

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Digital tvilling av vattendrag skräddarsydd för att bedöma miljöpåverkan av reglering i vattenkraft	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Digital twin of a river stretch tailored to estimate environmental impact of short-term regulation in hydropower	
Universitet/högskola/företag Luleå tekniska universitet	Avdelning/institution Strömningslära och experimentell mekanik/Teknikvetenskap och matematik
Adress Luleå tekniska universitet, 97187 Luleå	
Namn på projektledare Anders Andersson	
Namn på ev övriga projektdeltagare Henrik Lycksam	
Nyckelord: 5-7 st Digitala tvillingar, hydraulisk modellering, CFD, miljöeffekter, korttidsreglering	

Förord

Projektet har finansierats av Energimyndigheten inom programmet för Hållbar Vattenkraft (HåVa) som syftar till att bidra till omställningen mot ett hållbart och förnybart energisystem genom forskning om och utveckling av tekniker, system, metoder och frågeställningar relaterade till vattenkraft.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Summary	2
Inledning/Bakgrund	2
Genomförande	5
Resultat	8
Diskussion.....	17
Publikationslista.....	18
Referenser, källor.....	18
Bilagor	19

Sammanfattning

Digitala metoder för älvmodellering kan vara kraftfulla verktyg för att beskriva de hydrauliska förutsättningarna i reglerade vattendrag. Dessa förutsättningar är av stort intresse för att bedöma till exempel miljöpåverkan av nuvarande och framtida produktionsscheman för vattenkraftverk. Hydrauliska modellverktyg kan ställas upp i olika skalor och med varierande grad av förenklingar av verkligheten. Här har modeller i 1D, 2D samt 3D av en kraftigt reglerad älvsträcka, Akkats till Letsi i Luleälven, använts för att beskriva strömningsförhållandena i samma älvsträcka för att utvärdera fördelar och nackdelar med de olika typerna av modellering. Den endimensionella modellen ger snabba svar på älvens utbredning vid olika flöden och kan användas för att utvärdera dynamiska förlopp. En tvådimensionell modell ger utöver detta en beskrivning av hastighetsfältet, vilket är viktigt för att utvärdera habitat eller identifiera problemområden för konnektivitet för olika arter av fisk. En tredimensionell modell kan användas för att detaljstudera delar av sträckan och till exempel undersöka de hydrauliska förhållandena nära botten.

För att säkerställa att modellerna fångar verkligheten så utfördes fältmätningar av ytnivåer och hastigheter. Både 1D- och 2D-modellen förutspår att lutningen på vattenytan är kraftig i uppströmsdelen av sträckan för att sedan vara relativt låg hela vägen ner till reservoaren vid kraftverket nedströms, medan uppmätta ytnivåer indikerar en mer jämn lutning över hela sträckan. Denna skillnad beror mest troligt på en diskrepans mellan terrängmodellen och den verkliga geometrin, men även osäkerheter i randvillkor, naturliga variationer i bottenrätet och noggrannhet av altitudbestämning kan bidra. De uppmätta hastigheterna visar däremot god kvalitativ överensstämmelse med 3D-modellen.

Resultaten tillämpades på relevanta miljöfrågor och den inneboende tåligheten mot snabba förändringar i stationsvattenföring undersöktes i 2D-modellen genom att simulera en snabb flödesökning och flödessänkning. En metodik togs fram för att utvärdera lämpliga lekområden för specifika fiskarter och metodiken tillämpades för att undersöka möjliga och föredragna lekområden för harr.

Inom projektet har rekommendationer på val av metodik beroende på frågeställning och lokala förutsättningar tagits fram. Genom att med denna metodik skapa en digital tvilling av en berörd älvsträcka, kan olika åtgärder prövas och utvärderas för att hitta en optimal balans mellan energi- och miljöintressen.

Summary

Digital methods for river modelling can be powerful tools for describing the hydraulic conditions in regulated watercourses. These conditions are of great interest for assessing, for example, the environmental impact of current and future production schemes for hydropower plants. Hydraulic modelling tools can be set up in different scales and with varying simplifications of reality. Here, models in 1D, 2D and 3D have been used to describe the flow conditions in the same regulated river reach, Akkats to Letsi in the Lule River, to evaluate the advantages

and disadvantages of the different types of modelling. The one-dimensional model provides quick answers to the river's spanwise distribution at different flows and can be used to evaluate dynamic processes. In addition, a two-dimensional model provides a description of the velocity field, which is important for describing habitats or identifying problem areas for connectivity for different species of fish. A three-dimensional model can be used to study parts of the reach in detail and, for example, examine the hydraulic conditions near the riverbed.

To ensure that the models capture reality, field measurements of surface levels and water velocities were performed. Both the 1D and 2D models predict that the slope of the water surface is steep in the upstream part of the section and then relatively low all the way down to the reservoir at the downstream power plant, while measured surface levels indicate a more even slope over the entire reach. This difference is most likely due to a discrepancy between the terrain model and the actual bathymetry, but uncertainties in boundary conditions, natural variations in bottom roughness and accuracy of altitude measurements can also be contributing factors. The measured velocities, however, show good qualitative agreement with the 3D model.

The results were applied to relevant environmental issues and the inherent resistance to rapid changes in station discharge was examined in the 2D model by simulating a fast flow increase and decrease. A methodology was developed to evaluate suitable spawning areas for specific fish species and the methodology was applied to investigate possible and preferred spawning areas for grayling. This project has thereby evaluated available digital tools for these applications and produced recommendations on the choice of methodology depending on the issue and local conditions. By creating a digital twin of the affected river reach in this way, various measures can be implemented and evaluated to find an optimal balance between energy and environmental interests.

Inledning/Bakgrund

För flertalet av Sveriges 16 miljömål spelar vattenkraften en viktig roll. För att begränsa klimatpåverkan har riksdagens beslutat att Sverige inte skall ha några nettoutsläpp av växthusgaser år 2045 med etappmål på vägen. Ett av dessa är att Sveriges elproduktion skall vara 100 % förnybar till 2040. Vattenkraftens roll i detta, att i olika tidsskalor balansera förbrukning med förnybar produktion, blir här allt mer viktig i takt med att mer kraft från sol och vind introduceras i elsystemet. Vattenkraftens roll framstår dock inte lika positiv i alla miljömål. För ett av de senaste tillskotten till miljömålen, biologisk mångfald, utgör vattenkraftverk och dess reglering ”idag ett av de främsta hoten mot den biologiska mångfalden” (citrat från miljomal.se av Sveriges miljömålsmyndigheter och länsstyrelser). För den svenska implementeringen av ramdirektivet är denna avvägning mellan miljö- och energiintressen tydlig på nationell nivå, bl.a. manifesterad i form av en nationell prövningsplan som är i uppstartsfasen. Havs- och Vattenmyndigheten och Energimyndigheten har också tillsammans kvantifierat gränsen för betydande negativ påverkan för produktionen av elenergi till 1,5 TWh/år. För de förestående omprövningar enligt miljöbalken som skall ge

alla vattenkraftverk moderna miljövillkor är det viktigt att underlaget för prövningen bygger på accepterade fakta och etablerade metoder. Tvärvetenskapliga överväganden måste därför göras och integreras med varandra.

En av de viktigaste komponenterna i detta är förståelsen och verktygen för hur ett vattendrag fungerar hydrauliskt. Hydrauliken hos ett vattendrag är dock bara en pusselbit i ett större systemperspektiv och måste anpassas till frågeställningar viktiga för biologi, produktionsanläggning, rekreativvärden, dammsäkerhet, sedimenttransport, erosion m.m. Det är därför viktigt att de hydrauliska verktygen anpassas till dessa. Det finns därför ett behov att belysa olika verktygs lämplighet anpassad till dessa frågeställningar, dess för- och nackdelar, möjligheter och begränsningar. Av speciell vikt är de dynamiska effekterna i ett vattendrag påverkat av reglering. Då dessa inte alltid är intuitiva och aldrig är generella behöver betydelsen tydligare belysas och lämpliga verktyg utprovas.

Hydrauliskt präglas naturliga vattendrag av stora volymflöden, komplex geometri (batymetri) som varierar beroende på geologiska/geomorfologiska förutsättningar, säsong- och väderberoende flöden samt en historisk egen modifiering av erosion och deposition i älven. Till detta kommer människans påverkan på vattendragets hydraulik i form av flottledsrensningar, introducerad dämning och flödesreglering vid kraftproduktion. Vid en omprövning av ett kraftverk är det viktigt att belysa effekten av regleringen för en viss vattenförekomst. Speciellt gäller detta för de delsträckor som bedöms ha stora naturvärden såväl i KMV som naturliga vattenförekomster. Dessa har ofta högre vattenhastigheter och med begränsad påverkan av dämning. Hur kraftverks flödesreglering påverkar dessa sträckor kräver en analys av dynamiken i vattendraget, d.v.s. hur bland annat hastighet, vattenytanivå och vattentemperatur förändras.

Beroende på avstånd till kraftverk och batymetri i vattendraget skapas en uttalad dämpning i den lokala responsen till en flödesförändring (se t ex Burman et al 2020). Vattendragets egen magasinering på sträckan från kraftverket fördröjer och jämnar ut flödesvariationer. Skadliga flöden för en biotop kan därför helt utebli om varaktigheten i flödet är anpassad till vattendragets hydrauliska respons. Hur stor denna tålighet är varierar förstås från biotop till biotop men kan vara signifikant i många fall. I andra är denna tålighet låg och kritiska förhållanden uppstår relativt snabbt efter flödesändringar. Alla vattendrag, oberoende av hydraulisk responstid, har dock en viss ”förlåtande” egenskap i den fria vattenytan. D.v.s. en flödesförändring (även långvarig) slår inte igenom 100 % på hastighet och djup, utan delas av dessa i betydligt lägre förändringar (30 % respektive 45 % för en typisk strömbiotop). I brist på etablerade utvärderingsmetoder och vana att beakta vattenförekomsternas dynamik och dess relativt oexploaterade möjligheter, finns det dock en risk att den inneboende tåligheten till flödesförändringar inte är del av beslutsunderlaget fullt ut. Just dynamiken är dock en viktig del att beakta i den avvägning som skall prövas vad gäller påverkan på naturvärden.

Den hydrauliska analysen är i sig en avvägning mellan verktygsval, ekologisk frågeställning, tillgängligt underlag och behov av noggrannhet i resultaten. Olika verktyg ger olika detaljerade svar. Underlaget (oftast batymetrin och nivådata för

hydrauliska frågeställningar) är ofta kostsamt att inhämta och har olika krav beroende på frågeställning. Kraven på noggrannhet kan ofta vara relativt måttliga om det handlar om restaureringsåtgärder som inte sällan görs av lokalt tillgängligt material, med lokala entreprenörer och under besvärliga förhållanden för maskiner och personal. Det finns därför också ett behov att tydliggöra olika verktygs tillämpbarhet, styrkor och svagheter i termer av intressanta parametrar för berörd vattenförekomst.

Korttidsreglering av vattenkraften och dess inverkan på miljön är intressant ur ett internationellt perspektiv. Det norska forskningscentret CEDREN (Centre for Environmental Design of Renewable Energies) har t ex drivit två projekt inom området: EnviPEAK och HydroPEAK, där EnviPEAK fokuserade på att hitta vilken miljöpåverkan en ökad korttidsreglering (hydropeaking) skulle ha på älvar medan HydroPEAK behandlade möjliga framtida scenarios, tekniska begränsningar och mitigerande effekter för hydropeaking.

I ett samarbete mellan Vattenfall R&D och LTU har en 1D digital modell av spillfåran i Stornorrfors i Umeälven tagits fram och validerats med mätningar från divers för både stationära flödesfall och flödesförändringar (Angele & Andersson, 2018). LTU har även tagit fram 2D-modeller av sammanflödet mellan floderna Fenghua och Yao i sydöstra Kina med fokus på att undersöka transporten av sediment (Xie et al 2018). Även 3D-modeller har använts flitigt, där bland annat digitala modeller av Stornorrfors i Ume älv, Sikfors i Pite älv samt delar av Lule älv simulerats och flödesbilderna har utvärderats ur en miljösynpunkt (se t ex Andersson et al 2012, Lundström et al 2015 och Burman et al 2021).

Fokuset på föregående studier har varit enskilda flödesfall och det mervärde som detta projekt bidrar med är de dynamiska effekter som uppstår vid flödesförändringar, att även belysa vikten av den inneboende dämpningen i den modellerade älvsträckan samt att hitta nya eller beprövade sätt att tillämpa resultaten på miljöeffekter. Med ett bättre underlag och mer kunskap inom området blir det enklare att ta fram effektiva miljöåtgärder där eventuella begränsningar i energi- och effektuttag verkligen ger optimal miljönytta.

Projektet har genomförts under perioden september 2019 till december 2021 som en del av Energimyndighetens program inom hållbar vattenkraft, HåVa, med målet att utvärdera de digitala verktyg som finns tillhanda för att modellera dynamiska effekter, tillämpa dem på miljöfrågor, exemplifiera nyttan och arbetsmetodiken, samt ta fram rekommendationer på val av metodik beroende på frågeställning och lokala förutsättningar.

Genomförande

Projektet har utförts på Avdelningen för strömningslära och experimentell mekanik vid Luleå tekniska universitet. Projektidén togs fram i samarbete med Patrik Andreasson, Vattenfall Research and Development, vid tillfället adjungerad professor på LTU, numera adjungerad på Institutionen för vilt, fiske och miljö på SLU. Modelleringsarbete och analys har utförts av Anders Andersson, som även

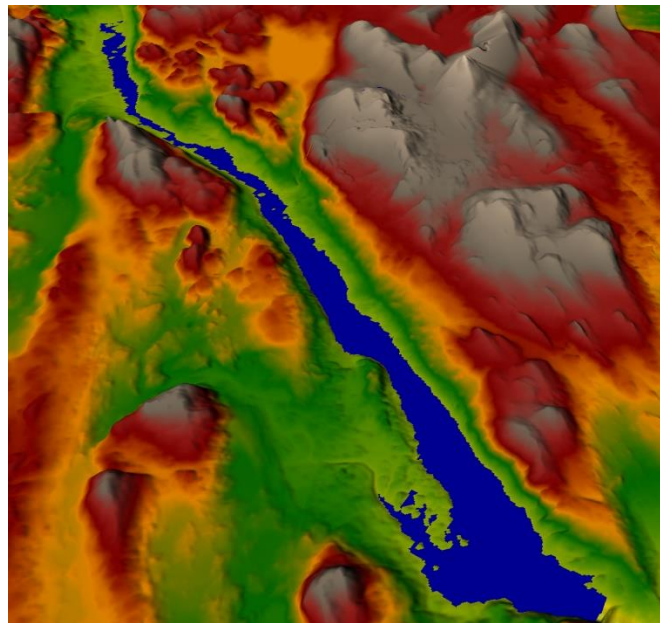
gjort fältmätningar tillsammans med Henrik Lycksam och med assistans av Anton Burman, samtliga vid Strömningslära.

Projektet kan delas upp i tre olika delar med specifika målsättningar enligt följande:

Delmål 1 - Utvärdering av olika digitala modelltekniker i en kontext av efterfrågat underlag och implementeringsmetod.

Inom delmål 1 har en digital modellering av älvsträckan från Akkats till Letsi i Luleälven modellerats. Modelleringen har skett i 1D, 2D och 3D för att visa på styrkor och svagheter hos de olika modellerna, i en kontext av behovet av kunskap för att bedöma tänkt åtgärd.

Modellerna baseras på en terrängmodell tillhandahållen av Vattenfall R&D där höjddata för terrängen hämtats från Lantmäteriet och kombinerats med batymetri för älven från gamla djupkartor, se Figur 1.



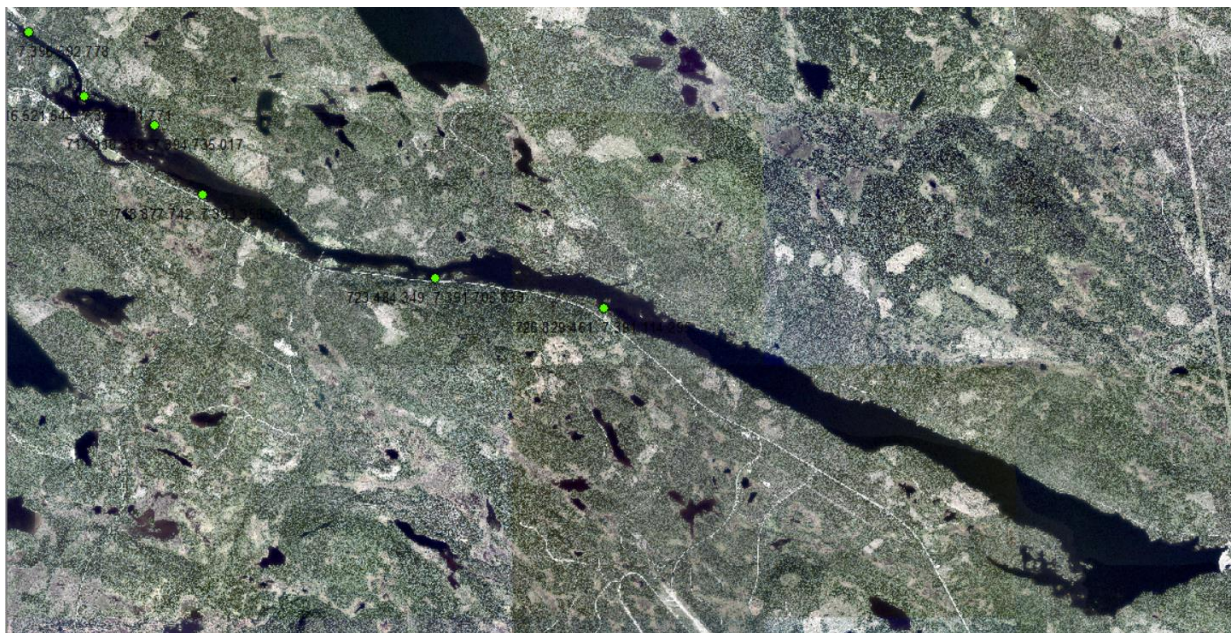
Figur 1. Överblicksbild över terrängmodell

För att bygga 1D-modellen så skapas tvärsnitt i geometrin med 50 m mellanrum längs hela sträckan från Akkats till Letsi i ArcGIS 10.7, där sedan den numeriska lösaren, i det här fallet HEC-RAS 5.07, beräknar ytnivån i varje tvärsnitt beroende på randvillkoren. Randvillkoret på inloppet var angivna flöden och på utloppet en bestämd reservoarnivå, vilken antogs vara konstant i samtliga körningar. För att beskriva ojämnheter i bottenstrukturen så används Mannings tal, vilket antogs vara konstant $n = 0,03$ i hela sträckan.

För 2D-modellen så importeras hela terrängmodellen till HEC-RAS där den sedan diskretiseras med ett beräkningsnät med 10×10 m celler, vilket gav ett beräkningsnät med totalt 311000 celler, där programvaran beräknar de hydrauliska parametrarna i varje cell.

En del av sträckan valdes ut för att simuleras i 3D i programvaran ANSYS CFX. Delsträckan kring Mattisudden ungefär mitt mellan kraftstationerna valdes ut då den ansågs ha potential för ökade miljövärden genom restaurering och från den delen av terrängmodellen skapades en volym som sedan diskretiserades till ett tredimensionellt beräkningsnät där de hydrauliska parametrarna beräknas i varje volymcell. För att fånga den oregelbundna formen på älvens botten används ett tetrahedralt beräkningsnät med 9,3 miljoner beräkningspunkter och 47 miljoner tetraelement. Modellen tog hänsyn till både luft och vatten genom en Volume of Fluid-formulering (VOF) med $k-\epsilon$ som turbulensmodell.

För att säkerställa att modellerna fångar verkligheten så har mätningar av vattennivåer och temperaturer i fält under perioderna juni-augusti 2020 och juli-september 2021 utförts med hjälp av så kallade ”divers” (tryck/temperatur loggar) av modell HOBO U20L från Onset Computer Corporation. Detta data användes sedan för att validera de olika modellerna och bedöma deras lämplighet. Loggrarna positionsbestämdes med en M-Tab RTK från L5 Navigation som även ger en höjddreferens och gavs namnen Diver1-Diver6 från uppströms till nedströms riktning, se Figur 2.



Figur 2. Positioner där loggar placerades 2021, Diver1-Diver6 från uppströms till nedströms (vänster till höger)

Även hastigheterna i älven mättes med en Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) av modell RiverPro monterad på en Z-Boat 1800 båda från Teledyne Marine, främst för att validera den mest avancerade 3D-modellen, se Figur 3.



Figur 3. Mätning av strömningshastigheter med ADCP (foto Henrik Lycksam)

Syftet med delmål 1 är att tydliggöra att val av verktyg är beroende på frågeställning och kan ses som ett komplement till kapitlet som beskriver hydrauliska modellverktyg i den svenska handboken för upp- och nedströmsvandring som utarbetats av SLU på uppdrag av Havs- och Vattenmyndigheten (Persson & Leonardsson 2020, Bilaga 5.6).

Delmål 2 – Utvärdera naturlig dämpning i vattendrag

Målet är här att tillämpa modellerna från delmål 1 såväl för att utarbeta en metodik för att analysera den ”inneboende tålighet” till flödesförändringar som alla vattendrag har (dock olika uttalat) samt att synliggöra detta som en viktig faktor att beakta i valet av åtgärd och nyttoavvägningen mot behovet av reglerande förmåga, dvs tydliggöra effekten av dynamisk respons i vattendrag till förändringar i flöde.

Delmål 3 – Tillämpa modellresultaten för att utvärdera miljöeffekter

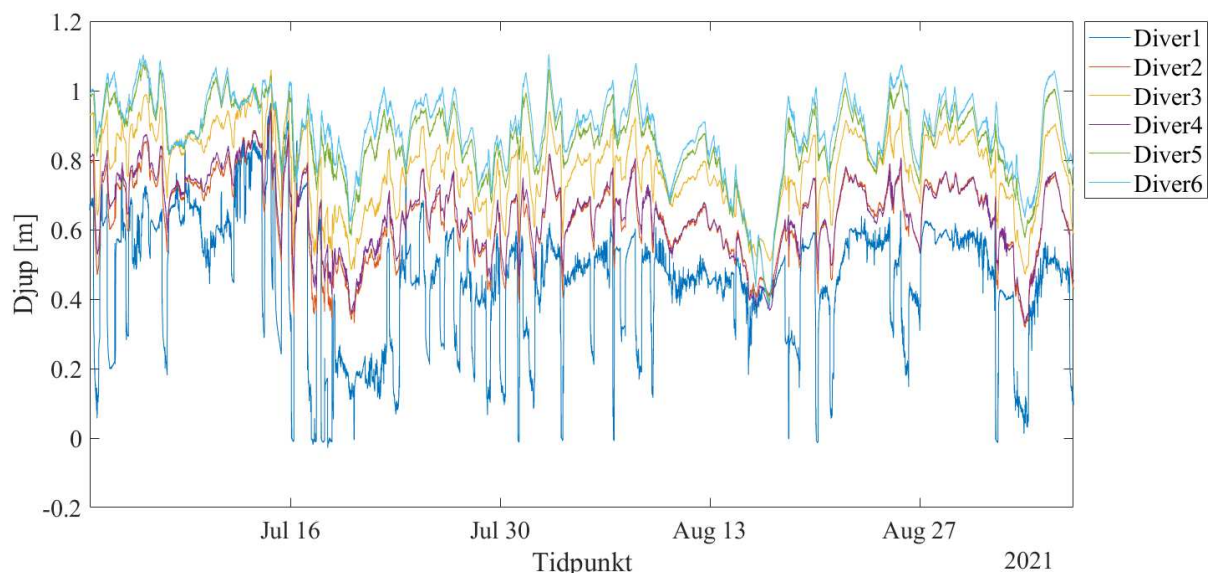
Delmål 3 tillämpar verktygen och resultaten från tidigare delmål för att illustrera hur dessa kan användas för att bedöma ett antal viktiga parametrar för intressanta målarter (t.ex. harr och lax). Artspecifika krav på djup och hastighet vid reproduktion hämtas från litteraturen och används i 2D-modellen för att hitta områden som uppfyller dessa krav.

Resultat

Resultaten från de olika typerna av modellering samt från fältmätningarna presenteras nedan.

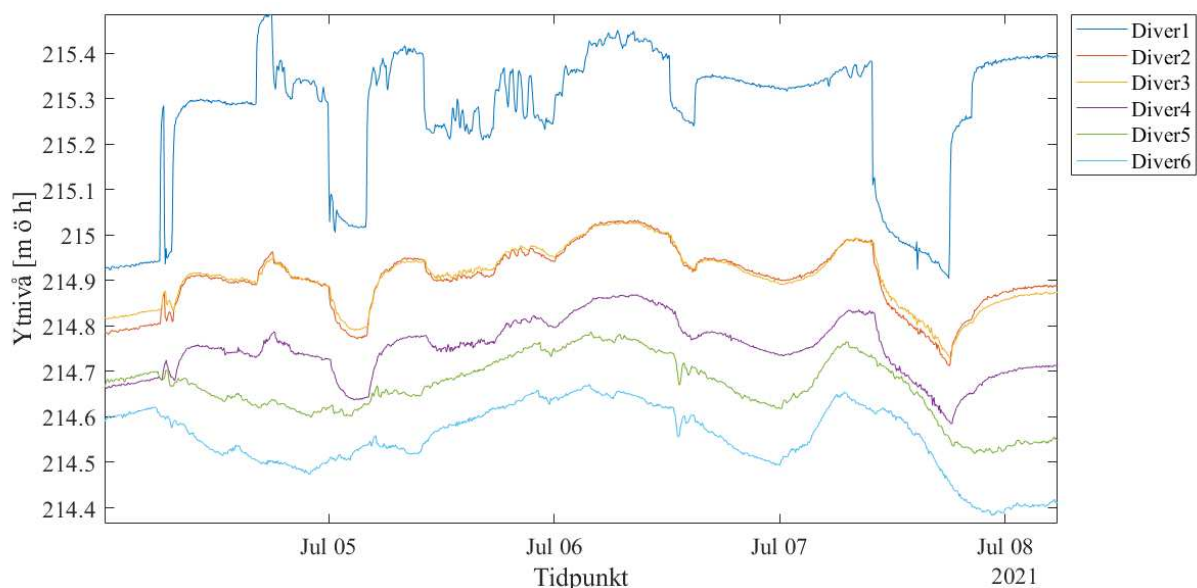
Nivåmätningar

Sex stycken loggrar placerades ut i älven vid lämpliga platser enligt Figur 2. Ytterligare en logger användes för att mäta lufttrycket vid Diver4 för att korrigera loggrarnas uppmätta absoluttryck och därmed ge bättre noggrannhet. De uppmätta trycken räknades om till djup för perioden från 2:a Juli till 6:e September 2021 och visas i Figur 4.



Figur 4. Uppmätta djup under sommaren 2021

Med hjälp av GPS så mättes dataloggrarnas position med god noggrannhet (centimeternivå i nordlig och östlig koordinat) och gavs en höjdreferens så att djupen kan beräknas om till en ytnivå uttryckt i meter över havsnivå (noggrannhet ± 1 dm) som sedan kan jämföras med beräknade ytnivåer, se Figur 5.

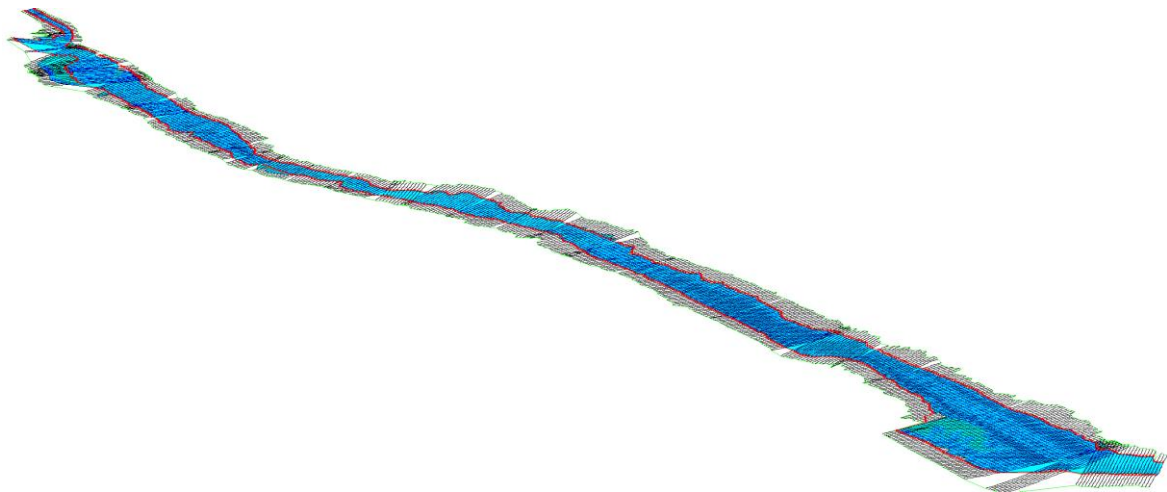


Figur 5. Ytnivåer i meter över havsnivå under de inledande dagarna av nivåmätningarna

De uppmätta nivåerna visar att den största skillnaden i ytnivå sker mellan Diver1 och Diver2 och att förändringarna i vattenytans nivå kan variera inom storleksordningen decimeter.

1D

Resultaten från 1D-modellen är av begränsat intresse för miljötillämpningar eftersom hastigheterna inte simuleras. Den stora fördelen är de korta beräkningstiderna vilket ger väldigt snabba svar. För ”steady-state”-beräkningar dvs, när endast ett konstant flödestillstånd undersöks ger modellen svar i form av djup och utbredning av älven inom några sekunder, se Figur 6 för resultaten från en simulering vid ett flöde av 250 m³/s som är ett vanligt förekommande flöde under sommarsäsongen.

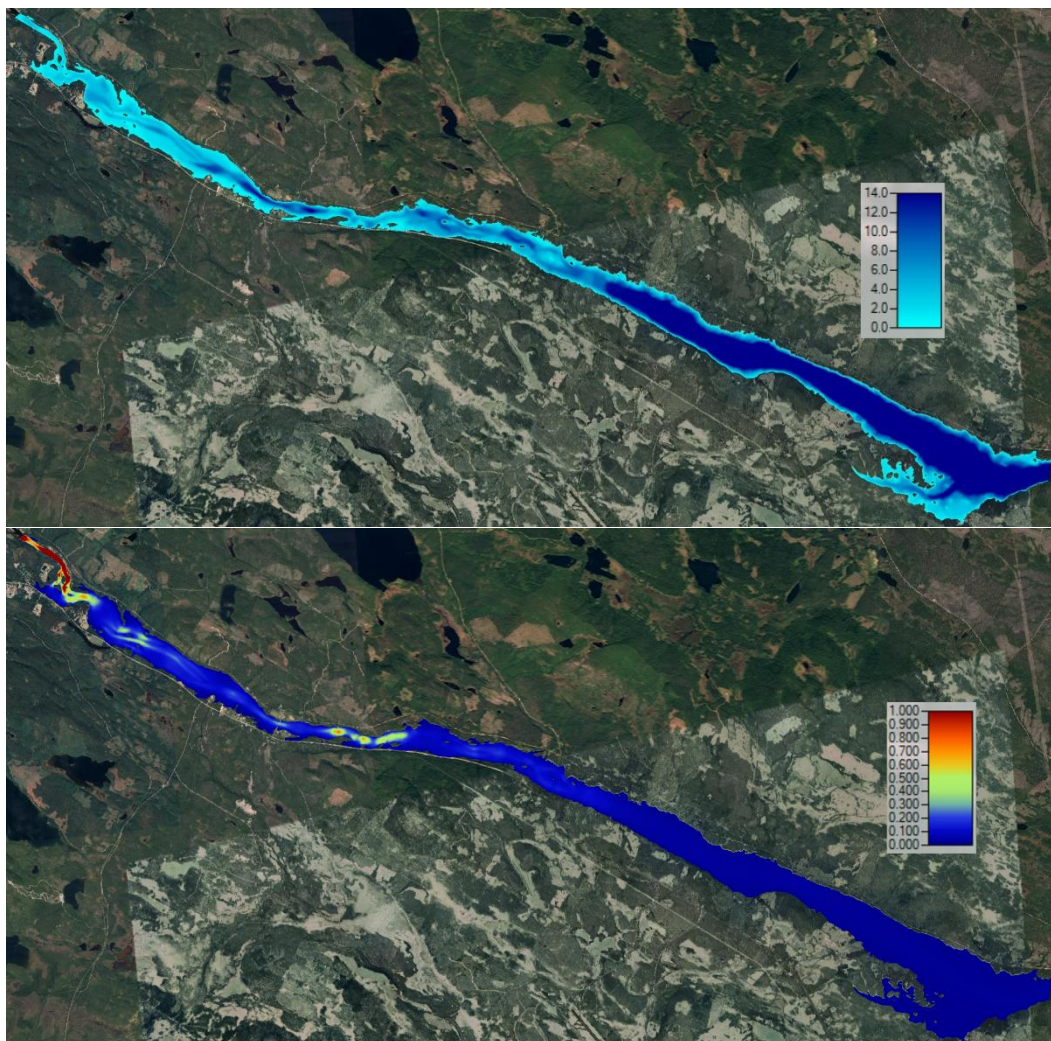


Figur 6. Simulerade ytnivåer från en 1D-simulering med ett konstant flöde av 250 m³/s

För transienta simuleringar, dvs när flödesförhållandena ändras med tiden introduceras numeriska känsligheter för parametrar som tidssteg, avstånd mellan tvärsnitt och tidsserier för randvillkor vilket ger onaturliga fluktuationer i resultaten för flöden och vattennivåer. Om modellens stabilitet garanteras så kan 1D-modellen även användas för att undersöka ett par ytterligare resultat så som hur dämpningen av flödesförändringar förändras med tid och avstånd från kraftverk samt bedöma strandningsrisk för fisk i olika livsstadier. Bedömningen här är dock att tiden det tar att garantera stabiliteten i en 1D-modell bättre används till att skapa en 2D-modell som utöver detta även ger andra viktiga parametrar.

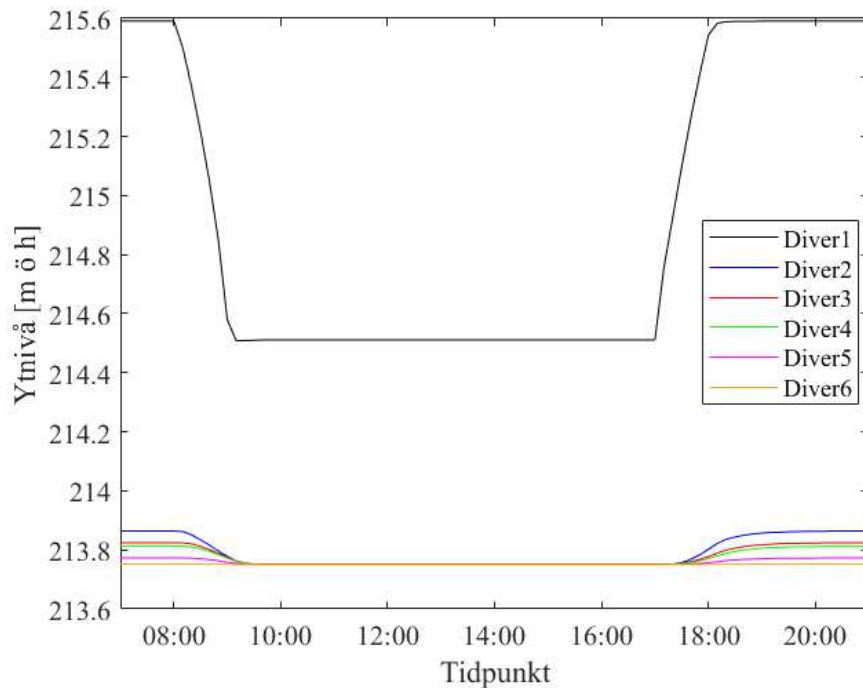
2D

Utöver nivåer och flöden så ger 2D-modellen även djupmedelvärderade hastigheter vilka kan användas för att utvärdera miljöeffekter. Figur 7 visar beräknade djup och hastigheter vid ett flöde av 250 m³/s från Akkats kraftstation.



Figur 7. Beräknade djup och hastigheter vid ett flöde av $250 \text{ m}^3/\text{s}$

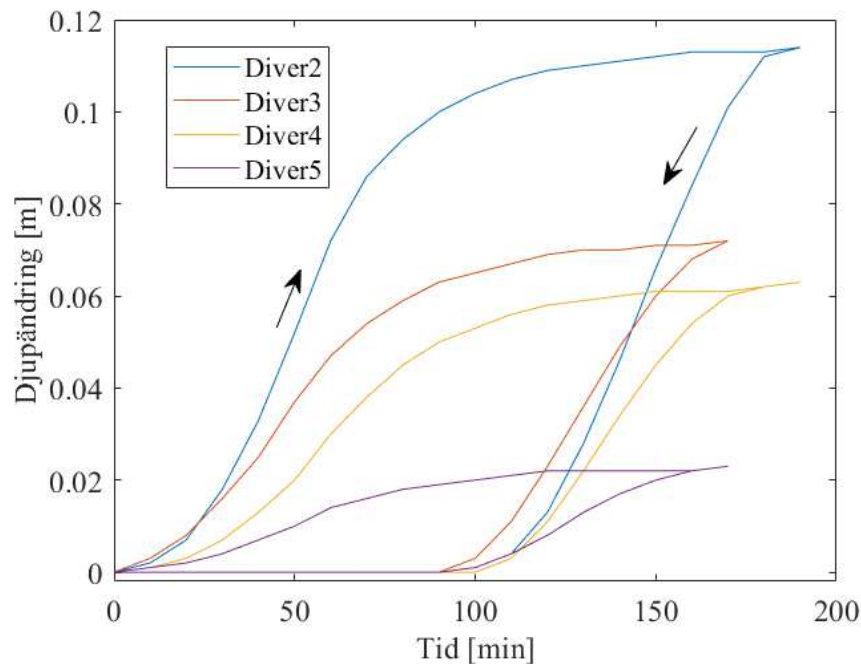
Även transienta effekter undersöktes i 2D-modellen. Det dynamiska förloppet i älven när flödet gick från $250 \text{ m}^3/\text{s}$ till $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (nolltappning simulerades ej p g a risk för numeriska instabilitet) och sedan tillbaka till ursprungsflödet simulerades. Flödena hölls konstanta i åtta timmar för att säkerställa att stabila förhållanden uppnåtts och flödesökningen respektive minskningen antogs ske linjärt över en timme. Figur 8 visar hur de simulerade ytnivåerna ändrades vid positioner motsvarande Diver1-6.



Figur 8. Simulerade förändringar i ytnivå vid samma positioner som Diver1-6 för en flödesändring från 250 m³/s till 10 m³/s och tillbaka till 250 m³/s

Simuleringarna visar att nivåändringen från Diver1 till Diver2 är större än 1,5 m vid det högre flödet och 0,7 m vid det låga flödet, vilket kan jämföras med Figur 5 där skillnaden i nivå är betydligt mindre. Även 1D-modellen visar liknande skillnader, vilket innebär att modellen ger mer forslänkande förutsättningar i uppströmsdelen och mer uniforma förhållanden från Diver2 och nedströms, medan mätningarna indikerar en mer jämn förändring av nivåer över hela sträckan. En trolig anledning till detta kan vara skillnader mellan terrängmodellen och den verkliga batymetrin. Andra bidragande orsaker kan vara skillnader i randvillkor mellan modellen och de verkliga förutsättningarna, naturliga variationer i bottenråhet och noggrannhet av altitudbestämning med GPS. Detta har en påverkan på dämpningen av flödesförändringar i sträckan, där skillnader mest troligt underskattas eftersom en stor del av nivåförändringen sker så tidigt i modellen.

Ett sätt att beskriva hur mycket flödesförändringar dämpas är att titta på ett hysteresisdiagram som visar hur en flödesökning och en flödessänkning tillbaka till ursprungsflödet påverkar vattenytans nivå på olika positioner i älven, se Figur 9.



Figur 9. Simulerade förändringar i djup vid samma positioner som Diver2-5 för en flödesändring från 10 m³/s till 250 m³/s och tillbaka till 10 m³/s

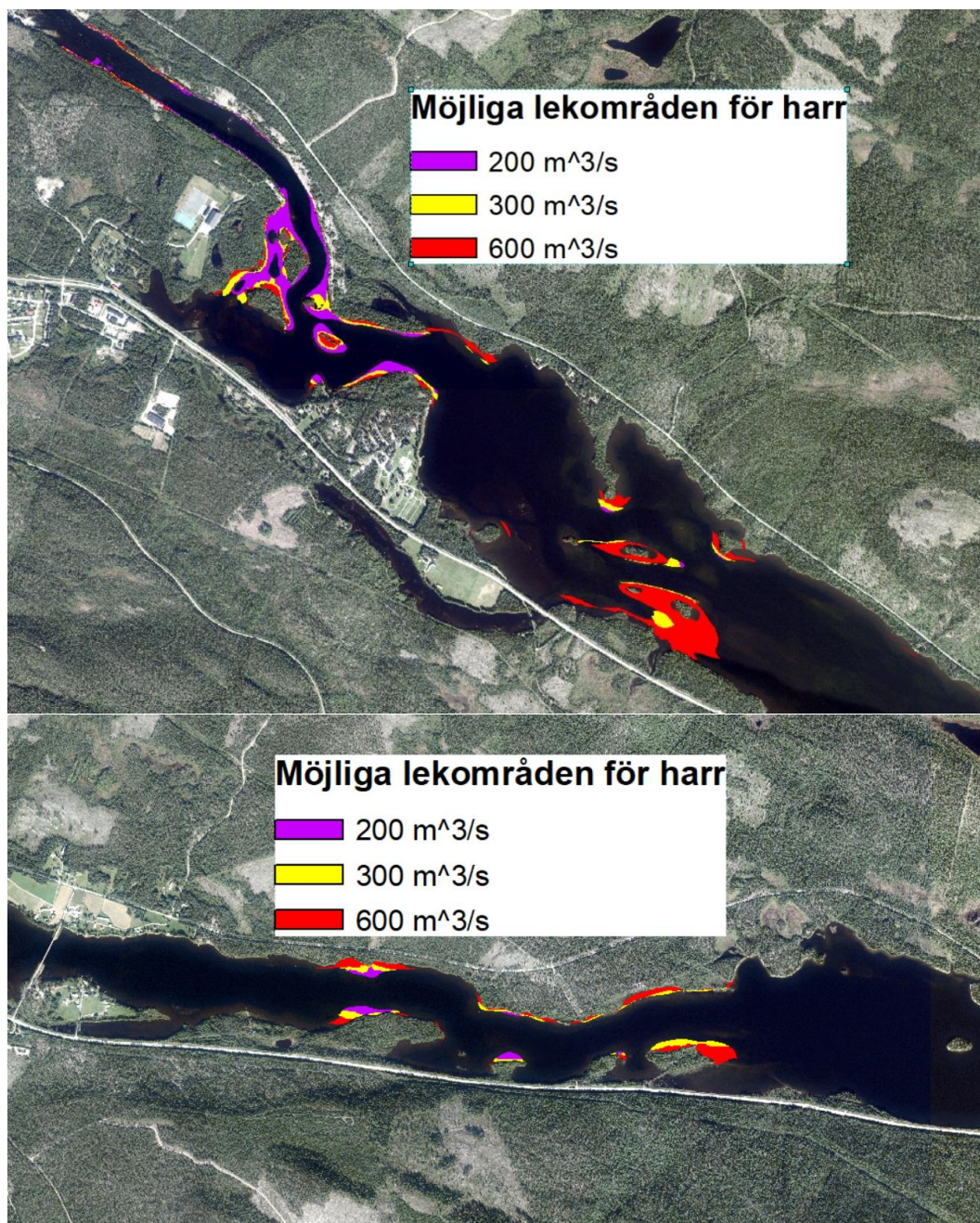
Nivåändringen blir mindre desto närmare reservoaren man kommer, men tiden det tar innan maxvärdet är uppnått är ungefär densamma vid alla punkter. Den naturliga dämpningen kan påverka både amplituden av förändringen och göra att den blir utdragen i tid med ökat avstånd från det övre kraftverket (Burman et al 2020), anledningen att det inte blir någon tydlig utdragningsseffekt i det här fallet kan vara modellens överskattning av fallhöjd i uppströmsdelen. Det är även svårt att använda de uppmätta nivåerna för att uppskatta hur stor den verkliga dämpningseffekten blir eftersom både inflöde och reservoarnivå förändras kontinuerligt.

De simulerade värdena kan även tillämpas för att utvärdera var det finns bra hydrauliska förutsättningar för lekomyråden av olika fiskarter. Gränsvärden för viktiga parametrar för olika arter av fisk går att hitta i litteraturen. För harr som är en art av intresse för den modellerade sträckan visas möjliga och rekommenderade värden för lekomyråden i Tabell 1.

Tabell 1. Uppmätt data på hydrauliska parametrars värden för lekomyråden för harr (Gönczi 1989)

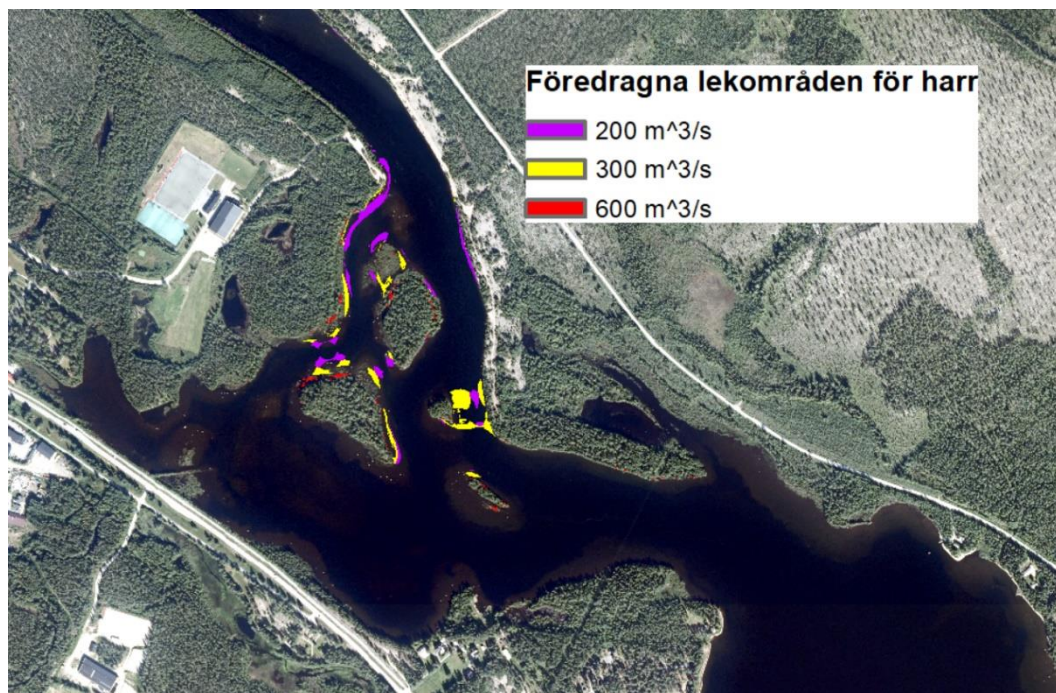
	Djup [m]	Hastighet [m/s]	Bottensubstrat [m]
Möjligt spann	0,3 - 1,1	0,2 - 0,9	0,02 - 0,64
Föredraget spann	0,3 - 0,5	0,4 - 0,7	0,08 - 0,32

En metodik för att utvärdera var modellen förutspår en lämplig kombination av både djup och hastighet togs fram. Modellen innehåller ingen information om bottensubstrat, så resultaten kan främst ses som en indikation på bästa möjliga scenario, samt var undersökningar av bottenstrukturen bör utföras. Två områden identifierades där stora delar har både djup och hastigheter som ligger i det möjliga spannet, ett i uppströmsdelen av modellen och ett strax nedströms Mattisudden. Resultaten för tre olika flöden för dessa områden visas i Figur 10.



Figur 10. Områden där både djup och hastighet hamnar inom det möjliga spannet för ett flöde av 200, 300 och 600 m³/s

Med det snävare spannet som föredras av harr så försvinner hela området nedströms Mattisudden och enbart ett mindre område nära Akkats återstår, se Figur 11.

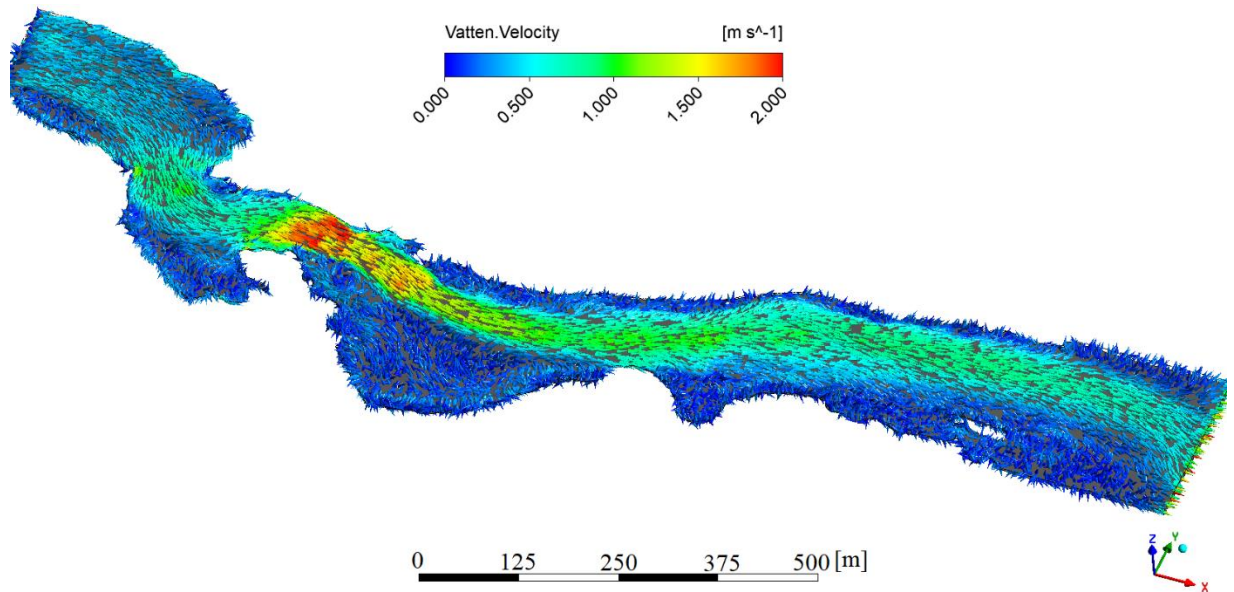


Figur 11. Områden där både djup och hastighet hamnar inom det föredragna spannet för ett flöde av 200, 300 och 600 m³/s

Eftersom modellen verkar underskatta djupen från Diver2 och nedströms så blir osäkerheten större i positioneringen och storleken på lekogränderna för den delen av älvsträckan.

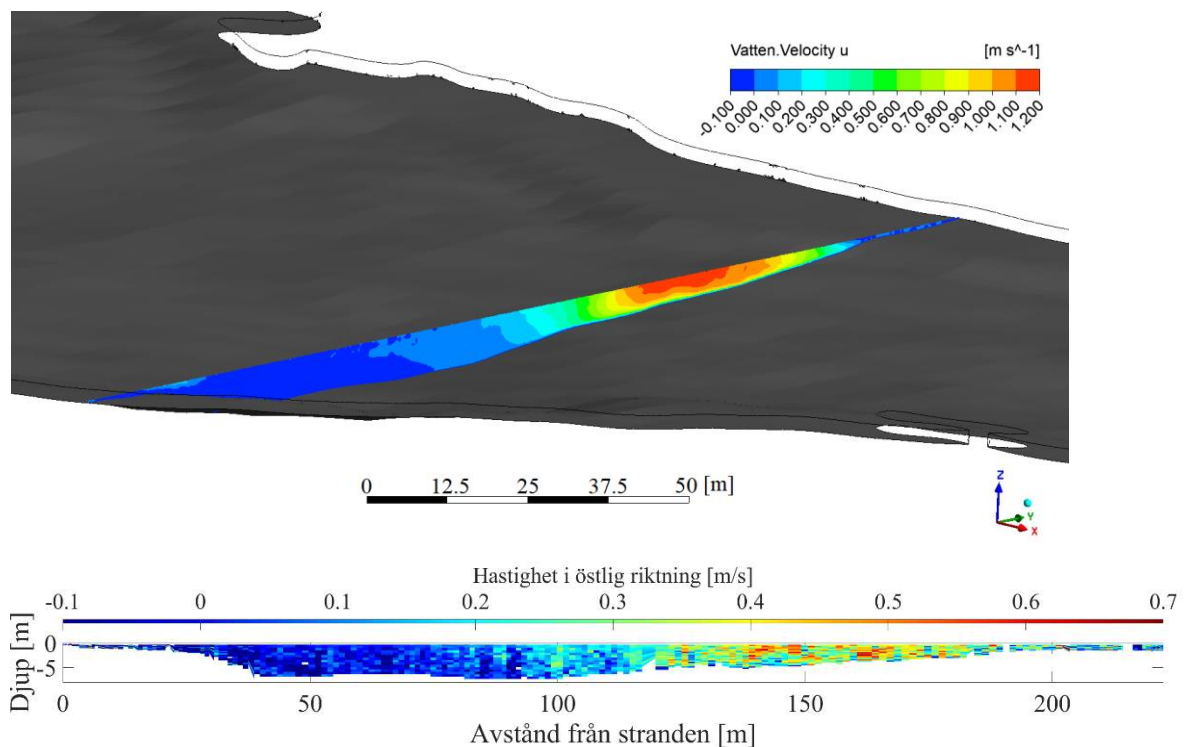
3D

Området kring Mattisudden simulerades i 3D-modellen. Figur 12 visar hastigheterna vid vattenytan, där mörkblå områden visar stillastående vatten och strömfåran syns i ljusblå-röda färger.



Figur 12. Vektorplot av hastigheten vid vattenytan vid ett flöde av 200 m³/s

En av fördelarna gentemot 2D-modellen är att hastighetsfördelningen i vertikalled löses upp. Figur 13 visar en jämförelse mellan simulerade och uppmätta hastigheter i ett tvärsnitt nära mitten av 3D-modellen. Mätningarna utfördes vid ett lägre flöde (ungefär vid 100 m³/s) än det simulerade (200 m³/s), så värdena går inte att jämföra kvantitativt, men den kvalitativa överensstämmelsen stämmer väl överens.



Figur 13. Simulerade och uppmätta hastigheter i östlig riktning i ett tvärsnitt nedströms Mattisudden

Tillämpningar där en 3D-modell är av intresse är sådana där hastigheter och skjuvspänningar närmast botten är viktiga till exempel levnadsförhållanden för bottenfauna. Även tillämpningar där tredimensionella effekter kan ha en stor betydelse t ex lockvatten för uppströmsvandrande fiskar eller ledning av nedströmsvandrande smolt simuleras med fördel i den här typen av modeller.

Diskussion

Resultaten visar att de hydrauliska modelleringsverktygen kan användas för att utvärdera miljöpåverkan för både enskilda flödesfall och för dynamiska förlopp. Den endimensionella modellen kan ge snabba svar, men är av begränsat intresse för miljötillämpningar. Modellen som beskriver älvsträckan i två dimensioner kan användas för att undersöka dynamiken i sträckan, utvärdera miljöeffekter samt att hitta områden där mer detaljerad analys i 3D bör utföras. Den tredimensionella modellen kan sedan användas för tillämpningar där hastighetsfördelningen i djupled är intressant, t ex för bottenfauna eller för att simulera lockvatten för fisk. Resultaten belyser även vikten av att underlagen är av hög kvalitet samt nödvändigheten av att använda fältdata för validering. En väl genomförd validering ökar trovärdigheten av modellresultaten och kan ge en bättre bild av var modellen fungerar väl och var i modellen man bör vara försiktig med att dra för stora slutsatser.

Den framtagna metodiken för modellval och utvärderingar av miljöeffekter kan till exempel användas vid prövningar av miljödömmar, för att utvärdera nya körscheman för kraftverk t ex med större krav på reglerförmåga eller att undersöka troliga framtida miljöeffekter från klimatförändringar.

Delar av den undersökta sträckan finns idag uppmätta med laserscanning och ett intressant framtida spår hade varit att med ny geometri tillsammans med mätdata med högre precision i höjddimensioneringen undersöka om det gick att fånga dynamiska förlopp med högre noggrannhet. Det finns även osäkerheter i hur väl de framtagna spannen för olika fiskarter faktiskt beskriver förutsättningarna för lekområden. Framtida projekt där mer avancerade tekniker för hastighetsmätning och djupkartering används och ett större urval av älvar undersöks skulle öka trovärdigheten och t ex kunna producera olika relevanta spann för olika typer av älvar. Det hade även varit intressant att inkludera uppmätta värden på bottenstruktur och/eller kontinuerliga mätningar av till exempel nivåer direkt i modellerna.

Ett annat framtida spår kunde vara att köra kopplade 2D-3D-modeller där majoriteten av sträckan simuleras i 2D men delområden av större intresse modelleras i 3D i samma modell. För tillämpningar där lokala variationer i strömningsbilden är viktiga hade det även varit intressant att testa mer avancerade numeriska modeller i 3D, till exempel en Large Eddy Simulation (LES) istället för simuleringar med enklare turbulensmodeller.

En ytterligare möjlighet för framtida arbete är att utveckla modelleringsverktyg med integrerad modellering av fiskpopulationer och bottenfauna för en mer direkt bedömning av effektiviteten av åtgärder på t.ex. reproduktion, säsongsvandring

och konnektivitet. Ett sådant arbete måste dock göras i nära samarbete med biologiska kompetensgrupper. Värdeskapandet av ett sådant projekt bör bli en effektiv och enhetlig värdering av vattendrags respons till olika produktionsmönster och restaureringsåtgärder. Effektivare åtgärder kan med detta åstadkommas, med optimala miljövärden till minimala begränsningar i produktion och effektuttag.

Publikationslista

Resultaten från delmål 1 och delmål 2 kommer att publiceras i en tidskrift med koppling till vattenbyggnadshydraulik eller hydraulisk modellering under 2022. Resultaten från delmål 3 kommer att presenteras på IAHR:s kongress med temat "From Snow to Sea" i Granada, Spanien, i juni 2022.

Andersson, A.G., & Lycksam, H., Hydraulic modelling of a regulated river reach on different scales to evaluate its inherent environmental conditions, *Accepted to 39th IAHR World Congress 2022, 19 - 24 June, Granada, Spain*.

Andersson, A.G., & Lycksam, H., Investigating inherent damping in regulated rivers using hydraulic modelling on different scales. *Manuscript 2022*.

Referenser, källor

Andersson, A. G., Lindberg, D-E., Lindmark, E., Leonardsson, K., Andreasson, P., Lundqvist, H. & Lundström, T. S. (2012). A study of the location of the entrance of a fishway in a regulated river with CFD and ADCP. *Modelling and Simulation in Engineering*.

Angele, K., & Andersson, A. G. (2018). Validation of a HEC-RAS Model of the Stornorrfors Fish Migration Dry Reach against New Field Data. *In Proceedings of the 12th International Symposium on Ecohydraulics, Tokyo, Japan (pp. 19-24)*.

Burman, A. J., Andersson, A. G., Hellström, J. G. I., & Angele, K. (2020). Case Study of Transient Dynamics in a Bypass Reach. *Water, 12(6), 1585*.

Burman, A. J., Hedger, R. D., Hellström, J. G. I., Andersson, A. G., & Sundt-Hansen, L. E. (2021). Modelling the downstream longitudinal effects of frequent hydropeaking on the spawning potential and stranding susceptibility of salmonids. *Science of the Total Environment, 796, 148999*.

Gönczi, A. P. (1989). A study of physical parameters at the spawning sites of the European grayling (*Thymallus thymallus* L.). *Regulated Rivers: Research & Management, 3(1), 221-224*.

Lundström, T. S., Brynjell-Rahkola, M., Ljung, A. L., Hellström, J. G. I., & Green, T. M. (2015). Evaluation of Guiding Device for Downstream Fish Migration with in-Field Particle Tracking Velocimetry and CFD. *Journal of Applied Fluid Mechanics, 8(3)*.

Persson, L., & Leonardsson, K. (2020). Utformning och uppföljning av fiskpassagelösningar. *Underlagsrapport till Havs- och vattenmyndighetens webbvägledning*

Xie, Q., Yang, J., Lundström, S., & Dai, W. (2018). Understanding morphodynamic changes of a tidal river confluence through field measurements and numerical modeling. *Water*, 10(10), 1424.

Bilagor

Bilaga 1. Administrativ bilaga

Bilaga 2. Abstract till IAHR World Congress konferensbidrag.