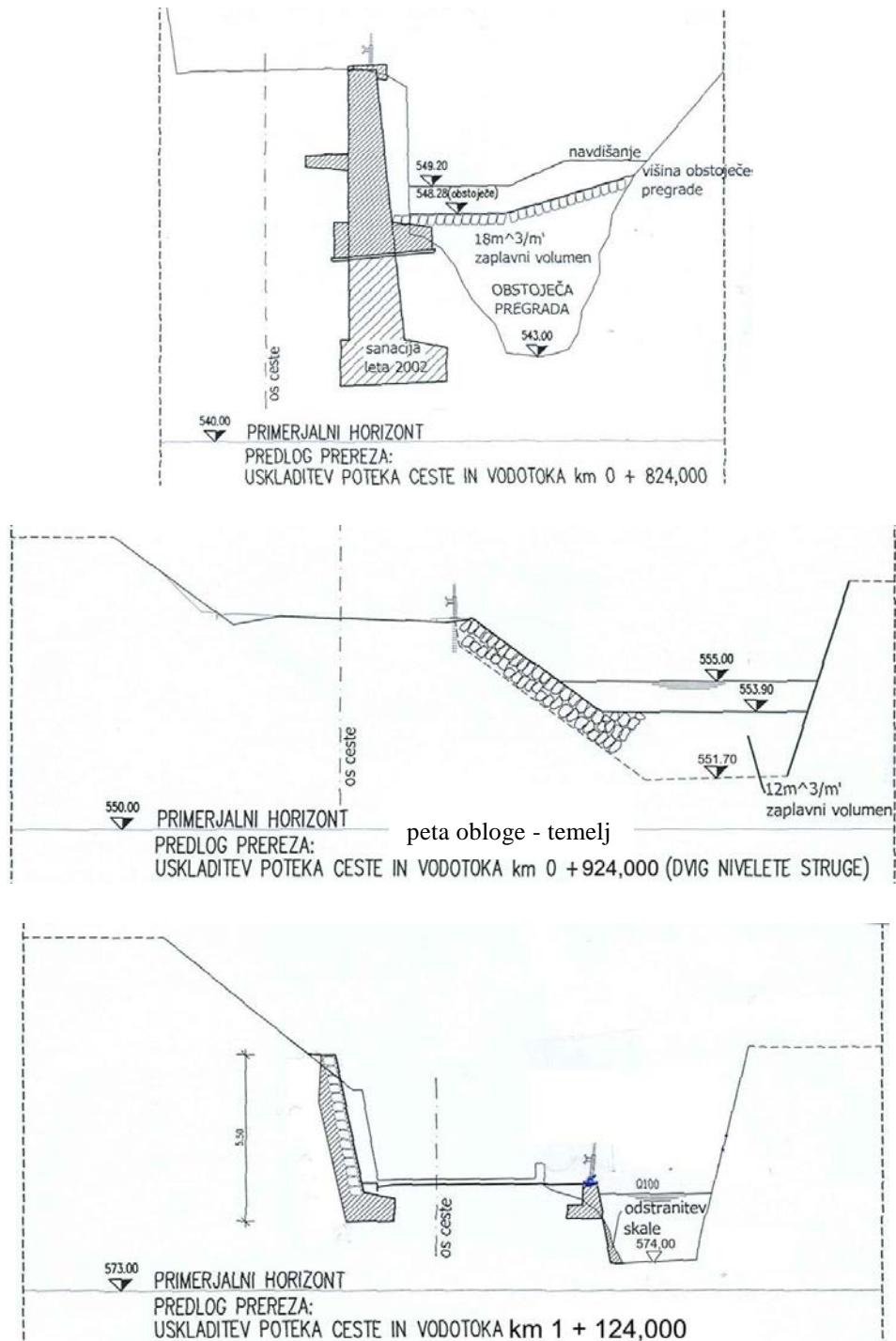
### Annex 9: Cross sections of existent situation of river bed and road before road reconstruction



**Priloga 10: Prečni prerezi struge in ceste s prikazom projektantskih rešitev****Annex 10: Cross sections of river bed and road showing planning solutions**

### Priloga 11: Prečni profili s prikazom usklajenih rešitev med strugo in cesto

### Annex 11: Cross sections showing harmonised solutions between river bed and road



Profil v stacionaži km1+124.000 je na sliki št. 3.1.

**Priloga 12a: Izračun pretočnih sposobnosti struge različnih oblik in padcev****Annex 12a: Calculation of ?? capabilities of riverbed of different shapes and droppings**

Pretočna sposobnost idealne struge je izračunana z uporabo Manningovih enačb. Za predvideno površino pretočnega profila dobimo:

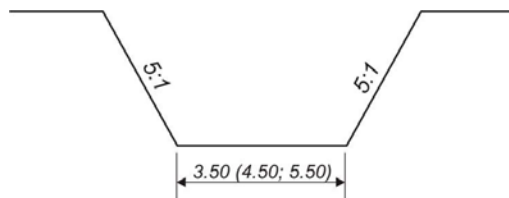
$$F = (b_{sp} + b_{zg}) \cdot 0,5 \cdot h,$$

za omočen obod pretočnega profila pa:

$$U = b_{sp} + 2s = b_{sp} + 2h\sqrt{1+m^2}.$$

Hidravlični radij znaša:

$$R = \frac{F}{U}$$

**Priloga 12b: Trapezna oblika prečnega prereza struge****Annex 12b: Trapezoid shape of river bed cross section**

Prečni prerez struge potoka Jereka za širine dna 3.50 m, 4.50 m in 5.50 m.

Tabela 1: Višina vode v koritu  $h(m)$  ob vzdolžnem padcu 5%

Table 1: Height of water in water channel  $h(m)$  at fall by 5%

	K	25	30	35
	$Q_{20}$	2,00 m	1,80	1,60
	$Q_{vv}$	2,80 m	2,50	2,20
	v	3,16 m/s	3,79	4,42



Tabela 2: Višina vode v koritu  $h(m)$  ob vzdolžnem padcu 5%

Table 2: Height of water in water channel  $h(m)$  at fall by 5%

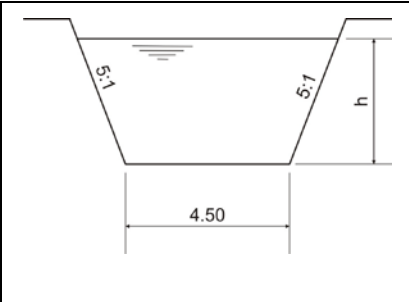
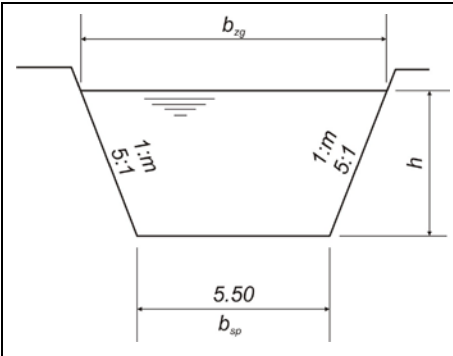
	K	25	30	35
	$Q_{20}$	1.80 m	1.60	1.40
	$Q_{vv}$	2.60 m	2.20	2.20
	V	3.11 m/s	3.73	4.36

Tabela 3: Višina vode v koritu  $h(m)$  ob vzdolžnem padcu  $J=2\%$ ,

Table 3: Height of water in water channel  $h(m)$  at fall  $J = 2\%$

	K	25	30	35
	$Q_{20}$	1,75 m	1,50	1,35
	$Q_{vv}$	2,40 m	2,10	1,80
	v	2,71 m/s	3,25	3,80

**Priloga 13: Izračun visokih voda potoka Ribnica****Annex 13: Calculation of high waters of the creek Ribnica**

Za izračun pretokov visokih voda je uporabljena enačba Kresnika:

enačba Kresnika:

$$Q_{vv} = \frac{32 \cdot \alpha F}{0.5 + \sqrt{F}}$$

$\alpha = 0,70$  ... odtočni koeficient, kjer lahko od 0.6 do 6.0

$$Q_{vv} = 65,65 \text{ m}^3/\text{s}$$

Določitev velikosti pretoka za različne pogostnosti:

$$Q_n = Q_{100} \sqrt[4]{\frac{n}{100}},$$

kjer za  $n$  vzamemo :

$n = 2, 5, 20, 50, 100$  (izbrana povratna doba).

Od tod dobimo:

$$Q_{50} = Q_{vv} \sqrt[4]{0.50} = 55,21 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{20} = Q_{vv} \sqrt[4]{0.20} = 43,92 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{10} = Q_{vv} \sqrt[4]{0.10} = 36,89 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_1 = Q_{vv} \sqrt[4]{0.01} = 20,76 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Priloga 14a: Izračun pretočnih sposobnosti korita potoka Ribnica pod mostom

#### Annex 14a: Calculation of inbank capacities of Ribnica stream channel under the bridge

Osnovni podatki za izračun so:

$F = 23,53 \text{ m}^2$  ...površina pretočnega profila,

$U = 14,62 \text{ m}$  ...omočeni obod pretočnega profila,

$R = 1,609$  ...hidravlični radij,

$v = 2,85 \text{ m/s}$  ...povprečna profilna hitrost vode,

$Q = 67,13 \text{ m}^3/\text{s}$  ...prevodnost pretočnega profila.

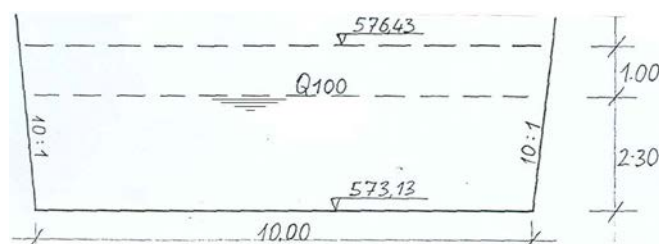
576.43...kota konstrukcije mostu spodaj

1.00 m...rezervna višina

2.30 m...višina struge

### Priloga 14b: Skica profila z vodostajem $Q_{100}$

#### Annex 14b: Rough draft with $Q_{100}$ water level



**Priloga 15a: Dimenzioniranje podslapja Ribnice****Annex 15a: The determination of coefficient of roughness of Ribnica river channel**

Določitev konjugiranih višin podslapja dolvodno od mostu pri pretoku vode po  $m'$  širine struge ( $b$ ):

$$q_{100} = \frac{Q}{b} = \frac{65.65}{10.00} = 6.6 \text{ m}^3/\text{s m}',$$

$b$  ... širina struge

$$h_1^3 = \left[ p + 1.5 \left( q^2 / g \right)^{1/3} \right] h_1^3 + \frac{q}{2g} (1 + \zeta) = 0,$$

$\zeta = 0.20$  ... vertikalna stena

$\zeta = 0.21$  ... stana v nagibu 3:2

$\zeta = 0.23$  ... stena v nagibu 1:6 (Steinman, 1992)

iz enačbe določim  $h_1$

$$h_2 = \frac{1}{2} h_1 + \left( \frac{1}{4} h_1^2 + 4 h_1 \frac{v_1^2}{2g} \right)^{1/2}$$

Oblika vodnega skoka - potopljenost :

$$h_2 = h_0^{sp}, \frac{h_0^{sp}}{h} = 1.1 \text{ do } 1.2$$

Potrebna dolžina podslapja (Steinman, 1992)

Zaključeni prag:

$$L_1 = 4,5 (h_2 - h_1)$$

$$L_2 = 3,6 (q(p + H - h_1))^{1/3}$$

Brez zaključenega praga:

$$L_3 = 8,5 ((h_2 - h_1))$$

Podslapje se meri od prereza, kjer se pojavi prva konjugirana globina ( $h_1$ )

$$q_{100} = 6,6 \text{ m}^3/\text{sm}', \quad h_1 = 0,96 \text{ m} \quad h_2 = 2,60 \text{ m}, \quad v_1 = 6,89 \text{ m/s}, \quad F_r = 2,25$$

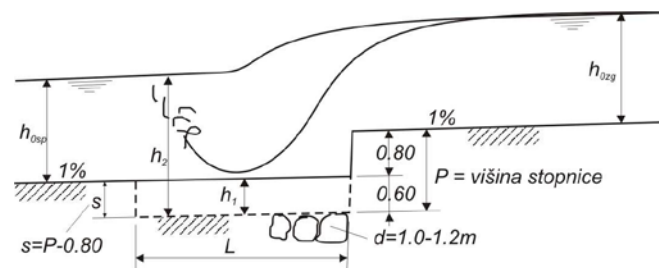
$$q_{20} = 4,40 \text{ m}^3/\text{sm}', \quad h_1 = 0,68 \text{ m} \quad h_2 = 2,10 \text{ m}, \quad v_1 = 6,51 \text{ m/s}, \quad F_r = 2,53$$

$$q_{10} = 3,70 \text{ m}^3/\text{sm}', \quad h_1 = 0,58 \text{ m} \quad h_2 = 1,93 \text{ m}, \quad v_1 = 6,39 \text{ m/s}, \quad F_r = 2,68$$

$$q_1 = 1,5 \text{ m}^3/\text{sm}', \quad h_1 = 0,26 \text{ m} \quad h_2 = 1,119 \text{ m}, \quad v_1 = 5,68 \text{ m/s}, \quad F_r = 3,53$$

### Priloga 15b: Vzdolžni prerez poglobitve podslapja

#### Annex 15b: Longitudinal section of plunge pool deepening



Rezultati dimenzioniranja pragu s podslapjem:

Za  $p = 1,4 \text{ m}$  je poglobitev podslapja :  $S = p - 0,80 \text{ m} = 0,60 \text{ m}$

Dolžina podslapja je  $10 \text{ m}$  za pretok  $Q_{100} = 65,65 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Priloga 16: Izračun zavarovanja in utrditve podslapja za prečnim pragom pod mostom****Annex 16: The calculation of plunge pool protection and consolidation, behind the transverse barrier and below the bridge**

Izračun dimenzij kamna:

$$d = \frac{v_1^3}{6.8} \sqrt{h_1 c_s^3}$$

$C_s = 1$  za horizontalno dno in za  $v_1 = 6,89 \text{ m/s}$  in  $h_1 = 0,96 \text{ m}$   $d$  je:

$$d = 1,06 \text{ m} \sim 1,10 \text{ m za } Q_{100}.$$

Za  $v_1 = 6,39 \text{ m/s}$  in  $h_1 = 0,58 \text{ m}$   $d$  je:  $d = 1,09 \text{ m} \sim 1,10 \text{ m za } Q_{100}$

Kamen za zložbo v suho je dimenzij ( $d$ )  $\emptyset 1,00 \text{ m}$  do  $\emptyset 1,20 \text{ m}$ .

Potrebni podatki za izračun podslapja so:

$Q = 65.65 \text{ m}^3/\text{s}$  ... pretok vode

$v_0 = 3.43 \text{ m/s}$  ... hitrost vode

$p = 0.80 \text{ m}$  ... višina pragu

$A = 23.53 \text{ m}^2$  ... površina pretočnega profila

$U = 14.62 \text{ m}$  ... omočen obod

$R = 1.609 \text{ m}$  ... hidravlični radij

$J = 1 \%$  ... vzdolžni padec

$1.70 \text{ m}'$  ... globina zgornje vode

$$\text{Energijska višina zaradi hitrosti vode: } K = \frac{\alpha v_0^2}{2g} = \frac{1.10 \cdot 3.43^2}{2 \cdot 9.81} = 0.66 \text{ m},$$

$$H_0 = H + K = 2.30 + 0.66 = 2.96 \text{ m}.$$

$$\text{Pretok vode po m' širine struge: } Q = \frac{65.65}{10.00} = 6.57 \text{ m}^3/\text{s}.$$

## Priloga 17: Določitev koeficienta hrapavosti struge potoka Ribnica

### Annex 17 : Dimension of Ribnica plunge pool

Določitev koeficienta naravne struge gorvodno od mostu za neravno dno, grobi gramoz:

$n_G=0.028$ ... grobi gramoz,

$n_v=0$ ... vpliv rastlinstva in vegetacije,

$n_s=0$  ... vpliv spremembe prečnega profila,

$n_p=0.005$ ... vpliv hrapavosti površine,

$n_o=0.010$ ... vpliv prereza in ovir,

$m=1.00$ ... meandriranje (ni vpliva).

Od tod sledi:

$$n'_G = (0.028 + 0.000 + 0.000 + 0.005 + 0.01) \cdot 1.00 = 0.033 \rightarrow 1/n'_G = 30.30,$$

$n_G=0.017$  ... betonske brežine, nevzdrževan beton

oziroma:

$$1/n_G = 59,$$

in povprečni koeficient hrapavosti:

$$n_G = \left( \frac{O_1 + 2O_2}{\frac{O_1}{n_G^{3/2}} + \frac{2O_2}{n_G^{3/2}}} \right)^{2/3} = \left( \frac{10.00 + 2 \cdot 2.10}{\frac{10.00}{0.033^{3/2}} + \frac{2 \cdot 2.10}{0.017^{3/2}}} \right)^{2/3} = 0.025 \rightarrow 1/n_G = 40$$

Voda pod mostom bo lahko imela večje hitrosti, kar posredno pomeni močnejše utrditve podslapja. Določitev koeficienta hrapavosti spodnje struge za naravno dno, grobi gramoz:

$n_G=0.028$ ... grobi gramoz ,

$n_v=0.010$  (0.005)... vpliv rastlinstva in vegetacije,

$n_s=0$  ... vpliv spremembe prečnega profila,

$n_p=0.005$ ... vpliv hrapavosti površine,

$n_o=0.010$  ( $0.015$ )... vpliv prereza in ovir,

$m=1.000$ ... meandriranje (ni vpliva).

Dobimo:

$$n'_G = (0.028 + 0.005 + 0.000 + 0.005 + 0.010) \cdot 1.000 = 0.045$$

$1/n'_G = 22.22$  ... ugodno izbrani faktorji:

$$n'_G = (0.028 + 0.010 + 0.000 + 0.005 + 0.015) \cdot 1.000 = 0.060$$

$1/n'_G = 17.24$  ... neugodno izbrani faktorji

Določitev koeficienta hrapavosti na podlagi 50 % zrna ( $d_{50}$ ) po obrazcu:

$$n_G = 0.039 \sqrt[6]{0.15} = 0.034$$

$$n_G = 0.039 \sqrt[6]{d_{50}} = 0.039 \cdot \sqrt[6]{0.60} = 0.036$$

$$n_G = 0.039 \sqrt[6]{0.75} = 0.037$$

predpostavim:  $d_{50}=0.60$  m (točna določitev zrna s presejno analizo presega obseg naloge)

Glede na izkustveno izbiro debelino kamenja  $d_{50}$  med  $\phi 0.45$  in  $\phi 0.75$  je vrednost

koeficienta hrapavosti med 0.034 in 0.037.

Po podatkih podjetja za urejanje hudournikov (PUH):

pesek, prod, kamni:

$$1/n_G = 34 \quad (n_G = 0.029)$$

z vegetacijo porasle brežine:

$$1/n_G = 30 \quad (n_G = 0.033)$$



$$n_G = \left( \frac{8.50 + 4.73 + 3.21}{\frac{8.50}{0.029^{3/2}} + \frac{7.94}{0.033^{3/2}}} \right)^{2/3} = 0.031$$

Struga dolvodno – prerez naravne struge

$$Q=65.65 \text{ m}^3/\text{s}, N=2.13 \text{ m/s}, 1/n_G=K=20$$

glede na izračunane koeficiente hrapavosti primerjamo rezultate:

SCS metoda: 0.045 (22.22) 0.060 (16.67)

podlaga 50 % zrna: 0.037 (27.03)

PUH (tabele): 0.031 (32.26)

Glede na različne metode je velikost koeficienta hrapavosti med vrednostmi 16.67 (najmanj ugodno) in 32.26 (ugodno) privzamem koeficient hrapavosti:  $1/n_G = K = 25$ . Ob upoštevanju izbranega koeficienta hrapavosti je v strugi hitrost  $v=2.13 \text{ m/s}$ , kar je običajna hitrost, mogoče celo prenizka glede na hudourniški značaj struge.

**Priloga 18: Določitev hidravličnega skoka dolvodno od mostu potoka Ribnica****Annex 18: Determination of hydraulic jump downstream of Ribnica stream bridge**

Tip hidravličnega skoka prikazan na prilogi št. 15 je odvisen od Froudovega števila.

Pretok na 1 m' preliwa:

$$q = 65.65/10.00 = 6.6 \text{ m}^3/\text{s m}'$$

razmerje konjugiranih višin:

$$h_2''/h_1' = 0.5 \left( \sqrt{1 + 8 Fr^2} - 1 \right)$$

Določitev prve konjugirane višine po enačbi:

$$h_1'^3 - \left[ p + 1.5 \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \right] h_1'^2 + \frac{q^2}{2g} (1 + \zeta) = 0$$

$$h_2'' = -0.5 h_1' + \left( 0.25 h_1'^2 + 4 h_1' \frac{v_1'^2}{2g} \right)^{1/2}$$

Tabela 1: Iteracijsko reševanje kubične enačbe za konjugirane globine

Table 3: Iterative solving of cubic equation for conjugated depths

predpostavim $h_1'$ (m)	1.00	1.10	1.12	1.115
rezultat (m)	+0.39	+0.05	-0.03	-0.0078

Konjugirana višina  $h_1'$  je 1.115 m pri hitrosti  $v' = 5.92 \text{ m/s}$ .

Konjugirana višina  $h_2'' = 2.32 \text{ m}$ , pri teh višinah je Froudovo število  $Fr = 1.79$ .

Določitev konjugirane višine  $h_2''$  s pomočjo grafa, ki upošteva vzdolžni padec struge (graf. št. 2.9):

$$Fr = 1.79 \rightarrow \begin{array}{ll} h_2''/h_1' = 2.0 & J = 0\%; h_2'' = 2.23 \text{ m} \\ h_2''/h_1' = 2.4 & J = 5\%; h_2'' = 2.68 \text{ m} \end{array}$$

Določitev  $h_2''$  s pomočjo grafa, ki upošteva obliko struge (graf. št. 2.10):

$$v' = 5.92 \text{ m/s}, h_1' = 1.115 \text{ m}, \text{ trapez: } h_2''/h_1' = 2.3, h_2'' = 2.56 \text{ m}$$

$$v'' = \frac{6.60}{2.32} = 2.84 \text{ m/s}, Fr = \frac{2.84}{\sqrt{9.81 \cdot 2.32}} = 0.60$$

Glede na velikost Froudovega števila  $Fr=1.79$  je vodni skok slaboten, z disperzijo energije do 15 %. Glede na literaturo (Steinman, 1992) se dejanski vodni skok ne pojavi.

Izračun dolžine podslapja:

$H_0=2,96 \text{ m}$ ... energijska višina

$v=3.43 \text{ m/s}$ ... hitrost

dolžina dometa slapa:

$$L_1 = (v + v_s) \sqrt{\frac{2H_1}{g}} + H = (3.43 + 6.72) \sqrt{\frac{2 \cdot 1.40}{9.81}} + 2.30 = 7.72 \text{ m}$$

$$v_s = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 2.30} = 6,72 \text{ m/s}$$

Preliv s širokim pragom:

$$L_1 = 1.75 \sqrt{H_0(H_1 + 0.22H_0)} = 1.75 \sqrt{2.96 + (1.40 + 0.22 \cdot 2,96)} = 3,92 \text{ m}$$

$$H_0 = H + K = 2.30 + 0.66 = 2.96 \text{ m},$$

kjer je:

$$H_1 = 1.40 \text{ m} \dots \text{ globina slapa}$$

Preliv pravokotnega prereza:

$$L_1 = 1.65 \sqrt{H_0 (H_1 + 0.32 H_0)} = 1.65 \sqrt{\frac{2.96 + (1.40 + 0.32 \cdot 2.96)}{\sqrt{\quad}}} = 3.80 \text{ m}$$

Enačba Müllerja (ETH Zürich):

$$L = 4 H_0^{3/2} \cdot H_1^{1/2}$$

Domet po teoriji o gibanju majhnih delcev:

$$L = 2\varphi \sqrt{H y_{\max}} = 2 \cdot 0.95 \sqrt{3.76 \cdot 1.75} = 4.87 \text{ m}$$

$$H = 2.30 + 0.66 + 0.80 = 3.76 \text{ m}$$

$$y_{\max} = (0.64 \cdot 2.96) \cdot 0.50 \cdot 0.80 = 1.75 \text{ m}$$

Dolžina podslapja, merjeno od mesta pojava prve konjugirane višine  $h_1'$  (Steinman, 1992):

- v primeru udarnega praga:

$$L_2 = 4.5 (h_2'' - h_1') = 4.5 (2.32 - 1.11) = 5.45 \text{ m}$$

$$L_2 = 3.6 (q (H_1 + H_0 - h_1'))^{1/3} = 3.60 (6.60 (1.40 + 2.96 - 1.11))^{1/3} = 10.00 \text{ m}$$

- v primeru brez udarnega praga:

$$L_2 = 8.5 (h_2'' - h_1') = 8.5 (2.32 - 1.11) = 10.29 \text{ m}$$

- oziroma z enačbo drugih avtorjev (Heineman, 2003):

$$L_2 = 6 (h_2'' - h_1') = 6 (2.32 - 1.11) = 7.26 \text{ m}$$

## Priloga 19: Izračun podslapja v odvisnosti od podpornih sil

### Annex 19: Calculation of plunge pool in dependence to supporting forces

Izračun podslapja pod prečnim prerezom iz priloge št. 16 z uporabo podpornih sil (Vischer, 2002) z izenačitvijo energij:

$$H_0 + H_1 = h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \Delta z_{e1}$$

$$\Delta z_{e1} = (0.006 \cdot 0.1) \cdot \frac{v_1^3}{2g}$$

podporni sili za pravokotni prerez:

$$S_1 = \rho g \frac{b h_1^2}{2} + \rho Q v_1$$

$$S_2 = \rho g \frac{b h_2^2}{2} + \rho Q v_2$$

Iz primerjave izračunanih sil določimo:

$S_1 = S_2$  ... prerez 1 in 1' sovpadata, ni dolžine toka do prve konjugirane višine (zajeza), skok se začne v peti jezu.

$S_1 > S_2$  ... prva konjugirana višina se pojavi od pete jezu dolvodno, kjer je  $S_1 = S_2$

$$h_1' = H_0 + H_1 - \frac{v_1^2}{2g} - \Delta z_{e1}$$

Določitev prve konjugirane višine ( $h_1'$ ):

predpostavim 1.00 m,  $v_1 = \frac{6.60}{1.00} = 6.60$  m/s, dobim:

$$h_1' = 1.40 + 2.96 - \frac{6.60^2}{2 \cdot 9.81} - 0.1 \cdot 2.22 = 1.92 \text{ m,}$$

predpostavim 0.80 m,  $v_1 = \frac{6.60}{0.80} = 8.25 \text{ m/s}$ , dobim:

$$h_1' = 1.40 + 2.96 - \frac{8.25^2}{2 \cdot 9.81} - 0.1 \cdot 3.47 = 0.54 \text{ m},$$

predpostavim 0.75 m,  $v_1 = \frac{6.60}{0.75} = 8.80 \text{ m/s}$ , dobim:

$$h_1' = 1.40 + 2.96 - \frac{8.80^2}{2 \cdot 9.81} - 0.1 \cdot 3.95 = 0.01 \text{ m}.$$

Glede na predpostavljeno globino vode je dosežena zadostna točnost za prvo konjugirano višino.

Izračun podporne sile z upoštevanjem predpostavljene globine vode v strugi:

$$S_1 = 1000.00 \cdot 9.81 \cdot \frac{1.00 \cdot 0.75^2}{2} + 1000.00 \cdot 6.60 \cdot 1.00 \cdot 8.80 = 2759 \text{ N} + 68080 \text{ N} = 60.84 \text{ kN}$$

$$S_2 = 1000.00 \cdot 9.81 \cdot \frac{1.00 \cdot 2.32^2}{2} + 1000.00 \cdot 6.60 \cdot 1.00 \cdot 2.84 = 26401 \text{ N} + 18744 \text{ N} = 45.15 \text{ kN}$$

$$v_2 = \frac{6.60}{2.32} = 2.84 \text{ m/s} \quad h_1' = 1.12, \quad Fr = 1.79.$$

Dolžina zajezbe:

$$h_2''/h_1' = 4 \rightarrow l = 4 h_1' = 4.48 \text{ m}$$

Predpostavim globino tolmana z višino praga, ki znaša 0.60 m:

$$\begin{aligned} S_2' &= 1000.00 \cdot 9.81 \cdot \frac{1.00 \cdot (2.32 + 0.60)^2}{2} + 1000.00 \cdot 6.60 \cdot 1.00 \cdot 2.84 = \\ &= 41822 \text{ N} + 18744 \text{ N} = 60.57 \text{ kN} \end{aligned}$$

Primerjava podpornih sil:

$$S_1 = 60.84 \text{ kN}; \quad S_2' = 60.57 \text{ kN}.$$

Pogoj  $S_1 = S_2'$  je izpolnjen, višina protipraga je pravilno izbrana, kjer oznake pomenijo:

$S_1 < S_2$  ... hidravlični skok nastane gorvodno od pete jezua.

Disperzija energije je zelo slaba. Izračun odgnanega vodnega skoka brez upoštevanja poglobitve:

$$H_0 = 2.30 + 0.66 = 2.96 \text{ m}$$

Pretok na 1m' širine struge:

$$q = 65.65/10.00 = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dolžina dometa slapu pri dotočni hitrosti (Jevtić, 1978)

$$v = 0.67 \cdot \sqrt{2 g H_0} = 5.11 \text{ m/s}$$

znaša:

$$L_1 = \varphi \sqrt{H_0 (2H_1 + H)} = 1.00 \sqrt{2.96 (2 \cdot 0.80 + 2.30)} = 2.62 \text{ m (brez poglobitve)}$$

$$L_1 = 1.00 \sqrt{2.96 (2 \cdot 1.40 + 2.30)} = 3.89 \text{ m (s poglobitvijo)}$$

Izračun dolžine podslapja:

- brez poglobitve:

$$L_2 = 4.30 \cdot 2.32 = 9.98 \text{ m}$$

- s poglobitvijo:

$$L_2 = 3.20 \cdot 2.25 = 7.20 \text{ m}$$

- s poglobitvijo:

$$L_{2\min} = 4.80 \cdot (2.25 - 0.96) = 10.08 \text{ m}$$

$$L_{2\max} = 6.60 \cdot (2.25 - 0.96) = 12.04 \text{ m}$$

**Priloga 20: Utrditev podslapja z vodno blazino****Annex 20: Consolidation of plunge pool using water cushion**

Potrebna utrditve podslapja z vodno blazino (Jevtić, 1978) za prerez struge Ribnice je narisana v prilogi št. 16:

$$d^2 = \frac{L_1^2 b (H + a) \chi_w + b \chi_1}{2 \sigma b} = \frac{3.33^2 \cdot 1.00 \cdot (2.30 + 0.60) \cdot 10.00 + 1.00 \cdot d \cdot 26.00}{2 \cdot 500.00 \cdot 1.00} = 0.32 + 0.026 \cdot d$$

Razpetina podpor podslapja  $L_1$  (Jevtić, 1978) je privzeta kot tretjina širine preliva:

$$L_1 = 10.00/3 = 3.33 \text{ m},$$

in dopustna natezna trdnost betona in kamenja je  $50 \text{ kN/m}^2$ .

Iskanje ničel kvadratne enačbe:

$$d^2 - 0.026d - 0.32 = 0,$$

podaj iskano dimenzijo utrditve podslapja:

$$d_{1,2} = \frac{0.026 \pm \sqrt{0.026^2 + 4 \cdot 0.32}}{2} = \frac{0.03 \pm 1.13}{2} = 0.58 \text{ m}.$$

Iztočna višina:  $h_{iz} = 0.64 H_0$  (M.N. Pavlovski)

$$d^2 = \frac{b_1^2 \cdot 6}{12 \sigma b} \left( \frac{\chi_w Q \sin \alpha (0.32 H_0 + 0.80)}{10.00} + d \cdot 25.00 \right),$$

$$d^2 = \frac{3.33^2 \cdot 6}{12 \cdot 250 \cdot 1.00} \left( \frac{10.00 \cdot 65.65 \cdot 0.928 \cdot 1.78}{10.00} + d \cdot 25.00 \right),$$

$$d = \frac{0.55 \pm \sqrt{0.30 + 9.56}}{2} = \frac{0.55 + 3.14}{2} = 1.85 \text{ m}.$$



Utrditev podslapja brez vodne blazine, izračunana za naslednje podatke:

-teža vode ( izračunana za čas 1 sekunde):

$$G = \chi_w Q = 10.00 \cdot 65.65 = 656.5 \text{ kN},$$

-kot pod katerim pade voda na utrditev:

$$\tan \alpha = \frac{g t}{v_0} = \frac{\sqrt{2g(H_0 + H_1)}}{3.43} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot (2.96 + 0.80)}}{3.43} = 2.50,$$

$$\alpha = 68.2^\circ; \sin \alpha = 0.928,$$

$g t$  ... hitrost navpičnega padanja,

$v_0$  ... dotočna hitrost.

Kinetična energija masne točke vode:

$$E_K = \frac{m v^2}{2},$$

pri čemer je masa vode:

$$m = \frac{G}{g},$$

in hitrost padanja:

$$v = \sqrt{2g(H_0 + H_1)}.$$

Od tod sledi kinetična energija vodnega curka:

$$E_K = \chi_w Q (H_0 + H_1) = 10.00 \cdot 65.65 (2.96 + 0.80) = 2468.44 \text{ kNm},$$

$$N = 2468.44 \cdot \sin \alpha = 2291.91 \text{ kNm}.$$

Obtežba za širino 1 m (širina prelivne krone  $l$  je 10.00 m):

$$Q_v = \frac{N}{l} = \frac{2291.11}{10.00} = 229,19 \text{ kN} \quad q_v = \frac{Q_v}{1 \text{ m}^2} = 229.19 \text{ kN/m}^2 .$$

lastna teža kamnitega tlaka predvidene debeline 0.50 m:

$$q_z = 0.50 \cdot 26.00 \cdot 1.00 = 13.00 \text{ kN/m}^2 .$$

Tlačna obtežba na tlakovano podslapje:

$$q_v + q_z = 229.19 + 13.00 = 242.19 \text{ kN/m}^2 ,$$

$$M = \frac{q d_1^2}{12} = \frac{242.19 \cdot 3.33^2}{12} = 223.80 \text{ kNm} ,$$

$$\frac{M}{\sigma} = W = \frac{b d^2}{G} \rightarrow t = \sqrt{\frac{GM}{\sigma b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 235.81}{5.00 \cdot 1.00}} = 1.68 \text{ m} .$$

Določitev debeline uporabljenih kamnov po Isbachu, (Heinemann 2003):

$$d_s = \frac{v^2}{2c^2 g \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right)} = \frac{3.43^2}{2 \cdot 9,81 \cdot \left( \frac{26.00 - 10.00}{10.00} \right)} = 0.51 \text{ m} ,$$

$$d_s = \frac{3.43^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 1,20^2 \cdot 1.6} = 0.26 ,$$

pri čemer veljajo naslednji pogoji:

$$d_{50} \geq d_s ,$$

$$d_{100} \geq 1.7 \cdot 0.51 = 0,87 \text{ m} ,$$

$$d \geq 2d_{50} = 2 \cdot 0.51 = 1.02 \text{ m} ,$$

$$d \geq 1.5d_{100} = 1.5 \cdot 0.87 = 1.31 \text{ m} .$$

## Priloga 21: Časopisna vest o poškodbi državne ceste R3-633/1099 Bitnje – Jereka ob potoku Jereka

### Annex 21: Newspaper article about damage on state highway R3-633/1099 Bitnje – Jereka along Jereka river

**GORENJSKA** / info@g-glas.si Torek, 12. oktobra 2004

# Popravljajo cestni usad

**Jereka -** Cestno podjetje Kranj je v začetku avgusta preplastilo posamezne odseke na dober kilometer dolgem odseku ceste Jereka - Bitnje, ki jih je zima najbolj poškodovala, pred kratkim pa so se lotili še cestnega usada, zaradi katerega je bila na omenjeni cesti polovična zapora prometa.

cestno zaporo odstranili. Cestno podjetje Kranj je asfaltiralo tudi 600-metrski makadamski odsek ceste na Pokljuki in končali so cesto okrog Bohinjskega jezera, od Ribčevega Laza do Ukanca, kjer naj bi do konca oktobra uredili še brežino in ograje. **Renata Škrjanc,** foto: Tina Dokl

Direkcija Republike Slovenije za ceste je pred začetkom del opravila raziskavo zemljišča, saj naj bi bilo območje cestnega usada zelo plazovito, poleg tega so ugotovili, da je pod zemljiščem tudi večja skala. "Po izkopu in odstranitvi skale, bomo zgradili oporni zid, zasuli cestni usad, cesto bomo asfaltirali in namestili zaščitno ograjo. Z deli smo pohiteli, saj moramo cestni usad sanirati še pred zimo, ki bi ga še dodatno povečala," je povedal vodja vzdrževalne službe v kranjskem cestnem podjetju **Gojko Bogataj**. Dela bodo stala okrog 7 milijonov tolarjev, denar pa bo, ker je cesta skozi Korita državna cesta, zagotovila Direkcija RS za ceste. Zaradi obsežnih del je omenjena cesta zaprta za ves promet. Dela naj bi končali do 20. oktobra, ko bodo



Cesta skozi Korita bo zaradi urejanja cestnega usada zaprta predvidoma do 20. oktobra.

Časopisna vest navaja zgolj predviden potek sanacije poškodbe ceste. Dejanskih vzrokov poškodbe ceste ne navaja, pa tudi vzdrževalci so usmerjeni zgolj na izgradnjo konstrukcije, kot delno rešitev za zagotovitev prevoznosti ceste. Za uskladitev poteka ceste in struge potoka ni ne volje, ne časa.

**Priloga 22: Primerjava gradbenih količin prečnih in vzdolžnih zgradb****Annex 22: Comparison of building quantities of transverse and longitudinal constructions**

Za primerjavo rešitev s prečnimi ali vzdolžnimi zgradbami na dolžini 220 m<sup>1</sup> ob prometnici sem privzel samo glavne največje gradbene količine. Površina prečnega prereza je privzeta enako za vse konstrukcije. Debelina krone zgoraj je 0.50 m, zaledna stena je navpična in sprednja zračna stena v nagibu 5:1. Prostornina petih prečnih zgradb (pregrade prelivne višine 1.00 m):

$$\text{Površina prereza: } (0.50 + 0.20 \cdot 3.00 + 0.50) \cdot 3.00 = 2.40 \text{ m}^2$$

$$\text{Prostornina: } 2.40 \cdot (6.00 + 10.00 + 10.00 + 8.00 + 15.00) = 117.60 \text{ m}^3$$

Prostornina pregrade prelivne višine 2.00 m:

$$\text{Površina prereza: } (0.50 + 0.20 \cdot 4.00 + 0.50) \cdot 4.00 = 3.60 \text{ m}^2$$

$$\text{Prostornina: } 3.60 \cdot 9.50 = 34.20 \text{ m}^3$$

Skupaj je prostornina pregrad 152 m<sup>3</sup>.

Z dvigom dna struge se erodirane brežine utrdijo z zaplavitvijo. Površina zasutih brežin je (220.00 m<sup>1</sup> · 3.00 m<sup>1</sup>) je 1320 m<sup>2</sup>.

Dodatne vzdolžne konstrukcije povprečne višine 4.00 m postavljene enostransko ob prometnici:

$$\text{Površina prečnega prereza je } 3.60 \text{ m}^2$$

$$\text{Prostornina konstrukcije: } 60.00 \text{ m}^1 \cdot 3.60 \text{ m}^2 = 216.00 \text{ m}^3$$

$$\text{Kamnita obloga strme brežine: } (35.00 \cdot 5.00 + 67.00 \cdot 6.00) \cdot 1.41 = 247 + 567 = 814 \text{ m}^2$$

Prostornina vzdolžnih zgradb:

Površina prečnega prereza vzdolžne zgradbe (podporni zid višine 7.00 m):

$$(0.50 + 0.20 \cdot 0.50 + 7.00) \cdot 7.00 = 8.40 \text{ m}^2$$

Prostornina:  $8.40 \cdot 65.00 = 546 \text{ m}^3$

Površina podpornega zidu višine 4.00 m je  $3.60 \text{ m}^2$ .

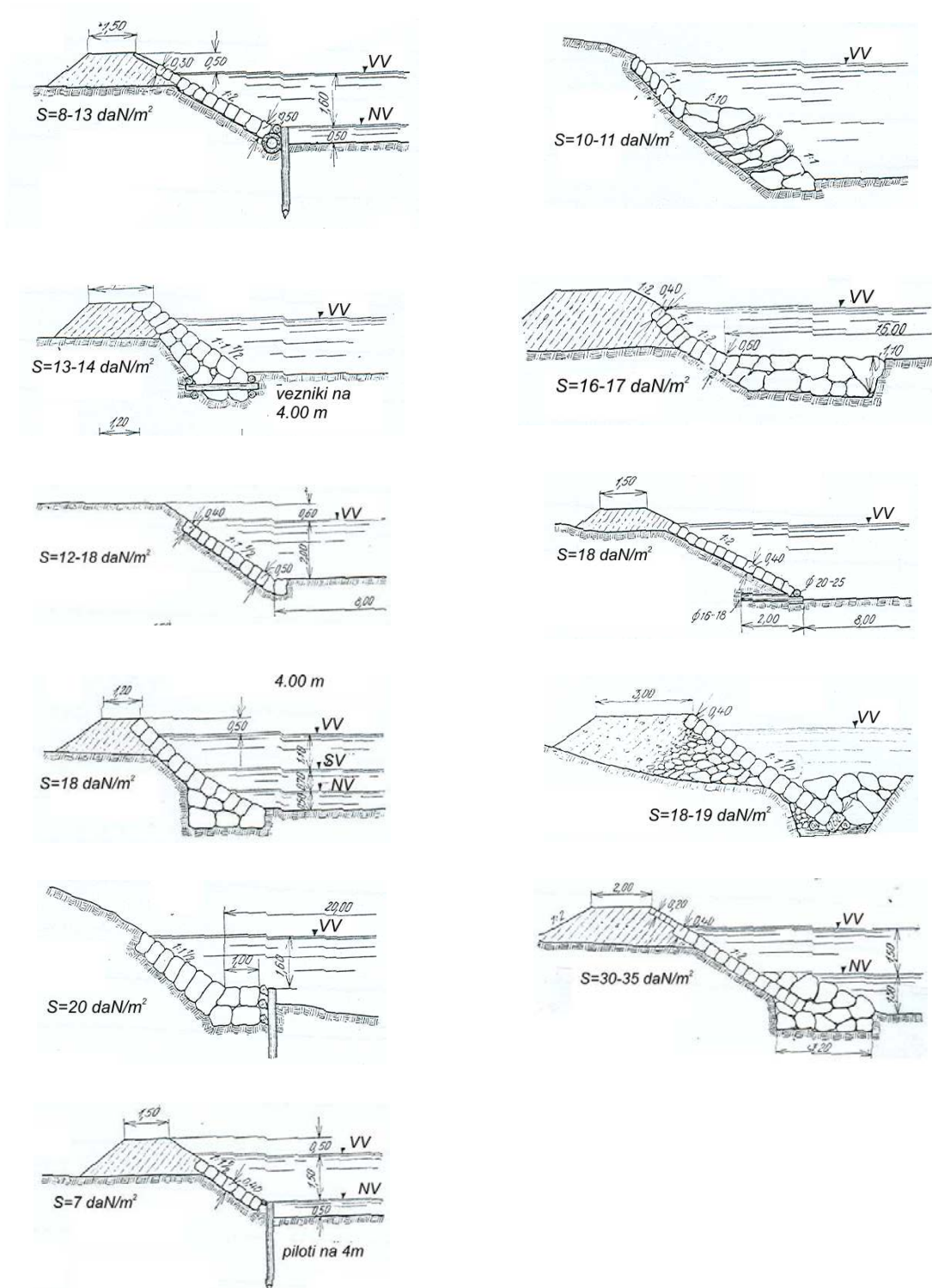
Prostornina:  $3.60 (220.00 - 65.00) = 558 \text{ m}^3$ , skupaj  $546 + 558 = 1104 \text{ m}^3$

Kamnita obloga strme brežine:  $(67.00 + 13.50 + 35.00 \cdot 7.00) \cdot 1.41 = 1228 + 346 = 1574 \text{ m}^2$

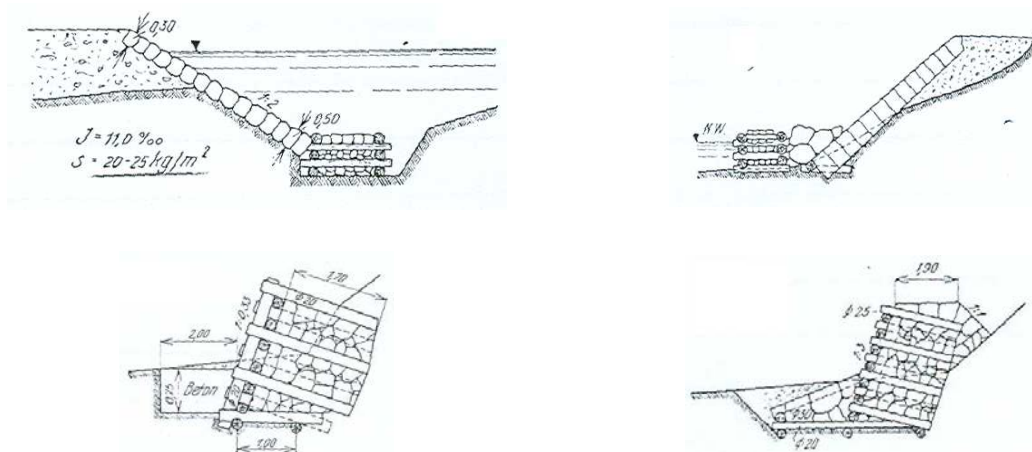
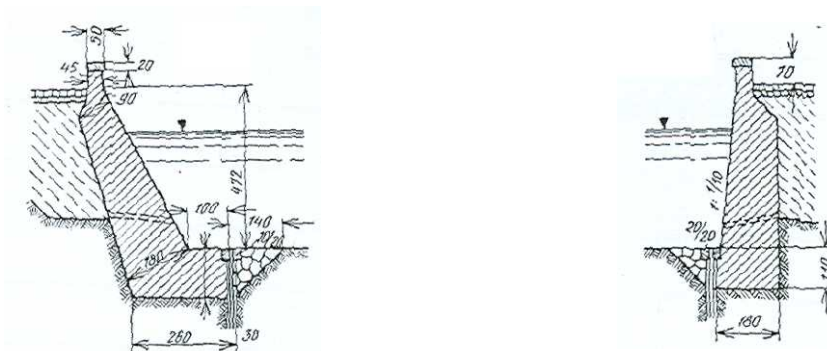
Trajanje zapore ceste pri gradnji prečnih zgradb predvidevam 3 dni za eno pregrado. Vzdolžna zgradba je večji gradbeni poseg, zahteva gradbišče vzdolž prometnice na celotni dolžini zgradbe in zaporo ceste ves čas gradnje predvidoma 3 mesece. Glede na primerjavo najvažnejših pogojev gradnje in gradbenih količin konstrukcij, je rešitev z uporabo prečnih zgradb v obravnavanem primeru ugodnejša.

**Priloga 23a: Zaščita brežin s kamnitimi zložbami in kamenometi (Schoklitsch II, 1930)**

**Annex 23a: Protection of slopes with stone compounds (Schoklitsch II, 1930)**





**Priloga 23d: Zaščita brežin s kamnitimi kaštami (Schoklitsch II, 1930)****Annex 23d: Protection of slopes with stone compounds (Schoklitsch II, 1930)****Priloga 23e: Zaščita brežin z obrežnim armirano betonskim zidom (Schoklitsch II, 1930)****Annex 23e: Protection of slopes with river side reinforced concrete wall (Schoklitsch II, 1930)**



### Priloga 24: Slika vzdolžne konstrukcije med kolesarsko stezo in reko Savo

### Annex 24: Image of longitudinal construction between cycle track and Sava river



Na sliki je prikazana pravilna uporaba vzdolžnih konstrukcij za primer poteka železniške proge pod pobočjem, po opustitvi železniške proge pa se je zgradilo cesto in leta 2005 kolesarsko stezo, za kar se je moralo pridobiti dodatno zemljišče. Reka Sava se je na tem mestu utesnila tako, da sedaj spreminja smer toka ob novozgrajeni vzdolžni konstrukciji in ne ob stiku s pobočjem.



Prikaz večjega področja Save Dolinke (MOP-ARSO).

Reproduction of major Sava Dolinka area (MESP-EARS).