

sustavi koji uče, pa im se djelovanje u toku vremena usavršava.

Optimalni sustavi. Neko je svojstvo optimalnog sustava najbolje moguće s obzirom na realne radne uvjete i ograničenja. Kriterij optimalnosti može biti brzina prijelazne pojave, točnost regulacija, utrošak energije, težina itd. U jednostavnim se optimalnim sustavima željeno svojstvo osigurava uz determinirane signale, te stalnu strukturu i parametre procesa. Složeniji optimalni sustavi ujedno su i adaptivni sustavi.

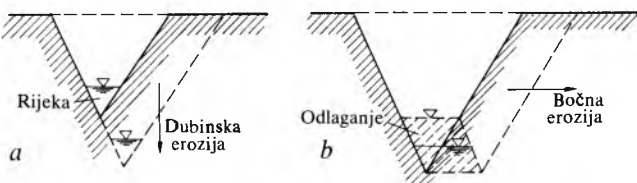
LIT.: H. Chestnut, R. Mayer, Servomechanisms and Regulating System Design, I. i II. J. Wiley, New York 1959. – J. Ch. Gille, P. Decaulne, M. Pélegrin, Théorie et calcul des asservissements linéaires. Dunod, Paris 1967. – F. Kümmel, Elektrische Antriebstechnik. Springer-Verlag, Berlin 1971. – В. А. Бесекевский, Е. П. Понов, Теория систем автоматического регулирования. Наука, Москва 1972. – F. Csáki, Modern Control Theories. Akadémiai Kiadó, Budapest 1972. – N. Pašalić, Osnovi regulacione tehnike. Elektrotehnički fakultet Zagreb, Zagreb 1977. – N. Munro, Modern Approaches to Control System Design. Peter Peregrinus Ltd., Stevenage 1979. – J. Božičević, Temelji automatike 1. Školska knjiga, Zagreb 1980. – T. Šurina, Automatska regulacija. Školska knjiga, Zagreb 1981. – Lj. Kuljača, Z. Vukić, Automatsko upravljanje sistemima. Školska knjiga, Zagreb 1985. – W. Leonhard, Control of Electrical Drives. Springer-Verlag, Berlin 1985. – M. Stojić, Kontinualni sistemi automatskog upravljanja. Naučna knjiga, Beograd 1985.

N. Pašalić

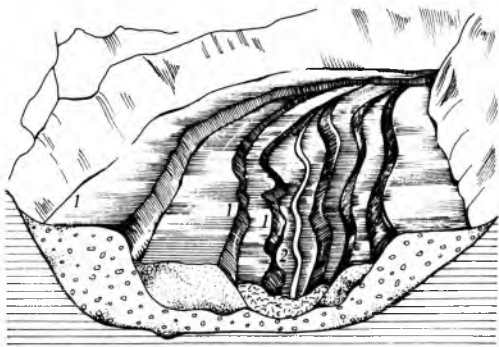
REGULACIJA VODOTOKA, uređenje vodenog toka i vodenog režima da bi se spriječile poplave, osigurala opskrba vodom industrije i stanovništva te omogućila što redovitija plovidba. To se postiže korekcijom vodene linije vodotoka, pogodnim formiranjem riječnog korita, osiguranjem dna i obala, gradnjom ustava i brana (v. Brane, TE 2, str. 119) te kanaliziranjem rijeka (v. Plovni putovi, TE 10, str. 427).

Količina vode koja protječe vodotokom ovisi o oborinama i topljenju snijega na oborinskom području. Najveće štete uzrokuju velike vode (poplave, zamočvarenje zemljišta), pogotovo u vrijeme vegetacijskog razdoblja. Ako je riječno korito duboko ispod obalnog područja, te ako vodotok ima velik pad, korito se produbljuje, pa se snižuje razina podzemnih voda do kojih korijenje raslinstva ne doseže. Riječni tokovi, osim toga, nose materijal iz korita i s obala u gornjem toku što se taloži u donjem toku, pa se tako mijenja korito i u gornjem i u donjem toku.

Postanak dolina. Današnje doline nastale su većinom u aluviju, i to erozijskim djelovanjem vodotoka. Ako je erozija intenzivnija po dubini nego po bokovima (dubinska erozija,

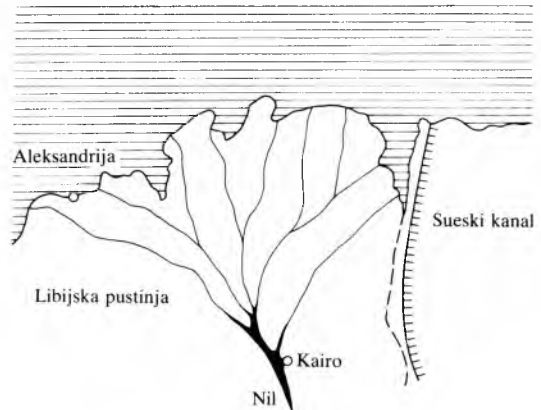


Sl. 1. Usijecanje dolina. a dubinska erozija, b bočna erozija



Sl. 2. Riječna dolina s riječnim terasama (1) i riječnim koritom (2) u posljednjoj fazi razvoja

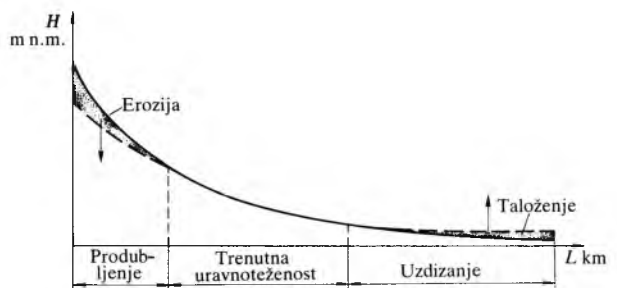
sl. 1a), nastaju usječene doline. One obično nemaju uledinjenih površina niti zemljanog sloja, a ako su uske i duboke, nazivaju se klancima, klisurama. Kad je bočna erozija intenzivnija od dubinske (sl. 1b), nastaju široke doline s uledinjenim površinama koje se mogu obrađivati. Ako je riječno korito bilo toliko udubljeno da rijeka ne može poplaviti ostatak doline, nastale su riječne terase (sl. 2). U donjem riječnom toku pad je obično vrlo malen, pa se tamo talože svi materijali koje vodotok nosi. Zbog toga nastaju naplavljene doline. Na ušćima u more ili jezero nastaju vrlo razgranate delte (sl. 3); neke delte sve više prodiru u more (delta Mississippija prodire u more 40...100 m godišnje).



Sl. 3. Delta Nila, duljina ~200 km

Prirodna se erozija povećava gradnjom prokopa i nasipa, pa njihova izgradnja može i štetno djelovati. I uspori uzrokuju povećano produbljivanje korita nizvodno od brana. U gornjem toku Rajne, između Basela i Strassbourga, na potezima ispod upornih građevina, korito je produbljeno oko 5 metara već u razdoblju od 4 godine.

Pad se vodotoka smanjuje od izvora do ušća (sl. 4). U gornjem toku zbog većeg pada doline su duboko usječene, a voda vuče velike količine krupnijeg nanosa. U srednjem toku obično vlada ravnoteža između djelovanja tekuće vode i otpora materijala na dnu i pokosima. To se ravnotežno stanje može poremetiti gradnjom građevina. U donjem se toku pad toliko smanjuje da se veći dio nanosa taloži stvarajući naplavine.



Sl. 4. Uzdužni profil vodotoka

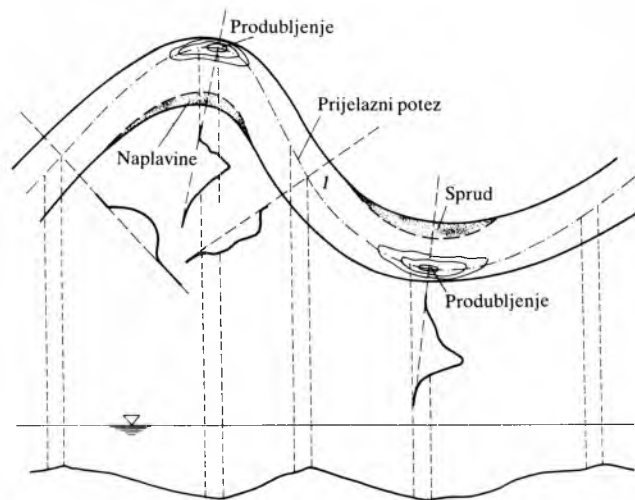
Jedna je od osnovnih svrha regulacije da se postigne usklađeno smanjenje pada uzduž vodotoka.

U gornjem dijelu vodotoka (pad veći od 1%) voda silovito otječe preko prirodnih zapreka u obliku nepravilno razbacanih stijena uz intenzivno miješanje vode i zraka. Na tom se dijelu vodotoka veće kamenje drobi i neotporni se blokovi krše, pa se korito formira u nanosu drobljenog kamenja i obluka. Taj se nanos prenosi kao nanos dna kotrljanjem i klizanjem, dok sitnija zrna mijenjaju svoj položaj, čas kao nanos dna, a čas kao polususpendiran ili suspendiran nanos. Na tom dijelu vodotoka udio nanosa u vodi može iznositi i 30%.

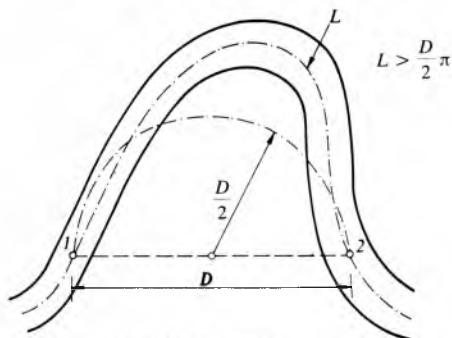
Obluče se postupno smanjuje, a vodotok prelazi u srednji tok s padom od 5‰ do 0,5‰. Sa smanjenjem veličine nanosa smanjuje se i uzdužni pad korita. Korito je relativno stabilno,

a sastavljeno je od krivina koje nastaju prirodnim razvojem riječnog toka u težnji da se postigne ravnoteža između kinetičke energije vode, prijenosa i razmještaja nanosa te otpora korita.

Razvoj riječnog toka. Voda teži da otječe u ravnoj liniji u smjeru najvećeg pada. U prirodi se, međutim, vodotok zbog prirodnih zapreka stalno odmiče od smjera najvećeg pada. Zbog erozijskog djelovanja vodene struje na vanjskoj se strani krivine (konkavni dio) korito produbljuje, a zbog taloženja nanosa na unutrašnjoj strani (konveksni dio) nastaju u koritu sprudovi (sl. 5). Zbog toga postaju krivine sve veće, rijeka krivuda i nastaju meandri (sl. 6). Naziv *meandar* potječe od maloazijske rijeke Meandar, danas Menderes u Turskoj, koja je karakteristična po svojem vijuganju. Ako se krajevi meandra (točke 1 i 2 na sl. 6) toliko približe da velike vode prodru mimo meandra, tok će se rijeke skratiti, a pad povećati uz eroziju dna.



Sl. 5. Plan vodotoka s uzdužnim i poprečnim profilima. I linija najvećih dubina



Sl. 6. Meandar vodotoka

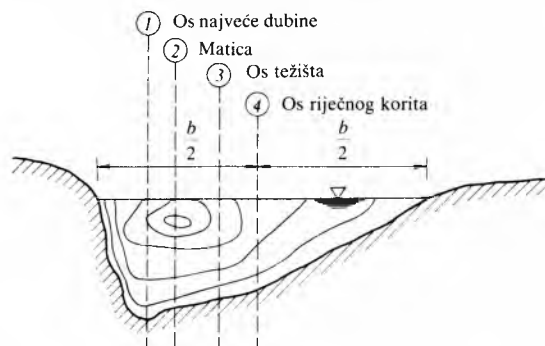
Zbog strujanja vode produbljuje se korito i pješčani sprudovi mijenjaju uzduž vodotoka. Te su promjene karakteristika nereguliranog vodotoka. Regulacijom vodotoka potrebno je predvidjeti dobre prijelaze između dviju krivina (sl. 5).

Dubine se vode mijenjaju uzduž vodotoka i poprečno na njega. Najveće su dubine nizvodno od tjemena krivine, a najmanje nešto nizvodnije od točke infleksije krivine. Mjesta najvećih dubina nazivaju se virovima, a mjesta malih dubina pragovima, plicicama, gazovima.

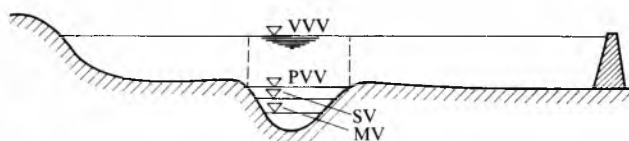
Kad se promatra neki poprečni presjek korita (sl. 7), razlikuje se os najveće dubine, matica rijeke gdje je brzina vode najveća, os težišta koja prolazi težištem profila vodotoka i os riječnog korita koja prolazi kroz polovicu širine vodene površine.

Ako se spoje točke površine ispod kojih su najveće dubine, dobiva se linija najvećih dubina vodotoka. Analogno se dobiva linija najvećih brzina (matica rijeke) i linija riječnog

korita (os riječnog korita). U situacijske planove vodotoka unosi se os riječnog korita i linija najvećih dubina. Budući da os riječnog korita ovisi o vodostaju, u plan se mora unijeti i podatak o vodostaju kojemu odgovara prikazana ucrtana os. Uz tu os unosi se *stacionaža*, udaljenost od riječnog ušća.



Sl. 7. Poprečni presjek korita s položajem karakterističnih osi



Sl. 8. Poprečni presjek riječnog korita. MV razina male vode, SV srednji vodostaj, PVV prosječni visoki vodostaj, VVV najviši visoki vodostaj

Riječno se korito (sl. 8) sastoji od osnovnog korita (do razine srednje vode, SV), glavnog ili matičnog korita koje se uzdiže iznad razine srednje velike vode (SVV), i korita za veliku vodu koje obuhvaća glavno korito i inundacije.

Obale su na konkavnom dijelu krivine strme, a katkada i okomite, dok je obala na konveksnom dijelu krivine položena.

Nestabilnost obala. Geološka i geomehanička svojstva tla u kojemu je formirano riječno korito utječu na njegov razvoj, na morfološke oblike koji se pojavljuju i na režim riječnog nanosa.

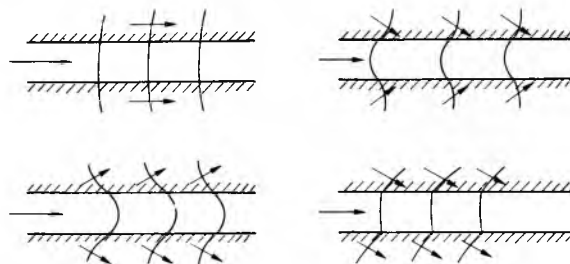
Riječne dionice u materijalu koji je otporan na djelovanje vode imaju stabilno korito. To treba uzeti u obzir pri određivanju trase reguliranog korita i pri razradbi metoda za formiranje korita.

Na stabilnost obala veoma utječe slojevitost tla, režim podzemnih voda i njihova ovisnost o vodostaju u rijeci i o brzini promjene vodostaja.

Obale se mogu zarušavati: a) kad je kinetička energija vode tolika da ispire donje slojeve, pa se zbog toga gornji slojevi urušavaju, b) kad se pri malim vodostajima dreniraju obalna područja ispiranjem čestica u vodopropusnim slojevima i tako se potkopavaju slojevi tla i c) kad se, ako su takva svojstva tla, strujanjem podzemnih i procjednih voda stvaraju klizne površine po kojima se ruši obala.

Izloženi su rušenju one obale gdje se smjer dotoka podzemnih voda suprotstavlja smjeru otjecanja vode u vodotoku (sl. 9).

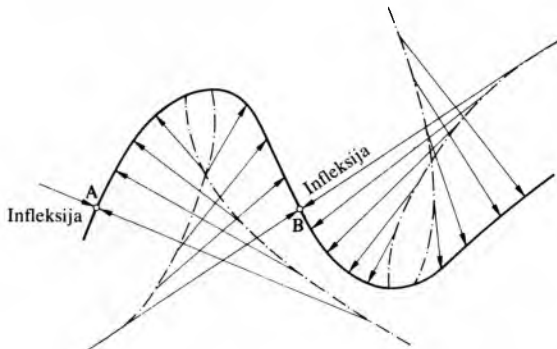
Prema stupnju ustaljenosti riječnog korita razlikuju se lutajuća korita, kad se lako i brzo mijenja njihov položaj, neustaljena, kad se malo i sporo mijenja položaj korita, i ustaljena korita, kad su korita skoro fiksna. Stupanj ustalje-



Sl. 9. Međusobni odnosi protjecanja vode u koritu i kretanja podzemnih voda

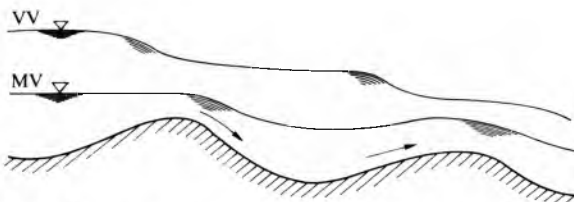
nosti ovisi o otpornosti nanosa kojom se suprotstavlja kinetičkoj energiji vode.

Kad postoji lutajuće korito, ono se račva u rukavce koji su odijeljeni adama, a meandri se stalno mijenjaju. Meandri se mogu prikazati krivinama složenim od lukova različitih polumjera (sl. 10). Polumjeri su to veći što je veća udaljenost od tjemena. U tjemenu je polumjer najmanji, odnosno zakrivljenost najveća. Pri izradbi regulacijske osnove treba nastojati zadržati one zakrivljenosti koje se pojavljuju na dijelovima ustaljenog korita.



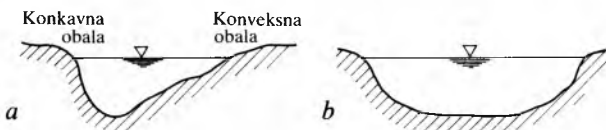
Sl. 10. Konstrukcija krivina korita usklađenih s krivinama na dijelovima ustaljenog korita

O zakrivljenosti meandara ovisi i linija najvećih dubina. Te promjene dubina različito djeluju na lokalni pad razine vode ovisno o vodostaju. Razina vode nastoji da slijedi konfiguraciju dna, pa pri malim vodostajima najveći pad nastaje nizvodno od grebena pličaka, dok se pri višim vodostajima najveći lokalni pad pojavljuje uzvodno od grebena (sl. 11).



Sl. 11. Promjena dubina i lokalni padovi. MV male vode, VV velike vode

Poprečni presjeci korita i riječnih dolina. U kamenom i čvrstom tlu riječno je korito obično duboko i usko, dok je u diluviju i aluviju šire i plicće. U zavoju je korito trokutasto; najdublji se dio nalazi u konkavnom dijelu zavoja, dok se prema konveksnom dijelu postupno diže (sl. 12a). Na ravnom dijelu vodotoka korito je parabolično (sl. 12b).



Sl. 12. Poprečni profili prirodnih korita. a u zavoju, b na ravnom dijelu vodotoka

Kao što je već spomenuto (sl. 8), razlikuju se korito za prosječnu malu vodu, korito za prosječnu srednju vodu i korito za veliku vodu.

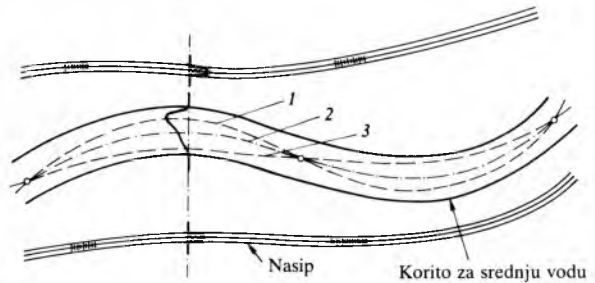
Korito za malu vodu formira se uglavnom po liniji najvećih dubina. Njegova vijugavost ovisi o sastavu tla. Kad je tlo granulometrijski vrlo sitno, a dno korita relativno široko, stvaraju se meandri malih voda unutar meandara srednjih voda i skoro neovisno o njima. Ako niski vodostaji traju duže i ako su ostale prilike povoljne, razvit će se raslinstvo u suhom dijelu korita za srednju vodu. To će povećati otpore protjecanju, smanjiti protjecajnu moć korita i poremetiti protjecanje.

Korito za normalnu srednju vodu obično je formirano s vlastitim nanosom, kad to dopuštaju geološke karakteristike

korita i obala, pa je takvo korito premaleno za velike vode i dio vode teče izvan njega formirajući korito za velike vode.

Nanos se taloži na mjestima naglog smanjenja kinetičke energije, i to u obalnom pojasu uz korito za srednju vodu. Zbog toga su obale uz ta korita najčešće na višoj koti od okolnog terena. Taj je niži teren za vrijeme velikih voda poplavljen skoro potpuno istaloženom vodom. Takve poplave traju duže, jer je otjecanje vode otežano, pa su ta područja često zamočvarena, dok je povišeni pojas uz rijeku plodan zbog intenzivnog taloženja nanosa (npr. obalni pojas uz Savu). Taj je pojas obično obrađen i naseljen iako je periodički plavljen. Da bi se taj pojas zaštitio od poplava, građeni su nasipi, koji nemaju tehničkog opravdanja i koji su što više većinom u suprotnosti s vodenim režimom. Takvi nasipi često otežavaju regulaciju rijeka.

Matica male vode vijuga i približava se liniji najvećih dubina. Za vrijeme srednjih voda konfiguracija dna korita ima najmanji utjecaj na položaj matice, jer voda teži da što kraćim putem stigne do ušća, a tome se suprotstavlja krivudavost korita. U granicama korita lokalno se ispravlja linija matice s težnjom da se udalji od konkavnog dijela obale. Ta je težnja to izrazitija što je vodostaj viši (sl. 13). Pri velikim vodama krivudavost korita za srednju vodu poboljšava otjecanje samo kad su obale korita za veliku vodu u skladu s koritom za srednju vodu. Ako linija matice velikih voda, koja teži većem ispravljanju toka, siječe obale korita pod tupim kutom, srednje korito uzrokuje dopunske otvore i jake vireve.

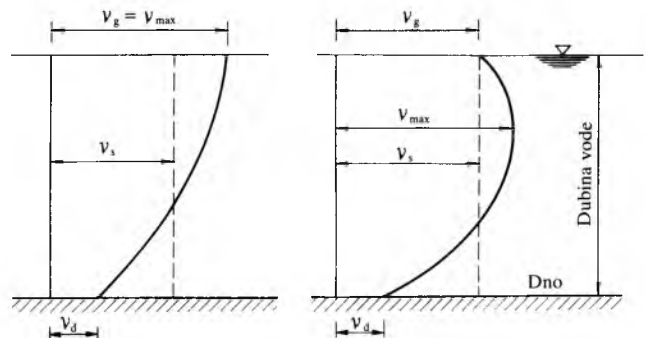


Sl. 13. Riječno korito. 1 matica male vode, 2 matica srednje vode, 3 matica velike vode

Ako se vijuga toka skрати prokopom, nastaje erozija u prokopu, a djelomično i uzvodno od prokopa i taloženja nizvodno od njega.

Sve građevine u vodotoku (brane, stupovi mostova, obalni zidovi, odvojeci kanala) utječu na smjer toka, dubinu vode, te na promjenu dna i obala. Oduzimanjem vode iz vodotoka (natapanje, voda za hlađenje i za industriju, hidroelektrane) smanjuju se protoci, pa to može uzrokovati taloženje nanosa.

Dinamika vodenih tokova. Tečenje vode u prirodnom koritu nije ni jednoliko ni stacionarno. Tok se može smatrati stacionarnim samo na kratkom potezu i u kratkom vremenskom intervalu, a jednolikim kad su promjene protjecajnog presjeka neznatne. Ako spomenuti uvjeti nisu ispunjeni (velike vode, usporne građevine, velike promjene presjeka i padova), moraju se uzeti u obzir promjene toka.



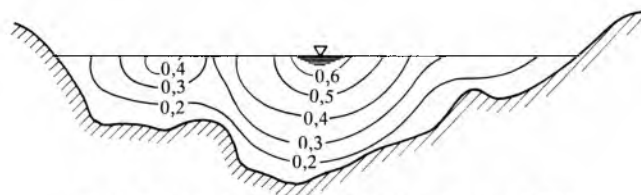
Sl. 14. Primjeri raspodjele brzina u poprečnom presjeku vodotoka

Stacionarno tečenje u pravcu. Kad voda teče sa slobodnim vodnim licem, na nju djeluje uzdužna komponenta sile teže. Unutrašnje trenje (strujanje u vodenim tokovima uvijek je turbulentno, v. *Mehanika fluida*, TE 8, str. 67), trenje na dnu i na pokosima, te trenje sa zrakom na površini vode koče protjecanje vode.

Brzina vode i raspodjela brzina u poprečnom presjeku vrlo su važne za regulaciju vodotoka. Što je protjecajni profil nepravilniji, to je nepravilnija raspodjela brzina. Najveće su brzine većinom bliže površini (sl. 14). Na dnu je brzina jednaka nuli i ona ima tu vrijednost samo u tankom sloju iznad dna.

Raspodjela se brzina u nepravilnom riječnom koritu može odrediti samo mjerenjem.

Ona ovisi o obliku poprečnog presjeka, hrapavosti korita, dubini vode, padu i sekundarnom strujanju unutar profila. Linije jednakih brzina nazvane su *izotahama* (sl. 15).



Sl. 15. Raspodjela brzina u profilu vodotoka (brzine u m/s)

Točna prosječna brzina protjecanja može se odrediti mjerenjem (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 418), a približna pomoću izraza

$$v_s = k_s R^{2/3} I^{1/2}, \quad (1)$$

gdje je k_s koeficijent brzine (tabl. 1), R omjer između površine razine vode i omočenog oboda (hidraulički polumjer), a I pad linije energije koji je za stacionarno jednoliko protjecanje jednak padu razine vode. Za vodotoke koji nose nanos koeficijent brzine određuje se pomoću izraza

$$k_s = 21,1 d_s^{-1/6}, \quad (2)$$

gdje je d_s mjerodavni promjer zrnâ nanosa.

Brzine protjecanja treba odrediti za srednje male protoke, srednje i velike protoke.

Tablica 1

VRIJEDNOSTI KOEFICIJENTA BRZINE VODE

| | |
|---|---------|
| Riječno korito s čvrstim dnom | 40 |
| Riječno korito s umjerenom količinom nanosa | 32...35 |
| Riječno korito obraslo vegetacijom | 33...35 |
| Nepravilno riječno korito sa šljunkom | 30 |
| Riječno korito s jakim pronosom nanosa | 28 |
| Bujice s grubim i mirnim šljunkom | 25...28 |
| Bujice s grubim i pokretnim šljunkom | 19...22 |

Na povećanje otpora protjecanju djeluju izbočine i udubljenja u koritu, pješčane dine, obraslost korita, krivine i hidrotehničke građevine.

Stacionarno tečenje u krivinama. Tečenje vode u krivini rijeke treba promatrati kao trodimenzijsku pojavu strujanja.

Kad voda protječe krivinom, razina je vode na vanjskom luku viša nego na unutrašnjemu (sl. 16). Povišenje je razine na vanjskom luku

$$\Delta z_1 = \frac{v_0^2}{2g} \left(1 - \frac{r_0}{r_2} \right), \quad (3)$$

a sniženje na unutarnjem luku

$$\Delta z_2 = \frac{v_0^2}{2g} \left(\frac{r_0}{r_1} - 1 \right), \quad (4)$$

gdje je v_0 brzina vode u sredini riječnog korita gdje je polumjer zakrivljenosti r_0 , r_1 polumjer vanjskog, a r_2 polumjer unutrašnjeg luka.

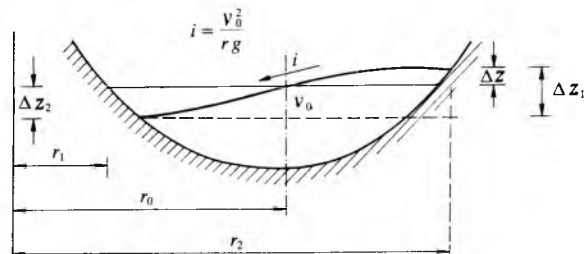
Navedeni odnosi vrijede za jednoliko kružno protjecanje. Oni se mijenjaju ako voda dotječe iz pravocrtnog korita, sploštenog luka ili luka suprotne zakrivljenosti. Tada se

čestice zbog inercije suprotstavljaju centripetalnoj sili. Nastaje sekundarno strujanje i gubici zbog sudara čestica.

U luku, osim sile teže, djeluje i centrifugalna sila koja iznosi

$$F = m \frac{v^2}{r}, \quad (5)$$

gdje je m masa čestice vode, v brzina vode, a r polumjer krivine.



Sl. 16. Vodeno lice u poprečnom profilu luka

Ako se promatraju smjerovi djelovanja sile gravitacije (mg) i centrifugalne sile određene izrazom (5), može se postaviti da je

$$\sin \alpha' = \frac{v^2}{gr}, \quad (6)$$

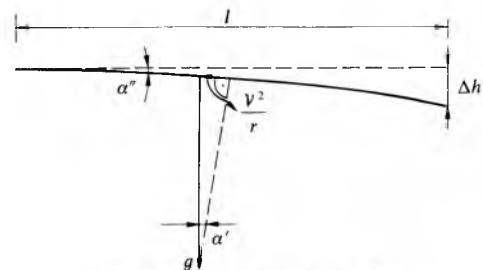
gdje je α' kut između smjera sile gravitacije i rezultantne sile (sl. 17). Omjer je između pada vodenog lica Δh i duljine vodenog lica l (sl. 17) određen izrazom

$$\tan \alpha'' = \frac{\Delta h}{l} = i, \quad (7)$$

gdje je i promjena pada vodenog lica. Budući da su vrijednosti kutova α' i α'' podjednake i da su te vrijednosti malene (manje od 5°), može se postaviti da je $\sin \alpha' = \tan \alpha''$, pa je

$$\frac{v^2}{r} = gi. \quad (8)$$

U krivini je na konveksnoj obali brzina v malena, pa omjer v^2/rg ima vrlo malu vrijednost. Zbog toga je promjena poprečnog pada približno jednaka nuli.



Sl. 17. Promjena poprečnog pada

Rastavi li se poprečni presjek na uske okomite dijelove (sl. 18a), može se za svaki dio odrediti srednja brzina v , pa se uvrštavanjem u izraz (8), a uzimajući u obzir pripadni polumjer krivine, dobiva vrijednost promjene pada vodenog lica i . Linija površine vode u poprečnom presjeku nije pravac već krivulja. Maksimalni pad vodenog lica pojavljuje se na mjestu gdje je najveća srednja brzina vode u okomitom dijelu presjeka.

Centrifugalna sila smanjuje se odozgo prema dolje zbog smanjenja brzine vode od v_g na v_d . Na površini je vode $v_g^2/r > gi$, a pri dnu $v_d^2/r < gi$. Zbog toga je na površini rezultanta R_g usmjerena prema vanjskoj obali i iznosi

$$R_g = m \left(\frac{v_g^2}{r} - gi \right), \quad (9)$$

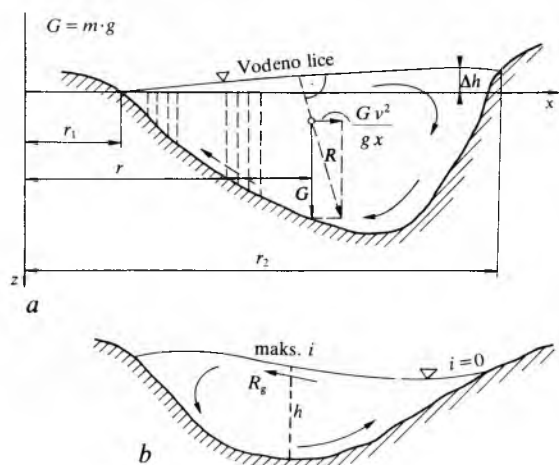
dok je pri dnu rezultanta R_d usmjerena prema unutrašnjoj obali i iznosi

$$R_d = m \left(g i - \frac{v_d^2}{r} \right) \quad (10)$$

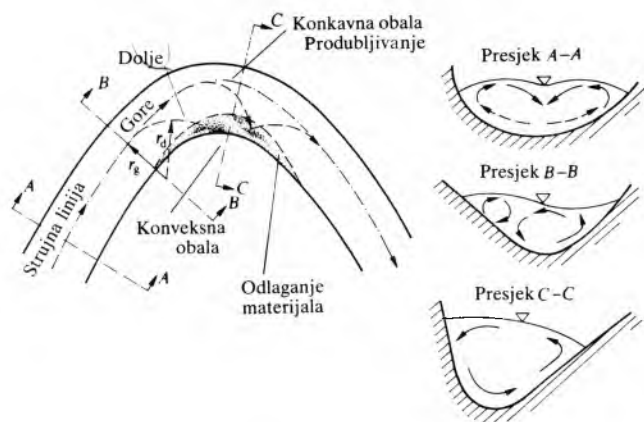
To uvjetuje spiralno kretanje vode (sl. 18b).

Čestice vode koje se iz gornjih slojeva kreću prema koritu erodiraju dno i dio erodiranih čestica odnose na suprotnu obalu, gdje ih odlažu do ponovnog transporta u više područje (sl. 19). Ako iza luka slijedi pravocrtni potez vodotoka, formira se, zbog inercije vode, u donjem dijelu toga poteza vodena površina suprotnog nagiba od onoga u luku. Zatim, u daljem toku, površina se vode koleba s promjenljivim poprečnim padovima.

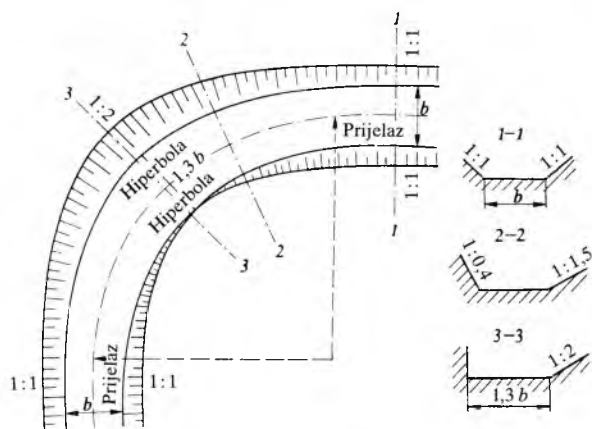
Kinetička energija spiralnog strujanja u četvrtkružnoj krivini iznosi ~2% od kinetičke energije vodotoka ($v^2/(2g)$)



Sl. 18. Poprečni presjek luka. a određivanje promjene pada vodenog lica. b spiralno kretanje vode, R_s rezultanta sila na površini, R_d rezultanta sila pri dnu



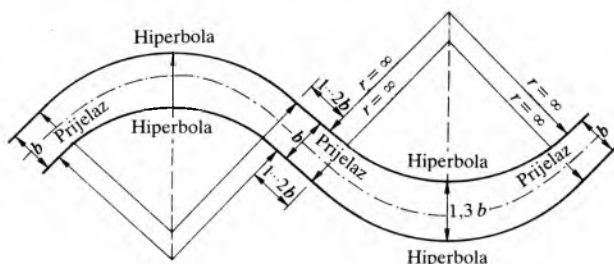
Sl. 19. Kretanje čestica vode u luku



Sl. 20. Hidraulički optimalno oblikovani zavoj u koritu

kad omjer polumjera krivine (r) i širine korita (b) iznosi $3 \dots 7$. Uz jednake omjere ta kinetička energija iznosi ~3% kad je krivina polukružna. Spiralno se kretanje smanjuje s povećanjem omjera r/b i s povećanjem dubine.

Najbolji se zavoj s hidrauličkog stajališta dobiva ako se zavoj izvede od dviju hiperbola koje prelaze u pravce. Na unutrašnjoj se obali moraju između hiperbola i pravaca umetnuti kratki prijelazni lukovi (sl. 20). U dijelu prijelaza u pravac i vanjska i unutrašnja obala imaju nagib 1:1. Nagib se vanjske obale postepeno smanjuje, pa na mjestu najmanjeg polumjera iznosi 1:2. Nasuprot tome, nagib se unutrašnje obale povećava, pa je na mjestu najmanjeg promjera obala okomita. To vrijedi za oblikovanje kanalskog zavoja, ali ono ima značenje i za riječna korita s pokretnim dnom. Izvedba zavoja prema hiperbolama s proširenjem od 30% u tjemenu zavoja vrijedi i za prirodne tokove (sl. 21), ali su tada obale položiti. Omjer polumjera zakrivljenosti i širine korita u ravnom dijelu mora po mogućnosti biti veći od 5.



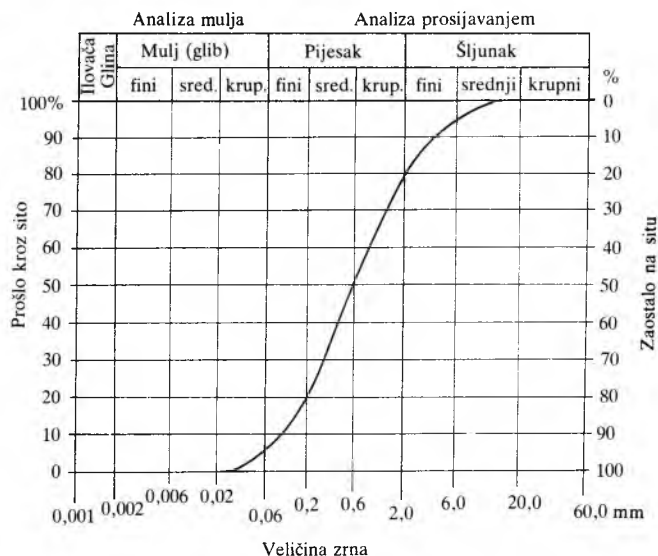
Sl. 21. Zavoji korita u obliku hiperbole povezane pravcima 1...2 puta duljim od širine korita

Ako se protjecanje u zavojima uspori, smanjit će se udubine koje nastaju ispiranjem, postat će manja opasnost od udaranja o obale, a pragove na prijelazima zavoja voda će odnijeti.

Nanos, kretanje nanosa i stabilnost korita. S protjecanjem vode u otvorenim tokovima transportiraju se i čvrste tvari: vučeni nanos, lebdeći nanos i plivajuće tvari.

Vučeni nanos veoma je bitan za stabilnost korita i u vodogradevnom pogledu (vododerine, udubljenja) ima veliko značenje. Vučeni nanos potječe od erozije korita, od postrane erozije (erozija obronaka u gornjem toku, odroni obala u srednjem toku) i meandriranja u donjem toku.

Lebdeći nanos najvažnija je komponenta nanosa. Tako se npr. pred ušćem Rajne u Bodensko jezero od 1900. godine istaložilo $\sim 3 \cdot 10^6$ m³ lebdećeg, a samo $\sim 40 \cdot 10^3$ m³ vučenog nanosa. Lebdeći nanos nastaje pretežno od površinske erozije u slivnom području, postrane erozije (obrušavanje obala) i dubinske erozije (djelovanjem virova). Važno je izvoriste



Sl. 22. Raspodjela zrna nanosa

lebdećeg nanosa kanalizacija i druge vrste onečišćenja vodotoka. Osim toga, lebdeći nanos nastaje brušenjem vučenog nanosa o dno korita.

Plivajući nanos ne znači mnogo za srednju Evropu.

Sastav zrnatog materijala karakteristika je vučenog i lebdećeg nanosa. Veličina zrna određuje se analizom mulja i prosijavanjem. Taj se sastav prikazuje dijagramom raspodjele zrna prema veličini (sl. 22). Hvatanje nanosa provodi se posebnim napravama (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 420).

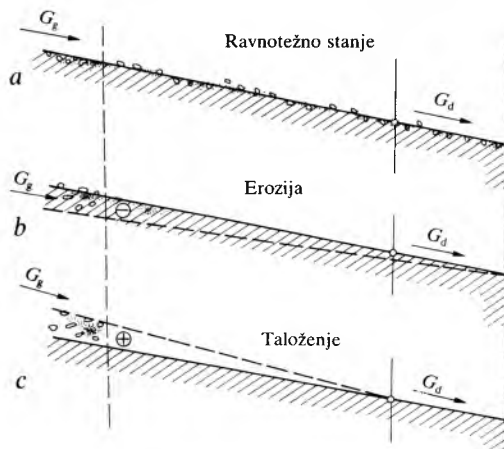
Granica između lebdećeg nanosa pri dnu i vučenog nanosa ovisi o turbulenciji strujanja te o veličini i obliku zrna. Granica između tih dviju vrsta nanosa određena je vrijednošću Froudeove značajke. Ta je granična vrijednost

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gd}} = 19, \quad (11)$$

gdje je v srednja brzina vode, g ubrzanje Zemljine teže, a d promjer zrna. Ako je $Fr < 19$, zrna se ponašaju kao vučeni nanos, a ako je $Fr > 19$, zrna se ponašaju kao lebdeći nanos.

Količine vučenog nanosa karakterizirane su sljedećim veličinama: a) količinom vučenog nanosa u pokretu koja je jednaka masi nanosa po jedinici širine korita i u jedinici vremena, b) kretanjem vučenog nanosa koje je jednako masi nanosa u promatranom profilu u jedinici vremena i c) količinom vučenog nanosa u dužem vremenskom razdoblju. Količine lebdećeg nanosa karakterizirane su sljedećim veličinama: a) udjelom lebdećeg nanosa u jedinici volumena vode, b) pronosom lebdećeg nanosa u jedinici vremena i c) količinom lebdećeg nanosa u dužem vremenskom razdoblju.

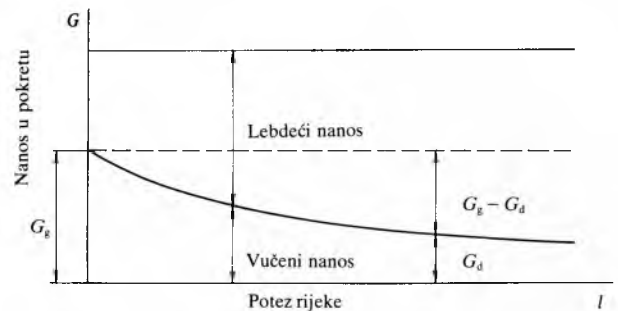
Kad se promatraju pješčani sprudovi (sl. 23), treba razlikovati gornji sloj (zaštitni sloj) u kojemu je veličina zrna tolika da 90% nanosa ostaje na situ (d_{90}), i donji sloj sa zrnima prosječne krupnoće.



Sl. 23. Ravnotežno stanje (a) i erozija (b) riječnog korita, taloženje (c) u riječnom koritu. G_g količina vučenog nanosa u uzvodnom, G_d količina vučenog nanosa u nizvodnom dijelu vodotoka

Nanos se vuče po dnu djelovanjem pokretne sile koja se pojavljuje za vrijeme većih protoka. Početak kretanja toga nanosa ovisi o protoku i treba ga utvrditi. To se postiže pomoću prislusnih uređaja.

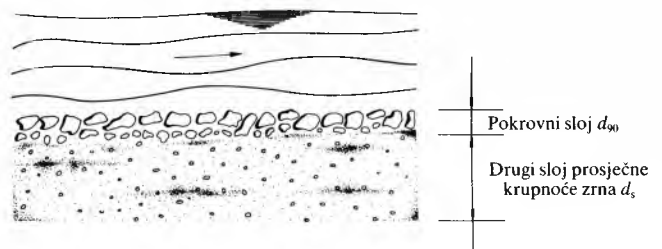
Prostorni i vremenski razvoj riječnog korita ovisi o bilancu nanosa, pogotovo vučenog nanosa. Ako uzduž nekog dijela riječnog korita nema bočnog zarušavanja, mogu se razlikovati tri stanja (sl. 24): a) ravnotežno stanje kad je vučeni nanos jednak u uzvodnom (G_g) i nizvodnom dijelu (G_d), b) erozija kad je $G_g < G_d$ i c) taloženje kad je $G_g > G_d$. U ravnotežnom stanju pad ostaje konstantan. Kad se pojavi erozija, mijenja se pad tako dugo dok se odnošenjem sitnijih zrna ponovno ne uspostavi ravnotežno stanje. Također se taloženjem konačno uspostavlja ravnotežno stanje. Erozija, odnosno taloženje nastaju zbog promjene pokretne sile, bilo kao posljedica vodoprivrednih zahvata, bilo kao posljedica promjene protoka, pogotovo porasta i opadanja veoma velikih



Sl. 24. Promjena nanosa na potezu rijeke

protoka. Na sl. 25 prikazane su promjene količine vučenog i lebdećeg nanosa na potezu vodotoka.

Na duljim vodotocima mora se promatrati i trošenje vučenog nanosa. Dimenzije se vučenog nanosa uzduž vodotoka smanjuju fizikalnim i kemijskim djelovanjem. Dio vučenog nanosa zbog toga postaje lebdeći nanos.



Sl. 25. Sastav pješčanog spruda

Elementarno smanjenje mase zrna dM na putu dl može se prikazati izrazom

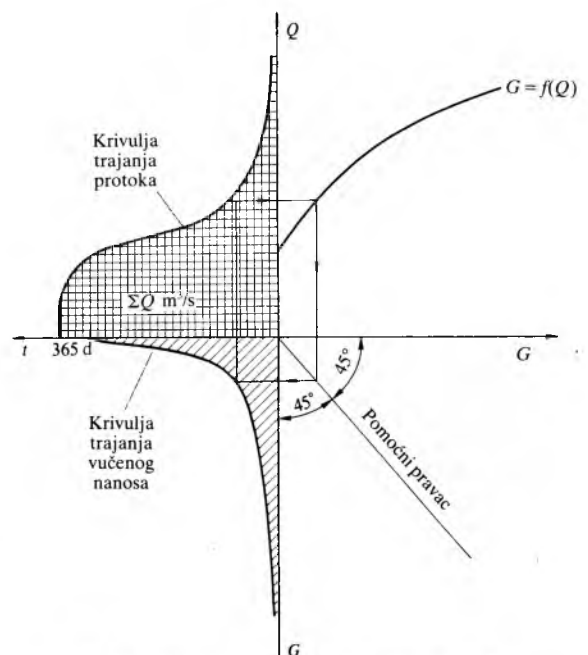
$$dM = -cMdl, \quad (12)$$

gdje je c koeficijent habanja, a M masa zrna. Integracijom izraza (12) dobiva se izraz

$$M = M_0 \exp(-cl), \quad (13)$$

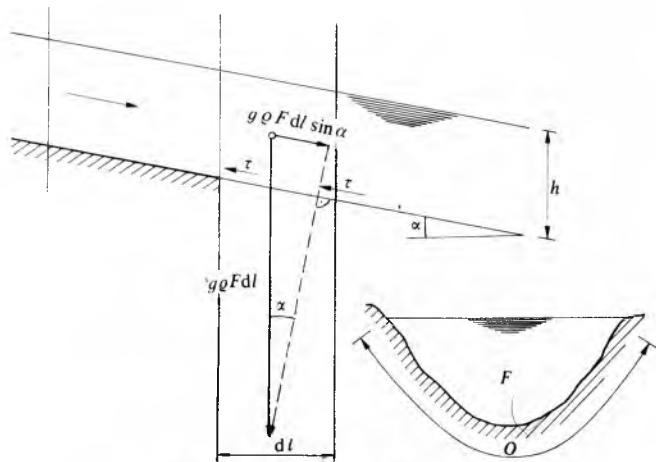
gdje je M_0 masa zrna za $l = 0$, kojim je određena masa zrna nakon što je zrno vučeno na putu duljine l .

Ovisnost vučenog nanosa o protoku. S porastom protoka Q raste i količina vučenog nanosa G , pa se pomoću krivulje trajanja protoka može konstrukcijom prikazanom na slici 26



Sl. 26. Određivanje vučenog nanosa prema protoku

odrediti i krivulja trajanja vučenog nanosa. Površina ispod te krivulje proporcionalna je godišnjoj količini vučenog nanosa. Za točnije određivanje količine vučenog nanosa potrebno je poznavati ovisnost količine vučenog nanosa o protoku pri porastu i pri opadanju protoka.



Sl. 27. Prikaz djelovanja pokretne sile

U ravnotežnom je stanju pokretna sila S jednaka sili otpora τ koja nastaje trljanjem čestica vode o plohe korita. Ta se jednakost (sl. 27) može napisati u obliku

$$g \rho F d l \sin \alpha = \tau O d l, \quad (14)$$

pa je

$$\tau = g \rho R \sin \alpha, \quad (15)$$

gdje je g ubrzanje Zemljine teže, ρ gustoća vode, F površina profila vodotoka, l duljina toka, α nagib površine vode, O omočeni obod, a $R = F/O$ hidraulički polumjer.

Kretanje nanosa započinje kad pokretna sila postane veća od graničnog otpora τ_{gr} , koji je određen izrazom

$$\tau_{gr} = 0,047 g (\rho_s - \rho) d_s, \quad (16)$$

gdje je ρ_s gustoća nanosa ($2600 \dots 2700 \text{ kg/m}^3$), a d_s srednji promjer zrna nanosa. Prosječna masa vučenog nanosa u jedinici vremena po jedinici širine riječnog korita funkcija je razlike između stvarnog i graničnog otpora. Ta je funkcionalna veza prikazana izrazom

$$\Delta G_s = \frac{8}{g \rho^{1/2}} (\tau - \tau_{gr})^{3/2}. \quad (17)$$

Ukupna količina vučenog nanosa dobiva se množenjem ΔG_s sa širinom dna koja utječe na pronos vučenog nanosa.

Stabilnost korita. Obalni pokosi i dno korita granične su plohe između vode i tla u koje je usječeno korito. Protjecanje vode bitno utječe na formiranje konture korita.

Da bi se utvrdila stabilnost nekog materijala prema eroziji, potrebno je izračunati pokretnu silu koja je potrebna da ga pokrene (dopuštena pokretna sila) i usporediti je sa stvarnom pokretnom silom. Budući da pokretna sila raste s dubinom vode, najveća se pokretna sila pojavljuje na nožici pokosa, pa je to dio pokosa koji je najviše izložen eroziji.

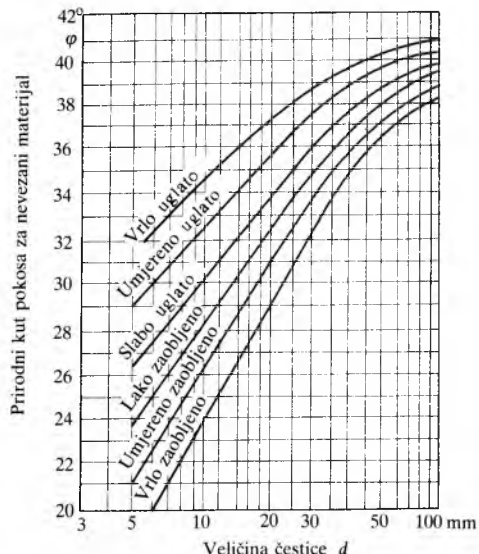
U priručnicima se mogu naći podaci o dopuštenoj pokretnoj sili S_0 na dnu korita. Na pokosu je dopuštena pokretna sila S'_0 manja, pa se pri proračunu sile na pokos upotrebljava omjer

$$n = \frac{S'_0}{S_0}, \quad (18)$$

koji je određen izrazom

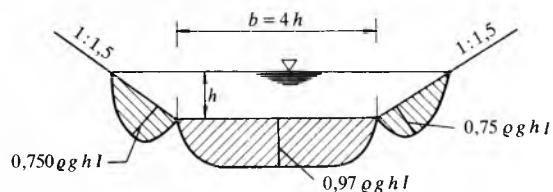
$$n = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{\tan^2 \alpha}{\tan^2 \varphi}}, \quad (19)$$

gdje je α nagib pokosa prema horizontali, a φ prirodni nagib materijala pokosa (sl. 28).

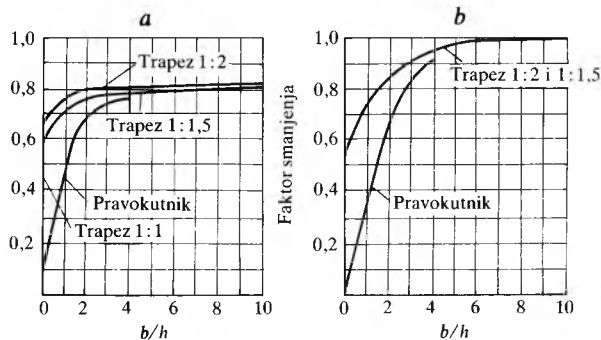


Sl. 28. Prirodni kut pokosa nevezanih kamenih čestica

Pokretna sila na pokosu nije konstantna. Tipičnu raspodjelu pokretne sile u trapeznom presjeku korita prikazuje slika 29. Za različite presjeka korita faktor smanjenja pokretne sile na pokos i dno korita vidi se na slici 30.



Sl. 29. Raspodjela pokretne sile u trapeznom presjeku



Sl. 30. Faktor smanjenja pokretne sile. a na pokosu korita, b na dnu korita

Tablica 2
MAKSIMALNE DOPUŠTENE BRZINE VODE I DOPUŠTENE POKRETNOSTI U RIJEČNOM KORITU

| | Čista voda | | Voda s nanosom | |
|---|------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| | v m/s | S ₀ N/m | v m/s | S ₀ N/m |
| Fini koloidni pijesak | 0,45 | 1,28 | 0,75 | 3,63 |
| Pjeskovita nekoloidna ilovača | 0,53 | 1,77 | 0,75 | 3,63 |
| Istaložena nekoloidna ilovača | 0,60 | 2,26 | 1,90 | 5,30 |
| Aluvijalni nekoloidni nanos | 0,60 | 2,26 | 1,05 | 7,16 |
| Čvrsta ilovača | 0,75 | 3,36 | 1,05 | 7,16 |
| Fini pijesak (1...2 mm) | 0,75 | 3,43 | 1,05 | 7,16 |
| Vrlo koloidna čvrsta glina | 1,15 | 12,46 | 1,50 | 22,07 |
| Škriljasta ilovača i tvrdo istaloženi nanos | 1,80 | 32,08 | 1,80 | 32,08 |
| Aluvijalni koloidni nanos | 1,15 | 12,26 | 1,50 | 22,07 |
| Sitni šljunak | 0,75 | 3,63 | 1,50 | 15,30 |
| Graduirana, nekoloidna glina | 1,15 | 18,15 | 1,50 | 31,59 |
| Graduirani, nekoloidni šljunak | 1,20 | 20,60 | 1,65 | 38,26 |
| Krupnozrnati šljunak | 1,20 | 14,32 | 1,50 | 32,08 |
| Oblo kamenje i oblici | 1,50 | 43,65 | 1,85 | 52,68 |

U tablici 2 navedene su vrijednosti maksimalno dopuštenih brzina vode i dopuštenih specifičnih pokretnih sila za različite materijale korita.

Za dimenzioniranje površinskog sloja dna korita računa se s graničnim otporom, prema izrazu (16),

$$\tau_{\text{grd}} = 0,04g(\rho_s - \rho)d_s \quad (20)$$

Pri tom se pretpostavlja da se može dopustiti malo pokretanje materijala na dnu korita.

Za pokose se računa s polovicom vrijednosti prema izrazu (20), što znači da se umjesto koeficijenta 0,04 postavlja koeficijent 0,02.

Izjednačenjem graničnog otpora i maksimalne pokretne sile može se odrediti prosječna veličina zrna. Tako se za pokos nagiba 1:1,5 (sl. 29) na koji djeluje maksimalna sila $S = 0,750g\rho hI$ (gdje je I uzdužni nagib površine vode) i koji predstavlja otpor $0,2ng(\rho_s - \rho)d_s$ dobiva (uz $n = 0,5$) da je potreban materijal s prosječnom veličinom zrna

$$d_s = 75hI \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \quad (21)$$

dok je za dno ($S = 0,970g\rho hI$ i $n = 1$) potreban materijal s prosječnom veličinom zrna

$$d_s = 24hI \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \quad (22)$$

Prema tome, za pokos je potreban materijal sa ~3 puta većom prosječnom veličinom zrna.

Pri određivanju stalnosti obalnog pokosa mora se uzeti u obzir da se dopuštena maksimalna brzina uz nožicu pokosa (v_{grp}) razlikuje od dopuštene maksimalne brzine u dnu korita (v_{grd}), pa je

$$v_{\text{grp}} = \xi v_{\text{grd}} \quad (23)$$

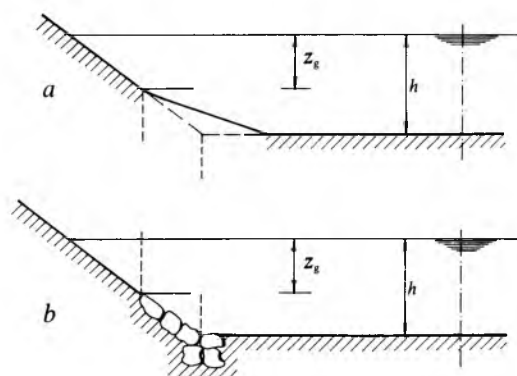
gdje $\xi^2 = n$ koji je određen izrazom (19). Ako se uzme u obzir da vrijedi izraz

$$v_z = \xi v_{\text{grd}} \left(\frac{h}{z} \right)^{1/2} \quad (24)$$

gdje je v_z brzina na razmaku z od površine vode, a h dubina vode, te ako se postavi da je $v_z = v_{\text{grd}}$, dobiva se granični razmak od površine vode

$$z_g = \xi^2 h = nh \quad (25)$$

Iznad z_g pokos je stabilan, pa dio pokosa ispod z_g mora imati manji nagib ili bolje učvršćenje (sl. 31).



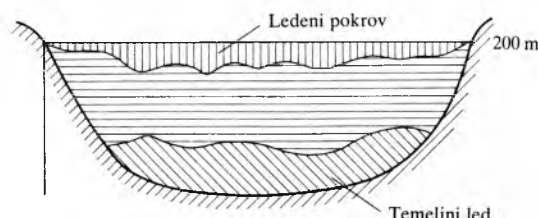
Sl. 31. Pokos korita. a manji nagib, b bolje učvršćenje u donjem dijelu pokosa

Led u rijekama. Led se pojavljuje u vodotocima kad se čitava vodena masa ohladi na 0°C ; led se pojavljuje to kasnije što je dublje korito i što je intenzivnije miješanje vode. Prvi led se pojavljuje uz obalu (rubni led). Uz male brzine vode može se postupno rubni led proširiti na cijelu površinu vodotoka. Temeljni led posebna je pojava leda koji nastaje kad se lebdeći led učvrsti na hrapavu dnu. On zaledivanjem ostalih čestica vode stvara debeli sloj leda. Taj se temeljni

led djelovanjem uzgona i strujanja vode odvađa od dna i podiže se na površinu. Temeljni je led neproziran, spužvaste strukture, a prepoznaje se po smrznutom mulju. Osim toga, led se stvara u obliku ledene kaše koja nastaje povezivanjem lebdećih ledenih kristala. Nastaju ledene grude koje zajedno s izronjenim temeljnim ledom stvaraju sante leda. One su mliječno bijele, a zbog okretanja i sudaranja stvaraju se kružne plohe s nabranim rubovima. Prema tome koliko je vodene površine pokriveno santama leda, govori se o rijetkim (pokriveno 1/10...3/10 vodene površine), labavim (4/10...6/10), gustim (7/10...9/10) i vrlo gustim santama (9/10...10/10 vodene površine). Kad se sante protegnu od obale do obale, nastaje stajaći led. On najprije nastaje na ostrim riječnim zavojima, uz mosne stupove, pješčane sprudove i druge zapreke u riječnom koritu. Ako se pridošli led utiskuje ispod mirnog leda, led se nagomilava i stvara se ledeni pokrov.

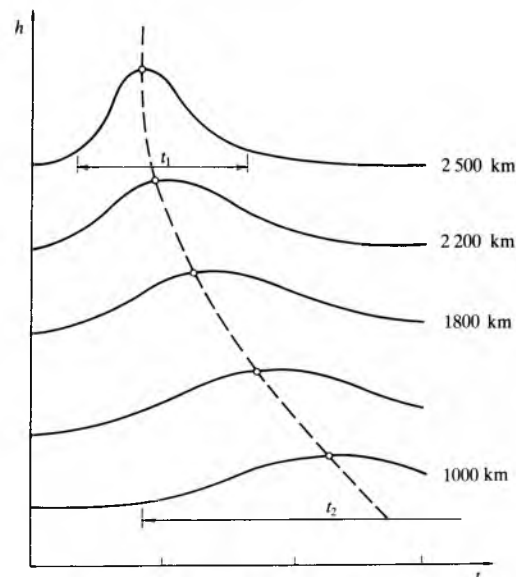
Kad temperature porastu, počinje topljenje ledenog pokriva i pojavljuju se slobodne vodene plohe, a led se počinje kretati. Da bi se kretanje leda pospješilo, razara se ledeni pokrov na plovnicama većinom ledolomcima. Premještanje leda može uzrokovati poplave, prodor nasipa, oštećenje građevina i duži prekid plovidbe. Ako djelovanje vode nije dovoljno da se pokrene led prije nego što nastanu spomenute štete, mora se led pokrenuti miniranjem.

Protjecanje vode ispod ledenog pokriva razlikuje se od protjecanja u otvorenom vodotoku, jer je omočeni obod veći. Voda se, naime, kreće između temeljnog leda i ledenog pokriva (sl. 32).



Sl. 32. Slobodna površina profila ispod ledenog pokriva i iznad temeljnog leda

Vodostaji i protoci. Redovitim mjerenjem vodostaja (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 416) dobivaju se osnovni podaci za određivanje protoka pomoću konsumpcijske krivulje (v. *Hidrologija*, TE 6, str. 405). Postoji cijeli niz karakterističnih vodostaja: najniži zapaženi vodostaj u dugom nizu godina (MV), najniži vodostaj u pojedinim godinama (MMV), prosječni niski vodostaj određen kao aritmetička srednja vrijednost najnižih vodostaja u promatranom nizu godina (PMV), srednji vodostaj određen kao aritmetička srednja



Sl. 33. Kretanje i deformacija vodenog vala

vrijednost vodostaja u pojedinim godinama (SV), prosječni srednji vodostaj određen kao aritmetička srednja vrijednost srednjih vodostaja u nizu godina (PSV), visoki vodostaj u pojedinim godinama (VV), prosječni visoki vodostaj određen kao aritmetička srednja vrijednost visokih vodostaja u nizu godina (PVV) i najviši visoki vodostaj zapažen u promatranom nizu godina (VVV). Analogno se mogu definirati i karakteristični protoci. O pojavi i određivanju maksimalnih protoka v. *Hidrologija*, TE 6, str. 410.

Promatranjem vodenog vala velike vode u profilima uzduž rijeke zapažaju se deformacije vodenog vala (sl. 33). Tokom nadolaska vodenog vala raste vodostaj i dio se vode zadržava u koritu. Tom se količinom vode povećava protjecajni profil vodotoka, što predstavlja prirodnu retenciju, koja je to veća što je površina vode veća i što je porast vodostaja veći. Zbog toga val na svom putu postaje sve plosnati, pa se visina sve više smanjuje, a njegovo trajanje produžuje. Promatrajući nizvodno val se pojavljuje s izvjesnim vremenskim zakašnjenjem.

ZAHVATI ZA REGULACIJU VODOTOKA

Zahvati za regulaciju vodenih tokova obuhvaćaju zaštitu od velikih voda, regulaciju linije toka, formiranje uzdužnog i poprečnih profila, osiguranje dna i osiguranje obala.

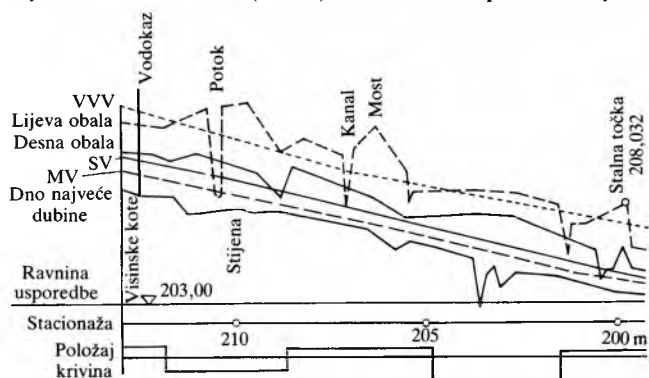
Regulacija vodotoka provodi se prema jedinstvenom planu koji obuhvaća ne samo glavni vodotok nego i sve njegove pritoke. Pri izradi toga plana treba uzeti u obzir geografski položaj i veličinu, te geološke, klimatske, meteorološke i hidrološke karakteristike slivnog područja, stanje poljoprivrede i šumarstva, vodosposodarstvene odnose (odvođenje voda iz vodotoka, postojanje uspornih građevina), plovidbene prilike, položaj prometnica, ekološke zahtjeve i drugo.

Regulacijski radovi izvode se od ušća prema izvoru, da vode u nereguliranom dijelu ne bi prouzrokovale veće štete od onih koje su se pojavljivale prije regulacijskih radova.

Geodetske predradnje. Za izradbu regulacijske osnove vodotoka potrebni su pregledni plan (obično u mjerilu 1:25000), položajni i visinski plan (situacija s visinskim kotama u mjerilu 1:1000 do 1:5000), zatim uzdužni profil vodotoka i poprečni profili korita. Ako je područje vodotoka već kartirano, potrebno je provjeriti da li karte odgovaraju trenutnom stanju. Za veće regulacijske radove primjenjuje se fotogrametrijsko snimanje iz zraka (v. *Fotogrametrija*, TE 5, str. 583), koje je pogotovo pogodno da se ustanove promjene riječnog korita (lutanje pješčanih sprudišta, poplavljena područja).

Položajni planovi moraju, osim obalne linije, sadržati položaj uljeva (kanalizacija), odvoda (vodovod, voda za melioracije), usporne građevine, mostove, skele, plicake, obalne zidove i nasipe, utovarna mjesta, podzemne mreže za navodnjavanje, gatove i dr.

Uzdužni profil vodotoka služi za prikaz padova. Uzdužni profil obuhvaća karakteristične vodostaje, visine obala i dno najveće dubine vode (sl. 34). Uzdužni se profili crtaju u



Sl. 34. Uzdužni profil rijeke s ucrtanim hidrografskim i morfološkim karakteristikama

nejednakim mjerilima za duljine i visine (npr. 1:2500:100 ili 1:1000:50). Osim toga, u njih se unose ušća pritoka, odvodi i kaptaze, mostovi, vodokazi, lučke i ostale građevine.

Poprečni profili mogu se izraditi iz podataka u položajnom i visinskom planu. Oni se izrađuju na razmacima od 25...100 m, a crtaju se u mjerilu 1:100 ili 1:200.

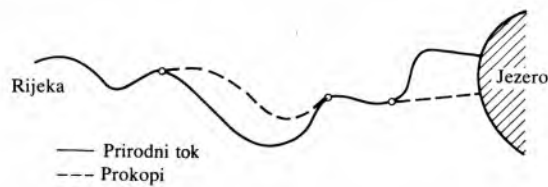
Zaštita od velikih voda. Sprečavanje, odnosno smanjenje šteta od velikih voda postiže se zadržavanjem velikih voda, odnosno smanjivanjem visine vala velike vode (aktivna zaštita) i zaštitnim građevinama (pasivna zaštita), ili kombinacijom aktivne i pasivne zaštite. Treba težiti da se velike vode što brže odvedu, ali je korisno da se voda zadrži kako bi se mogla iskoristiti. Budući da su veliki protjecajni profili skupi i da s vodoprivrednog gledišta nisu svrsishodni, moraju se iskoristiti sve mogućnosti da se višak vode zadrži u prirodnim spremištima (močvarama, mrtvim rukavcima, jezerima i sl.). Mala spremišta vode veoma utječu na velike vode, pogotovo u brdovitim područjima gdje su velike razlike između srednjih i velikih protoka. Gdje ne postoje prirodna spremišta, moraju se radi smanjenja velikih voda graditi akumulacijski bazeni. Njihovo iskorištavanje treba uskladiti s interesima korisnika (poljoprivreda, energetika).

Regulacija linije toka. Kad se izrađuje osnova regulacije vodotoka, treba najprije odlučiti da li je potrebno, i na kojemu dijelu vodotoka, mijenjati liniju vodenog toka. To ovisi o uzdužnom padu i o potrebi produbljivanja korita, te o količini nanosa. Kad se radi o velikim vodotocima, moraju se uzeti u obzir zahtjevi plovidbe, mogućnost iskorištenja vodenih snaga i linija toka kroz gradove (regulacijska osnova grada). Linija je toka, osim toga, ovisna o postojećim čvrstim točkama (naselja, mostovi, pristaništa, ušća pritoka, prometnice).

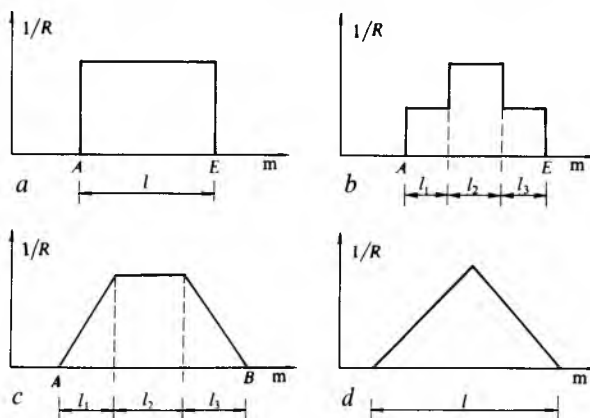
Vodotok se nalazi u najnižem dijelu doline. Ta je pojava najvažnija za regulaciju, pa se nastoji da se linija toka prilagodi postojećem koritu da bi se postignulo ravnotežno stanje u pronosu nanosa.

Ako vodotok ima jake krivine koje su zapreka plovidbi i otjecanju velikih voda, tada treba krivine ublažiti, a kad to nije moguće, izvode se prokopi (sl. 35).

Pri određivanju nove linije toka najčešće se izbjegavaju pravci. Oni djeluju neprirodno kao kruta neprirodna korita, a da ne donose bitnih vodograđevnih prednosti. Nasuprot tome može se zapaziti da male i srednje vode teku vijugavo između sprudova koji mijenjaju položaj.



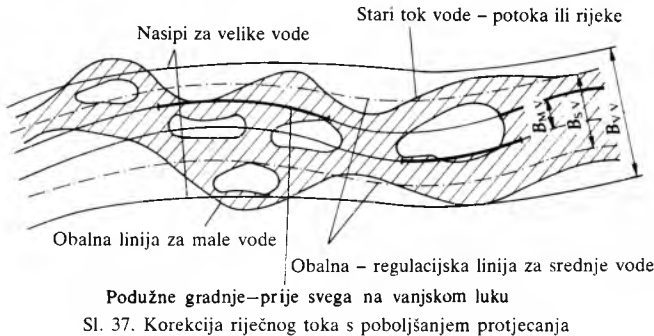
Sl. 35. Korekcija linije vodenog toka skraćivanjem toka (presijecanje okuka)



Sl. 36. Izvedba krivine vodotoka prikazana recipročnom vrijednošću polumjera zakrivljenosti (1/R). a) kružni luk, b) košarasti luk, c) kružni luk s prijelaznim krivinama, d) klotoida

U prirodi se uspostavlja oblik krivine koji je u skladu s dinamikom kretanja vode. Kad se nastoji korigirati linija vodotoka, treba po mogućnosti prilagoditi trasu već postojećem koritu. Uvijek, međutim, treba pripaziti da ne nastane lom na prijelazu od pravca u zavoju, odnosno na prijelazu između luka i protuluka. Izvedba krivine može se prikazati dijagramom u koordinatnom sustavu u kojemu je na apscisi ispružena os vodotoka, a na ordinati recipročna vrijednost polumjera zakrivljenosti (sl. 36). Prirodni lukovi vodotoka najviše odgovaraju klotoidama (sl. 36d), dakle krivuljama s promjenljivim polumjerom zakrivljenosti, pa se danas najčešće regulirani lukovi vodotoka izvode u obliku klotoide.

Poboljšanje se protjecanja postiže kad se tokovi, raspodijeljeni na više rukavaca između otoka i sprudova, svedu na jedno korito (sl. 37).



Često se korigira linija vodotoka zato da bi se vodotok pomaknuo od prometnice (željeznička pruga, cesta). Pri tome se regulira vodotok, odnosno skraćuje linija toka, što može imati neželjene posljedice (povećana erozija). Tada se kao protuzaštita ugrađuju pragovi ili stepenice kao u bujicama.

Formiranje uzdužnog profila. Promjena prirodnog uzdužnog profila, što uzrokuje promjene padova, može se ostvariti promjenom širine korita, skraćivanjem ili produljenjem toka i gradnjom stepenica.

Postepeno smanjenje pada prirodna je pojava. U gornjem se toku velikih padova pojavljuje jaka erozija u koritu vodotoka, u srednjem toku uspostavlja se ravnoteža, dok se u donjem toku zbog smanjenog pada nanos taloži. Regulacijskim zahvatima treba ograničiti pretjeranu eroziju i štetna taloženja.

Sa smanjenjem pada smanjuje se srednja brzina vode i njezina pokretna sila, a to se postiže proširenjem korita ili produljenjem toka. Proširenje je korita opravdano kad je to ekonomičnije nego ugradnja pragova u koritu, da bi se stabiliziralo korito, ili gradnja pregrada. Produljenje toka (stvaranje vijuga), da bi se smanjio pad, rijetko se primjenjuje, jer najčešće dolina nije dovoljno široka za takvu promjenu toka. Gradnjom ustava smanjuje se pad u vodotoku, a time i pokretna sila.

Smanjivanje dubine vode i pokretne sile može se postići smanjenjem vrha vala velike vode odvođenjem dijela vode kroz odušni kanal i kroz kanal za dovod vode hidroenergetskim postrojenjima.

Na prilike u reguliranom vodotoku utječu prilike u pritocima. Ako se, npr., u pritoku smanji donos nanosa, produbljuje se korito ispod ušća, pa se mijenjaju padovi, dok se opet ne uspostavi stabilno stanje.

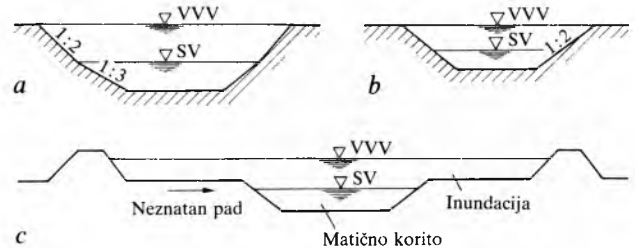
Prilikom izradbe regulacijske osnove pogodno je proučiti tzv. *uzorni potez vodotoka*. Kao uzorni potez odabire se odsječak vodotoka koji je duže vremena stabilan i na kojemu ne postoje zapreke protjecanju. Uzorni potez mora imati slične protoke i slično kretanje nanosa, te potez vodotoka za koji se izrađuje regulacijska osnova.

Formiranje poprečnog presjeka. Poprečni profil koji se ostvaruje regulacijom vodotoka naziva se regulacijskim ili normalnim profilom. Takav profil mora zadovoljiti sljedeće uvjete: a) vodu i nanos mora primiti jedinstveno korito i odvesti ih bez štete, b) za male protoke povoljno je što dublje,

a za velike protoke što pliće korito, c) oblik korita mora biti takav da se ne prekorači dopuštena pokretna sila, tj. da se omogući prijenos nanosa bez erozije dna, d) razina vode u koritu mora osigurati održavanje takve razine podzemnih voda koje su povoljne za poljoprivredu, e) profil vodotoka u krivinama mora biti tako formiran da na vanjskim obalama nema produblivanja korita niti taloženja na unutrašnjim obalama, f) na plovnim rijekama pri malim vodostajima mora se osigurati potrebna plovna dubina i širina plovne vode, uz uvjet da pri velikim vodostajima brzina vode ne bude veća od 3 m/s i g) potrebno je zadovoljiti i estetske i ekonomske zahtjeve. Dakako, svi se spomenuti uvjeti ne mogu zadovoljiti, pa se traži kompromisno rješenje.

Hidraulički najpovoljniji je onaj profil koji može odvoditi protok s najmanjom mogućom protjecajnom površinom. Taj je uvjet ispunjen ako hidraulički polumjer, koji je jednak omjeru plavnjene površine i omočenog oboda korita, dostigne najveću moguću vrijednost. Izvedba je takvih profila skupa, pa oni ne dolaze u obzir kao regulacijski profili za prirodna korita. Takvi su profili neekonomični jer su potrebni duboki usjeci, a najpovoljnija se hidraulička svojstva postižu samo za jedan od mogućih protoka. Zbog toga se takvi profili primjenjuju za kanale i zatvorene profile kojima protječe određena količina vode.

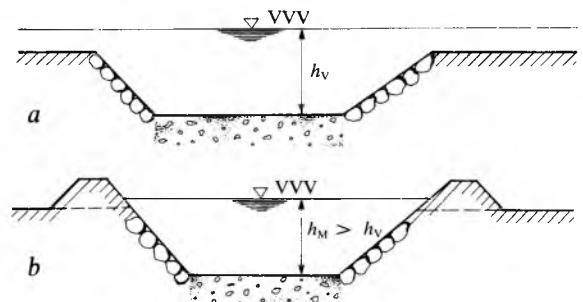
Za male vodotoke treba odabrati jednostavan koritasti (sl. 38a) ili parabolični profil. Profil se odabire prema vrsti tla, odnosno prema vrsti osiguranja dna. Hidraulički polumjer mora biti toliko velik koliko odgovara dopuštenoj brzini protjecanja. U nizinskom području pogodan je trapezni profil (sl. 38b) zbog jednostavnijeg održavanja.



Sl. 38. Tipovi poprečnih profila. a koritasti profil, b trapezni profil, c dvostruki profil; SV srednji vodostaj, VVV vrlo veliki vodostaj

Kad je omjer velikih i srednjih voda velik, dobro su se pokazali tzv. dvostruki profili s matičnim koritom za srednju vodu i s inundacijama koje su prekrivene vodom samo za vrijeme velikih voda (sl. 38c).

Da bi se smanjilo poplavno područje, grade se nasipi (sl. 39). Pri tome treba uzeti u obzir mogućnost da mogu velike vode produbiti korito, jer se s povišenjem razine povećava i pokretna sila. Tada voda nosi nanos koji se odlaže na potezu s manjom pokretnom silom, gdje se dno povisuje i postaje strmije dok se ne postigne ravnotežno stanje. Povišenje dna korita može uzrokovati prelijevanje obala s prijenosom svih vrsta nanosa. Da bi se to spriječilo, potrebno je suziti korito da se poveća dubina vode i pokretna sila, ili otkloniti nanos stalnim ili periodičkim bagerovanjem. Bageruje se i radi uzimanja pijeska. Takvo bagerovanje može biti poželjno ako količina izbagerovanog pijeska približno odgovara količini donesenog nanosa.



Sl. 39. Razina vode u rijeci. a bez nasipa, b s nasipom za veliku vodu

Kad je određen uzdužni profil, poprečni se profil određuje tako da se postigne ravnotežno stanje. To se određuje kopiranjem prirode (uzorni potez vodotoka), računski ili modelskim ispitivanjem. Računski se određuje ovisnost količine nanosa o širini profila, pa se širina profila određuje prema očekivanoj količini nanosa. U modelskom ispitivanju poprečni se profil tako dugo mijenja dok se transportirana količina nanosa, uzimajući u obzir mjerilo modela i zakone sličnosti, ne uskladi s očekivanom količinom nanosa.

Osiguranje dna. Svaki se vodotok ukopava tokom vremena sve dublje u tlo. Ta se prirodna pojava može zahvatiti u vodotok toliko pojačati da postane štetna. Poznato je produblivanje korita rijeke Rajne, koje se produbilo od kraja prošlog stoljeća za nekoliko metara.

Zbog produbljenja korita nastaju smetnje u opskrbi vodom i u plovidbi (smanjenje dubine u lučkim bazenima, teškoće u pogonu brodskih prevodnica).

Uzroci sniženja dna korita jesu: skraćenje toka, ograničenje širine korita koje se izvodi kao regulacija za malu vodu, smanjenje donosa vučenog nanosa, smanjenje poplavnih površina tako da se visoki vodostaji povisuju, što povećava pokretnu silu, bagerovanje u koritu vodotoka. Da bi se ograničila erozija dna korita, moraju se uzroci odstraniti ili njihovo djelovanje smanjiti.

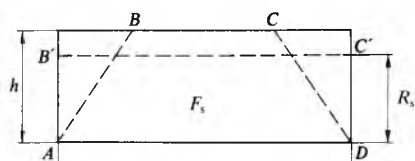
Ipak, da bi se osigurao predviđeni visinski položaj dna, potrebni su građevni zahvati, i to u obliku ploha (popločenje, pokriveni sloj) ili točaka (pragovi na dnu, temeljni pragovi).

Za popločavanje dna potrebni promjer 50% zrna određuje se prema izrazu

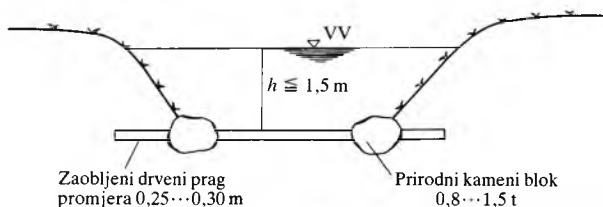
$$d_{50} = \frac{\rho R_s I (k/k_h)^{3/2}}{0,04(\rho_s - \rho)} \quad (26)$$

gdje je ρ gustoća vode, R_s hidraulički polumjer prema udjelu protoka koji djeluje na dno (sl. 40), I pad razine vode, ρ_s gustoća nanosa, a k/k_h omjer koeficijenta dna i zrna (za ravno dno $k/k_h = 1,0$, za valovito dno $k/k_h = 0,5$). Promjer je najmanjeg zrna $d_{min} = 0,6d_{50}$, a najvećeg $d_{max} = 1,6d_{50}$. Potrebna debljina sloja približno je jednaka promjeru maksimalnog zrna.

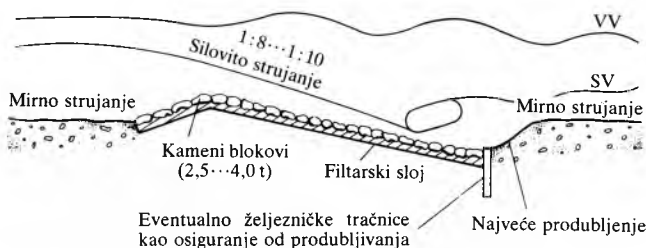
Temeljni pragovi postavljaju se u dno da bi se ono održalo na željenoj visini. Na sl. 41 vidi se primjer primjene drvenih



Sl. 40. Uz određivanje hidrauličkog polumjera R_s prema udjelu protoka koji djeluje na dno. $F_s = ABCD = AB'C'D'$, $R_s = F_s/B_s$



Sl. 41. Osiguranje dna korita pomoću drvenih pragova



Sl. 42. Osiguranje dna korita kamenim blokovima

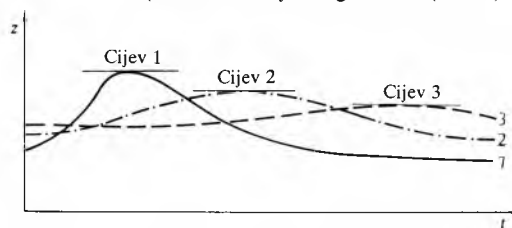
pragova u koritu potoka. Razmak pragova ne bi smio biti veći od $L_{max} = D/(2I)$, gdje je D promjer drvene oblice. Ta je udaljenost potrebna da dubljenje korita ostane u dopuštanim granicama.

U velikim koritima u posljednje se vrijeme postavljaju pragovi od kamenih blokova (sl. 42). Najveće se naprezanje pojavljuje u donjoj trećini praga gdje nastaje hidraulički skok.

Umjesto temeljnih pragova mogu se graditi ustave.

Osiguranje obala. Obalni pokosi i riječno dno granične su plohe između vode u rijeci i podzemne vode u tlu doline. Ako se taloži vrlo fini nanos na dnu vodotoka, nastaje brtveni sloj na dnu korita ili te fine čestice prodiru u dno korita. Oba procesa brtve dno, pa se izjednačenje između riječne i podzemne vode odvija u prvom redu kroz obalni pokos.

Podzemna se voda kreće polaganom, a njezino je kretanje ovisno o propusnosti tla. Povišenjem vodostaja u rijeci postepeno se podiže vodostaj podzemne vode u tlu pored korita, a podzemna se voda obogaćuje riječnom vodom. Što je tlo u dolini propusnije, brže se podiže razina podzemne vode i dalje se proteže porast njezine razine. Ako, dakle, veliki protoci brzo protječu, trajanje je vala prekratko da bi se tlo doline opskrbito vodom. Zbog toga su s vodoprivrednog gledišta nepovoljna glatka riječna korita i brzi prolaz velikih voda. Ako se piezometarske cijevi za mjerenje razine podzemne vode (v. *Hidrometrija*, TE 6, str. 425) postavje okomito na tok rijeke, mogu se registrirati promjene te razine. Zbog polaganog kretanja podzemne vode promjena razine ovisi o udaljenosti od riječnog korita (sl. 43).



Sl. 43. Promjene vodostaja podzemne vode. Piezometarska cijev 1 najbliža, a piezometarska cijev 3 najdalja od korita vodotoka

Kad je razina vode u rijeci niža od razine podzemne vode u obalnom tlu, podzemna se voda kreće prema rijeci, pa vodotok djeluje kao odvodni kanal. Rijeka se hrani iz zaliha podzemne vode u riječnoj dolini, pa dotok podzemne vode osigurava protok u sušnom razdoblju.

LIT.: R. Winkel, Die Grundlagen der Flussregelung. W. Ernst & Sohn, Berlin 1947. – F. Schaffernak, Flussmorphologie und Flussbau. Springer-Verlag, Wien 1950. – J. Duhm, Der Flussbau. Verlag Georg Fromme Co., Wien 1951. – A. Schoklitsch, Handbuch des Wasserbaus (2 Bände). Springer-Verlag, Wien 1962. – A. Wechmann, Hydrologie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1964. – H. Press, Wasserwirtschaft, Wasserbau und Wasserrecht. Werner-Verlag, Düsseldorf 1966. – E. Nakel, Gewässerausbau. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1970. – E. Svetličić, Hidraulika otvorenih korita (1, 2. i 3. dio). OVP, Zagreb 1977. – D. Vischer, A. Huber, Wasserbau. Springer-Verlag, Berlin 1979. – E. Svetličić, Otvoreni vodotoci – regulacija vodenih tokova. Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1987.

E. Svetličić

REKTIFIKACIJA, difuzijska tehnološka operacija za razdvajanje kapljeviti smjesa u frakcije na osnovi razlika hlapljivosti njihovih sastojaka sustavnim ponavljanjem djelomičnog isparivanja i kondenzacije u izravnom kontaktu protustruja kapljeviti i parnih faza tih smjesa. Tokom rektifikacije hlapljiviji se sastojci koncentriraju u parnoj, a teže hlapljivi u kapljevitoj fazi.

U američkoj literaturi rektifikacija se naziva *frakcijskom destilacijom*, jer je rektifikacija zapravo specijalni postupak destilacije (v. *Destilacija*, TE 3, str. 232).

Rektifikacija se vodi stupnjevanim postupcima i postupcima kontinuiranog kontakta faza.