

Bilaga 5.6. Strömning i vattendrag och fiskpassager – Hydraulisk modellering

Av: Patrik Andreasson, Luleå Tekniska Universitetet och Vattenfall AB

I vattendrag omsätts hela tiden energi. Rörelsen från högre elevation till lägre frigör lägesenergi som driver flödet. Den energin omvandlas så småningom till värme via s.k. "inre friktion" i vattnet och försvinner därmed som energikälla till flödets rörelse. Dessförinnan sker ofta ett flertal övergångar från läges- till rörelseenergi och vice versa. Är vattendraget brett och djupt dominerar lägesenergin och det strömmar lugnt. Är det grunt och smalt dominerar rörelseenergin. Lägesenergin i ett vattendrag beskrivs ofta som en nivå på vattenytan eller, alternativt, som ett djup över botten.

Mänskligt konstruerade strömningssystem drivs ofta av ett stipulerat tryck eller flöde, med slutna och givna (oföränderliga) vattenvägar. Ett exempel är vårt kommunala dricksvatten eller många system inom processindustrin. Vattendrag och fiskpassager däremot, har nästan alltid en fri vattenyta. Ordet "fri" inbegriper den mest uppenbara egenskapen för dessa vattensystem: att strömningen själv avgör vilket djup och därmed vilken flödesdomän ("våt volym") som tas i anspråk. Hastighet eller tryck är här inte givet av yttre faktorer eller en given flödesgeometri, utan en följd av terrängen och dess lutning i ett samspel med även angränsande sträckor i vattendraget. "Strömning" är ett samlande begrepp som beskriver rörelsen i vattnet, d.v.s. flöde, hastigheter, omblandning/turbulens, vattentryck/djup, m.m. Den lokala strömningsbilden i ett vattendrag, påverkas antingen från uppströms- eller nedströms förhållanden, inte från bägge håll samtidigt. En brant bottenlutning betyder därför inte alltid snabb strömning då det kan dämpa nedströms ifrån. Likaså kan en mycket flack bottenlutning utsättas för höga hastigheter om strömningen har samlat fart på en uppströms sträcka.

Förutom den fria vattenytan finns det några ytterligare egenskaper som få andra strömmande system uppvisar. Nedan nämns fyra viktiga sådana som direkt påverkar matematisk modellering:

Höga flöden: Det är stora vattenmängder som passerar i ett naturligt eller anlagt vattendrag/fiskpassage. Även en måttlig fiskpassage med ett flöde på 0,5 m³/s är högt, i jämförelse med de flöden som förekommer inom de flesta industriella strömningssystem. Lockvattenflöden på flera kubikmeter per sekund är utmanande stora, för jämförbara trycksatta pumpdrivna system. Sammantagen s.k. slukförmåga och spill på flera hundra kubikmeter per sekundmeter som är representativt för större vattenkraftverk och naturligt i oreglerade älvar, förekommer knappast i någon annan industriell process.

En konsekvens av detta är att vattenvägar (naturliga som konstgjorda) alltid är

fullt turbulenta i vattenkraftsammanhang (*tekniskt: höga och ofta mycket höga Reynolds tal*). Turbulens är den största enskilda fysikaliska osäkerheten vid matematisk modellering. Inga praktiskt användbara generella modeller för turbulens existerar, utan modeller måste anpassas till problemställningen. Vilket val man som modellerare gör för att representera turbulensen kan påverka resultatet märkbart. För vattendrag och fiskpassager räknas som turbulensmodell även de "friktionstermer" som används i de enklare 1D/2D koderna. Turbulensen utgör den dominerande andelen av den s.k. friktionen och är därmed en avgörande faktor för ett vattendrags strömningsförhållanden.

Bottenstruktur: De flesta industriella tillämpningar har en tydlig och strukturerad geometri där den s.k. råheten är väldefinierad. Råhet kallas den ytstruktur som en matematisk modells geometriska begränsningsytor ges, d.v.s. dess skrovlighet. I ett naturligt vattendrag eller stenig fiskpassage är batymetrin (den våta geometrin) ofta betydligt mer komplicerad och svårdefinierad än i många andra strömningstillämpningar. Inte bara är geometrin komplex, råheten har många olika storleksskalor också. För att bygga en matematisk modell är det viktigt att skilja på geometri (vars form återges av 3D-modellens volym och form) och råhet som representeras av en förlustterm (parametreras) på 3D-modellens ytor. Med modern beräkningskraft och detaljerade ekolodsdata kan ofta högupplösta modeller byggas. En sådan modell kan därför behöva ges en lägre råhet än en modell med grövre upplösning.

Bottenmaterialet är också ofta löst liggande och dess sammansättning och utbredning nedåt är ofta inte känd. En förändrad strömningsbild förändrar därför ofta bottenmaterialets sammansättning vilket de flesta modeller har svårare att hantera. Stora förändringar i strömningsbilden kan också orsaka förändringar i batymetrin (geometri) genom mer omfattande erosion.

Dynamik: Naturliga och reglerade vattendrag och fiskpassager är ofta föremål för ökande eller minskande vattenföring. I ett slutet industriellt system sker förändringar i flödet nästan omedelbart i hela systemet, t.ex. vid ett pådrag från en pump eller reglerandet av en ventil. Strömningshastigheten anpassar sig där direkt till en nivå som är direkt proportionell mot flödesändringen. I ett vattendrag är denna process mycket mer utdragen och dämpad. Detta berörs ytterligare i avsnitt nedan (Dynamiken i ett rinnande vattendrag).

Flödestillstånd: Rinnande vatten omsätter energi som via turbulensen (s.k. dissipation) omvandlas till värme. För varje sektion i ett vattendrag kan man definiera en energinivå som används och fordras för att transportera vattnet. I ett stillastående vattenkraftmagasin kan man definiera energinivån som vattenytans lägesenergi ovanför botten, eller dess djup (*Tekniskt: energi kan mätas i meter för vattendrag då enheten [m] via multiplikation med densitet och tyngdacceleration får enheten [J/m³]*).

I ett rinnande vattendrag tillkommer en energiterm jämfört med magasinet: rörelseenergi. Ett givet flöde ger alltså upphov till såväl lägesenergi (djup) som rörelseenergi. Ju större djup, desto större genomströmmad area och därmed lägre hastighet och vice versa. Konsekvensen är att i varje sektion i ett rinnande vattendrag finns två tänkbara flödestillstånd vid samma tillgängliga energinivå: stort djup och liten hastighet eller stor hastighet vid litet djup. Beroende på angränsande förhållanden i vattendraget så kan båda tillstånden periodvis råda.

Häri ligger också utmaningen. Övergången mellan dessa två strömningstillstånd kallar man kritiska förhållanden. Den accelererande övergången från stort djup till stor hastighet är relativt enkel att hantera i en matematisk modell. Återgången från stor hastighet till större djup kallar man vattensprång. Vattensprång är ett kaotiskt tillstånd ofta med vågor, rullvågor, luftinblandning och stänk. Detta utgör en utmaning för de flesta matematiska modeller. I en typisk stenig fors sker dessa övergångar upprepade gånger och distribuerat över ett större område beroende på bottenstrukturens egenskaper. T.ex. en s.k. blockramp är konstruerad för att skapa förhållanden där vattensprång utgör främsta källan till strömningens utseende och förluster.

Storskaliga strukturer: I naturliga vattendrag förekommer ofta fasta hinder för det strömmande vattnet som skapar storskaliga virvlar och turbulens. Geologiska formationer, större stenar (boulders), vegetation/träd, o.s.v. påverkar lokalt strömningen kraftigt. Ur modelleringssynpunkt kan dessa strukturer utgöra en utmaning vad gäller hur denna påverkan skall representeras. För fisk och andra organismer är dessa strukturer ofta viktiga, då de skapar en variation i strömningens bild som kan användas vid vandring, födosök, m.m.

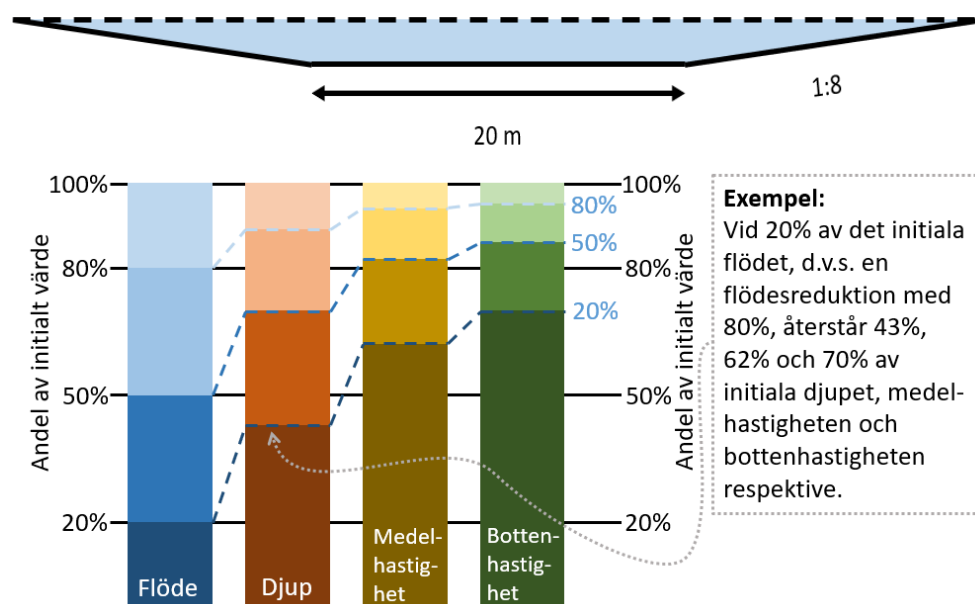
Naturliga vattendrag har nästan alltid en bredd i vattenlinjen som är mycket större än djupet. Ofta är också bottenlutningen in mot stränderna flacka, vilket för mer avancerade matematiska modeller kan skapa svårigheter att dela upp flödesdomänen i delvolymmer som inte blir alltför långsmala.

Dynamiken i ett rinnande vattendrag

I vattendrag sker kontinuerliga flödesförändringar, såväl i reglerade som i naturliga. Den resulterande responsen på många strömningssparametrar som djup, medelhastighet och bottenhastighet är generellt sett avsevärt mindre än förändringen i flödet. Då detta är en viktig egenskap i reglerade vattendrag ges ett exempel nedan.

Exempel: En relativt rak vattendragsträcka med flacka stränder och plan botten kan t.ex. ha ett tvärsnitt som liknar det i Figur 38 nedan. Förutsatt att vattendraget inte är överdämt så råder på merparten av sträckan ett jämviktstillstånd mellan gravitationens verkan i bottenlutningens riktning och strömningens "friktion" mot botten. Initialt antas ett djup av 2 m och 70 m³/s flöde i vattendraget. Figur 38 visar i vilken takt djup, medelhastighet och bottenhastighet reduceras när flödet minskas (*tekniskt: den s.k. Mannings ekvation med antagande om likformighet, d.v.s. fullt utbildad strömning, har använts i beräkningen*).

"Bottenhastighet" är en relativt oprecis benämning. Här används den s.k. friktionshastigheten som är en hastighet som definierar de hydrauliska bottenförhållandena i ett strömmande vattendrag. I praktiken för t.ex. en stenpås så är det en hastighet som råder en bra bit ner mellan de enskilda stenarna (*tekniskt: vid ca 5% av råhetshöjden*). Högre upp, mot krönet på de enskilda råhetselementen ("stenarna") är hastigheten drygt 8 gånger större än denna friktionshastighet. De förhållanden som visas av den gröna stapeln i Figur 38 är giltig oavsett vilken definition av bottenhastigheten man väljer att använda sig av.



Figur 1. Hur ett minskat flöde resulterar i en reduktion i djup, medelhastighet och bottenhastighet (s.k. friktionshastighet) för ett vattendrag i jämvikt, med ett trapetsformat tvärsnitt med bottenbredden 20 m och släntlutningarna 1:8.

Tabell 5 nedan visar resultaten i Figur 38 i siffror.

Tabell 1. Diagrammet i Figur 29 för 20%, 50% och 80% av initialt flöde.

Djup, medelhastighet och bottenhastighet (i % av initialt värde)	Andel av initialt flöde (Q)		
	80% av Q	50% av Q	20% av Q
Djup	89%	70%	43%
Medelhastighet	94%	82%	62%
Bottenhastighet	95%	86%	70%

Det kan vid en första anblick verka förvånande att t.ex. en reduktion av flödet med 80% (d.v.s. 20% av det initiala flödet återstår) fortfarande behåller 43% av ursprungligt djup, 62% av medelhastigheten och hela 70% av bottenhastigheten. Till skillnad från slutna system (t.ex. rörsystem) så fördelas flödesförändringar i ett vattendrag såväl på en förändrad tvärsnittsarea som en förändrad hastighet. Tillsammans "delar" area och hastighet på förändringen, vilket gör den resulterande enskilda påverkan på parametrarna betydligt mindre.

Denna enkla analys är förstås bara ett exempel men är representativ i sina storleksordningar. Andra tvärsnitt ger något andra värden, men storleksordningen är ofta liknande. Vid dämmande förhållanden gäller förstås inte dessa relationer, då merparten av djupet behålls vid dämning och hastigheterna sjunker nära linjärt med flödet. För strömsträckor, som ur biotopsynpunkt ofta är intressanta, så är dock beräkningen fullt relevant.

Ovanstående exempel gäller för ett vattendrag i jämvikt. Vid flödesförändringar, exempelvis regleringar, läggs en dynamik till strömningsbilden. Här är viktigt att förstå att vattendraget har en egen dynamik som ibland skiljer sig väsentligt från dynamiken i tappning eller produktion invid kraftverket. Vattendrag har en inneboende dämpande verkan på flödesförändringar i till- eller frånflödet (uppströms eller nedströms regleringsanordning). Den initiala responsen till en förändring i till/frånflödet är visserligen relativt snabb. Responsen minskar dock allt mer med tiden och den gradvisa anpassningen till förändringen ger därför ett utdraget förlopp. Tidsskalan på förändringen är beroende på vattendragets beskaffenhet och avstånd från reglerpunkten. Stora vattenvolymer i vattendraget kan göra förloppet mycket utdraget. Det är alltså viktigt att förstå dynamiken i ett vattendrag vid en analys av konsekvensen av reglering.

Här bör påpekas att svenska älvar har generellt sett en mer utdragen dynamik i jämförelse med floder i många av andra ledande vattenkraftsländer. Svensk geologi ger merparten av vattendragen en flackare lutning än i de mer bergiga regioner representativt för t.ex. Norge och alpländerna. Detta gör responsen till flödesförändringar generellt mer utdragen i svenska vattendrag.

Metodik för hydrauliska modeller

Det finns idag en stor mängd matematiska modeller som på olika sätt används för strömning i vattendrag och för konstruktioner i och i anslutning till fiskpassagelösningar. Många gånger är dessa till stor hjälp i val av designlösningar, bedömning av åtgärdsförslag, konsekvensanalyser, m.m. I avsnitt nedan (Guidande tabellsammanfattning) finns en enkel guide som hjälper läsaren att sortera modellverktygen utifrån den frågeställning man är intresserad av.

Matematisk modellering är dock inte det enda eller alltid det bästa verktyget i verktygslådan. Det finns fler. Några är:

Fältmätningar: Skall man modellera strömningsbild bör man börja med att samla information om situationen i fält (ofta mätningar). Indata som flöden, batymetri (bottentopografi) och vattennivåer behövs för att sätta upp och kalibrera en modell. I vissa frågeställningar kan fältmätningar i sig vara ett tillräckligt verktyg. En modell är oftast en grov uppskattning av prototypen (verkligheten). Ett modellerat "nuläge" (d.v.s. innan planerad åtgärd) kan således aldrig återge verkligheten så bra som prototypen själv. Att använda modellering för att bestämma "nuläget" är främst rationellt om syftet är att kalibrera en modell för en mer omfattande förändring i strömningsbilden. En modell kan också vara motiverad om data spridd över en stor area behövs för nulägesbilden, då fältarbete kan vara tidskrävande och förenat med begränsningar vad gäller tillgänglighet, väder, personsäkerhet, m.m. Vid nyanläggning av en fiskväg måste man förstås helt förlita sig på en bedömning utan mätning vad gäller dess hydraulik. Idrifttagning med mätning vid färdigställandet är då ofta den kvalitetssäkring som sker.

Fältförsök: Kan man med relativt enkla medel efterlikna en önskad flödesbild direkt i fält? Är detta möjligt är fördelen att det är verkligheten som "modelleras", d.v.s. fel på grund av modellval, skalningseffekter, numerisk lösare m.m. kan helt undvikas och behoven att i detalj kartlägga batymetri, råhet (skrovlighet på botten), strömningsbild, m.m. kan i stor utsträckning undvikas. Ett exempel är utformning av lockvatten: pumpning i fält kan ge svar på såväl inverkan i huvudströmmen som attraktionsvärdet med lämplig utrustning och mätteknik. Ett annat exempel som är relativt lätt att genomföra är provspill i torrfåror och andra vattenvägar. För att undvika onödigt produktionsbortfall bör dock detta planeras in väl, för att sammanfalla med planerade spill eller säsonger med hög tillrinning. "Verkligheten" i fält ställer dock höga krav på mätutrustning, osäkerhet i mätning och introducerar svårstyrda och till delar okända yttre förhållanden (väder, oavsiktlig påverkan av annan aktivitet, m.m.).

"Handräkning": Denna lite förenklade benämning avser de enklare överslagsberäkningar och generella samband som kan göras utifrån den

samlade erfarenheten inom vattenbyggnadshydraulik. Här avses ingen modellering utan skattningar som kan göras ”back of an envelope”, eller i alla fall med hjälp av enkla verktyg som t.ex. Excel. I vetenskapslitteraturen finns ett stort antal studier publicerade på generaliserade samband (dimensionslösa grundfall) framtagna för många olika typer av generiska strömningssituationer. Ett exempel är hur man utifrån en ythastighet skattar vilken storlek på botten-substratet som är stabilt, d.v.s. är av tillräcklig storlek för att ej eroderas bort (*tekniskt uttryckt: Beräknas m.h.a. Shields klassiska samband, log-lagen och den s.k. skärspänningskvoten för att kompensera för slänt/bottenlutning*). Ett annat typiskt exempel där denna form av semiempiriska samband är mer lämpad än strömningssmodellering är s.k. blockramper (litteratursök på ”block ramp” eller ”rock ramp”).

Fysiska modeller: Ett alternativ till matematisk modellering kan vara fysiska modeller. Detta kommenteras ytterligare i avsnitt nedan (Fysiska modeller).

Den hydrauliska modelleringen bör anpassas till den aktuella anläggningens storlek och betydelse. Omfattande modelleringsarbete är inte rimligt för många små kraftverk. Hydraulisk modellering utgör också i grunden ett komplement till en biologisk bedömning. I vissa fall kanske den senare kan vara tillräcklig i ett projekteringsskede, utan någon egentlig hydraulisk modellering.

Underlag och val av modellverktyg

Att modellera ett vattendrag eller detaljer i anslutning till en fiskpassage inbegriper oftast geometri (terräng/batymetri) som är komplex, stora dimensioner och höga flöden som är svåra att mäta med hög noggrannhet. Oavsett modell så utgör dock just detta, batymetri, bottenbeskaffenhet, flöden och nivåer grunddata till en modell. För trovärdigheten i ett modellerat resultat är dessa grunddata avgörande, i de flesta fall viktigare än vilket verktyg som väljs för modelleringen. Dessa grunddata måste därför finnas tillgängliga när modellen sätts upp, men även för att validera resultaten. Behöver modellen kalibreras, d.v.s. en eller flera parametrar anpassas till ett känt tillståndssamband (oftast djup mot vattenföring) så bör helst ett kompletterande oberoende underlag finnas för validering av modellen.

Underlaget för en modellering är som nämnts viktigt. Moderna batymetriska mätningar ger ett mycket detaljerat underlag vilket är bra ur kvalitetssynpunkt. Detta avspeglas ofta som hög detaljeringsgrad i modelleringen, t.ex. i 3D matematiska eller fysiska modeller. Detta ger en större visuell upplevelse av modellen som ”välgjord”. Så kan också vara fallet, men en modellering med hög detaljeringsgrad i batymetrin garanterar inte i sig ett bra resultat. En välavvägd modell disponerar resurserna (budget, ansträngning, m.m.) på de delar som ger bäst resultat. Hög upplösning är inte alltid rätt prioritering här.

Rekommendation: Prioritera resurser till kvalitativa indata till en modellering (oavsett verktyg), vilket inte sällan innebär mätning i fält av batymetri, flöde och nivåer.

Vilket verktyg (olika koder eller fysisk modell) man sedan väljer bör ske utifrån vilka frågeställningar som behöver besvaras. En mer avancerad matematisk modell (se senare avsnitt: 3D-modeller) eller fysisk skalmodell är förhållandevis generella och genererar stora mängder data men ger inte alltid det bästa resultatet. Enklare modeller har ofta ett större inslag av empiriska samband, d.v.s. erfarenhetsmässiga anpassningar och är ofta ”frikostigare” vad gäller möjligheten att göra kalibreringar med direkt påverkan på resultatet. T.ex. kan bromsverkan av bropelare eller vattensprång (se tidigare avsnitt: Flödestillstånd) oftast representeras med tillräcklig noggrannhet med semi-empiriska samband i enkla modeller, medan mer avancerad modellering (CFD eller fysisk modell) kräver större ansträngning (CPU respektive skala) för samma noggrannhet.

Oavsett modellval så är det ”bara” de hydrauliska förhållandena som modelleras. Effektiva fiskpassager omfattar också fiskens beteende och dess preferenser. Dessa är sällan del i de modellverktyg som används. Främst i forskningssammanhang finns dock vissa ansatser och ett växande intresse att koppla beteende och preferenser hos fisk till strömningstekniska parametrar. Dessa s.k. IBM-modeller (Individual Based Models) är dock utanför omfattningen i detta modelleringsavsnitt.

Rekommendation: Anpassa verktyget efter frågeställningen, d.v.s. välj inte mer komplexitet i modellerandet än nödvändigt.

Nedan går översiktligt igenom de olika verktygen, dess fördelar och begränsningar.

Matematisk modellering

De rörelselagar (ekvationer) som styr strömmade vatten är kända sedan mitten av 1800-talet. Komplexiteten i dessa gör dock att även idag är det endast strömningssproblem med mycket begränsad utsträckning och turbulens som kan lösas utan förenklande antaganden med tillhörande felkällor. Utmärkande för vattendrag är stora dimensioner och alltid turbulent strömning med virvlar i många storlekar. Därför måste olika modeller av fysiken användas, d.v.s. olika metoder att genom ett förenklat angreppssätt försöka beskriva vattnets rörelse. Här finns ett stort antal modeller att välja mellan. I praktiken bygger alla som används för vattendrag på att turbulenta rörelser filtreras bort och endast medelströmmens rörelser simuleras. Inflytandet av turbulensen, som står för den primära bromsverkan i strömningen, måste förstås ändå representeras i medelströmmens ekvationer. Beroende på applikation så har modellerna för turbulensen olika komplexitet. I de enklaste 1D/2D-koderna är ofta all

inverkan av turbulensen inbakad i en enda förlustkoefficient som bromsar rörelsen hos medelströmmen. Mer avancerade koder har möjlighet att lösa s.k. transportekvationer för turbulensen, dock sällan mer än två för vattendrags-tillämpningar för att begränsa beräkningsarbetet. En annan vanlig förenkling är att integrera de styrande rörelseekvationerna över en eller två dimensioner. I nedan avsnitt om 1D och 2D modeller berörs detta ytterligare.

Kvalitet och trovärdighet

Matematisk strömningsmodellering har ett stort antal tillämpningar. I etablerade industritillämpningar eller i granskade forskningsarbeten ställs krav på kvalitet och trovärdighet (Quality and Trust). Verktyn för detta är verifiering och validering (V&V) som är benämningen som ofta används.

Kvalitet avser här själva koden och hur väl den numeriska lösningen speglar de ekvationer man avser lösa. För olika branscher finns här utvecklade så kallade "Best Practice Guidelines" (BPG), som i huvudsak fokuserar på "Quality", d.v.s. verifiering av att lösningen speglar den uppsättning ekvationer man avser lösa. Ett generellt och europeiskt initiativ är Ercoftacs BPG (Casey and Wintergerste, 2000) som är etablerat och ofta använt för CFD-modeller (se senare avsnitt: 3D-modeller). Att lösningen är oberoende av s.k. nätfinhet ("rumslig upplösning"), att lösningskonvergens erhållits för relevanta storheter och att eventuellt tidssteg är anpassat till numerisk algoritm och ingående fysik är exempel på kvalitetskrav som ställs, liksom en komplett redovisning av antaganden och använda samband och variabler.

"Trust" eller trovärdighet fokuserar på den andra källan till fel vid matematisk modellering: fel beroende på felaktiga eller olämpliga modellantaganden. Eller konkret: kan modellerna i den kod man valt ge användbara resultat för den tillämpning man avser använda den till? Validering av modelleringen är en del av kvalitetssäkringen vad gäller "trust" (se tidigare avsnitt: Fältmätningar). Att validering är viktigt även i dessa tillämpningar framgår tydligt i Rao *et al* (2017). Här testas flera av de vanligaste 1D, 2D och 3D-koder på ett enkelt vattensprång med stor osäkerhet och spridning i resultaten. Vattensprång är vanligt förekommande i fiskpassager och strömsträckor, se tidigare avsnitt (Flödestillstånd).

Inga koder (program) för strömning i vattendrag, med tillhörande modellantaganden, är idag så bra att de kan leverera resultat med kvantifierbar osäkerhet utan denna typ av kvalitetssäkring. Kvalitet har dock ett pris: mer omfattande underlag och beräkningsarbete. Vill man ha kvantifierbara resultat är dock detta en nödvändighet.

Behöver kvalitetssäkring alltid genomföras? Även mer osäkra (kvalitativa) resultat kan vara användbara så länge man är medveten om bristerna. Ofta är trender riktiga, d.v.s. alternativa scenarier kan jämföras m.a.p. vilket som ger bäst resultat. Med viss erfarenhet av den specifika koden och gjorda modellantaganden kan man också ibland göra ett antagande om en lösning är konservativ ("på säkra sidan") eller inte. Att göra en känslighetsanalys, d.v.s. beroendet av olika parameterval, ger också information som kan öka trovärdigheten. Genomförandet av en åtgärd i samband med fiskpassager innebär också oftast arbete i naturlig terräng där de lokala förutsättningarna (tillgänglighet, schaktmöjligheter, berggrund, stenmaterial, m.m.) inte alltid kan genomföras i alla dess delar exakt enligt resultat från en modellering. Här kan robusta lösningar som har marginal att klara osäkerheter vara att föredra, hellre än en kvalitetssäkrad lösning som är känslig för avvikelser i yttre förhållanden. För åtgärder i små vattendrag kan fullskalig modellering också utgöra en oproportionerligt stor insats (kostnad).

Vilken kvalitetssäkring man väljer är till stor del en ekonomisk avvägning. Osäkerhet kostar i form av marginaler. Det kan vara motiverat att acceptera en större osäkerhet om kostnaderna för att sänka den överstiger de för att istället arbeta med marginaler tillräckliga för att vara "på säkra sidan".

Rekommendation: kvalitetssäkra resultaten vad gäller kod/numerisk lösning samt modellantaganden för att erhålla trovärdiga kvantifierbara resultat av modelleringen. I vissa fall kan även mer kvalitativa studier (utan fullvärdig verifiering/validering) vara ett alternativ. Som utförare eller beställare av en matematisk modellering bör man som ett minimum säkerställa att det framgår hur kvalitet och trovärdighet (verifiering och validering) hanterats och bedömts i resultatredovisningen. Har kalibrering/validering utförts skall utfallet av detta redovisas.

1D modeller

För längre sträckor i ett vattendrag, många km och däröver, är det oftast ett gott val att använda sig av 1D-modellering, speciellt om man vill fånga transienta förlopp (föränderliga i tiden), t.ex. vid korttidsreglering. Fysiken är här medelvärdesbildad i vattendragets tvärsnitt och grova (men användbara) förenklingar vad gäller t.ex. laterala och vertikala processer är gjorda. Kvar blir de s.k. 1D Saint-Venant's ekvationer som i dess kompletta form också benämns "dynamic wave" ekvationer. I vissa koder finns det optioner för "reducerade ekvationer" (diffusive och kinematic wave) som då har en något mer begränsad applicerbarhet.

1D modeller ger främst hydrauliska samband mellan flöde och nivå (se exempel Figur 39). Utifrån dessa kan medelvärden på hastighet,

bottenskjuvspänning och ett antal andra parametrar skattas. Någon lateral¹ eller vertikal variation i tvärsnittet finns inte i modelleringsresultaten. Det finns dock metoder att grovt uppskatta dessa även om det inte normalt är rutiner i de flesta 1D-koder. Många av de vanligaste 1D-verktygen har dock möjlighet att skilja på "main channel" och "flood plains" via s.k. "compound channel methods" som ger en viss lateral variation i parametrarna.

Utifrån en given batymetri och flöde finns det normalt bara en parameter att kalibrera beräkningen emot, råhetsparametern. I de flesta modeller är detta det s.k. Mannings tal. Denna enkla parameter anger styrkan på de skjuvkrafter vattendragets botten utsätts för vid en viss medelhastighet, utifrån en beskrivning av "skrovligheten" hos botten. Att grovt skatta Manningstalet kan därför göras utifrån t.ex. en beskrivning av hur stenig botten är. Nästan "allt" ses ibland inkluderas i Manningstalet, även inverkan av vegetation, vattendragets krökar, m.m. I sin enkelhet är detta sätt att beskriva förluster i ett vattendrag väl anpassat till såväl 1D som 2D beräkningar. Det finns också framtagna relationer mellan bottensubstratets storlek (t.ex. kornstorleksmedianen D_{50}) och Mannings tal. Dessa är dock flera till antalet och ger lite olika och spretiga resultat. Mannings tal (och tillhörande ekvation) finns beskriven i alla textböcker inom vattenbyggnadshydraulik ("open channel flow") eller på nätet (sök t.ex. på "Manning roughness coefficient"). För en ovan användare finns det dock några fallgropar man bör undvika:

- Mannings tal är inte en dimensionslös parameter. För det oftast använda internationella Manningstalet n är dimensionen [$s \times m^{-1/3}$]. Det betyder att i litteratur och andra källor med brittiska enheten [$s \times ft^{-1/3}$] måste värdet av n konverteras till SI-enheter (omvandlingsfaktor 1,49).
- I Sverige används fortfarande ibland en äldre svensk/(nord) europeisk praxis att använda ett inverterat värde på Mannings tal ($M=1/n$), ibland benämnt Stricklers tal. De är dock svåra att förväxla då vårt svenska M sällan är under 10 och $n < 1$.
- För grunda steniga vatten gäller inte konventionella tabellerade värden på Mannings tal. Råheten i vattendraget ökar när det relativa djupet ("relative submergence") minskar. Lågt relativt djup definierar Powell (2014) när djupet är under 4 gånger bottenstrukturens D_{84} (större stenars diameter²). Powell (2014) ger en bra överblick inom området.

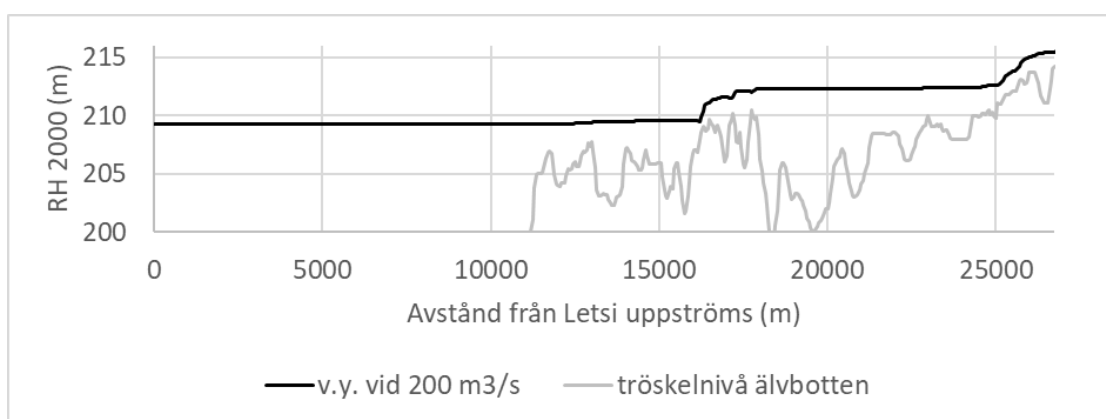
Urvalet av programvaror för 1D-modeller är stort och finns i såväl licensskyddade paket som i gratis freeware. Ett exempel på den senare

¹ vinkelrätt mot strömningsriktningen

² D_{84} är den korndiameter i ett jordmaterials siktkurva vars kumulativa massa till 84% har en mindre diameter.

kategorin är HEC-RAS men licensknutna programpaket är också ofta förekommande.

Rekommendation: 1D-modeller är effektiva verktyg för att beskriva förhållandet mellan djup och flöde längs ett vattendrag. Andra hydrauliska parametrar kan skattas, dock endast som medelvärden över tvärsnittet oftast. Med kalibrering är 1D-modeller det rätta valet om dessa hydrauliska data är tillräckligt. För mer komplex strömning, t.ex. i en fiskväg, är 1D oftast inte rätt verktyg.



Figur 2. Exempel på resultat från en 1D-simulering. Här sträckan Akkats – Letsi (Luleälven). Stationär beräkning i HEC-RAS (efter Anders G. Andersson, LTU). Vertikal axel är nivå i höjdsystemet RH 2000.

Många programpaket för 1D har olika tilläggs paket för angränsande frågeställningar främst i vattendrag: sedimenttransport, temperatur, förorenings spridning, isbildning, etc. Många har också optionen att arbeta i 2D (t.o.m. 3D) och har vissa gränssnitt mellan dessa olika nivåer.

2D modeller

Två-dimensionella modeller är likt 1D oftast baserad på djupintegrerade ekvationer enligt Saint-Venant. Den stora fördelen jämfört med 1D är att även den laterala fördelningen av strömnings bilden erhålls i resultaten. Nackdelen är främst att 2D är mer beräkningskrävande än 1D. När strömnings hastigheter är viktigt, har 1D-modeller begränsningar och 2D är att föredra. Många kriterier för organismers livsmiljöer inkluderar såväl djup som hastighet.

För strömning utan abrupta variationer i vertikal led är 2D ett utmärkt verktyg. Sådana tillstånd råder ofta på naturliga sträckor i ett vattendrag. Nära turbinlopp, utskov eller mynnande lockvatten kan dock 2D vara otillräckligt för att beskriva strömnings bilden på ett användbart sätt. Själva fiskpassagen kan också vara mindre lämplig att beskriva i 2D. Speciellt gäller detta s.k.

tekniska fiskvägar med vertikala väggar, strukturer i djupled och kraftigt avlänkad strömning.

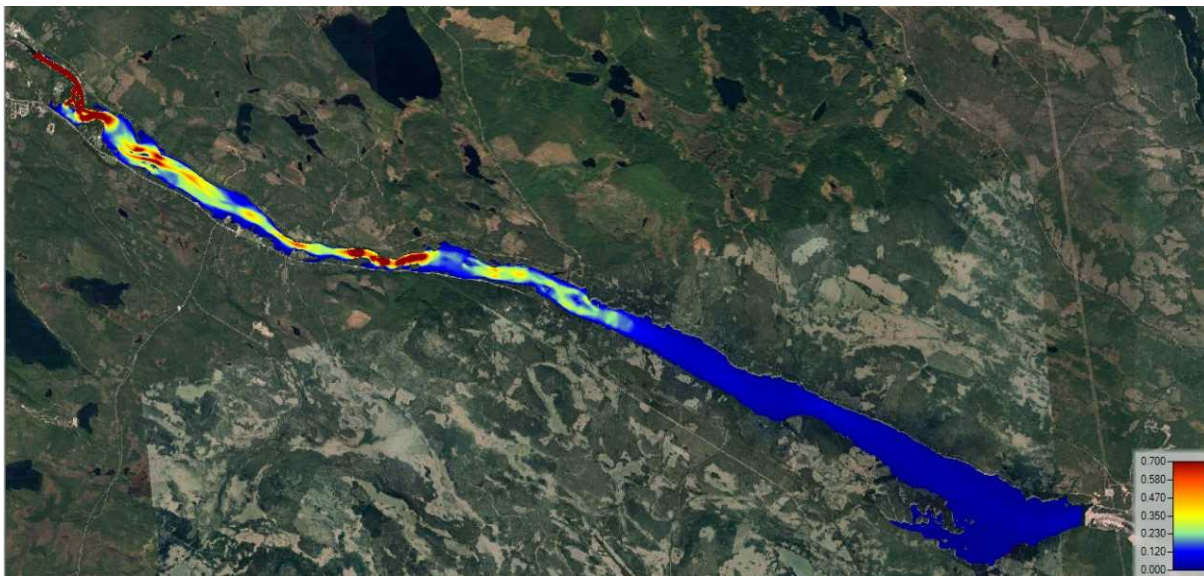
Sekundärströmmar och andra variationer i vertikalled är processer som inte beskrivs i en uppsättning 2D rörelseekvationer. Det finns dock 2D-koder där delar av dessa vertikala processer rekonstrueras baserat på grundantaganden om vertikal fördelning m.m.

Liksom för 1D-koder finns det ett antal 2D-koder, såväl licensknutna som gratis att använda. Likt 1D är grunden för förlustberäkningar ("bottenfriktionen") baserad på en beskrivning av botten beskaffenhet, oftast i form av ett Manningstal (se tidigare avsnitt: 1D modeller). En skillnad från 1D är dock att råheten (bottens "skrovlighet") inte kan (eller behöver) vara lika "generös" i att inkludera delar av terrängen, såsom t.ex. vattendragets krökar.

Kalibrerade så ger 2D-modeller ofta en hygglig fördelning av hastigheterna om inte batymetrin är allt för komplicerad (se exempel Figur 40). Kalibrering sker som för 1D oftast endast m.h.a. flöde och nivåer. Det är en fördel om även hastighetsmätningar används i kalibreringen. Mätinsatsen för detta är dock ofta komplex och kräver mer mätutrustning, t.ex. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Tekniken att bestämma ythastighet från flytande "tracers" med bildanalys är f.n. på frammarsch: s.k. "Particle Tracking Velocimetry" (PTV). Utifrån ythastighet kan den vertikala medelhastigheten ofta grovt skattas, normalt som 80–85% av ythastigheten (*Tekniskt: se "depth-averaged to surface velocity ratio", t.ex. i Hauet et al, 2018*).

En del 2D-modeller (t.ex. i open-source koderna Delft3D och Telemac-2D) har en mer avancerad hantering av turbulenta kvantiteter och därmed också modelleringen av den viktiga förlusttermen ("bottenfriktionen"). Förutom en bättre beskrivning av turbulent hastighets- och längdskala så kan det ge mer rättvisande strömningsbild i vissa fall (t.ex. nära en vertikal vägg). Mannings råhetsparameter är dock oftast den "kalibrerbara" parametern även i dessa mer avancerade modeller. Många modeller har också moduler som tillägg, som kan hantera sedimenttransport, föroreningsspredning, m.m.

Rekommendation: Om 1D-modellering inte kan ge de svar som krävs vad gäller lateral fördelning av hastighet och andra parametrar är 2D ett bra val. 2D-modellering fungerar generellt väl i "naturlig terräng" men har begränsningar vad gäller vertikala processer och bör undvikas om terrängen har abrupta förändringar i djupled. För fiskbiotoper och fiskpassagelösningar så är hastigheter ofta viktiga. Generellt sett hanterar 2D hastighetsfördelning bättre än 1D.



Figur 3. 2D-modell av sträckan Akkats – Letsi i Luleälv med HEC-RAS. Färgkodning visar totalhastigheten djupintegrerat (m/s). Bilden från Anders G. Andersson, LTU.

3D-modeller

Med 3D-modeller avser man oftast s.k. CFD (Computational Fluid Dynamics) som bygger på de s.k. Reynolds ekvationer. Dessa har för att minska beräkningsbehovet matematiskt filtrerats i tiden, och därmed "släckt ut" alla turbulenta fluktuationer. Dessa måste därför återskapas i form av olika modeller beroende på frågeställning.

Ett antal CFD-koder finns att tillgå. OpenFOAM är en vanlig open-source kod. CFD-koder har oftast en mer generell fysikalisk modellbyggnad och kan därmed användas för många olika strömningsprocesser och tillämpningar. Med sin mer generella uppbyggnad kräver också CFD mer initierade val av randvillkor (t.ex. råhet), hantering av vattenytan, lösningsalgoritmer, turbulensmodeller, m.m. CFD är också betydligt mer beräkningskrävande än de flesta 1D/2D-modeller. Även om CFD har färre begränsningar vad gäller krav på geometri/batymetri m.m. så är det inte alltid så att CFD ger mer korrekta resultat än 1D/2D. För komplicerade geometrier eller krav på 3D-resultat avseende hastighetsfördelning och turbulens så är dock CFD ett utmärkt verktyg. För t.ex. inloppet till en fisktrappa eller strömningen vid en ledarm eller genom ett låglutade galler är CFD att föredra (se exempel på CFD-modellering i Figur 41).

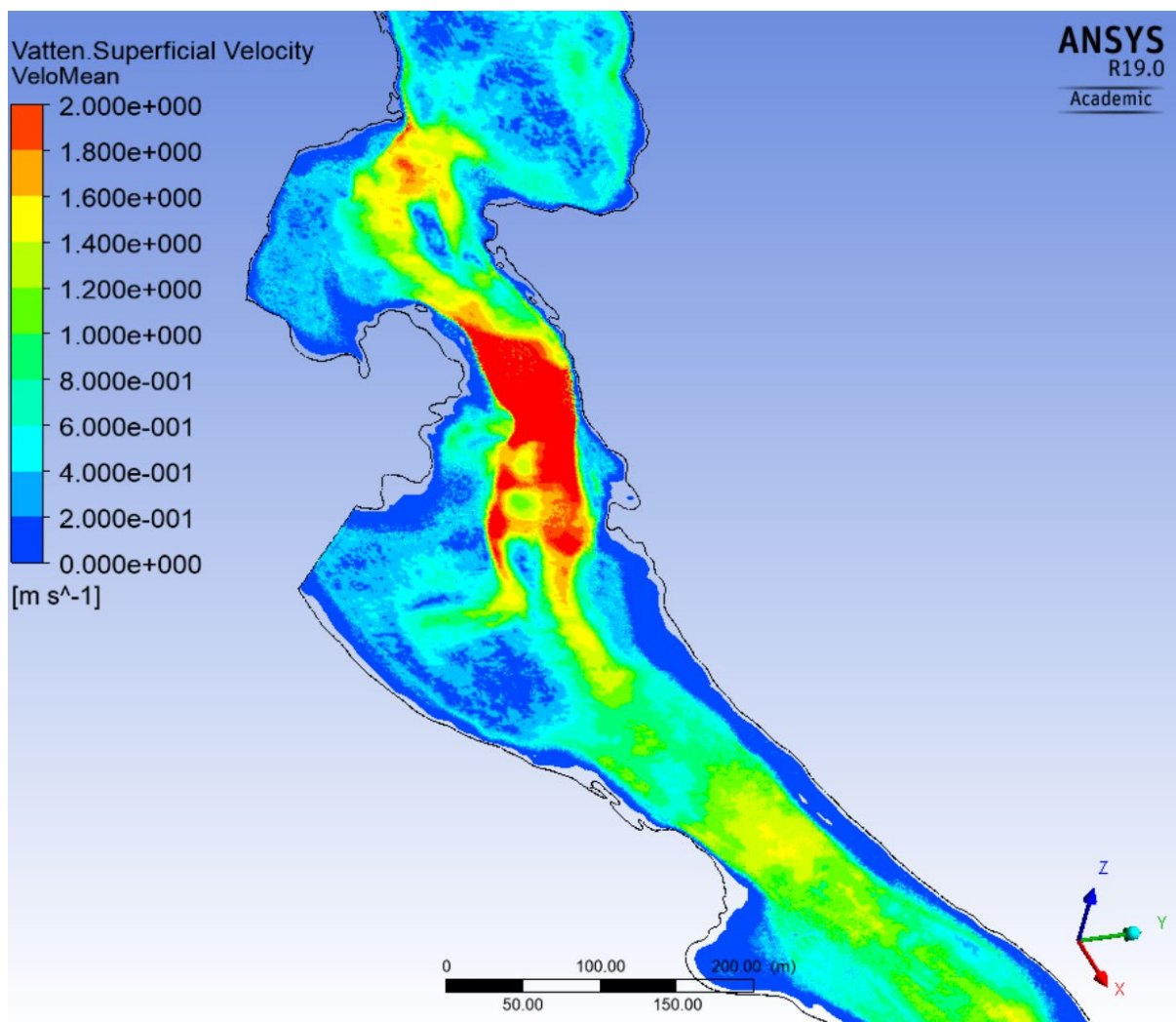
Alla verktyg kräver kompetens (erforderlig teori och erfarenhet) för att producera användbara resultat. CFD får dock sägas kräva mer än t.ex. 1D/2D såväl vad gäller nätgenerering, randvillkor, modellval (många alternativ i en CFD-kod), numerisk lösare och kvalitetskontroll. Inte sällan är det specialister med vana från andra applikationer som anlitas för att också applicera CFD på vattendrag. Här är därför viktigt att som beställare av CFD-beräkningar

försäkra sig om att vattendrag i sammanhanget karaktäristiska och viktiga egenskaper (t.ex. storskalig och stokastisk råhet och förekomsten av vattensprång) förstås av utföraren. Några av dessa nämns i första avsnittet (Strömning i vattendrag och fiskpassager).

De olika CFD-koderna som finns tillgängliga på marknaden har ofta lite olika styrkor och svagheter beroende på frågeställning. I praktiken innebär kodens uppbyggnad ofta en avvägning mellan användarvänlighet/användargränssnitt och flexibilitet/frihetsgrader i modelleringen. En generell standardmodell som levererar kvalitet för alla flödesfall existerar inte. Drömmen om "CFD with a touch of a button" är fortfarande en utopi och kommer så förbli under överskådlig tid.

Förutom CFD finns det liknande 3D-modeller vars uppbyggnad och metodik är besläktad med 2D (ofta inbyggd och valbar option mellan 2D och 3D). Förenklningar och modell-antaganden anpassade till förhållanden som ofta råder i vattendrag är här redan gjorda, vilket underlättar för användaren och ofta snabbar upp beräkningen. Tidigare nämnda Delft3D och Telemac är exempel på open-source koder i denna kategori. Enklare handhavande skall dock inte misstolkas som att generaliserbarhet eller tillämbaerhet ökat. Betydelsen av erfarenhet och kunnande inom strömningsmodellering för resultatens kvalitet är här fortfarande lika stor som i de mer avancerade och generella CFD-koderna.

Rekommendation: CFD är ett kraftfullt verktyg för komplicerade strömningssituationer, t.ex. i eller i anslutning till en fisktrappa eller liknande byggda strömningskonstruktioner. Även vid behov av detaljerade vertikala processer är CFD ofta att föredra. En erfaren CFD-resurs med bra beräkningskapacitet och "färdig geometri" kan relativt snabbt få fram ett resultat för ett grundfall (typiskt några dagar till en vecka). Kvalitetssäkring adderar ytterligare tid till detta (några dagar). Vid stora frihetsgrader i geometrisk/batymetrisk utformning är CFD mindre lämpligt, då varje sådan förändring ofta kräver "omstart" från grunden (geometri→nät→beräkning).



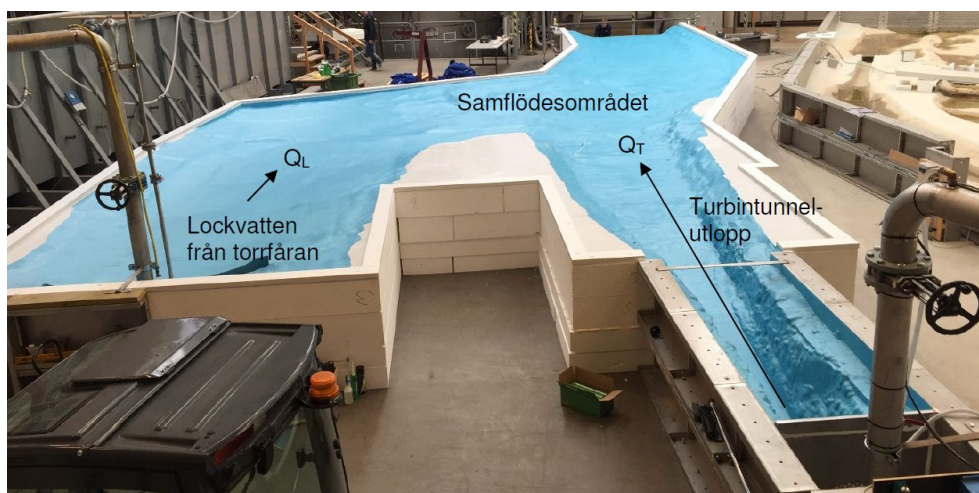
Figur 4. 3D CFD-modell av Mattisudden: ca 1 km älvsträcka mellan Akkat och Letsi i Luleälven. Total ythastighet beräknad med ANSYS CFX (Hedberg, 2018).

Fysiska modeller

Rätt dimensionerad och byggd är en fysisk modell en skalmodell av verkligheten. Normalt krävs en skala på ca 1:50 för att producera kvalitativa resultat i en fysisk modell m.a.p. strömningsbilden för att upprätthålla tillräckligt turbulenta förhållanden. En fysisk modell är dock utrymmeskrävande (Figur 42). En sträcka i ett vattendrag på 1 km upptar ca 25 m längd (med inlopp och utlopp) och ca 120–150 m² golvyta. I denna skala motsvarar en vattenföring på 300 m³/s ett skalat flöde av 17 l/s (*tekniskt: homolog modell skalad enligt Froudes, för detaljer se lämplig textbok i Hydraulic Engineering*).

En fysisk modell har en högre initialkostnad än en matematisk modell men är betydligt mer rationell att göra förändringar i, att snabbt testa olika scenarier och modifieringar av batymetrin. Det kan därför vara rationellt med

en fysisk modell även ur kostnadssynpunkt om frihetsgraderna i ett designarbete av t.ex. en fiskväg är många. En fysisk modell har också fördelen att man som lekman (vad gäller hydraulisk modellering) kan delta i modellerandet handgripligen (själv påverka strömningen med enkla medel). En fysisk modell är därmed ett mycket användbart kommunikativt verktyg till olika intressenter och ger en ökad förståelse för den hydrauliska frågeställningens möjligheter och begränsningar.



Figur 5. Fysisk modell skala 1:50 av samflödesområdet Stornorrfors.

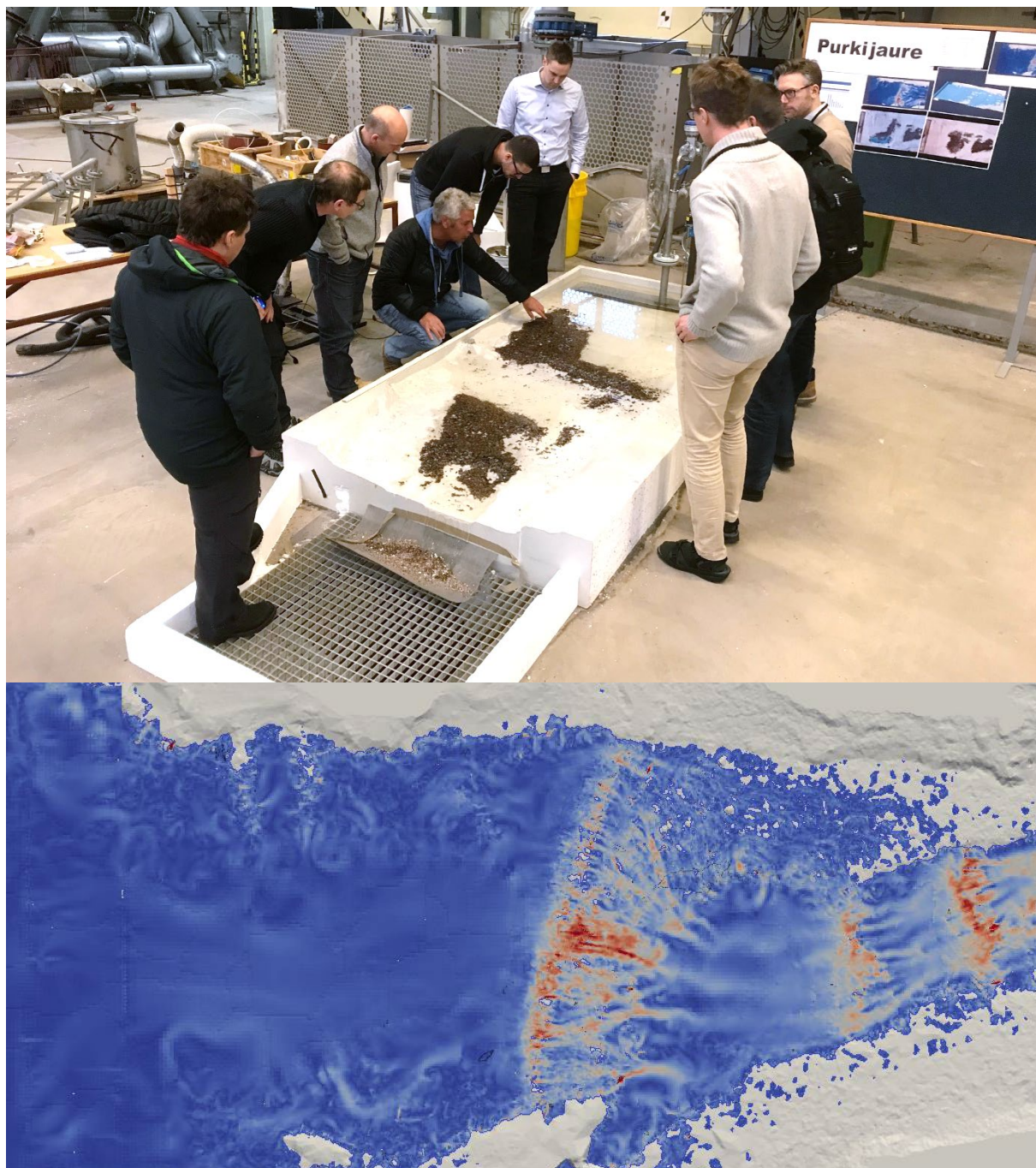
En fysisk modell har dock begränsningar. Den främsta är nämnda fysiska utrymmeskrav. Precis som matematisk modellering kräver den också ett bra underlag vad gäller batymetri och någon form av kvalitetskontroll i form av kalibrering mot ett känt nuläge. En fysisk modell saknar visserligen alla de "modellantaganden" som kan skapa problem i en matematisk modell men har egna felkällor. Skaleffekter är ett potentiellt problem i fysiska modeller. Detta är ett problem som helt saknas i matematisk modellteknik. Även skalan 1:50 är inte tillräcklig för låga hastigheter eller små dimensioner med resulterande problem med kvalitet i resultaten. Det är därför inte lämpligt att i samma fysiska modell försöka modellera såväl ett större vattendrag som en mindre fiskväg, t.ex. en fisktrappa. En 1,5 m bred trappa i prototyp ("verklig storlek") blir bara 3 cm bred i en 1:50 modell. För en sådan modell kan visserligen en rimlig noggrannhet fås av förhållandena i inlopp och utlopp (t.ex. utbredningen av lockvatten) men förhållandena i själva fiskvägen kan inte modelleras med någon större tillförlitlighet. De små dimensionerna i modellens fiskväg resulterar i helt annorlunda flöden än i prototyp (verklig skala). Mycket låga hastigheter i en fysisk modell bör också tolkas med försiktighet.

Skaleffekterna gör också att studier av sedimenttransport är svårtolkade i en fysisk modell. Stabiliteten hos bottensubstratet modelleras visserligen rätt väl, d.v.s. vilka stenfraktioner som motstår strömningens erosiva krafter. Själva transportförloppet av mobilt bottensubstrat (sediment) och dess eventuella deposition i bottenformationer är dock betydligt svårare att representera på ett korrekt sätt i en fysisk modell. Även s.k. transienta förlopp är också krävande

att modellera fysiskt, t.ex. snabba vattenståndsförändringar. Samspelet mellan den fysiska modellsträckan och resten av vattendraget måste då vara känt på modellens ränder (in- och utlopp). Modellen måste dessutom vara utrustad med snabb nivå/flödesreglering som kan efterlikna den verkliga transienten. Tidsskalan för processen i nämnd 1:50-skala blir då också 7 gånger snabbare än i verkligheten vilket är mycket komplicerat att åstadkomma.

Bortser man helt från skaleffekter kan man till låg kostnad bygga en kvalitativ modell av ett vattendrag i miniformat, typiskt 2–3 m lång, 4–5 m² yta. Skalningen bör då göras i s.k. förställd höjdskala, d.v.s. man överdriver den vertikala längden jämfört med den horisontella. En sådan modell rekommenderas inte som enda verktyg, men kan vara rationellt om frihetsgraderna i utformningen av batymetrin är många. Även ur kommunikations- och samrådssynpunkt är en sådan modell användbar då olika intressenter kan bjudas in att delta i utformningen. Resultaten är dock endast i bästa fall kvalitativa och bör alltid kombineras med en slutfas där en matematisk modellering eller analys genomförs, byggd på resultaten från den fysiska minimodellen (för exempel se Figur 43).

Fysisk modellering kan med fördel göras på viktiga komponenter och detaljer i t.ex. en fiskpassagelösning. Skalan väljs då så att kvaliteten i resultaten blir tillfredsställande. Även fullskala är då ibland möjligt, oftast med snäva gränser för modellområdet.



Figur 6. Minimodell av Purkijaure grunddamm. Upptill kvalitativ fysisk modell (skala 1:180 horisontellt, 1:60 vertikalt). Nertill CFD-modell byggd på minimodell (för att erhålla kvantitativa resultat).

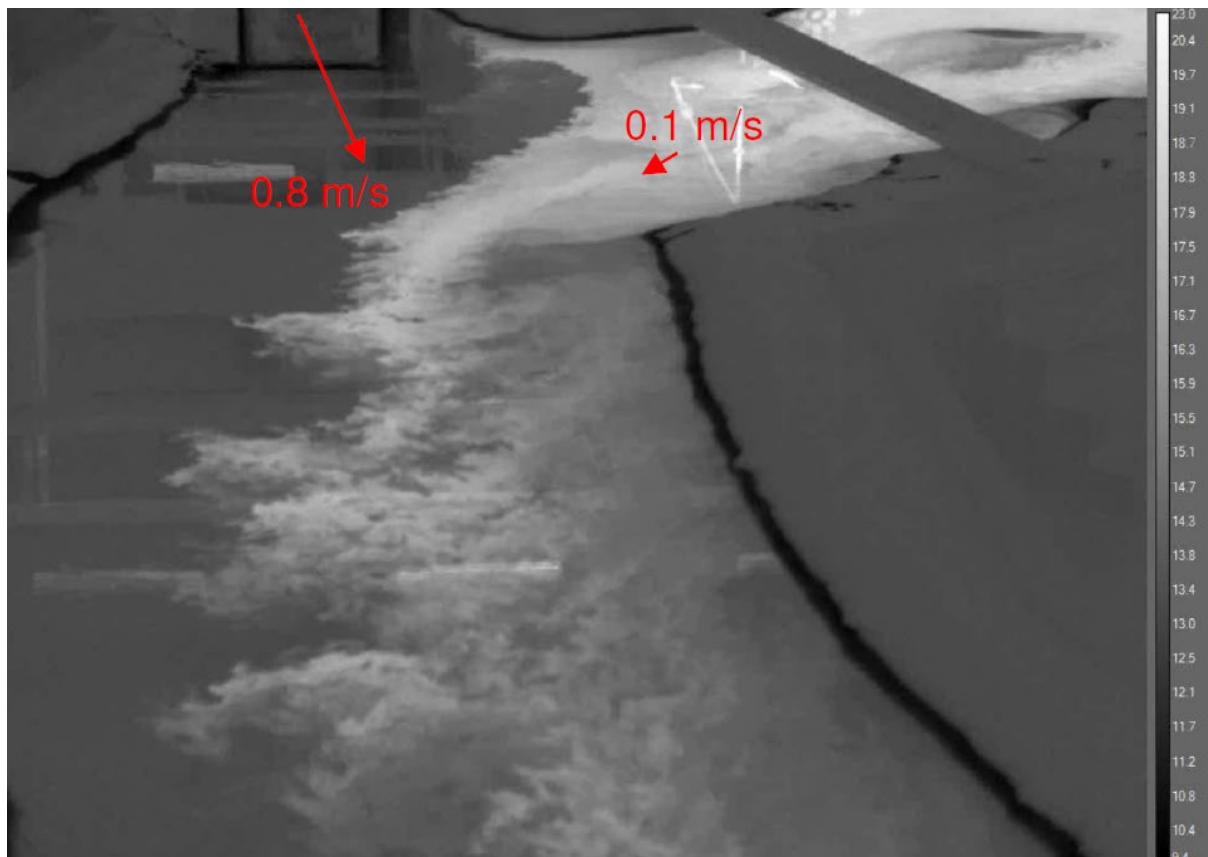
Lockvatten

För att anlockningen till en teknisk eller naturlig fiskväg skall fungera bra så måste inloppet vara såväl detekterbart som attraktivt för fisken. För uppströmsvandring till en fiskpassage är strömningen som associeras med fiskvägen en viktig parameter (om än inte den enda).

Då området nedströms ett kraftverk ofta är starkt påverkat av produktionsvattenförlingen så kan flödet i själva fiskvägen behöva kompletteras med tillförseln av ett större lockvattenflöde. Lockvatten kan sägas bestå av ett tillräckligt stort volymflöde med en hastighet som i konkurrens med strömmen från kraftverkets utlopp kan upptäckas av fisken. Volymflödet hos lockvattnet i kombination med hastigheten (typiskt 0,8–2 m/s enligt FAO, 2002 beroende på adresserade fiskarter) motsvarar en energinivå som är jämförbar med maximalt någon enstaka decimeter mätt som fallhöjd. Det är därför ur resurssynpunkt inte motiverat att använda vatten från uppströms magasin (typiskt tiotals meter fallhöjd) bara för lockvatten. Ofta finns vatten tillgängligt på nedströmssidan som utgör ett alternativ för volymflödet. Med en pump kan detta vatten accelereras upp till önskvärd hastighet. Ejektorer, d.v.s. höghastighetsstrålar som drar med sig lugnvatten, är ett effektivt sätt att åstadkomma lockvatten. Utformningen bör dock ske så att lockvattnet blir attraktivt för fisken.

Lockvattnet behöver oftast anpassas till de rådande strömförhållandena genererade av drivvattenförlingen i kraftverket. Olika simkapacitet, djuppreferens, m.m. gör att lockvatten för uppströmsvandring också behöver anpassas till de målarter som passagen skall attrahera. Förutom djup och volymflöde påverkar också lockvattenstrålens vinkel mot huvudströmmen, turbulenta kvantiteter (t.ex. energi och storlek hos virvlarna som skapas av lockvattnet), lockvattnets anslutning till fiskvägen, m.m. Det är förstås en stor fördel om fiskens rörelser i vattendraget är kända inför en introduktion av fiskväg och lockvatten. Att beskriva de lockvattenförhållanden som är gynnsamma för olika fiskarter är dock inte avsikten i detta kapitel. Däremot ges här en guide till vilka verktyg som är tillämpliga och tillgängliga.

Att modellera lockvatten görs bäst i 3D, förslagsvis med någon form av CFD. Lockvattnets tredimensionella karaktär och interaktion med medelflödet lämpar sig oftast inte att modelleras med djupintegrerade ekvationer (1D/2D). Med CFD fås också en uppfattning om turbulenta storheter som intensitet, längdskala, vorticitet, m.m. Det kan vara lockande att modellera stationärt (d.v.s. med resultaten medelvärdesbildade i tiden). En sådan simulering sparar datorkraft jämfört med en transient (tidsupplöst). Den ”sirapliktande” strömningsbild som ges med stationära beräkningar filtrerar dock bort den instabilitet med stora virvlar som skapas av lockvattenstrålen. Instabilitet i medelströmmen (t.ex. periodiska variationer som ofta sker när vattenflöden av olika hastighet blandas) kan till intensitet och storlek påverka fiskens vilja att gå mot fiskpassagen. Fysisk modell är också ett verktyg som fungerar för lockvatten. Här visualiseras lockvattenstrålen med ett färgämne eller med en värmekamera och olika temperatur på lockvatten och huvudflöde (Figur 44).



Figur 7. Värmekamera för att visualisera lockvatten. Stornorrfors samflödes-område som i Figur 42, men bild nedströms ifrån. Ljusare färg: flöde via gamla älvfåran, mörkare färg: vatten från turbiner.

Modellering är förknippat med kostnader som ibland inte kan motiveras. Modellering ger bara flödesbilden men inte information om fiskens preferenser. Om möjligt är det därför alltid en fördel om man kan göra försök i fält, d.v.s. utprova olika placeringar direkt på plats vid kraftverket. Detta är förstås inte heller en undersökningsmetod som passar en liten budget, då utrustning kan bli kostsam och omfattande uppföljning kan behöva göras.

I litteraturen finns ett stort antal vetenskapliga artiklar skrivna om "turbulent jets" och "junction flow" eller "channel junction" som berör frågan ur lite olika vinklar. Även om dessa ofta har tagits fram för förenklade geometrier och idealiserade förhållanden finns här viss information om penetration och omblandning för mindre flöden (som attraktionsflöden) som tillförs huvudflödet vid olika vinklar från sidan. Tyvärr finns inte detta idag sammanställt för just denna tillämpning på ett enkelt och tillgängligt sätt. Den klassiska textboken av Fisher (1979) kan dock utgöra en startpunkt för teorin på området vars upplägg och fokus ligger relativt nära den här avsedda tillämpningen.

Guidande tabellsammanfattning

I ett försök att sammanfatta avsnittet ”Metodik för hydrauliska modeller” har ett par tabeller tagits fram. Avsikten med dessa är att ge läsaren en första sorteringsgrund, eller guide, till vilket modelleringsverktyg som är bäst lämpad för olika frågeställningar. En sådan sammanställning blir inte rättvisande i alla förekommande situationer och är definitivt inte heltäckande. Förhoppningsvis kan den dock guida läsaren till att fördjupa sig i de delar som känns mest relevanta.

Tabell 6 nedan fokuserar på de olika modellverktygen som berörs: vilka typiska tillämpningar man vanligtvis använder dem till och där resultatet oftast blir bra. Även modellteknikernas vanligaste svagheter pekas ut.

Tabell 7 är ett försök att utifrån några olika flödessituationer som förekommer i vattendrag och fiskpassager ge en rekommendation om val av modellverktyg. Preferensen för olika verktyg är något olika för olika aktörer i frågan. Rekommendationen gör därför inte anspråk på att vara varken slutgiltig eller heltäckande.

Tabell 2. De olika modellverktygens användningsområden, styrkor och svagheter i sammanfattning.

Modellval	Typiskt vattendrag	Typiskt resultat	Största fördel	Största nackdel
1D matematisk	10 – 100 km, transienta flöden	Vattennivå/flöden	Enkel och snabb	Endast longitudinell variation. Ej för komplex geometri.
2D matematisk	2 – 20 km	Även hastighetsfördelning	Enkel och snabb men med lateral upplösning (tvärsnitt)	Ej för komplex geometri, speciellt ej i höjddled. Ej vertikal processer.
3D matematisk	1 m – 1 km	”all strömning”	Generell för de flesta situationer.	Tunga beräkningar men kan ge missvisande resultat utan validering
Fysisk skalmodell	1 m – 1 km	Nivåer, hastigheter, omblandning, m.m. (beror på instrumentering)	När väl byggd: enkel och snabb att testa scenarier i. Kommunikativ.	Utrymmeskrävande och initialkostnad. Skaleffekter ger begränsningar i tillämpning.
”Handräkning”	Lokalt	”all strömning”	Snabba överslag	Begränsningar i resultat och generaliserbarhet
Fältförsök	Lokalt	Beror på instrumentering	Test i ”verkligheten”	Begränsningar i genomförbarhet

Tabell 3. Rekommendation av modellval för några typiska strömningssituationer.

	Första val	Alternativt val
Reglering i vattendrag: förändringar i djup	1D-modell, fältförsök	Enklare beräkningar och överslag
Reglering mellan kraftverk: effekt på vattendraget som biotop	2D matematisk: ger såväl fördelning av djup som hastighet, fältförsök	1D med grova antaganden om hastighetsfördelning
Lokal biotop i vattendrag	Fältförsök, 3D matematisk eller fysisk modell	2D ger också användbara svar. Handräkning.
Lockvatten: placering och utformning	Fältförsök, 3D matematisk eller fysisk modell	Handräkning: kräver litteratursökning, 2D kan fungera under vissa förhållanden
Naturlik fiskväg	Designkriterier ur litteraturen, enklare beräkningar.	1D/2D men svårt om strömningsbild är komplicerad (stenig, vattensprång, m.m.)
Teknisk fiskväg	Ofta finns designkriterier: använd dem.	CFD, fysisk modell med liten/ingen skalning
Avledare, guidning av fisk (placering i vattendrag)	2D/3D beroende på frågeställning. Fysisk skalmodell.	Fältförsök om möjligt
Avledare, guidning av fisk (designdetaljer)	Finns designkriterier: använd dem.	Fysisk modell i liten/ingen skala, 3D matematisk. Försök med fisk?

Referenser

Casey, M. and Wintergerste, T. (editors), 2000, "ERCOFTAC SIG - Quality and Trust in Industrial CFD: Best Practice Guidelines". ERCOFTAC, 2000.

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

Fisher, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger & N.H. Brooks, 1979, "Mixing in inland and coastal waters", Academic Press, San Diego, USA.

Hauet, A., T. Morlot & L. Daubagnan, 2018, "Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers", 9th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2018), Lyon-Villeurbanne, France, Sept. 5-8.

Hedberg, M., 2018, "CFD simulations of Luleälven: An examination of CFD as a tool for evaluating restoration possibilities of regulated dredged rivers", Examensarbete, LTU. <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1260091/-FULLTEXT01.pdf>

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

Rao, P., T. V. Hromadka, C. Huxley, D. Souders, N. Jordan, C. C. Yen, E. Bristow, C. Biering, S. Horton & B. Espinosa, 2017, "Assessment of computer modeling accuracy in floodplain hydraulics", International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 37, No. 2, pp. 88-95, <http://dx.doi.org/10.1080/02286203.2016.1261218>