Havs och Vatten myndigheten

Bilaga 5.8. Hydrauliska samband för fiskpassager

Av: Patrik Andreasson, Luleå Tekniska Universitetet och Vattenfall AB

Avsikten med detta avsnitt är att ge verktyg för en första ungefärlig hydraulisk design av en fiskpassage, d.v.s. uppskatta vilka djup och hastigheter som uppstår vid ett relevanta lutningar och struktur på fiskpassagens botten. Enkelhet och vanlighet har prioriterats före komplexitet och specialfall. I ett skarpt designläge bör dock analysen fördjupas. För detta ges ett flertal hänvisningar till litteratur som ger möjlighet till en mer grundlig analys (senare avsnitt: Referenser och lästips). Naturliknande fiskpassager anläggs med i terräng och med material som inte alltid helt överensstämmer med tänkt design. Även en mer grundlig analys kan därför behöva efterjusteras efter idrifttagning för att kompenseras för detta.

För enkelhetens skull redovisas här endast samband för breda och likformiga fiskpassager. Formellt innebär detta att fiskpassagens bredd bör vara mer än ca 10 gånger medeldjupet. Är bredden mindre kan användandet av den s.k. hydrauliska radien korrigera för detta (förklaras vidare i avsnitt nedan: Naturlik fiskpassage med stort relativt djup). Likformighet innebär att vattenvägens lutning och tvärsnitt är relativt oförändrad under en sträcka: minst motsvarande 4–5 djup från inlopp och utlopp samt att inte passagen däms upp av höga nedströmsförhållanden. I praktiken är ovan villkor ofta uppfyllda (eller nästan uppfyllda) för merparten av en fiskpassages sträckning. Den förenklade teorin i detta avsnitt är dock i första hand avsett för en analys av passagens längd i sin helhet, snarare än avsedd för analys av lokala sträckor däri.

S.k. vattensprång förekommer frekvent i grunda och branta vattendrag. I nedan uttryck för mycket grunda vatten där bottenmaterialet nästan eller faktiskt sticker upp ovanför vattenytan är detta beaktat (en viktig del) i ekvationerna. För större djup är detta inte fallet. Tillräcklig kunskap om flödestillståndet (sub-/superkritiskt och dess övergångar) bör därför finnas hos användaren av ekvationerna för att undvika felaktiga slutsatser. För mer läsning se avsnitt: Allmän hydraulik.

Naturligt grunda vattendrag med lite större bottenlutning visar ofta upp en kombination av strömning mellan större utspridda stenar och inslag av djupare och lugnare vattenområden ("pooler"). Naturligt utbildas också ofta trösklar mellan dessa pooler, mer eller mindre sammanhängande. I avsnitt "Naturlik fiskpassage av 'pool-weir'-typ" beskrivs hydrauliken för denna typ av struktur då den för större bottenlutningar är ett effektivt sätt att hålla hastigheterna begränsade.

Naturlik fiskpassage med stort relativt djup

För djupare vatten finns flera enkla samband för att beskriva hydrauliken. Många känner till Mannings ekvation för hydraulisk modellering av kanaler och vattendrag. Den är det klassiska sättet att enkelt uppskatta de hydrauliska förhållandena i ett vattendrag. Med ovan nämnda förenklingar så relateras medelhastighet över vattenvägens tvärsitt U [m/s] till bottenlutning S_0 [m/m] och vattendjup h [m] via en råhetsparameter Mannings tal n [s/m^{1/3}]:

$$U = \frac{1}{n}h^{2/3}S_0^{1/2}$$

Mannings tal kan direkt plockas ur tabeller. T.ex. är enligt Hamill (2011) värdet *n* i intervallet 0,040 – 0,080 för ett vattendrag med många krökar och bottenmaterial med 75–150 mm stenar. För ett djup på 0,8 m och en hastighet av 1 m/s ger detta en lutning på ca 0,3% (n = 0,044). Detta är ofta en alltför låg lutning som ger mycket långa och flacka fiskpassager.

Bottenstrukturen i ett vattendrag är naturligt alltid graderad i flera stenstorlekar. Oftast beskrivs materialet på botten av ett vattendrag med hjälp av en karaktäristisk storlek, en s.k. kornstorlek mätt som diameter. En sådan är d_{84} [m], som är den stenstorlek för vilken 84% av bottenmaterialet är finare. Limerinos (1970) presenterade ett uttryck som relaterat Mannings *n* till d_{84} . Med SI-enheter (och tidigare nämnda förenklingar) lyder det:

$$n = \frac{0,113h^{1/6}}{1,16 + 2 \times \log_{10}\left(\frac{h}{d_{84}}\right)}$$

För en botten med större stenar kan dessas medelstorlek ungefärligen sättas till d_{84} . Exempel på större sten är en representativ diameter av 0,5 m.

Ett villkor för ovan ekvationer är som nämnts att fiskpassagen är hydrauliskt bred, d.v.s. att dess bredd B > 10h. Uppfyller inte fiskpassagen detta kriterium så kan djupet h ersättas med den s.k. hydrauliska radien R. För ett trapetsformat tvärsnitt med strömfårans bredd l_h och släntlutningarna S_s är hydrauliska radien:

$$R = h \left(\frac{1 + \frac{h}{S_s l_h}}{1 + \frac{2h}{S_s l_h} \sqrt{1 + S_s^2}} \right)$$

Ett trapetsformat tvärsnitt har form av en horisontell strömfåra (bredd l_h) med jämnt sluttande slänter på sidorna. Djupet *h* avser huvudfårans djup. För vertikala sidor på passagen reduceras detta till $R = h/(1 + 2h/l_h)$. Släntlutningen S_s uttrycker kvoten mellan släntens höjd och bredd.

Formellt är Mannings ekvation giltig endast för stora relativa djup, d.v.s. ungefär där $h > 10d_{84}$. Det finns metoder att justera för detta, se t.ex. Cheng (2015). I nästa avsnitt (Naturlik fiskpassage med relativt litet djup) hanteras dock dessa fall med en "sömlös" (kontinuerlig) metod hela vägen ner till $h < d_{84}$.

Naturlik fiskpassage med litet relativt djup

Av enkelhetsskäl så presenteras här en metod som inte särskiljer på "limited relative submergence" ($h < 10d_{84}$) och "low relative submergence" ($h \approx d_{84}$ och därunder). I avsnitt om "Referenser och lästips" kan dock hittas litteratur som är sorterad på denna differentiering för den som vill läsa mer (stycke: Passager med uppstickande eller knappt överströmmade stenar ($h/d_s \approx 1$) och stycke: Passager där djupet är litet i förhållande till stenstorleken ($h/d_s <$ ca 10). Här har också valts en metod som relativt väl harmoniserar med ekvationer för större djup (se avsnittet ovan): den av Lariner m.fl. (2006). I Figur 1 nedan jämförs denna med tre andra ansatser för grunda, steniga vatten (Ortel m.fl., 2011, Pagliara m.fl., 2008 och FAO, 2002). Vid låga djup ger alla fyra ansatser ungefär samma hastighet men när djupet ökar är det bara Lariner m.fl. (2006) som får ett förväntad utveckling av hastigheten. I avsnitt "Passager med uppstickande eller knappt överströmmade stenar ($h/d_s \approx 1$)" finns referens till fler liknande uttryck. Någon jämförelse mellan alla dessa har dock inte gjorts.



Figur 1. Exempel på hur hastigheten varierar med djupet. Här är $d_s = 0.5 m$, $d_{eff} = 0.85d_s$, $l_s/d_s = 3$ och $S_0 = 0.01$. Beräkning (heldragen svart kurva) jämförs med konventionella Mannings ekvation samt några alternativa modeller i litteraturen. Diagrammet till vänster är en förstoring av det nedersta vänstra hörnet av bilden till vänster.

För låga djup med uppstickande stenar ("*perturbating boulders*") blir strömningen komplex, där upprepade och s.k. bestämmande sektioner och vattensprång uppstår spritt över hela vattenvägen vid lite högre hastigheter. Med stora stenar i bottenmaterialet så är det dessa som orsakar merparten av förlusterna ("bromsverkan") i strömningen. De flesta metoder för att beskriva hydrauliken under dessa förhållanden utgår också från en formulering av s.k. "formmotstånd" hos större stenar. Här har valts att beskriva förhållanden där större stenar är jämnt spridda över botten utan tydliga "kanaler" i mönstret (Figur 2).



Figur 2. Illustration av strömning med lågt relativt djup (vy uppifrån och från sidan). Lutningen på vattenvägen är S₀, de stora stenarna har diametern d_s, djupet är h och stenarna har ett medelavstånd (c-c) av l_s. Den del av de stora stenarna som sticker upp ovanför omgivande botten benämns effektiv diameter d_{eff}.

Under dessa förhållanden kan ett samband mellan bottenmaterial, lutning och hastighet skrivas som:

$$\begin{split} U &= 2.6 \times S_0^{0.557} h^{0.45} d_s^{0.05} C_s^{-0.456} & h < 1.1 d_{eff} \\ U &= \min \begin{bmatrix} 3.0 \times S_0^{0.466} h^{1.396} d_{eff}^{-0.896} C_s^{-0.230} \\ 20.2 \times \left(\frac{h}{d_s}\right)^{1/6} \sqrt{hS_0} \end{bmatrix} & h > 1.1 d_{eff} \\ C_s &= 0.75 \left(\frac{d_s}{l_s}\right)^2 \end{split}$$

där

för jämnt utspridda stenar (men relativt nära varandra:
$$2d_s < l_s < 4d_s$$
).
Uttrycket för hastigheten *U* kan framstå som komplicerat men är egentligen
relativt enkelt. Det översta gäller för vattennivåer i nära eller under stora
stenars krön. Det undre avser större djup och är en kombination av två uttryck
där den s.k. operatorn min[...] betyder att man väljer det uttryck som ger lägst
hastighet av de två innanför parantesen.

Ekvationssystemet ovan är en syntes (och viss förenkling) av Lariner m.fl. (2006) och Mannings ekvation från avsnitt 0, med syftet att få en sömlös övergång till större djup. För Manningstalet har använts uttrycket av Limerinos (1970) för ett djupt vatten (vid $h = 20d_{84}$) och antagandet $d_{84} \approx d_s$.

I Figur 1 visas hastigheter vid olika djup för bottenförhållanden som karaktäriseras av 0,5 m stora stenar utspridda jämnt med ett medelavstånd av 1,5 m och med ca 85% av stenhöjden ovan botten som har en medellutning på 1%.

Den stora spridningen av resultat mellan olika modeller framgår tydligt i Figur 1. Även modellen av Smart m.fl. (2002) provades, dock utan att lyckas erhålla realistiska resultat. Också det enkla sambandet av Hey (1979) framtaget för $h > 0,3d_{84}$ utvärderades men bedömdes vara alltför grovt och avvika för mycket såväl vid låga som höga djup. Spridningen är ett utslag av komplexiteten i strömningen och understryker vikten att kontrollera och ha möjlighet att efterjustera en fiskväg efter det att den byggts.

För fiskpassager oavsett djup bör tvärsnittet ha flacka sidor, helst med samma stenstorlek och täthet som i huvudfåran. Detta grundare sidor av passagen skapar lägre hastigheter, som kan vara lämpliga för svagsimmande arter.

Hur räknar man ut flödet för hela fiskpassagen? Något förenklat får man en ungefärlig uppskattning av flödet genom:

$$Q \approx h \left(U_h l_h + \frac{U_s h}{S_s} \right)$$

där h, U_h och l_h är djup, hastighet och bredd för huvudfåran, U_s och S_s är hastighet och lutning på slänterna för ett trapetsformat tvärsnitt. Medelhastigheten på slänterna U_s kan skattas om ekvationssystemet för hastighet ovan räknas ut med djupet $0.5h/\sqrt{1+S_s^2}$. Hastigheten i huvudfåran U_h räknas med djupet h oförändrat.

Naturlik fiskpassage av "pool-weir"-typ

"Pool-weir" eller "cascade rocky ramp" är ett sätt att lösa fiskpassager där mer branta bottenlutningar fordras och kan tålas av adresserade fiskarter. Calles m.fl. (2013) använder benämningen naturlik bassängtrappa för denna typ av passage. Figur 3 nedan illustrerar den principiella designen.



Figur 3. Principskiss för passage av "pool-weir"-typ. I figuen är T krönbredden, L distansen mellan krönen, hQ uppströms nivån över krönet på stenarna och □h är vattennivåskillnaden mellan bassängerna. S0 är som tidigare fiskpassagens bottenlutning.

Förutsatt att ⊿h är tillräckligt stor ges flödet av ett enkelt s.k. Polenisamband:

$$Q = CBh_Q^{3/2}$$

där *Q* är totalflödet [m³/s], Koefficienten *C* beror på krönets utformning och *B* är krönets totala bredd. Sambandet är giltigt om $\Delta h > 0,3h_Q$ ungefär. Värdet på *C* varierar något mellan olika referenser:

Lariner m.fl. (2006): $C \approx 1,6$ FAO (2002): 1,5 < C < 1,8 för naturliga och 1,8 < C < 2,4 för krossade (kantiga) krönstenar Gordon m.fl. (1992): $C \approx 1,7$ USWSF (2019): 1,4 < C < 1,8 med analogi till "broad-crested weirs" med beroende av h_0 och T

Towler m.fl. (2015): 1,4 < C < 1,8 (samma metod som USWSF, 2019)

Notera att koefficienten *C* inte är dimensionslös. Därför bör värden kontrolleras så att de ges i SI-enheter. T.ex. USWSF (2019) och Towler m.fl. (2015) ges i brittiska enheter, även om dess källa (Brater m.fl., 1996: tabell 5.1) ges i SI-enheter ursprungligen. Ett värde $C \approx 1,7$ är ett ungefärligt medelvärde av nämnda referenser.

Hastigheten på stenkrönet ges av den (hydrauliskt) kritiska hastigheten $U \approx 2, 6\sqrt{h_Q}$ [m/s] och ökar upp till $U \approx 4, 4\sqrt{\Delta h}$ [m/s] när vattnet når bassängytan nedanför. Hur stor nivåskillnaden blir mellan bassängerna bestäms helt av geometriska parametrar, d.v.s. hur lång (*L*) pool man anlägger i bottenlutningen S_0 :

$$\Delta h = LS_0$$

Detta gäller (som genomgående i detta avsnitt) för de något idealiserade/förenklade förhållanden som nämnts i början. Vanliga lutningar för denna typ av "pool-weir" passager är enligt Armstrong m.fl. (2010) mellan 1% och 5%.

För mindre nivåskillnad mellan bassängerna ($\Delta h < 0, 3h_Q$), som kan vara aktuellt om hastigheterna behöver hållas nere, finns det flera metoder. Baki m.fl. (2017a,b) ger en grundlig och relativt lättförståelig genomgång av teorin för dessa förhållanden. Fler referenser finns i avsnitt "Referenser och lästips" (Passager av "pool-weir"-typ) samt i handböckerna Lariner m.fl. (2006), FAO (2002) samt USFWS (2019).

Kallt klimat och erosion

Branta lutningar innebär ökad risk för erosion, såväl för de större stenarna ("boulders") som för det finare bottenmaterialet. För det senare kan konventionella samband användas, t.ex. Shield's metod som kan hittas i merparten av litteraturen om sedimenttransport (se t.ex. klassikern av Raudkivi, 1976). Även mer lokal erosion, t.ex. i anslutning till större stenar ("scour") eller nedströms "weirs" kan hittas här. Bottenmaterialet kommer också sorteras (erodera/sedimentera) med tiden för att harmonisera med de destabiliserande krafterna som åstadkoms av vattnets rörelse, främst de vid högflödessituationer.

Vad gäller större stenar så fungerar inte dessa konventionella metoder för sedimenttransport lika bra, delvis för att "boulders" sticker upp i strömmen på ett sätt som inte bottenmaterialet gör. Utan anspråk på att vara heltäckande kan mer om erosionsrisken för större sten läsas i t.ex. Bressan m.fl. (2018), van Rijn (2019), Carling m.fl. (2002), Wang m.fl. (2019) och Herterich & Dias (2019). En grov indikation om stabiliteten ges av Danehy m.fl. (2016). De studerade ett stort antal "boulders" (mer än 600 st.) av olika storlek under varierande flödesförhållanden och fann att sten med en medeldiameter över 0,5 m var genomgående stabila.

Kallt klimat och öppet rinnande vatten innebär ofta omfattande isbildning. För grunda vatten och branta lutningar uppstår därför lätt problem orsakad av s.k. kravis. Detta är iskristaller som bildas i rinnande vatten som kylts till marginellt under 0°C. Kravis ("frazil ice") skapa omfattande ispåväxt på botten och fördämningar i vattenvägen, med risk för accelererad erosion och svallis som följd. Svallis ("water ice") kallas den gradvis växande tjocklek av kärnis kan bildas om små vattendrag bottenfryser. Mer om isproblem i små vattendrag kan läsas i Ashton (1986), Beltaos (2013), Turcotte m.fl. (2013) eller Dubé (2015).

Referenser och lästips

Förutom referenser till texten i detta avsnitt finns också lästips inlagda. För att enkla läsa vidare finns samlade referenser i tre underrubriker för de olika hydrauliska förhållanden som behandlas här.

Armstrong, G.S., M.W. Aprahamian, G.A. Fewings, P.J. Gough, N.A. Reader & P.V. Varallo, 2010, *Environment agency fish pass manual*, GEHO 0910 BTBP-E-E, Environment Agency, Bristol, UK.

Ashton, G.D., 1986, *River and Lake Ice Engineering*, Water Resources Publications, Littleton, USA.

Brater, E.F, H.W. King, J.E. Lindell & C.Y. Wei, 1996, *Handbook of hydraulics*, 7th Ed, McGraw-Hill, Boston.

Beltaos, S., 2013, *River Ice Formation*, Canadian Geophysical Union, Hydrology Section, Edmonton (speciellt kap. 11 och 12).

Calles, O., E. Degerman, H. Wickström, J. Christiansson, S. Gustafsson & I. Näslund, 2013, Anordningar för upp- och nedströmspassage av fisk vid vattenanläggningar - Underlag till vägledning om lämpliga försiktighetsmått och bästa möjliga teknik för vattenkraft, Rapport 2013:14, Havs- och vattenmyndigheten.

Carling, P.A., M. Hoffmann & A.S. Blatter, 2002, *Initial Motion of Boulders in Bedrock Channels*, Water Science and Application, **5**:147-160.

Danehy, R.,E.R. Moberly, P.L. Reber, S. Swanson, S. Liebhardt & J. Sheahan, 2016, *Stability and thermal impacts of channel-spanning boulder weirs in Mosby Creek*, Northwest Science, 90(4): 411-420.

Dubé, M., B. Turcotte & B. Morse, 2015, *Steep channel freezeup processes: Understanding complexity with statistical and physical models*, Canadian Journal of Civil Engineering, **42**(9): 622-633.

Herterich, J.G. & F. Dias, 2019, *Potential flow over a submerged rectangular obstacle: Consequences for initiation of boulder motion*, European Journal of Applied Mathematics, Online ISSN: 1469-4425, 36 p. Limerinos, J.T., 1970, *Determination of the Manning Coefficient from Measured Bed Roughness in Natural Channels*, USGS Water Supply Paper 1898-B. U.S. Geological Survey.

Raudkivi, A.J., 1976, *Loose Boundary Hydraulics*, Pergamon Press, Oxford, UK.

Turcotte, B, B. Morse, M. Dubé & F. Anctil, 2013, *Quantifying steep channel freezeup processes*, Cold Regions Science and Technology, **94**: 21-36.

Van Rijn, L.C., 2019, *Critical movement of large rocks in currents and waves*, International Journal of Sediment Research, 34(4): 387-398.

Allmän hydraulik

Chadwick, A., J. Morfett. & M. Borthwick, 2013, *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*, 5th edition, CRC Press, Boca Raton, Fl., USA.

Chanson, H., 2004, *The Hydraulics of Open Channel Flow*, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam.

Cederwall, K. & P. Larsen, 1976, *Hydraulik för väg- och vattenbyggare*, Liber Läromedel, Malmö.

Gordon, N.D., T.A. McMahon & B.L. Finlayson, 1992, *Stream hydrology – An introduction for ecologists*, John Wiley & Sons, Chichester, England.

Hamill, L., 2011, *Understanding hydraulics*, 3rd edition, Palgrave Macmillan, London.

Henderson, F.M., 1966, *Open Channel Flow*, Macmillan Publishing Co. New York.

Jain, S.C., 2001, Open Channel Flow, John Wiley & Sons, New York.

Passager med uppstickande eller knappt överströmmade stenar $(h/d_s \approx 1)$

Aberle, J. & M. Smart, 2003, *The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes*, Journal of Hydraulic Research, **41**(3): 259-269.

Baki, A.B.M., D.Z. Zhu & N. Rajaratnam, 2016, *Flow simulation in a rock-ramp fish pass*, Journal of Hydraulic Engineering, **142**(19): 04016031, 12p.

Cassan, L. & P. Laurens, 2016, *Design of emergent and submerged rock-ramp fish passes*, Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, **417**(45), 10 p., <u>www.kmae-journal.org</u>.

Cassan, L., T.D. Tien, D. Courret, P. Laurens & D. Dartus, 2014, *Hydraulic resistance of emergent macroroughness at large Froude numbers: design of nature-like fishpasses*, Journal of Hydraulic Engineering, **140**(9): 04014043, 9 p.

FAO, 2002, *Fish passes: Design, Dimensions and Monitoring*, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome Italy.

Heimerl, S., F. Krueger & H. Wurster, 2008, *Dimensioning of fish passage structures with perturbation boulders*, Hydrobiologica, **609**: 197-204.

Katul, G., 2002, *A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams*, Water Resources Research, **38**(11), 8p.

Lariner, M., D. Courret & P. Gomes, 2006, *Guide technique pour la conception des passes «naturelles»*, Rapport GHAAPPE RA.06.05-V1, CSP-CEMAGREF-GHAAPPE, Institut de Méchanique des Fluides, Toulouse (på franska).

Mooney, D.M., C.L. Holmquist-Johnson & S. Broderick, 2007, *Rock Ramp Design Guidelines*, Reclamation – Managing water in the west, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver.

Ortel, M., S. Peterseim & A. Schlenkenkhoff, 2011, *Drag coefficient of boulders on a block ramp due to interaction processes*, Journal of Hydraulic Research, **49**(3): 372-377.

Pagliara, S. & P. Chiavaccini, 2006, *Flow resistance of rock chutes with protruding boulders*, Journal of Hydraulic Engineering, **132**(6): 545-552.

Pagliara S., R. Das, and I. Carnacina, 2008, *Flow resistance in large-scale roughness condition*, Canadian Journal of Civil Engineering, **35**: 1285–1293.

Rice, C.E., K.C. Kadavy, K.M. Robinson, 1984, *Roughness of Loose Rock Riprap on Steep Slopes*, Journal of Hydraulic Engineering, **124**(2):179-185.

Smart, G.M., M.J. Duncan & J.M. Walsh, 2002, *Relatively rough flow resistance equations*, Journal of Hydraulic Engineering, 128(6): 568-578.

USFWS, 2019. *Fish Passage Engineering Design Criteria*, USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service), Northeast Region R5, Hadley, Massachusetts.

Weibel, D. & A. Peter, 2013, *Effectiveness of different types of block ramps for fish upstream movement*, Aquatic Sciences, **75**(2): 251-260.

Wang, L., L. Bressan & S. Tinti, 2019, Numerical investigation on the instability of boulders impacted by experimental coastal flows, Water, **11**(8):1557, 16p.

Passager av "pool-weir"-typ

Baki, A.B.M, D.Z. Zhu, A. Harwood, A. Lewis & K. Healey, 2017a, *Rock-weir fishway I: flow regimes and hydraulic characteristics*, Journal of Ecohydraulics, **2**(2):122-141.

Baki, A.B.M, D.Z. Zhu, A. Harwood, A. Lewis & K. Healey, 2017b, *Rock-weir fishway II: design evaluation and considerations*, Journal of Ecohydraulics, **2**(2):142-152.

Gordon, E.H, K. Collins, C. Holmquist-Johnson & M. Scurlock, 2016, *Rock Weir Design Guidance*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

Kapitzke, R., 2010, *Culvert fishway guidelines: Part H – Rock ramp fishways for open channels*, Ver. 2.0, James Cook University, Australia.

Thornton, C.I., A.M. Meneghetti, K. Collins, S.R. Abt & S.M. Scurlock, 2011, *Stage-discharge relationships for U-, A-, and W-weirs in un-submerged flow conditions*, Journal of the American Water Resources Association, **47**(1): 169-178.

Towler, B., J. Turek & A. Haro, 2015, *Preliminary Hydraulic Design of a Step-Pool-Type, Nature-Like Fishway*, TR-2015-1, University of Massachusetts Amherst, USA.

Wang, R.W. & A. Hartlieb, 2011, *Experimental and field approach to the hydraulics of nature-like pool-type fish migration facilities*, Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 400(5), 18 p.

Wohl, E., 2016, *Channel-unit hydraulics on a pool-riffle channel*, Physical Geography, **28**(3): 233-248.

Passager där djupet är litet i förhållande till stenstorleken ($h/d_s < ca 10$)

Aberle, J. & V. Nikora, 2006, *Statistical properties of armoured gravel bed surfaces*, Water Resources Research, **42**: W11414, 11 p.

Cheng, N.-S., 2015, *Resistance coefficients for artificial and natural coarsebed channels: alternative approach for large-scale roughness*, Journal of Hydraulic Engineering, **141**(2): 04014072, 7 p.

Choi, S.-U. & H. Kang, 2016, *Characteristics of mean flow and turbulence statistics of depth-limited flows with submerged vegetation in a rectangular open-channel*, Journal of Hydraulic Research, **54**(5): 527-540.

Cooper, J.R., J. Aberle, K. Koll & S. J. Tait, 2013, *Influence of relative submergence on spatial variance and form-induced stress of gravel-bed flows*, Water Resources Research, **49**: 5765-5777.

Dittrich, A. & K. Koll, 1997, *Velocity field and resistance of flow over rough surfaces with large and small relative submergence*, International Journal of Sediment Research, **12**(3): 21-33.

Ferguson, R., 2007, *Flow resistance equations for gravel an boulder-bed streams*, Water Resources Research, **43**, W05427, 12p.

Hey, R.D., 1979, Flow resistance in gravel bed rivers, Journal of the Hydraulic Division, **105**(4): 365-379.

Manes, C., D. Pokrajac & I. McEwan, 2007, *Double averaged open-channel flows with small relative submergence*, Journal of Hydraulic Engineering, 133(8): 896-904.

Mohajeri, S.H., S. Grizzi, M. Righetti, G.P. Romano & V. Nikora, 2015, *The structure of gravel-bed flow with intermediate submergence: a laboratory study*, Water Resources Research, **51**: 9232-9255.

Powell, D.M., 2014, *Flow resistance in gravel-bed rivers: Progress in research*, Earth-Science Reviews, **136**: 301–338.

Rouzes, M., F.Y. Moulin, E. Florens & O. Eiff, 2019, *Low relative-submergence effects in a rough-bed open-channel flow*, Journal of Hydraulic Research, **5**7(2): 139-166.

V. Ferro, 1999, *Friction factor for gravel-bed channel with high boulder concentration*, Journal of Hydraulic Engineering, **125**(7): 771-778.

Zeng, C., C. Li, H. Tang, L. Wang & J. Mao, 2015, *Experimental study of depth-limited open-channel flows over a gravel bed*, International Journal of Sediment Research, **30**: 160-166.

11/11