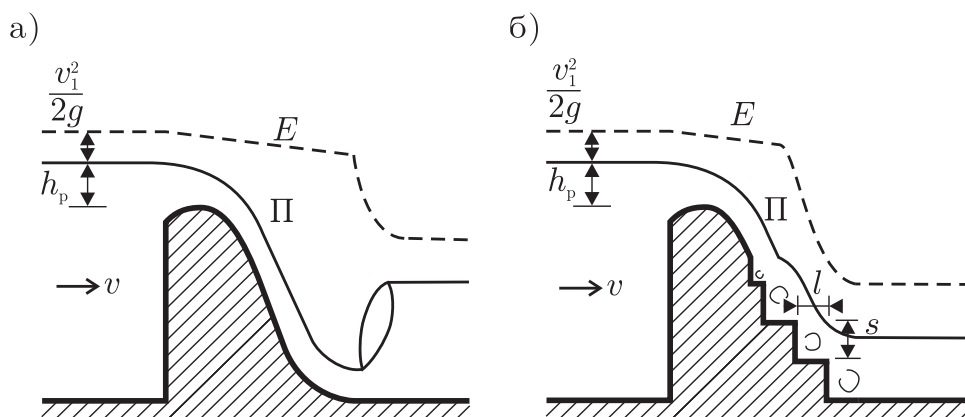


3.5.12 Прелив са степенастим брзотоком

На слици 3.88 приказани су подужни пресеци кроз прелив практичног профила (део „а“) и прелив са степенастим брзотоком, (део „б“). Како се из пијезометарских и енергетских



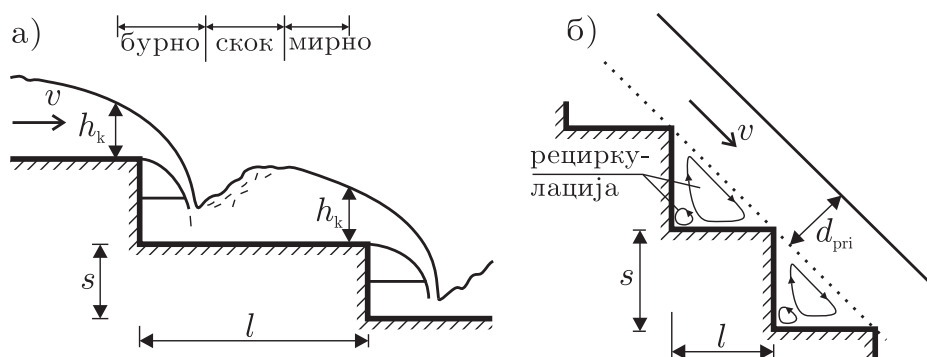
Слика 3.88: Пијезометарска и енергетска линија: а) на преливу практичног профила и б) преливу са степенастим брзотоком.

линија види, код прелива практичног профила, највећи део механичке енергије се изгуби у хидрауличком скоку, низводно од прелива у слапишту. Пошто је облик прелива практичног профила направљен тако да што мање омета струјање воде, а брзоток је без неравнина, губици енергије на њима су занемарљиви. Супротан принцип је примењен на степенастом брзотоку, на коме су направљени степеници, висине s и дужине l . Због тога струјање на преливу са степенастим брзотоком има следеће карактеристике:

- Механичка енергија се добрим делом губи дуж степенастог брзотока, а мање у слапишту.
- Мешање ваздуха и воде дуж степенастог брзотока је много интензивније, него код обичног брзотока, због чега су дубине течења, за исти проток, на њему знатно веће.

- Постоји проблем абразије степенастог брзотока, ако у води има наноса.

Према [9], при струјању воде преко степенастог брзотока разликују се два главна начина струјања. У првом, који је приказан на слици 3.89, под „а”, вода у скоковима тече преко степеника, где се на сваком степенику формира хидраулички скок. Губитак механичке енергије углавном се дешава у хидрауличком скоку, али и при удару млаза од дно степеника, садејству ваздуха и воде и др. Овакво струјање се назива *скоковитим*.



Слика 3.89: Преливање преко степенастог брзотока са: а) скоковитим и б) клизећим струјањем, према [9].

Повећање протока низ брзоток прелива изазива стварање кохерентног млаза воде, који клизи преко степеника, са привидном дебљином слоја воде d_{pri} . Уз дно удубљења степеника стварају се *рецикулације* (кружно струјање воде), у којима се механичка енергија трансформише у топлотну. Овакво струјање се назива *клизећим* и приказано је на слици 3.89, под „б”.

Прелаз из једног начина струјања у друго нема јасну границу већ је постепен, уз настанак и *мешовитог – прелазног* струјања.

Како је прелив степенастог брзотока прелив практичног профила, проток преко њега, према једначини (3.200), је:

$$Q = m B \sqrt{2g} h_p^{3/2},$$

где се за коефицијент преливања обично усваја $m = 0,49$.

За димензионисање степенастог прелива користи се, као карактеристична дужина, критична дубина h_k , која се добија из услова да је Фрудов број једнак:

$$Fr = \frac{Q^2 B}{g A^3} = 1.$$

Проток преко прелива може се онда изразити и преко критичне дубине:

$$Q = B\sqrt{g h_k^3}. \quad (3.271)$$

За веће протоке, на степенастом брзотоку се остварује клизеће струјање. Веза између изабраних димензија степеника и хидрауличких услова, при којима се остварује клизеће струјање, дата је, према [7], емпиријском формулом :

$$\frac{h_k^s}{s} = 0,91 - 0,14 \tan \phi, \quad (3.272)$$

где су s изабрана висина степеника и ϕ угао низводног лица бране према хоризонталу, а h_k^s је најмања критична дубина клизећег струјања. Коришћењем једначина (3.271) и (3.272), може се израчунати и најмањи проток, при коме се остварује клизећи ток, Q^s . Истовремено, мора се водити рачуна да се изабрана висина степеника, s , може изградити. Наиме, степенести брзоток се обично гради од *ваљаног бетона*, у коме има знатно мање воде него у „стандардном” бетону. Слојеви бетона се наносе и ваљају на лицу места, и обично имају дебљину од 0,3 m, [30], па су могуће висине степеника: 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 m.

На слици 3.90 приказан је пресек прелива и степенастог брзотока. Како је раније поменуто, прелив има облик практичног профила, иза кога следи део брзотока, који има паран број степеника висине $s/2$ и степенести брзоток, са степеницима висине s . Делом брзотока са висином $s/2$ (обично 4, или 6 степеника) остварује се мирнији прелаз са глатке на

степенасту површину. На слици 3.90 су приказане и основне величине које су потребне за прорачун струјања на степенастом брзотоку.

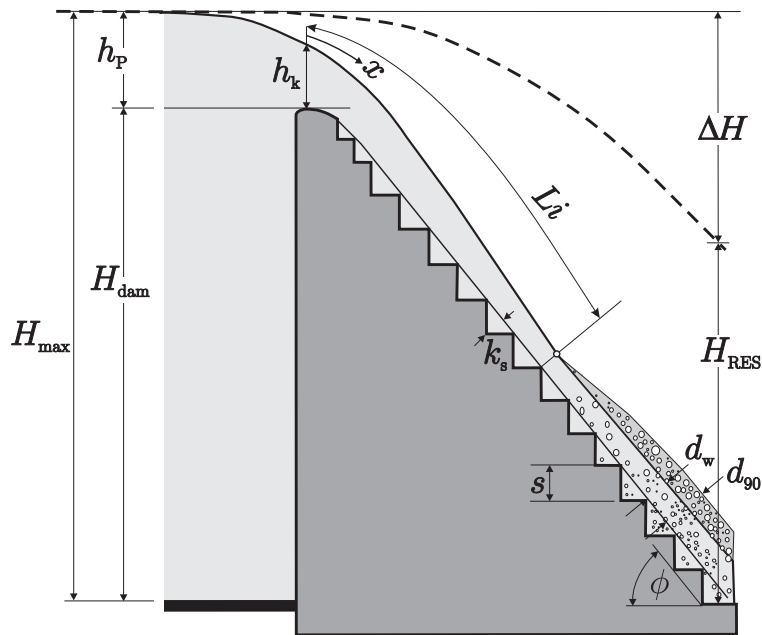
Висина бране од дна слапишта до круне прелива означава се са H_{dam} и преко ње се прелива преливни млаз, висине h_p и критичне дубина h_k . При струјању преко прелива, од круне прелива, уз чврсту контуру, ствара се гранични слој у коме је турбулентно струјање, са великим интензитетом промена притисака и брзина. Дуж струјања овај слој повећава дебљину, да би на неком растојању Li гранични слој достигао слободну површину воде. Интензивне промене притисака и брзина стварају услове за увлачење ваздуха у воду, односно низводно од тог места, дуж брзотока струји мешавина воде и ваздуха, чија се бела боја, услед пене, јасно разликује од тамније боје струјања чисте воде. Дебљина слоја чисте воде је обележена са d_w , а дебљина мешавине воде и ваздуха са d_{90} . На слици 3.90 приказане су обе дебљине, као и њихове слободне површине. У струјању на степенастом брзотоку слободна површина чисте воде се не може уочити.

Описане појаве дешавају се на сваком брзотоку, без обзира да ли је обичан или степенаст, само је на степенастом брзотоку са клизећим струјањем мешање воде и ваздуха интензивније, па тако има и знатно већи утицај на струјање.

Ако је степенести брзоток „довољне дужине”, дуж њега се успоставља једнолико (униформно) струјање, јер у низводном правцу, дубине асимптотски теже ка нормалној дубини (за ознаку се користи доњи индекс „u”). Услов за успостављање нормалне дубине, према [7], је:

$$\frac{H_{\text{dam}}}{h_k} \geq 20. \quad (3.273)$$

Пошто се ради о течењу мешавине воде и ваздуха потребно је израчунати нормалну дебљину слоја чисте воде, $d_{w,u}$, и нормалну дебљину слоја мешавине, $d_{90,u}$, која представља слоја дебљину воде, од дна до нивоа на коме је концентрација ваздуха у води $C = 0,9$ ($C = 0$ је чиста вода и $C = 1$ само ваздух).



Слика 3.90: Пресек прелива и степенастог брзотока, са основним величинама за прорачун, према [6].

Нормална дебљина слоја чисте воде рачуна се, према [7], као:

$$d_{w,u} = 0,215 F_*^{2/3} s, \quad (3.274)$$

а нормална дебљина слоја мешавине $d_{90,u}$ као:

$$d_{90,u} = 0,5 s F_*^{(0,1 \tan \phi + 0,5)}, \quad (3.275)$$

где је F_* Фрудов број (дефинисан на англосаксонски начин), у коме је храпавост (тј. висина степеника, s) карактеристична дужина:

$$F_* = \frac{Q}{B \sqrt{g s^3 \sin \phi}}. \quad (3.276)$$

Концентрација ваздуха у мешавини воде и ваздуха је променљива, по дубини и дуж тока, па је корисно дефинисати

просечну (осредњену) концентрацију ваздуха по дубини тока, \bar{C}_u , која се, према [7], изражава као:

$$\bar{C}_u = 1 - \frac{d_{w,u}}{d_{90,u}}. \quad (3.277)$$

Укупна енергија по јединици тежине, на узводном крају прелива, H_{\max} , (слика 3.90), је:

$$H_{\max} = H_{\text{dam}} + 1,5 h_k. \quad (3.278)$$

При струјању преко степенастог брзотока део енергије по јединици тежине, ΔH , се губи и на крају брзотока преостала енергија по јединици тежине је H_{RES} . Овај део механичке енергије треба да се трансформише у умирујућем базену у топлоту. Преостали део енергије по јединици тежине може се изразити преко дебљине слоја чисте воде, d_w , и брзине чисте воде, v_w , као:

$$H_{\text{RES}} = d_w \cos \phi + \alpha \frac{v_w^2}{2g}, \quad (3.279)$$

где је вредност коефицијента неравномерности брзине $\alpha \approx 1,1$. Ако је познато H_{RES} , уз претпоставку о силовитом струјању, из једначине (3.279) се могу израчунати величине d_w и v_w , итеративним поступком. Коришћењем једначине (3.92) израчунава се конјугована дубина и проверавају потребне димензије слапишта.

Да би се израчунала преостала енергија потребно је одредити утицај трења на степенастом брзотоку, који се изражава коефицијентом трења λ_s . При извођењу емпиријских једначина за λ_s , према [7], вођено је рачуна о томе да попречни пресек није кружни већ правоугаони и да је на дну храпавост неупоредиво већа од храпавости по зидовима.

Еквивалентна храпавост на степенастом брзотоку, k_s , није храпавост површине бетона, већ пројекција висине степеника, s , управна на ток (слика 3.90):

$$k_s = s \cos \phi. \quad (3.280)$$

Овако одређена еквивалентна храпавост дели се са еквивалентним пречником, $D_{d,w}$, који је једнак четвороструком хидрауличком радијус слоја чисте воде. Како је корито широко, правоугаоно, хидраулички радијус је једнак дебљини овог слоја, $d_{w,u}$, па је:

$$D_{d,w} = 4d_{w,u} \cos \phi. \quad (3.281)$$

Изведене су две емпиријске једначине за коефицијент трења, према [7], као:

$$\lambda'_s = [0,5 - 0,42 \sin(2\phi)] \left(\frac{k_s}{D_{d,w}} \right)^{0,2}, \quad (3.282)$$

и

$$\frac{1}{\lambda_s''} = \frac{1}{\sqrt{0,5 - 0,42 \sin(2\phi)}} \left[1 - 0,25 \log \left(\frac{k_s}{D_{d,w}} \right) \right]. \quad (3.283)$$

За прорачун се узима мања вредност између λ'_s и λ_s'' , која даје већу преосталу енергију по јединици тежине и неповољније услове у умирујућем базену. У даљем прорачуну ова величина се означава са λ_s .

За одређивање преостале енергије по јединици тежине, битно је да ли се на брзотоку остварује једнолико струјање или не. Ако се остварује једнолико струјање, што значи да је остварено $H_{\text{dam}}/h_k \geq 15$, користи се, према [7], израз:

$$H_{\text{RES}} = \frac{F H_{\text{max}}}{\frac{H_{\text{dam}}}{h_k} + F}, \quad (3.284)$$

где је F :

$$F = \left(\frac{\lambda_s}{8 \sin \phi} \right)^{1/3} \cos \phi + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\lambda_s}{8 \sin \phi} \right)^{-2/3}. \quad (3.285)$$

Ако није остварено једнолико струјање на брзотоку, па је $H_{\text{dam}}/h_k < 15$, користи се, према [7], експоненцијални израз:

$$H_{\text{RES}} = H_{\text{max}} \exp \left[\left(-0,045 \left(\frac{k}{D_{d,w}} \right)^{0,1} (\sin \phi)^{-0,8} \right) \frac{H_{\text{dam}}}{h_k} \right]. \quad (3.286)$$

Коришћењем поступка за одређивање H_{RES} и једначине (3.279) може се проценити дебљина слоја воде и брзина воде у сваком пресеку брзотока, у којем није достигнута нормална дебљина слоја.

У изложеном поступку прорачуна преостале енергије по јединици тежине, H_{RES} , коришћене су емпиријске једначине. За прорачун H_{RES} може се, према [26], користити и стандардни прорачун дебљина слоја воде у брзотоку, који је изложен у делу 3.5.10. Утицај степеника на струјање одређује се преко еквивалентне храпавости на степенастом брзотоку, k_s , која се рачуна помоћу једначине (3.280), а затим се Манингов коефицијент, n , рачуна помоћу емпиријске једначине (2.54). По израчунатој линији нивоа лако се рачуна и линија енергије, односно преостала енергија по јединици тежине. Трећи начин за одређивање H_{RES} су хидрауличка моделска испитивања, која су приказана у делу 3.5.14.

Преостала енергије по јединици тежине, H_{RES} , као важна хидрауличка карактеристика прелива са степенастим брзотоком, најтачније се одређује хидрауличким моделским испитивањима. Нешто је мање тачна примена емпиријских једначина. На основу поређења H_{RES} , израчунате помоћу емпиријских једначина и преко стандардног прорачуна дебљине слоја воде у брзотоку, може се, према [26], закључити да први поступак даје веће вредности од другог. Ако је висина степеника, s , мања од дебљине слоја мешавине воде и ваздуха, h_{90} , ове разлике су занемарљиве, али ако је $s > h_{90}$ разлике су значајне и стандардни прорачун се не може користити, јер му резултати нису на страни сигурности.

3.5.13 Сифонски прелив

Код свих непотопљених прелива проток преко прелива зависи од висине преливног млаза, а разлика између коте нивоа узводно и низводно од прелива нема никаквог утицаја на проток. У неким ситуацијама, потребно је да се проток преко прелива повећа, тако што ће његова вредност зависити од разлике кота нивоа горње и доње воде. У том случају прелив